

Bartłomiej Igliński  
Roman Buczkowski  
Marcin Cichosz

# TECHNOLOGIE bioenergetyczne

monografia



WYDAWNICTWO NAUKOWE  
UNIWERSYTETU MIKOŁAJA KOPERNIKA  
Toruń 2009

Recenzent  
**Barbara Dejevska**

Projekt okładki  
**Marcin Cichosz**

Redakcja  
**Zespół Autorski**  
**(Bartłomiej Igliński, Roman Buczkowski, Marcin Cichosz)**

Druk Materiałów dofinansowano ze środków  
Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Toruniu

Printed in Poland  
© Copyright by Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika  
Toruń 2009

ISBN 978-83-231-xxx-x

WYDAWNICTWO NAUKOWE  
UNIwersytetu MIKOŁAJA KOPERNIKA  
Redakcja: ul. Gagarina 5, 87-100 Toruń  
tel. (056) 611 42 95, fax (056) 611 47 05  
e-mail: [dwyd@umk.pl](mailto:dwyd@umk.pl)  
Dystrybucja: ul. Reja 25, 87-100 Toruń  
tel./fax: (056) 611 42 38, e-mail: [books@umk.pl](mailto:books@umk.pl)

**[www.wydawnictwoumk.pl](http://www.wydawnictwoumk.pl)**

Wydanie pierwsze, nakład 300 egz.  
Druk: Drukarnia Cyfrowa UMK

# SPIS TREŚCI

<b>Słowo wstępne</b> .....	7
<b>Wprowadzenie</b> .....	9
<b>Biomasa – definicje, powstawanie, podział, potencjał</b> .....	17
Biomasa jako źródło energii pierwotnej.....	17
Fotosynteza C-3 .....	18
Fotosynteza C-4 .....	19
Biomasa na cele energetyczne .....	20
Zasoby biomasy.....	26
Biomasa jako ekopaliwo .....	32
<b>Charakterystyka drewna i słomy jako paliwa</b> .....	36
Drewno .....	36
Pozyskiwanie drewna odpadowego .....	37
Słoma.....	44
<b>Plantacje roślin energetycznych z przeznaczeniem na biomasę</b> .....	52
Warunki klimatyczno-glebowe uprawy roślin energetycznych w Polsce.....	52
Przegląd roślin energetycznych z przeznaczeniem na biomasę.....	55
Przykłady plantacji w Polsce .....	82
<b>Aglomeryzacja biomasy – brykiety, pelety</b> .....	88
Charakterystyka i scalanie materiałów drobnoziarnistych .....	88
Prasy do peletyzacji i brykietowania.....	91
Brykiety z biomasy.....	94
Pelety z biomasy.....	98
Wytwarzanie i badanie brykietów z węgla i biomasy.....	101
Rynek peletów w UE i w Polsce .....	104
<b>Spalanie biomasy</b> .....	107
Spalanie drewna .....	107
Spalanie słomy .....	112
Badania nad spalaniem biomasy.....	116
Przykłady spalania biomasy w Polsce .....	129
<b>Współspalanie biomasy</b> .....	142
Współspalanie odpadów.....	142
Przygotowanie biomasy i paliwa do komory paleniskowej .....	143
Kotły rusztowe.....	145
Kotły pyłowe .....	148

Kotły fluidalne .....	149
Problemy podczas współspalania węgla i paliwa z odpadów .....	160
<b>Zgazowanie, piroliza biomasy</b> .....	171
Zgazowanie biomasy .....	171
Piroliza biomasy .....	177
Biowodór .....	185
Ogniwa paliwowe .....	189
<b>Paliwa alkoholowe i eterowe (silniki iskrowe)</b> .....	196
Bioetanol .....	198
Fermentacja alkoholowa .....	202
Biometanol .....	211
Bio-etry .....	212
Biopaliwa alkoholowe w Polsce .....	213
<b>Oleje roślinne, biodiesel</b> .....	217
Rośliny oleiste .....	218
Otrzymywanie oleju .....	224
Wytwarzanie estrów .....	226
Zagospodarowanie gliceryny .....	234
Wykorzystanie alg do produkcji biodiesla .....	235
<b>Wpływ biopaliw na silniki i emisję zanieczyszczeń</b> .....	244
Biopaliwa a ochrona środowiska .....	250
<b>Pozyskiwanie i wzbogacanie biogazu</b> .....	255
Rola i znaczenie fermentacji metanowej w przyrodzie .....	256
Zastosowanie fermentacji metanowej .....	259
Fermentacja metanowa i techniki oczyszczania biogazu .....	269
Degradacja biomasy w obecności nieorganicznych akceptorów ..	270
Rola jonów octanowych i wodoru cząsteczkowego .....	272
Konwersja biopolimerów do metanu i tlenku węgla(IV) .....	274
Rozkład węglowodanów .....	274
Rozkład białek .....	278
Rozkład lipidów .....	281
Techniki oczyszczania biogazu .....	282
Technika membranowa .....	283
Technika absorpcji fizycznej .....	285
Technika absorpcji chemicznej .....	287
Technika adsorpcyjna .....	290
<b>Bioenergia z odpadów</b> .....	299
Spalarnie odpadów komunalnych .....	299
<b>Ankiety – opis</b> .....	308
<b>Załącznik 1</b> .....	314
<b>Załącznik 2</b> .....	316

## SŁOWO WSTĘPNE

Z satysfakcją przekazujemy Państwu opracowanie monograficzne pt.: „Technologie bioenergetyczne”. Myślą przewodnią naszego przedsięwzięcia jest przedstawienie aktualnych informacji na temat produkcji, przetwarzania oraz wykorzystania energii odnawialnej, jaką jest energia z biomasy w Polsce i na świecie.

W tym celu przygotowaliśmy i wysłaliśmy niemal 400 ankiet do wytwórców bioenergii w Polsce.

Wszystkim respondentom, którzy odpowiedzieli na nasze ankiety składamy serdeczne podziękowania. Pragniemy również skierować podziękowania do Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Toruniu oraz Dziekana Wydziału Chemii UMK, którzy udzielili pomocy finansowej oraz jednostkom administracji państwowej, stowarzyszeniom oraz przedstawicielom rolnictwa i przemysłu, którzy przekazali nam informacje niezbędne podczas przygotowania opracowania.

W naszej ocenie, opublikowany materiał w przeważającym stopniu ma charakter faktograficzny, a przytoczone rozwiązania proekologiczne z całą pewnością wymagałyby pełniejszej analizy technicznej. Licząc zatem na życzliwe przyjęcie przekazanego Państwu opracowania, wyrażamy pełne przekonanie, iż następna edycja monografii poświęconej energii alternatywnej pozwoli nam zamieścić kolejne przykłady wdrażanych instalacji w Polsce i na świecie.

*Autorzy*



## WPROWADZENIE

Energia jest wykorzystywana przez człowieka od zarania dziejów [1, 2]. Dzięki badaniom plemion na Nowej Gwinei w Afryce i Ameryce Południowej oszacowano dobowe zużycie energii na około 4000 kJ na mieszkańca, potrzebne do przygotowania gotowanej stawy dla niewielkiej rodziny. Odpowiada ono 0,1 kg ropy naftowej lub 0,5 kg drewna. Zużycie energii wzrastało systematycznie wraz z rozwojem rolnictwa i udoskonalaniem narzędzi. Ocenia się, że społeczeństwa rolnicze, wypiekające pieczywo zużywały już około 20 MJ na mieszkańca w ciągu jednej doby [3].

W starożytności, gdy pojawiła się metalurgia (wyroby z miedzi, brązu i żelaza), dobowe zużycie energii wzrosło do 40 do 60 MJ na mieszkańca. Oprócz przygotowania coraz bardziej wyszukanych potraw stosowano już podgrzewanie wody dla celów sanitarnych i ogrzewania pomieszczeń, nie mówiąc już o konsumpcji energii w różnych gałęziach przemysłu, takich jak tkactwo, farbiarstwo, produkcja broni, narzędzi itd. [3].

Poziom zużycia energii wzrósł znacząco w starożytnym Rzymie i kształtował się od 80 do 100 MJ na mieszkańca w ciągu doby i bardzo się różnił w różnych regionach świata. Ówczesny człowiek korzystał głównie z energii pochodzącej ze spalania biomasy (drewno, torf, darni, itp.), eksploatując również z inne odnawialne źródła energii. Energia słoneczna wykorzystywana była od początków naszej cywilizacji, gdyż konwersja jej w ciepło nie wymagała urządzeń mechanicznych. Początkowo ludy pierwotne wykorzystywały ją do suszenia mięsa, ryb, skór, drewna, cegieł, jak również do ogrzewania pomieszczeń (systemy pasywne) [4, 5]. Archimedes, w 212 r. p.n.e., skonstruował urządzenie wojenne, które posiadało system luster skupiający promienie słoneczne. Dzięki niemu udało się pod Syrakuzami spalić flotę nieprzyjacielskich okrętów [6]. Kolejnym przykładem wykorzystania energii Słońca są szklarnie, które po raz pierwszy stosowane były w czasach rzymskich do całorocznej produkcji ogórków dla rzymskiego cesarza Tiberiusa [7].

Energia wiatru wykorzystywana była głównie do suszenia i w żeglarskim. W hinduskiej księdze Arthasatha of Kantilya (400 r. p.n.e.) znajduje się opis wiatraka wykorzystywanego do pompowania wody. W pismach Herona z Aleksandrii (I wiek n.e.) zamieszczone są szkice wiatraków napędzających organy wodne (do

transportu wody). Pod koniec pierwszego tysiąclecia urządzenia te budowane są w Persji, Chinach i Babilonii, a w Europie pojawiły się około IX w. [8, 9].

Od 1700 roku p.n.e w Babilonii zaczęto wykorzystywać energię spadku wody, zaś rozkwit młynów wodnych nastąpił w średniowieczu. Na ziemiach polskich już w XI w. młyny wodne były częstym widokiem. Koła wodne poza młynarstwem znajdowały stopniowo zastosowanie w tartakach, garbarniach, olejarniach, a także w hutnictwie i innych rodzajach przemysłu. W dokumentach, jakie przechowały się z XI i XII wieku, opisy młynów są często spotykane. W 1149 r. Pakosław buduje młyn w Dobrej. Przywilej z 1258 r., nadany przez Bolesława Wstydliwego, zezwala stawiać młyny po obu stronach Nidy [7, 10, 11]. Przykładem wykorzystania energii wodnej w owych czasach może być Potok Jelitkowski (Gdańsk-Oliwa). W XVI w. nad tym potokiem pracowało 20 zakładów przemysłowych: 11 kuźnic, 3 młyny zbożowe, 2 papiernie, fabryka sukna, młyn kory dębowej, kuźnica miedzi i rusznikarnia [12].

Od tysięcy lat w wielu rejonach globu wykorzystywana jest energia geotermalna. Rdzenni mieszkańcy obu Ameryk eksploatowali źródła geotermalne już przeszło 10 000 lat temu, używając gorącej wody do gotowania i w celach leczniczych. Starożytni Grecy wykorzystywali gorące źródła w Pamukkale (dziś Turcja), zaś Rzymianie w Abano Terme i Baden. Do dziś zachowały się liczne opisy gorących źródeł, które ogrzewały domy w antycznych Pompejach. W Polsce tysiąc lat temu wykorzystywano zasoby geotermalne Sudetów (Cierpice, Łądek-Zdrój) [13–15].

W XIX wieku wzrosło znaczenie węgla jako nośnika energii, zaś w XX wieku ropy naftowej i gazu ziemnego [16, 17]. Paliwa kopalne wydobywane na ogromną skalę przez duże konsorcja zaczęły wypierać źródła energii odnawialnej. Można powiedzieć na zasadzie porównania np. z epoką brązu, iż żyjemy w epoce węgla i ropy. Obecnie, energia biomasy, wody, geotermiczna, Słońca czy wiatru nazywana jest energią alternatywną, choć człowiek korzystał z niej na długo przed erą węgla i ropy [18].

Obecnie, średnie dobowe zużycie energii pierwotnej na świecie wynosi około 180 MJ na mieszkańca. Energia zużywana jest głównie przez najbardziej rozwinięte kraje świata, które również generują największą ilość odpadów i gazów cieplarnianych. Kraje biedne nadal korzystają głównie z bioenergii [3].

Jak wiadomo gospodarka każdego kraju silnie zależy od dostaw energii [1, 2]. Agresja militarna, kryzys bankowy oraz efekt cieplarniany mogą powodować nagłą przerwę w dostawach energii (rys. 1). Własne zasoby alternatywnej energii, uniezależniają od niepewnych dostaw zagranicznych, nie powodują efektu cieplarnianego przez co zwiększają bezpieczeństwo państwa [19].

Wielu ekspertów światowej energetyki coraz częściej sygnalizuje geopolityczne ryzyko wiążące się z możliwością zachwiania równowagi energetycznej. Rozwój cywilizacji przyczynia się do coraz szybszego wzrostu zapotrzebowania na energię. Jak wiadomo, system energetyczny Ziemi oparty jest na surowcach kopalnych, a jego źródła koncentrują się zaledwie w kilku obszarach obejmujących zasoby



ropy naftowej, gazu ziemnego, węgla i uranu. Zasoby te bardzo często znajdują się w rejonach od lat niespokojnych politycznie. Powyższa sytuacja jest coraz częściej przyczyną niedoborów energetycznych wielu państw oraz niekontrolowanego wzrostu cen nośników energii. Ważnym więc czynnikiem dalszego rozwoju każdego kraju współczesnego świata jest zachowanie suwerenności energetycznej. Już dzisiaj można stwierdzić, że Unia Europejska cierpi na strukturalną słabość sektora energetycznego. Produkcja surowców energetycznych krajów UE pokrywa tylko połowę jej potrzeb i jeśli nie nastąpią na tym polu istotne zmiany, to za około 30 lat zapotrzebowanie na te surowce będzie pokrywane w 70 procentach przez media pochodzące z importu [19, 20, 21]. Na tle niskiego poziomu dochodu narodowego w Polsce, zużycie energii pierwotnej na jednego mieszkańca, było i jest stosunkowo wysokie. Wynikało to ze struktury gospodarki, zwłaszcza przemysłu, nieracjonalnego gospodarowania energią wynikającego z jej niskiej ceny. Oparcie systemu energetycznego na paliwach stałych, spowodowało niekorzystną strukturę bilansu paliwowo-energetycznego. Węgiel kamienny i brunatny stanowi ponad 73% zużywanej energii pierwotnej. Tak wysokiego udziału tych paliw nie ma żaden kraj Unii Europejskiej. Stan taki negatywnie wpływa na warunki ekologiczne oraz elastyczność i bezpieczeństwo pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego [21].



Rys. 1. Czynniki wpływające na bezpieczeństwo państwa [19]

Korzystanie z konwencjonalnych źródeł energii niesie ze sobą wiele zagrożeń ekologicznych, gospodarczych i zdrowotnych. Wydobywanie węgla metodą głębinową okupione jest licznymi ofiarami w ludziach. Wystarczy wspomnieć niedawną tragedię w kopalni "Śląsk" w wyniku której życie straciło 20 górników [22]. Otworowa eksploatacja deformuje budowę geologiczną, rzeźbę terenu, wody podziemne

i powierzchniowe, a jednocześnie zanieczyszcza chemicznie glebę i szatę roślinną. Kopalnie odkrywkowe powodują dewastację gruntu, dodatkowo wypompowywana woda jest przyczyną opadania wód gruntowych i powierzchniowych (znikające jeziora) [23] (rys. 2).



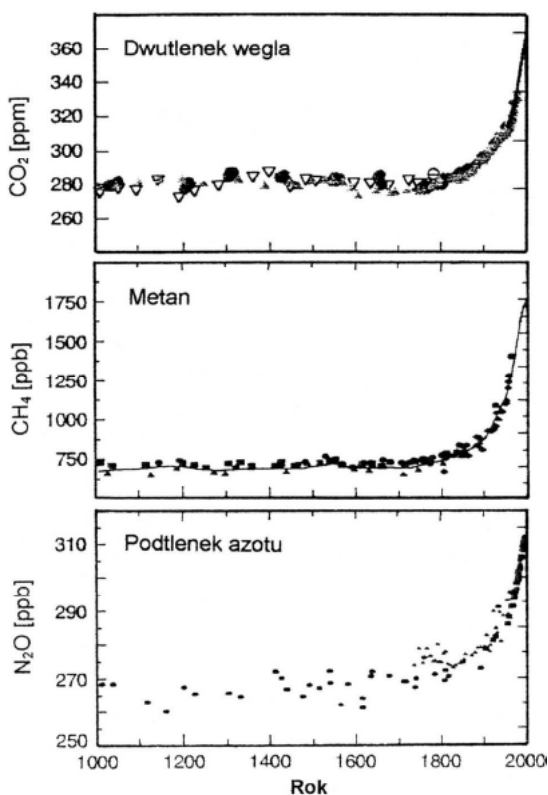
Rys. 2. Wysychające Jezioro Ostrowskie (Przyjezierze) (fot. L. Pazderski)

Ropa naftowa to surowiec mineralny, silnie toksyczna ciepla mieszanina węglowodorów: alkanów, cykloalkanów, arenów (80-90%), od najłżejszego metanu ( $\text{CH}_4$ ) do najcięższych; kwasów karboksylowych, fenoli, związków heterocyklicznych oraz związków metaloorganicznych. Zawartość siarki w ropie może sięgać 6% m/m [2, 17].

Transport surowej ropy naftowej jest najczęstszym źródłem wycieków – katastrof ekologicznych. Zdarzają się one podczas jej wydobycia (wyrwanie głowic), magazynowania (rozszczelnienie zbiorników) i transportu (katastrofy tankowców, pęknięcia rurociągów). Podstawową grupą skażającą środowisko są paliwa uwalniane w niezliczonej ilości wycieków chronicznych i małych. Powstają one na skutek erozji zbiorników i armatury w sieci transportu i dystrybucji paliw, a także w wyniku rozszczelnienia złączy, przypadkowego rozlania, kolizji drogowych, działalności warsztatów naprawczych. Wśród uwalnianych produktów można wyróżnić benzynę silnikową, paliwa dieslowe, oleje opałowe, oleje smarowe, smary plastyczne, substancje żywiczno-asfaltowe, a także zużyte oleje i płyny hydrauliczne [24, 25].

Spalenie 1 Tg węgla kamiennego średniej jakości powoduje emisję 20 Gg pyłów, 35 Gg  $\text{SO}_2$ , 6 Gg  $\text{NO}_x$  oraz 2 500 Gg  $\text{CO}_2$ , zaś na wysypiska trafia ponad 300 Gg

popiołów. 1 Tg węgla zawiera 1 Mg U-238 i 2 Mg Th-232, które w czasie spalania dostają się do atmosfery. W 170 Tg węgla spalane go rocznie w Polsce znajduje się łącznie 500 Mg promieniotwórczego uranu i toru, kierowanych na wysypiska w popiołach lub emitowanych do atmosfery w pyłach [1, 2, 27]. Od około 1800 roku zauważyć można gwałtowny wzrost stężenia dwutlenku węgla, metanu i tlenku azotu(I) (rys. 3). Bezpośrednie pomiary stężenia tych gazów w atmosferze, prowadzone w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat, uzupełnione są na wykresach wynikami pomiarów w rdzeniach lodowych Grenlandii i Antarktydy (różne symbole). W tym przypadku, stężenie gazów cieplarnianych mierzone jest w pęcherzach powietrza zamkniętych w strukturze lodu o znanym wieku [28].



Rys. 3. Zmiany stężenia w atmosferze głównych gazów cieplarnianych ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) w okresie ostatniego tysiąca lat [28]

Emitowany wskutek spalania paliw kopalnych tlenek siarki(IV) przyczynia się do obniżenia upraw rolniczych, zakwaszania gleby i wody (kwaśne deszcze), erozji materiałów budowlanych, a u ludzi powoduje choroby układu oddechowego. Tlenki azotu również zakwaszają środowisko, przyczyniając się do eutrofizacji wód

powierzchniowych oraz chorób dróg oddechowych u człowieka. Podczas transportu paliw konwencjonalnych i w trakcie ich spalania emitowane są związki organiczne, które powodują wzrost umieralności i zachorowalności (podrażnienia oczu, choroby układu oddechowego i krążenia, zaburzenia układu nerwowego, nowotwory). Metale ciężkie uwalniane do środowiska są przyczyną m.in. nowotworów i wad dziedzicznych [29, 30].

Korzystanie z konwencjonalnych źródeł energii prowadzi do intensywnego zanieczyszczenia powietrza. Badania przeprowadzone przez brazylijskich naukowców wskazują na to, że niebezpieczeństwo poronienia u kobiet zachodzących w ciążę w okresie zimowym jest aż dwukrotnie większe niż w innych porach roku. Smog fatalnie wpływa na rozwój płodu, a w późniejszym okresie może także upośledzić rozwój umysłowy [31].

Polacy do niedawna znali trąby powietrzne (tornado) z telewizji. W ostatnich latach, wskutek zmian klimatu, stały one się niemal codziennością. W czerwcu 2007 roku cała seria tornad dokonała ogromnych zniszczeń w takich miejscowościach, jak: Pobiedziska i Kliny w Wielkopolsce, Zblewo na Pomorzu oraz Kurzelów na Ziemi Świętokrzyskiej [32].

Polska posiada niewielkie zasoby ropy naftowej i gazu ziemnego, wobec czego całkowicie uzależniona jest od dostaw z innych krajów, głównie z Rosji [33–35].

Paliwa konwencjonalne są nieodnawialne, zasoby ich kurczą się z każdym rokiem. Według raportu World Energy Council [36, 37] węgiel kamienny skończy się za 135 lat, węgiel brunatny za 168 lat, ropa naftowa za 37 lat, zaś gaz ziemny za 59 lat. Im bliżej będzie tych lat, tym wyższa cena surowca, co wiąże się z kryzysem gospodarczym i konfliktami politycznymi i zbrojnymi. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż część wydobycia ropy naftowej wykorzystywane jest w gospodarce na cele nie lokomocyjne. Jeśli jej zabraknie wiele gałęzi przemysłu będzie zagrożonych, pogłębiając kryzys.

Więcej informacji na temat skutków spalania paliw kopalnych na środowisko znajduje się w Załączniku nr 3 niniejszej monografii.

Ze względów ekologicznych, geologicznych, gospodarczych i politycznych należy stopniowo wracać do odnawialnych źródeł energii z których korzystaliśmy wcześniej. Polska jako kraj rolniczy powinna rozwijać technologie oparte na biomasie, biopaliwach i biogazie. Są to paliwa które można produkować bez szkody dla środowiska.

## Literatura

1. M. Kaliski, *Bezpieczeństwo energetyczne w gospodarce paliwowej Polski*, PAN Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Kraków 2006.
2. J. Kicki, *Bezpieczeństwo energetyczne – rola tradycyjnych nośników energii dziś i w przyszłości*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2007.
3. M. Jaczewski, *Człowiek a energia*, Energetyka, 1–10, kwiecień 2006.

4. W. Brząkała (red.), *Ogrzewanie energią słoneczną*, Polski Klub Ekologiczny. Okręg Dolnośląski, Wrocław 2005.
5. Á. R. Ridao *et al.*, *Solar energy in Andalusia (Spain): present state and prospects for the future*, *Renewable&Sustainable Energy Reviews* 11, 148–161, 2007.
6. Oxford, *Wielka historia świata*. T. 9. Grecja, czasy rzymskie, Oxford Education Books, Warszawa 2008.
7. K. Butti and J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology*, Marion Boyars Publishers Ltd, New York and London 1981.
8. <http://energiazwiatru.w.interia.pl> (wejście 24.11.09).
9. W.M. Lewandowski, *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, Warszawa, 2007.
10. R. Kothari, D. Buddhi, R.L. Sawhney, *Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods*, *Renewable&Sustainable Energy Reviews* 12, 553–563, 2008.
11. F.H. Koch, *Hydropower – the politics of water and energy: Introduction and overview*, *Energy Policy* 30, 1207–1213, 2007.
12. <http://www.visitgdansk-oliwa.com> (wejście 24.11.09).
13. I.G. Fridleifsson, *Geothermal energy for the benefit of the people*, *Renewable&Sustainable Energy Reviews* 5, 299–312, 2001.
14. A. Oniszk-Popławska, *Ciepło z wnętrza Ziemi*, EC BREC/IMBER, Gdańsk-Warszawa 2003.
15. <http://www.biomasa.org> (wejście 24.11.09).
16. A. Czapliński (red.), *Węgiel kamienny*, Wydawnictwa AGH, Kraków 1994.
17. K. Chłobowski (red.), *Ropa naftowa a środowisko przyrodnicze*, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
18. B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Energia alternatywna w województwie kujawsko-pomorskim*, Wyd. UMK, Toruń 2008.
19. K. Kuciński (red.), *Energia w czasach kryzysu*, Difin, Warszawa 2006.
20. <http://www.sm.fki.pl> (wejście 18.11.08).
21. J. Kopczyk, *Wprowadzenie. Jaki będzie pożytek ze wzrostu cen energii elektrycznej w Polsce, i czy będzie?*, Konferencja Energetyka rozproszona – Kłaster 3x20, 5–6, Toruń-Przysiek 2008.
22. <http://pl.wikinews.org> (wejście 24.11.09).
23. J. Siuta, *Rekultywacja gruntów*, Wyd. EKOINŻYNIERIA, Warszawa 1998.
24. A.E. Bence, K.A. Kvenvolden, M.C. Kennicutt, *Organic geochemistry to environmental assessments of Prince William Sound, Alaska, after the Exxon Valdez oil spill – an review*, *Organic Geochemistry* 24(1), 7-42, 1996.
25. Md.S. Islam, M. Tanaka, *Impacts of pollution on coastal and marine ecosystems including coastal and marine fisheries and approach for management: a review and synthesis*, *Marine Pollution Bulletin* 48, 524-649, 2004.
26. <http://solar.calfinder.com> (wejście 24.11.09).
27. <http://www.wikipedia.pl> (wejście 20.11.09).
28. K. Różański, *Antropogeniczne zmiany klimatu: mit czy rzeczywistość?*, materiały XXXVI Zjazdu Fizyków Polskich, wykłady sekcyjne, Toruń 2001.
29. <http://www.externe.info> (wejście 24.11.09).
30. M.A. Wasilewska, *Toksykologia*, Wyd. Hogben, Szczecin 2008.
31. <http://www.twojapogoda.pl> (wejście 18.11.09).
32. <http://www.wiadomosci24.pl> (wejście 26.11.08).
33. [http://www.pgi.gov.pl/surowce\\_mineralne](http://www.pgi.gov.pl/surowce_mineralne) (wejście 25.11.09).

34. <http://inwestycje.pl/gaz>(wejście 25.11.09).
35. <http://www.wiadomosci24.pl>(wejście 25.11.09).
36. N. Zupanc (chairman), 2007 Survey of Energy Sources, World Energy Council, London 2007.
37. P. Döll, *Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective*, *Climate Change* 54, 269-293, 2002.

# BIOMASA – DEFINICJE, POWSTAWANIE, PODZIAŁ, POTENCJAŁ

## Biomasa jako źródło energii pierwotnej

Pojęcie „biomasy” w gospodarce pojawiło się w związku z powolnym powrotem do wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Ogólnie „**biomasa**” to masa materii zawarta w organizmach. Wyróżnia się fitomasę (biomasę roślin) oraz zoomasę (biomasę zwierząt), a także biomasę mikroorganizmów. Biomasa producentów tworzona jest w procesie fotosyntezy. Konsumenci i reducenty (destruenci) tworzą swoją biomasę kosztem biomasy producentów [1, 2].

Definicja biomasy cytowana w §2.1 rozporządzenia Ministra Gospodarki i Pracy (Dz. U. Nr 267, poz. 2656) [3], jest w pełni zbieżna z definicją biomasy zawartą w art. 2b dyrektywy 2001/77/WE [4] i brzmi następująco: „Biomasa – stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także z przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji”.

Organizmy produkujące związki organiczne na drodze fotosyntezy to:

- wszystkie rośliny (nieliczne wyjątki to rośliny cudzożywne, saprofityczne i pasożytnicze),
- niektóre protisty oraz
- część bakterii (tzw. bakterie purpurowe oraz sinice) [5, 6].

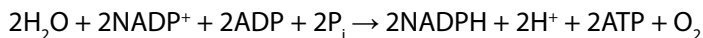
Producentem biomasy są organizmy, które wykorzystując promienie słoneczne w zakresie długości fal 400–700 nm potrafią absorbować 50% widma światła słonecznego. Sprawność procesu fotosyntezy wynosi od 1–3% (rzadziej 5–6%). Biorąc pod uwagę ogromną nadwyżkę energii słonecznej docierającej do Ziemi w stosunku do aktualnych potrzeb ludzkości jest to wynik zadowalający. Wzrost sprawności o 1% to często nawet dwukrotne zwiększenie ilości produkowanej żywności. Zasoby biomasy są więc ogromne. Chcąc dziś powrócić do koncepcji pozyskiwania energii z biomasy, współczesny człowiek dysponuje zaawansowanymi technologiami przetwarzania biomasy. Nie jesteśmy zatem skazani na spalanie

drewna, jak robili to nasi przodkowie, a mamy do wyboru wiele rodzajów biopaliw otrzymywanych z roślin, a każde z nich ze względu na swoje właściwości może mieć rozmaite zastosowania w gospodarce [7, 8].

### Fotosynteza C-3

Fotosynteza jest jednym z podstawowych procesów biologicznych, warunkuje ona istnienie absolutnej większości organizmów żywych na Ziemi. W wyniku reakcji fotosyntetycznych, w ciągu roku na całej kuli ziemskiej w formie węglowodanów i innych związków organicznych, magazynowanych jest ponad 10 Pg węgla. Dzięki reakcjom fotosyntezy możliwa jest przemiana materii nieorganicznej ( $\text{CO}_2$ ) w organiczną, stanowiącą źródło energii dla organizmów heterotroficznych. W komórkach eukariotycznych proces fotosyntezy zachodzi w wyspecjalizowanych organellach – chloroplastach, zawierających barwniki fotosyntetyczne. U roślin organem zawierającym komórki z chloroplastami jest liść, będący głównym organem asymilacyjnym. Pewne ilości chloroplastów zawierają także komórki niezdrewniałych łodyg, ewentualnie kwiatów i owoców [5, 8].

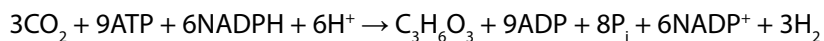
Pierwszy etap fotosyntezy nazywany jest fazą jasną (świetlną), polega na przekształceniu energii światła słonecznego do energii wiązań chemicznych dwóch związków chemicznych: adenylo-5'-trifosforanu (ATP) i dinukleotydu nikotyno-amido-adeninowego (NADPH). Oba wysokoenergetyczne związki wytwarzane są dzięki przenoszeniu elektronów poprzez kolejne przenośniki. Promieniowanie pochłonięte przez cząsteczki barwników asymilacyjnych służy do przeniesienia elektronów od cząsteczek chlorofilu do kompleksów białkowych znajdujących się w błonach białkowo-lipidowych. Energia światła wykorzystywana jest do wybięcia elektronu z cząsteczki wody i przeniesienia go, poprzez system przekaźników, na formę utlenioną –  $\text{NADP}^+$ . W transporcie elektronów biorą udział kompleksy białkowe: fotoukład I (PS I), fotoukład II (PS II), kompleks cytochromowy  $b_6/f$  trwale związany z błonami, oraz szybkie przekaźniki elektronów w postaci plastochinonu i plastocyjaniny. Transport elektronów przez wymienione przenośniki prowadzi także do powstania różnicy stężeń jonów wodorowych w poprzek błon. Energia zgromadzona w postaci różnicy stężeń jest wykorzystywana przez enzym, syntazę ATP, do wytworzenia ATP. Uproszczony zapis reakcji zachodzących w fazie jasnej fotosyntezy przedstawia równanie ( $P_i$  – fosforan) [1, 5]:



Kolejna faza fotosyntezy (ciemna) nazywana jest także cyklem Calvina-Ben-sona. Energia zgromadzona w ATP i NADPH wykorzystywana jest do przekształcenia dwutlenku węgla do prostych związków organicznych cukrów. Następuje to poprzez przyłączenie  $\text{CO}_2$  do pięciowęglowego związku – 1,5-bisfosforybulozy. Powstały związek sześciowęglowy rozpada się na dwie cząsteczki zawierające po



trzy atomy węgla, które po zredukowaniu przy użyciu NADPH stanowią pierwszy trwały produkt fotosyntezy – triozy. W wyniku ich przekształcania powstaje glukoza oraz odtwarzana jest 1,5-bisfosforybuloza konieczna do związania kolejnych cząsteczek dwutlenku węgla. Uproszczony zapis reakcji zachodzących w fazie ciemnej przedstawia równanie [1, 5]:

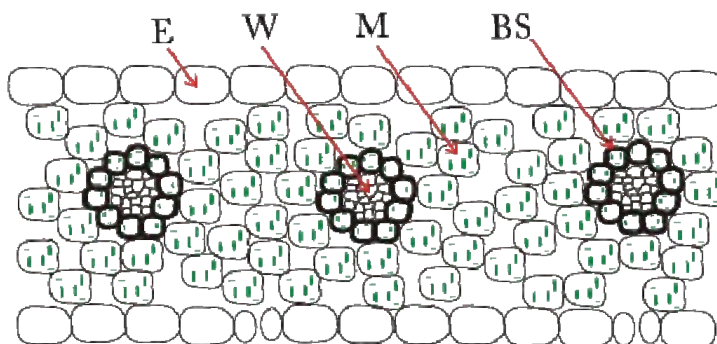


Związki będące produktami fazy ciemnej fotosyntezy zostały szczegółowo poznane dzięki badaniom Melvina Calvina i Andrew Bensona, za co w 1961 roku Calvin otrzymał nagrodę Nobla w dziedzinie chemii [10]. Badania te wykazały, że izotop węgla  $^{14}\text{C}$  podawany organizmom fotosyntetyzującym pojawia się najpierw w związku trójwęglowym – kwasie 3-fosfoglicerynowym. Z tego powodu rośliny, u których pierwszym produktem asymilacji  $\text{CO}_2$  jest związek trójwęglowy, określa się jako rośliny typu C-3 [6, 10].

## Fotosynteza C-4

Wiele roślin „energetycznych” wykorzystuje fotosyntezę C-4, (cykl Hatcha-Slacka). Rośliny te wykształciły mechanizmy anatomiczne i fizjologiczne pozwalające na zwiększenie stężenia  $\text{CO}_2$  w komórkach, w których zachodzi cykl Calvina-Bensona [1, 11]. Przystosowania anatomiczne roślin polegają na zróżnicowaniu komórek zaangażowanych w wiązanie  $\text{CO}_2$  na komórki mezofilu oraz komórki pochw okołowiązkowych. Komórki pochw okołowiązkowych posiadają grubą ścianę komórkową, zwykle wysyconą suberyną, dzięki czemu ściana komórkowa jest w bardzo małym stopniu przepuszczalna dla gazów. Proces wiązania  $\text{CO}_2$  zachodzi dwukrotnie. Po wnikięciu do komórek mezofilu przez aparaty szparkowe, dwutlenek węgla przyłączany jest do fosfoenolopirogronianu. W reakcji tej powstaje związek czterowęglowy – jony szczawiooctanowe. Jest on w zależności od gatunku rośliny przekształcany do jonów asparaginianowych lub jabłczanowych i w tej postaci przenoszony do komórek pochw okołowiązkowych. Tam zachodzi reakcja dekarboksylacji i wydzielenie  $\text{CO}_2$ , który jest włączany do cyklu Calvina-Bensona. Cykl ten zachodzi tylko w komórkach pochw okołowiązkowych, gdzie stężenie  $\text{CO}_2$  przekracza 10–20 razy stężenie  $\text{CO}_2$  w komórkach mezofilu [1, 11].

Liście roślin, które wykorzystują fotosyntezę typu C-4, zawierają komórki mezofilowe o cienkich ścianach komórkowych zawierające chloroplasty – **M** i komórki pochw okołowiązkowych o grubych ścianach komórkowych także zawierające chloroplasty – **BS**, otaczające wiązkę przewodzącą – **W**, oraz komórki epidermy – **E** nie zawierające chloroplastów (rys. 1).



Rys. 1. Komórki roślin o fotosyntezie C-4 [1]

Brak cyklu Calvina-Bensona w komórkach mezofilowych związany jest z brakiem enzymu, przyłączającego  $\text{CO}_2$  do cząsteczki rybulozo-1,5-bisfosforanu (RuBP) określanego nazwą karboksylaza oksigenaza rybulozo-1,5-bisfosforanowa (RuBisCO). Enzym ten może katalizować także reakcję przyłączenia do RuBP tlenu, gdyż tlen i dwutlenek węgla konkurują o centrum aktywne RuBisCO. Proces ten nosi nazwę fotooddychania i obniża wydajność fotosyntezy roślin  $\text{C}_3$ . Dzięki zwiększonemu stężeniu  $\text{CO}_2$  w komórkach pochwów okołowiązkowych proces fotooddychania jest zahamowany, a tym samym wydajność fotosyntezy roślin  $\text{C}_4$  jest wyższa niż roślin  $\text{C}_3$ . Jednak nakład energetyczny na związanie jednej cząsteczki  $\text{CO}_2$  jest większy niż u roślin  $\text{C}_3$ .

Rośliny typu  $\text{C}_4$  podzielono na trzy podtypy:

- NADP-ME,
- NAD-ME oraz
- PEP-CK [1].

Podstawą wydzielenia trzech podtypów jest enzym odpowiedzialny za przeprowadzanie reakcji dekarboksylacji w komórkach pochwów okołowiązkowych. Jest to odpowiednio: enzym jabłczanowy zależny od NADP, enzym jabłczanowy zależny od NAD i karboksykinazy fosfoenolopirogronianowej (PEP-CK).

Więcej informacji o procesie fotosyntezy znajduje się w opracowaniu Halla [5], Kopcewicza [6.] bądź w na łamach czasopisma Photosynthesis Research [12].

## Biomasa na cele energetyczne

Wykorzystywanie biomasy jako źródła energii nie jest zjawiskiem nowym. Praktycznie od czasów prehistorycznych człowiek używał drewna czy innych surowców pochodzenia roślinnego do ogrzewania swoich domostw. Stan ten trwał aż do czasu rewolucji przemysłowej, odkąd obserwuje się systematyczny wzrost wykorzystania węgla oraz ropy naftowej. Rewolucja przemysłowa choć ograniczy-

ła rolę surowców biologicznych jako źródła energii, to jednak całkowicie ich nie wyeliminowała [13].

Biomasa jest najmniej kapitałochłonnym, odnawialnym źródłem energii. Jej produkcja może praktycznie przebiegać samoistnie, np. w puszcach, na stepach i łąkach, a także w oceanach i w zbiornikach wody słodkiej. Aby zintensyfikować produkcję biomasy potrzebne są dodatkowe nakłady związane z nawożeniem, nawadnianiem, walką ze szkodnikami i ochroną roślin [14].

Węglowodany i skrobia, podstawowy i docelowy produkt upraw rolnych, stanowią pokarm dla zwierząt i ludzi oraz są surowcem do produkcji etanolu, który jest również produktem wyjściowym w syntezie wielu cennych i pożądanых substancji, a także może stanowić użyteczne źródło energii. Pozostałość biomasy, która już nie ma właściwości odżywczych to celuloza, hemiceluloza i lignina, które stanowią doskonały surowiec energetyczny. W roślinach energetycznych proporcje substancji pokarmowych do energetycznych są odwrócone, a ich orientacyjny skład jest następujący: 40–60% celuloza, 20–40% hemiceluloza i 10–25% lignina [15].

Dokonując charakterystyki biomasy „energetycznej” można uwzględnić następujący podział, z uwagi na:

1) pochodzenie:

- produkty rolnicze: słoma roślin zbożowych, gałęzie z przycinek sadów oraz inne produkty roślinne, alkohole jako dodatki do benzyn silników gaźnikowych, olej rzepakowy jako paliwo dla silników wysokoprężnych, biogaz z nawozu organicznego produkcji zwierzęcej, biogaz z osadów ściekowych, odpadów komunalnych płynnych i stałych,
- produkty leśne: drzewa i gałęzie z przecinek i cięć sanitarnych, gałęzie z cięć produkcyjnych, odpady z przemysłu drzewnego, plantacje lasów energetycznych liściastych, czuby i gałęzie pocięte na łupki do spalania w piecach grzewczych o mocy cieplnej około 200 kW;

2) źródło pozyskiwania energii z biomasy:

- biomasa nieprzetworzona, np. drewno, słoma, rośliny specjalnie hodowane jako rośliny energetyczne,
- biomasa wstępnie przetworzona, np. oleje roślinne, gaz drzewny, lekkie alkohole,
- odpady, np. makulatura, trociny, wióry oraz
- gaz powstający w trakcie przemian materii organicznej pod wpływem bakterii, np. biogaz z wysypisk komunalnych, biogaz z fermentacji gnojowicy;

3) konsystencję:

- stałą, np. drewno, słoma, makulatura, trawy,
- płynną, np. ścieki, płynne odpady ściekowe oraz
- gazową, np. biogaz, biowodór [16, 17, 18].

Należy zauważyć, iż pojęcia biomasy i biopaliwa często używane są zamiennie. Autorzy uważają iż pojęcia „biomasy” należy używać w szerszym kontekście, powołując się jednocześnie na definicję zawartą w Dyrektywie 2003/30/CE [19],

„biopaliwo” to płynne lub gazowe paliwo dla transportu, produkowane z biomasy. Natomiast „biomasa” to biodegradowalne frakcje produktów, odpadów oraz pozostałości z działalności rolniczej, leśnej i pokrewnych gałęzi gospodarki, a także biodegradowalne frakcje odpadów komunalnych i przemysłowych [7].

Wojciechowski [20], ze względu na stan skupienia dzieli biomasę na biopaliwa, biopaliwa ciekłe i biopaliwa gazowe (tabela 1).

Tabela 1. Podział biomasy na cele energetyczne [20]

<b>Biomasa</b>		
<b>Biopaliwa</b>	<b>Biopaliwa ciekłe</b>	<b>Biopaliwa gazowe</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– pozostałości z rolnictwa (słoma zbóż, rzepaku, siano, łęty),</li> <li>– drewno opałowe (ścinki, kora, wióry, zrębki, trociny),</li> <li>– odpady z produkcji zwierzęcej,</li> <li>– osady ściekowe odwodnione,</li> <li>– rośliny energetyczne drzewiaste i trawiaste.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– biodiesel – olej rzepakowy,</li> <li>– etanol,</li> <li>– metanol,</li> <li>– biooleje,</li> <li>– oleje po smażeniu z placówek żywienia zbiorowego.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– biogaz rolniczy z fermentacji gnojowicy i odpadów rolniczych,</li> <li>– gaz drzewny,</li> <li>– gaz wysypiskowy i z fermentacji osadów ściekowych,</li> <li>– biogaz z fermentacji odpadów przetwórstwa spożywczego</li> </ul>

W tabeli 2 przedstawiono podział biomasy wg Singha i współpracowników [21].

Tabela 2. Podział biomasy rolniczej wg Singha i współpracowników [21]

<b>Kategoria</b>	<b>Typ biomasy</b>	<b>Przykłady</b>
A1	słoma	pszenica, jęczmień, rośliny strączkowe
A2	łodygi	bawełna, kukurydza, gorczyca, rzepak
A3	wytłoki trzciny cukrowej	trzcina cukrowa
A4	łupiny, kolby,	kukurydza, ryż nieobłuszczony, orzeszki ziemne

Obecnie w Polsce obowiązuje Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych [22], która w sposób jednoznaczny definiuje pojęcie biopaliw. Za biopaliwa ciekłe w myśl ustawy uznane zostały:

- a) benzyny silnikowe zawierające powyżej 5,0% v/v biokomponentów lub powyżej 15,0% v/v eterów,
- b) olej napędowy zawierający powyżej 5,0% v/v biokomponentów,
- c) ester, bioetanol, biometanol, dimetyloeter oraz czysty olej roślinny – stanowiące paliwa samoistne,
- d) biogaz – gaz pozyskany z biomasy,
- e) biowodór – wodór pozyskiwany z biomasy,
- f) biopaliwa syntetyczne – syntetyczne węglowodory lub mieszanki syntetycznych węglowodorów, wytwarzane z biomasy, stanowiące samoistne paliwa.

Ta sama ustawa określa, jakie substancje możemy uznać za biokomponenty: bioetanol, biometanol, ester, dimetyloeter, czysty olej roślinny oraz węglowodory syntetyczne otrzymane z biomasy. Zestawienie najważniejszych biopaliw ciekłych przedstawiono w tabeli 3 [8, 22].

Tabela 3. Źródła biopaliw płynnych i ich zastosowanie [8, 22]

Biopaliwo	Roślina	Proces konwersji	Zastosowanie
Bioetanol	zboża, ziemniaki, pseudozboża, topinambur	hydroliza i fermentacja	dodatek do benzyny
	buraki cukrowe, trzcina cukrowa, słodkie sorgo	fermentacja	
	uprawy energetyczne, słoma, <i>Miscantus</i> , rośliny trawiaste	obróbka wstępna, hydroliza i fermentacja	
Biometanol	uprawy energetyczne, <i>Miscantus</i>	gazyfikacja lub synteza metanolu	
Olej roślinny	rzepak, słonecznik, soja	-	dodatek do oleju napędowego
Biodiesel	rzepak, słonecznik, soja	transestryfikacja	dodatek lub substytut oleju napędowego
Bioolej	uprawy energetyczne, <i>Miscantus</i>	piroliza	substytut oleju napędowego

Zgodnie z Dyrektywą 2003/30/WE Parlamentu Europejskiego z dnia 8 maja 2003 r. [19] za biopaliwa uznaje się poniższe produkty:

- a) *bioetanol*: etanol produkowany z biomasy i/lub ulegającej biodegradacji części odpadów, do użycia jako biopaliwo,
- b) *biodiesel*: ester metylowy produkowany z oleju roślinnego lub zwierzęcego, o jakości oleju napędowego, do użycia jako biopaliwo,

- c) *biogaz*: paliwo gazowe produkowane z biomasy i/lub ulegającej biodegradacji części odpadów, które może być oczyszczone do jakości naturalnego gazu, do użycia jako biopaliwo, lub gaz drzewny,
- d) *biometanol*: metanol produkowany z biomasy, do użycia jako biopaliwo,
- e) *biodimetyloeter*: dimetyloeter produkowany z biomasy, do użycia jako biopaliwo,
- f) *bio-ETBE* (eter etylowo-*t*-butylowy): ETBE produkowany na podstawie bioetanolu. Procent objętości bio-ETBE, który jest liczony jako biopaliwo, wynosi 47%,
- g) *bio-MTBE* (eter metylowo-*t*-butylowy): paliwo produkowane na bazie biometanolu. Procent objętości bio-MTBE, który jest liczony jako biopaliwo, wynosi 36%,
- h) *biopaliwa syntetyczne*: syntetyczne węglowodory lub mieszanki syntetycznych węglowodorów, które zostały wyprodukowane z biomasy,
- i) *biowodór*: wodór produkowany z biomasy i/lub z ulegającej biodegradacji części odpadów, do użycia jako biopaliwo,
- j) *czysty olej roślinny (PVO)*: olej produkowany z roślin oleistych poprzez tłoczenie, ekstrakcję lub za pomocą porównywalnych metod, czysty lub rafinowany, ale niemodyfikowany chemicznie, gdy jest kompatybilny z typem silnika i odpowiednimi wymogami emisyjnymi.

#### *Biopaliwa I, II, III i IV generacji*

W ostatnich latach mówi się coraz częściej o biopaliwach I, II, III, a nawet IV generacji [25, 26]. Kolejne generacje charakteryzują się wyższą redukcją emisji CO<sub>2</sub>, wyższą efektywnością energetyczną i nie powinny konkurować z produkcją żywności. Do biopaliw pierwszej generacji zalicza się:

- bioetanol (BioEtOH) rozumiany jako konwencjonalny etanol otrzymywany z procesów hydrolizy i fermentacji z takich surowców jak: zboża, buraki cukrowe itp.,
- czyste oleje roślinne (PVO), otrzymywane z procesów tłoczenia na zimno i ekstrakcji ziaren roślin oleistych,
- biodiesel stanowiący estry metylowe oleju rzepakowego (RME) lub estry metylowe (FAME) i etylowe (FAEE) wyższych kwasów tłuszczowych innych roślin oleistych otrzymywane w wyniku procesów tłoczenia na zimno, ekstrakcji i transestryfikacja,
- biodiesel, stanowiący estry metylowe i etylowe otrzymywany w wyniku transestryfikacji posmażalniczych odpadów olejowych,
- oczyszczony biogaz pochodzący z zawilgoconego biogazu składowiskowego, bądź rolniczego,
- bio-ETBE, otrzymywany z przeróbki chemicznej bioetanolu [25, 26].

Biopaliwa drugiej generacji to:

- bioetanol otrzymywany z procesów przeróbki lignocelulozy, pochodzącej

- z biomasy (z wyłączeniem surowców przeznaczonych do celów spożywczych) na drodze zaawansowanych procesów hydrolizy i fermentacji,
- biopaliwa syntetyczne, otrzymywane w procesach zgazowania biomasy oraz syntezy produktów tego zgazowania (procesy BTL); biodiesel, jako biopaliwo lub komponent otrzymany w wyniku rafinacji wodorem (hydrogenizacji) olejów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych, głównie odpadowych,
  - biogaz jako syntetycznie otrzymywany gaz ziemny (SNG), otrzymywany w wyniku procesów zgazowania lignocelulozy i odpowiedniej syntezy,
  - biowodór, otrzymywany na drodze procesów zgazowania i wydzielania lub specyficznych procesów biologicznych [25, 26].

Biopaliwa trzeciej generacji to biowodór i biometanol, otrzymywane w wyniku zgazowania lignocelulozy i syntezy produktów zgazowania lub w wyniku procesów biochemicznych [27]. W niektórych opracowaniach za biopaliwa trzeciej generacji uznaje się glony [28, 29].

Biopaliwa czwartej generacji to biowodór, biometan i biopaliwa syntetyczne otrzymane z biomasy o wysokiej wydajności w procesie pirolizy i gazyfikacji. Ditlenek węgla powstający obok  $H_2$ ,  $CH_4$  i CO ma być wychwycony i trwale zdeponowany (sekwestracja) np. w starych kopalniach, co ma dodatkowo zahamować efekt cieplarniany [30].

Niezależnie od optymalizacji i udoskonalania procesów produkcji biopaliw wciąż szuka się nowych odnawialnych surowców energetycznych oraz metod ich przetwarzania na biopaliwa (być może biopaliwa V generacji?). Można tu przykładowo wymienić metodę pozyskiwania bioetanolu na drodze fermentacji lignocelulozy (odpady drzewne), czy technologię BTL (Biomass to Liquid). Technologie te polegają na przetwarzaniu biomasy w syntetyczne paliwa ciekłe na drodze procesów pirolitycznych. Do produkcji paliw BTL może być używana zarówno słoma, jak i odpady jałowego drewna oraz produkty z plantacji energetycznych, wykorzystywanych w całości do produkcji paliw. Po optymalizacji technologii, z jednego hektara ziemi można będzie wyprodukować blisko  $4 m^3$  paliwa BTL [26].

### *Biomasa odpadowa*

Cennym surowcem energetycznym może być również odpadowa biomasa. Można tutaj mówić o odpadach drewna (np. w tartakach) czy słomie, jak również o odpadach chociażby z gospodarstw (frakcja mokra). Problem utylizacji odpadów stałych nabrał w ostatnich latach istotnego znaczenia, a przecież wiele odpadów zarówno pochodzących z przemysłu, jak również z gospodarstw domowych zawiera znaczny ładunek związków organicznych, których spalanie może być źródłem energii. Wśród substancji, które najczęściej są stosowane jako paliwa należy wymienić:

- osady z oczyszczalni ścieków,

- odpady poprodukcyjne z przemysłu oraz
- odpady komunalne [31, 32].

Wartość opałowa odpadów jest różna, w zależności od źródła ich pochodzenia. W niektórych przypadkach wartość ta może być zbliżona nawet do ropy naftowej lub węgla. Wykorzystanie odpadów jako czynnika energetycznego wymaga uzyskania specjalnych pozwoleń oraz podlega ścisłej kontroli [31, 32].

## Zasoby biomasy

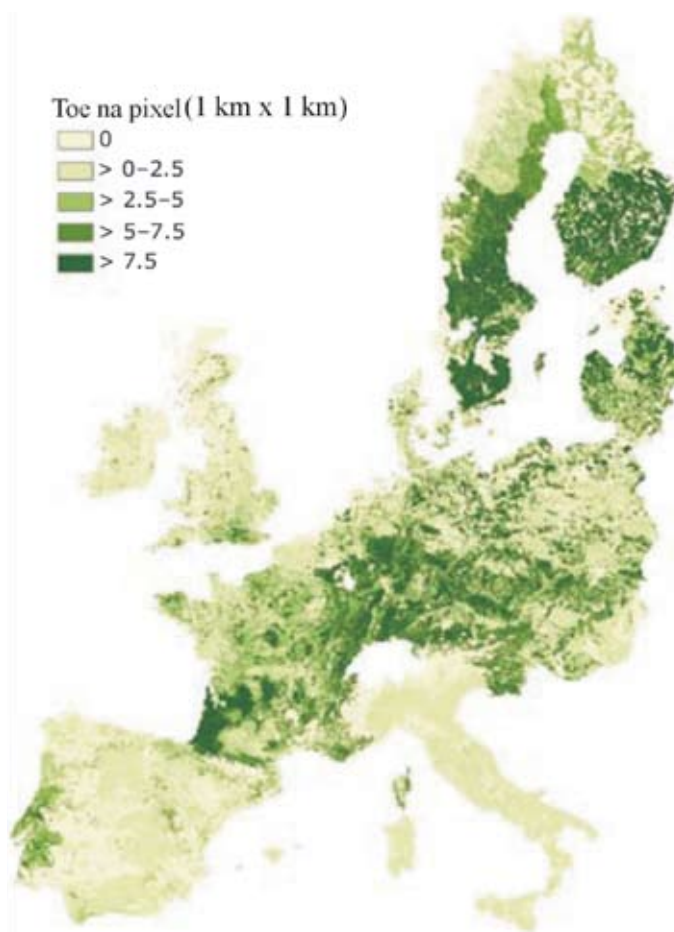
Na świecie istnieją znaczne zasoby biomasy. Demirbas [33] podaje, iż największy potencjał drewna posiada Ameryka Północna (lasy kanadyjskie), Azja (mi.in. Półwysep Indyjski, Nizina Gangesu), były ZSRR (tajga). Największy udział w wytwarzaniu odpadów rolniczych ma Afryka i Ameryka Łacińska, słomy zaś Azja i Ameryka Północna. Biomasa w największym stopniu wykorzystywana jest w Afryce (39%) i Europie (22%).

Tabela 4. Potencjał biomasy i jej wykorzystanie na świecie (EJ/rok) [33]

Potencjał biomasy	Ameryka Płn.	Ameryka Łac.	Azja	Afryka	Europa	Bliski Wschód	Były ZSRR	Świat
Drewno	12,8	5,9	7,7	5,4	4,0	0,4	5,4	41,6
Odpady rolnicze	4,1	12,1	1,1	13,9	2,6	0,0	3,6	37,4
Słoma	2,2	1,7	9,9	0,9	1,6	0,2	0,7	17,2
Inne	0,8	1,8	2,9	12	0,7	0,1	0,3	7,6
Całkowity potencjał	19,9	21,5	21,6	21,4	8,9	0,7	10,0	103,8
Wykorzystanie	3,1	2,6	23,2	8,3	2,0	0,0	0,5	39,7
Wykorzystanie/potencjał [%]	16	12	17	39	22	7,0	5	38

Raporty European Environment Agency zawierają informację, iż zasoby biomasy w Europie są znaczne. W przypadku biomasy leśnej [34] znaczne zasoby występują w krajach skandynawskich, nadbałtyckich i w Niemczech (rys. 2.). Porównanie zasobów bioenergii krajów członkowskich UE w 2010, 2020 i 2030 roku [35] stawia Polskę jako jednego z głównych producentów obok Niemiec, Francji i Hiszpanii (rys. 3.).

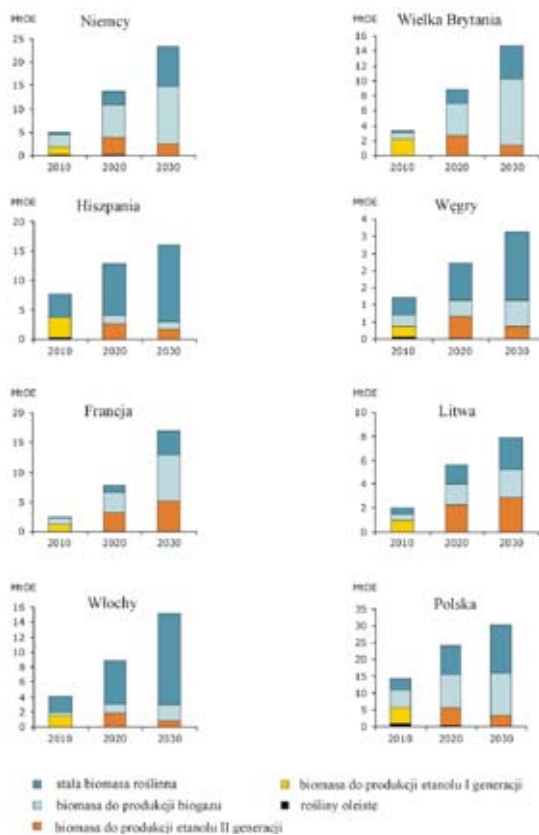




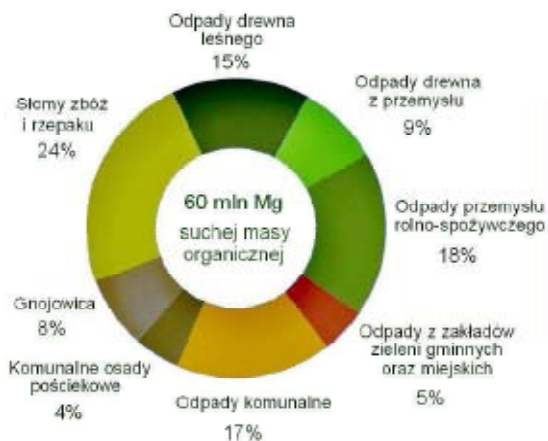
Rys. 2. Zasoby biomasy leśnej [34]

Polskie zasoby bioenergii z wyszczególnieniem źródeł przedstawiono na rysunku 4 [36]. Największe możliwości produkcji energii daje słoma zbóż i rzepaku, odpady z przemysłu rolno-spożywczego i odpady drewna leśnego.

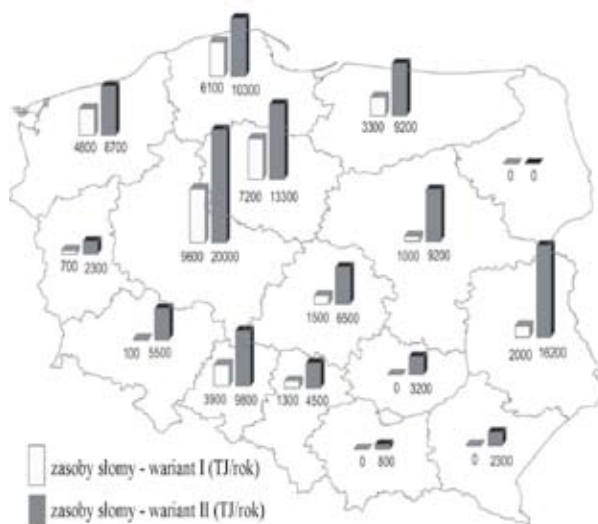
Potencjał słomy i drewna (wariant pesymistyczny i optymistyczny) dla Polski został oszacowany przez Berggrena i współpracowników [37]. Największy potencjał słomy posiada województwo wielkopolskie, kujawsko-pomorskie i pomorskie (rys. 5.), natomiast w przypadku drewna województwo zachodniopomorskie, warmińsko-mazurskie i mazowieckie (rys. 6.).



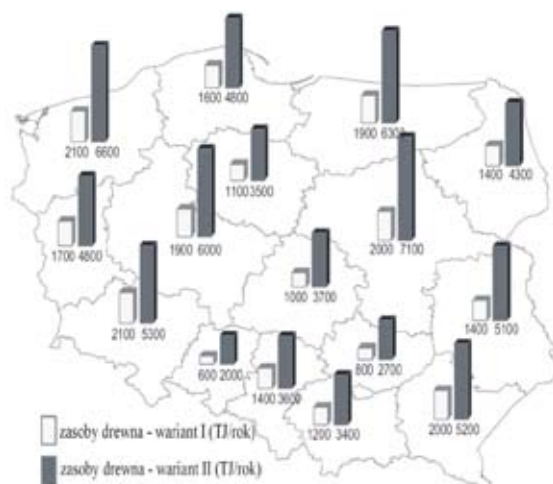
Rys. 3. Potencjał bioenergii w latach 2010, 2020 i 2030 w wybranych krajach UE [35]



Rys. 4. Krajowe zasoby odpadów organicznych w 2007 roku [36]



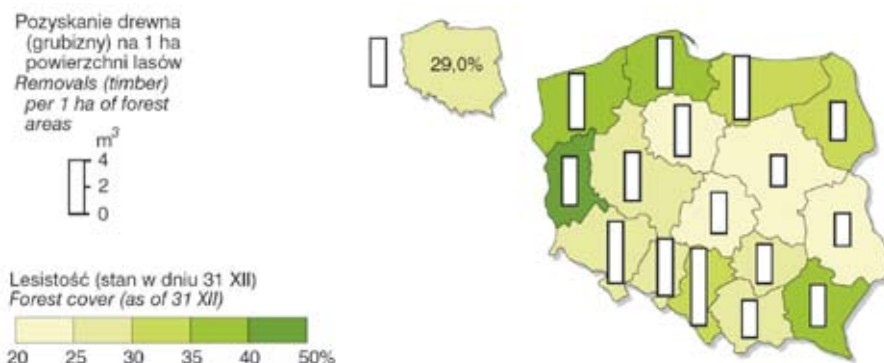
Rys. 5. Zasoby słomy w Polsce [37]



Rys. 6. Zasoby drewna w Polsce [37]

Istnieją znaczne rozbieżności w ocenie potencjału technicznego odnawialnych źródeł energii występujących w Polsce. Zgodnie z ekspertyzą Europejskiego Centrum Energii Odnawialnej pt. *Ekonomiczne i prawne aspekty wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce* (EC BREC, 2000 r.), rzeczywisty potencjał techniczny odnawialnych źródeł energii w Polsce wynosi około 2514 PJ/rok co stanowi prawie 60% krajowego zapotrzebowania na energię pierwotną [38].

W latach 1946–2008 wskaźnik lesistości (obliczony jako stosunek powierzchni lasów do powierzchni ogólnej kraju) wzrósł z 20,8% do 29%, ale jest on nadal niższy od wskaźnika ustalonego dla Polski na poziomie 33–34%. Opracowany w 1995 r. „krajowy program zwiększania lesistości” zakłada uzyskanie lesistości na poziomie do około 30% do 2020 r. i około 33% do 2050 r.; aby w 2020 r. osiągnąć zamierzony cel, należy w latach 2009–2020 zalesić 500 tys. ha gruntów porolnych i nieużytków [39].

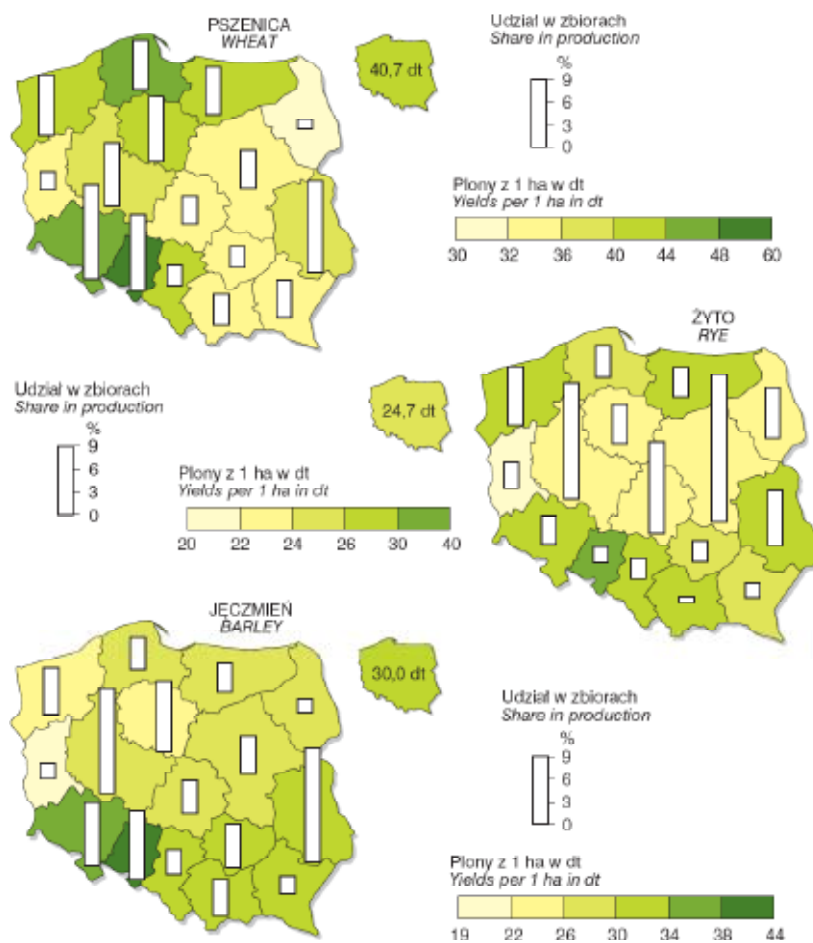


Rys. 7. Lesistość i pozyskanie drewna według województw w 2008 r. [39]

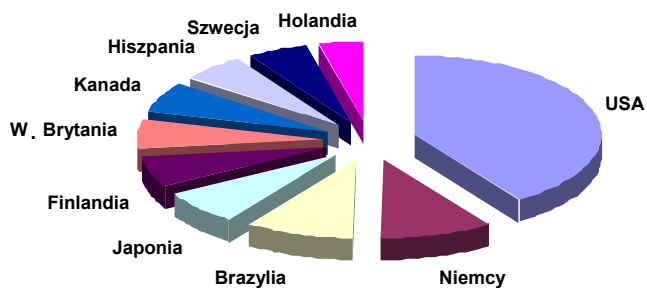
Generalna Dyrekcja Lasów Państwowych szacuje, że całkowity potencjał techniczny drewna z leśnictwa możliwy do bezpośredniego wykorzystania na cele energetyczne wynosi ok. 6,1 Mm<sup>3</sup> drewna, co jest odpowiednikiem 41,6 PJ. Znaczne potencjalne ilości tych odpadów powstają w przemyśle drzewnym [16, 17]. Według analiz Instytutu Technologii Drewna, potencjał techniczny drewna odpadowego z przemysłu drzewnego oraz innych źródeł szacować można na około 58 PJ [18].

W ostatnich latach w rolnictwie polskim dominuje uprawa zbóż [39], z których można pozyskać słomę na cele energetyczne. Największe plony zbiera się z upraw pszenicy, żyta i jęczmienia (rys. 8.) [39].

Wśród krajów uprzemysłowionych wysoki udział biomasy w bilansie energii pierwotnej mają: Finlandia – 18%, Szwecja – 16%, Austria – 13%, Dania – 7%, USA 3,5%. W Polsce, prawie 93,5% energii ze źródeł odnawialnych zapewnia biomasa. Dla porównania 6,3% udziału ma energia wodna [24]. Heinimö [26] podaje, iż największymi producentami energii elektrycznej z biomasy są USA (30,7%), Niemcy (7,33%) i Brazylia (7,31%) (rys. 9.).



Rys. 8. Zróżnicowanie plonów oraz udział województw w zbiorach zbóż w 2008 r.

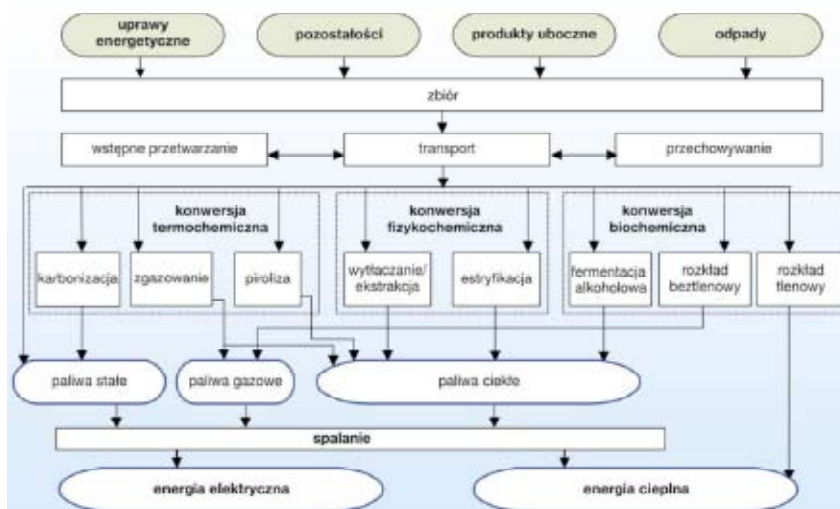


Rys. 9. Najwięksi producenci energii z biomasy [26]

## Biomasa jako ekopaliwo

Najważniejszą cechą biomasy jest to, że nie powoduje ona tak dużej emisji dwutlenku siarki, jak to ma miejsce w procesie spalania węgla kamiennego lub innych paliw kopalnych. Ponadto, biomasę charakteryzuje zerowy bilans emisji dwutlenku węgla, który jest związany z zamknięciem obiegu C - CO<sub>2</sub> - C. Podczas spalania tyle emituje się tego gazu do atmosfery, ile rośliny pobierają z niej w procesie fotosyntezy [40, 41, 42].

Bardzo ważnym argumentem opowiadającym się za wprowadzaniem biomasy (biopaliw) na rynek jest widmo kryzysu energetycznego związanego z wyczerpywaniem się źródeł ropy naftowej i gazu ziemnego (najpowszechniej dziś stosowanych paliw mineralnych). Jeżeli prognozy ekspertów się potwierdzą, to za kilkadziesiąt lat surowce te będą na wyczerpaniu, a stopniowe zmniejszanie podaży z pewnością będzie skutkowało systematycznym wzrostem cen paliw ropopochodnych i gazu ziemnego. Oprócz powyższych argumentów ekologicznych zainteresowanie wykorzystaniem roślin do celów przemysłowych i energetycznych, w tym produkcji paliw, jest wynikiem nadprodukcji żywności. Możliwość wykorzystania arealu upraw na cele energetyczne przy relatywnie wzrastających kosztach produkcji paliw mineralnych wzbudza duże zainteresowanie przemysłu, rolników i polityki [40, 41, 42]. Możliwości wykorzystania biomasy przedstawiono na rysunku 10 [43].



Rys. 10. Produkcja energii z surowców roślinnych [43]

Założenia przyjęte przez Unię Europejską pozwalają przypuszczać, że w najbliższych latach wyraźnie zwiększy się udział surowców energetycznych na bazie

biomasy. Dziś już nie dyskutuje się czy korzystać z biomasy, jak jeszcze kilkanaście lat temu, ale w jaki sposób i w jakim zakresie. Należy jednak podkreślić, że realizacja strategii związanej z produkcją energii odnawialnej z biomasy nie może być priorytetem samym w sobie. Projektując i wdrażając nowoczesne rozwiązania należy dokładnie poznać nie tylko ich zalety, ale również wady poszczególnych rozwiązań, jak również wątpliwości i nierozwiązane problemy, które zostały pokrótce przedstawione w tym opracowaniu. ONZ zaleca, by projekty biopaliwowe uwzględniały wszystkie okoliczności, a nie tylko krótkoterminowy zysk dla gospodarki. Dziś dominuje strategia zrównoważonego rozwoju, a osiągnięcie równowagi uwarunkowane jest dokładnym rozpoznaniem zagrożeń ekologicznych, technologicznych i ekonomicznych. Tylko takie kompleksowe myślenie i działanie daje szansę, iż potencjał energetyczny tkwiący w biomase zostanie optymalnie wykorzystany [44, 45, 46, 47].

## Literatura

- [1] J. Goldemberg, S.T. Coelho, *Renewable energy – traditional biomass vs. modern biomass*, Energy Policy 32, 711–714, 2004.
- [2] <http://www.wikipedia.pl> (wejście 24.18.09).
- [3] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 9 grudnia 2004 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii, Dz. U. Nr 267, poz. 2656.
- [4] Dyrektywa 2001/77/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 września 2001 r. w sprawie wspierania produkcji na rynku wewnętrznym energii elektrycznej wytwarzanej ze źródeł odnawialnych, Dziennik Urzędowy Wspólnot Europejskich, L 283/33.
- [5] D.O. Hall, K.K. Rao, *Fotosynteza*, WNT, Warszawa 1999.
- [6] J. Kopcewicz (red.), *Fizjologia roślin*, PWN, Warszawa 2005.
- [7] R. Buczkowski, B. Igliński, T. Kasikowski, *Perspektywy współspalania biomasy z paliwami tradycyjnymi w kotłach fluidalnych*, Materiały Międzynarodowej Konferencji Procesów Energii „Eco-Euro-Energia”, 203–212, Bydgoszcz, 2004.
- [8] J. Gaca, M. Sulewski, *Biomasa – terażniejszość i przyszłość*, Materiały Ogólnopolskiej Konferencji „Osiągnięcia Proekologiczne w Przemśle i Energetyce” (red. R. Buczkowski), 37–56, Wyd. UMK, Toruń, 2007.
- [9] K. Hikosaka, T. Hirose, *Leaf and canopy photosynthesis of C3 plants at elevated CO<sub>2</sub> in relation to optima partitioning of nitrogen among photosynthetic components: theoretical prediction*, Ecological Modelling 106, 247–259, 1998.
- [10] M. Cakvin, *The photosynthetic cycle*, Bulletin de la Société Chimique de France 38 (11), 1233–44, 1956.
- [11] S. Engelmann et al., *Molecular evolution of C4 phosphoenol pyruvate carboxylase in the genus Flaveria — a gradual increase from C3 to C4 characteristics*, Planta 217, 717–725, 2003.
- [12] <http://www.springerlink.com/content/100325/> (wejście 25.08.09).
- [13] J.L. Easterly, M. Burnham, *Overview of biomass and waste fuel resources for power production*, Biomass&Bioenergy 10 (2–3), 79–92, 1996.

- [14] W.M. Lewandowski, *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, Warszawa, 2007.
- [15] J. Piwowarczyk, *Energetyczne użytkowanie biomasy roślinnej*, GLOBEnergy 2–3, 32–38, 2003.
- [16] J. Szlachta, *Energetyczne aspekty wykorzystania biomasy*, Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Dolnośląski Wojewódzki Ośrodek Doradztwa Rolniczego z/s w Świdnicy, Świdnica 2001.
- [17] J.C. Elauria, M.L.Y. Castro, D.A. Racelis, *Sustainable biomass production for energy in the Philippines*, Biomass&Bioenergy 25, 531–540, 2003.
- [18] J. Goldemberg, P. Guardabassi, *Are biofuels a feasible option?*, Energy Policy 37, 10–14, 2009.
- [19] Dyrektywa 2003/30/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 8 maja 2003 r. w sprawie wspierania użycia w transporcie biopaliw lub innych paliw odnawialnych.
- [20] H Wojciechowski, *Układy kogeneracyjne z organicznym obiegiem Rankine'a wykorzystujące biomasę*, Materiały IV-ych Europejskich Dni Oszczędzania Energii, Wrocław 2004.
- [21] J. Singh, B.S. Panesar, S.K. Dharma, *Energy potential through agricultural biomass using geographical information system – A case study of Punjab*, Biomass&Bioenergy 32, 301–307, 2008.
- [22] Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych, Dziennik Ustaw z 2006 r. Nr 169 poz. 1199.
- [23] T. Wiesenthal et al., *Biofuel support in Europe: Lessons learnt for the long way ahead*, Renewable & Sustainable Energy Reviews 13, 789–800, 2009.
- [24] M. Parikka, *Global biomass fuel resources*, Biomass&Bioenergy 27, 613–620, 2004.
- [25] K. Biernat, *Nowe technologie wytwarzania biokomponentów i biopaliw pierwszej i drugiej generacji*, Międzynarodowa Konferencja „Jakość paliw w Polsce i Unii Europejskiej”, Warszawa, 5–6 września 2007.
- [26] J. Heinimö, M. Junggingen, *Production and trading of biomass for energy – An overview of the production status*, Biomass&Bioenergy 33, 1310–1320, 2009.
- [27] C. R. Carere et al., *Third generation biofuels via direct cellulose fermentation*, International Journal of Molecular Science 9, 1342–1360, 2008.
- [28] <http://ziemianarozdrozu.pl> (wejście 01.09.09).
- [29] <http://www.inhabitat.com> (wejście 02.09.09).
- [30] <http://news.mongabay.com/bioenergy> (wejście 01.09.09).
- [31] Demirbaş, *Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals*, Energy Conversion&Management 42, 1357–1378, 2001.
- [32] Faaij, *Modern biomass conversion technologies*, Migration and Adaptation Strategies for Global Change 11, 343–375, 2006.
- [33] M.F. Demirbaş, M. Balat, H. Balat, *Potential contribution of biomass to the sustainable energy development*, Energy Conversion&Management 50, 1746–1760, 2009.
- [34] T. Larsson, *Environmentally compatible bio-energy potential from European forests*, EEA technical report, Copenhagen 2007.
- [35] T. Larsson, *Estimating the environmentally compatible bioenergy potential from agriculture*, EEA technical report, Copenhagen 2007.
- [36] W. Kotowski, *Odpady zastępują biomasę*, Energia Gigawat, 1–7, czerwiec 2009.
- [37] M. Berggren et al., *Biomass co-firing potentials for electricity generation in Poland-Matching supply and co-firing opportunities*, Biomass&Bioenergy 32, 865–879, 2008.
- [38] G. Wiśniewski (red.), *Ekonomiczne i prawne aspekty wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce*, EC BREC, Warszawa 2000.



- [39] Mały Rocznik Statystyczny Polski, GUS 2009.
- [40] Ch.R. McGowin, *Biomass for electric power in the 21<sup>st</sup> century*, *Biomass&Bioenergy* 10 (2–3), 69–70, 1996.
- [41] K. Michałowska-Knap, M. Włodarski, D. Dietrich, *Zagadnienia wykorzystania odnawialnych źródeł energii w regionach – analiza porównawcza*, Instytut Energii Odnawialnej, EC BREC, Warszawa 2005.
- [42] J. Gan, C.T. Smith, *A comparative of woody biomass and coal for electricity generation under various CO<sub>2</sub> emission reduction and taxes*, *Biomass&Bioenergy* 30, 296–303, 2006.
- [43] L. Janikowicz, *Biomasa w Polsce*, *Ekologia i Energetyka* 601–604, sierpień 2006.
- [44] P. McKendry, *Energy production from biomass: conversion technologies*, *Bioresource Technology* 83, 47–54, 2002.
- [45] M. Szymczak, *Paliwa odnawialne w energetyce i ciepłownictwie*, Materiały Międzynarodowej Konferencji Procesorów Energii „Eco-Euro-Energia”, 237–245, Bydgoszcz 2004.
- [46] J.D. Murphy, K. McCarthy, *The optimal production of biogas for use as a transport fuel in Ireland*, 30, 2111–2127, 2005.
- [47] J.W. Wandrasz, A.J. Wandrasz, *Paliwa formowane*, Wyd. „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa 2006.

# CHARAKTERYSTYKA DREWNA I SŁOMY JAKO PALIWA

## Drewno

Mianem drewna określa się surowiec otrzymany ze ściętych drzew i formowany przez obróbkę w różnego rodzaju sortymenty. Zachodzi zatem konieczność terminologicznego odróżnienia drzewa jako żyjącej rośliny drzewiastej od wyprodukowanego z niej surowca – drewna [1].

Drewno stanowi zespół komórek, które były częścią składową żyjącego organizmu drzewnego. Właściwości techniczne i możliwości stosowania zależą od cech, rozmieszczenia i chemicznej budowy komórek, z których drewno się składa. Drewno, ksylem (z gr. *ksylos* – drewno) jest złożoną tkanką roślin naczyniowych, zajmująca przestrzeń między rdzeniem a kambium. Jej główną funkcją jest rozprowadzanie wody i rozpuszczonych w niej soli mineralnych, pobieranych przez korzenie, po całej roślinie. U roślin strefy klimatów umiarkowanych wiosną, gdy rozpoczyna się okres wegetacji transportuje również substancje odżywcze z elementów spichrzowych (są to głównie korzenie i pnie) do rozwijających się pędów i liści. Większość komórek wchodzących w skład drewna ma zdrewniałe ścianki, przez co drewno pełni również funkcję mechaniczną [1, 2]. Drewno – w przeciwieństwie do surowców kopalnych – można produkować w sposób ciągły, bez wyczerpywania jego zasobów [3].

Jedną z możliwości gospodarczego zastosowania drewna jest jego spalanie w celu uzyskania energii (głównie ciepła). Na opał przeznaczają się drewno niskiej jakości (drewno wadliwe, drewno gałęziowe), trociny i części innych odpadów obróbki przemysłowej. Obecnie dąży się do ograniczenia spalania drewna leśnego do minimum, gdyż stanowi ono zbyt cenny surowiec [3].

Podstawowymi pierwiastkami wchodzącymi w skład drewna są: węgiel (49,5%), tlen (43,8%), wodór (6,0%) i azot (0,2%). Jest to skład uśredniony, zmienia się on w zależności od gatunku drewna. Główne związki chemiczne tworzące drewno to: celuloza, hemiceluloza i lignina [2].



Rys. 1. Skład chemiczny drewna (uśredniony) [2]

## Pozyskiwanie drewna odpadowego

Po zakończeniu procesu pozyskiwania drewna na terenie zrębu pozostaje znaczna ilość gałęzi, igliwia, liści i odciętych wierzchołków drzew. Do niedawna najczęściej spotykaną metodą zagospodarowania tej drobnicy zrębowej było jej układanie w stopy i spalanie. Jednak takie postępowanie, decyzjami Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych od 2004 roku zostało ograniczone. Coraz więcej nadleśnictw posiada specjalne maszyny do rozdrabniania resztek pozrębowych. Odpadowa biomasa stanowi rezerwar substancji pokarmowych dla zakładanych plantacji, jak również potencjalne źródło energii [4].



Rys. 2. Drewno grube (fot. M. Koprowski)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Podziękowania dla Marcina Koprowskiego z Pracowni Dendrochronologicznej (Wydział Biologii i Nauk o Ziemi UMK) za użyczenie zdjęć.

Surowiec drzewny może być pozyskiwany z lasów, jako drewno grube, drobne odpady drzewne o ograniczonych możliwościach wykorzystania w przemyśle, a także drewno opałowe pozyskiwane na plantacjach drzew szybkorosnących. Innym źródłem drewna opałowego mogą być zakłady przemysłu drzewnego (odpady w postaci trocin, zrębków, wiórów, odprysków, kory) oraz odpady komunalne (zużyte przedmioty drewniane). Drewno opałowe jest także wykorzystywane w formie przerobionej, w postaci brykietów czy peletów. Około 50% światowych zasobów drewna przetwarzanych jest na opał. Wskaźnik ten jest mniejszy w krajach rozwiniętych, większy w krajach rozwijających się, gdzie drewno wciąż jest najpopularniejszym paliwem [4, 5].

Kora to zewnętrzna warstwa drzewa charakteryzująca się niejednorodną wielkością, będąca odpadem przemysłu drzewnego i stanowiąca od 10 do 15% masy pozyskiwanego drewna. Jej wartość opałowa wynosi 18,5–20,0 MJ/kg, wilgotność 55–65%, zaś zawartość popiołu, który wykazuje tendencje do żuźlowania, stanowi 1–3% suchej masy [6].

Tabela 1. Wartość opałowa kory niektórych gatunków drzew [6]

Gatunek drewna	Części mineralne [%]	Wartość opałowa [MJ/kg]
Dąb	5,3	19,5
Sosna	2,9	21,0
Świerk	0,8	20,3
Sekwoja	0,4	19,4



Rys. 3. Kora (fot. M. Koprowski)

Zrębki drzewne to rozdrobnione drewno o średniej długości 5–50 mm, szerokości 10–20 mm i grubości 2–8 mm o charakterystycznym, romboidalnym kształ-

cie. Wymiary zrębków „energetycznych” zawarte są w przedziale 5–100 mm. Zrębki powstają [7]:

- podczas pierwszego trzebieńia drzewostanów, wierchołków i innych pozostałości po wyrębach,
- podczas obrabiania kłód w tartakach oraz
- z odpadów drzewnych w dużych zakładach przetwarzających drewno.

Zrębki są doskonałym paliwem dla kotłów, wykorzystuje się je również do produkcji płyt pilśniowych i jako topnik w hutnictwie. Wadą tego paliwa jest wrażliwość na zmiany wilgotności powietrza i podatność na choroby grzybowe. Zrębki powinny być składowane na suchym podłożu (np. podłożu betonowe) pod otwartym po bokach dachem. Dzięki wytwarzanemu ciepłu przez fermentację, świeże zrębki z lasu o wilgotności 70% mogą w przeciągu 2–3 miesięcy zmniejszyć zawartość wody do 35% [7, 8].



Rys. 4. Zrębki drzewne (fot. M. Koprowski)

Trociny stanowią około 10% drewna przerabianego w tartakach. Są także produktem ubocznym skrawania, frezowania itp. w zakładach obróbki drewna. Oczyszczone z drewna kawałkowego stanowią cenne paliwo i mogą być wykorzystywane w kotłowniach. Poziom wilgotności trocin jest zróżnicowany i waha się od 6 do 10% dla trocin podsuszonych i od 45 do 65% dla trocin z niedawno ściętego drzewa. Przy wilgotności 5–15%, zawartość popiołu wynosi mniej niż 0,5%. Fakt ten pociąga za sobą trudności związane z magazynowaniem, skłonność do zaparzenia (trociny bukowe) i podatność na zawilgocenie. Z tego względu trociny powinny być spalane w pierwszej kolejności [1, 8].

Wióry, podobnie jak trociny, są produktem ubocznym przemysłu drzewnego, powstającym podczas skrawania i frezowania. Cechą charakterystyczną wiórów jest niska wilgotność (5–15%), ich wartość opałowa wynosi około 15 MJ/kg, a podczas spalania powstaje niewiele zanieczyszczeń [1, 8].

Tarcica powstaje w wyniku przetarcia drewna okrągłego w sposób indywidualny bądź grupowy (decyduje liczba równocześnie pracujących pił) na pilarkach: ramowych (trakach), taśmowych bądź tarczowych. Ze względu na stopień obróbki tarcicę dzielimy na:

- tarcicę nieobrzynaną – o obrobionych dwóch powierzchniach równoległych, krawędzie boczne są obłe (bez obróbki). Otrzymywana jest przez przetarcie jednokrotne na trakach (piłach tartacznych) oraz
- tarcicę obrzynaną – o obrobionych czterech płaszczyznach i krawędziach czoła.

Pył drzewny powstaje przy obróbce (piłowaniu, frezowaniu, szlifowaniu) drewna [1, 8].

Opracowano wiele technologii pozwalających na pozyskanie biomasy drzewnej w sposób efektywny, ekonomiczny oraz przyjazny dla środowiska. W Lasach Państwowych dominującą technologią pozyskania surowca w użytkowaniu rębnym jest system drewna długiego LWS, w trakcie którego wyrobione dłużyce zrywane są przy użyciu skiderów, najczęściej słowackich LKT [9].

Podczas zbiórki drewna wykorzystuje się kombajn zrębowy tzw. harwester (rys. 5) wyposażony w pakietującą głowicę ścinkową; drzewa ścinane są za pomocą hydraulicznie napędzanego noża i pakietowane dzięki specjalnej konstrukcji górnej ramy i łap chwytających. Głowica automatycznie pakietuje od 1 do 10 drzew w jednym cyklu. Pakiet ściętych drzew układany jest wzdłuż szlaku. Technologia ta pozwala skutecznie pozyskiwać biomasę podczas zabiegów czyszczenia i trzebieży lasu [10, 11].



Rys. 5. Timberjack-Harvester 1270 w trakcie trzebieży [11]

Podczas pracy, operator harwestera układa okrzesywane gałęzie na jednej przymie. Gałęzie gromadzone są obok szlaku operacyjnego, tak by poruszający się harwester po nich nie jeździł. Przygotowane gałęzie są następnie podawane za

pomocą specjalnego żurawia do maszyny pakietującej. Urządzenie to jest montowane na ciągniku zrywkowym tzw. forwarderze (rys. 6). Dostarczone pozostałości są prasowane i wiązane plastikową taśmą co każde 40 cm, a następnie przecinane za pomocą piły na pojedyncze baloty. Przekiętny balot ma długość 3 m, średnicę około 60–80 cm i waży od 300 do 700 kg. Przy spaleniu wytwarza około 1 MWh energii. Z jednego hektara zrębu można uzyskać około 100–150 balotów. Wydajność balotowania w zależności od umiejętności operatora, ilości materiału i sposobu przygotowania wynosi 20–30 balotów na godzinę.



Rys. 6. Timberjack-Forwarder 1010. Załadunek i zrywka drewna [11]

Baloty czasowo mogą być magazynowane w lesie lub transportowane bezpośrednio do elektrociepłowni za pomocą standardowych samochodów do wywozu drewna. Baloty zwykle zrębkowane są w elektrociepłowni lub na składnicy, co umożliwia zastosowanie stacjonarnych bardzo wydajnych metod kruszenia lub zrębkowania. System pakietowania umożliwia magazynowanie balotów w łatwy i nieskomplikowany sposób. Sprasowane pozostałości nie tracą na wartości tak szybko jak biomasa pozostawiona luzem. Dzięki temu, możliwe jest przechowywanie tak przygotowanego surowca na okres zwiększonego zapotrzebowania na energię. Metoda ta zwiększa ekonomicznie uzasadnioną odległość transportową do ponad 200 km a nawet więcej w przypadku stosowania transportu kolejowego [10, 11].

Ze 100 m<sup>3</sup> drewna pozyskiwanego z gospodarki leśnej można otrzymać 10 m<sup>3</sup> kory, 15 m<sup>3</sup> drobnicy gałęziowej, 20 m<sup>3</sup> odpadów kawałkowych (ścinki, obrzyny), 19 m<sup>3</sup> trocin i zrębków oraz 36 m<sup>3</sup> tarcicy. Udziały poszczególnych rodzajów odpadów powstających w różnych gałęziach przemysłu drzewnego przedstawiono w tabeli 2 [12].

Drewno odpadowe powstaje również przy przerobie i obróbce oraz przy wytwarzaniu wyrobów drewnianych [1]. Produktem poużytkowym są więc wyroby i elementy z drewna i tworzyw drzewnych niezdatne do dalszej eksploatacji, zniszczone lub wycofane z użycia. Drewno poużytkowe różni się od drewna odpadowego, co wpływa na dalszy sposób jego zagospodarowania. Odpady drzewne o známym składzie jakościowym są gromadzone w miejscu przerobu surowca, natomiast występowanie drewna poużytkowego jest rozproszone, w małym zagęszczeniu i mocno zróżnicowane postaciowo oraz ilościowo. W ostatnich latach przemysł płyt drewnopochodnych, szczególnie płyt wiórowych i pilśniowych, zwiększył w przerabianym surowcu udział przemysłowych odpadów drzewnych, głównie najlepszych gatunków drewna odpadowego, które są łatwe do zagospodarowania. Całkowicie niewykorzystaną jeszcze bazą surowca drzewnego, której zasoby wzrastają w miarę rozwoju przemysłu i gospodarki, są zasoby drewna poużytkowego, nazywane drewnem staroużytkowym lub złomem drzewnym [13, 14].

Tabela 2. Ilość przemysłowej biomasy powstającej w przemyśle drzewnym w [tys. m<sup>3</sup>] [12]

Rodzaj biomasy	Przemysł				Łącznie
	tartaczny	stolarki budowlanej otworowej	płyt drewnopochodnych	meblarski	
kawałkowe	2575	31	437	760	3803
trociny i wióry	1805	72	145	70	2092
pył drzewny	-	2	93	220	315
kora	300	-	280	-	580
łącznie	4680	105	955	1050	6790

W praktyce, priorytetową czynnością w recyklingu drewna jest staranne rozsortowanie go na homogeniczne partie (grupy). Podział ze względu na pochodzenie i sposób wytworzenia wyrobów pozwoli na wyselekcjonowanie drewna przydatnego do materiałowego zagospodarowania, spalania lub zdeponowania na odpowiednim składowisku. Przez wstępne sortowanie drewna poużytkowego wyodrębnia się grupy asortymentowe (od I do IV). Do pierwszej grupy zaliczane są odpady z przerobu drewna, opakowania drzewne, palety. W drugiej sklasyfikowano tworzywa drzewne, meble i wyroby z tworzyw drzewnych. Opłotowania, stolarka okienna i drzwiowa, elementy konstrukcyjne zaliczane są do trzeciej grupy. Do ostatniej należy drewno zabezpieczone impregnatami. Obecnie podaje się, że ilość drewna poużytkowego pochodzącego z wymiany mebli i wyposażenia wnętrz wynosi ok. 120–140% poziomu z 1997 r. Zatem roczna podaż tego surowca to około 1,44–1,68 mln m<sup>3</sup> [13, 14].



W tabeli 3 przedstawiono charakterystykę wybranych właściwości drewna odpadowego [15].

Tabela 3. Charakterystyka wybranych właściwości drewna odpadowego [15]

Wyszczególnienie		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Jednostka	[%]	[MJ/kg]	[MJ/kg s.m.]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[MW/m <sup>3</sup> ]	[% s.m.]	[% s.m.]	[% s.m.]
Zrębki	całego drzewa	45–55	6–9	18,5–20,0	250–350	0,7–0,9	1–2	5,4–6,0	< 0,05	0,1–0,5
	gałęzi	50–60	6–9	18,5–20,0	250–400	0,7–0,9	1–3	6,0–6,2	< 0,05	0,3–0,5
	pnia	40–55	6–10	18,5–20,0	250–350	0,7–0,9	0,5–2	5,4–6,0	< 0,05	0,3–0,5
	pniaka	30–50	6–11	18,5–20,0	200–300	0,5–0,7	1–3	5,4–6,0	< 0,05	0,3–0,5
	odpadów tarcicy	10–50	6–15	18,5–20,0	150–300	0,7–0,9	0,4–1	5,4–6,4	< 0,05	0,1–0,5
	cięcia tarcicy	5–15	13–16	19,0–19,2	80–120	0,5–0,6	0,4–0,5	6,2–6,4	< 0,05	0,1–0,5
Odpad	z cięcia piłą	45–60	6–10	18,5–20,0	250–350	0,5–0,8	0,5–2,0	6,2–6,4	< 0,05	0,1–0,5
	ze sklejki	5–15	15–17	19,0–19,2	200–300	0,9–1,1	0,4–0,8	6,0–6,4	< 0,05	0,1–0,5
Pył	z cięcia piłą	45–60	6–10	19,0–19,2	250–350	0,5–0,7	0,4–0,5	6,2–6,4	< 0,05	0,1–0,5
	mielenia tarcicy	5–15	15–17	19,0–19,2	100–150	0,5–0,7	0,4–0,8	6,2–6,4	< 0,05	0,1–0,5
Kora		50–65	6–9	18,5–20,0	250–350	0,5–0,7	1–3	5,7–5,9	< 0,05	0,3–0,5
Tarcica		15–30	12–15	18–19	150–250	0,7–0,8	1–5	5,5–6,0	< 0,1	0,1–0,5

1 – zawartość wilgoci (świeży materiał), 2 – wartość opałowa świeżego materiału, 3 – wartość opałowa, 4 – gęstość nasypowa, 5 – ilość uzyskiwanej energii z jednostki objętości, 6 – zawartość popiołu, 7 – zawartość wodoru, 8 – zawartość siarki, 9 – zawartość azotu.

Wartość opałowa drewna zależy od gatunku, wilgotności, popielności, a także ewentualnej zawartości żywicy oraz od udziału celulozy i ligniny. Drewno o dużej wilgotności daje mniejszą liczbę kalorii, gdyż na skutek obecności wody zawiera ono w jednostce ciężaru mniej substancji palnych, poza tym część energii musi zostać zużyta na odparowanie wody. Decydujący wpływ na wartość opałową drewna wywiera jego ciężar właściwy. Ciężkie gatunki drewna mają większą wartość opałową niż gatunki o niskim ciężarze właściwym. Drewno nadgniłe, na skutek częściowego zniszczenia celulozy i ligniny zawiera mniejszą ilość substancji palnej niż drewno zdrowe [1, 16].

Znając elementarny skład chemiczny drewna oraz ciepło spalania jego składników, można określić ciepło spalania według wzoru Dulonga [16]:

$$W_g = 8100C + 34000 \left( H + \frac{O}{8} \right) + 2500S \text{ [kcal/kg]}$$

gdzie:  $W_g$  – ciepło spalania drewna suchego [kcal/kg], C, H, O, S – udziały węgla, wodoru, tlenu i siarki [kg/kg paliwa].

Współczynniki przy poszczególnych symbolach odpowiadają w zaokrągleniu ciepłu spalania poszczególnych składników paliwa. Po wyrażeniu poszczególnych wartości w procentach, uwzględniając również iż drewno (praktycznie) nie zawiera siarki, wzór Dulonga przybiera postać:

$$W_g = 81C + 340\left(H + \frac{O}{8}\right) \text{ [kg/kcal]}$$

Większą wartość opałową ma drewno drzew liściastych dużej gęstości jak: grab, buk, dąb, brzoza niż drewno drzew iglastych (tabela 4). Wilgotność drewna przeznaczonego do spalania nie powinna być większa od 25%, a optymalna jej wartość zawiera się w granicach 10–18% [17].

Więcej informacji o drewnie znajduje się w opracowaniach Krzysika [1], Korprowskiego [18, 19, 20]; z kolei technologię pozyskiwania drewna na cele energetyczne szeroko przedstawiono w opracowaniach Lewandowskiego [7] i Eberta [17].

Tabela 4. Wartości energetyczne różnych rodzajów drewna [17]

Wilgotność [%]	Wartość opałowa [GJ/m <sup>3</sup> ]					
	buk, dąb	brzoza	wierzba	modrzew	sosna, olcha	świerk
0	10,8	9,69	6,65	8,74	7,98	7,60
15	10,6	9,47	6,50	8,55	7,80	7,43
20	10,5	9,38	6,44	8,46	7,73	7,36
25	10,4	9,28	6,37	8,37	7,64	7,28
30	10,2	9,17	6,29	8,27	7,55	7,19
35	10,1	9,03	6,20	8,15	7,44	7,08
40	9,92	8,87	6,09	8,00	7,31	6,96
45	9,71	8,69	5,96	7,84	7,16	6,81
50	9,46	8,47	5,81	7,64	6,97	6,64
55	9,16	8,19	5,62	7,39	6,75	6,43
60	8,78	7,85	5,39	7,08	6,47	6,16

## Słoma

Słoma to dojrzałe lub wysuszone źdźbła roślin [2]. Przyjęto się używać tego określenia w stosunku do zbóż, roślin strączkowych, lnu i rzepaku. Podstawowym składnikiem słomy jest włókno surowe i związki bezazotowe. Słoma charakteryzuje się wysoką zawartością suchej masy (do 85%), a także zdolnością chłonięcia wody i gazów. Jako odpad produkcji nasiennej ma szerokie zastosowanie w produkcji roślinnej, ogrodniczej, budownictwie, ostatnio również w energetyce [21, 22].

Najstarszą metodą zagospodarowania słomy było i wciąż jeszcze jest użycie jej jako materiału ściółkowego. Słoma może być również cennym nawozem organicznym, a najprostszą metodą jej zagospodarowania jest rozdrobnienie i przyoranie bezpośrednio po zbiorze [21, 22].

W energetyce znajduje zastosowanie słoma wszystkich rodzajów zbóż oraz rzepaku i gryki. Za szczególnie cenną uchodzi słoma żytnia, pszenna, rzepakowa, gryczana, bobikowa i słonecznikowa oraz osadki kukurydzy. Kraje posiadające mało zwierząt gospodarskich i produkujące dużo zbóż i rzepaku starają się znaleźć alternatywne formy wykorzystywania słomy. Na przykład Kanadyjczycy używają jej do produkcji płyt, zaś Duńczycy ponad połowę słomy wykorzystują na cele energetyczne [23, 24].

Budowa fizjologiczna słomy zbóż i rzepaku jest podstawową cechą odróżniającą ją od konwencjonalnych nośników energii. Przestrzenno-rurkowa budowa źdźbła słomy powoduje, że jest to materiał objętościowy, którego struktura charakteryzuje się nadmiarem powietrza. Skład chemiczny słomy uzależniony jest od warunków glebowych, klimatycznych oraz działania człowieka. W tabeli 5 przedstawiono wartość opałową słomy pszennej, jęczmiennej i kukurydzianej [25].

Tabela 5. Wartość opałowa słomy [25]

Rodzaj słomy	Wartość opałowa słomy świeżej [MJ/kg]	Zawartość wilgoci w słomie świeżej [%]	Wartość opałowa słomy suchej [MJ/kg]
pszenna	12,9–14,9	12–22	17,3
jęczmienna	12,0–13,9	12–22	16,1
kukurydziana	3,3–7,2	50–70	16,8

Obserwowane w ostatnich latach nagminne wypalanie po żniwach słomy na polu jest zjawiskiem nagannym, niepożądaną formą zagospodarowania nadwyżki słomy. Spalanie słomy na polu stanowi wymierną stratę gospodarczą, powoduje też degradację środowiska naturalnego. W jego wyniku niszczone jest materia organiczna, następuje zanieczyszczenie powietrza znaczną ilością gazów i lotnych pyłów powstających w procesie swobodnego spalania słomy. Działanie wysokiej temperatury na górne warstwy gleby zabija życie biologiczne, niszczy strukturę gruzelkową, co jest bardzo szkodliwe dla stosunków powietrzno-wodnych w glebie [24].

W Polsce produkuje się rocznie około 25 Tg słomy. Przez dziesięciolecia wykorzystywano ją głównie na potrzeby produkcji zwierzęcej, jako materiał ściółkowy i paszę. Służyła także do przykrywania kopców, ocieplania budynków i przygotowania mat w gospodarstwach ogrodniczych. Od 1983 roku zbiory słomy zaczęły przewyższać zapotrzebowanie wynikające z produkcji rolniczej. W latach 1983–1990 średnioroczna nadwyżka ponad zużycie w rolnictwie wyniosła

5354 Gg, a w okresie 1995–2001 już 10881 Gg. W rachunku tym uwzględniono także zapotrzebowanie słomy na przyoranie, dla utrzymania zrównoważonego bilansu substancji organicznej w glebie. Powiększające się nadwyżki słomy skłaniają do poszukiwania efektywnego sposobu ich zagospodarowania. Jedną z możliwości jest wykorzystanie słomy w energetyce. Jej wartość opałowa wynosi bowiem od 14,3 do 15,2 MJ/kg, pod względem energetycznym 1,5 Mg słomy równoważne jest około jednej tonie węgla kamiennego. Udane wdrożenia wykazały, że istnieją techniczne możliwości wykorzystania słomy jako paliwa nie tylko do ogrzewania mieszkań i budynków inwentarskich w gospodarstwach rolnych, ale także w kotłowniach komunalnych [26].



Rys. 7. Słoma na polu (fot. D. Kamiński)<sup>22</sup>

Wartość opałowa słomy jako paliwa energetycznego uzależniona jest od jej gatunku, wilgotności oraz techniki przechowywania. Bardziej wskazane jest użycie tzw. słomy szarej, czyli pozostawionej przez pewien czas po ścięciu na działanie warunków atmosferycznych, a następnie wysuszonej (tabela 6). Taki produkt charakteryzuje się nieco lepszymi właściwościami energetycznymi oraz mniejszą emisją związków siarki i chloru od słomy żółtej, czyli świeżo ściętej. Ważną sprawą jest również wilgotność paliwa. Wartość opałowa słomy suchej wynosi średnio od 16 do 18 MJ/kg, dla świeżej parametr ten wynosi maksymalnie około 15 MJ/kg [27].

### *Technologia zbioru i magazynowania słomy*

Słoma przeznaczona na cele energetyczne zbierana jest za pomocą pras. Podstawowym parametrem warunkującym przystąpienie do zbioru i prasowania sło-

---

<sup>22</sup> Podziękowania dla Dariusza Kamińskiego z Zakładu Taksonomii i Geografii Roslin (Wydział Biologii i Nauk o Ziemi UMK) za udzielenie zdjęcia

my jest jej wilgotność, która nie powinna przekraczać 15%. Jeżeli jest to możliwe powinna też być wcześniej poddana procesowi więdnięcia. Będące na wyposażeniu rolnym prasy podzielić można na trzy zasadnicze grupy [29, 30, 31]:

- formujące małe bele prostopadłościennie o stopniu zagęszczenia do 130 kg/m<sup>3</sup>,
- zwijające, formujące wielowymiarowe bele cylindryczne o stopniu zagęszczenia do 150 kg/m<sup>3</sup> oraz
- formujące wielowymiarowe bele prostopadłościennie o stopniu zagęszczenia do 180 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela. 6. Porównanie parametrów słomy z innymi paliwami [28]

Parametr	Słoma		Węgiel	Gaz ziemny	Zrębki drzewne	
	żółta	szara				
Wilgotność [% wag.]	20	20	12	0	40	
Zawartość popiołu [% s.m.]	4	3	12	0	1–2	
Zawartość [% wag.]	węgla	42	43	59	75	50
	tlenu	37	38	7,3	0,9	43
	wodoru	5,0	5,2	3,5	24	6,0
	chloru	0,55	0,30	0,08	-	6,00
	azotu	0,34	0,41	1,00	0,90	0,30
	siarki	0,16	0,13	0,80	0,00	0,05
Składniki lotne [% wag.]	70	73	25	100	70	
Wartość opałowa [MJ/kg]	15,4	16,0	25,0	48,0	10,4	
Ciepło spalania [MJ/kg]	18,2	18,7	32,0	48,0	19,4	
Temperatura mięknięcia popiołu [°C]	950	1100	1175	-	-	
Temperatura płynięcia popiołu [°C]	1150	1250	1275	-	-	

Podczas żniw kombajn pozostawia słomę jako pokos na polu. Następnie jest ona zbierana i dla potrzeb ogrzewnictwa prasowana w bele lub baloty. Małe bele mają wymiary prostopadłościanu i masę ok. 10–15 kg i są powszechnie stosowane na ściólkę dla zwierząt w małych i średnich gospodarstwach. Mogą być używane jako paliwo, jednak ze względów ekonomicznych powinny być stosowane tylko do najmniejszych kotłów o mocy do 30 kW, przystosowanych do spalania słomy, ogrzewających pojedyncze budynki inwentarskie lub mieszkalne. Podstawową wadą tych bel jest mały stopień zmechanizowania zbioru, transportu i składowania oraz duża ilość sznurka potrzebnego przy prasowaniu słomy. Zaletą jest możliwość ręcznego załadunku słomy do pieca, brak konieczności zapewnienia dużych placów manewrowych przed piecem i dojazdu z poziomu terenu, łatwość formowania stert magazynowych i powszechność występowania pras zbierających [29, 30, 31].

Bele średnie rzadko występują w naszym kraju, ich wymiary to 0,8/0,8/1,7 m i masa ok. 150 kg, stosowane są jako pasza i ściółka dla zwierząt oraz do ogrzewa-

nia średnich gospodarstw. Obecnie, w Polsce może wystąpić zapotrzebowanie na tego typu bele dla średnich gospodarstw i pojedynczych bloków mieszkalnych ogrzewanych kotłami o mocy od 35 KW do 99 KW, w których średnica wewnętrzna komory spalania wynosi 900 lub 1300 mm. Bele średnie okrągłe o szerokości 1,2 m i średnicy 0,7–1,0 m mogą być zwijane w prasach zwijających wyposażonych w regulację średnicy lub ciężaru beli [29, 30, 31].

Bele okrągłe duże są obecnie powszechnie stosowaną formą zbioru słomy w średnich i dużych gospodarstwach. Ich normalna szerokość wynosi 1,2 m, natomiast średnica 1,5 m. Masa okrągłej beli słomy waha się w granicach 200–300 kg. Są one stosowane jako pasza i ściółka dla zwierząt, a także w niektórych przypadkach jako sposób składowania niechcianej słomy. Dla potrzeb grzewczych są to obecnie największe bele wykorzystywane do spalania w kotłach okresowych – pracujących cyklicznie (spalanie całej beli słomy). Zaletą takiej formy podawania paliwa są: niskie nakłady na zbiór słomy, wysoki stopień mechanizacji zbioru, stosunkowo niskie koszty inwestycyjne, niska podatność słomy na wtórne zawilgocenie podczas składowania, łatwy załadunek beli do pieca przy pomocy ciągnika wyposażonego w podnośnik widłowy, stosunkowo długi okres spalania jednej porcji paliwa załadowanej do kotła, trwający do 4 godzin oraz powszechność występowania w Polsce pras zwijających. Do wad dużych bel należy zaliczyć: duże powierzchnie placów składowych lub konieczność stosowania specjalistycznego sprzętu umożliwiającego składowanie w więcej niż trzech warstwach, podatność na zamakanie wierzchniej warstwy beli (do ok. 2 cm) w przypadku składowania w stertach nieprzykrywalnych [29, 30, 31].

Bele Hesstona są to bele prostokątne o wymiarach 1,2/1,3/2,4 m i masie ok. 450 kg. Wymagają specjalistycznych pras zbierających i w zasadzie są wykorzystywane wyłącznie w ciepłowniach opalanych słomą, w których występują piece o stałej wydajności. Wysoki stopień zgniotu słomy i wymiary prostopadłościanu pozwalają na składowanie słomy w wysokich stertach dochodzących do kilkunastu metrów, co znacznie ogranicza powierzchnie magazynowe. W ciepłowniach wykorzystujących bele typu Hesstona stosuje się podawanie słomy do kotła w sposób ciągły. Pozwala to na uzyskiwanie dużych wydajności ciepłowni pracujących równomiernie. Koszty dodatkowe zakupu specjalistycznego sprzętu do zbierania i transportu beli są rekompensowane przez wysoką automatyzację procesów podawania i spalania słomy [29, 30, 31].

Na polskim rynku można kupić urządzenia do prasowania słomy. Przykładowo, oferowane w sieci dealerskiej POL-MOT Warfama S.A. prasy GP 1260 produkowane przez norweską firmę ORKEL A/S charakteryzują się najnowocześniejszymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi zapewniającymi doskonałe parametry pracy, jak również gwarantują wyjątkową wytrzymałość i niezawodność pras [32]. Specjalistyczne zastosowanie walców komory zapewnia doskonałą przyczepność prasowanej beli, nawet w przypadku materiału podatnego na ślizganie się podczas procesu zwijania. W prasie typu GP 1260 (rys. 8) został zastosowany system łożysk ślizgowych, w wyniku czego producent zapewnia bezawaryjną eksploatację urządzenia przez

długi okres. Komfort obsługi zapewnia oferowane w standardzie centralne smarowanie tulei i łańcuchów, jak również osłony z włókna szklanego, otwierane w prosty sposób zapewniający doskonały dostęp do wielu zespołów prasy w celu dokonania przeglądu technicznego. Standardowe wyposażenie prasy stanowi zespół wiążący siatką obejmujący dwa zwoje siatki, zapewniające znaczne skrócenie przerw w pracy niezbędnych do wymiany siatki. Prasa może być wyposażona w koła jezdne różnych rozmiarów, o szerokości od 400 do 700 mm, umożliwiające uzyskanie niewielkiego nacisku na podłoże i pracę na grzącym gruncie oraz minimalizowanie negatywnego wpływu na strukturę gleby [32].



Rys. 8. Prasa typ GP 1260 [32]

Problemy transportu słomy należy rozwiązywać w zależności od warunków lokalnych. Transport na krótkie odległości może odbywać się przy pomocy ciągników rolniczych. Przy występowaniu większych odległości należy stosować zestawy samochodowe. Orientacyjna odległość, z której jest opłacalny transport słomy wynosi 100 km. Przy większych odległościach inne rodzaje paliwa mogą okazać się bardziej ekonomicznie uzasadnione. Zaletą wykorzystania słomy jako paliwa, szczególnie przy niewielkich odległościach miejsca zbioru od kotłowni jest możliwość zmagazynowania słomy w miejscu zbioru. Po zakończeniu prac w rolnictwie i rozpoczęciu sezonu grzewczego wykorzystuje się wolny sprzęt rolniczy do transportu słomy do kotłowni. Dodatkowe zatrudnienie pozwala zmniejszyć skutki braku pracy na terenach wiejskich w okresie zimowym. Szczegółowe rozwiązania zakupu, zbioru i transportu słomy do kotłowni będą zależą od warunków lokalnych, przy czym w warunkach duńskich wykształcił się system kontraktacji słomy i dostarczania przez rolników z własnych magazynów do kotłowni w uzgodnionych terminach, co wydaje się rozwiązaniem optymalnym [29, 30, 31, 33].

Słoma jest zazwyczaj transportowana do miejsca składowania natychmiast po belowaniu. Składowana w stanie suchym, jest bardziej przydatna do produkcji energii oraz może być dużej przechowywana. Różne metody składowania sło-

my mają wpływ na jakość słomy i jej wilgotność oraz na koszty składowania. Przechowywanie słomy może odbywać się w stodołach typu holenderskiego, stogach i stertach. Z informacji uzyskanych od rolników i firm eksploatujących kotłownie opalane słomą wynika, że w naszych warunkach klimatycznych jest dopuszczalne składowanie na wolnym powietrzu w stogach i stertach. Składowanie małych balotów w stogach powoduje niewielki wzrost zawilgocenia wierzchnich warstw stogu. Przykrycie stogu od góry folią lub brezentem powinno zapewnić możliwość wykorzystania całej słomy na potrzeby grzewcze. Trudniejsza sytuacja występuje w przypadku bel zwijanych. Ze względów technicznych nie można układać stert wyższych niż 3 warstwy. Przykrycie stert wymaga dużych ilości folii lub brezentu. Częściowym rozwiązaniem jest sposób zwijania beli, w którym ułożenie włókien ułatwia spływ wody. Rozwiązaniem zabezpieczającym słomę przed wilgocią w belach zwijanych jest foliowanie beli. Podraża to niestety koszty pozyskania słomy i wprowadza konieczność zdejmowania folii przed wprowadzeniem beli do pieca. Odrębnym problemem jest spalanie starych, wieloletnich zapasów słomy. Przeprowadzone doświadczenia wykazały możliwość spalania tych zapasów pod warunkiem, że nie wystąpiły procesy gnilne wewnątrz beli [29, 30, 31, 33].

Szersze informacje na temat pozyskania słomy ma cele energetyczne znaleźć można w pracach Denisiuka [22] oraz Grzybka [33].

## Literatura

- [1] F. Krzysik, *Nauka o drewnie*, PWN, Warszawa 1978.
- [2] <http://www.wikipedia.pl> (wejście 02.09.09).
- [3] M. Domański, *Drewno jako materiał energetyczny*, Wyd. SGGW, Warszawa 2007.
- [4] W. Pokorski, *Kompleksowe wykorzystanie odpadów tartacznych, leśnych i roślin energetycznych do produkcji energii*, „Biomasa dla elektroenergetyki. Szanse i problemy”, 204–213, Wyd. „Wieś Jutra”, Warszawa 2007.
- [5] Cz. Śleziak (red.), *Odnawialne źródła energii jako element rozwoju lokalnego. Przewodnik dla samorządów terytorialnych i inwestorów*, Wyd. EC BREC/IMBER, Warszawa 2003.
- [6] W. Kordylewski, *Spalanie i paliwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wydanie IV, Wrocław 2005.
- [7] W.M. Lewandowski, *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, Warszawa, 2007.
- [8] <http://www.agroenergetyka.pl> (wejście 03.09.09).
- [9] M. Maksymiak, A. Grieger, *Analiza wydajności pracy przy maszynowym pozyskiwaniu drewna na przykładzie harwestera Palmet 901.3 i forwardera Palmet 840.2*, Inżynieria Rolnicza 1(99), 273–281, 2008.
- [10] <http://www.deere.com> (wejście 07.09.09).
- [11] <http://www.katowice.lasy.gov.pl> (wejście 07.09.09).
- [12] L. Janikowicz, *Biomasa w Polsce*, Ekologia i Energetyka, 601-604, sierpień 2006.
- [13] L. Danecki, *Recykling zużytych mebli i odpadów tworzyw drzewnych*, Biuletyn Informacyjny OBRPPD nr 1–2, 2005.
- [14] A. Frühwald, *Wood industry in Europe – Main Trends*, *Drewno* 46 (169), 73–90, 2003.



- [15] M. Hałuzo, R. Musiał, *Ocena zasobów i potencjalnych możliwości pozyskania surowców dla energetyki odnawialnej w województwie pomorskim*, Biuro Planowania Przestrzeni w Słupsku, Słupsk 2004.
- [16] E. Mikołajczak, *Wood waste value as a function of energy production profitability criteria*, Journal of Agribusiness and Rural Development 3(9), 111–118, 2009.
- [17] H-P. Ebert, *Palenie drewnem we wszystkich rodzajach pieców*, Wyd. Studio Astropsychologii, Białystok 2003.
- [18] M. Koprowski, A. Zielski, *Dendrochronology of Nowary spruce (Picea abies (L.) Karst.) from two range centres in lowland Poland*, Tress 20(3), 383–390, 2006.
- [19] M. Koprowski, *Dendrochronologiczna analiza przyrostów rocznych buka zwyczajnego (Fagus sylvatica (L.)) w Nadleśnictwie Iława*, Sylwan 5, 44–50, 2006.
- [20] M. Koprowski, M. Gawenda, *Dendrochronologiczna analiza przyrostów rocznych jodły pospolitej (Abies alba Mill.) na Pojezierzu Olsztyńskim (Nadleśnictwo Wichrowo)*, Sylwan 11, 35–40, 2007.
- [21] P. Gradziuk, *Możliwości wykorzystania surowców pochodzenia rolniczego na cele energetyczne*, Roczniki Naukowe 1 (3), 233–238, 1999.
- [22] W.H. Denisiuk, J. Piechocki, *Techniczne i ekologiczne aspekty wykorzystania słomy na cele grzewcze*, Wyd. Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2005.
- [23] <http://www.dsvpoznau.eu/pl> (wejście 04.09.09).
- [24] P. Gradziuk, *Możliwości energetycznego wykorzystania słomy*, Postępy Nauk Rolniczych 5, 31–39, 1995.
- [25] J. Szlachta, *Energetyczne aspekty wykorzystania biomasy*, Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Dolnośląski Wojewódzki Ośrodek Doradztwa Rolniczego z/s w Świdnicy, Świdnica, 2001.
- [26] P. Gradziuk, *Ekonomiczne i ekologiczne aspekty wykorzystania słomy na cele energetyczne w lokalnych systemach grzewczych*, Acta Agrophysica 8(3), 591–601, 2006.
- [27] P. Łepkowski, *Potencjał biomasy mamy większy niż możliwości jej spożytkowania. Szara słoma lepsza od żółtej*, Energia Gigawat – kwiecień 2003.
- [28] R. Wichowski, *Wykorzystanie słomy jako źródła energii odnawialnej w rolnictwie na przykładzie Danii*, Seminarium krajowe, Wykorzystanie energii odnawialnej w rolnictwie, IBMER, 1994.
- [29] M. Kaszak, *Efektywność energetyczna produkcji nośników energii z biomasy, praca inżynierska*, Bydgoszcz 2006.
- [30] <http://www.kape.gov.pl> (wejście 04.09.09).
- [31] <http://www.gigawat.net.pl> (wejście 04.09.09).
- [32] <http://www.jedrus.com.pl> (wejście 04.09.09).
- [33] A. Grzybek, P. Gradziuk, K. Kowalczyk, *Słoma – energetyczne paliwo*, Wyd. Polskie Towarzystwo Biomasy PolBiom, Warszawa 2001.

# PLANTACJE ROŚLIN ENERGETYCZNYCH Z PRZEZNACZENIEM NA BIOMASĘ

Na wstępie należy zaznaczyć, iż pojęcie „roślin energetycznych” jest bardzo szerokie. W tym rozdziale przedstawiono charakterystykę roślin, które uprawia się przede wszystkim na „stałą” biomasę. Z niektórych roślin można pozyskać biomasę, biopaliwo (olej roślinny, alkohol) oraz biogaz. Niektóre rośliny „energetyczne” zostaną opisane w rozdziale poświęconym biopaliwom (np. rośliny oleiste).

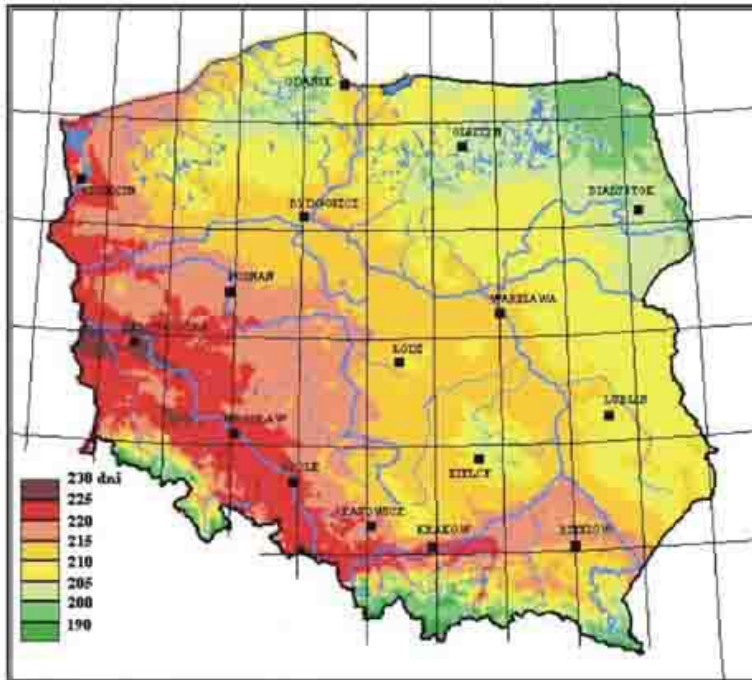
Analizy i prognozy wykazały, że należy liczyć się z dużym deficytem drewna i to już w niezbyt odległej przyszłości. Dlatego też prowadzenie badań dotyczących uprawy i wykorzystania szybko rosnących drzew i form krzewiastych dla energetyki i przetwórstwa chemicznego jest celowe i uzasadnione [1].

Rośliny energetyczne powinny charakteryzować się dużym przyrostem rocznym, wysoką wartością opałową, znaczną odpornością na choroby i szkodniki oraz stosunkowo niewielkimi wymaganiami glebowymi. Niezwykle istotną sprawą jest również możliwość mechanizacji prac agrotechnicznych związanych z zakładaniem plantacji oraz zbieraniem plonu. Plantacja roślin energetycznych na biomasę może być użytkowana przez okres 15–20 lat [1, 2].

## Warunki klimatyczno-glebowe uprawy roślin energetycznych w Polsce

Polska jest krajem o klimacie przejściowym, gdzie występuje znaczna zmienność elementów meteorologicznych w poszczególnych latach. Najbardziej niestabilnym czynnikiem jest ilość opadów. Zdarzają się lata o dużej ilości opadów, nawet ponad 750 mm i lata suche o opadach w ilości około 500 mm. Korzystnym dla uprawy roślin energetycznych jest fakt, że 2/3 opadów przypada na okres ich wegetacji. Długość okresu wegetacyjnego liczona od ostatnich wiosennych do pierwszych jesiennych przymrozków jest dość wyrównana i waha się od 230 dni na zachodzie Polski do 200 na wschodzie (rys. 1.). Czas ten jest wystarczający dla wzrostu i rozwoju większości roślin energetycznych. Dobowe wahania temperatury nie powodują strat plonu biomasy w okresie jej wzrostu. Na podstawie wie-

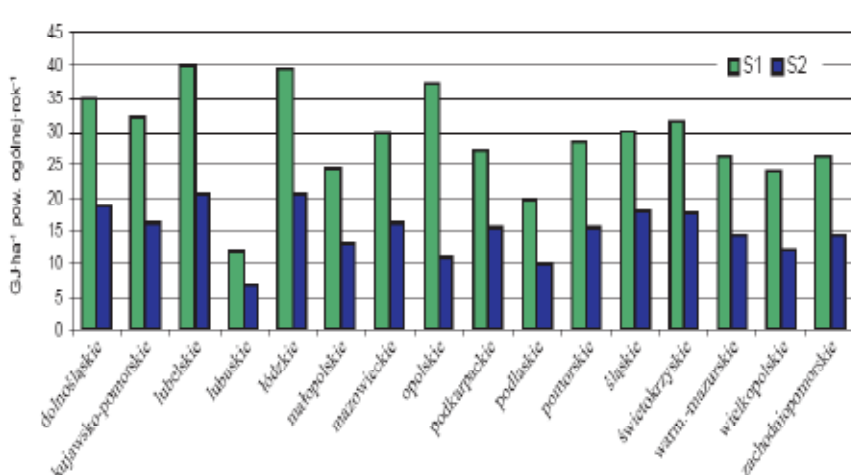
oletnich obserwacji, średniomiesięczne wahania dobowe temperatury w miesiącu lipcu wynoszą 7,1°C. Korzystnym faktem jest również to, iż Polska jest krajem w przeważającej części nizinnym. Większość terytoriów użytków rolnych leży na poziomie nieprzekraczającym 300–350 m n.p.m. i o nachyleniu zbocza nieprzekraczającym 10° [3].



Rys. 1. Długość okresu wegetacyjnego w Polsce [4]

W Polsce, największą powierzchnię (80%) zajmują gleby bielcowe i brunatne. Największe kompleksy występują w Wielkopolsce, na Pojezierzu Mazurskim, Podlasiu oraz w zachodniej części Pojezierza Pomorskiego. Gleby bielcowe są najgorsze pod względem przydatności rolniczej, powstają na podłożu piaszczystym, występują na terenie całej Polski, a zwłaszcza na wschodnim terenie Pojezierza Pomorskiego i północnej części Niziny Mazowieckiej. Mady zajmują około 4–5% powierzchni kraju, występują na Żuławach Wiślanych, wzdłuż Wisły, Odry, Sanu, Bugu oraz Warty. Bardzo żyzne czarnoziemy zajmują około 1% powierzchni Polski. Występują na Wyżynie Lubelskiej w Kotlinie Sandomierskiej oraz w południowej części Wyżyny Kielecko-Sandomierskiej. Czarne ziemie powstają na podłożu podmokłym, zabagnionym. Zajmują 1–2% powierzchni kraju, występują głównie na Kujawach. Gleby bagienne zajmują około 9% powierzchni kraju. Należą do nich również gleby torfowe. Występują w okolicy rzeki Biebrzy i Narwi na Polesiu Lubel-

skim. Rzędziny zajmują około 1% powierzchni Polski. Występują na Wyżynie Lubelskiej, Krakowsko-Częstochowskiej oraz Kielecko-Sandomierskiej [3, 5].



Rys. 2. Potencjał produkcji roślin energetycznych w przeliczeniu na powierzchnię województw w GJ/(ha·rok) dla scenariuszy S1 i S2 [6]



Rys. 3. Potencjalne plony wierzby w zależności od promieniowania słonecznego [7]

E. Gańko [6] ocenia całkowity areal gruntów potencjalnie dostępnych pod uprawy energetyczne w Polsce na 4,1 miliona ha dla scenariusza S1 (intensywna uprawa roślin) oraz 3,2 miliona ha dla S2 (półintensywna uprawa roślin). Potencjał techniczny produkcji roślin energetycznych w Polsce na dostępnych gruntach został oszacowany odpowiednio dla S1 i S2 na 682 oraz 350 PJ/rok. Gańko [6] dokonała normalizacji wyników odnosząc potencjał wyrażony w PJ/rok do całkowitej powierzchni danego województwa, otrzymując wynik w GJ/(ha·rok) (rys. 2.).

Na plon biomasy roślin energetycznych ma wpływ również ilość promieniowania słonecznego padającego na plantację. Przykładowo, model symulacyjny zaproponowany przez Borka [7] wskazuje, iż średni plon w warunkach Polski wynosi 15,7 Mg s.m./ha·rok, przy czym najkorzystniejsze warunki występują na północy Polski (rys. 3.).

## Przegląd roślin energetycznych z przeznaczeniem na biomasę

Poniżej przedstawiono w porządku alfabetycznym charakterystykę roślin, które można uprawiać na cele energetyczne. Szczegółowo opisano najpopularniejszą w Polsce roślinę energetyczną – wierzbę wiciową.

### *Konopie włókniste*

Uprawa **konopi włóknistych** (*Cannabis sativa L. vulgaris*) znana jest od wielu lat jako źródło włókna wykorzystywanego w produkcji tekstyliów, lin, powrozów, itp. Wstępne wyniki doświadczeń wskazują na możliwość wykorzystania biomasy konopi włóknistych jako surowca dla celów energetycznych. Dotychczas na opał przeznaczano tylko paździerz konopne, stanowiące produkt uboczny podczas pozyskiwania włókna ze słomy [8, 9].

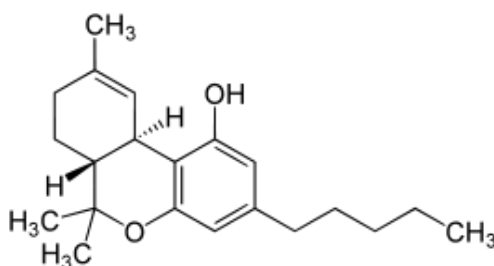
Konopie włókniste wymagają gleb zwięzłych, bogatych w próchnicę i zasobnych w składniki pokarmowe, o odczynie obojętnym lub lekko zasadowym. Dobrze rozwinięty system korzeniowy zapewnia przewietrzanie gleby oraz dostęp do wody i składników pokarmowych z głębszych jej warstw [11]. W efekcie, konopie wpływają na poprawę struktury gruzełkowej gleb i stanowią dobry przedplon w zmianowaniach z dużym udziałem zbóż. Aktualnie, w rejestrze krajowym COBORU [12] znajdują się cztery odmiany jednopienne konopi włóknistych, wyhodowane w Instytucie Włókien Naturalnych w Poznaniu: Białobrzeskie, Beniko, Silesia i Tygra. Przy zapewnieniu poprawnej agrotechniki i sprzyjającej pogodzie, w/w odmiany plonują na poziomie 12–15 Mg s.m./ha. Prowadzone są prace genetyczno-hodowlane nad uzyskaniem nowych odmian, plonujących powyżej 20 Mg s.m./ha przy śladowych ilościach tetrahydrokanabinolu (THC) (rys. 5.) [13].

Uprawa konopi korzystnie wpływa na środowisko. Konopie w zasadzie nie wymagają stosowania środków ochrony roślin. Jeden hektar konopi wiąże około 2,5 Mg CO<sub>2</sub>, przyczyniając się do ograniczenia efektu cieplarnianego. Konopie

można uprawiać na terenach skażonych, gdzie absorbując metale ciężkie, takie jak kadm, ołów, cynk, miedź przyczyniają się do rekultywacji tych terenów [15].



Rys. 4. Konopie włókniste (*Cannabis sativa L. vulgaris*) [10]



Rys. 5. Wzór strukturalny tetrahydrokanabinolu (THC)

Tabela 1. Ważniejsze cechy rolniczo-użytkowe poszczególnych odmian konopi [14]

Odmiana	Plon słomy [Mg/ha]	Plon nasion [Mg/ha]	Zawartość celulozy [%]	Masa 1000 ziaren [g]	Zawartość THC [%]
Białobrzeskie	143	9,5	47,0	13,7	0,038
Beniko	146	7,5	49,0	14,3	0,026
Silesia	142	10	47,3	14,0	0,041
Tygra	143	10	47,4	14,0	0,037

### *Kostrzewa trzcinowa*

**Kostrzewa trzcinowa** (*Festuca arundinacea*) należy do traw wczesnych, charakteryzujących się szybkim tempem wzrostu i rozwoju oraz wysoką wydajnością, w związku z czym może być uprawiana na cele energetyczne. W ostatnim czasie bywa także uprawiana w czystym siewie na gruntach ornych. Jest to trawa luźnokępkowa, wysoka, wieloletnia. Krzewi się śródpochwowo, a niekiedy wytwarza długie rozłogi podziemne, z których wyrastają pędy. Ma silnie rozwinięty system korzeniowy, sięgający nawet do 2 m głębokości, co zwiększa jej odporność na suszę [8, 16].



Rys. 6. Kostrzewa trzcinowa (*Festuca arundinacea*) [17]

Kostrzewa trzcinowa doceniana jest również jako roślina przeciwerozyjna; wykorzystuje się ją do zadarniania skarp, poboczy dróg, autostrad, terenów specjalnych oraz do zakładania trawników użytkowych. Kostrzewa optimum rozwoju osiąga na stanowiskach żyznych, a zwłaszcza zasobnych w przyswajalny azot. Jest trawą o bardzo wysokiej odporności na stresowe warunki termiczne i wilgotnościowe. Dobrze rozwija się w okresie upałów i wytrzymuje ostre zimy. Nie szkodzą jej spóźnione przymrozki wiosenne. Znosi ciężkie nieprzewiewne gliny i wysoki poziom wody gruntowej, ale dzięki dużej wytrzymałości na brak wody nadaje się przede wszystkim do uprawy na lekkich i suchych glebach, nadmiernie odwodnionych, zmurszałych torfach, a także na rekultywowanych hałdach popiołów, żużlu wielkopieczowego, itp. Dobrze znosi także zasolenie gleby. W warunkach gleb ornych przy opadach rocznych wynoszących średnio 550 mm otrzymywano plony suchej masy tego gatunku zbliżone do 15 Mg/ha, w warunkach żyznych gleb hydrogenicznych można spodziewać się plonów dochodzących do 20 Mg/ha [8, 16].

### *Kupkówka pospolita*

**Kupkówka pospolita** (*Dactylis glomerata*) jest pospolitą trawą luźnokępkową, wysoką o szybkim i dynamicznym rozwoju. Szybki przyrost biomasy pozwala ją zakwalifikować jako roślinę energetyczną. Stosuje się ją do renowacji użytków zielonych metodą podsiewu. Najlepiej plonuje na glebach utrzymanych w dobrej kulturze, zasobnych w składniki pokarmowe. Źle znosi warunki podmokłe, gdyż szybko się przerzedza i wypada z runi. Nie znosi gleb kwaśnych (optymalne pH 6,0–7,0). Wytrzymuje mroźne zimy i długie okresy posuchy, natomiast jest bardzo wrażliwa na spóźnione przymrozki. Wegetację rozpoczyna wczesną wiosną. Może się kłosić (ok. 6 tygodni) już na przełomie kwietnia i maja. Jako gatunek szybko-rośnący i odrastający po skoszeniu wymaga częstego, regularnego zbioru. Odpowiednio nawożona i użytkowana dostarcza wysokich plonów 8–12 Mg s.m./ha. Jest trawą azotolubną i szybko się rozwija wykorzystując wysokie dawki nawozów azotowych [18, 19].



Rys. 7. Kupkówka pospolita (*Dactylis glomerata*) (fot. D. Kamiński)

### *Manna mielec*

**Manna mielec** (wodna) (*Glyceria aquatica*). Podobnie jak trzcina, należy do rodziny traw *Gramineae*. Jest wieloletnią rośliną dorastającą do 2 metrów wysokości, o długim podziemnym czołgającym się kłączu. Posiada kwiaty wiatropylne, w formie wiechy o długości do 40 cm. Owocem jest czarno brunatny ziarniak, który



doskonale nadaje się do rozmnażania tej rośliny. Manna rozmnaża się również wegetatywnie przez rozłogi, fragmentację kłęczka i pędów. Spotkać ją można w płytkich jeziorach eutroficznych, w mule rzek, w rowach i bagnach. Pospolita w całym kraju, występuje również w innych regionach Europy i Azji [20]. Z jednego hektara można zebrać ponad 10 Mg suchej masy. Jej znaczenie energetyczne powinno polegać na wykorzystaniu w siedliskach naturalnego bytowania [21].



Rys. 8. Manna mielec (*Glyceria aquatic*) [8]

### *Miskanty*

Roślina, którą z powodzeniem można uprawiać z przeznaczeniem na cele energetyczne to miskant (*Miscanthus*) – okazała trawa kępowa, występująca w kilkudziesięciu genotypach, z których największą popularność osiągnęły triploidy oparte o krzyżówki miskanta chińskiego (*Miscanthus sinensis*) i miskanta cukrowego (*Miscanthus sacchariflorus*). Inne nazwy tej rośliny – prócz miskantusa i miskanta – to: trzcina chińska i trzcinnik olbrzymi. W środowisku naturalnym miskant dorasta nawet do 6 m wysokości, a średnica pędów dochodzi do 5 cm. Cechą charakterystyczną gatunku jest rozległy system korzeniowy, sięgający do 2,5 m w głąb ziemi, co sprzyja efektywnemu pobieraniu składników pokarmowych i wody. Wartość opałowa biomasy miskanta wynosi 14–17 MJ/kg s.m. [21, 22].

W Europie **miskant olbrzymi** (*Miscanthus*) uprawiany jest od ok. 50 lat, początkowo jako roślina ozdobna, a od kilkunastu lat na plantacjach energetycznych,

z których pozyskiwane są grube, sztywne, wypełnione gąbczastym rdzeniem źdźbła, o wysokości 200–350 cm. Pod koniec października roślina wytwarza okazałe, do 30 cm długości, pierzaste kwiatostany typu palczasto-groniastej wiechy, złożone z kilkudziesięciu równowąskich gałązek 10–20 cm długości, rozmieszczonych grupami na piętrach osi kwiatostanu. Wzdłuż każdej gałązki znajdują się niewielkie sterylne kłoski, około 0,5 cm długości, z plewami pokrytymi jedwabistymi włoskami. Najczęściej jednak w klimacie Polski do nadejścia zimy kwiatostany są schowane w pochwach liściowych [19, 22].



Rys. 9. Miskant [8]

Jako roślina o cyklu fotosyntetycznym C-4, miskant ma większe możliwości przyrostu masy, gdyż w warunkach optymalnych wykorzystanie światła jest o 40% większe niż w przypadku roślin C-3. Trawa ta nie ma dużych wymagań co do jakości gleby, ale w pierwszym roku uprawy jest mało odporna na mrozy [21]. Miskanta rozmnaża się łatwo przez podział kęp, którego dokonuje się zanim wyrosną młode pędy. Szybki wzrost i rozwój części nadziemnych powoduje przykrycie powierzchni pola, hamując rozwój chwastów. Już w pierwszym roku uprawy z 1 ha powierzchni można uzyskać do 8 Mg suchej masy, ale dopiero w trzecim roku miskant osiąga najwyższe plony – nawet powyżej 30 Mg s.m./ha [19, 20, 21, 22, 23].

Na przygotowanie stanowiska pod uprawę miskanta warto przeznaczyć co najmniej cały sezon wegetacyjny poprzedzający założenie plantacji. Prace należy rozpocząć od usunięcia wraz z korzeniami samosiejek drzew i krzewów oraz skoszenia i zgrabienia pędów pozostałych roślin. Do zwalczania odrastających chwastów powinien zostać zastosowany odpowiedni nalistny herbicyd totalny, np.: Roundup, Klinik, Kosmik lub Avans, stosowane w dawce 3–5 dm<sup>3</sup>/ha, w zależności od stopnia zachwaszczenia. W kilka tygodni po oprysku, martwą roślinność należy rozdrobnić (talerzowanie) i zaorać. Zaleca się dodatkowo wysiew roślin mo-

tylkowatych, które pod koniec sezonu wegetacyjnego powinny zostać zaorane na głębokość 35–40 cm. W razie niskiego pH gleby (poniżej 5,5) przed orką należy zastosować wapnowanie. Przed sadzeniem miskanta olbrzymiego, na wiosnę następnego roku, pole starannie wyrównuje się stosując bronę lub glebogryzarkę. Na polach użytkowanych rolniczo powyższe zabiegi nie są konieczne i ograniczają się do standardowej uprawy jesienno-wiosennej, tak jak pod inne rośliny rolnicze: zboża, oleiste lub okopowe. Dobrze rozrośnięte kępy wytwarzają kilkaset trzciniowatych łodyg. Okres eksploatacji plantacji wynosi ponad 15 lat [21, 22].

Koszty pielęgnacji plantacji miskanta olbrzymiego są bardzo niskie. W pierwszym roku prowadzi się odchwaszczenie mechaniczne w rzędach i w międzyrzędziach, wykorzystując do tego celu tradycyjne zestawy upraw międzyrzędowych. W przypadku dużego zachwaszczenia można stosować herbicydy z grupy pochodnych triazyn. W kolejnych latach zachwaszczenie jest niewielkie i nie jest wymagane odchwaszczanie, wynika to z intensywnego rozwoju i wzrostu roślin oraz zaciebiania gleby, związanego z bardzo wysokim wskaźnikiem ulistnienia roślin w łanie. W warunkach europejskich miskant olbrzymi wykazuje bardzo wysoką odporność na większość patogenów roślinnych. Na plantacjach nie jest więc prowadzona ochrona chemiczna, co wydatnie przyczynia się do niskich kosztów utrzymania [24].

Zbiór miskanta można przeprowadzić jedno- lub dwuetapowo. W przypadku zbioru jednoetapowego słoma powinna być zbierana maszynami, które przygotowują surowiec opałowy do bezpośredniego podania do pieca. Zbiór przeprowadza się mechanicznie za pomocą silosokombajnów, pras rolujących. Zebrany i sprasowany materiał roślinny jest zwijany w duże bele (ok. 1 m<sup>3</sup>), których masa wynosi ok. 130 kg. Maksymalna zawartość wody przy tym systemie zbioru może wynosić 25%. Kiedy zbierany materiał roślinny ma wilgotność powyżej 25%, do zbioru wykorzystuje się tradycyjny silosokombajn rozdrabniający rośliny. W przypadku zbioru jednoetapowego występuje problem przy transporcie na duże odległości – z powodu małej masy nasypowej rozdrobnionego na sieczkę miskantusa (70–95 kg/m<sup>3</sup>). Ten system zbioru jest bardziej kosztowny, ponieważ utrudnione jest przechowywanie dużej ilości rozdrobnionych roślin, a także wzrastają koszty transportu i dosuszania [24, 25].

W przypadku zbioru dwuetapowego, pierwszy etap polega na koszeniu roślin na pokosy, podczas gdy w drugim wykonywane jest podbieranie masy roślinnej i prasowanie w bele prostopadłościennie (kostki duże i małe) lub cylindryczne. W przypadku zbioru dwuetapowego można zastosować kosiarki rotacyjne lub sieczkarnie polowe. Dwuetapowy zbiór z prasowaniem w duże bele znacznie zmniejsza liczbę potrzebnych środków transportowych, a co za tym idzie redukowane są koszty z tym związane. Wadą zbioru dwuetapowego jest zwiększona możliwość strat podbieranej masy, jej zanieczyszczenie glebą oraz zwiększone zużycie paliwa, większa ilość przejazdów powoduje zbędne ugniatanie gleby, czyli niszczenie jej struktury [25, 26, 27].

**Miskant cukrowy** (*Miscantus sacchariflorus*). Miskant cukrowy to osiągająca wysokość 1–4 m roślina o sztywnych, wypełnionych rdzeniem źdźbłach i rozbu-

dowanym, sięgającym do 2,5 m w głąb ziemi systemie korzeniowym. Rozległy system korzeniowy umożliwia mискantowi cukrowemu skuteczne pobieranie z gleby składników pokarmowych i wody, a duża zawartość ligniny i celulozy chroni go przed uszkodzeniami mechanicznymi [8, 19].

Miskant cukrowy najlepiej rośnie na lekkich, zasobnych w składniki pokarmowe, umiarkowanie wilgotnych glebach. Najwyższe plony daje przy wysokiej temperaturze i dużym nasłonecznieniu, dobrze reaguje też na nawożenie związkami azotu. W warunkach klimatycznych Polski nasiona zwykle nie dojrzewają przed nadejściem zimy. Z racji mocnego systemu korzeniowego w swej ojczyźnie stosowany jest jako roślina przeciwozyjna, a ze względu na intensywne pobieranie z gleby metali ciężkich także na poboczach autostrad [21].

Miskant cukrowy uprawiany przez wiele lat na jednym miejscu, nie wymaga specjalnej pielęgnacji. Pozytywnie reaguje na nawożenie azotem w ilości 60 kg N oraz 50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i 100 kg K<sub>2</sub>O/ha. Zbiór i wykorzystanie biomasy najlepiej wykonać mechanicznie przy pomocy silosokombajnów rolujących lub tradycyjnych. Można też przeprowadzić zbiór za pomocą kosiarki rotacyjnej i prasy zwijającej. Optymalny termin zbioru przypada od września do października. Ze względu na większą odporność na niską temperaturę i suszę, miskant cukrowy wydaje się być lepiej przystosowany do uprawy w Polsce niż miskant olbrzymi. Daje się łatwo rozmnażać (na przełomie kwietnia i maja) poprzez podział rozłogów, które można umieszczać w bruzdzie za pługiem, a następnie przykryć broną. Zalecana obsada może wynosić od 1 do 4 roślin na 1 m<sup>2</sup>, co odpowiada rozstawie międzyrzędzi i odległości między roślinami 0,5–1 m. Ustalając obsadę należy pamiętać o ekspansywności tego gatunku, dzięki czemu pokrywa on powierzchnię pola równomiernym, zwartym łanem. Plon suchej masy jaki można uzyskać to 20–50 Mg s.m./ha [21, 28].

### Owies

**Owies zwyczajny** (*Avena sativa* L.) jest gatunkiem zbóż należącym do rodziny wiechlinowatych. Uprawiany jest powszechnie w strefie umiarkowanej Eurazji oraz Ameryki Północnej. Owies znajduje zastosowanie przede wszystkim jako pasza (w Polsce w ten sposób wykorzystywane jest 80% ziarna), poza tym służy też jako surowiec dla przemysłu spożywczego, gdzie wykorzystuje się go do produkcji płatków, kasz i otrębów. Owies jest również wykorzystywany w przemyśle farmaceutycznym, kosmetycznym i chemicznym, a także do celów dietetycznych i leczniczych. Do tych licznych zastosowań dołączyło niedawno kolejne: wykorzystanie owsa do celów energetycznych. Owies jest łatwy w spalaniu, cechuje się stabilną wartością energetyczną (18,5 MJ/kg) i wilgotnością (10–13%) [19, 29].

W Polsce istnieje długa tradycja uprawy owsa, nie występują więc trudności pojawiające się nieraz w związku z hodowlą nowych gatunków roślin energetycznych. Rolnicy posiadają odpowiednie wyposażenie i odpowiednie magazyny, nie brakuje im także doświadczenia. Wymagania glebowe owsa są niewielkie, pod

uprawę można wykorzystywać także ubogie gleby niskiej jakości (pod warunkiem, że zostaną odpowiednio nawodnione) i odłogi, które są w ten sposób zagospodarowywane. Owies uprawiany na terenach skażonych oczyszcza glebę z metali ciężkich, a ponieważ nie nadaje się do spożycia przez ludzi czy zwierzęta, może zostać wykorzystany na cele energetyczne. Transport i magazynowanie owsa są łatwiejsze, niż transport i magazynowanie innych rodzajów biomasy, np. drewna czy słomy [29, 30].



Rys. 10. Owies zwyczajny (*Avena sativa* L.) [8]

### *Palczatka Gerarda*

**Palczatka Gerarda** – *Andropogon gerardi* jest okazałą trawą, która dobrze znosi zarówno zasolenie jak i suszę, może być też uprawiana na glebach umiarkowanie wilgotnych. Wymaga starannego odchwaszczania gleby przez pierwsze dwa lata. Plantację zakłada się w maju wysiewając nasiona w rzędach odległych od siebie o 60–110 cm. W roku założenia plantacji nie zaleca się nawożenia mineralnego. W następnych latach korzystnie reaguje na zasilanie w końcu maja nawozami azotowymi w ilości 70–110 kg N/ha (K i P w zależności od zasobności podłoża). Zbiór, po zakończeniu wegetacji, następuje po pierwszych przymrozkach [21].



Rys. 11. Palczatka Gerarda – *Andropogon gerardi* (fot. D. Kamiński)

### *Paulownia omszona*

**Paulownia omszona** (Paulownia puszysta) (*Paulownia tomentosa*) to gatunek drzewa z rodziny *Paulowniaceae*, dawniej zaliczany do rodziny trędownikowatych. Drzewo pochodzi z południowo-wschodniej części Chin [8]. Od dłuższego czasu sadzone w cieplejszych częściach Europy jako ozdobne drzewo parkowe. Ostatnio wzrasta zainteresowanie paulownią jako rośliną energetyczną. Można ją hodować też w Polsce, bo wytrzymuje temperaturę  $-20^{\circ}\text{C}$ , dodatkowo posiada następujące zalety:



Rys. 12. Paulownia omszona (*Paulownia tomentosa*) [34]

- może być sadzona na glebach skażonych i uszkodzonych, jest odpowiednia do zapobiegania i ochrony przed erozją,
- rocznie przyrasta nawet więcej niż 4 metry,
- szybko odrasta po cięciu,
- bardzo szybko schnie po zbiorach oraz
- posiada prosty pień, z niewielką liczbą sęków [31, 32].

Przykładowo, plantacja składająca się z 1 600 drzew na hektar daje w cyklu 2–3 letnim średni roczny plon wynoszący 35–55 Mg drewna z hektara. Przy zbiorze wilgotność drewna wynosi 40–50%, po 20–40 dniach suszenia na powietrzu spada do 10–12%; zawartość popiołu to około 1,1% s.m. Wartość opałowa paulowni przy 30% wilgotności to 12,3 MJ/kg, w stanie suchym sięga 18,5 MJ/kg [33].

### *Proso różgowate*

**Proso różgowate** (*Panicum virgatum*) występuje na znacznych obszarach kontynentu północnoamerykańskiego, w zbiorowiskach roślinności trawiastej prerii, widnych lasów oraz słonych bagien i moczarów. Wytwarza okazałe, zielone lub szarozielone kępy, sięgające najczęściej 1–2 (rzadziej 3) metry wysokości. Ze względu na dużą trwałość polecane są do zadarniania terenów zdegradowanych, w charakterze roślinności przeciwerozylnej (rośliny tworzą krótkie, łuskowate rozłogi), a także do upiększania poboczy autostrad. W latach 90-tych ubiegłego wieku Departament Energii Stanów Zjednoczonych objął *Panicum virgatum* programem badawczym nad roślinami do celów energetycznych, dla centralnych i północno-wschodnich rejonów USA [8, 35].



Rys. 13. Proso różgowate (*Panicum virgatum*) [36]

Plantację energetyczną proso różgowatego powinno się zakładać późną wiosną (druga połowa maja, czerwiec). Na terenach wilgotnych proso różgowate za-

leca się uprawiać w rozstawie rzędów od 60 do 90 cm, a na terenach suchych – od 90 do 120 cm. Ilość nasion związana jest z rozstawem i tak, dla 60 cm wynosi ona 1,9 kg/ha, dla rozstawu 90 cm ilość tę należy pomniejszyć do 3/4, a dla 120 cm – o połowę. W roku wysiewu nie jest konieczne nawożenie plantacji. Od drugiego sezonu wegetacyjnego późną wiosną korzystne jest stosowanie nawożenia azotowego w dawce 70–130 kg/ha. Dawka P i K powinna być ustalona na podstawie analizy składu chemicznego gleby [35].

### *Rdest japoński i rdest sachaliński*

**Rdest japoński** (*Reynoutria Japonia*) i **rdest sachaliński** (*Reynoutria sachalinensis*) należą do rodziny rdestowatych bylin, których ojczyzną jest Azja Wschodnia. Do Europy sprowadzone w I połowie XIX w. jako rośliny ozdobne. Sadzone w celu stabilizacji wydm i skarp (np. na Śląsku), a także jako rośliny pastewne dla zwierzyny leśnej w Czechach. Rozpowszechnianiu sprzyjają długie rozłogi (do 5–6 metrów długości) oraz nasiona, które tworzą się w 2 tygodnie po kwitnieniu. W warunkach Polski rdesty rozpoczynają wegetację dość późno na przełomie kwietnia i maja. Rosną bardzo szybko osiągając wysokość 2–4 metry. Wegetację kończą wraz z nadejściem pierwszych przymrozków. Ze względu na dużą dynamikę wzrostu oraz niewielkie wymagania glebowe, zasługują na szersze zainteresowanie ze strony genetyków, hodowców i energetyków [8, 21].



Rys. 14. Rdest japoński (*Reynoutria Japonia*) [37]

### *Robinia akacjowa*

Rośliną, którą można by wykorzystać w Polsce na cele energetyczne jest **robinia akacjowa**, grochodrzew biały (robinia biała, grochodrzew akacjowaty) (*Robinia pseudoacacia* L.). Pochodzi z Ameryki Północnej. Do Europy sprowadzona zo-



stała w roku 1601 r. jako drzewo ozdobne, była sadzona w parkach, później także w lasach. Samorzutnie rozprzestrzeniła się w środowisku naturalnym. Posiada ona wiele korzystnych cech biologicznych, które predestynują ją jako roślinę energetyczną. Do cech tych zalicza się szybki wzrost, małe wymagania co do siedliska, małą wrażliwość na zanieczyszczenia oraz łatwość hodowli [38, 39].



Rys. 15. Robinia akacja (*Robinia pseudoacacia* L.) [8]

### *Róża wielokwiatowa*

Spośród wielu roślin, jakie mogą być uprawiane na biomasę dużym zainteresowaniem cieszy się **róża wielokwiatowa** (*Rosa multiflora*) [19]. Roślina ta zwraca uwagę małymi, śnieżnobiałymi kwiatami z jaskrawożółtymi pręcikami oraz błyszczącymi liśćmi, które jesienią przybierają piękną, pomarańczowo-czerwoną barwę. Skłonność róży do tworzenia wielu pędów odroślowych powoduje duży przyrost biomasy, sprawia to, iż może być uprawiana na cele „energetyczne” [21].

Jako roślina energetyczna, róża wielokwiatowa jest sadzona na plantacjach kilkudziesięciohektarowych w rozstawach 1 x 1 m lub – na ziemiach słabszych – 0,5 m x 1 m. Plon tej rośliny to 10–15 Mg biomasy z 1 ha. Dla celów energetycznych, pod koniec października kosi się ją na wysokości 15–25 cm nad ziemią. Następnie pędy są cięte na zrębki, dzięki czemu materiał szybciej wysycha. Produkt ten może być brykietowany, spalany czy też zgazowywany do metanolu [21, 40].

Dużym atutem róży wielokwiatowej jest to, że ma niewielkie wymagania, znosi skrajne warunki suszy, rośnie na wydmach i ubogich glebach piaszczystych

V i VI klasy bonitacyjnej. Zaletą tej rośliny jest zbiór biomasy co roku, poczynając od roku założenia plantacji. Dobrze rozwinięty system korzeniowy róży przenika w głąb profilu glebowego zwiększając podsiąkalność. Powoduje wzrost retencji gruntowej sąsiadujących gleb. Wpływa pozytywnie na produktywność upraw przyległych, szczególnie w latach posusznych, dodatkowo osłabia zjawisko erozji wodnej i wietrznej [21,40].



Rys. 16. Róża wielokwiatowa (*Rosa multiflora*) [8]

### *Spartina preriowa*

**Spartina preriowa** (*Spartina pectinata*) wywodzi się z Ameryki Północnej. Występuje od Nowej Funlandii i Quebecu (Kanada) po amerykańskie stany Arkansas, Teksas i Nowy Meksyk. Cechą charakterystyczną rośliny są duże możliwości adaptacyjne: występuje ona zarówno w bardzo suchym jak i bardzo wilgotnym środowisku. Podobnie jak inne gatunki typu C-4, jest okazałą rośliną wyrastającą do wysokości 2 m, tworzącą obszerne, luźne kępy gęsto pokryte długimi do 80–90 cm, szerokimi do 1,5 cm liśćmi. W połowie lata pojawiają się palczasto-grogniaste kwiatostany długości ok. 30 cm. Pędy generatywne w środku są puste. Plon biomasy to 17–29 Mg s.m./ha [8, 41].

W warunkach polskich spartina wytwarza nasiona, jednak ze względu na niedostępność nasion w handlu oraz szybki spadek zdolności kiełkowania zalecane jest rozmnażanie wegetatywne poprzez podział rozłogów na wiosnę. Trawę tę najczęściej wysadza się w rozstawie rzędów 180–300 cm i 50–75 cm w rzędzie. Od drugiego sezonu wegetacyjnego korzystne jest zasilanie roślin nawozami mineralnymi, w dawce 60–110 kg N/ha (P i K – po analizie składu chemicznego gleby). Zaletą tych roślin jest ich „długowieczność”, która pozwala na użytkowanie plantacji przez kilkanaście lat [21].



Rys. 17. *Spartina pectinata* [42]

### *Stokłosa bezostna*

**Stokłosa bezostna** (*Bromus inermis*) jest trawą wysoką, rozłogowo-luźnokępkową, wieloletnią [19]. Może być wykorzystywana w produkcji pasz na gruntach ornych, trwałych łąkach kośnych i przemiennych użytkach zielonych. Jako gatunek dobrze znoszący suszę występuje na wałach, górnych odcinkach skarp i rowów. Stokłosa bezostna szybko wschodzi (5–6 dni), jednak pełny rozwój osiąga w drugim lub trzecim roku wegetacji. Można wówczas zebrać 3 pokosy zielonki,



Rys. 18. *Stokłosa bezostna* (*Bromus inermis*) (fot. D. Kamiński)

czyli około 40 Mg zielonej masy (około 10 Mg siana) z przeznaczeniem na cele energetyczne. Jest to gatunek o wysokich i obficie ulistnionych pędach generatywnych i wegetatywnych, co posiada istotne znaczenie dla jego wartości pokarmowej. Pędy generatywne wykształca także w odrostach, ale w mniejszej liczbie niż wiosną. Stokłosa jest wrażliwa na udeptywanie i niskie koszenie, co znacznie osłabia jej żywotność. Jest trawą o średniej zdolności konkurencyjnej; tylko w niektórych warunkach siedliskowych wykazuje większą konkurencyjność i dominuje, tworząc zwarte płaty [8, 25].

### *Stokłosa uniolowata*

**Stokłosa uniolowata** (*Bromus unioloides*) jest trawą pochodzącą z Ameryki Południowej. Pędy generatywne dosyć szybko drewnieją, dorastają do wysokości 130 cm, kwiatostan jest wiechą podwójną o długości do 30 cm [19]. W klimacie umiarkowanym uprawiana jest jako trawa 2–3 letnia, stąd nadaje się wyłącznie do obsiewu gruntów ornych. Z licznych badań wynika, że w dobrych warunkach może plonować na poziomie 8–15 Mg s.m./ha. Należy do traw nitrofilnych, uprawianych na optymalnie wilgotnych i nieco przesycających gruntach ornych o różnych typach gleb [8, 43].



Rys. 19. Stokłosa uniolowata (*Bromus unioloides*) [43]

### *Sylfia*

**Sylfia** (*Silphium perfoliatum*), znana też pod nazwą różnik przerośnięty, jest byliną z rodziny astrowatych pochodzącą z centralnych regionów Ameryki Północnej. Uznawana jest za cenną roślinę pszczelarską, leczniczą, paszową

(o znacznej zawartości białka i węglowodanów), ozdobną (uprawianą w ogrodach), jak również energetyczną. Ze względu na niewielkie wymagania pod względem zapotrzebowania na składniki pokarmowe może być polecana jako roślina pionierka przy rekultywacji terenów zdegradowanych. Pędy sylfii osiągają wysokość do 2,5 metra. Plantacje energetyczne sylfii należy zakładać jesienią, poprzez wysiew nasion w rzędach o rozstawie 100 cm. Po 3–4 latach z plantacji można zbierać około 100 Mg biomasy z ha (19 Mg s.m./ha) [25, 44].



Rys. 20. Sylfia (*Silphium perfoliatum*) [37]

### Ślazowiec pensylwański

Kolejną rośliną jest **ślazowiec pensylwański** (*Sida hermaphrodita*). Rodzaj *Sida* należący do rodziny ślazowatych (*Malvaceae*), obejmuje kilkaset gatunków roślin jednorocznych, wieloletnich i krzewów występujących w tropikalnych i subtropikalnych strefach kuli ziemskiej. W Polsce *Sida hermaphrodita* nazywana jest ślazowcem pensylwańskim, malwą pensylwańską, a niekiedy sidą. Dzięki istnieniu pączków wzrostowych na korzeniach w strefie przyłodygowej, roślina corocznie odrasta zwiększając liczbę łodyg od jednej w pierwszym roku do kilkunastu w drugim i 20–30 w trzecim, czwartym i następnych latach [19, 21].

Obecnie, najważniejszym kierunkiem użytkowania ślazowca jest wykorzystanie jego biomasy jako odtwarzalnego źródła energii. Doskonale nadaje się do produkcji brykietu opałowego czy peletów. Łodygi ślazowca charakteryzuje porównywalne ciepło spalania z drewnem bukowym. Należy też wspomnieć, że cieńsze łodygi ślazowca charakteryzują się większym ciepłem spalania, a na taką cechę plantator może wpływać przez dobór odpowiednich zabiegów agrotechnicznych [31]. Z hektara plantacji można uzyskać plon do 15 Mg suchej masy, z czego 6,7 Mg stanowi celuloza. Zaletą ślazowca pensylwańskiego jest możliwość uprawy na glebach IV–V klasy bonitacyjnej oraz łatwość rozmnażania z nasion lub przez podział karp [21, 45].



Rys. 21. Ślázowiec pensylwański (*Sida hermaphrodita*) [8]

Dla ślázowca jako wieloletniej kultury, szczególne znaczenie ma dobre przygotowanie pola przed założeniem plantacji. Młode rośliny ślázowca potrzebują do normalnego wzrostu światła, stąd też są wrażliwe na zachwaszczenie. Dlatego pole powinno być dobrze odchwaszczone i nie powinno zaskorupiać się. Odchwaszczanie może odbywać się drogą chemiczną jak również poprzez mechaniczne zabiegi agrotechniczne, co jest szczególnie ważne w pierwszym roku uprawy. W latach następnych chwasty nie są tak groźne, gdyż ślázowiec rozwijając bogatą masę zieloną, skutecznie je zagłusza [21].

Gleba pod uprawę ślázowca powinna zostać odpowiednio przygotowana. Ponieważ młodym roślinom do prawidłowego rozwoju niezbędne jest światło, należy unikać pojawienia się chwastów, które zaciniają uprawę. Ślázowiec pensylwański rozmnaża się generatywnie, czyli przez nasiona i wegetatywnie – przez sadzonki, będące fragmentami korzeni lub pędów naziemnych. Podczas wysiewu ślázowca szczególną uwagę należy zwrócić na równomierność: nasiona powinny zostać rozmieszczone w podobnej odległości od siebie, na podobnej głębokości (1–1,5 cm.) Najlepszym sposobem osiągnięcia tego celu jest zastosowanie siewu maszynowego. Bezpośrednio na pole uszlachetnione nasiona ślázowca pensylwańskiego wysiewa się w kwietniu. Szeroka rozstawa rzędów (60–70 cm) ułatwia międzyrzędowe zabiegi pielęgnacyjne w latach następnych. Ze względu na niewielki rozmiar nasion, głębokość ich umieszczenia nie powinna przekraczać 1–1,5 cm. Wysiew nasion w ilości 3–8 kg/ha możliwy jest przy użyciu zwykłych siewników zbożowych lub buraczanych [21, 45, 46].

Oprócz rozmnażania generatywnego, można z powodzeniem wykorzystać sposób wegetatywny. Do rozmnażania wegetatywnego służą odcinki korzeni lub fragmenty pędów naziemnych. Sadzonki przygotowuje się bezpośrednio przed sadzeniem, wykopując podziemną część roślin i tnąc korzenie na odcinki długości

8–10 cm. Z dobrze wykształconej 3–4 letniej kępy można uzyskać 20–30 sadzonek, które następnie sadi się na głębokość 5–8 cm. Pierwszego zbioru plonów dokonuje się w maju, drugiego zaś na przełomie lipca i sierpnia, gdy rośliny osiągną wysokość 100–150 cm [21, 47].

### *Topinambur*

**Topinambur** (słonecznik bulwiasty) (*Helianthus tuberosus*) jest byliną pochodzącą z Ameryki Północnej dorastającą do 4 metrów wysokości [19]. Topinambur wytwarza podziemne rozłogi zakończone bulwami jak u ziemniaka. Surowcem energetycznym są zarówno bulwy, które można przeznaczyć do produkcji etanolu lub biogazu, jak też części nadziemne zaschnięte – do bezpośredniego spalania lub też do produkcji brykietów czy pelet. Wysoki potencjał plonowania (średnio 10–16 Mg s.m./ha), łatwość uprawy, niski koszt założenia plantacji oraz duże zdolności adaptacyjne do warunków glebowych, przemawiają za uprawą tego gatunku w Polsce. Inną formą wykorzystania jest rekultywacja gruntów zdewastowanych przez przemysł i gospodarkę komunalną [21, 48].

Wymagania klimatyczne słonecznika bulwiastego są niewielkie, dobrze znosi zmienne warunki i niską temperaturę, jednak najkorzystniejsza dla tego gatunku jest pogoda ciepła i wilgotna. Bulwy topinamburu, w przeciwieństwie do bulw ziemniaka, dobrze znoszą niską temperaturę, nawet do  $-30^{\circ}\text{C}$ , dzięki obecności inuliny, podwyższającej stężenie soku komórkowego, co zwiększa odporność na mróz. Słabe jesienne przymrozki nie uszkadzają też części nadziemnych rośliny. Głębokość uprawy decyduje o wzroście roślin w pierwszym roku, jak również o plonowaniu w latach następnych. Podstawowym zabiegiem jest głęboka orka do 30 cm, a gdy warstwa orna jest płytka – orka z pogłębiaczem [21, 25].

Przed sadzeniem bulw należy wyrównać wierzchnią warstwę gleby, co ułatwia sadzenie i korzystnie wpływa na kiełkowanie oraz wschody. Sadzenie bulw można przeprowadzić jesienią lub wczesną wiosną. Bulwy ukorzeniają się i kiełkują już w temperaturze gleby  $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$ . Korzystniejszy wydaje się więc jesienny termin sadzenia, ponieważ rośliny rozpoczynają wegetację zanim gleba obeschnie i nadaje się do mechanicznej uprawy. W efekcie, okres wegetacji topinamburu wydłuża się przynajmniej o 3 tygodnie, co wpływa korzystnie na plony. Nawożenie słonecznika bulwiastego uzależnione jest od zasobności gleby i przedplonu. W przeciętnych warunkach kultury i zasobności gleby zalecane są dawki na 1 ha: 80–120 kg N, 60–80 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$  i 120–160 kg  $\text{K}_2\text{O}$ . Nawożenie związkami azotu stosuje się zwykle w dwóch równych dawkach, pierwszą przed sadzeniem, razem z fosforem i potasem, a drugą kiedy rośliny mają ok. 50 cm wysokości [8, 49].

Termin i częstota zbioru słonecznika bulwiastego uzależnione są od celu uprawy (na bulwy lub zieloną masę). Jeżeli podstawowym plonem są bulwy, zbioru części nadziemnych dokonuje się najczęściej w październiku, gdyż wczesne koszenie zielonej masy (np. w czerwcu, lipcu) wpływa ujemnie na plon bulw. Zwykle zbioru bulw dokonuje się późną jesienią, przed nastaniem mro-

zów, można także wykorzystać okresy odwilży w miesiącach zimowych. Jeżeli planujemy wiosenny termin wykopków, wówczas łodygi ścina się zimą w czasie mrozów, aby uniknąć ugniatania gleby z zimującymi w niej bulwami. Topinambur jest gatunkiem o bardzo wysokim potencjale produkcyjnym. Według różnych źródeł w warunkach polskich można uzyskać z powierzchni 1 ha 12–36 Mg bulw i 31–75 Mg zielonej masy [50, 51].



Rys. 22. Topinambur (*Helianthus tuberosus*) (fot. D. Kamiński)

### Topola

**Topola** (*Populus sp.*) jest w Polsce powszechnie znanym drzewem, występują cztery rodzime gatunki topoli: czarna, biała, osika i szara (ta ostatnia jest naturalnym mieszańcem topoli białej i osiki) [19]. Topole czarna, biała i szara występują głównie w lasach łąkowych dużych dolin rzecznych, osika natomiast jest rozpowszechniona w lasach liściastych i mieszanych na terenie praktycznie całego kraju. Bardzo popularnym drzewem ozdobnym, ze względu na swój kolumnowy pokrój sadzonym zwłaszcza wzdłuż dróg jest topola włoska stanowiąca sztucznie wyhodowaną odmianę ozdobną topoli czarnej [53].

Pozytywną cechą topoli jest intensywna wymiana gazowa – pobieranie dużych ilości dwutlenku węgla (gaz cieplarniany), oraz wydzielanie do atmosfery ogromnych ilości tlenu. Przed sadzeniem topoli należy wykonać orkę głęboką na 30–40 cm. Na glebach cięższych orka powinna być wykonana jesienią, na glebach lżejszych wiosną. Dla lepszego rozdrobnienia podłoża zaleca się wykonanie większej ilości zabiegów – w tym kultywatorowanie i bronowanie, aby wyeliminować możliwość tworzenia się w glebie pustych przestrzeni – komór powietrznych, utrudniających powstawanie pierwszych korzeni topoli. Uprawa gleby powinna zacząć się – jeśli to możliwe w lutym, a sadzenie topoli zakończyć się w połowie



kwietnia. Odległości pomiędzy rzędami topoli na plantacji powinny wynosić od 3,0 do 3,4 m w zależności od rozstawy kół używanych ciągników i maszyn. Odległości pomiędzy sadzonkami w rzędach są inne dla każdej z proponowanych odmian i wynoszą od 50 do 60 cm, co daje obsadę na hektar od 5600 do 6700 zrzedów. Zalecane nawożenie związkami azotowymi wynosi rocznie 20–70 kg azotu na hektar [25, 54].



Rys. 23. Topole (*Populus L.*) (fot. D. Kamiński)

Ścinanie roślin może odbywać się dopiero po zakończeniu wegetacji, w okresie bezlistnym, to jest od grudnia do końca lutego następnego roku. Najlepiej wykonywać cięcia, gdy gleba jest zamrożona. Ścinając topolę pierwszy raz należy pamiętać, że wysokość cięcia nie może przekroczyć 15 cm. W przeciwnym przypadku płaszczyzna cięcia będzie się sukcesywnie podnosić podczas kolejnych zbiorów i powodować problemy techniczne. Cięcia topoli wykonywane jest piłą obrotową, ciągniętą przez traktor, a ścięte pręty pozostają w międzyrzędziach. Drewno w trakcie zbioru zawiera ok. 53% wilgoci i stopniowo traci ją leżąc na polu do około 35%. Tak przesuszone może zostać zmagazynowane bez zagrożenia ryzykiem wystąpienia procesów fermentacyjnych [25, 54].

### *Trzcina pospolita*

**Trzcina pospolita** (*Phragmites australis*), jest wieloletnią rośliną spotykaną na terenie całego kraju. Osiąga wysokość do 4 metrów, posiada długie czołgające się kłaczki i bardzo grube, ulistnione, proste źdźbło. Kwiatostanem jest bardzo duża, rozpierzchna wiecha. Kwitnie od lipca do września i jest wiatropylna. Najczęściej porasta brzegi wód, bagna i zalewiska, starorzecza, sadzawki, glinianki, doły potorfowe itp. Rozmnaża się przede wszystkim wegetatywnie, przez długie rozłogi, oraz fragmentację kłaczki. Największe zagęszczenia tworzą kłaczki na głębokości 0,5 m. Pojedyncze kłaczki żyją przeciętnie około 6 lat i mogą rozrastać się w promieniu 10 metrów z szybkością 1 metra rocznie. Trzcina doskonale utrwala brzegi akwenów przed erozją, często spotkać ją można na terenach dawnych bagien, które osuszone wykorzystywane są rolniczo. Biorąc pod uwagę jej dostępność, jest najczęściej polecaną rośliną do zakładania oczyszczalni botanicznych. Z racji jej popularności często używa się terminu „oczyszczalnie trzcinowe”, w odniesieniu do wszystkich systemów, gdzie wykorzystuje się rośliny do usuwania nieczystości [8, 25].



Rys. 24. Trzcina pospolita (*Phragmites australis*) (fot. D. Kamiński)

Na podstawie badań przeprowadzonych na terenie Lubelszczyzny stwierdzono, że w naturalnych siedliskach trzcina dorasta do 4,1 metra i dostarcza suchą masę w ilości od 13 do 30 Mg/ha [21]. Z uwagi na wysokie plony i odporność na wymarzenie jest to roślina, która po opracowaniu odpowiedniej technologii uprawy i wyhodowania dobrych odmian powinna zająć poczesne miejsce wśród roślin energetycznych [21].

### *Wierzba energetyczna*

Pośród roślin energetycznych największym zainteresowaniem cieszy się **wierzba „energetyczna”** (*Salix L.*) Popularność tej rośliny wynika z kilku przyczyn:

- możliwości uzyskania dopłat bezpośrednich,
- dużego przyrostu biomasy – nawet 14-krotnie szybszy od lasu naturalnego,
- wysokiej wartości energetycznej,
- łatwości uprawy oraz
- długiej żywotności plantacji >30 lat [55].

Wierzba (*Salix L.*) należy do rodziny wierzbowatych i obejmuje ponad 300 gatunków występujących jako drzewa, krzewy lub krzewinki. Wierzba jest rośliną dwupienną, owadopylną, jej liście są pojedyncze, całkowite, ułożone najczęściej skądoległe, kwiaty zebrane w kwiatostany zwane są kotkami. Dzięki obecności pączków wzrostowych na korzeniach, w strefie przyłodygowej, gatunki z rodzaju *Salix* mają zdolność wytwarzania nowych pędów w kolejnych okresach wegetacyjnych. Krzewiaste gatunki wierzby, tworzące długie, elastyczne pędy, nazywane są wikliną. Na cele energetyczne wykorzystuje się najczęściej szybko rosnącą *Salix viminalis* [55, 56].

Wierzba wiciowa (*Salix viminalis*), zwana również konopianką, dorasta w formie krzewiastej do 6 metrów. Pędy są giętkie, początkowo owłosione, w późniejszych okresach wegetacji nagie, przyjmują barwę od szarozielonej do oliwkowej. Liście mają długość od 10 do 25 cm i są od 8–10 razy dłuższe niż szersze. Górna strona liścia jest prawie naga, matowa o barwie zielonej, natomiast dolna jedwabista jest białowłosiona. Kwiatostany męskie są krótkie, grube, o długości do 3,6 cm i żółtej barwie. W Polsce zarejestrowane są 3 odmiany wierzby krzewiastej: Start, Sprint i Turbo. Wszystkie charakteryzują się szybkim wzrostem i dają wysoki plon suchej masy drewna. Odznaczają się one dużą odpornością na choroby i tolerancją na szkodniki [55, 57, 58].

Wierzbę z rodzaju *Salix viminalis* można uprawiać na wielu rodzajach gleb, od bielicowych gleb piaszczystych do gleb organicznych, należy jednak dobrać odpowiednie klony. Glebę do nasadzeń wierzby przygotowuje się w zależności od rodzaju gleby, poziomu kultury rolnej i od przedplonu. Najpowszechniej stosowanymi zabiegami są:

- karczowanie i koszenie drzewek, krzewów i chwastów wieloletnich,
- kultywatorowanie i/lub talerzowanie,
- oprysk herbicydem totalnym,
- wapnowanie oraz
- głęboszowanie lub orka zimowa z pogłębiaczem [55].

Największy przyrost biomasy wierzby notuje się na terenach o wystarczającej ilości wody. Jest to szczególnie ważne w pierwszym roku, gdy roślina dopiero wykształca system korzeniowy. Jeśli w tym okresie wystąpi susza – najprawdopo-

dobniej roślina uschnie, a na pewno jej przyrost będzie bardzo mały. W kolejnych latach roślina wykształca już rozbudowany system korzeniowy i okresowe susze jej nie zagrażają. Optymalny poziom wód gruntowych przeznaczonych pod uprawę wierzby energetycznej to 100–300 cm dla gleb piaszczystych i 160–190 cm dla gleb gliniastych. Temperatura i długość dnia ma wpływ na przebieg vegetacji wierzby w ten sposób, że wczesną wiosną, nawet podczas krótkotrwałych ociepleń następuje rozpoczęcie procesów życiowych wewnątrz rośliny, niewidocznych z zewnątrz, po czym, gdy nadchodzą silne mrozy bez okrywy śnieżnej może następować przemarzanie karp lub odrastających prętów. Krótkotrwałe przymrozki nie przekraczające  $-10^{\circ}\text{C}$  nie wywierają większego wpływu na wzrost i rozwój powszechnie występujących odmian wierzby [55, 58].



Rys. 25. Plantacja wierzby energetycznej na terenie sołectw Świętoszówka i Grodziec [59]

Odpowiednie pH dla wierzby to zakres pomiędzy 5,5 a 6,5, a więc gleby nieznacznie kwaśne. Nawożenie nowych nasadzeń musi być bardzo ostrożne i nie powinno przekraczać 30 kg N, 18 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$  i 20 kg  $\text{K}_2\text{O}$  na 1 hektar. W kolejnych latach uprawy można stosować bardziej intensywne nawożenie mineralne [21, 55].

Optymalne warunki przechowywania sadzonek wierzby to umiarkowana wilgotność i temperatura w zakresie  $0-4^{\circ}\text{C}$ . Pomieszczenia te powinny mieć dobrą wentylację, aby nie dopuścić do rozwoju grzybów i pleśni. Jeżeli temperatura zbliża się do ok.  $8^{\circ}\text{C}$  i utrzymuje przez dłuższy czas, dla rośliny jest to „znak”, że należy zbudzić się do życia i rozpocząć okres vegetacyjny. Należy więc unikać takich sytuacji podczas przechowywania sadzonek, gdyż może to spowodować znaczne obniżenie zdolności vegetacyjnych. Jeżeli sadzonki, były przechowywane przez

kilka miesięcy, przed sadzeniem jest wskazane zamoczyć je w wodzie na kilka dni, co pozwoli uzupełnić zapasy wody utracone w okresie przechowywania. Prawidłowo przygotowane sadzonki wierzby (zrzezy) powinny mieć 20–25 cm długości i 5–12 mm grubości. Zrzezy powinny mieć przynajmniej 5 uśpionych oczek, być czyste, zdrowe i odpowiednio uwilgotnione [21, 55].



Rys. 26. Zrzezy wierzby energetycznej [8]

Na 1 ha powierzchni wysadza się około 25–30 tys. zrzezów. Najbardziej popularny schemat nasadzeń to:

- odległość zrzezów w rzędach – 30–35 cm,
- odległość pomiędzy rzędami – 70 cm oraz
- odległość pomiędzy parami rzędów – 150 cm [60].

Rzędy powinny być wyznaczone poprzecznie do drogi wyjazdowej, tak aby przy manipulacji ciągnikiem nie niszczyć karb wyrosniętej wierzby. Przy braku dróg dojazdowych powinno się pozostawić 3–4 metrową opaskę manipulacyjną. Przed wiosennym sadzeniem pole powinno być zabronowane i po wyznaczeniu redlin można rozpocząć sadzenie. Z wieloletniej praktyki wynika, że zrzezy powinny być tak wsadzone do gleby, aby przynajmniej 2 uśpione pąki były ponad glebą. Przy sadzeniu należy pamiętać o biegunowości sadzonek. Posadzenie odwrotnie opóźnia rozpoczęcie wegetacji o 3 tygodnie. Zrzezy powinny być sadzone pod niewielkim kątem nachylenia do południowej strony. Wczesnowiosenne słońce szybciej nagrzewa sadzonkę, przyspieszając jej wegetację. Sadzenie maszynowe jest lżejsze, ale kosztowniejsze i opłacalne przy dużym areale plantacji [21, 61].

Przykładowo, firma AgroLas Co. Sp. J. [62] ma w ofercie sadzarkę dwurzędową (1600 kg) i czterorzędową (2800 kg) (Rys. 27). Materiałem wyjściowym są długie pędy wierzby, które podczas sadzenia są cięte na odcinki o długości ok. 20 cm i sadzone w pozycji pionowej za pomocą napędzanego hydraulicznie urządzenia sadzącego. Jeden operator obsługuje dwie sekcje sadzące.

W pierwszym roku wegetacji wiklina jest wrażliwa na zachwaszczenie, dlatego też należy prowadzić obserwacje konkurencyjności wierzba-chwasty oraz stosować pielęgnację chemiczną lub mechaniczną. W następnych latach intensywność wzrostu jest na tyle duża, że większość chwastów zostaje przygłuszona. Selektyw-

nymi herbicydami dla wierzby w zwalczaniu chwastów jedno- i dwuliściennych są: Lontrel 330 (0,5 dm<sup>3</sup>/ha) lub Targa Super (4 dm<sup>3</sup>/ha). Bardzo skuteczna jest również mechaniczna walka z chwastami. Można do tego celu wykorzystać pielniki podpinane do ciągnika rolniczego. Bardzo ważne jest, aby mechaniczne zwalczanie chwastów rozpocząć zanim chwasty rozwiną silny system korzeniowy. Najczęściej w okresie wegetacji wskazane jest 2–3 krotne spulchnienie międzyrzędzi w celu zniszczenia chwastów [63].



Rys. 27. Sadzarka czterorzędowa [62]

W pierwszym roku po nasadzeniu niezbędna jest ścinka sanitarna wierzby, w celu rozkrzewienia w latach następnych. Pozyskiwanie biomasy rozpoczyna się zwykle po dwóch latach uprawy w cyklach zbiorów jednorocznych, dwuletnich lub trzyletnich. W przypadku wielu wielkoobszarowych plantacji przewiduje się zbiór w cyklu jednorocznym przez pierwsze trzy lata, po czym stopniowe przechodzenie na zbiór w cyklu dwuletnim, tak by ostatecznie prowadzić zbiórkę w cyklu zbioru trzyletniego. Po ścięciu pędów tuż przy powierzchni gleby, na wiosnę niskie karpy wypuszczają nowe łodygi, które można eksploatować w powyższym cyklu zbiorów. Produkcja na plantacji może przebiegać bez większych zakłóceń przez 20–25 lat [64].

Zbiory wierzby energetycznej prowadzi się po zakończeniu wegetacji, gdy z krzewów opadną liście. Odbywa się to od grudnia do marca, gdy na plantację może wjechać ciężki sprzęt, a wilgotność drewna jest najniższa. Pędy ścina się ręcznie lub maszynowo na wysokości 5–10 cm nad powierzchnią ziemi. Ścięte pędy mają wilgotność około 50%, po przesuszeniu wiosną i latem w przewiewnym miejscu nawet 15% [21, 55].

Do zbioru roślin w cyklach jednorocznych można wykorzystać silosokombajny do zbioru kukurydzy współpracujące z ciągnikami, które rozdrabniają materiał na zrębki (zbiór na biomasę), lub ścinanie przy użyciu sekatorów, pił spalinowych, kosiarek listwowych (zbiór na sadzonki). Do zbioru roślin w cyklach dwu- lub trzy-

letnich można użyć kombajnu do zbioru kukurydzy ze zmodyfikowanym aparatem tnącym. Kombajn ten rozdrabnia pędy na 3–5 cm zrębki, które są następnie wydmuchiwane do pojemnika znajdującego się na kombajnie lub na przyczepę ciągnika jadącego obok kombajnu (tak jak przy zbiorze kukurydzy). Inne maszyny stosowane do zbioru wierzby krzewiastych ścinają i wiążą całe rośliny w wiązki. Na rysunku 28 przedstawiono kosiarkę do wierzby energetycznej, która jest podpinana do ciągnika i napędzana wałem odbioru mocy (WOM) [65]. Umożliwia ścinanie wierzby 1, 2, 3-letniej (jednocześnie ścinany jest jeden rząd). Elementem tnącym jest drobnoząbkowa tarcza (ze spiekami widiowymi) o średnicy 50 cm [65].



Rys. 28. Kosiarka do wierzby energetycznej [65]

Na niewielkich plantacjach wierzba może być pozyskiwana ręcznie przy użyciu pił łańcuchowych niezależnie od cyklu zbioru. Tak pozyskana biomasa może być przechowywana w stertach, a następnie rozdrabniana za pomocą rębarek do drewna. Przy uprawie wierzby zaskakująco duży jest udział energii słonecznej w tworzeniu biomasy, w porównaniu z wkładem samego rolnika. Efektywność energetyczna uprawy wierzby, wyrażona stosunkiem wartości energetycznej plonu do poniesionych nakładów, wynosi od około 22 do 42, odpowiednio przy zbiorze roślin co roku i co trzy lata [48].

Plon suchej masy drewna z wierzby krzewiastych w trzyletnim cyklu zbioru wynosi [54]:

- *Salix viminalis* x *Salix purpurea* – 13,71 Mg s.m./(ha-rok),
- *Salix viminalis* – 18,83 Mg s.m./(ha-rok),
- *Salix viminalis* x *Salix viminalis lanceta* – 22,17 Mg s.m./(ha-rok).

Biomasa uzyskana z plantacji wierzby energetycznej może być wykorzystywana na kilka sposobów. Najbardziej powszechne jest jej spalanie w kotłach. Spalać można biomasę wstępnie przetworzoną (sieczeńka wierzbową, zrębek drzewny),

bądź wysoko przetworzoną, tj. brykiet drzewny lub pelet. Wierzba energetyczna oprócz wykorzystania energetycznego, jest stosowana również do innych celów:

- gospodarczych (sklejki, płyty pilśniowe, wyroby papiernicze, masy celulozowe, itd.),
- ochrony gleb (rekultywacja terenów przemysłowych, strefy ochronne wokół zakładów przemysłowych, wysypisk śmieci, rekultywacja skarp piaszkowni),
- ochrony wód (strefy ochronne wokół oczyszczalni ścieków, wzmacnianie brzegów zbiorników wodnych, hydrobiologiczne oczyszczanie ścieków) oraz
- ochrony powietrza (strefy ochronne wokół dróg i autostrad) [66].

Plon biomasy i opłacalność produkcji wierzby energetycznej przedstawiono w tabelach 2 i 3.

Więcej informacji o uprawie wierzby energetycznej można znaleźć w opracowaniach Kościka [21] i Dubasa [55], jak również na stronach internetowych [58, 60, 68, 69].

Tabela 2. Plon biomasy *Salix viminalis var. gigantea*, zawartość celulozy w drewnie i jego wartość energetyczna [67]

Częstotliwość zbioru	Plon suchej masy [Mg/(ha·rok)]	Wartość energetyczna plonu [MJ/kg s.m.]	Zawartość popiołu [%]
Coroczny	14,8	18,56	1,89
Co 2 lata	16,1	19,25	1,37
Co 3 lata	21,5	19,56	1,28

Tabela 3. Opłacalność produkcji wierzby energetycznej przy obsadzie 40.000 sztuk/ha [68]

Wyszczególnienie	Jednostka	Cykl 1-letni	Cykl 2-letni	Cykl 3-letni
Koszt produkcji	[PLN/ha]	1.191,90	2.556,90	4.279,90
Plon biomasy	[Mg/ha]	31,82	63,50	120,66
Koszt produkcji 1 Mg	[PLN]	37,46	40,27	35,47
Cena za 1 Mg zrębków		80,00	80,00	80,00
Zysk z 1 Mg		42,54	39,73	44,53
Zysk z 1 ha		1.353,60	2.523,10	5.372,90
Zysk z 1 ha/rok		1.353,60	1.261,50	1.790,90

## Przykłady plantacji w Polsce

Coraz więcej plantacji roślin energetycznych zakładanych jest w naszym kraju. Przykładowo, w powiecie słupskim od 2003 roku wprowadzany jest projekt „wierzba energetyczna”, który zakłada szerokie wykorzystanie biomasy wierzbowej do pozyskania ciepła. Na terenie powiatu obsadzono tą rośliną 160 ha, w przyszłym



roku będzie to około 350 ha. Obecnie, funkcjonuje około 20 kotłowni na drewno i odpady, 6 kotłowni na słomę. Najwięcej kotłowni znajduje się na terenie gminy Kępice i gminy Słupsk [59, 69].

Na terenie gminy Sułów (woj. lubelskie) uprawiana jest wierzba energetyczna na kilku plantacjach małoobszarowych: 7 plantacji o powierzchni do 2 ha, 2 plantacje o powierzchni mieszczącej się w przedziale 2–4 ha oraz 2 plantacje o powierzchni mieszczącej się w przedziale 4–5 ha. Łącznie zajmują one powierzchnię ponad 20 ha. W miejscowości Michałów (również gmina Sułów) wierzba uprawiana jest na dwóch wielkoobszarowych plantacjach: plantacja nr 1 o powierzchni 23 ha, plantacja nr 2 o powierzchni 9 ha [59].

Miejskie Przedsiębiorstwo Energetyki Ciepłej, Wodociągów i Kanalizacji w Środzie Wielkopolskiej posadziło w 2005 r. 40 tysięcy wierzb energetycznych na terenie oczyszczalni ścieków w Chwałkowie (powiat średzki, woj. wielkopolskie). Pozyskana biomasa służy do ogrzewania oczyszczalni ścieków [70].

Gmina Wolsztyn (woj. wielkopolskie) po oddaniu do użytku nowoczesnej oczyszczalni ścieków przeznaczyła ponad 54 ha gruntów, wykorzystywanych dotychczas jako poletka zalewowe starej oczyszczalni na uprawę wierzby energetycznej. Został rozstrzygnięty przetarg na wieloletnią dzierżawę w/w powierzchni z przeznaczeniem na uprawę wierzby energetycznej i wykorzystanie jej biomasy do spalania. Ciepło zostanie wykorzystane do ogrzewania obiektów oświatowych [59].

Jedna z największych plantacji wierzby o powierzchni 180 ha znajduje się w pobliżu miejscowości Dąbie (powiat kolski, woj. wielkopolskie).

Elektrownia „Stalowa Wola” S.A. (powiat stalowolski, woj. podkarpackie) posiada 12-hektarową plantację wierzby energetycznej. Sadzonki przekazywane są rolnikom na bardzo preferencyjnych warunkach tak, aby jak najbardziej zminimalizować koszty założenia plantacji [71].

Na terenie gminy Gubin (woj. lubuskie) w pobliżu miejscowości Chlebowo rolnik indywidualny posiada plantację wierzby energetycznej o powierzchni 21,6 ha. Uprawiana na tym terenie wierzba liczy cztery lata. Ten sam właściciel posiada również dwie inne plantacje znajdujące się w okolicy Chlebowa. Jedna z nich to plantacja o powierzchni 15,2 ha założona w 2002 r., druga o powierzchni 31,5 ha założona w 2004 roku. Łączna powierzchnia gruntów na których uprawiana jest wierzba wynosi 68,3 ha [69].

Instytut Nauk Rolniczych w Zamościu prowadzi w miejscowości Płoskie (gmina Zamość) plantację ślazuwca pensylwańskiego o charakterze badawczym. Celem badań jest opracowanie zaleceń agrotechnicznych oraz ocena możliwości wykorzystania rośliny w celach energetycznych. Zbiór prowadzi się od grudnia do marca. Plon z jednego hektara wynosi od 12 do 17 Mg suchej masy. Ślazuwiec jest badany także pod kątem wykorzystania świeżej biomasy lub kiszonki do produkcji energii w procesie fermentacji metanowej [72].

Na obszarze 25 ha w Czircadzu (woj. lubuskie) założona została plantacja ślazuwca pensylwańskiego. W zamierzeniach, ma ona zaspokoić w 90% potrzeby po-

bliskiego zakładu produkującego pelety. Po czterech latach uprawy, z 1 ha można uzyskać około 17 Mg s.m. Z kolei w Zespole Szkół Terenów Zieleni w Radzyminie (mazowieckie) jest prowadzona szkółka ślazuca pensylwańskiego. Celem jest zachęcenie rolników z gminy Radzymin do uprawy tej rośliny [59].



Rys. 29. Plantacja ślazuca pensylwańskiego [59]

Firma Agro-Pool-Prima Sp. z o.o. w Warszawie i Przedsiębiorstwo Rolne w Kmiecinie (powiat nowodworski, woj. pomorskie) założyli plantację malwy pensylwańskiej o powierzchni 750 ha. Malwa może być stosowana jako biomasa w elektrowniach i ciepłowniach. Jest rośliną stosunkowo odporną na niesprzyjające warunki klimatyczne, jej dużą zaletą jest możliwość uprawy na glebach słabszych. Spółka z o.o. Agro-Pool Prima w Warszawie planuje wybudowanie w Nowym Dworze Gdańskim (woj. pomorskie) ciepłowni miejskiej na biomasę o mocy 10–15 MW, której podstawowym paliwem byłaby malwa pensylwańska [59].

Plantację doświadczalną dwu odmian słonecznika bulwiastego prowadzi Instytut Nauk Rolniczych w Zamościu na terenach położonych w miejscowości Płoskie (gmina Zamość). Nadziemne części zbierane zimą po zaschnięciu mogą służyć do produkcji brykietów i peletów lub są spalane w postaci zrębków. Instytut Nauk Rolniczych w Zamościu posiada również plantację spartiny preriowej. Użykiwany plon w sprzyjających warunkach to ponad 20 Mg s.m. z 1 ha. Można ją prasować i spalać w przystosowanych do tego celu piecach. Również plantacja palczatki Gerarda jest prowadzona przez tenże instytut w celach badawczych: opracowania zaleceń agrotechnicznych oraz oceny możliwości wykorzystania w celach energetycznych. W sprzyjających warunkach może dawać plon nawet powyżej 20 Mg s.m. z 1 ha. Prasowana w kostkę, baloty zostaje spalana w odpowiednich piecach. Można z niej produkować brykiet i pelety [59].

## Literatura

- [1] P. Gradziuk (red.), *Biopaliwa*, Wyd. „Wież Jutra” Sp. z o.o., Warszawa 2003.
- [2] J. W. Wandrasz, A.J. Wandrasz, *Paliwa formowane*, Wyd. „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa 2006.
- [3] <http://www.poland.gov.pl/Klimat,35.html> (wejście 11.08.09).
- [4] <http://www.zazi.iung.pulawy.pl/Documents/Maps.htm> (wejście 13.08.09).
- [5] H. Okruszko (red.), *Agrofizyczne podstawy produktywności gleb i roślin uprawnych*, Instytut Agrofizyki PAN, Lublin 1993.
- [6] E. Gańko, *Potencjał techniczny produkcji roślin na cele energetyczne w Polsce*, Materiały XII Konferencji Naukowej „Uprawa roślin energetycznych a wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce”, Puławy 2008.
- [7] R. Borek, *Empiryczno-statystyczne i symulacyjne modele plonowania wierzby (*Salix viminalis* L.) uprawianej na cele energetyczne*, Materiały XII Konferencji Naukowej „Uprawa roślin energetycznych a wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce”, Puławy 2008.
- [8] <http://www.wikipedia.pl> (wejście 12.08.09).
- [9] H. Burczyk, J. Kołodziej, *Konopie włókniste wobec kukurydzy i sorga jako rośliny energetyczne*, Materiały seminarium pt. „Bioenergia w rolnictwie”, Poznań 2008.
- [10] <http://www.konin.naszemiasto.pl> (wejście 12.08.09).
- [11] K. Heller i in., *Ochrona Inu i konopi w Polsce i na świecie*, Progress in Plant Protection, 46 (1), 2006.
- [12] <http://www.coboru.pl> (wejście 10.08.09).
- [13] H. Burczyk, J. Kołodziej, M. Kowalska, *Konkurencyjność konopi włóknistych i kukurydzy jako roślin energetycznych w zależności od sposobu ich wykorzystania*, Materiały XII Konferencji Naukowej „Uprawa roślin energetycznych a wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce”, Puławy 2008.
- [14] [http://odr.zetobi.com.pl/roslinna/pole\\_d\\_konopie.pdf](http://odr.zetobi.com.pl/roslinna/pole_d_konopie.pdf) (wejście 12.08.09).
- [15] L. Grabowska, J. Kołodziej, H. Burczyk, *Zastosowanie energetyczne konopi włóknistych*, Problemy Inżynierii Rolniczej 2, 19–25, 2007.
- [16] M. Falkowski (red.), *Trawy*, Państwowe Wyd. Rolnicze i Leśne, Warszawa 1982.
- [17] <http://www.forages.psu.edu> (wejście 12.08.09).
- [18] W. Bednarek i in., *Plonowanie kupkówki pospolitej w zależności od przebiegu warunków meteorologicznych*, Acta Agrophysica, 12(3), 581–594, 2008.
- [19] L. Rutkowski, *Klucz do oznaczania roślin naczyniowych Polski niżowej*, PWN, Warszawa 2006.
- [20] W. Matuszkiewicz, *Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski*, PWN, Warszawa 2006.
- [21] B. Kościk (red.), *Rośliny energetyczne*, Wyd AR., Lublin 2003.
- [22] <http://www.miskantolbrzymi.pl> (wejście 17.08.09).
- [23] <http://www.bio-opal.com/miskant.php> (wejście 17.08.09).
- [24] M. Stolarski, S. Szczukowski, J. Tworkowski, *Biopaliwa z biomasy wieloletnich roślin energetycznych*, Energetyka i Ekologia 1, 77–80, 2008.
- [25] M. Kaszak, *Efektywność energetyczna produkcji nośników energii z biomasy*, Praca inżynierska, Bydgoszcz 2006.
- [26] <http://www.agroenergetyka.pl> (wejście 17.08.09).
- [27] <http://www.drewno.pl/> (wejście 17.08.09).

- [28] <http://www.atlas-roslin.pl> (wejście 17.08.09).
- [29] I. Niedziółka, A. Zuchniarz, *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*, MOTROL 8A, 232–237, 2006.
- [30] <http://www.biomasa.org> (wejście 17.08.09).
- [31] <http://www.drosera.pl> (wejście 17.08.09).
- [32] H. Zheng (red.), *Invasive plant soft asian origin established in the United States and their natura enemy*, vol. 1, USA Forest Service, FHTET 2004-05.
- [33] P. Kasamaki, *Paulownia puszysta znakomitym źródłem biomasy*, Bioenergy International Polska, 3 Marzec 2008.
- [34] <http://www.kolibrikerteszet.hu> (wejście 17.08.09).
- [35] G. Majtkowska, W. Majtkowski, *Trawy źródłem energii*, Trawy i Rośliny Motylkowe, wrzesień, 94-97, 2005.
- [36] <http://www.big-grass.com> (wejście 17.08.09).
- [37] <http://images.google.pl> (wejście 17.08.09).
- [38] T. Węgołek, A. Kraszkiewicz, *Dynamika wzrostu robinii akacjowej (Robinia pseudacacia L.) w zadrzewieniu śródpolnym na glebach lessowych*, Acta Agrophysica 5(1), 211–218, 2005.
- [39] Kraszkiewicz, *Ocena ciepła spalania i wartości opałowej wybranych sortymentów drewna robinii akacjowej na tle klas grubości*, MOTROL 10, 67–72, 2008.
- [40] Biedrzycka, „Zielona” energia ma nowe źródło. Kwiat polskiej energetyki, Nafta Gaz&Biznes 5, 2003.
- [41] <http://www.ihar.edu.pl> (wejście 17.08.09).
- [42] <http://agroenergetyka.it.kielce.pl> (wejście 17.08.09).
- [43] <http://www.viarural.com.ar> (wejście 17.08.09).
- [44] R. Kowalski, J. Wierciński, *Ocena niektórych gatunków Silphium jako surowców insulinowych*, Annales UMCS, Sec. E 59 (1), 189–195, 2004.
- [45] H. Borkowska, B. Styk, *Ślaziowiec pensylwański (Sida hermaphrodita Rusby), Uprawa i wykorzystanie*, WAR, Lublin, 2006.
- [46] D. Remlein-Starosta, K. Nijak, *Ślaziowiec pensylwański – wstępne wyniki badań nad możliwościami ochrony przed agrofagami*, Postępy w Ochronie Roślin 47(4), 358–362, 2007.
- [47] <http://www.biomax.com.pl> (wejście 18.08.09).
- [48] H. Czyż, B. Dawidowski, *Charakterystyka i wykorzystanie biomasy z upraw polowych jako źródła energii odnawialnej*, Energia Odnawialna 1, 2005.
- [49] A. Sawicka, *Jakość bulw Helianthus tuberosus L. w warunkach stosowania herbicydów*, Annales UMCS, Sec. E 59(3), 1245–1257, 2004.
- [50] T. Piskier, *Nakłady robocizny i koszty uprawy topinamburu*, Inżynieria Rolnicza, 11(86), 359–365, 2006.
- [51] T. Piskier, *Potencjał energetyczny topinamburu*, Problemy Inżynierii Rolniczej 1, 133–136, 2009.
- [52] <http://www.nahrung-im-garten.de/pictures-topinambur.html> (wejście 28.10.08).
- [53] <http://odnawialnezrodlaenergii.pl> (wejście 17.08.09).
- [54] <http://www.itd.poznan.pl> (wejście 17.08.09)
- [55] J.W. Dubas i in., *Wierzba energetyczna – uprawa i technologie przetwarzania*, Wyższa Szkoła Ekonomii i Administracji w Bytomiu, Bytom 2004.
- [56] R. Kłósowski, *Wierzba*, PODR. – Oddział w Przysieku, Przysiek 2007.
- [57] <http://www.uwm.edu.pl> (wejście 12.08.09).
- [58] <http://www.wierzbaenergetyczna.pl> (wejście 12.08.09).

- [59] <http://www.eo.org.pl> (wejście 12.08.09).
- [60] <http://www.wierzba.home.pl> (wejście 12.08.09).
- [61] W. Sobczyk, *Plonowanie wierzby wiciowej – w świetle badań*, *Polityka energetyczna* 10 (2), 547–555, 2007.
- [62] <http://www.agrolas.com.pl>.
- [63] W. Miziniak, *Wpływ herbicydów na wybrane odmiany wierzby energetycznej (Salix viminalis)*, *Postępy w Ochronie Roślin* 48 (1), 301–306, 2008.
- [64] <http://www.jamir.pl> (wejście 12.08.09).
- [65] <http://www.ze.strefa.pl> (wejście 13.08.09).
- [66] R. Zabrocki, G. Ignacem, *Wykorzystanie wierzby energetycznej w gospodarce rolnej*, *Stowarzyszenie Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu, Roczniki Naukowe* 9 (3), 234–238, 2007.
- [67] M. Stolarski, *Wszystko o wierzbie*, *Czysta Energia* 10, 32–33, 2003.
- [68] <http://www.saliks.pl> (wejście 27.10.08).
- [69] <http://www.ekoenergia.pl> (wejście 13.08.09).
- [70] <http://www.wodociagi-sroda.pl> (wejście 14.08.09).
- [71] <http://www.wstalowej.pl> (wejście 14.08.09).
- [72] <http://energia.org.pl> (wejście 14.08.09).

# AGLOMERYZACJA BIOMASY – BRYKIETY, PELETY

## Charakterystyka i scalanie materiałów drobnoziarnistych

Nowoczesne techniki pozyskiwania, wzbogacania i przetwarzania surowców powodują wytwarzanie znacznych ilości materiałów drobnoziarnistych (miał, pyły, wióry, itp.). Dla racjonalnego wykorzystania tych materiałów w gospodarce niezbędne jest ich wcześniejsze scalenie i otrzymanie odpowiedniej struktury [1, 2]. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów pochodzenia roślinnego jest procesem, w którym rozdrobniony materiał, pod wpływem sił zewnętrznych i wewnętrznych, ulega zagęszczeniu i scaleniu, a otrzymany produkt (aglomerat) uzyskuje określoną, stałą formę geometryczną [1].

Materiały drobnoziarniste składają się z dużej ilości cząstek, mniej lub bardziej zróżnicowanych pod względem kształtu i luźno ze sobą związanych. Wymiary tych cząstek wahają się w granicach od mikrometra do kilku milimetrów [2].

Cząstki sferyczne o dowolnym wymiarze można upakować z gęstością 74%. Jeżeli natomiast materiał składa się z cząstek sferycznych o dwóch wymiarach, w którym cząstki mniejsze zajmują wolne przestrzenie między większymi w ściśle określonym stosunku ilościowym, to teoretyczna gęstość upakowania takich cząstek wynosi 86%. Dobranie według wymienionej zasady składu cząstek o trzech wymiarach pozwala upakować je z gęstością 90–92%, a składu czterech frakcji z gęstością 95–97%. W praktyce takie gęstości upakowania jest trudno osiągnąć, gdyż trudności sprawia zachowanie ściśle określonego wzajemnego stosunku ilościowego poszczególnych frakcji cząstek w każdym elemencie objętości [2].

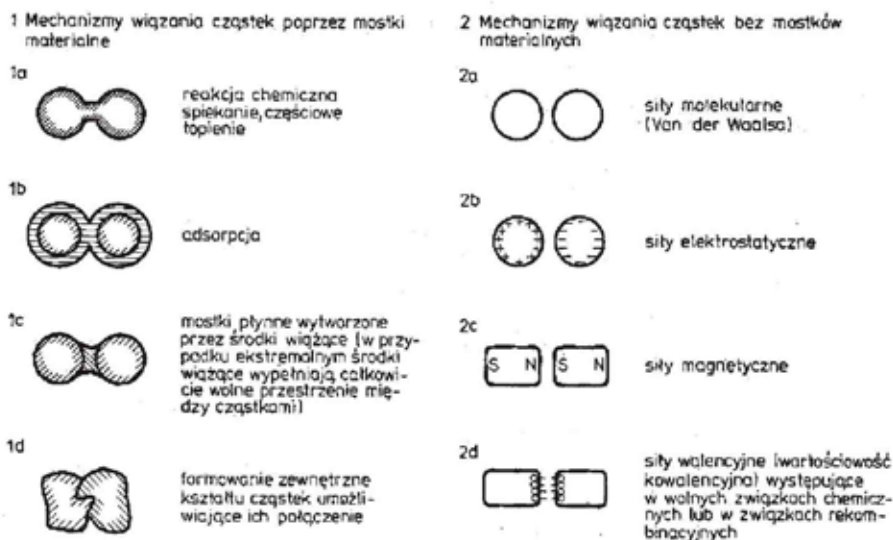
Prasowanie materiałów drobnoziarnistych to przemieszczanie wzajemne cząstek, a następnie ich upakowanie pod wpływem obciążenia zewnętrznego o wartości bliskiej lub nawet większej od obciążenia na granicy plastyczności danego materiału [2].

Przez zagęszczanie rozumie się zwiększenie gęstości ułożenia cząstek materiału bez ich wyraźnego odkształcenia. W tym przypadku charakter zależności pomiędzy gęstością ułożenia cząstek a trwałością więzów między nimi wpływa nie

tylko wartość obciążenia zewnętrznego, ale także czynniki mechaniczne (więzy mechaniczne i zaklinowanie nierówności powierzchni cząstek), fizyczne (siły kohezji, siły tarcia, magnetyczne) i fizykochemiczne. Czynniki te, określając jako funkcję celu ich maksymalne wykorzystanie przy tworzeniu mechanizmów wiązania cząstek materiałów drobnoziarnistych, można wg Pietscha [3] podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- a) mechanizmy wiązania poprzez „mostki materialne”,
- b) mechanizmy wiązania bez „mostków materialnych”.

Mechanizmy te w sposób poglądowy przedstawiono na rysunku 1. Mechanizmy grupy pierwszej wykorzystuje się najczęściej w procesach zagęszczania materiałów drobnoziarnistych z udziałem środków wiążących (lepiszcza), natomiast mechanizmy grupy drugiej wykorzystywane są w procesach zagęszczania i prasowania materiałów drobnoziarnistych bez udziału lepiszcza.



Rys. 1. Mechanizmy wiązania cząstek materiałów drobnoziarnistych wg Pietscha [3]

Aby pojedyncze ziarna utworzyły trwały aglomerat konieczne jest wystąpienie odpowiednio dużych sił łączących te ziarna. Według Rumpf'a [4, 5] mechanizmy wiązań między ziarnami można podzielić na 5 kategorii:

1. mostki stałe, które mogą się tworzyć w podwyższonych temperaturach w miejscu kontaktu ziaren, w wyniku dyfuzji molekuł z jednego ziarna do drugiego. Ciepło może być doprowadzone z zewnątrz lub też wydzielać się w trakcie procesu (np. przez tarcie). Mostki stałe mogą także powstać

- w wyniku twardnienia substancji wiążącej, krzepnięcia stopionych substratów reakcji chemicznej lub krystalizacji rozpuszczonych substancji,
2. siły adhezji występujące w substancjach wiążących, które nie pozwalają na swobodne przemieszczanie się ziaren. Substancje o wysokiej lepkości (kleje) mogą tworzyć wiązania podobne do tych jakie pojawiają się w mostkach stałych. W przypadku takiej fazy ciekłej mogą powstać cienkie, nieruchome warstwy adsorpcyjne,
  3. formy zamknięte wiązań mechanicznych. Mogą one występować w materiałach o budowie włóknistej, płytkowej a także w przypadku ziaren, które ulegając deformacji, powodują wzajemne blokowanie się,
  4. siły ciśnienia kapilarnego w układach ziaren luźno przemieszczalnych. Siły te w mostkach cieczowych oraz przestrzeniach kapilarnych mogą tworzyć silne wiązania, które jednak zanikają, jeżeli ciecz wyparuje, a brak jest innych mechanizmów przejmujących wiązania,
  5. siły przyciągania oddziaływujące między ziarnami w rodzaju sił Van der Waalsa, elektrostatycznych bądź magnetycznych, które mogą powodować łączenia się ziaren wówczas, gdy nastąpi ich dostateczne zbliżenie. Siły te wyraźnie zwiększają się przy zmniejszaniu wymiarów ziaren.

Granulacja ciśnieniowa polega na zagęszczaniu poprzez ściśnięcie określonej porcji materiału ziarnistego w wyniku czego następuje wyparcie powietrza z przestrzeni międzyziarnowej, zbliżenie do siebie poszczególnych ziaren i wytworzenie w rezultacie sił łączących te ziarna. W celu zwiększenia sił spójności między ziarnami i w konsekwencji wytrzymałości aglomeratu, często dodaje się płynnego środka wiążącego. Otrzymany w wyniku granulacji ciśnieniowej produkt charakteryzuje się ściśle określonym kształtem i wymiarami wynikającymi z geometrii komory roboczej urządzenia. Jeśli wymiary aglomeratów są znaczne (zwykle wynoszą kilka lub kilkanaście centymetrów) to nazywamy je brykietami. Sam proces określa się wtedy brykietowaniem, a maszyny noszą nazwy brykieciarek lub pras do brykietowania [6].

Gęstość końcowa brykietów wynosi ponad 90% maksymalnej gęstości teoretycznej cząstek wsadu do brykietowania [2].

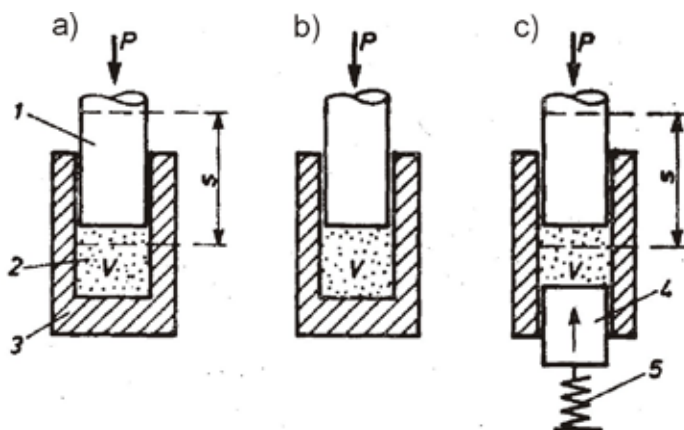
Proces brykietowania materiałów drobnoziarnistych może być realizowany w następujący sposób (rys. 2) [2, 7]:

- a) stempel o stałym tłoku przesuając się wywiera nacisk na materiał zasypany do prasy i go zagęszcza. Nacisk stempla jest zależny od rodzaju i ilości zagęszczonego materiału zasypanego do matrycy. W metodzie tej szczególnie istotne jest dozowanie materiału do matrycy prasy – ilość dozowanego materiału powinna być stała w każdym cyklu zagęszczania. W przeciwnym przypadku gęstość uzyskanych brykietów będzie zróżnicowana, a przy zasypaniu materiału poniżej dolnego położenia stempla, proces zagęszczania w ogóle nie nastąpi,
- b) skok stempla i objętość przestrzeni roboczej są zmienne. Ruch stempla (lub innego elementu roboczej prasy) trwa aż osiągnie się w przestrzeni



roboczej odpowiedni nacisk. Metoda ta jest niezależna od stopnia napełnienia przestrzeni roboczej materiałem i pozwala na uzyskanie brykietów o jednakowej gęstości, lecz zróżnicowanej objętości,

- c) skok stempla jest stały. Nacisk stempla (lub innego elementu roboczego) jest także stały, ponieważ przy przekroczeniu określonego nacisku zagęszczania stempel dolny ulega przemieszczeniu. Również ten sposób zagęszczania materiałów jest niezależny od stopnia napełnienia przestrzeni roboczej materiałem i pozwala na uzyskanie brykietów o jednakowej gęstości, lecz zróżnicowanej objętości.

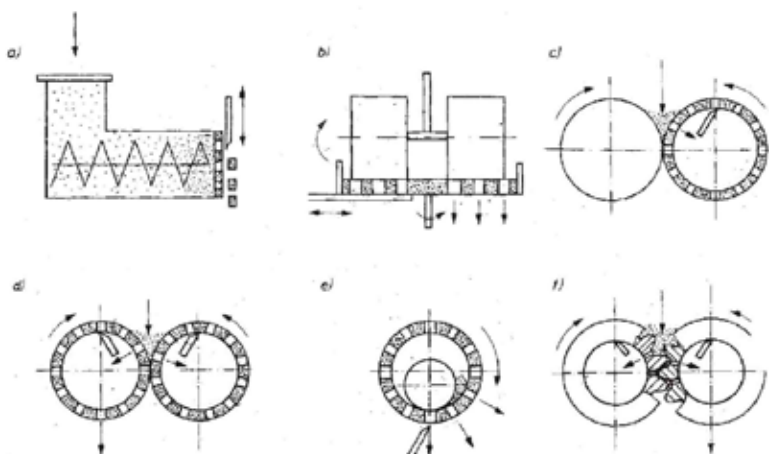


Rys. 2. Podstawowe sposoby brykietowania: 1 – stempel górny, 2 – materiał, 3 – matryca, 4 – stempel dolny, 5 – sprężyna,  $S$  – skok,  $V$  – objętość,  $P$  – nacisk [2, 7]

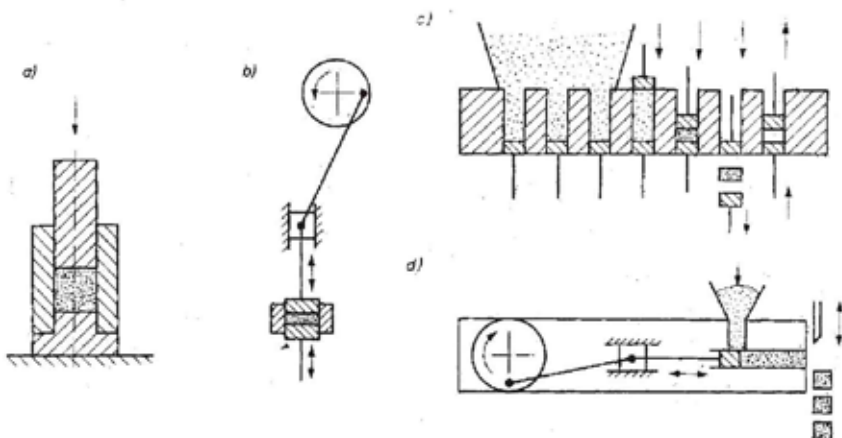
Wszystkie metody brykietowania materiałów drobnoziarnistych zostały zrealizowane w prasach mechanicznych ze stołem obrotowym, sposób b) został ponadto zrealizowany w prasach walcowych i pierścieniowych, natomiast sposób c) wykorzystywany jest we wszelkiego rodzaju prasach wytłaczających (wytłaczarkach z otwartym kanałem formującym [2, 7].

## Prasy do peletyzacji i brykietowania

W prasach do peletyzacji (rys. 3) materiał drobnoziarnisty jest przepychany przez cylindryczne otwory o określonej średnicy, umieszczone w zespołach roboczych prasy. Zagęszczenie materiału następuje pod wpływem sił tarcia występujących pomiędzy ściankami otworów a zagęszczonym materiałem. Na rysunku 3 przedstawiono schematy ideowe różnych rozwiązań konstrukcyjnych tego typu urządzeń [8].



Rys. 3. Podstawowe rozwiązania konstrukcyjne pras do peletyzacji: a) prasa ślimakowa, b) prasa z gniotownikiem krążkowym, c) prasa z zewnętrznym gniotownikiem walcowym, d) prasa z dwoma współbieżnymi matrycami walcowymi, e) prasa z matrycą walcową i wewnętrznym gniotownikiem, f) prasa z dwoma współbieżnymi walcami zębatymi [8]

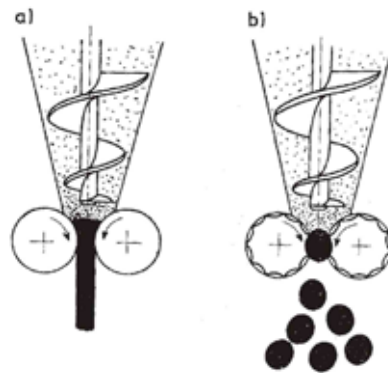


Rys. 4. Prasы stemplowe: a) prosta prasa stemplowa, b) prasa korbowa pionowa, c) prasa kołowa, wielotłoczkowa do produkcji tabletek, d) prasa korbowa pozioma (wyłaczarka stemplowa) [2, 8]

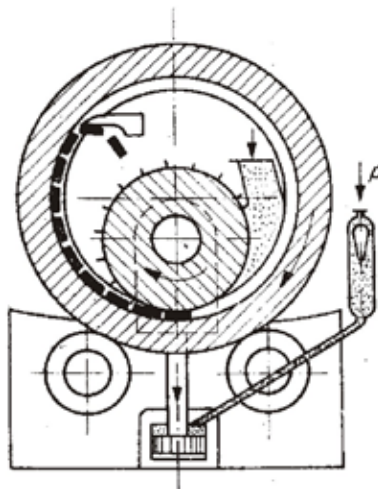
W prasach stemplowych (rys. 4) materiał zostaje zagęszczony przez poruszający się stempel w nieruchomej matrycy. Stempel musi w tym przypadku uzyskać pewne przyśpieszenie aż do wartości prędkości równej zero (proces zagęszczania jest okresowy). W napełnionej wcześniej matrycy materiał zostaje zagęszczony

przez stempel, by w następnej fazie już jako brykiety opuścić matrycę. Brykieciarki tego typu wytwarzają brykiety cylindryczne o warstwowej, łamliwej budowie. Ich średnica waha się od 50 do 100 mm, a długość rzadko osiąga dwukrotność średnicy. Ze względu na ograniczenia hydrauliki, wydajność tych maszyn rzadko przekracza 300 kg/h. Brykieciarki te znajdują zastosowanie przy przetwarzaniu odpadów drzewnych w małych i średnich firmach, najczęściej stolarniach [2, 8].

W prasach walcowych (rys. 5) materiał zostaje zagęszczany w sposób ciągły, między dwoma synchronicznie i przeciwnieobrotowo obracającymi się walcami. Dozowanie materiału pomiędzy walce odbywa się w sposób ciągły, najczęściej za pomocą urządzenia ślimakowego. W urządzeniu tym następuje także wstępne zagęszczenie materiału drobnoziarnistego [2].



Rys. 5. Zasada działania prasy walcowej: a) walce gładkie, b) walce z wgłębieniami formującymi [2]



Rys. 6. Schemat działania prasy pierścieniowej [2]

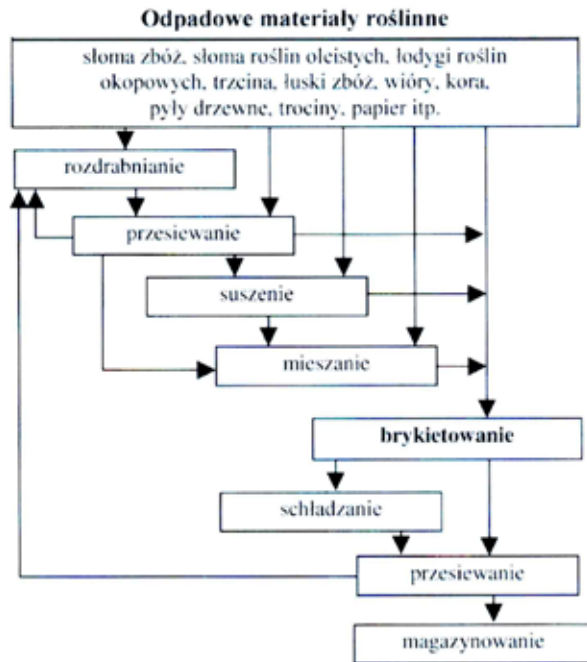
W prasach pierścieniowych (rys. 6) materiał zostaje zagęszczany w kanale utworzonym między pierścieniem zewnętrznym a współbieżnie z obracającym się walcem, usytuowanym wewnątrz pierścienia. Najwyższe ciśnienie prasowania występuje w najniższym punkcie pierścienia i walca roboczego. Wewnętrzny walec roboczy jest uzębiony dla ułatwienia łamania prasowanego w sposób ciągły materiału. W prasach walcowych i pierścieniowych występują małe opory tarcia, co wpływa na zwiększenie żywotności elementów roboczych i zmniejszenie zużycia energii [2].

## Brykiety z biomasy

Brykietowaniu poddaje się bardzo wiele materiałów w różnych celach. Najczęściej są to odpowiednio przygotowane surowce pochodzenia roślinnego, które brykietuje się w celach energetycznych. Tej operacji poddawane są również leki, proszki węglików, wióry metali kolorowych i wiele innych. Media poddawane brykietowaniu muszą, mieć ściśle określone cechy i parametry, ze względu na sam proces brykietowania, składowania i samego spalania. Dla przykładu wilgotność powinna wahać się w granicach 8–18%. Jest ona bardzo ważna zarówno w samym procesie brykietowania (gdy jest za wysoka brykiet jest „rozsadzany” przez gwałtownie parującą wodę, przez co jest on bardzo niskiej jakości) jak i dla zapewnienia korzystnych parametrów energetycznych produktu. Ponadto, im drobniejszą frakcję stanowi surowiec, tym proces brykietowania przebiega sprawniej ze względu na większą powierzchnię przylegania cząsteczek w brykiecie. Ostatecznie, na efektywność procesu spalania wpływa rodzaj brykietowanego materiału, jego gęstość, zdolność do spajania pod wpływem określonego ciśnienia i temperatury, odpowiednie właściwości fizykochemiczne, takie jak: wartość opałowa, ciepło spalania, skład chemiczny materiału przed i po spaleniu oraz zawartość popiołu. Mając na uwadze powyższe, stwierdzono, iż materiał przeznaczony do brykietowania, w wielu przypadkach musi być wcześniej sezonowany lub suszony w specjalnych suszarniach. Trzeba go również niejednokrotnie, dodatkowo rozdrobnić na różnych rodzajach rębakach, siewczkarniach czy młynach [9, 10].

Dla przykładu, na rysunku 7 przedstawiono kolejne fazy pozyskiwania brykietów z materiałów roślinnych [11].

Surowce pochodzenia roślinnego, poddawane procesowi brykietowania zawierają najczęściej celulozę, skrobię, białka, żywice, tłuszcze i woski. Podczas zagęszczania, z jednoczesnym działaniem temperatury, wilgoci i dużego ciśnienia, substancje te ulegają różnorodnym przemianom fizycznym i chemicznym, np. żelowania skrobi, kleikowania białka, stapiania żywicy i ligniny itp. W wyniku tych zjawisk zmniejszają się opory tarcia pomiędzy cząstkami materiału i ściankami kanału komory zagęszczającej. Wpływa to na zmniejszenie jednostkowych nacisków zagęszczania oraz spadek energochłonności procesu, a także polepszenie właściwości mechanicznych gotowego brykietu [2].



Rys. 7. Schemat brykietowania z odpadowych materiałów roślinnych [11]



Rys. 8. Różne rodzaje brykietu z biomasy (fot. B. Igliński)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zdjęcia 8, 10 i 11 wykonane zostały na 7-ych Międzynarodowych Targach Urządzeń, Technologii do Wytwarzania i Zastosowania Pelletu i Brykietu „PELLETS-EXPO & BRYKIET-EXPO”, 24–26 czerwca 2009 w Bydgoszczy.

Niska zawartość wilgoci sprawia, że wartość opałowa brykietów jest wyższa niż drewna. Dzięki dużemu zagęszczeniu materiału w stosunku do objętości, proces spalania jest stopniowy i powolny. Brykiet drzewny ma najczęściej kształt walca lub kostki. Technologia produkcji brykietów drzewnych była już stosowana przed II wojną światową w Szwajcarii, jednak produkcja na skale przemysłowa rozwinęła się dopiero w latach osiemdziesiątych XX wieku [9, 10].

W wielu krajach europejskich obowiązują normy określające właściwości paliwa produkowanego z biomasy. Najbardziej powszechny w Polsce rodzaj brykietu wg niemieckich standardów DIN odpowiada klasie HP 5 (przekrój 0,4–1 cm, długość < 5 cm). Według tej normy przekrój brykietu powinien posiadać geometryczną formę taką jak koło, kwadrat, wielokąt lub owal. Norma określa również gęstość (1–1,4 g/cm<sup>3</sup>), wilgotność (poniżej 12%), zawartość popiołu (poniżej 1,5%), wartość kaloryczną (17,5–19,5 MJ/kg) oraz skład chemiczny brykietu. Norma DIN nie dopuszcza stosowania jakichkolwiek substancji spajających. Jak dotąd w Polsce nie wprowadzono jednolitych norm jakości, jednak atesty brykietu drzewnego przeprowadzane są m. in. przez Główny Instytut Górnictwa oraz Zakład Pomiarowo-Badawczy Energetyki Energopomiar [9, 10]. Normy wybranych krajów dotyczące granulatu drzewnego przedstawiono w tabeli 1 [12, 13].

Technicznie możliwe jest także produkowanie granulatu z kory, zrębków, upraw energetycznych i słomy. Zalety brykietu:

- duża gęstość – łatwość przechowywania i dystrybucji,
- możliwość stosowania w kotłowniach z automatycznym podawaniem paliwa,
- wysoka wartość opałowa – porównywalna z gorszej jakości węglem kamiennym,
- nie zawiera szkodliwych substancji,
- bezpieczna emisja dwutlenku siarki i innych substancji szkodliwych,
- niska zawartość popiołu,
- wykorzystanie popiołu jako nawozu,
- długi czas przechowywania w suchych pomieszczeniach,
- szerokie spektrum zastosowania: w kotłowniach indywidualnych, kotłowniach zasilających sieci grzewcze, kominkach [9, 10].

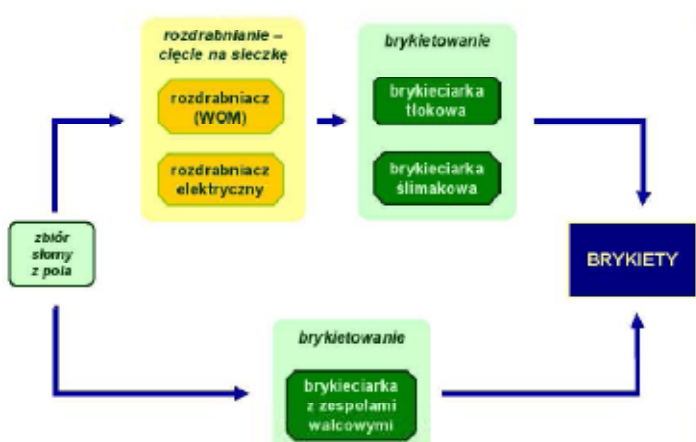
W celu przygotowania do procesu brykietowania, słomę rozdrabnia się do postaci siewki. Czasami z powodu złego magazynowania i zbyt dużej wilgotności wymaga ona suszenia [10]. W toku badań, Adamczyk i współpracownicy [15] wykonali wiele prób brykietowania słomy metodą zwijania. Słoma używana do brykietowania posiadała wilgotność około 20%. Zmieniając parametry pracy maszyny brykietującej uzyskiwano brykiet o różnym stopniu zagęszczenia. Brykiet o największym zagęszczeniu około 500 kg/m<sup>3</sup> uzyskano dla kąta skrzywienia osi walców brykietujących 5°, odległości między osiami walców 85 mm i prędkości obrotowej walców wynoszącej 2,67 Hz.

Stolarski [16] proponuje dwuetapowe pozyskiwanie brykietów ze słomy (rozdrabnianie + brykietowanie) bądź jednoetapowe, z zastosowaniem brykietarki z zespołami walcowymi (rys. 9).

Tabela 1. Porównanie norm dotyczących granulatu drzewnego w wybranych krajach europejskich [12, 13]

Opis	Austria ONORM M 7135		Szwecja SS 10 71 20			Niemcy DIN 51721			Włochy CEN - R 1445				Wielka Brytania / British BioGen Kodex Dobry Praktyki	
	przekrój słowca	przekrój słowca	2 kategorie długości (l i s)			3 kategorie długości (s)			4 kategorie ze względu na średnicę poprzeczną oraz średnicę lub nie dozwolone występowanie pozostałości słowca				granulat słowca parowy jakości	granulat słowca trójfazowy jakości
wymiary	okrągły 24-28 mm maks 100 mm długość	okrągły 220-230mm maks 100 mm długość	maks. długość (24")	maks. długość (25")	maks. długość (26")	HPI HPI HPI HPI HPI	XII H2 H3 H4 H5	XIII 15-18 19-18 6-10 3-7 14 0-4	A bez dozwolone	A z dozwolone	B 6 mm, 8mm	C 6 mm, 8mm	< 40x20mm	> 10 mm - < 20 mm
gęstość nasypowa			250 kg/m <sup>3</sup>	250 kg/m <sup>3</sup>	250 kg/m <sup>3</sup>				220-230 kg/m <sup>3</sup>	220-230 kg/m <sup>3</sup>	220-230 kg/m <sup>3</sup>	230 kg/m <sup>3</sup>	> 100 kg/m <sup>3</sup>	> 100 kg/m <sup>3</sup>
zwilżalność									≥ 97%	≥ 97%	≥ 95%	≥ 90%		
odporność w % (30min)			≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 0,5								< 0,5%	< 0,5%
gęstość zawiesiny	≥ 1,0 kg/m <sup>3</sup>	≥ 1,0 kg/m <sup>3</sup>						11,4 g/m <sup>3</sup>						0,227 kg/m <sup>3</sup>
zawartość wody	≤ 0%	≤ 0%	≤ 0%	≤ 0%	≤ 0%			≤ 0%						
zawartość popiołu	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%			≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%
zawartość węgla (przy dostawie)			≤ 0%	≤ 0%	≤ 0%				≤ 0%	≤ 0%	≤ 0%	≤ 0%	≤ 0%	≤ 0%
wartość opałowa	≥ 10,0 MJ/kg	≥ 10,0 MJ/kg	≥ 10,0 MJ/kg 347 1000kg	≥ 10,0 MJ/kg 47 1000kg	≥ 10,0 MJ/kg 47 1000kg	10,5 - 10,5 MJ/kg			≥ 10,0 MJ/kg	≥ 10,0 MJ/kg	≥ 10,0 MJ/kg	≥ 10,0 MJ/kg	> 4,7 MJ/kg	> 4,7 MJ/kg
siarka	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%			≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%
azot	≤ 0,2%	≤ 0,2%						≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%
chlor	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%			≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%	≤ 0,04%
arsen								≤ 0,1 mg/kg						
kadź								≤ 0,5 mg/kg						
chrom								≤ 0 mg/kg						
miedź								≤ 0 mg/kg						
tytan								≤ 0,05 mg/kg						
olow								≤ 0 mg/kg						
cydek								≤ 0 mg/kg						
fosfor								≤ 0 mg/kg	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%	≤ 0,2%
zanieczyszczenia	wykonane z drewna wolnego od zanieczyszczeń	wykonane z kory wolnej od zanieczyszczeń												
rodzaj węgla (dostawca)			nie może być drewny						nie dozwolone	nie dozwolone	nie dozwolone	nie dozwolone		
temperatura topnienia popiołu			temperatura topnienia musi być określona											

\*) - określone do czasu suchy \*\*) w przypadku wybranych \*\*) wody w wadze popiołu \*\*\* - do określania



Rys. 9. Schemat procesów technologicznych powstawania brykietów słomy [16]



Rys. 10. Brykiet ze słomy (fot B. Igliński)

## Pelety z biomasy

Produkcja peletu polega na poddaniu biomasy trzem kolejnym procesom: suszenia, mielenia i prasowania. Pelety wytłacza się z rozdrobnionej suchej biomasy pod dużym ciśnieniem w prasie rotacyjnej, bez substancji klejącej. Produktem końcowym są małe granulki o kształcie cylindrycznym o średnicy 6–25mm i długości do kilku cm. Bardzo duże siły działające podczas wyciskania powodują, że w małej objętości zostaje upakowana duża ilość produktu. Paliwo to charakteryzu-



je się niską zawartością wilgoci (8–12%), popiołów (0,5%) i substancji szkodliwych dla środowiska oraz wysoką wartością energetyczną. Cechy te powodują, że jest to paliwo przyjazne środowisku, a jednocześnie łatwe w transporcie, magazynowaniu i dystrybucji. Zalety pelet:

- wysoka wartość opałowa (2,1 kg granulatu zastępuje 1 litr oleju opałowego; dobry granulak ma wartość kaloryczną przekraczającą 70% wartości kalorycznej najlepszych gatunków węgla),
- „zerowa” emisja CO<sub>2</sub> oraz niewielka emisja SO<sub>2</sub>,
- odnawialne źródło energii, najczęściej pozyskiwane lokalnie,
- nie zawierają żadnych dodatkowych, szkodliwych substancji chemicznych takich jak kleje czy lakiery,
- łatwe i dogodne w użytkowaniu,
- niskie koszty składowania i transportu,
- odporne na samozapłon oraz naturalne procesy gnilne, a gładka powierzchnia skutecznie chroni przed absorbowaniem wilgoci z otoczenia
- podczas spalania powstaje niewielka ilość popiołu, który stanowi nawóz ogrodniczy [1, 9, 10].

W doświadczeniach polowych, zlokalizowanych w Stacji Dydaktyczno-Doświadczalnej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie [17] badano produktywność wierzby z gatunku *Salix viminalis* w czteroletnim cyklu zbioru oraz ślazuwca pensylwańskiego w jednorocznym cyklu zbioru. Pozyskana z doświadczeń polowych biomasa wierzby i ślazuwca została rozdrobniona na zrębki i przetransportowana do zakładu Max-Parkiet w Żurominie. Następnie surowiec ten został dosuszony w suszarni bębnowej. Kolejnym etapem było mielenie wysuszonych zrębków obu gatunków. Rozdrobniony surowiec poddano procesowi peletyzacji na urządzeniu o wydajności jednej tony pelet na godzinę. Wilgotność pelet z wierzby i ślazuwca była zbliżona. Natomiast zawartość popiołu w peletach wytworzonych z biomasy ślazuwca (3,43%) była ponad dwukrotnie wyższa niż w tych z wierzby (1,38%). Ciepło spalania pelet z *Salix spp.* wynosiło 18 708 kJ/kg, a z *Sida hermaphrodita R.* 18 247 kJ/kg, wartość opałowa z kolei odpowiednio 16 883 i 16 036 kJ/kg. Gęstość nasypowa pelet z biomasy *Salix spp.* wynosiła 635,6 kg/m<sup>3</sup>, natomiast z *Sida hermaphrodita R.* była o ponad 100 kg niższa (517,2 kg/m<sup>3</sup>). Wartość opałowa 1 m<sup>3</sup> pelet wierzbowych kształtowała się więc na poziomie 10,73 GJ, a ślazuwca 8,3 GJ. Całkowity koszt wytworzenia jednej tony pelet z biomasy czteroletnich pędów wierzby wyniósł 317,16 zł/t (tab. 2). Natomiast koszt wytworzenia jednej tony pelet z biomasy ślazuwca był nieznacznie wyższy i wyniósł 323,84 zł/t [17].

Stolarski [18] badał wybraną biomasę po aglomeryzacji (tabela 3). Gęstość świeżych zrębków wierzbowych wynosiła 393,5 kg/mp, przy wilgotności 53%. Wilgotność pozostałych paliw (peletu i brykietu) była kilkukrotnie niższa niż świeżych zrębków, ponieważ jest to uwarunkowane procesem produkcji tych paliw. Pelet wytworzony z trocin sosnowych (667,6 kg/mp) charakteryzował się najwyższą gęstością nasypową. Zawartość popiołu w badanych paliwach wynosiła średnio

1,76%, najniższa była ona w pelecie z trocin dębowych (0,4%). W brykiecie oraz pozostałych rodzajach peletu z trocin wartość tej cechy kształtowała się na zbliżonym poziomie. Pelet z pozostałości słonecznikowych zawierał najwięcej popiołu, prawie 3,5%. Norma DIN 51731 dopuszcza 1,5% zawartości popiołu w pelecie, dlatego tylko pelet z trocin korowanego drewna spełniał wymagania normy.

Tabela 2. Podstawowe parametry pelet z wierzby i ze ślazuwca [17]

<b>Wyszczególnienie</b>	<b>Wierzba</b>	<b>Ślazuwec</b>
Wilgotność [%]	7,5	7,9
Zawartość popiołu [%]	1,38	3,43
Ciepło spalania [kJ/kg]	18708	18247
Wartość opałowa [kJ/kg]	16883	16036
Gęstość nasypowa [kg/m <sup>3</sup> ]	635,6	517,3
Wartość opałowa [GJ/m <sup>3</sup> ]	10,73	8,30



Rys. 11. Produkcja peletu (fot B. Igliński)

Tabela 3. Gęstość nasypowa, wilgotność i zawartość popiołu wybranej biomasy [18]

Biomasa	Gęstość nasypowa [kg/mp]	Wilgotność [%]	Zawartość popiołu [%]
Zrębki wierzbowe (świeże)	393,5	53,11	2,04
Pelet z wierzby	592,3	8,78	2,15
Pelet ze ślazuwca	492,4	8,61	2,71
Pelet z trocin sosnowych	667,6	9,61	1,29
Pelet z trocin bukowych	598,4	7,04	0,80
Pelet z trocin dębowych	608,7	7,95	0,40
Pelet z pozostałości jabłkowych	629,0	12,01	2,17
Pelet z pozostałości słonecznikowych	477,6	12,04	4,37
Brykiet z mieszaniny trocin	295,1	7,91	0,61
Średnio	497,1	13,92	1,76

Ciepło spalania oznaczone w pelecie wyprodukowanym z pozostałości słonecznikowych oraz w pelecie z trocin sosnowych było wysokie, odpowiednio 20,08 i 20,06 MJ/kg. Wartość opałowa, uwzględniająca wilgotność danego paliwa oraz zawartość w nim popiołu, była istotnie najniższa w przypadku świeżych zrębków wierzby (7,67 MJ/kg). Istotnie najwyższą wartością opałową charakteryzował się pelet wyprodukowany z trocin dębowych (18,03 MJ/kg). Wartość opałowa peletu z wierzby i ślazuwca była zbliżona i wynosiła około 17 MJ/kg [18].

Obecnie bez problemu można zakupić urządzenia do aglomeracji materiałów roślinnych. Przykładowo, firma Ecurex [19] posiada w swojej ofercie szeroką gamę urządzeń do produkcji peletów.

## Wytwarzanie i badanie brykietów z węgla i biomasy

Autorzy opracowania wytworzyli brykiety z węgla i biomasy. W przedsięwzięciu tym wykorzystano węgiel pozabilansowy (muł węglowy) z Przedsiębiorstwa Wzbogacania Węgla Kamiennego „Carbo-Concentrat” S.A. w Mysłowicach, zaś trociny sosnowe dostarczono z Zakładów Przemysłu Drzewnego w Toruniu.

Przedmiotem patentu nr 126 731 pt. „Sposób wytwarzania tabletek paliwowych z włóknistego materiału organicznego” jest brykietowanie bez użycia lepiszczy [20]. Zgodnie z tą publikacją, odpady drzewne nie wymagają lepiszcza dodatkowego, ponieważ mają własność samosklejania podczas brykietowania w wyższej temperaturze. Opisany tutaj sposób obejmuje rozdrobnienie włóknistego materiału organicznego do wielkości cząstek nieprzekraczającej 85% minimalnego wymiaru formowania tabletek, suszenie oraz sprasowywanie osuszonego materiału. Jak podaje opis materiał przed sprasowaniem suszony jest do uzyskania zawartości wilgoci w przedziale 16–28% wagowych a najlepsze efekty uzyskuje

się przy wilgoci wynoszącej 20–24% wagowych. Warunkiem wystąpienia naturalnych procesów samosklejania podczas sprasowywania materiału, oprócz odpowiedniej wilgotności materiału wyjściowego, jest zastosowanie takiego ciśnienia podczas etapu sprasowywania, aby tabletką opuszczająca matrycę tabletkarki miała temperaturę w zakresie 163–177°C. W takim to zakresie temperatury zostają uwolnione naprężenia sprężyste z materiału, jakie powstały w nim pod ciśnieniem brykietowania, co umożliwia ściśle zetknięcie się powierzchniowe cząstek. Spojenie powierzchni cząstek, zespalanie się włóknistych części cząstek drewna oraz połączenie się drzewnika, będącego naturalnym lepiszczem pomiędzy włóknami drzewnymi, wszystko to powoduje wzajemne wiązanie cząstek drzewnych, nadając brykietom dostateczną wytrzymałość po ochłodzeniu pod ciśnieniem. Stwierdzono ponadto, że dla uzyskania równomiernego spalania otrzymanych w ten sposób tabletek paliwowych konieczne jest ich osuszenie do wilgotności równoważnej z wilgotnością otoczenia, tj. około 7–8% [21,22].

Przygotowanie próbek do brykietowania poprzedzone było określeniem wilgotności materiałów wyjściowych na wagosuszarce. Brykiety z trocin sosnowych oraz brykiety mieszane otrzymano na prasie ręcznej typu LPR-250. Przed zbrykietowaniem materiał został poddany rozdrobnieniu. Trociny sosnowe i muł węglowy zostały ze sobą dokładnie wymieszane następujących w proporcjach:

- 70% mułu węglowego, 30% trocin sosnowych;
- 50% mułu węglowego, 50% trocin sosnowych;
- 30% mułu węglowego, 70% trocin sosnowych.

Wilgotność zmierzona na wagosuszarce dla mułu węglowego wynosząca średnio 14,40% i dla pyłu sosnowego 11,32% nie gwarantowała wymaganej w opisie patentowym wilgotności surowców do brykietowania w zakresie 16–28%, dlatego próbki przed wygrzaniem zostały nawilżone odpowiednią ilością wody.

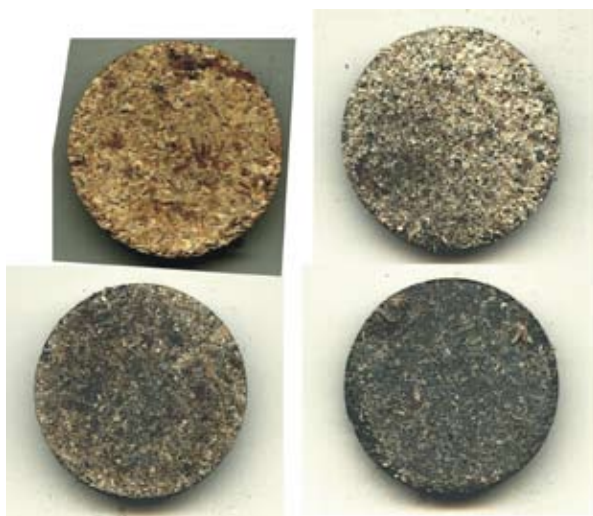
Do matrycy tabletkarki wprowadzono około 12 g surowca. Ciśnienie prasowania wynosiło 40 MPa. Materiał pozostawał pod ciśnieniem w tabletkarce przez czas pięciu minut. Prasowanie odbyło się zarówno na zimno, jak i w podwyższonej temperaturze (w zakresie 160–200°C).

W wielu typach urządzeń brykietujących, np. w granulatorze ślimakowym temperatura prasowania znacznie wzrasta na skutek tarcia surowca o elementy układu roboczego. Dostępna prasa pozbawiona była takich możliwości. Problem uzyskania pożądanej temperatury rozwiązano umieszczając matrycę wraz z surowcem w rozgrzanej do 200°C suszarce. Taka temperatura zapobiegała ostygnięciu surowca poniżej 160°C podczas przenoszenia matrycy z powrotem do prasy ręcznej. Czas wygrzewania matrycy z surowcem wynosił 1 godzinę.

Efekt zastosowanych podczas brykietowania zabiegów zbadano porównując wytrzymałość mechaniczną brykietów powstałych w podwyższonej temperaturze, z brykietami (o takim samym składzie), których wytwarzanie przebiegało bez etapu wygrzewania materiałów w matrycy.

Wzrost temperatury powoduje zwiększenie wytrzymałości brykietów a także gęstości, co można przypisać właściwości uplastycznionej ligniny. Brykiet sosno-

wy powstały w rozgrzanej matrycy nie rozpada się po dziesięciokrotnym zrzuconiu z wysokości 2 m, a ubytek jego masy także jest niewielki. Choć wytrzymałość brykietu sosnowego otrzymanego na zimno jest wyraźnie mniejsza, to można zaobserwować na jego przykładzie dużą zdolność do wiązania mechanicznego badanych tu odpadów drzewnych. Wiązania tego typu związane są z zaklinowaniem i zazębaniem cząstek brykietowanego materiału. Czynnikiem zwiększającym wytrzymałość jest wzrost zawartości trocin sosnowych w składzie brykietu, natomiast im większa przewaga mułu węglowego tym stopień wiązania surowców jest słabszy.



Rys. 12. Brykiety zawierający a) 100% trocin sosnowych, b) 70% trocin sosnowych i 30% mułu węglowego, c) 50% trocin sosnowych i 50% mułu węglowego, d) 30% trocin sosnowych i 70% mułu węglowego

Wzrost wytrzymałości brykietów mieszanych wzrasta istotnie wraz z temperaturą prasowania. Efekt ten przypisać można własności komponentu drzewnego i zawartej w nim ligniny, a także w mniejszym stopniu jego zdolnościom mechanicznego wiązania. Potwierdza to wzrost wytrzymałości brykietów wraz ze wzrostem przewagi trocin względem mułu węglowego.

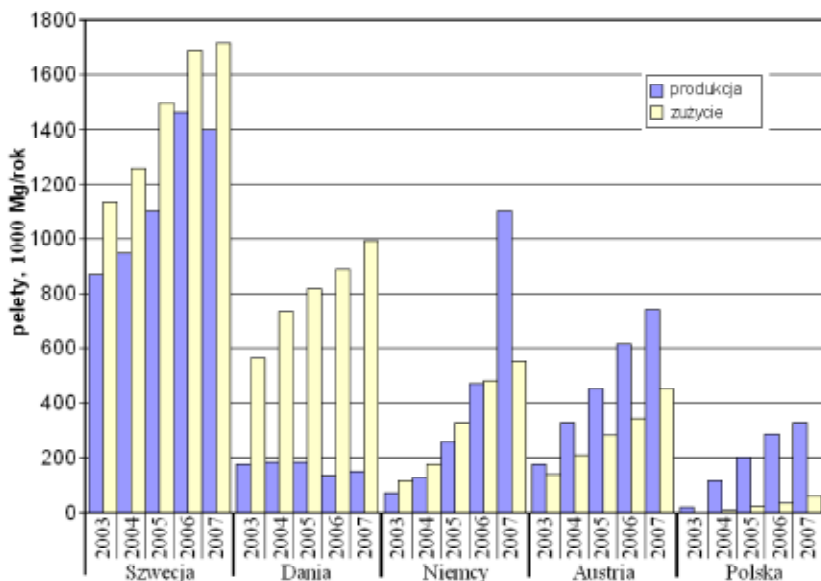
Przyczyną powstawania tego typu wiązania może być zaklinowanie i zazębienie cząstek brykietowego materiału. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- 1) Dodawanie substancji wiążących do odpadów drzewnych w celu umożliwienia ich dobrego zbrykietowania jest niezbędne. Drewno posiada naturalne substancje wiążące, których działanie wyzwała wysoka temperatura.

- 2) Możliwe jest brykietowanie odpadów drzewnych w temperaturze pokojowej, dobrze rozdrobnione surowce mają dużą zdolność do łączenia się w sposób mechaniczny (na zasadzie zaklinowywania i ząbienia się cząstek).
- 3) Wzrost temperatury wpływa pozytywnie na wytrzymałość zarówno brykietów jednorodnych – sosnowych, jak i mieszanych, tj. węglowo- sosnowych.
- 4) Łączenie dwóch niejednorodnych surowców, takich jak trociny sosnowe i muł węglowy wpływa negatywnie na wytrzymałość brykietu, która maleje wraz ze wzrostem udziału tego ostatniego składnika.
- 5) Możliwe jest wytwarzanie brykietów mieszanych, łączących odpady drzewne i muł węglowy techniką bezlepiszczową, warunkiem jest odpowiednia temperatura i przewaga zawartości biomasy. Jednakże produkcja brykietów tego typu z przewagą węgla wymaga dodatku substancji wiążącej.
- 6) Biomasa jako paliwo może być wykorzystana do współspalania z węglem. Dzięki swej niskiej popielności redukuje ilość uciążliwych odpadów stałych powstających jako produkt spalania, co ma szczególne znaczenie przy rozwiązywaniu problemów związanych z zagospodarowywaniem paliw niskiej jakości, takich jak muł węglowy.

## Rynek peletów w UE i w Polsce

Rynek peletów w krajach UE można określić jako „eksplodujący”, co jest głównie wynikiem wymogów ochrony środowiska. Zakres zastosowań peletów obejmuje sektory: użytkowników indywidualnych i komunalnych oraz energetykę przemysłową i zawodową, nadają się one bowiem do zasilania małych kotłów ciepłowniczych, kotłów rusztowych, kotłów fluidalnych oraz do kotłów pyłowych. Szeroki zakres zastosowań peletów jest wielką zaletą, ponieważ zwiększa zapotrzebowanie na nie, a przez to możliwość masowej produkcji oraz zmniejszenia kosztów wytwarzania i dystrybucji. Ocenia się, że do końca 2010 roku, produkcja peletów drzewnych w Europie może osiągnąć 10 mln Mg. Mimo możliwości rozwoju produkcji w Europie Centralnej brakuje peletów i konieczny jest ich import z Europy Wschodniej, a nawet z Kanady. Największymi producentami peletów w UE są: Szwecja [23], Austria i Niemcy, cechuje je także duże krajowe zużycie – jest to efekt dobrze rozwiniętego rynku peletów [24].



Rys. 13. Rozwój rynku peletów w wybranych krajach UE [24]

Polski rynek peletów jest jeszcze młody, obecnie jest niewiele ponad 30 producentów peletów, większość zakładów produkcyjnych znajduje się w gęsto zaludnionej północnej i północno-zachodniej części kraju. Ponad połowa z nich to małe zakłady ze zdolnością wytwórczą poniżej 30 tys. Mg/rok. Sumaryczna zdolność produkcyjna oceniana jest na ok. 500 tys. Mg/rok, ale na przykład w 2007 r. produkcja peletów tylko nieznacznie przekroczyła 350 tys. [25]. Duże znaczenie ma eksport, na przykład w 2005 r. wyprodukowano ponad 200 000 Mg peletów, z czego 175 000 Mg na eksport. Rosnącemu eksportowi peletów niestety nie towarzyszy rozwój własnego, krajowego rynku. Brak rozwiniętej sieci dystrybucji i informacji o produkcie oraz jego cenie i jakości powoduje, że pelety zalegają w magazynach, podczas gdy istnieje na nie zapotrzebowanie w innym rejonach [24, 25].

## Literatura

1. R. Hejft, *Cisnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych*, Wyd. Pol. Białostockiej, Białystok 2002.
2. Z. Drzymała, *Podstawy inżynierii procesu zagęszczania i prasowania materiałów*, PWN, Warszawa 1988.
3. W. Pietsch, Pressure Agglomeration-State of Art, Proc. 2nd Int. Symp. on Agglomeration, K.V.S. Sastry (ed.), AIME, 649–677, New York 1977.

4. H. Rumpf, *The Strength of Granules and Agglomerates on*, Agglomeration, Interscience W.A.K. Knepper (ed.), 379–414, New York 1962.
5. H. Rumpf, *Particle technology: applied science and system engineering*, Loughborough University of Technology, London 1990.
6. A. Heim, T. Gluba, B. Kochański, *Granulacja aglomeracyjna drobnociarnistych odpadów przemysłu metalurgicznego*, Fyzykochemiczne Problemy Mineralurgii 29, 1995.
7. H. Rieschel, *Die Industrielle Anwendung der Kompaktierung*, Köpperb GmbH, Hattingen/Ruhr 1970.
8. H. Hummel, *Pressagglomeration – Theorie und Praxis, materiały symposiumu Metody zagęszczania materiałów drobnociarnistych*, Kraków 1985.
9. <http://www.biomasa.org> (wejście 08.09.09).
10. <http://www.agroenergetyka.pl> (wejście 09.09.09).
11. L. Demianiuk, *Brykietowanie rozdrobnionych materiałów roślinnych, rozprawa doktorska*, Politechnika Białostocka, Białystok 2001.
12. E. Wach, *Właściwości granulatu drzewnego*, Czysta Energia 6, 33–35, 2005.
13. <http://www.komunalny.pl> (wejście 14.09.09).
14. M. Temmerman et al., Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes, *Biomass&Bioenergy* 30, 964–972, 2006.
15. F. Adamczyk i in., *The investigative problems in the process of inspissation of the straw intended on the fuel*, Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering 50(4), 5–8, 2005.
16. F. Adamczyk, I. Borek-Idźkowska, *Safety hazards at shredders and the briquetting machines of straw*, Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering 53(2), 12–15, 2006.
17. M. Stolarski, *Pelety z biomasy wierzby i słazowca*, Czysta Energia 6, 36–38, 2005.
18. M. Stolarski, S. Szczukowski, J. Tworowski, *Charakterystyka wybranych biopaliw z biomasy stałej*, Problemy Inżynierii Rolniczej 4, 2007.
19. <http://www.ecurex.pl> (wejście 15.09.09).
20. R.W. Gunnerman, *Sposób wytwarzania tabletek paliwowych z włóknistego materiału organicznego, opis patentowy nr 126 731*, Urząd Patentowy PRL, 1985.
21. B. Kochański, E. Rzyski, *Podstawy techniki granulacji*, WNT, Warszawa 1989.
22. W. Korpala, W. Weiner, *Techniki granulacyjne w utylizacji pylistych odpadów przemysłowych*, BTN, ATR, Bydgoszcz 2000.
23. M. Ståhl, F. Wikström, *Swedish perspective on wood fuel pellets for household heating: A modified standard for pellets could reduce problem*, Biomass&Bioenergy 33, 803–809, 2009.
24. M. Jakubiak, W. Kordylewski, *Pelety podstawowym biopaliwem dla energetyki*, materiał dostępny na stronie: <http://www.spalanie.pwr.wroc.pl> (wejście 15.09.09).
25. <http://www.pelletsatlas.info> (wejście 15.09.09).



# SPALANIE BIOMASY

Ogień i spalanie towarzyszyły człowiekowi od zarania dziejów, zaś pierwszym paliwem była biomasa. W dużym uproszczeniu, spalanie można zdefiniować jako szybkie utlenianie paliw ze znacznym wydzielaniem ciepła, manifestujące się widocznym płomieniem.

Spalanie pozostaje najbardziej popularną technologią wykorzystania biomasy. Jest uznawane za podstawową, dobrze opracowaną technologię przetwarzania biomasy w energię elektryczną i/lub ciepło.

## Spalanie drewna

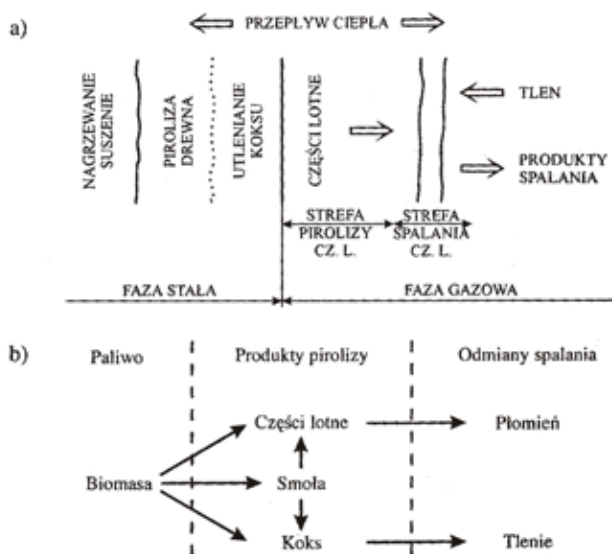
Z powodu dużej zawartości wilgoci oraz części lotnych, drewno ma właściwą sobie specyfikę spalania; można wyróżnić cztery fazy tego procesu (rys. 1) [1]:

- nagrzewanie i suszenie,
- rozkład termiczny,
- spalanie produktów rozkładu termicznego oraz
- spalanie pozostałości koksowej.

Drewno najpierw nagrzewa się i suszy, następnie w fazie gazowej spalają się lotne produkty rozkładu termicznego, a następnie karbonizat. Rozkład termiczny drewna zaczyna się już w temperaturze 220°C, a poszczególnych składników drewna w temperaturze:

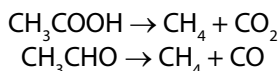
- hemiceluloza: 220–320°C,
- celuloza 320–370°C,
- lignina 320–500°C.

Stwierdzono jakościową różnicę pomiędzy termicznym rozkładem holocelulozy (celuloza i hemiceluloza) i ligniny – pierwsza ulega „głębszemu” rozkładowi termicznemu, generując więcej produktów lotnych, podczas gdy lignina daje więcej pozostałości koksowej. Duży wpływ na skład produktów termicznego rozkładu drewna ma dopływ tlenu i temperatura. Swobodny dopływ tlenu i wysoka temperatura (spalanie płomieniowe) sprzyjają szybszemu wydzieleniu części lotnych, natomiast w warunkach niedostatku tlenu i w niskiej temperaturze powstaje więcej karbonizatu [1, 2, 3].



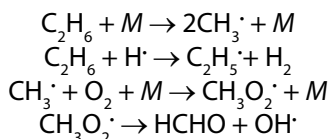
Rys. 1. Mechanizm płomieniowego spalania drewna (a), rozkład termiczny drewna zależnie od charakteru spalania (b) [1]

Najwięcej części lotnych wydziela się z drewna ogrzewanego w temperaturze 250–450°C. Duża zawartość pary wodnej w lotnych produktach rozkładu termicznego drewna oraz znaczny udział tlenu w drewnie powodują, że strefa spalania części lotnych jest bardziej rozciągnięta, a temperatura jej niższa niż w przypadku spalania węgla. Na drodze do płomienia lotne składniki ulegają w pierwszej kolejności termicznemu rozkładowi do związków prostszych, przykładowo [4]:

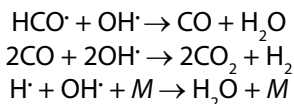


Ze względu na niską temperaturę płomienia strefę spalania części lotnych można umownie podzielić na dwie części, biorąc pod uwagę ważniejsze reakcje chemiczne. Reakcje chemiczne w poszczególnych strefach spalania można scharakteryzować następująco [4]:

a) strefa spalania (generacji rodników  $M$ ):



b) strefa dopalania (rekombinacji rodników, dopalania CO):



Teoretyczna temperatura spalania części lotnych pochodzących z rozkładu termicznego drewna sięga 1750°C, ale zawartość wody w drewnie znacznie ją obniża. Ilość sadzy powstająca podczas spalania części lotnych z drewna jest znacznie mniejsza niż podczas spalania węgla [2, 5].

Drewno spalane jest na szeroką skalę. Współczesne kominki z szybą czołową, osłaniającą płomień, umożliwiając regulację ilości powietrza doprowadzanego do paleniska coraz częściej stosowane są jako podstawowe systemy ogrzewania domów jednorodzinnych [6, 7]. Na rynku znajduje się szeroka oferta kominków domowych. Przykładowo, kominek Foghet [8] (rys. 2.) o mocy 23 kW może ogrzać mieszkanie o powierzchni do 100 m<sup>2</sup>. Zastosowanie wbudowanego nawilżacza zapobiega występowaniu wielu dolegliwości, jak ból gardła czy alergie.



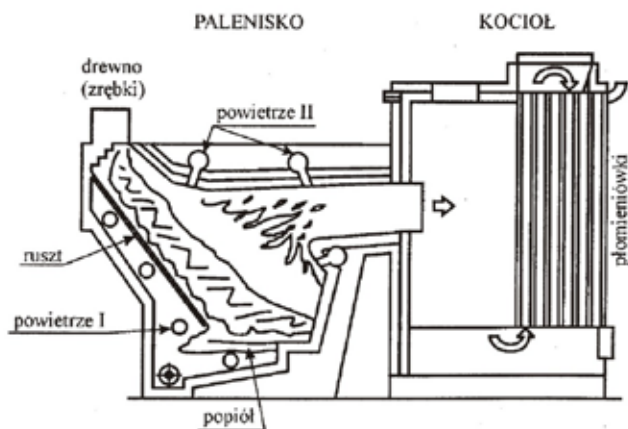
Rys. 2. Kominek Foghet z szybą półokrągłą spalający drewno i pelety (po lewej) oraz drewno (po prawej) [8]

Istnieje wiele konstrukcji palenisk do spalania drewna, różnią się one w zależności od mocy cieplnej i postaci spalanego drewna. Ze względu na organizację procesu spalania wyróżnia się trzy typy palenisk:

- rusztowe (stałe i przesuwane),
- fluidalne oraz
- cyklonowe [2].

Paleniska rusztowe (rys. 3.) stosowane są do spalania drewna w kotłach o mocy do 5 MW, przede wszystkim dzięki małym kosztom inwestycyjnym i eks-

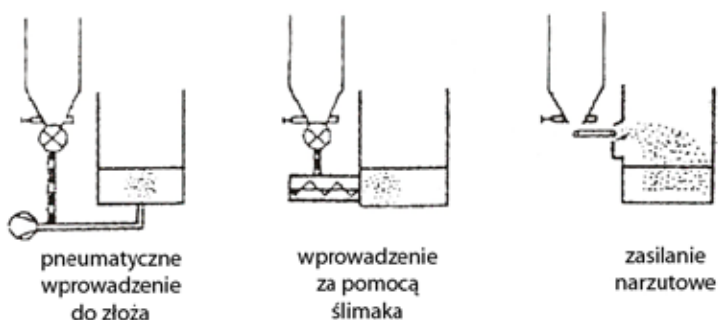
ploatacyjnym. Najpowszechniej stosowane są ruszty pochyłe, schodkowe i posuwisto-zwrotne. W kotłach rusztowych można spalać drewno o różnych rozmiarach o zawartości wody do 65%. Na rysunku 3 przedstawiono schemat „kotła na drewno” z rusztowym przedpaleniskiem typu schodkowego. Odbiór ciepła odbywa się poza paleniskiem, co zapewnia odpowiednie warunki do suszenia i wypalenia drewna [2].



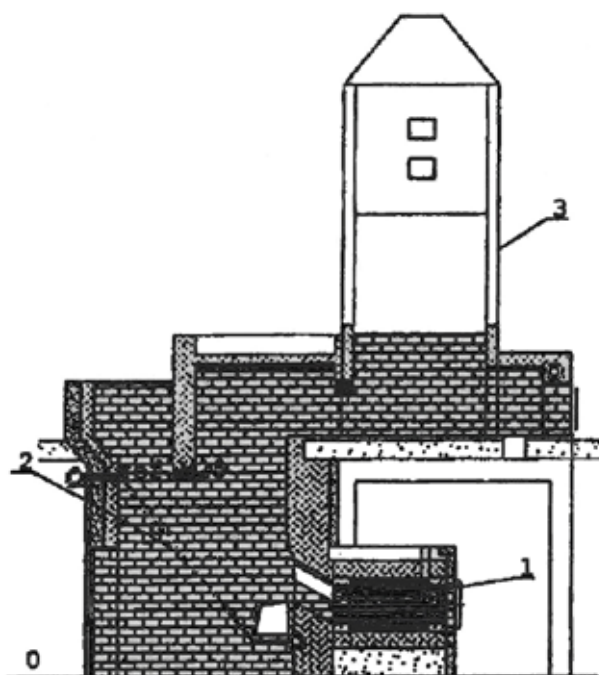
Rys. 3. Kocioł z rusztowym przedpaleniskiem do spalania drewna [2]

Paleniska fluidalne ze stacjonarnym lub cyrkulującym złożem, są przeznaczone głównie do spalania przemysłowych odpadów drzewnych. Kotły fluidalne do spalania drewna osiągają znaczne moce, ich wydajność przekracza 200 Mg pary/h, a zazwyczaj czynnikiem ograniczającym wydajność kotła jest możliwy do pozyskania strumień paliwa. W kotłach fluidalnych można spalać biomasę o dużej wilgotności (do 60%), podczas spalania powstają niewielkie ilości  $\text{NO}_x$ . Na rysunku 4 przedstawiono możliwości podawania rozdrobnionego drewna do złoża fluidalnego [9].

Spalanie bardzo rozdrobnionego drewna (np. trocin) w paleniskach rusztowych i fluidalnych sprawia trudności z powodu zbyt szybkiego wynoszenia cząstek drewna z paleniska. Lepiej do tego celu nadają się paleniska cyklonowe, zapewniając dobre wypalenie cząstek drewna i niewielką emisję CO. Paleniska cyklonowe najczęściej stosowane są jako przedpalenisko do kotłów rusztowych lub jako paleniska dopalające do kotłów fluidalnych. Na rysunku 5 przedstawiono schemat cyklonowego przedpaleniska do spalania trocin i pyłów drzewnych z materiału ceramicznego do kotła wodnego WR-1,25. Udział CO w spalinach był śladowy, udział  $\text{NO}_x$ : 120 mg/m<sup>3</sup> dla 11%  $\text{O}_2$ , natomiast temperatura spalin z komory cyklonowej wynosiła 950°C [10].



Rys. 4. Wprowadzanie drewna do złoża fluidalnego [9]



Rys. 5. Kocioł z cyklonowym paleniskiem na trociny: 1 – cyklon, 2 – ruszt, 3 – kocioł [10]

Nie stosuje się palenisk pyłowych do spalania drewna z powodu konieczności znacznego rozdrobnienia i wysuszenia drewna, dużej emisji  $\text{NO}_x$ , wyprowadzania popiołu niemal w całości ze spalinami [2].

Wykorzystanie drewna na cele opałowe ma w Polsce długą tradycję, zwłaszcza jeśli chodzi o spalanie drewna w indywidualnych kotłowniach małej mocy.

Liczbę gospodarstw indywidualnych wyposażonych w kotły na drewno ładowanych ręcznie szacuje się na około 100 tysięcy [11]. W większości są to kotły o niskiej sprawności (często kotły na węgiel), chociaż w ostatnich latach pojawiają się kotły z atestami energetycznymi. Przykładowo, polski kocioł [12] SMOK (rys. 6) posiada sprawność 84%, zbiornik na opał może być usytuowany z lewej lub prawej strony kotła, wielkość zbiornika od 0,6 do 10 m<sup>3</sup>.



Rys. 6. Automatyczny Zestaw do Spalania Biomasy SMOK o mocy 30 kW [12]

Więcej informacji na temat spalania drewna zawierają opracowania Tillmana [1], Kordylewskiego [2] i Gradziuka [11].

## Spalanie słomy

Wykorzystanie słomy jako paliwa w prymitywnych piecach do ogrzewania budynków mieszkalnych na wsi, a nawet pod płytami kuchennymi w ubogich rodzinach wiejskich, znane było od dawna [13, 14]. Takie prymitywne spalanie słomy charakteryzuje się oczywiście bardzo niską sprawnością cieplną (najwyżej 30–35%) i emisją do atmosfery dużych ilości tlenu węgla, pyłów i szkodliwych substancji organicznych. Profesjonalne podejście do energetycznego wykorzystania słomy zaczęło się w niektórych krajach europejskich, a szczególnie w Danii, w latach 70-tych, czyli w latach tzw. kryzysu paliwowego. Wówczas rozpoczął się szybki rozwój konstrukcji kotłów centralnego ogrzewania opalanych słomą, które zastępowały dotychczasowe kotły olejowe lub gazowe i zapewniały wyższą sprawność cieplną oraz niższe emisje szkodliwych składników spalin. Liderem w tej dziedzinie stała się Dania [15].

Słoma jest dość trudnym paliwem do spalania, gdyż dostarczana do kotła charakteryzuje się wysokim stopniem niejednorodności, zwłaszcza substancji mineralnych i wilgoci [16]. Podczas spalania słomy można wyróżnić cztery fazy:

- faza I – odparowanie wody zawartej w słomie,
- faza II – gazyfikacja słomy; powstaje tlenek węgla, wodór, metan i wyższe węglowodory;
- faza III – spalanie gazów. W trakcie zupełnego spalania (odpowiednia ilość tlenu) powstaje dwutlenek węgla i woda, przy niedostatku tlenu powstaje tlenek węgla, sadza i smoła oraz
- faza IV – spalanie węgla. W przypadku zupełnego spalania produktem jest  $\text{CO}_2$ , a przy niedostatku tlenu także CO. Spaleniu zupełnemu towarzyszy powstanie popiołu, który zawiera również niespalone związki materii organicznej [17].

Ciepło wytworzone podczas spalania biomasy w znacznej części jest pochłaniane przez płaszcz wodny kotła, część ciepła unoszona przez spaliny jest tracona. Popiół ze spalania może utrudniać „prowadzenie” ognia w kotle. Przy spalaniu niektórych rodzajów słomy (np. jęczmiennej) stałe części popiołu topią się już w temperaturze  $600^\circ\text{C}$ . Powoduje to oklejanie komory spalania i płomieniówek masą smołową, która po termicznym utwardzeniu tworzy szklistą, nieprzepuszczalną dla ciepła materię; utrudnia to przenikanie ciepła do płaszcza wodnego [18]. Denisuk i Piechocki [17] kotły do spalania słomy dzielą na dwa rodzaje:

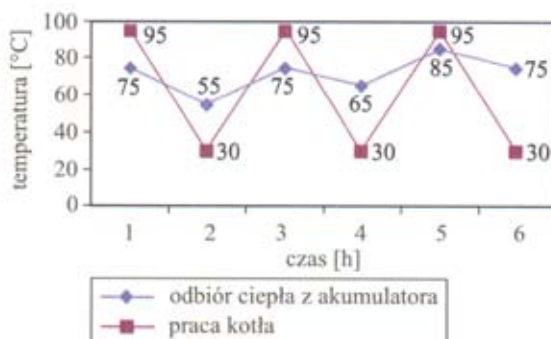
- wrzutowe, które pierwotnie były kotłami płomienicowymi. Ze względu na powstające w czasie spalania słomy lotne pyły, stanowiące około 46% objętości spalin, zaczęto stosować kotły płomienicowo-płomieniówkowe z pojedynczym lub podwójnym zawrotem spalin oraz
- automatyczne; stosuje się tu głównie bezresztowe kotły płomienicowo-płomieniówkowe z przedpaleniskiem oraz kotły płomienicowo-płomieniówkowe rusztowe z rusztem schodkowym wykonującym ruch posuwisto-zwrotny.

Z kolei Gradziuk [11] dzieli kotły do spalania słomy na trzy rodzaje:

- wsadowe do okresowego spalania całych bel słomy,
- do spalania słomy rozdrobnionej oraz
- do „cygarowego” spalania całych bel słomy.

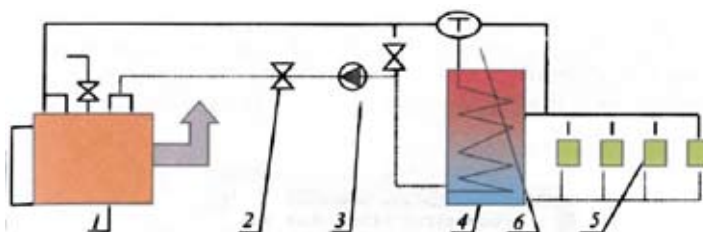
Kotły wrzutowe charakteryzuje cykliczność załadunku słomy. Między kolejnymi załadunkami następuje wygaszenie kotła i związany z tym spadek temperatury płaszcza wodnego kotła. Na rysunku 7 przedstawiono zmianę temperatury kotła wrzutowego [19].

Ażeby uniknąć dyskomfortu cieplnego powodowanego wahaniami temperatury związanymi z obsługą kolejnych cykli kotła, do układu grzewczego kotła wrzutowego należy wmontować zbiorniki akumulacyjne (rys. 8.), które umożliwiają dostawę ciepła w cyklu wygaszania i załadunku kolejnej porcji słomy do kotła. Sprawność cieplna kotłów wsadowych wynosi 70–75%, emisja CO od 1 do  $4 \text{ g/m}^3$  [20].



Rys. 7. Przebieg temperatury kotła „EKOPAL” sprzężonego z akumulatorem ciepła [19]

Kotły wrzutowe wymagają dokładnego wypełnienia przestrzeni płomienicy (paleniska) słomą. Kotły o mocy powyżej 70 kW ładowane są słomą prasowaną w formie biał cylindrycznych o masie 110–200 kg. W przestrzeni płomienicy stosuje się jedną lub dwie dysze nawiewu powietrza. W celu zapewnienia zupełnego i całkowitego spalania słomy wewnątrz kotła, powierzchnie sklepienia i miejsca zawrotu spalin wykłada się elementami ceramicznymi. Podawanie słomy i proces prowadzenia ognia w kotłach automatycznych odbywa się w ruchu ciągłym i jest sterowane komputerowo[17].

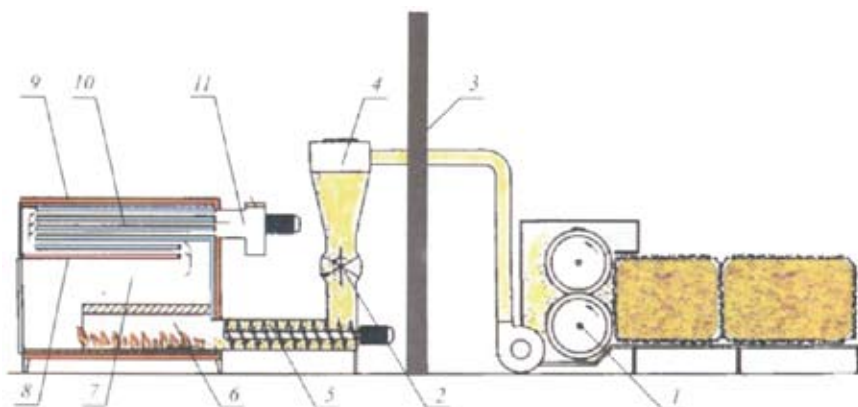


Rys. 8. Schemat urządzenia grzewczego z kotłem wrzutowym i zbiornikiem akumulacyjnym: 1 – kocioł wrzutowy, 2 – zawory, 3 – pompa, 4 – zbiornik akumulacyjny, 5 – grzejniki odbiorcy, 6 – zawór trójdrogowy [17]

W przypadku kotłów płomienicowo-płomieniówkowych bezresztowych ciągłą pracę zapewnia wytworzone ze słomy cygaro bez końca, palące się od przodu. Cygaro tworzone jest poprzez zagęszczanie wtórnej słomy rozluźnionej lub poprzez wpychanie do przedpaleniska całych balotów. Na rysunku 9 przedstawiono



schemat ciągu technologicznego ciepłowni z automatycznym, pneumatycznym podawaniem słomy do kotła płomienicowo-płomieniówkowego z przedpaleniskiem [17].

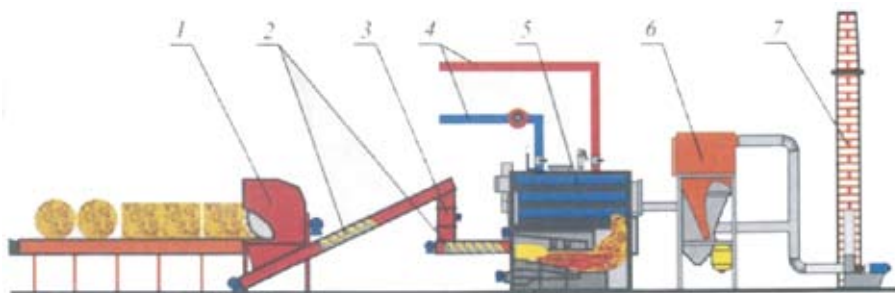


Rys. 9. Automatyczna ciepłownia na słomę z przedpaleniskiem: 1 – szarpacz słomy, 2 – zgarniacz śluzą dozująca słomę, 3 – ściana ogniowa, 4 – wentylator wyciągowy słomy, 5 – przenośnik ślimakowy, 6 – przedpalenisko, 7 – komora spalania, 8 – ceramika, 9 – izolacja, 10 – płaszcz wodny, 11 – wentylator [17]

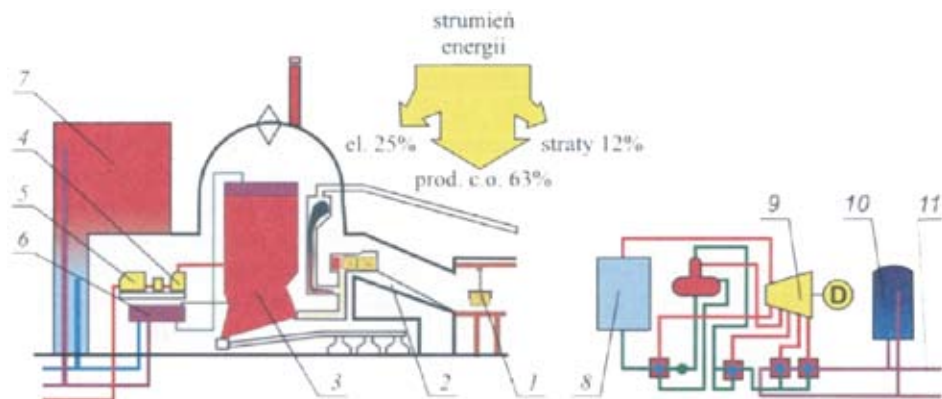
W kotłach płomienicowo-płomieniówkowych z rusztem posuwisto-zwrotnym istnieją dwa możliwe systemy podawania słomy na ruszt: system podawania słomy rozdrobnionej i system podawania całych balotów. W Danii technologię podawania do kotła słomy rozdrobnionej stosuje się dla urządzeń energetycznych do 10 MW mocy kotła [17].

Na rysunku 10 przedstawiono schemat kotłowni opalanej słomą o mocy 3,5 MW działającej w Lubaniu. Zastosowany system rozdrabniania słomy i jej transportu umożliwia podawanie do kotła rusztowego słomy wilgotnej. Wprowadzenie pomiędzy szarpaczem słomy a śluzą dozującą przenośnika łańcuchowo-zgrzeblowego w miejsce dotychczas stosowanego przenośnika ślimakowego znacznie ułatwiło pracę – wyeliminowano zjawisko blokowania transportu słomy rozdrobnionej [21].

Kotły płomienicowo-płomieniówkowe z rusztem to także kotły wysokotemperaturowe stosowane w elektrociepłowniach, w których w większości stosuje się współspalanie słomy ze zrębkami drewna lub osadami ściekowymi. Na rysunku 11 przedstawiono schemat elektrociepłowni z Mansedo w Danii. Elektrociepłownia wyposażona jest w turbinę o mocy elektrycznej 8,3 MW i wytwarza moc cieplną 33,2 MW. Współspalanie pozwala poprawić parametry techniczne paliwa, a co za tym idzie również sprawność procesu [17].



Rys. 10. Schemat kotłowni w Lubaniu: 1 – stół dozujący zakończony szarpaczem typ CC-1800-2, 2 – przenośnik pochyły łańcuchowo-zgrzeblowy i poziomy ślimakowy, 3 – śluza z urządzeniem dozującym, 4 – przyłącze kotła (powrót, zasilanie), 5 – kocioł WCO 803 z rusztem schodkowym, 6 – zespół filtrów spalin typ OPP, 7 – komin z wentylatorem wyciągowym spalin [21]



Rys. 11. Schemat elektrociepłowni w Mansedo: 1 – suwnica z chwytakiem, 2 – układ dozowania słomy rozdrobnionej i zrębków drewna, 3 – kocioł, 4 – turbina, 5 – prądnica, 6 – zbiornik kondensatu, 7 – akumulator ciepła, 8 – kocioł, 9 – turbina, 10 – turbina ciepła, 11 – zewnętrzna sieć ciepła [17]

Więcej informacji na temat spalania słomy zawierają opracowania Denisiuka i Piechockiego [17, 19] oraz Grzybka i współautorów [21].

## Badania nad spalaniem biomasy

Biomasa na cele energetyczne różni się składem chemicznym od konwencjonalnych paliw. Przed energetycznym wykorzystaniem biomasy, należy zbadać jej skład chemiczny. Przykładowo, Demirbas [22] badał różne rodzaje biomasy (tabe-

la 1). Autor stwierdził, iż węgiel kamienny zawiera 81,5% węgla, podczas gdy jego zawartość w biomase to około 50%.

Kraszewicz [23] przedstawił ocenę ciepła spalania i wartości opałowej suchej masy drewna pni, kory pni, pni w korze i gałęzi w korze robinii akacjowej na tle klas grubości (rys. 12.).

Tabela. 1. Analiza elementarna wybranych próbek paliw [% s.m.] [22]

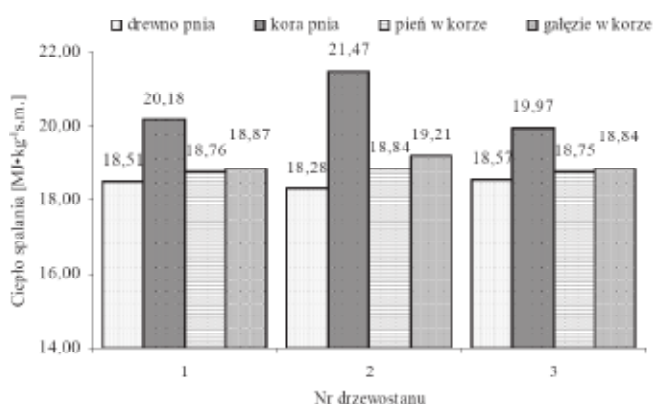
Paliwo	C	H	N	S	Cl	O
Węgiel kamienny	81,5	4,0	1,2	3,00	-	3,30
Dąb czerwony	50,0	6,0	0,3	-	-	42,4
Słoma pszeniczna	41,8	5,5	0,7	-	1,5	35,5
Łupiny oliwek	49,9	6,2	1,6	0,05	0,2	42,0
Drewno bukowe	49,5	6,2	0,4	-	-	41,2
Drewno świerkowe	51,9	6,1	0,3	-	-	40,9
Kolby kukurydzy	49,0	5,4	0,5	0,20	-	44,5
Odpady herbaciane	48,0	5,5	0,5	0,06	0,1	44,0
Mączka z łupin orzechów włoskich	53,5	6,6	1,5	0,10	0,1	35,4
Łupiny migdałowca	47,8	6,0	1,1	0,06	0,1	41,5
Łupiny słonecznika	47,4	5,8	1,4	0,05	0,1	41,3

Na podstawie analizy uzyskanych wyników Kraszewicz sformułował następujące stwierdzenia i wnioski:

- wartość opałowa i ciepło spalania surowca drzewnego robinii akacjowej są zależne od sortymentu i grubości drewna,
- w warunkach badań wartość opałowa i ciepło spalania kory pni robinii akacjowej są z reguły o 6–9% większe od pozostałych analizowanych sortymentów,
- wartość opałowa drewna robinii akacjowej jest mniejsza od wartości opałowej drewna wierzby o 5% i porównywalna z wartością opałową drewna dębowego,
- celowym byłoby rozszerzenie badań o określenie ciepła spalania i wartości opałowej surowca drzewnego robinii akacjowej pochodzącego z drzewostanów zróżnicowanych pod względem wieku oraz rosnących w innych warunkach siedliskowych [23].

Gradziuk [24] w pracy doświadczalnej porównywał koszty produkcji ciepła ze słomy, węgla i oleju opałowego w warunkach dwóch przedsiębiorstw energetyki ciepłej, w których funkcjonowały zarówno kotłownie opalane miazem węglowym o mocy 4 MW i 17,5 MW, słomą (0,9, 1 i 7 MW) oraz olejem opałowym (1,1 MW). Koszt jednostkowy produkcji ciepła w przypadku kotłowni węglowych wynosił od

17,5 do 23,8 zł/GJ, opalanych słomą 21–53,5 zł/GJ, a olejem 102,6–106,4 zł/GJ. W strukturze kosztów kotłowni węglowych największą pozycję stanowiły: zakup węgla 44,9–56,3%, remonty 6,6–15,4% oraz energia elektryczna 10,2–10,5%, w kotłowniach opalanych słomą: zakup paliwa 17,6–35,2%, amortyzacja 8,2–18,8% i wynagrodzenia 13,6–27,2%, a w olejowych: zakup paliwa 61,6–64,4% oraz amortyzacja 22,2–23,2%. Analiza kosztów jednostkowych produkcji ciepła w poszczególnych obiektach wykazała, że nie zawsze są one wyższe w kotłowniach opalanych słomą. Zastosowanie słomy jako paliwa w systemie ciepłowniczym PEC Lubań spowodowało obniżenie emisji rocznej:  $SO_x$  o 57,5 Mg,  $NO_x$  o 2,6 Mg,  $CO_2$  o ponad 10,5 Gg oraz pyłów o 63 Mg [24].



Rys. 12. Ciepło spalania suchej masy drewna pni, kory pnia, pni w korze i gałęzi w korze [23]

Tabela. 2. Porównanie nakładów energetycznych przy suszeniu ziarna kukurydzy z wykorzystaniem gazu ziemnego i słomy [25]

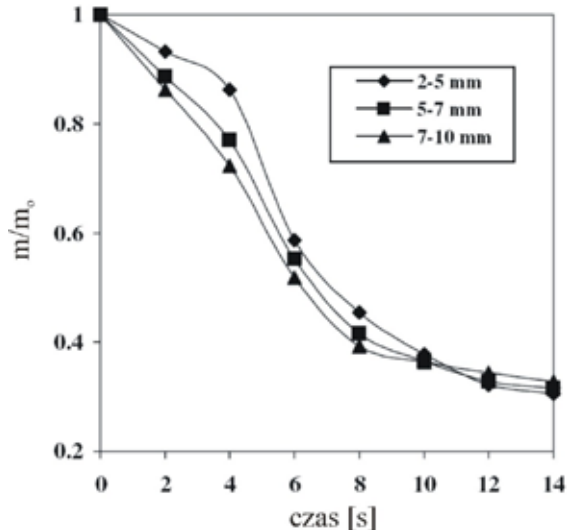
Rok		2006	2007
Masa wilgotnego surowca [Mg]		18145	14111
Masa suchego surowca [Mg]		15788	12058
Zużycie paliwa	Gaz [m <sup>3</sup> ]	268567	-
	Energia elektr. [kWh]	14649	212606
	Słoma [Mg]	-	402
Nakłady na energię	Gaz [€/Mg]	6,76	-
	Energia elektr. [€/Mg]	1,00	1,76
	Słoma [€/Mg]	-	1,03
Całkowite nakłady na energię [€/Mg]		7,76	2,79

Jech i współpracownicy [25] przedstawili adaptację suszarni do ziarna typu CHIEF CBS 14-6, zasilanej gazem ziemnym (2006 rok), a następnie paliwem w po-

stacji słomy zbożowej i odpadów z procesu czyszczenia nasion (2007 rok). Oce-niono wydajność suszarni i zużycie energii, jak również dokonano analizy ekono-micznej, na podstawie której stwierdzono znaczące oszczędności finansowe przy zastosowaniu paliwa w postaci słomy i odpadu z czyszczonego ziarna, które wy-no-siły 4,97 €/Mg suchego surowca, co w skali roku dało kwotę 61 116,0 €.

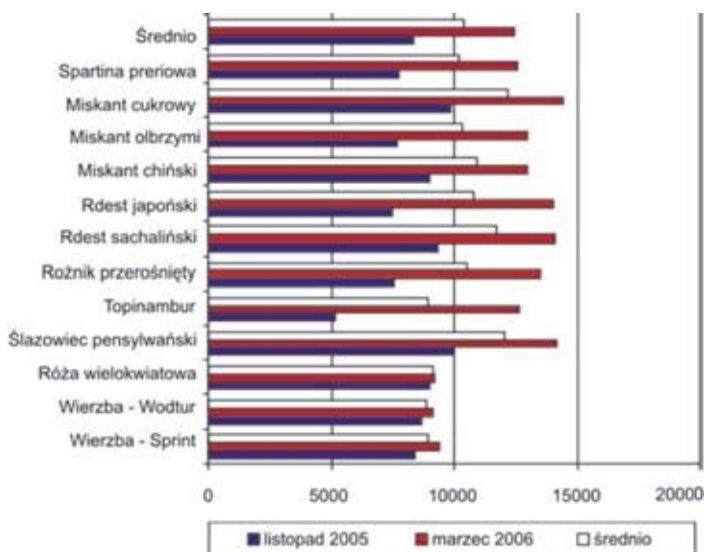
Ewida i współpracownicy [26] przeprowadzili kontrolowane spalanie sło-my ryżowej. Stwierdzono, że brykiety o wymiarach 7–10 mm są najlepiej spalane (rys. 13), szczególnie na początku procesu. Przyczyną tego stanu rzeczy jest gęstsze upakowanie małych brykietów, przez co dostęp tlenu jest mniejszy.

Stolarski i współpracownicy [27] badali wybrane rośliny energetyczne pod ką-tem wartości opałowej, zawartości siarki i wilgotności. Świeżą biomasę wieloletnich roślin energetycznych pozyskano z doświadczeń polowych prowadzonych w Stacji Dydaktyczno-Doświadczalnej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Wartości opałowe poszczególnych paliw, zostały przedstawione na rysunku 14. Naj-niższe średnie wartości opałowe w przedziale od 8 879 do 9 128 kJ/kg odnotowano dla wierzby, róży oraz topinamburu. Natomiast najwyższe wartości opałowe, średnio 12 000 kJ/kg stwierdzono w biomasie ślázowca pensylwańskiego oraz miskanta cukrowego. Wartość opałowa biomasy pozyskiwanej w listopadzie wynosiła śred-nio 8326 kJ/kg. Zawierała się ona w przedziale od 5166 kJ/kg w przypadku topi-namburu do 9952 kJ/kg dla ślázowca. Średnia wartość opałowa biomasy pozyska-nej w marcu wynosiła 12 426 kJ/kg i zawierała się w przedziale od 9077 kJ/kg dla wierzby odmiany Wodtur do 14 423 kJ/kg dla miskanta cukrowego [27].



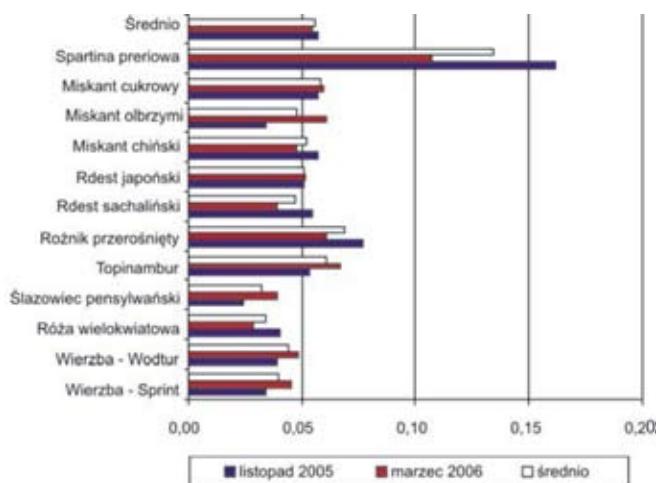
Rys. 13. Zmiana masy ( $m/m_0$ ) brykietów słomy ryżowej w czasie;  $m$  – masa po czasie  $t$ ,  $m_0$  – masa początkowa [26]

Najwyższą zawartość siarki zarówno przy pozyskiwaniu biomasy w listopadzie oraz marcu oznaczono w spartynie preriowej, odpowiednio 0,16% i 0,11% (rys. 15). Dla pozostałych gatunków jej wartość zawierała się w przedziale od 0,03% dla ślazuwca pensylwańskiego do 0,07% dla rożnika przerośniętego [27].



Rys. 14. Wartość opałowa biomasy wieloletnich gatunków roślin energetycznych w zależności od terminu zbioru [kJ/kg] [27]

Z przeprowadzonych badań wynika, że jakość świeżej biomasy z wieloletnich roślin energetycznych jako biopaliwa w znacznym stopniu zależy od gatunku, z którego jest ona pozyskiwana. Ponadto, istotną rolę odgrywa również termin pozyskiwania biomasy oraz warunki pogodowe w okresie jej zbioru. Generalnie, rośliny dające biomasę w postaci słomistej oraz półdREWniałej, w miarę opóźnienia terminu zbioru charakteryzują się lepszymi parametrami energetycznymi. Wydaje się, że w przypadku zakładania wielkoobszarowych plantacji tych gatunków należy uwzględnić różne warunki atmosferyczne, które będą decydowały o wilgotności a tym samym o wartości opałowej zebranej biomasy. Rośliny dające biomasę lignocelulozową w postaci drewna bezpośrednio po zakończeniu okresu wegetacji mają wilgotność biomasy zbliżoną do biomasy roślin słomistych i półdREWniałych. Nie obserwuje się natomiast u tych gatunków spadku wilgotności w miarę opóźnienia terminu zbioru. Dlatego wilgotność drewna zebranego bezpośrednio z pola w obu terminach jest wysoka i wynosi około 50%. Wybór gatunku rośliny do uprawy na cele energetyczne, technologii pozyskania biomasy oraz ewentualnego jej uszlachetnienia będzie zależał od zapotrzebowania rynku [27].



Rys. 15. Zawartość siarki w biomacie wieloletnich gatunków roślin energetycznych w zależności od terminu zbioru [%] [27]

Kalebasa [28] badała ilość i skład chemiczny popiołu z biomasy roślin energetycznych. Ilość popiołu surowego otrzymanego w czasie spalania 1 Mg była istotnie zróżnicowana (tabela 3). Najwięcej popiołu surowego (po spalaniu) uzyskano ze spalania biomasy ślazuwa pensylwańskiego (59,5 kg/Mg), mniej z miskanta chińskiego (52,5 kg/Mg), a najmniej z wierzby (31,5 kg/Mg). Różnice w ilości popiołu właściwego (popiół surowy bez zawartości krzemionki i węglanów) uzyskane z tych roślin (14,7, 16, 17 kg/Mg), były nieistotne, przy średniej wartości z trzech roślin wynoszącej 15,9 kg/t. Jakość popiołu ocenia się m.in. na podstawie stosunku masy popiołu surowego do popiołu właściwego. Wartość tego stosunku dla biomasy badanych roślin była zbliżona dla ślazuwa pensylwańskiego (3,72) i miskanta chińskiego (3,58) oraz znacznie niższa dla wierzby (1,85), co wskazuje na ilość krzemionki i węglanów zawartych w popiele. Zawartość wybranych makro- i mikroelementów w tym metali ciężkich w popiele właściwym z biomasy analizowanych roślin była zróżnicowana. Wśród makroelementów stwierdzono najwięcej wapnia i potasu, a najmniej sodu; wśród analizowanych mikroelementów – najwięcej glinu i żelaza, a najmniej litu; wśród metali ciężkich – najwięcej cynku, a najmniej chromu [28].

Badaniami popiołu roślin energetycznych zajmowała się również Kowalczyk-Jusko [29]. Rośliny były uprawiane na glebie klasy II kompleksu pszennego dobrego, w warunkach odpowiedniej kultury i z zachowaniem właściwych dla każdego gatunku zasad agrotechniki. Przeprowadzone badania wykazały, że największą zawartością popiołu charakteryzowały się nadziemne części słonecznika bulwiastego (5,1% w stanie powietrzno-suchym). W przypadku pozostałych roślin zawartość

ta wahała się w granicach odpowiednio: 2,5–3,6 i 2,8–4,1% (tabela 4). Zdaniem autorki, istnieje słaba korelacja między zawartością popiołu a wartością energetyczną surowca, co oznacza, że wraz ze wzrostem zawartości popiołu w biomacie następuje spadek wartości ciepła spalania [29].

Tabela 3. Skład chemiczny popiołu roślin energetycznych [28]

Roślina energetyczna	Miskant chiński	Ślazowiec pensylwański	Wierzba krzewiasta
Wyszczególnienie	kg z 1000 kg spalanej biomasy		
Popiół surowy	52,5	59,5	31,5
Popiół właściwy	14,7	16,0	17,0
Stosunek masy popiołu surowego do właściwego	3,57	3,72	1,85
fosfor	4,44	3,06	9,12
potas	33,0	11,1	40,4
wapń	38,6	66,3	32,3
magnez	5,53	3,88	3,93
sód	3,41	0,94	1,51
siarka	6,89	4,19	3,51
Suma makroelementów	91,9	89,5	90,8
żelazo	1,453	0,412	0,423
glin	3,126	0,500	1,288
mangan	0,116	0,025	0,088
lit	0,095	0,018	0,023
bor	0,034	0,068	0,470
bar	0,047	0,031	0,371
Suma mikroelementów	4,871	1,054	2,663
ołów	0,047	0,050	0,017
kadm	0,075	0,087	0,006
chrom	0,006	0,006	0,006
miedź	0,013	0,018	0,065
cynk	0,375	0,100	1,342
nikiel	0,040	0,006	0,047
Suma metali ciężkich	0,556	0,267	1,483
Suma wszystkich pierwiastków	97,3	90,8	94,9

Autorka [29] stwierdziła znaczne różnice w składzie pierwiastkowym popiołu poszczególnych gatunków, przy czym charakterystyczna była znaczna zawartość tlenków alkalicznych, odpowiedzialnych za obniżone temperatury topliwości popiołu. Szczególnie dużą zawartość CaO i K<sub>2</sub>O stwierdzono w popiele ślazowca, słonecznika bulwiastego i róży bezkolcowej (od 18,8 do 35,7% w przypadku CaO oraz od 13,0 do 35,8% K<sub>2</sub>O). Dodatkowo, w popiele z róży bezkolcowej występowała duża ilość P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (16,5%). Suma tlenków w popiele wymienionych roślin jest



znaczna i świadczy o niebezpieczeństwie znacznego odkładania się osadów na urządzeniach grzewczych podczas spalania biomasy tych gatunków. Z kolei popiół traw: miskanta cukrowego i spartiny preriowej charakteryzował się znacznie mniejszą zawartością związków alkalicznych, przy równocześnie wysokim udziale krzemionki 66,1% w przypadku spartiny i 77,9% dla miskanta. Dzięki temu popiół traw wykazuje znacznie słabsze właściwości zanieczyszczania powierzchni ogrzewalnych. Największą zawartość chlorków, wpływających na korozję urządzeń grzewczych, stwierdzono w popiele z biomasy słonecznika bulwiastego (4,74%), zaś w przypadku miskanta cukrowego nie stwierdzono obecności chlorków. Popiół z biomasy słonecznika bulwiastego cechował się najniższą temperaturą topnienia (960°C), co sprawia, że może najbardziej osadzać się na powierzchni grzewczej kotłów, zaburzając wymianę ciepła. Temperaturę topnienia popiołu >1500°C stwierdzono w przypadku biomasy miskanta, róży i ślazuca (tabela 5) [29].

Tabela 4. Zawartość i skład popiołu z biomasy roślin energetycznych [%] [29]

Zawartość		Miskant cukrowy	Spartina preriowa	Ślazuca pensylwański	Słonecznik bulwiasty	Róża bezkolcowa
Wilgoć w próbce analitycznej		7,7	13,5	8,3	9,7	14,6
Popiół	Stan powietrzno-suchy	3,50	3,60	2,50	5,10	2,60
	Stan suchy	3,70	4,10	2,80	5,60	3,10
SiO <sub>2</sub>		77,90	66,10	3,20	6,80	6,74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		1,33	0,98	0,76	0,51	1,69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,06	0,85	0,48	0,46	0,81
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		0,09	0,10	0,05	0,05	0,09
TiO <sub>2</sub>		0,06	0,04	0,04	0,02	0,04
CaO		8,35	14,30	35,70	18,80	32,00
MgO		0,82	2,30	5,34	1,06	7,85
SO <sub>3</sub>		2,21	4,63	2,42	1,85	3,50
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		1,87	2,96	4,85	3,69	16,50
Na <sub>2</sub> O		0,46	0,88	0,80	0,54	0,82
K <sub>2</sub> O		2,66	4,97	14,30	35,80	13,00
BaO		0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
SrO		0,02	0,04	0,10	0,09	0,12
Cl		0,00	0,25	0,24	4,74	1,00
CO <sub>2</sub>		1,22	0,72	30,70	24,60	15,4

Denisiuk [30] badał możliwości wykorzystania ślazuwca pensylwańskiego w energetyce. Przy teoretycznie założonych 100% wschodach i wyrównaniu karp średnio do 22 pędów, wysiew 64 tys. nasion na hektar na plantacji dwuletniej stanowi potencjał masy 115 Mg/ha, a na plantacji trzyletniej 125 Mg/ha. W tabeli 6 zestawiono uzyskane średnie wartości parametrów energetycznych rośliny.

Tabela 5. Charakterystyczne zakresy temperatury topliwości popiołu [29]

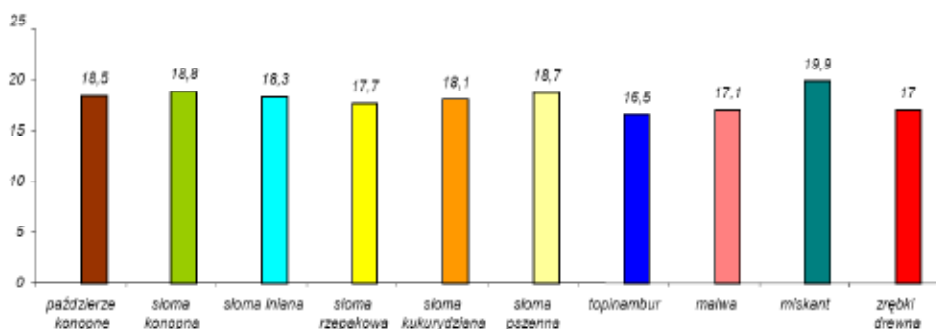
Temperatura [°C]	Miskant cukrowy	Spartina preriowa	Ślazuwec pensylwański	Słonecznik bulwiasty	Róża bezkolcowa
spiekania	760	730	680	620	730
mięknięcia	>1500	1060	740	690	>1500
topnienia	>1500	1210	>1500	960	>1500
płynięcia	>1500	1250	>1500	1120	>1500

Tabela 6. Średnie wartości parametrów energetycznych karp ślazuwca pensylwańskiego [30]

Część rośliny	Zawartość wody [%]	Ciepło spalania [MJ/kg]	Wartość opału [MJ/kg]
łodyga	19,10	17,85	13,55
kwiat	14,10	17,77	14,72
cała roślina	18,30	18,00	14,04

Uzyskiwana corocznie biomasa konopi jest cennym surowcem energetycznym. Źródłem energii może być nie tylko cała roślina, ale również produkt uboczny powstający z jej przerobu, tj. paździerz stanowiące 70–75% plonu. W laboratorium IWN [31] przy zastosowaniu PN 81G-04532 określono wartość energetyczną słomy i paździerzy konopnych, niektórych gatunków roślin jednorocznych i wieloletnich oraz zrębków drewna – wyniki badań przedstawiono na rysunku 16. Badania wykazały, że wartość energetyczna konopi przekracza 18 MJ/kg. Dla porównania drewno charakteryzuje się nie tylko niższym ciepłem spalania, na poziomie 17 MJ/kg, ale dodatkowo przed paletyzacją, musi być poddane procesowi suszenia i rozdrabniania, co znacząco zwiększa koszty uzyskania surowca.

Paździerz są materiałem objętościowym, niski ciężar właściwy powoduje problemy z ich składowaniem i transportem. W celu wyeliminowania tych niekorzystnych cech w Instytucie Włókien Naturalnych w Poznaniu przeprowadzono udane próby brykietyzacji paździerzy konopnych. Emisja CO<sub>2</sub> i CO podczas spalania brykietów wynosiła odpowiednio około 0,8 kg i 0,15 kg na 1 kg masy. Stwierdzono także, że w czasie brykietyzacji paździerzy nie trzeba stosować dodatków chemicznych, ponieważ paździerz sklejają się ze sobą wskutek działania naturalnych substancji roślinnych i wysokiego ciśnienia [31].



Rys. 16. Wartość energetyczna wybranych roślin energetycznych [MJ/kg] [31]

Niedziółka i współpracownicy [32] badali wartość opałową kukurydzy pastewnej. Duży potencjał plonowania tej rośliny, sięgający 12–15 Mg suchej masy całych roślin z 1 ha, powoduje wzrost zainteresowania jej wykorzystaniem nie tylko do produkcji biogazu (świeża masa, kiszonka), czy bioetanolu (ziarno), ale także do bezpośredniego spalania (słoma kukurydziana). W tabeli 7 przedstawiono średnie plony, wilgotność oraz wartość opałową masy późniwej. Przeciętny plon słomy kukurydzianej w czasie zbioru wynosił około 14 Mg/ha, przy średniej wilgotności 50%. Główną frakcją słomy stanowiły łodygi, których plon wynosił około 6,5 Mg/ha, o stosunkowo wysokiej wilgotności (65,4%). Średnia wartość opałowa zbieranej słomy kukurydzy wynosiła w stanie świeżym ok. 6,5 MJ/kg, natomiast w stanie wysuszonym dochodziła do 15,5 MJ/kg.

Tabela 7. Średnie plony, wilgotność i wartość opałowa masy późniwej kukurydzy pastewnej [32]

Frakcja kukurydzy	Średni plon [Mg/ha]	Wilgotność w stanie świeżym [%]	Wartość opałowa w stanie świeżym [MJ/kg]	Wartość opałowa w stanie wysuszonym (wilgotność 10%) [MJ/kg]
Słoma ogółem	13,9	50,3	6,5	15,5
w tym:				
– łodygi	6,5	65,4	5,6	15,2
– liście	2,3	45,3	6,2	15,2
– liście okrywowe	2,0	50,6	6,5	15,7
– rdzenie	2,9	55,6	55,6	16,1
– wiechy	0,2	34,4	34,4	15,6

Dziewanowska i Dobek [33] badali wartości opałowe liści wybranych gatunków drzew zbieranych na terenach zabudowanych. Tereny zabudowane, które w okresie jesienno-zimowym są oczyszczane z opadających liści, stanowią podstawowe źródło tej biomasy. W większości materiał ten po zebraniu jest wywożony na składowiska odpadów i tam składowany lub podlega kompostowaniu. Spalanie i pozyskiwanie na tej drodze energii to alternatywna metoda zagospodarowania liści. W celu określenia wartości opałowej liści, zbierano próbki w okresie listopada i grudnia 2003 roku z terenów lewobrzeżnej części Szczecina. Następnie, przygotowano próbki w dwóch postaciach, czyli: w formie rozdrobnionej oraz zbrykietowanej. Uzyskane wartości opałowe badanych liści różnych gatunków drzew przedstawiono w tabeli 8. Najniższymi wartościami opałowymi charakteryzowały się liście klonu srebrzystego (10,7 kJ/g w formie brykietu i 13 kJ/g w postaci rozdrobnionej), grabu pospolitego (11,8 kJ/g w formie brykietu i 12,8 kJ/g w postaci rozdrobnionej) oraz lipy krymskiej (12 kJ/g w formie brykietu i 12,1 kJ/g w postaci rozdrobnionej). Natomiast najwyższymi wartościami opałowymi charakteryzowały się liście dębu czerwonego (17,5 kJ/g w formie brykietu i 17,6 kJ/g w postaci rozdrobnionej) oraz dębu bezszypułkowego (17 kJ/g w formie brykietu i 17,6 kJ/g w postaci rozdrobnionej). Największe różnice dla liści w postaci brykietu, wystąpiły w przypadku liści dębu czerwonego i lipy krymskiej, gdzie wartość opałowa dębu czerwonego była wyższa o 62,7% w stosunku do klonu srebrnego, natomiast dla liści występujących w postaci rozdrobnionej największe różnice wystąpiły między lipą krymską, a dębem bezszypułkowym i dębem czerwonym, gdzie dla dębu wartość opałowa liści była wyższa o 45,7%. Różnice uzyskanego ciepła spalania dla badanych liści w postaci rozdrobnionej i zbrykietowanej wynikają z dostępności tlenu podczas spalania do całego materiału w bombie kalorymetrycznej. W przypadku liści zbrykietowanych struktura materiału była bardziej zwarta i dostęp tlenu był utrudniony w porównaniu z liśćmi rozdrobnionymi [33].

Koncepcja energetycznego wykorzystania ziarna owsa, rozpowszechniona już w Szwecji, może zostać z powodzeniem wdrożona również w Polsce. W Szwecji (przodującej w wykorzystaniu energii ze źródeł odnawialnych) funkcjonują setki urządzeń spalających ziarno owsa i innych zbóż. Palniki (przystawki) do spalania ziarna przeznaczone są głównie do ogrzewania gospodarstw rolnych, ale można je również wykorzystać w kotłowniach budynków użyteczności publicznej czy pomieszczeń produkcyjnych o różnej powierzchni, w zależności od parametrów pieca. Palnik można podłączyć do każdego pieca na paliwa stałe o mocy do 28 kW [34].

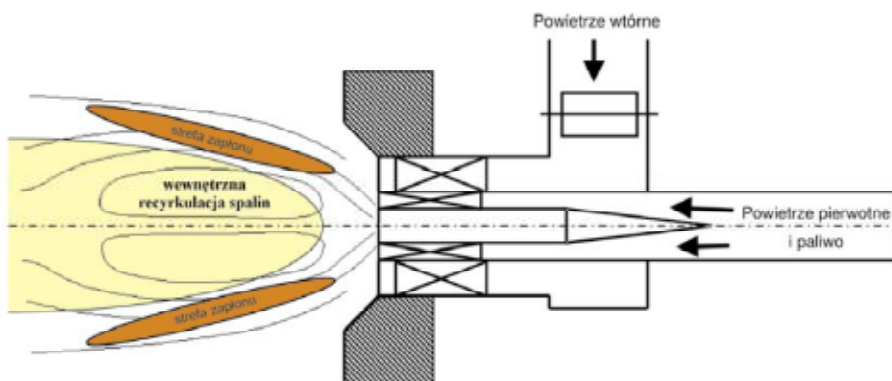
Kubica [16] badał spalanie biomasy w urządzeniach grzewczych małej mocy, instalowanych w gospodarce komunalnej, zwłaszcza w rozproszonym ogrzewnictwie indywidualnym (tabela 9). Sprawność energetyczna w każdym przypadku przekraczała 80%, najniższe stężenia tlenków ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) stwierdzono dla słomy pszenno-żytniej, najwyższe dla słomy rzepakowej. Spalanie słomy rzepakowej dawało również najwięcej popiołu. Emisja 16-stu wielopierścieniowych węglodorów aromatycznych (WWA) najniższa była dla drewna bukowego, najwyższa dla drewna sosnowego.

Tabela 8. Wartości opałowe liści wybranych gatunków drzew [33]

Gatunek drzewa	Ciepło spalania liści [kJ/g]	
	brykiety	rozdrobnione
Dąb bezszypułkowy ( <i>Quercus petraea (Mattuschka)Loebl.</i> )	17,0	17,6
Dąb czerwony ( <i>Quercus rubra L.</i> )	17,5	17,6
Grab pospolity ( <i>Carpinus betulus L.</i> )	11,8	12,8
Kasztanowiec biały ( <i>Aesculus hippocastanum L.</i> )	15,7	18,4
Klon srebrzysty ( <i>Acer saccharinum L.</i> )	10,7	13,0
Klon pospolity ( <i>Acer platanoides L.</i> )	13,0	14,3
Platan klonolistny ( <i>Platanu acerifolia (Aiton)Wild.</i> )	12,4	16,4
Topola biała ( <i>Populus alba L.</i> )	12,6	14,3
Topola czarna ( <i>Populus nigra L.</i> )	14,0	13,2
Wierzba płacząca ( <i>Salix sepulcralis Simk.</i> )13,2	16,0	16,4
Lipa krymska ( <i>Tilia euchlora C.Koch</i> )	14,0	12,0

W Zakładzie Procesów Ciepłych Instytutu Energetyki w Warszawie od lat 60-tych ubiegłego wieku prowadzone były prace nad konstrukcjami palników do spalania różnych paliw (węgle brunatne i kamienne, olej, itp.), które m.in. dzięki współpracy z firmą ECOENERGIA zostały wdrożone w kilkudziesięciu kotłach w kraju i zagranicą [36]. Wiedza i doświadczenie zdobyte podczas opracowywania wysokostabilizujących palników wirowych oraz palników rozpałkowych i niskoemisyjnych zostały wykorzystane przy pracach nad skonstruowaniem nowatorskiego palnika pyłowego do spalania biomasy. Analizując potrzeby rynku zdecydowano, że konstruowany palnik będzie palnikiem wirowym. Cechą charakterystyczną tych palników jest generowanie silnej strefy recyrkulacji wewnętrznej gorących spalin stabilizującej zapłon pyłu (rys. 17).

Stopień zawiorowania mieszaniny pyłowej i powietrza wtórnego oraz intensywność recyrkulacji dobierane są każdorazowo do instalacji kotłowej oraz jakości i rodzaju spalanego pyłu. Palniki wirowe są palnikami samopodtrzymującymi, a ich instalacja w kotle nie wymaga globalnych zmian aerodynamiki komory, tak jak w przypadku palników strumieniowych pracujących w układach tangencjalnych [16].



Rys. 17. Schemat konstrukcyjny palnika wirowego [35]

Tabela 9. Wyniki badań energetycznych i emisyjnych spalania typowych biopaliw w urządzeniach grzewczych małej mocy [16]

Wyszczególnienie	Rodzaj biomasy				
	Drewno bukowe (1)	Granule drewna sosnowego (2)	Słoma rzepakowa (3)	Słoma pszenno-żytnia (4)	Słoma rzepakowa (5)
Moc cieplna kotła [kW]	40	50	65	65	600
Sprawność energetyczna [%]	83,0	80,4	81,7	84,2	80,1
Stężenie [mg/m <sup>3</sup> ]					
CO	2659,9	406,3	2186,3	374,9	2973,8
NO <sub>2</sub>	83,7	363,3	103,2	97,5	414,6
SO <sub>2</sub>	35,9	58,9	124,6	35,8	157,8
Lotne związki organiczne w przeliczeniu na C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	170,2	46,4	256,0	222,0	-
Pył [mg/m <sup>3</sup> ]	30,0	20,1	641,2	357,9	2150,0
Zanieczyszczenia organiczne zaadsorbowane na pyłe [mg/m <sup>3</sup> ]	38,1	8,8	14,5	7,5	37,2
Całkowite zanieczyszczenia organiczne [mg/m <sup>3</sup> ]	111,0	28,4	58,2	32,2	172,0
16 WWA [μg/m <sup>3</sup> ]	868,0	122,4	196,0	818,4	634,1
B(a)P [μg/m <sup>3</sup> ]	0,141	0,45	3,1	30,3	25,9

Spalanie w kotle typu:

- 1) EKODREW (40 kW)
- 2) DUOMAT (50 kW)
- 3) EKOPAL (65 kW)
- 4) EKOPAL (65 kW)
- 5) EKODREW (600 kW)

## Przykłady spalania biomasy w Polsce

W tym rozdziale zaprezentowano wybrane przykłady instalacji bezpośredniego spalania biomasy w Polsce.

### *Kotłownie na drewno*

Na terenie Miejskiej Kotłowni w Bornem Sulinowie (powiat szczecinecki, woj. zachodniopomorskie) zainstalowano i uruchomiono 3 kotły o mocy nominalnej 2 MW każdy, opalane biomasą. Kotłownia opalana zrębkami drzewnymi pracuje w systemie ciepłowniczym na potrzeby ogrzewania miasta Borne Sulinowo. Instalacja składa się z kotłów wodnych trójciągowych ze specjalnie skonstruowaną komorą spalania drewna oraz schodkowego ruchomego rusztu, który zapewnia optymalny sekwencyjny proces spalania drewna. Komfort użytkowania instalacji zapewnia również w pełni zautomatyzowany system podawania paliwa, odpiekania oraz zapalania wsadu drzewnego. System wyposażony jest w moduł graficznej wizualizacji pracy kotłów oraz pozostałego systemu [35, 36].



Rys. 18. Miejska kotłownia w Bornem Sulinowie [36]

W 2001 roku podjęto decyzję o budowie kotłowni na biomasę (zrębki drewna i kory) w Pisz (powiat piski, woj. warmińsko-mazurskie). W grudniu 2003 roku rozpoczął się rozruch technologiczny Ciepłowni Miejskiej oraz sukcesywne podłączenie węzłów ciepłowniczych zainstalowanych w zlikwidowanych kotłowniach. Od czerwca 2004 r. kotłownia pracowała na potrzeby całego miasta, ale przez pewien okres produkowała ciepło tylko na cele zapewnienia ciepłej wody użytkowej. Od początku sezonu grzewczego 2004/05 ciepłownia pokrywała już zapotrzebowanie na ciepło centralnego ogrzewania oraz ciepłej wody użytkowej [37].

Na terenie Zakładu Przemysłu Drzewnego w Wierzchowie (powiat drawski, woj. zachodniopomorskie) zainstalowano dwa piece na biomasę producenta FERRELI, o łącznej mocy 5 MW. Wytwornica ciepła technologicznego z pośrednią wytwornicą pary służy do produkcji ciepła technologicznego wykorzystywanego do produkcji wyrobów drewnianych, wytwarzania pary technologicznej oraz suszenia włókna drzewnego [35].



Rys. 19. Piec na drewno w Zakładach Przemysłu Drzewnego w Wierzchowie [36]

W 2006 r. w budynku Domu Pomocy Społecznej w Brańsku (powiat bielski, woj. podlaskie) dokonano modernizacji kotłowni polegającej na wymianie czterech starych, opalanych węglem kotłów „Rumia” na kotły opalane biomasą. Zamontowano jeden kocioł wodny opalany drewnem współpracujący z akumulatorem ciepła na potrzeby c.o. oraz wentylację kuchni, stołówki oraz sali gimnastycznej. Do przygotowania pary technologicznej i podgrzewu wody użytkowej zamontowano dwa kotły parowe typu ES-KA 297. Są one opalane drewnem. Para jest wykorzystywana na potrzeby technologiczne kuchni i pralni oraz służy do wytwarzania ciepłej wody użytkowej. Charakterystyka kotła ES-KA 297:



- moc cieplna jednego kotła: 297 kW,
- wydajność pary: 341 kg/h,
- maksymalne ciśnienie robocze: 0,07 MPa,
- dopuszczalna temperatura zasilania: 95°C oraz
- sprawność kotła: 75%.

Kotły przystosowane są do spalania drewna kawałkowanego, odpadów drzewnych tartacznych, torfu, węgla różnego asortymentu. Zaprojektowano kocioł wodny niskotemperaturowy typu Uniwex S ZST o mocy 300 kW z zasobnikiem na zrębki, podajnikiem ślimakowym i regulatorem kotłowym. Kocioł wytwarza ciepło do nagrzewnic w budynku kuchni i stołówki oraz na potrzeby centralnego ogrzewania budynków DPS. Kocioł wyposażony jest w układ podajników ślimakowych, które automatycznie dostarczają paliwo z silosu do komory spalania. Dodatkowo, układ wyposażono w podajnik skośny dostarczający zrębki i trociny z magazynu opału do silosu [35].

Kocioł na biomasę Ferrolit Wodnorurowa z wytwornicą ciepła na paliwo stałe z rusztem ruchomym BI COMB SGM 1600 został zainstalowany w zakładzie rzeźniczo-wędliniarskim w Piekoszowie (powiat kielecki, województwo świętokrzyskie). Jako paliwo wykorzystywana jest biomasa pochodząca z własnej plantacji wierzby energetycznej, odpady pochodzące z przeróbki nieimpregnowanego drewna i korka, odpady pochodzące z obróbki drewna impregnowanego. Parametry: produkcja pary (650°C: 2660 kg/h), moc cieplna wyjściowa 1861 kW, moc cieplna wejściowa 2189 kW, zainstalowana moc elektryczna 19,47 kW [35].



Rys. 20. Piec na biomasę w Piekoszowie [35]

Kotłownia Spółdzielni Eksploatacyjno-Mieszkaniowej „NOWA” w Kowalach Oleckich (powiat olecki, woj. warmińsko-mazurskie). Modernizacja kotłowni węglowej na kotłownię na biomasę została wykonana w 2003 roku. Polegała ona na zastąpieniu 6 kotłów typu SŻ – 65 kotłami typu UNIWEX AJ-500 i UNIWEX AJ-800. Podstawowym opałem używanym w zmodernizowanej kotłowni są trociny i zrębki tartaczne. Kotłownia pracuje w okresie zimowym na potrzeby co i cw oraz w sezonie letnim na potrzeby cw. Inwestycja została sfinansowana ze środków Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Olsztynie, EkoFunduszu oraz ze środków własnych [35].

W zakładzie ZSB Stolbud we Włoszczowej (powiat włoszczowski, woj. świętokrzyskie) działa kotłownia, w której spalane są odpady powstające przy produkcji drewnianej stolarki okiennej. Ciepło z kotłowni doprowadzane jest ciepłociągiem do pobliskich osiedli. Dzięki temu wyeliminowano kilka lokalnych kotłowni opalanych węglem [35].

W firmie SKLEJKA-EKO S.A., zlokalizowanej w Ostrowie Wielkopolskim (powiat ostrowski, województwo wielkopolskie) zainstalowano kocioł wodny Polytechnik, z rusztem ruchomym, o mocy cieplnej 3000 kW. Kocioł przystosowany jest do spalania odpadów drzewnych, powstających w trakcie procesów technologicznych tj.: kory, mokrych trocin, zrębków, drewna itp. Dostarczenie materiału do kotła odbywa się poprzez przenośnik zbierakowy i hydrauliczny system wygarniający. Spalanie odbywa się w wysokiej temperaturze, za pomocą łuku zapłonowego, co pozwala na uzyskanie niskiej emisji zanieczyszczeń. Sprawność kotła Polytechnik wynosi 80%. Wyposażony jest w multicyklon o skuteczności odpylania 85%. Kocioł pracuje na potrzeby technologiczne i grzewcze zakładu [38].

Piec AZSO (automatyczny zespół spalania odpadów) o mocy 250 kW służy do ogrzewania trzech kurników o powierzchni 3000 m<sup>2</sup> położonych w miejscowości Solistówka (powiat augustowski, woj. podlaskie). W piecu spalane są trociny [36].

Energia zgromadzona w biomasie wykorzystywana jest od 2007 r. również w kotłowni Zakładu „SKM Warsztaty Meblowe” SP. z o.o. w Myśliborzu (powiat myśliborski, woj. zachodniopomorskie). Pracuje tam kocioł na odpady drzewne i trociny o mocy 500 kW, ogrzewający powierzchnię 3000 m<sup>2</sup> [35].

W Zakładzie Przemysłu Drzewnego – TARTAK Marian Leonhard, zlokalizowanym w Gorzycach Wielkich (powiat ostrowski, woj. wielkopolskie) zainstalowane są dwa kotły parowe typu Hajnówka. Kotły mają moc cieplną 65 kW każdy i sprawność cieplną 70%. Kotły wytwarzają parę niezbędną do prawidłowego funkcjonowania suszarni drewna, ogrzewania budynków socjalnych oraz ogrzewania pomieszczenia produkcji drabin. Opalane są odpadami drzewnymi pochodzącymi z urządzeń do mechanicznej obróbki drewna (trociny), podawanymi do kotłów za pomocą dozowników typu AZSO 100 produkcji firmy Hamech z Hajnówki [35].

W Specjalnym Ośrodku Szkolno-Wychowawczym w Sieradzu (powiat sieradzki, woj. łódzkie), kosztem 400 tys. zł wykonano modernizację kotłowni ogrzewającej obiekt tego ośrodka. Środki finansowe pozyskano z budżetu powiatu oraz Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Łodzi. Za-

instalowano kocioł na pelety o mocy 190 kW. Jest to bezobsługowy kocioł HDG Compact firmy BAWARIA. Zalety kotłów nowego typu HDG Compact to:

- stała wydajność dzięki chłodzonemu powietrzem, ruchomemu rusztowi schodkowemu (patent HDG Bavaria),
- moc regulowana płynnie w zakresie od 30 do 100% mocy znamionowej kotła,
- sterowanie procesem spalania z wykorzystaniem sondy Lambda i czujnika temperatury spalania – sercem systemu jest sterownik swobodnie programowalny,
- automatyczny zapłon dmuchawą gorącego powietrza,
- automatyczny system usuwania popiołu,
- zdalny monitoring parametrów pracy poprzez sieć telefoniczną,
- możliwość przyłączenia do kotła palnika olejowego oraz
- standardowo wbudowany system ppoż. w układzie podawania paliwa [36].

Obiekty znanego w całym kraju Muzeum Archeologicznego w Biskupinie (powiat żniński, woj. kujawsko-pomorskie) również opalane są biomasą. Zamontowano tam kotłownię wodną, niskotemperaturową wyposażoną w kocioł na biomasę typu HDG Compact C o mocy 200 kW, z automatycznym zasypem opału, niemieckiej firmy HDG Bavaria. Podstawowym paliwem dla kotłowni są zrębki z drewna naturalnego. Do spalania wykorzystywane są również trociny, wióry, brykiety drewniane lub rośliny energetyczne [35].



Rys. 21. Piec w Specjalnym Ośrodku Szkolno-Wychowawczym w Sieradzu [35]

Przykładem wykorzystania energii biomasy w ośrodkach dydaktycznych jest kotłownia w gimnazjum w miejscowości Marzęcino (powiat nowodworski, woj. pomorskie). Kotłownia ogrzewa budynki szkolne, halę gimnastyczną i 2 budynki mieszkalne. Kocioł typu ARIMAX BIO 300 ma moc 300 kW, spala brykiet drzewny. Dobowe spalanie nie przekracza 400 kg [35].



Rys. 22. Kotłownia w Muzeum Archeologicznym w Biskupinie [35]

W Szkole Podstawowej w Drzonowie (powiat szczecinecki, woj. zachodniopomorskie) na potrzeby ciepłej wody użytkowej i centralnego ogrzewania wykorzystywane są dwa kotły BIOPLEX (HL) opalane pelletem i drewnem. Moc cieplna każdego kotła wynosi 104 kW [35].

W szkole w miejscowości Brąszewice (powiat sieradzki, woj. łódzkie) zrealizowano projekt przejścia z ogrzewania węglem na biomasę. Zainstalowano piec o mocy 120 kW. Kotłownia ogrzewa budynek o kubaturze 3200 m<sup>3</sup>. Po zastosowaniu ogrzewania na biomasę i wykonaniu termomodernizacji budynku, w porównywalnym okresie grzewczym roczne koszty zostały zmniejszone o 7 tys. zł. Inwestycja została zrealizowana przy wsparciu środków finansowych WFOŚiGW w Łodzi [35].

### *Kotłownie na słomę*

Słoma jest atrakcyjnym surowcem bioenergetycznym, jako łatwo dostępny produkt przemysłu rolniczego, nie wymagający radykalnych zmian w aktualnej

strukturze upraw rolnych. Słomę można ogrzewać różnego rodzaju instalacje począwszy od domków jednorodzinnych, poprzez kotłownie grupowe, obiekty produkcyjne jak chlewnie, szklarnie, itp. Na terenie powiatu ostrowskiego znajduje się kotłownia osiedlowa, opalana słomą, która zlokalizowana jest w Nowych Skalmierzycach (powiat ostrowski, woj. wielkopolskie). W kotłowni zamontowany jest kocioł WCO-80S, o mocy cieplnej 1 MW<sub>t</sub>. Dodatkowo, kocioł wyposażony jest w odpylacz typu ADM. Kotłownia ta należy do Ostrowskiego Zakładu Ciepłowniczego S.A. [35, 39]



Rys. 23. Kotłownia na słomę w Nowych Skalmierzycach [36]

Kotłownia na słomę w Grabowcu (powiat zamojski, woj. lubelskie) wybudowana została w 1996 r., a zmodernizowana w 2005 r. [41]. Aktualna moc wynosi 1,1 MW (2 kotły o mocy 550 kW każdy). W sezonie grzewczym zużywa się około 700 Mg słomy [35,40].

W 1998 r. został przyjęty do realizacji skorygowany program „Zastosowanie słomy jako paliwa w systemie grzewczym Lubania” [41]. Okolice Lubania (powiat lubański, woj. dolnośląskie) stanowią tereny o raczej średniej intensywności upraw, ponadto areal jest stosunkowo rozdrobniony. „Dostęp” do słomy został oparty na umowach sprzedaży „na pokosie” zawieranych z rolnikami. Maksymalna wilgotność prasowanej słomy wynosi 17–18%; słoma prasowana jest w bele prostokątne o wymiarach 1,2x0,8x2,4 m. Ciężar właściwy

sprasowanej słomy wynosi 110–140 kg/m<sup>3</sup>, zaś waga beli od 220 do 320 kg. Słoma podawana do kotłowni (schemat przedstawiono na rysunku 10) ładowana jest samojezdnym ładowaczem na stół podawczy, który podaje ją w sposób ciągły do rozdrabniacza. Rozdrobniona słoma podawana jest do kotła 1,0 MW podajnikiem ślimakowym o zmiennej wydajności, natomiast do kotłów o mocy 3,5 MW podajnikiem zgrzeblowym również o zmiennej wydajności. Spalanie słomy odbywa się w komorze paleniskowej w dwóch fazach. W komorze paleniskowej słoma najpierw jest odgazowana, a powstałe gazy spalają się w jej górnej części, natomiast pozostałości słomy dopalają się na ruszcie schodkowym. Powietrze do spalania podawane jest do kotła jako powietrze pierwotne (20%) do stref podrusztowych oraz jako powietrze wtórne (80%) systemem dysz do komory paleniskowej. Spaliny po oddaniu ciepła w trzech ciągach płomieniówek oczyszczane są z pyłów w aerodynamicznych odpylaczach [41, 42].



Rys. 24. Kotłownia na słomę w Grabowcu [35]

W Trzebiechowie (powiat zielonogórski, woj. lubuskie) zainstalowano dwa kotły o mocy 500 kW każdy, dostarczają energię i ciepłą wodę do kompleksu zabytkowego o kubaturze 40 000 m<sup>3</sup>. Kotłownia zużywa 600 Mg słomy rocznie w formie okrągłych balotów o średnicy 150–170 cm, prostokątnych bel o wymiarach 180x70x120 cm lub 80x40x40 cm, przechowywanych w adaptowanym magazynie po byłych zakładach zbożowych. Zapas paliwa wystarcza na dwa tygodnie, zostaje uzupełniony dostawami od rolników z gminy Trzebiechów wg ustalonego harmonogramu. Skutki modernizacji systemu ciepłowniczego, gmina i środowisko ją otaczające odczuli już w pierwszym sezonie grzewczym, ponieważ oszczędno-

ści wynosiły 50 tysięcy złotych rocznie. Gmina redukuje emisję CO<sub>2</sub> do atmosfery chroniąc zabytkowy park z unikatowym drzewostanem, rezerwat przyrody w Radowicach i co najważniejsze ujęcie wody pitnej dla miasta Zielona Góra [35].

W Otuszu (powiat poznański, woj. wielkopolskie) powstała nowoczesna kotłownia na słomę po przebudowie kotłowni opalanej węglem. W kotłowni zamontowano kocioł typu Metal Erg Oława wraz z wentylatorem i sterownikiem RM 02 opalany słomą, kocioł miałowy GR 350 (jako zabezpieczenie na wypadek braku słomy) oraz dwa zbiorniki wody ciepłej. Kotłownia wyposażona jest również w stację uzdatniania wody i inne urządzenia sterujące. Znamionowa moc cieplna pieca na słomę wynosi 400 kW, układ spalania w kotle to spalanie przeciwprądowe. Proces spalania słomy odbywa się cyklicznie, przy pełnej automatyzacji pracy kotła i systemu grzewczego od załadowania do zakończenia procesu spalania ładunku słomy. Dla zapewnienia właściwego spalania pomiędzy kotłem a odbiornikami zostały zamontowane dwa zbiorniki akumulacyjne (o poj. 15 m<sup>3</sup> każdy) odbierające tyle ciepła ile jest produkowane przez jeden kocioł w trakcie jednego cyklu spalania beli słomy. Przy kotłowni wybudowano magazyn słomy o kubaturze 1783 m<sup>3</sup> [35].

Miasto Frombork (powiat braniewski, woj. warmińsko-mazurskie) podjęło się przebudowy systemu ciepłowniczego, a budowa kotłowni i magazynu słomy była jego kluczowym elementem. Nowa ciepłownia na słomę o mocy 6,5 MW jest ciepłownią przyjazną środowisku, co ma szczególne znaczenie ze względu na walory turystyczne i położenie miasta w sąsiedztwie Chronionego Krajobrazu rzeki Baudy. Do nowej kotłowni podłączono 423 odbiorców bez podnoszenia stawek opłat za ciepło [43].

### *Pozostałe kotłownie*

W Nadleśnictwie Białogard (powiat białogardzki, woj. zachodnio-pomorskie) w wyłuszcarni szyszek funkcjonują piece, które powstały w 1912 roku. Jako paliwo wykorzystywane są szyszki. Piece są dwustopniowe. Każdy z pieców ma moc 250 kW, co daje łącznie 500 kW [45]. Roczne spalanie wynosi 300–400 Mg paliwa. Piece ogrzewają powierzchnię 7000 m<sup>2</sup> [35, 44].

Na terenie Polski znajduje się 21 wyłuszcarni, w zasadzie każda dyrekcja regionalna Lasów Państwowych posiada przynajmniej jedną wyłuszcarnię, w których spala się odpadową biomasę szyszek. Na rysunku 25 przedstawiono piec opalany wyłuszczonej szyszkami w Rucianem-Nidzie (powiat piski, woj. warmińsko-mazurskie) [46].

W zakładzie celulozowo-papierniczym International Paper Kwidzyn S.A. (powiat kwidzyński, woj. pomorskie) wykorzystywany jest kocioł sodowy spalający ługi powarzelne. Kocioł ma moc cieplną 204 MWt. W skojarzeniu z produkcją ciepła produkowana jest także energia elektryczna. Przykładowo, w I kwartale 2005 r. wyprodukowano w IP Kwidzyn 45 653 MWh energii elektrycznej z biomasy [35].



Rys. 25. Piec opalany wytłuszczonymi szyszkami w Rucianem-Nidzie [45]

W gminie Daleszyce (woj. świętokrzyskie) do ogrzewania domu o powierzchni 150 m<sup>2</sup> i ciepłej wody w zbiorniku o pojemności 100 litrów zamontowany jest piec na biomasę, w którym jako paliwo wykorzystywane są suche pestki z owoców [35].

Budynkiem, opalany ziarnem energetycznym jest gospodarstwo we wsi Brzuchania (powiat miechowski, woj. małopolskie), w którym na początku roku 2004 zamontowano instalację do spalania owsa. Zdaniem właściciela, nowa technologia ma wiele zalet: jest opłacalna (150 kg ziarna wystarcza do ogrzewania mieszkania o powierzchni 200 m<sup>2</sup> przez ponad trzy doby), prawie całkiem zautomatyzowana (trzeba tylko uzupełniać ziarno w zasobniku) i nieszkodliwa dla środowiska, a powstający w czasie spalania popiół można później wykorzystywać jako nawóz. Urząd miasta Miechowa zamierza sfinansować jeszcze przynajmniej 100 podobnych inwestycji [47].

W celu ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych do atmosfery również w budynku Gminnego Ośrodka Kultury w Piekoszowie (powiat kielecki, woj. świętokrzyskie) wybudowano kotłownię wodną niskotemperaturową opala-



ną ziarnem owsa. Zainstalowano kocioł D'ALESSANDRO CSI o mocy 100 kW. Koszty ogrzewania są dwukrotnie niższe w oparciu o ziarno owsa od opalania gazem. Spalanie ziarna jest w pełni zautomatyzowane [35].



Rys. 26. Kotłownia opalana ziarnem owsa w Piekoszowie [35]

## Literatura

- [1] D.A. Tillman *et al.*, *Wood combustion*, Academic Press, New York 1981.
- [2] W. Kordylewski (red.), *Spalanie i paliwa*, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [3] M. Ściążko, H. Zieliński (red.), *Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy*, Wyd. Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla i Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zabrze–Kraków 2003.
- [4] L. Stromberg, *Fluidized bed technology in Scandinavia*, Materiały konferencyjne „Spalanie węgla '99”, Ustroń–Zawodzie 1999.
- [5] J.M. Jones *et al.*, *A comprehensive biomass combustion model*, *Renewable Energy* 19, 229–234, 2000.
- [6] E. Wach, *Drewno i słoma jako paliwa. Właściwości i technologie spalania*. Poradnik, Bałtycka Agencja Poszanowania Energii, Gdańsk 2005.
- [7] Prochow *et al.*, *Bioenergy from permanent grassland – a review*, *Combustion, Biore-source Technology* 100, 4945–4954, 2009.
- [8] <http://www.jolly-mec.it> (wejście 21.09.09).

- [9] J. Tymiński, *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w Polsce do 2030 roku*, IBMiER, Warszawa 1997.
- [10] Grossmann, *Combustion*, Academic Press, San Diego 1996.
- [11] P. Gradziuk (red.), *Biopaliwa*, Wyd. „Wieś Jutra”, Warszawa 2003.
- [12] <http://www.moderator.com.pl> (wejście 21.09.09).
- [13] C. Nielsen, *Utilization of straw and similar agricultural residues*, *Biomass&Bioenergy* 9(1–5), 515–323, 1995.
- [14] R. Lipski, S. Orliński, M. Tokarski, *Energetyczne wykorzystanie biomasy na przykładzie kotłowni opalanej słomą we Fromborku*, *MOTROL* 8A, 202–209, 2006.
- [15] <http://www.gsp.pl/biomasa.htm> (wejście 22.09.09).
- [16] K. Kubica, *Spalanie biomasy w urządzeniach grzewczych małej mocy – emisja zanieczyszczeń*, w: „Odnawialne źródła u progu XXI wieku”, EC BREC/IMBER, 419–426, Warszawa 2001.
- [17] W.H. Denisiuk, J. Piechocki, *Techniczne i ekologiczne aspekty wykorzystania słomy na cele energetyczne*, Wyd. Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2005.
- [18] F. Hansen, *Program produkcyjny firmy Volund Danstoker*, Volund Energy System A/S, Esbjerg – Dania, 1996.
- [19] W. Denisiuk, J. Piechocki, *Energetyczne wykorzystanie słomy na przykładzie kotłowni w Zielonkach*, *Inżynieria Rolnicza* 8(19), 265–272, 2000.
- [20] W. Kotowski, *Rozwój technologii efektywnego przetwarzania biomasy w media energetyczne*, *Gospodarka Paliwami Energetycznymi* 7, 22–26, 2002.
- [21] Grzybek, P. Gradziuk, K. Kowalczyk, *Słoma – energetyczne paliwo*, Wyd. Wieś Jutra, Warszawa 2001.
- [22] Demirbas, *Combustion characteristics of different biomass fuel*, *Progress in Energy and Combustion Science* 30, 219–230, 2004.
- [23] Kraszkiewicz, *Ocena ciepła spalania i wartości opałowej wybranych sortymentów drewna robinii akacjowej na tle klas grubości*, *MOTROL* 10, 67–72.
- [24] P. Gradziuk, *Ekonomiczne i ekologiczne aspekty wykorzystania słomy na cele energetyczne w lokalnych systemach grzewczych*, *Acta Agrophysica* 8(3), 591–601, 2006.
- [25] J. Jech, S. Sosnowski, J. Mészáros, *Suszenie ziarna energią uzyskaną ze spalania biomasy*, *MOTROL* 10, 60–66, 2008.
- [26] K.T. Ewida et al., *A sustainable approach to the recycling of rice straw through pelletization and controlling burning*, *Clean Technologies and Environmental Policy* 8, 188–197, 2006.
- [27] M. Stolarski, S. Szczukowski, J. Tworkowski, *Biopaliwa z biomasy wieloletnich roślin energetycznych*, *Energetyka i Ekologia* 1, 77–80, 2008.
- [28] D. Kalebas, *Ilość i skład chemiczny popiołu z biomasy roślin energetycznych*, *Acta Agrophysica* 7(4), 909–914, 2006.
- [29] Kowalczyk-Juśko, *Popiół z różnych roślin energetycznych*, *Proceedings of ECOpole* 3(1), 159–164, 2009.
- [30] W. Denisiuk, *Możliwości wykorzystania ślazuwca pensylwańskiego w energetyce*, *Inżynieria Rolnicza* 6, 105–113, 2005.
- [31] L. Grabowska, J. Kołodziej, H. Burczyk, *Zastosowanie energetyczne konopi włóknistych*, *Problemy Inżynierii Rolniczej* 2, 19–25, 2007.
- [32] Niedziółka, M. Szymanek, A. Zuchniarz, *Ocena właściwości energetycznych i mechanicznych brykietów z masy poźniwej*, *Inżynieria Rolnicza* 7(95), 153–159, 2007.

- [33] M. Dziewanowska, T. Dobek, *Wartości cieplne liści wybranych gatunków drzew zbieranych na terenach zabudowanych*, Acta Agrophysica 8(3), 551–558, 2006.
- [34] <http://www.ekoenergia.pl> (wejście 22.09.09).
- [35] T. Golec i in., *Palniki pyłowe na biomasę*, Energetyka i Ekologia 5, 375–382, 2007.
- [36] <http://www.eo.org.pl> (wejście 15.09.09).
- [37] <http://www.zpp.pl> (wejście 15.09.09).
- [38] P. Sołowiej, K. Nalepa, M. Neugebauer, *Analiza energetyczno-ekonomiczna produkcji energii cieplnej w kotłowniach na zrębki drewna*, Inżynieria Rolnicza 2(100), 263–267, 2008.
- [39] <http://www.sklejkaeko.pl> (wejście 22.09.09).
- [40] <http://www.ozc.ostrow-wielkopolski.pl> (wejście 22.09.09).
- [41] <http://www.pnec.org.pl> (wejście 23.09.09).
- [42] K. Kowalczyk, Z. Kuchmistrz, *Uwarunkowania inwestycyjne programu „Zastosowanie słomy jako paliwa w systemie grzewczym miasta Lubania”. Trzyletnie doświadczenia eksploatacyjne*, w: „Odnawialne źródła energii u progu XXI wieku”, 459–466, EC BREC/IMBER, Warszawa 2001.
- [43] <http://www.luban.pl> (wejście 23.09.09).
- [44] <http://www.ekoenergia.pl> (wejście 23.09.09).
- [45] <http://www.ostoja.one.pl> (wejście 23.09.09).
- [46] <http://www.jezioro.com.pl> (wejście 23.09.09).
- [47] <http://www.biomasa.org> (wejście 16.09.09).

# WSPÓŁSPALANIE BIOMASY

## Współspalanie odpadów

Niezwykły w ostatnich kilku latach wzrost atrakcyjności procesu współspalania wynika z uwarunkowań legislacyjnych, które umożliwiają zaliczenie części energii powstającej w procesie współspalania biomasy i węgla brunatnego do energii odnawialnej. Dzięki współspalaniu możliwy był szybki przyrost wytwarzania tzw. zielonej energii, nastąpiło zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do powietrza. Za korzystną konsekwencję można też uznać oszczędność zasobów surowców nieodnawialnych [1, 2].

Biomasę powinno się przede wszystkim wykorzystywać w generowaniu energii rozproszonej – czyli należałoby budować dużą liczbę niewielkich systemów o dużej sprawności. Coraz częściej mówi się też o układach tzw. trigeneracji – pozwalających na produkcję energii elektrycznej, ciepła i chłodu. Taki układ może pracować cały rok, ciągle produkując energię elektryczną, a w zależności od pory roku także ciepło lub chłód. Zakłady energetyczne prowadzące współspalanie, posiadają z tego tytułu dodatkowe wsparcie w postaci zwolnienia z akcyzy części energii uznawanej za wyprodukowaną z OZE, a emitowany przez nie dwutlenek węgla nie obciąża limitów emisji przydzielonych w ramach krajowego planu rozdziału uprawnień do emisji (KPRU). Są to znaczące zyski tych zakładów uzasadniające dalszy rozwój technik współspalania [1, 2, 3].

Współspalanie jest potocznym określeniem wytwarzania energii elektrycznej lub ciepła w oparciu o proces wspólnego, jednoczesnego, przeprowadzanego w jednym urządzeniu spalania biomasy lub biogazu z innymi paliwami. Część energii wyprodukowanej w powyższy sposób może być uznana za energię wytworzoną w odnawialnym źródle energii. Ilość tę ustala się na podstawie następującego wzoru [4]:

$$E_o = \frac{\sum_{i=1}^n M_b W_b}{\sum_{i=1}^n M_b W_b + \sum_{i=1}^m M_k W_k} \cdot E$$

gdzie:  $E_o$  – ilość energii elektrycznej lub ciepła zaliczonych do energii wytwarzanej z odnawialnych źródeł energii [MWh lub GJ],  $E$  – ilość energii elektrycznej lub ciepła wytworzonych w jednostce wytwórczej, w której jest

spalana biomasa lub biogaz wspólnie z innymi paliwami [MWh lub GJ],  $M_{bi}$  – masa spalanej w jednostce wytwórczej biomasy lub biogazu [Mg],  $M_{ki}$  – masa spalonych w jednostce wytwórczej innych rodzajów paliw [Mg],  $W_{bi}$  – wartości opałowe biomasy lub biogazu spalonych w jednostce wytwórczej, obliczone w sposób określony w Polskich Normach [MJ/Mg],  $W_{ki}$  – wartości opałowe innych niż określone w symbolu  $W_{bi}$  paliw spalonych w jednostce wytwórczej, obliczone w sposób określony w Polskich Normach [MJ/Mg],  $n$  – liczba rodzajów biomasy lub biogazu spalonych w jednostce wytwórczej,  $m$  – liczba rodzajów innych paliw spalonych w jednostce wytwórczej.

Warto w tym miejscu przytoczyć za §16 pkt. 3 rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie standardów emisyjnych z instalacji [5], definicję instalacji współspalania odpadów. Brzmi ona następująco: „Przez instalację współspalania odpadów rozumie się każdą instalację, której głównym celem jest wytwarzanie energii lub produktów materialnych, w której wraz z paliwami spalane są odpady w celu odzyskania zawartej w nich energii lub w celu ich unieszkodliwienia”.

Podana definicja, jak i inne przepisy cytowanego rozporządzenia, nie ograniczają jakie rodzaje odpadów mogą być współspalane. Mogą to być zarówno odpady z grupy innych niż niebezpieczne jak też odpady niebezpieczne. Istotne jest, aby ich użycie wiązało się z odzyskiem energii i nie powodowało obniżenia jakości produktu. Bardzo istotna jest również wartość opałowa odpadów kierowanych do współspalania w piecach cementowych, szczególnie dla cementowni, która podejmując się procesu współspalania odpadów i ponosząc koszty związane z dostosowaniem instalacji oczekuje zysków po stronie oszczędności energii w paliwie pierwotnym. W krajach UE najczęściej współspalane w piecach cementowych są następujące rodzaje odpadów:

- zużyte opony,
- odpady gumowe,
- odpady z produkcji papieru,
- oleje przepracowane,
- drewno odpadowe,
- komunalne osady ściekowe oraz osady z przemysłu papierniczego,
- tworzywa sztuczne oraz
- zużyte rozpuszczalniki [6].

## **Przygotowanie biomasy i paliwa do komory paleniskowej kotła energetycznego**

Istnieją dwie możliwości energetycznego wykorzystania biomasy w istniejących kotłach [7]:

- 1) współspalanie bezpośrednie:
  - mieszanie biomasy z węglem przed układem dozowania węgla do kotła,
  - niezależne przygotowanie biomasy – rozdrobnienie i spalanie na ruszcie pod kotłem oraz
  - dozowanie do palników, ewentualnie nad palnikami węglowymi, niez-

leżnym strumieniem, w tym przypadku możliwe jest użycie biomasy jako paliwa „reburningowego”,

2) współspalanie pośrednie:

- przedpalenisko – do komory paleniskowej kotła wnoszone jest ciepło spalin ze spalania biomasy,
- wstępne zgazowanie biomasy – do komory paleniskowej wprowadzany jest wilgotny gaz palny.

Magazynowanie i rozdrobnienie dużych ilości biomasy o znacznej objętości wymaga rozbudowy często ograniczonych placów składowych oraz podjęcia innych przedsięwzięć inwestycyjnych (zakup maszyn rozdrabniających i transportowych). Ze względu na procesy biologiczne, a także niebezpieczeństwo samozapłonu nie należy składować rozdrobnionej biomasy w elektrowni dłużej niż 2–3 dni. Wprowadzanie rozdrobnionej biomasy przez istniejący układ nawęglania wymaga najmniejszych nakładów inwestycyjnych. Tym sposobem realizowano próby współspalania w polskiej energetyce. Próby przeprowadzone na różnych kotłach pyłowych wyposażonych w młyny kulowe wykazały, że możliwe jest podawanie do 5% biomasy przez istniejący układ młynowy. Dodatkowo, ograniczenia mogą wystąpić w układzie nawęglania, np. ze względu na zawieszanie się mieszanki biomasy z węglem w bunkrach węglowych o określonym nachyleniu ścian. Dodanie wilgotnej biomasy powoduje zwiększenie zawartości wilgoci w mieszaninie pyłowo-powietrznej z młynów oraz obniżenie jej temperatury. W niektórych przypadkach może to być rekompensowane zwiększeniem wentylacji oraz podwyższeniem temperatury powietrza podawanego do młynów. Ogólnie, dodanie biomasy powoduje obniżenie wydajności młynów (liczonej w energii paliwa dostarczanego do kotła), co przy braku zapasu paliwa powoduje niedotrzymanie wydajności kotła. W celu dotrzymania wymaganej wydajności kotła i dynamiki zmiany obciążeń, konieczna jest praca z większą niż na samym węglu liczbą młynów – dodatkowo młyn pracuje na samym węglu rekompensując negatywny wpływ biomasy na pozostałych młynach [7].

Przeprowadzone próby wyraźnie wskazują [7], że uzyskanie zakładanego, wyższego udziału cieplnego biomasy w procesie współspalania wymaga przygotowania biomasy w oddzielnym systemie, skąd byłaby bezpośrednio podawana do kotła, z pominięciem młynów węglowych. Powoduje to konieczność wstępnego rozdrobnienia biomasy oraz ewentualne wstępne jej osuszenie. Wiąże się to z koniecznością inwestycji w dość rozbudowaną instalację, co znacznie zwiększa koszty przystosowania kotła do współspalania. Biomasa może być podawana do komory paleniskowej przez przystosowane palniki usytuowane pomiędzy palnikami pyłowymi lub nad nimi. Metoda ta w porównaniu z podawaniem biomasy bezpośrednio do młynów ma następujące zalety:

- umożliwia prowadzenie współspalania z wysokim udziałem biomasy w masie paliwa,
- niezależnia układ podawania biomasy od ograniczeń wydajności młynów, podajników, wentylatorów,

- umożliwia utrzymanie (podwyższenie) wydajności kotła,
- ułatwia monitorowanie ilości podanej biomasy do kotła (oddzielny palnik) – łatwiejsze rozliczanie ilości spalonej biomasy,
- stabilizuje spalanie i obniża minimum techniczne kotła oraz emisję  $\text{NO}_x$ .

Kotły fluidalne, zwłaszcza przy oddzielnym doprowadzeniu biomasy, są mniej wrażliwe na jej jakość i dopuszczają większy jej udział. Zdolność do wykorzystywania różnych paliw w instalacjach ze złożem fluidalnym to rzecz powszechnie znana, jednak zmiany stosowanego paliwa czy też jego proporcji w istniejących, eksploatowanych instalacjach każdorazowo powinny być konsultowane i analizowane przez dostawców danej technologii w celu ustalenia parametrów pracy czy dobrania składu złoża do planowanych zmian paliwa. Dodatkowym powodem niedotrzymania wydajności kotła przy współspalaniu biomasy w kotłach energetycznych może się okazać ograniczona wydajność zainstalowanych wentylatorów spalin, dobieranych dla mniejszych ilości spalin z węgla [8].

Innym rozwiązaniem [7] dotyczącym współspalania może być dobudowanie do kotła przedpaleniska lub wstępnego zgazowycza o wydajności cieplnej zapewniającej zakładany udział biomasy w produkcji energii elektrycznej. Jak dotąd, tańszym rozwiązaniem jest zastosowanie przedpaleniska. Rozwiązanie takie wprowadzono w kotle OP-140 w EC Elbląg. Składa się on z komory spalania wmurowanej wewnątrz cegłą ogniotrwałą i z zewnątrz opancerzonej. W komorze znajduje się ruszt schodkowy napędzany hydraulicznie oraz ruszt dopalający. Paliwo doprowadzane jest na ruszt przez lej zsykowy, a popiół i żużel są odprowadzane poprzez leje do odzūlacza z zamknięciem wodnym. Spaliny z przedpaleniska schłodzone do temperatury ok.  $850^{\circ}\text{C}$  dzięki odpowiedniemu nadmiarowi powietrza do spalania, kierowane są do dolnej części leja komory paleniskowej. Ciepło ze spalin z przedpaleniska przekazywane jest do obiegu parowo-wodnego kotła pyłowego.

## Kotły rusztowe

Kotły rusztowe eksploatowane są głównie w małych obiektach, o mocach cieplnych nie przekraczających zwykle  $50 \text{ MW}_t$ . W dużych elektrowniach, czy elektrociepłowniach kotły te spełniają zazwyczaj rolę szczytowych źródeł ciepła [6].

Najbardziej rozpowszechnione w kotłach starego typu były paleniska z rusztem płaskim, przy spalaniu paliw o dużej wilgotności stosuje się paleniska z rusztami pochyłymi lub schodkowymi, palenisko z rusztem taśmowym jest najbardziej rozpowszechnionym paleniskiem w kotłach przemysłowych [9]. Wzdłuż rusztu można wyróżnić następujące strefy: nagrzewania i suszenia, odgazowania, zgazowania i dopalania. W przypadku spalania paliw wilgotnych (biomasa) jest wskazane zabudowanie sklepienia nad przednią częścią rusztu w celu przyspieszenia suszenia paliwa, a przy spalaniu paliw o małej zawartości części lotnych, sklepienie powinno znajdować się nad końcową częścią rusztu.

Do zalet kotłów z paleniskiem rusztowym należy zaliczyć [10]:

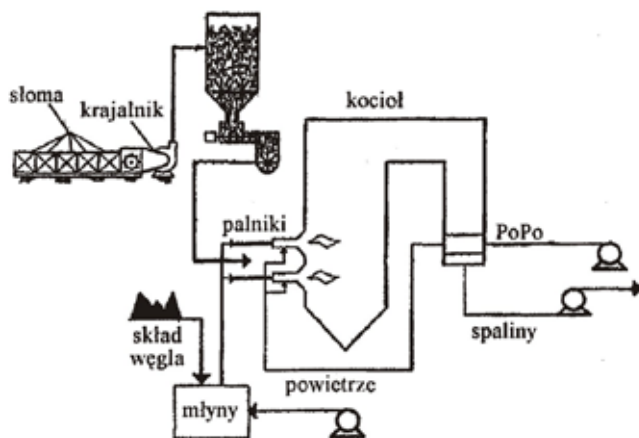
- prostą budowę,
- szeroki zakres obciążeń,
- łatwość eksploatacji (rozruch i odstawienie) oraz
- prosty system sterowania.

Do zasadniczych wad eksploatacyjnych palenisk rusztowych należą:

- niższa sprawność energetyczna,
- spiekanie się paliw na ruszcie, czego efektem są straty powstałe wskutek niecałkowitego spalania oraz
- spalanie węgla o dużym rozdrobieniu, co powodować może ubijanie się paliwa na ruszcie, a w konsekwencji utrudnienia w przepływie powietrza przez warstwę i przesyp drobnymi frakcjami przez ruszt do odzūżlacza.

Tradycyjne kotły rusztowe charakteryzują się zwykle bardzo słabo rozbudowanym węzłem oczyszczania spalin – posiadają najczęściej jedynie proste urządzenia do odpylania, cyklony, rzadziej elektrofiltry, przez co ich zastosowanie do współspalania odpadów może być ograniczone ze względu na wymagania emisyjne. Spełnienie obowiązujących wymagań, dotyczących zarówno standardów emisyjnych jak i procesowych, w przypadku kotłów rusztowych bez uprzedniej modernizacji instalacji oczyszczania spalin i rekonstrukcji ciągu spalin może być bardzo trudne. Dokonując wstępnej analizy zastosowania kotłów rusztowych jako potencjalnych współspalarni odpadów, w sposób szczególnie należy sprawdzić także wymagania dotyczące jakości żużla i popiołów paleniskowych, gdyż zagrożenie przekroczenia przez nie 3% zawartości całkowitego węgla organicznego lub 5% straty prażenia jest dość duże [11, 12].

Typowe kotły rusztowe do spalania węgla z rusztem taśmowym pozwalają współspalać kilkanaście procent drewna [13] i słomy [11] (rys. 1.) z węglem bez znacznego pogorszenia parametrów pracy kotła i istotnego zwiększenia emisji CO.



Rys. 1. Współspalanie słomy z pyłem węglowym [11]

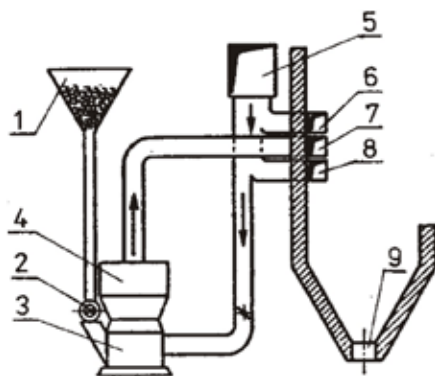


Nowoczesne konstrukcje kotłów rusztowych umożliwiają specjalistyczne spalanie zarówno biomasy, jak i różnego rodzaju odpadów. Są to urządzenia charakteryzujące się zwartą konstrukcją i znaczną niezawodnością, jednak relatywnie niewielką elastycznością pracy, zwłaszcza w zakresie zmiany parametrów paliwa. Wykorzystywane są przede wszystkim przez ciepłownie i elektrociepłownie komunalne i przemysłowe. Konstrukcja współczesnych rusztów umożliwia efektywne spalanie paliw niskogatunkowych. W chwili obecnej w Polsce funkcjonuje około 250 elektrociepłowni komunalnych i przemysłowych. Część tych jednostek, w których pracują kotły rusztowe została już przystosowana do współspalania paliw innych (głównie biomasy) niż konwencjonalne, dla których zostały zaprojektowane [10].

Badania energetyczno-emisyjne kotła OSR-32 w EC Andropol [10] wykonane przez Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla przed przystąpieniem do modernizacji i po jej wykonaniu wykazały znaczną poprawę wartości wskaźników charakterystycznych pracy kotła. Dla prawidłowego spalania paliwa duże znaczenie ma równomierność granulacji paliwa, a w przypadku współspalania równomierne wymieszanie paliw. Homogenizacja dwóch rodzajów paliwa: węgla z biomasą czy też z paliwem alternatywnym jest trudna. Mieszanie paliw na placu, czy też na przesy-pach taśmociągów nie zawsze spełnia swoją rolę. Podczas zasypywania zasobnika przykotłowego mieszanką, następuje wtórne rozsegregowywanie się paliw, co powoduje okresowe podawanie na ruszt mieszaniny o innych proporcjach w stosunku do pierwotnie założonych. Wpływ na niewłaściwe proporcje mieszanki na ruszcie ma także okresowe odrywanie się lżejszych frakcji mieszanki (np. biomasy) do leja utworzonego w zasobniku podczas poboru paliwa do spalania. Spalanie nierównomiernie wymieszanego paliwa prowadzi do miejscowego przepalania się warstwy na ruszcie. W konsekwencji, w miejscach przepaleń powietrze napotyka-jąc na mniejszy opór, ucieka do komory paleniskowej, nie dopalając paliwa na pozostałej części rusztu. Podział bunkra z zastosowaniem podajników regulowanych przez falowniki pozwala na mieszanie paliw w ostatniej fazie podawania do kotła (bez negatywnych objawów opisanych powyżej) w dowolnej proporcji. Zastosowanie takiego układu ułatwia ustawianie odpowiedniej proporcji udziału biomasy w zależności od jakości spalanych w danym momencie paliw. Ułatwia to również rozruch oraz odstawienie kotła zasilanego samym węglem, a także, w przypadku spalania odpadów, pozwala spełnić warunek zatrzymania podawania odpadów do spalania w momencie przebywania gazów spalinowych w strefie temperatury powyżej 850°C w czasie krótszym niż 2 s. Podawanie paliwa do paleniska za pośrednictwem zbiornika buforowego oraz podajników rewersyjnych umożliwia dodatkowe wymieszanie paliw oraz podanie na ruszt paliwa o równomiernej granulacji i optymalnej gęstości nasypowej [10].

## Kotły pyłowe

Kotły pyłowe stanowią najbardziej rozpowszechnioną grupę kotłów eksploatowanych w krajowej energetyce zawodowej [9]. Paleniska pyłowe są wyposażone w instalacje przygotowujące mieszankę pyłowo-powietrzną. Instalacje te składają się zwykle ze zbiornika paliwa (węgla), podajnika-dozownika, młyna, separatora, palnika, dysz powietrza, kanałów powietrznych, komory paleniskowej i urządzeń regulacyjnych (rys. 2.). W instalacji paliwo stałe jest mielone w młynie na drobny pył, a potem wdmuchiwane do komory paleniskowej razem z powietrzem potrzebnym do procesu spalania. Zadaniem palnika jest doprowadzenie paliwa i powietrza do komory paleniskowej, dobre ich wymieszanie, ogrzanie pyłu, zapłon mieszanki oraz stabilizacja płomienia [9, 14].



Rys. 2. Schemat instalacji paleniska pyłowego: 1 – zbiornik węgla, 2 – podajnik, 3 – młyn, 4 – separator, 5 – palnik, 6,8 – dysze powietrza, 7 – dysza mieszanki, 9 – komora paleniskowa [13]

Kotły pyłowe posiadają relatywnie wysoko technicznie zaawansowane instalacje oczyszczania spalin, dzięki czemu są w stanie, szczególnie tam gdzie współpracują z instalacją mokrego lub półsuchego odsiarczania spalin, spełnić standardy emisyjne. W przypadku wymagań dla tlenków azotu mogą dla tych rodzajów kotłów wystąpić problemy techniczne. Oddzielną i trudną do rozwiązania kwestią dla tego rodzaju kotłów jest układ podawania paliwa w postaci odpadów. Jak dotąd w kotłach pyłowych, technicznie dobrze opanowane jest (niestety ciągle nie w Polsce) dozowanie i współspalanie głównie osadów ściekowych [6].

Współspalanie biomasy w kotłach pyłowych napotyka na wiele trudności, problem stanowi rozdrobnienie drewna lub słomy w młynach węglowych w stopniu zbliżonym do rozdrobnienia węgla. Próby ze spalaniem rozdrobnionej słomy (sieciki) w kotłach pyłowych z pyłem węglowym wykazały, iż czas spalania karbonizatu ze słomy okazał się znacznie dłuższy niż czas spalania cząstek węgla, co zwiększało stratę

spalania [15]. Spliethoff i Hein [16] stwierdzają, iż rozdrobnienie słomy do rozmiarów <6 mm i drewna <4 mm zapewnia wystarczającą jakość wypalenia w procesie współspalania z pyłem węglowym.

## Kotły fluidalne

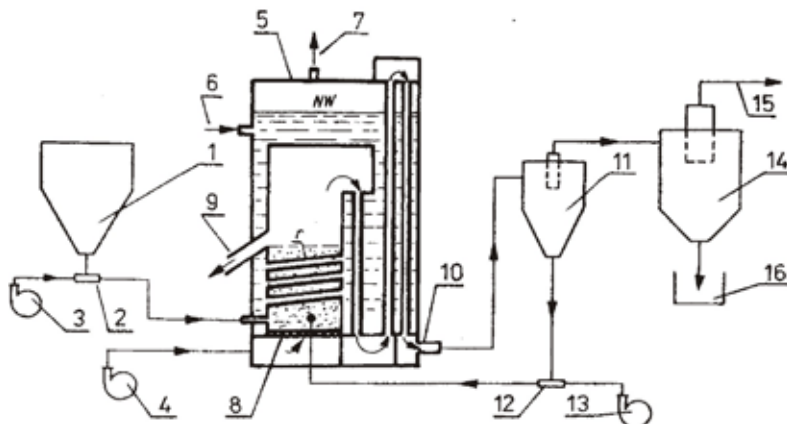
W ostatnich latach w procesie energetycznego wykorzystania biomasy coraz większą popularność zdobywa technika fluidalna. Jej stosowanie jest wyrazem proekologicznych dążeń w energetyce światowej [17].

Prace nad spalaniem fluidalnym zostały rozpoczęte 16. grudnia 1921 roku, kiedy Fritz Winkler zauważył ruch ziaren pod wpływem powietrza przypominający wrzącą ciecz [18]. Ten niewielki eksperyment zapoczątkował rozwój nowego procesu zwanego fluidyzacją. Jednakże dopiero w latach sześćdziesiątych XIX w. pojawiło się szczególne zainteresowanie techniką fluidalnego spalania dzięki usilnym wysiłkom Douglasa Elliota, który wspólnie z British Coal Utilization Research Association i National Coal Board zainicjował program badań fluidalnego spalania węgla w warstwie pęcherzowej (Bubbling Fluidized Bed). 17 lat po wynalazku Winklera, Waren Lewis i Edwin Gilliard z MIT poszukując odpowiedniego procesu do katalitycznego krakingu zauważyli nowe zjawisko zwane fluidyzacją w warstwie cyrkulacyjnej (Circulating Fluidized Bed (CFB)). Od tego okresu nastąpił szybki rozwój techniki CFB, głównie w przemyśle petrochemicznym. Dopiero w 1982 roku został zbudowany pierwszy kocioł CFB 84 MW w zakładach Vereinigte Aluminium Werke w Luenen według technologii Lurgi. Jednocześnie prowadzone były intensywne prace przez fińską firmę Ahlstrom, Foster Wheeler, ABB i wiele innych, które zaowocowały dobrymi konstrukcjami kotłów CFB. Olbrzymi postęp w budowie kotłów fluidyzacyjnych na świecie spowodował zainteresowanie technologią fluidalnego spalania węgla krajowych producentów kotłów, a także energetyki zawodowej i przemysłowej. Rafako we współpracy z EVT obecnie oferują cały zestaw kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną. Podobnie, Foster Wheeler Energy Fakop z Sosnowca oferują krajowym inwestorom kotły fluidalne CFB oraz Compact. Szereg krajowych firm prowadzi modernizację ciepłowni opartą na technice fluidalnej. Spalanie w kotłach fluidyzacyjnych wykazuje wiele zalet [17, 18]:

- możliwość wykorzystania mułów popłucznych z instalacji wzbogacania węgla jako paliwa,
- proste przygotowanie paliwa do spalania oraz proste doprowadzenie go do komory paleniskowej,
- znaczną (80%) redukcję emisji  $\text{SO}_2$  do atmosfery poprzez doprowadzenie do złoża związków wiążących siarkę,
- niską emisję dwutlenku azotu z uwagi na niską temperaturę złoża (850°C) i spalanie etapowe,
- ograniczoną emisję węglowodorów,
- bardzo dobry współczynnik wymiany ciepła w komorze paleniskowej,

- wysoką sprawność spalania, ze względu na mieszanie turbulентne i długi czas przebywania cząstek w złożu cyrkulacyjnym,
- możliwość gospodarczego wykorzystania powstających odpadów paleniskowych oraz
- niewielkie zabrudzenie powierzchni kotłowych.

Schemat kotła z palnikiem fluidalnym przedstawiono na rysunku 3 [9]. Paliwo podaje się z zasobnika 1 przez dozownik 2 do kotła nad płytę rusztową 8. Wentylator podmuchowy 4 o wysokim stopniu sprężania 40 kPa tłoczy powietrze przez otwory w płycie rusztowej. Prędkość przepływu tego powietrza jest tak dobrana, że cząstki stałe paliwa są w zawieszeniu. Podczas spalania rury parownika zanurzone w złożu fluidalnym intensywnie odbierają ciepło.



Rys. 3. Schemat kotła z palnikiem fluidalnym, 1 – zasobnik paliwa, 2 – dozownik, 3 – wentylator zasilający instalację transportu ziaren węgla, 4 – wentylator podmuchowy, 5 – kocioł, 6 – króciec zasilający, 7 – króciec wylotu pary, 8 – płyta rusztowa, 9 – kanał przesypowy popiołu, 10 – wylot spalin, 11 – oddzielnik cyklonowy I stopnia, 12 – dozownik unosu, 13 – wentylator zasilający instalację transportu niespalonych cząstek węgla, 14 – oddzielnik cyklonowy II stopnia, 15 – wlot spalin do wentylatora sztucznego ciągu i komina, 16 – zbiornik popiołu [9]

Dzięki idealnemu wymieszaniu ziaren węgla z powietrzem w warstwie fluidalnej oraz faktowi, że temperatura warstwy fluidalnej jest niższa niż temperatura topnienia popiołu zawartego w węglu, możliwe jest spalanie węgla niskokalorycznego, zawierającego bardzo dużo popiołu. W palniku fluidalnym możliwe jest spalanie węgla o wartości opałowej począwszy od około 6,3 MJ/kg bez odbioru ciepła z warstwy fluidalnej i od około 13 MJ/kg przy odbiorze ciepła z warstwy fluidalnej. Fluidalne spalanie węgla zawierającego dużą ilość popiołu jest jedynym bezpośrednim sposobem jego spalania, które może być wykorzystywane dla wytwarzania gazów wysokotemperaturowych dla turbiny gazowej. Wynika to

z niskiej temperatury warstwy fluidyzacyjnej, co minimalizuje wyzwolenie się gazowych składników popiołu, szkodliwie działających na łopatki turbiny oraz nadtapianie ziaren popiołu mogących w rezultacie wywołać erozję łopatek. Pomyślnie wypadły próby ze spalaniem w palenisku fluidalnym węgla brunatnego, mułów i przerostów węgla kamiennego, torfu, łupków bitumicznych, pozostałości z przeróbki ropy naftowej, a także odpadów komunalnych [17, 18].

Wymiana ciepła pomiędzy warstwą fluidalną a umieszczonymi w niej rurowymi powierzchniami ogrzewalnymi kotła jest bardzo intensywna, co wpływa na wymiary komory paleniskowej. Do 60% ciepła uzyskanego ze spalania może być przyjęte przez powierzchnie ogrzewalne. Palenisko fluidyzacyjne pozwala na zmniejszenie emisji dwutlenku siarki do atmosfery przy odpowiedniej zawartości wapnia w warstwie fluidalnej wyrażonej w stosunku molowym  $Ca/S = 1,5$  o 80%, a przy stosunku molowym  $Ca/S = 2,5$  nawet o 95%. Równocześnie emisja tlenków azotu do atmosfery zostaje zmniejszona o 50–80% w porównaniu do paleniska pyłowego [18].

Ze względu na prędkość przepływającego czynnika w komorze spalania, skład frakcyjny materiału stanowiącego warstwę fluidalną oraz ciśnienie panujące w komorze paleniskowej można dokonać podstawowego podziału kotłów fluidyzacyjnych. Z tego względu kotły fluidyzacyjne dzieli się na [19]:

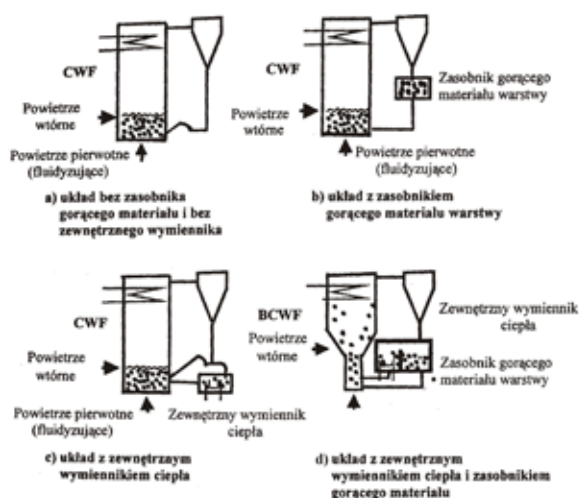
- kotły fluidyzacyjne ze złożem stacjonarnym (pęcherzowym) – w literaturze anglosaskiej oznaczane jako AFBC (Atmospheric Fluidized Bed Combustion),
- kotły fluidyzacyjne z ciśnieniowym złożem stacjonarnym (pęcherzowym) – PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustion),
- kotły fluidyzacyjne ze złożem cyrkulacyjnym – CFBC (Circulating Fluidized Bed Combustion),
- kotły fluidyzacyjne z ciśnieniowym złożem cyrkulacyjnym – PCFBC (Pressurized Circulating Fluidized Bed Combustion).

W wyniku poszukiwania konstrukcji kotła mniej wrażliwego na zmiany jego parametrów eksploatacyjnych, powstały kotły z cyrkulacyjną warstwą fluidalną, posiadające odmienne rozwiązania, zwłaszcza w układzie recyrkulacji materiału sypkiego. Schematy stosowanych rozwiązań przedstawiono na rysunku 4 [20].

W rozwiązaniu (a) (Rys. 4.) zasadniczym parametrem kształtującym warunki pracy instalacji jest prędkość przepływu gazu fluidyzującego. Gęstość strumienia masy materiału powracającego do kolumny oraz rozkład koncentracji ziaren wewnątrz komory paleniskowej są zależne głównie od prędkości gazu fluidyzującego i właściwości cyrkulujących ziaren [20].

W rozwiązaniu (b) zastosowano w układzie nawrotu ziaren zasobnik materiału cyrkulującego oraz zawór typu „L”. Obecność zasobnika pozwala zmieniać ilość materiału zawartego w kolumnie fluidyzacyjnej. Pozwala to na dodatkową regulację gęstości strumienia materiału, w granicach wyznaczonych pojemnością zasobnika, oprócz zmian wynikających z prędkości gazu fluidyzującego. Układ taki pozwala w większym zakresie niż układ (a) dobrać warunki przepływowe, dostoso-

wując je do wymagań procesu spalania. W obu opisanych instalacjach (a i b) temperatura materiału sypkiego zawracanego do komory paleniskowej kotła jest o kilkanaście stopni niższa od temperatury ziaren w komorze. W wielu przypadkach, głównie przy zmianie właściwości spalanego paliwa, pojawia się konieczność regulacji temperatury materiału sypkiego zawracanego do komory paleniskowej, głównie poprzez chłodzenie. Takie możliwości posiada przedstawiony układ (c), w którym zastosowano podajnik fluidyzacyjny; możliwe jest sterowanie przepływem i temperaturą materiału powracającego do komory paleniskowej kotła. Materiał sypki może być wprowadzany bezpośrednio z układu nawrotu do komory kotła lub poprzez zewnętrzny fluidalny wymiennik ciepła, po uprzednim schłodzeniu w nim [20].

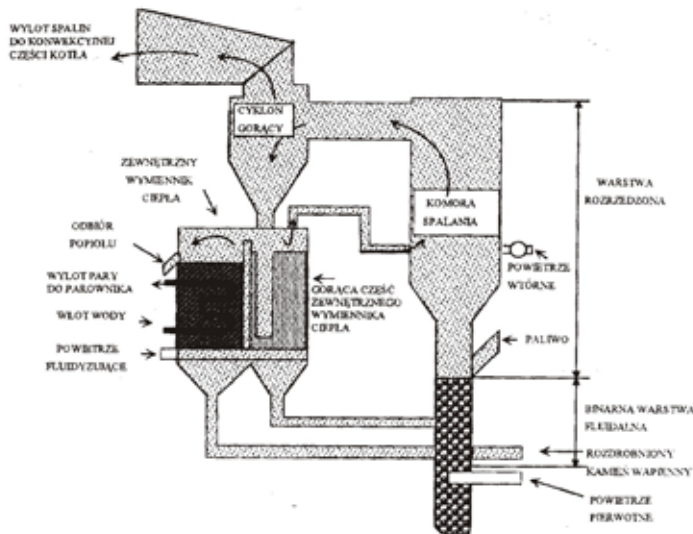


Rys. 4. Schematy typowych układów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną [20]

Układ przedstawiony na rysunku (d) jest kompilacją wszystkich opisanych wcześniej rozwiązań. Układ ten w połączeniu z charakterystyczną zmianą przekroju komory paleniskowej kotła pozwala na organizację warstwy binarnej w komorze kotła, zaliczanego do najnowszej generacji kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną [20].

Kocioł z binarną cyrkulacyjną warstwą fluidalną (pol. BCWF, ang. MSFB) przedstawiono na rysunku 5. BCWF jest warstwą cyrkulacyjną posiadającą w swej dolnej części zorganizowaną warstwą fluidalną, która jest złożona głównie z kul ceramicznych o rozmiarach 10-15 mm, które są fluidyzowane strumieniem powietrza doprowadzonego pod ruszt komory paleniskowej, powietrza pierwotnego, z zawieszonymi w nim małymi ziarnami materiału cyrkulującego, który stanowią: popiół, sorbent wapniowy i paliwo. W dolnej części komory paleniskowej powstają doskonałe warunki rozdrabniania, co stwarza możliwość wprowadzania paliwa

o rozmiarach ziaren do 50 mm i zapłonu paliwa świeżego, gdyż binarna warstwa fluidalna stanowi bardzo skuteczny stabilizator procesu spalania ze względu na małą podatność na zmiany temperatury, związaną ze znaczną pojemnością ciepłą kul ceramicznych [20].



Rys. 5. Schemat układu kotła z binarną cyrkulacyjną warstwą fluidalną [20].

Kotły typu BFB (ze złożem bąbelkowym) i CFB (CFBC) są dzisiaj najbardziej popularnymi instalacjami wykorzystującymi technikę fluidalną. Kotły te w zasadzie spełniają wymagania dotyczące niskiej emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych w przypadku spalania w nich odpowiednich, określonych w projekcie kotła paliw (odpowiednio przygotowanych pod względem rozdrobnienia oraz zawartości popiołu i wilgoci). Zdarza się jednak, że jakość spalanych paliw dość znacznie odbiega od jakości paliw gwarantujących poprawną pracę kotła, zgodną z wymogami środowiska i względami ekonomicznymi. Obecnie trwają badania nad zapewnieniem większej elastyczności paliwowej kotłów wykorzystujących technikę fluidalną. Duże nadzieje na tym polu roją prace nad binarnym układem cyrkulacyjnym – BCWF, w których warstwa fluidalna łączy cechy warstw pęcherzowej oraz cyrkulacyjnej i stanowi odmianę systemu CFB. Układy tego typu znalazły zastosowanie w kotłach energetycznych, brakuje jednak szczegółowych analiz potwierdzających ich zalety, aby można było mówić o ich komercyjnym zastosowaniu [21].

Wśród kotłów fluidalnych na szczególną uwagę zasługuje technologia spalania w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej (CFB). Dzięki wewnętrznej cyrkulacji zia-

ren materiału warstwy oraz intensywnemu mieszaniu, czas kontaktu ziaren paliwa z gazem jest znacznie dłuższy niż w warstwie pęcherzowej. Dlatego też, kotły CFB charakteryzują się wyższą sprawnością procesu spalania oraz niższą emisją  $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_x$  w porównaniu do kotłów z warstwą pęcherzową, a także większą elastycznością paliwową. Na rysunku 6 przedstawiono rozwiązania technologiczne kotłów CFB stosowane w energetyce krajowej. W każdym z tych kotłów można spalać dodatkowo biomasę korzystając z istniejącego układu nawęglania. W kotłach CFB odpady komunalne, bez odpowiedniego przygotowania nie powinny być spalane. Odpady te powinny być poddane segregacji i obróbce z ostatecznym wytworzeniem paliwa [22].

Niewątpliwą zaletą kotłów CFB jest możliwość spalania różnych paliw w tym samym palenisku. W Tabeli 1 podano przykładowy skład paliw spalanych w kotle CFB [25].

Tabela 1. Charakterystyka wybranych substancji spalanych w kotłach fluidalnych [25]

Wyszczególnienie	Węgiel	Słoma	Drewno	Osady ściekowe	RDF*	TDF**
Wilgoć [%]	3	10	7	3	30	0,5
Popiół [%]	8	6	3	47	11	6
Części lotne [%]	35	75	75	7	49	68
Siarka [%]	1	0,05	0,1	1	0,3	1,5
Ciepło spalania [MJ/kg]	28	17	15	11	11	37

\* (RDF) Refuse Derived Fuel (paliwo z odpadów); \*\* (TDF) Tyre Derived Fuel (paliwo z opon samochodowych)

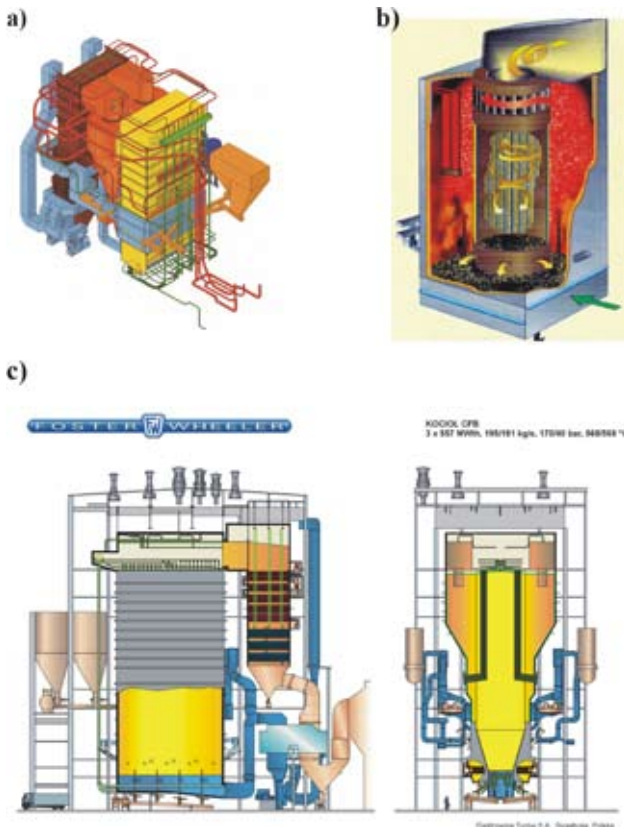
W wielu krajach świata doceniono zalety kotłów fluidalnych dla bloków energetycznych o mocy 100–250 MW. Na czoło wdrażanych modernizacji wysuwa się, zdaniem „Power Magazine” [26], wymiana kotłów w elektrowni Turów. Po zakończeniu instalacji kotłów fluidalnych na blokach 1–6 elektrownia ta stanie się największym źródłem mocy na świecie (1500 MW) opartym na tej technologii. Energetyka światowa zgromadziła na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat bogate doświadczenia w zakresie eksploatacji kotłów fluidalnych. W wyniku realizacji projektów sponsorowanych przez amerykański Departament Energetyki i liczne niezależne firmy, kotły fluidalne przeszły od końca lat 80 przez stadium badań i wdrożeń eksperymentalnych do zastosowania przemysłowego na wielką skalę.

Technologia cyrkulacyjnych kotłów fluidalnych (CWF) wyrosła na technologię konkurencyjną dla kotłów pyłowych w sektorze produkcji energii. W ostatnim dziesięcioleciu kotły CWF wykorzystujące cyrkulację naturalną osiągnęły skalę kotłów dla energetyki zawodowej [22, 25]. Bloki z cyrkulacyjnymi kotłami fluidalnymi o mocy  $2 \times 175 \text{ MW}_e$  pracują od 1991 roku w USA, a od 1995 roku o mocy  $250 \text{ MW}_e$  we Fran-



cji, od 1998 w Elektrowni Turów w Polsce (3 x 235 MW<sub>e</sub>) i trzy 262 MW<sub>e</sub> w Elektrowni Turów od 2002 roku. Do kolejnych bloków CWF dużej mocy należy zaliczyć:

- 2 bloki CWF 220 MW<sub>e</sub>, Korea,
- 2 bloki CWF 250 MW<sub>e</sub>, Puerto Rico,
- 2 bloki CWF 250 MW<sub>e</sub>, Red Hills, USA,
- blok CWF 300 MW<sub>e</sub>, Neijiang Baima in Sichuan, Chiny,
- 2 bloki CWF 300 MW<sub>e</sub>, Jacksonville Energy Authority (JEA) w Jacksonville, Floryda, USA,
- blok 330 MW<sub>e</sub>, Gujarat, Indie,
- blok 340 MW<sub>e</sub>, Porto Scuso, Włochy.



Rys. 6. Konstrukcje kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną: a) kocioł FW z gorącym cyklo-nem, b) kocioł Kvaerner typu Cymie, c) kocioł FW typu Compact [23, 24]

Naturalnym krokiem dla dalszego rozwoju technologii CWF jest przejście do większych rozmiarów kotłów z nadkrytycznymi parametrami pary. Jednym z pierwszych rezultatów przeprowadzonych badań jest blok z kotłem fluidalnym

ciśnieniowym z warstwą pęcherzową (PFBC) w Karita w Japonii. Parametry kotła są następujące: ciśnienie w komorze paleniskowej – 1,58 MPa, temperatura warstwy fluidalnej – 870°C, wysokość korpusu części ciśnieniowej – 44 m oraz średnica korpusu – 15 m. Kocioł produkuje 760 Mg/h pary o parametrach: 24,1 MPa, 566/593°C, a podstawowym paliwem jest węgiel kamienny 28,7 MJ/kg [25].

Obecnie do standardowego stanu technologii fluidalnej należy zaliczyć: bloki o mocy do 340 MW<sub>e</sub> z klasycznymi kotłami fluidalnymi CWF oraz kotłami fluidalnymi typu COMPACT. Jednostki te charakteryzują się temperaturą pary wysokoprężnej na wlocie do turbiny do 565°C, ciśnieniem do 17,5 MPa oraz sprawnością netto obiegu 38–39%. Porównanie parametrów przykładowych rozwiązań przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie parametrów przykładowych standardowych technik technologii fluidalnej [25]

<b>Dane techniczne</b>	<b>CWF BOT Elektrownia Turów S.A. Bloki 1–3</b>	<b>CWF Compact I BOT Elektrownia Turów S.A Bloki 4–6</b>	<b>CWF JEA, Jacksonville, Floryda, USA Blok 1–2</b>
Moc bloku [MW <sub>e</sub> ]	235	262	300
Przepływ pary świeżej [kg/s]	185,4	200	252
Ciśnienie pary wysokoprężnej na wlocie do turbiny [MPa]	13,17	16,65	17,2
Temperatura pary wysokoprężnej na wlocie do turbiny [°C]	540	565	540
Temperatura pary wtórnie przegrzanej [°C]	540	565	540
Przepływ pary przegrzewu [kg/s]	165,5	182	224
Ciśnienie pary do wtórnego przegrzewu [MPa]	2,8	4,2	3,77
Temperatura końcowa wody zasilającej [°C]	242,6	250	-
Temperatura wylotowa spalin [°C]	157	138	-

Do standardowych jednostek nowej generacji oferowanych obecnie na rynku należy zaliczyć również bloki o mocy 400–500 MW<sub>e</sub> z kotłami fluidalnymi ze złożem cyrkulacyjnym typu COMPACT na parametry nadkrytyczne o sprawności netto obiegu do 45%. Maksymalnie dostępnymi rozwiązaniami w zakresie technologii fluidalnej w perspektywie lat 2010–2015 są bloki o mocy 600–800 MW<sub>e</sub> z kotłem z warstwą cyrkulacyjną typu COMPACT na parametry nadkrytyczne. Badania

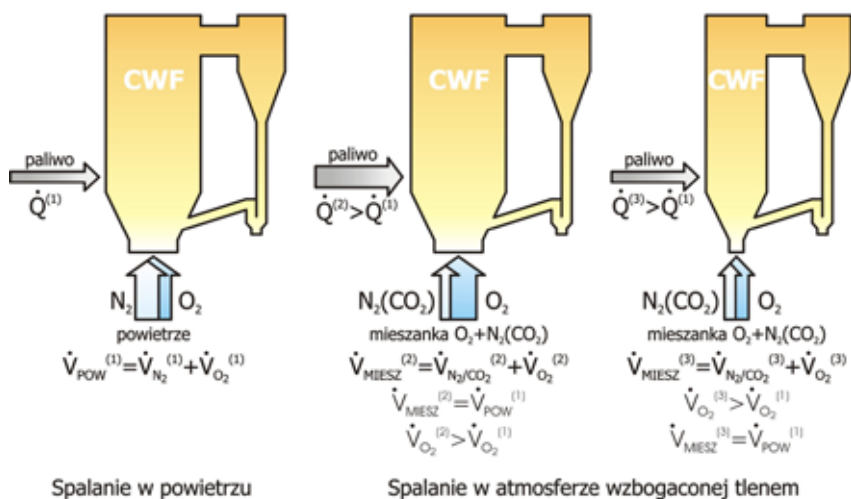
nad rozwojem koncepcji kotłów CWF na parametry nadkrytyczne dla tego typów bloków prowadzone są od kilku lat przez Foster Wheeler oraz GEC Alstom Stain Industrie. Prace innowacyjne w zakresie technologii fluidalnej zmierzają w dwóch kierunkach. Pierwszy z nich to kolejny etap rozwoju bloków o mocy 800 MW<sub>e</sub> z kotłami fluidalnymi CWF typu COMPACT II-giej generacji, które charakteryzują się temperaturą pary wysokoprężnej na wlocie do turbiny 700°C oraz ciśnieniem tejże pary 36,5 MPa [27, 28].

Drugi kierunek związany jest z koncepcją prowadzenia procesu fluidalnego spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem. Realizacja tej koncepcji sprowadza się do dwóch odmiennych rozwiązań technicznych, tj. wzbogacania tlenem tradycyjnie doprowadzanego powietrza atmosferycznego, bądź recyrkulację gazów spalinowych (o znacznie podwyższonym udziale CO<sub>2</sub>) z domieszką czystego tlenu. Zastosowanie atmosfery niekonwencjonalnej o podwyższonym udziale tlenu i dwutlenku węgla podczas spalania jest zagadnieniem nowym i bardzo interesującym z punktu widzenia sprawności i emisji. Spalanie węgla w procesie recyrkulacji z mieszaniną O<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub> pozwala bowiem w tani sposób usuwać i magazynować lub zagospodarować CO<sub>2</sub> ze spalin, co wiąże się z redukcją objętości spalin i z mniejszą objętością gazu inertnego (głównie udziału CO<sub>2</sub> kosztem obniżenia udziału N<sub>2</sub> w spalinach). Redukcja objętości spalin pozwala obniżyć straty wyłotowe w kotle, co skutkuje wzrostem sprawności bloku i niższymi kosztami poniesionymi na oczyszczanie spalin. Porównując spalanie węgla w atmosferze powietrza z procesem prowadzonym w warunkach modyfikacji gazu doprowadzonego do komory paleniskowej można oczekiwać następujących efektów [22]: wyższej sprawności kotła, łatwiejszego i tańszego odzysku CO<sub>2</sub> ze spalin, zwiększenia możliwości kontroli temperatury warstwy w wyniku recyrkulacji CO<sub>2</sub>, obniżenia emisji NO<sub>x</sub>, wyższego stopnia konwersji sorbentów używanych do procesów odsiarczania. Realizowane przez firmę Foster Wheeler etapy rozwoju tej koncepcji są następujące [29]:

- pilotażowa jednostka w dużej skali (1–10 MW<sub>t</sub>) lata 2006–2008,
- demonstracyjna jednostka w małej skali technicznej (25 MW<sub>e</sub>) w USA/Europie w latach 2008–2010,
- demonstracyjna jednostka w dużej skali technicznej (250 MW<sub>e</sub>) w USA/Europie w latach 2010–2015,
- pierwszy komercyjny blok (100–400 MW<sub>e</sub>) w latach 2013–2016.

Przyszłość stawia przed technologią fluidalnego spalania paliw znacznie ostrzejsze wymagania. W takim przypadku niebagatelne znaczenie ma fakt, że technologia ta może je spełnić. Realizacja procesu spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem w warunkach cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej komplikuje się o tyle, że gaz doprowadzany do komory paleniskowej poza funkcją utleniacza pełni tu również rolę płynu utrzymującego materiał warstwy w stanie fluidyzacji. Doprowadzenie do komory paleniskowej gazu o zwiększonym stężeniu tlenu obliuguje do wprowadzenia odpowiednio większej ilości paliwa – w celu zachowania nadmiaru O<sub>2</sub> w strefie spalania. To z kolei prowadzi do zwiększenia obciążenia ciepł-

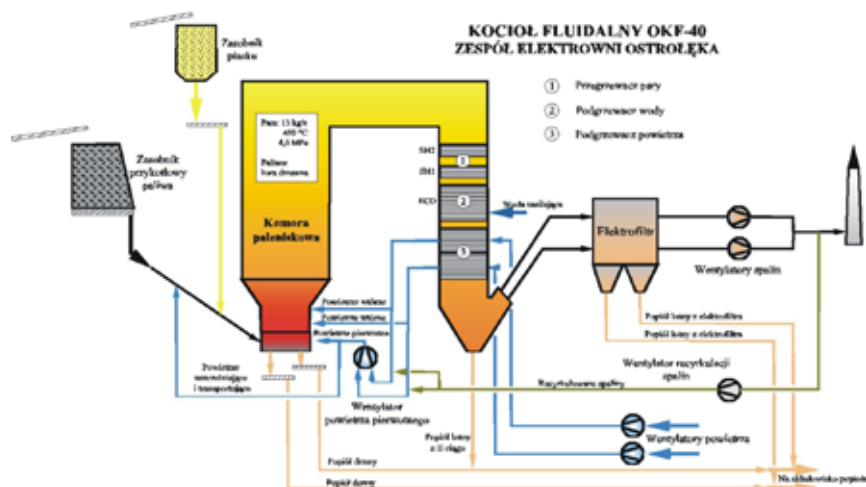
nego komory paleniskowej. Uzyskanie warunków atmosfery wzbogaconej tlenem możliwe jest również z zachowaniem pierwotnych strumieni paliwa i tlenu, z jednoczesnym „okrojeniem” doprowadzanego strumienia mieszanki gazowej. W tym przypadku, konieczne jest jednak zmniejszenie gabarytów komory paleniskowej, a dokładnie jej przekroju poprzecznego, w celu utrzymania odpowiedniej prędkości przepływu gazów przez reaktor. Takie rozwiązanie prowadzi również do zwiększenia obciążenia masowego komory spalania. Graficzną ilustrację obydwu wariantów przedstawiono na rysunku 7. Jak łatwo zauważyć, w przypadku aplikacji atmosfery wzbogaconej tlenem w układach CWF głównym wyzwaniem będzie opanowanie odbioru w jednostce czasu znacznie zwiększonej ilości ciepła. W przypadku kotłów typu CWF wskazuje się przede wszystkim na istotną rolę wymienników ciepła typu „Intrex” w procesach wymiany ciepła i przegrzewie pary. Jak dotąd, słabo rozpoznana jest kinetyka procesu spalania w atmosferze modyfikowanej tlenem. Zastosowanie metody termogravimetrycznej do analizy kinetyki procesu spalania paliw w atmosferze o podwyższonej koncentracji tlenu pozwoliło na zidentyfikowanie podstawowych różnic w przebiegu procesu [22].



Rys. 7. Realizacja procesu spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem w warunkach CWF [22]

W Polsce pierwszy kocioł fluidalny z warstwą pęcherzową, spalający wyłącznie biomasę na skalę przemysłową, został oddany do eksploatacji w 1997 roku w Elektrociepłowni „Ostrołęka A” [25] (rys. 8.). W kotle obok biomasy można spalać inne paliwa, charakterystykę których przedstawiono w tabeli 3. Kocioł powstał w wyniku modernizacji kotła pyłowego typu OP-100. Kocioł ten wytwarza parę z wy-

dajnością 13 kg/s o temperaturze 450°C i ciśnieniu 4,0 MPa. Kocioł OKF-40 został przystosowany do spalania kory drzewnej. W wyniku przeprowadzonej modernizacji wydajność pary została zwiększona o ponad 50%, przy zachowaniu niezmięnionej wartości jej temperatury i ciśnienia. Wskutek zmiany paliwa zmniejszyła się ilość usuwanego popiołu. Ponadto, inwestycja ta przyczyniła się do: wzrostu sprawności spalania o 5–7%, możliwości elastycznej pracy kotła pod względem dostosowania jego obciążenia do aktualnego zapotrzebowania, możliwości spalania paliw niskojakościowych o zawartości wilgoci do 60%, utylizacji z bieżącej produkcji kory drzewnej i likwidacji istniejącego jej składowiska oraz obniżenia kosztów utrzymania kotła.



Rys. 8. Kocioł fluidalny OKF-40 [25]

Tabela 3. Fizykochemiczne parametry paliw spalanych w kotle fluidalnym 40 MW<sub>t</sub> [25]

Paliwo	1	2	3	4	5	6	7	8
	[%]							[kJ/kg]
Kora	58,64	7,50	71,93	2,83	17,74	20,24	0,014	17049
Zrębki drzewne	44,20	7,09	82,41	0,70	9,80	21,08	0,007	15886
Szlamy włókniste	61,28	8,24	62,57	22,31	6,88	16,48	0,049	12094
Bioszlam	43,71	7,42	80,76	0,63	11,19	23,31	0,046	16079
Bioszlam II	48,12	5,95	81,64	1,34	11,06	20,69	0,064	16786
Śmieci I	63,40	9,84	78,37	3,72	8,07	21,23	0,040	14611
Śmieci II	60,13	10,67	81,50	2,20	5,64	24,18	0,043	15345

1 – wilgoć przemijająca, 2 – wilgoć higroskopijna, 3 – zawartość części lotnych, 4 – zawartość popiołu, 5 – zawartość substancji organicznych, 6 – całkowita zawartość węgla, 7 – zawartość siarki, 8 – ciepło spalania [kJ/kg]

Kocioł OKF-40 umożliwia również czyste spalanie, które koresponduje z wymaganiami ochrony środowiska. Jego eksploatacja przyczynia się do obniżenia emisji  $\text{SO}_2$  o 280 Mg/rok,  $\text{NO}_x$  o 100 Mg/rok,  $\text{CO}_2$  z paliw kopalnych o 46 Gg/rok oraz zużycia węgla kamiennego o 23 Gg/rok [30, 31].

## **Problemy podczas współspalania węgla i paliwa z odpadów**

Tworzenie się aglomeratów (spieków) i ustanie fluidyzacji (tzw. defluidyzacja) zachodzi zwykle w tych obszarach, gdzie wskutek niedostatecznego mieszania lub małej prędkości gazu temperatura warstwy przekracza temperaturę mięknięcia ziaren materiału sypkiego. Zauważono, że prędkość gazu, przy której następuje defluidyzacja liniowo wzrasta wraz z różnicą temperatury warstwy i początkowej temperatury tworzenia aglomeratów; fluidyzacja w temperaturze wyższej od początkowej temperatury aglomeracji ziaren jest jednak możliwa, lecz wymaga większej prędkości gazu. Spalając różne paliwa stwierdzono, że mimo iż całkowita masa warstwy, wielkość ziaren, temperatura, szybkość nagrzewania, współczynnik nadmiaru powietrza oraz prędkość gazu wpływają na proces aglomeracji, to najważniejszym parametrem jest skład chemiczny paliwa oraz materiału warstwy fluidalnej. Większość aglomeratów tworzonych podczas spalania paliw alternatywnych jest wynikiem powstania: ciekłej mieszaniny metali alkalicznych (Na, Ca, K itp.), siarczków,  $\text{CaSO}_4$  oraz krzemianów i glinokrzemianów. W przypadku, gdy spalane paliwo zawiera duże ilości takich składników proces aglomeracji może powodować duże trudności w utrzymaniu stabilnej pracy paleniska. Badania problemu aglomeracji w kotłach energetycznych wykazały, że znajomość właściwości konkretnego paliwa i jego popiołu jak również sorbentu użytego do odsiarczania, są kluczowe dla uniknięcia tworzenia się spieków – tym bardziej, że mechanizm procesu tworzenia się popiołu zależy od rodzaju paliwa, a defluidyzacja może nastąpić także w temperaturze niższej od temperatury mięknięcia popiołu wskutek tworzenia się lokalnych centrów lepkich (np. czysty kamień wapienny oraz dolomit nie powinny powodować tworzenia się spieków w paleniskach fluidalnych, aczkolwiek obecność zanieczyszczeń znacznie wpływa na to zjawisko). Niezależnie od składu chemicznego, na tworzenie się spieków mają wpływ również warunki spalania, a szczególnie ilość tlenu, gdyż w warunkach jego niedoboru następuje redukcja tlenków metali, a powstały czysty metal ma niższą temperaturę topnienia. Uniknięcie aglomeracji w kotłach energetycznych jest możliwe dzięki ujednorodnieniu temperatury w palenisku, zmianie rodzaju paliwa bądź sorbentu (np. z kamienia wapiennego na dolomit) lub też jego uziarnienia [25, 32].

### *Osadzanie materiału*

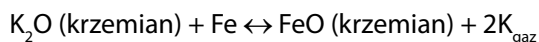
Pierwszym krokiem prowadzącym do osadzania się materiału na powierzchniach wewnętrznych palenisk jest kondensacja związków zawartych w fazie ga-

zowej (głównie alkaliów) oraz osadzanie się ultradrobnych ziaren fazy stałej na powierzchni wymiennika ciepła w wyniku działania sił adhezji. Osad taki tworzy swoisty „film”, na którym w wyniku dalszego zachodzenia różnorodnych procesów fizycznych bądź też reakcji chemicznych łatwo osadzają się kolejne warstwy fazy stałej powodując powstanie trudno usuwalnego nalotu. Z uwagi na dużą zawartość związków metali alkalicznych w paliwie, spalanie paliw alternatywnych niesie ze sobą większe prawdopodobieństwo intensyfikacji powyższego zjawiska w porównaniu do spalania „czystego” węgla, gdyż więcej substancji przechodzi wówczas z popiołu do fazy gazowej. W momencie schłodzenia, kondensacja ultradrobnych ze spalin następuje dla takich związków szczególnie łatwo. Dodatkowym problemem jest fakt, że popiół ze spalania takich paliw daje lepkie depozyty oraz może powodować łatwą defluidyzację. Zmniejszeniu szybkości osadzania się fazy stałej przeciwdziałać może dobra separacja drobnych ziaren z ciągu spalinowego, okresowe oczyszczanie powierzchni ogrzewalnych lub też zmiana składu chemicznego paliwa i materiału warstwy. Inną możliwością jest zmiana kształtu powierzchni ogrzewalnych bądź charakteru przepływu tak, aby zminimalizować czas i wielkość strefy kontaktu: spaliny – powierzchnia ogrzewalna [25].

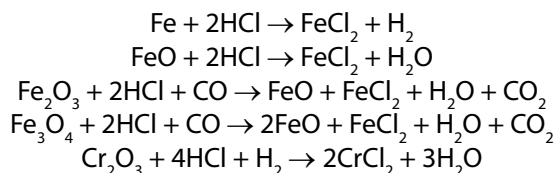
### *Korozja*

Współspalanie biomasy i paliw z odpadów z węglem niesie ze sobą również pewne trudności związane z zagrożeniem korozyjnym powierzchni ogrzewalnych, powodowanym głównie przez kwasy zawarte w spalinach. Szybkość i intensywność procesu jest ściśle skorelowana ze składem paliwa (głównie z zawartością chlorowców), a problemy są efektem reakcji pomiędzy HCl, Cl<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, parą wodną oraz metalami alkalicznymi (głównie Na oraz K) [17].

Osadzenie się popiołu z procesu spalania lub współspalania biomasy, zawierającego znaczny ładunek związków chemicznych, a zwłaszcza alkaliów może powodować korozję jak i erozję metalu. Bander i Peleton [33] przeprowadzili symulację spalania i współspalania biomasy, ustalili równowagę w układzie stałych i płynnych krzemianów. Dowiedli, iż dwa pierwiastki występują w zdecydowanie dużych ilościach w popiele, a mianowicie krzem i potas w postaci krzemianów o niskim punkcie topnienia. Wobec tego spalanie biomasy, a zwłaszcza słomy doprowadza do kondensacji stopionych krzemianów, które prawdopodobnie powodują korozję i zniszczenia podczas procesu spalania. Metale, z których jest wykonana komora spalania mogą być narażone na działanie tychże krzemianów, ponieważ warstwa ochronna tlenków może być nadtopiona. Ponadto, wysoka lotność metali alkalicznych może prowadzić do niespodziewanej korozji przez reakcje typu:



Podczas procesu spalania i współspalania biomasy powstają pewne ilości chłorowodoru, który może reagować w istniejących warunkach z metalami i tlenkami metali według poniższych równań reakcji chemicznych [25]:



Decydujący udział w korozji ma HCl, można jej przeciwdziałać poprzez separację związków zawierających chlor z odpadów (np. wstępna separacja PCV, NaCl jeśli paliwem są odpady komunalne), bądź też wyłapywanie HCl lub  $\text{Cl}_2$  w palenisku, w instalacji mokrego odsiarczania lub przed odpylaczem. Usunięcie związków zawierających chlor dokonuje się głównie poprzez wtrysk sorbentu, którym przeważnie jest tlenek lub węgiel sodu bądź wapnia (te same sorbenty jak dla chloru stosuje się również celem usunięcia innych halogenów – np. fluoru bądź bromu). Niemniej jednak najbardziej efektywna wydaje się być separacja z paliwa składników zawierających chlor [25].

#### *Skład paliwa i jego fluktuacje*

Emisja toksycznych produktów ubocznych jest głównie efektem okresowej fluktuacji stężenia tlenu w palenisku wskutek zmian parametrów spalanego paliwa (np. skład chemiczny, wartość opałowa itp.). Szczególnie widoczne jest to podczas spalania odpadów, gdzie utrzymanie stabilnej, niskiej emisji staje się trudne (węgiel i biomasa charakteryzują się bardziej jednorodnym składem chemicznym i w związku z tym ich spalanie jest łatwiejsze) [25].

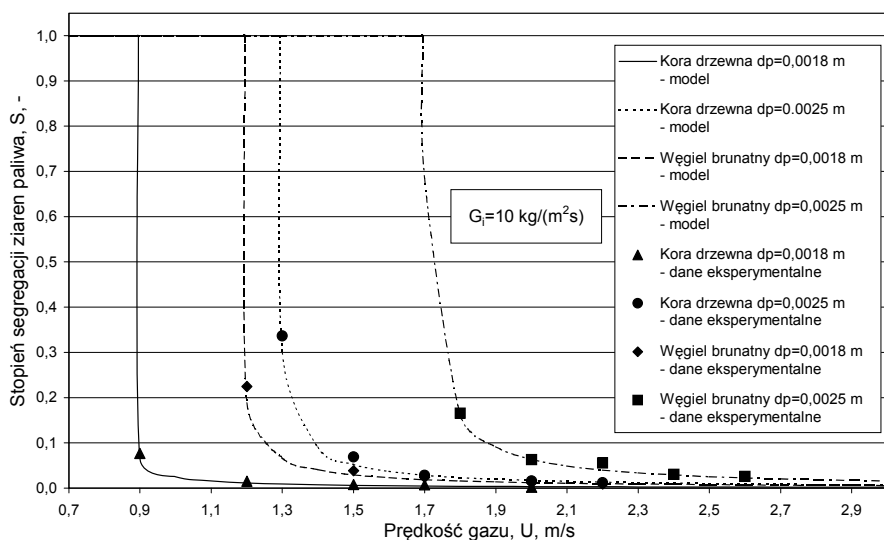
Niedomiar tlenu w palenisku powoduje wyższą emisję CO, PAH (wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne) oraz dioksyn. Stwierdzono, że emisja CO, a co za tym idzie innych niedopalonych związków zawierających węgiel jest najniższa, jeżeli stężenie tlenu w spalinach wynosi około 6–10%; przy zbyt niskim stężeniu tlenu następuje szybki wzrost emisji z uwagi na występowanie w palenisku warunków redukcyjnych, zaś gdy stężenie  $\text{O}_2$  przekracza 10% zachodzi tzw. „zimne spalanie”, również charakteryzujące się podwyższonym stężeniem produktów ubocznych w spalinach.

Utrzymaniu emisji na niskim poziomie sprzyja ponadto zapewnienie dobrego wymieszania paliwa i utleniacza, dostatecznie wysoka temperatura spalania oraz zmniejszenie intensywności zmian właściwości paliwa. To ostatnie jest możliwe poprzez ujednorodnienie składu paliwa (w przypadku odpadów poprzez ich segregację i wydzielenie np. tylko frakcji palnej), a także jego dobre wymieszanie [17, 25].



### Emisja zanieczyszczeń gazowych i stałych

Spalanie i powstawanie zanieczyszczeń gazowych czy stałych, są procesami nierozdzielnie ze sobą związanymi. Wielkość zanieczyszczeń emitowanych do środowiska jest kompleksową funkcją reaktywności paliwa, parametrów procesu spalania (np. masowego udziału paliwa, nadmiaru powietrza, temperatury) i warunków panujących w komorze paleniskowej, jak intensywność procesu mieszania i segregacji ziaren paliwa. Obecność CO, węglowodorów ( $C_xH_y$ ), smoły oraz ziaren koksiku jest zwykle spowodowana niecałkowitym spalaniem. Ponadto polichlorowane dibenzodioksyny (PCDD) i polichlorowane dibenzofurany (PCDF) są związkami organicznymi i ulegają degradacji powyżej temperatury 873 K. Dlatego też, nie powinny powstawać w procesach spalania, które przebiegają w zdecydowanie wyższej temperaturze. Skład popiołu oraz emisja  $NO_x$ ,  $N_2O$ ,  $SO_2$  czy metali ciężkich zależą głównie od właściwości i pochodzenia paliwa. Decydującym parametrem jest również temperatura spalania, optymalne wymieszanie paliwa z powietrzem i materiałem warstwy oraz czas pobytu ziaren paliwa w komorze paleniskowej [25].

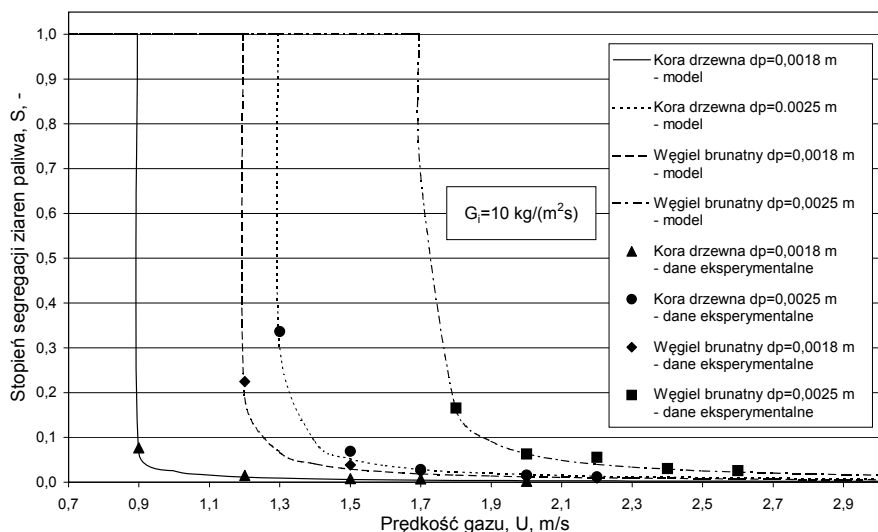


Rys. 9. Wyniki badań eksperymentalnych i badań modelowych dla kory drzewnej i węgla brunatnego: stopień segregacji ziaren paliwa w funkcji prędkości gazu [34]

Podczas spalania węgla następuje wraz ze wzrostem wysokości komory paleniskowej stopniowy spadek temperatury warstwy fluidalnej. W przypadku spalania drewna obserwowany jest wzrost temperatury warstwy w części środkowej komo-

ry paleniskowej. Jak stwierdzono powyżej, decydujący wpływ na rozkład temperatury warstwy fluidalnej posiada segregacja ziaren. Jej przebieg i intensywność uzależniona jest od: charakterystyki składników mieszanki, budowy reaktora oraz warunków prowadzenia procesu spalania. Uzyskane efekty oraz ich szybkość są funkcjami parametrów charakterystycznych dla paliwa i materiału warstwy takich jak: rozkład ziarnowy paliwa, kształt ziaren, gęstość ziaren, udziały masowe lub objętościowe poszczególnych składników mieszanki. Na rysunku 9 przedstawiono wpływ prędkości gazu oraz gęstości i średnicy ziaren paliwa na wielkość stopnia segregacji ziaren paliwa w warstwie fluidalnej [34].

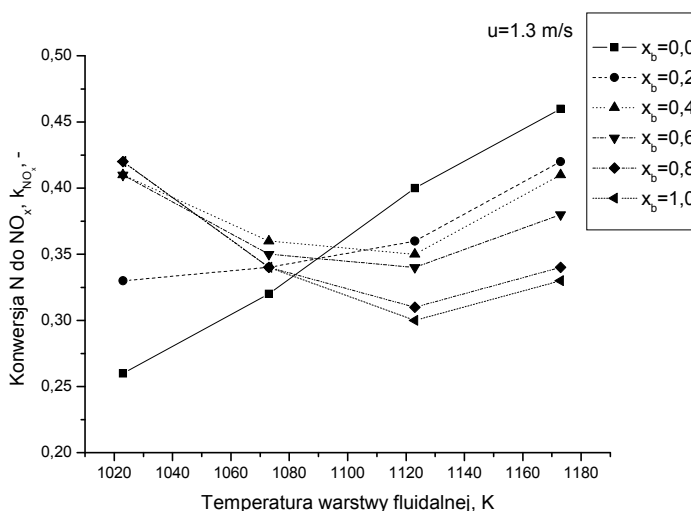
Spalanie mieszanin paliwowych w warstwie fluidalnej jest procesem bardzo złożonym. Wiele z zaobserwowanych zjawisk jest trudnych do wyjaśnienia na obecnym etapie. Dla niektórych z nich można jednak próbować poszukiwać wyjaśnienia. W pracy [35] przeprowadzono analizę procesu spalania mieszanki biomasy i węgla brunatnego w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej. Na rysunku 10 przedstawiono wpływ udziału masowego ziaren kory drzewnej w mieszance paliwowej na wielkość stopnia wypalenia, konwersję: C do CO, S do SO<sub>2</sub> oraz wartość stosunku molowego Ca/S w warstwie fluidalnej.



Rys. 10. Konwersja C do CO, S do SO<sub>2</sub>, stopień wypalenia mieszanki paliwowej oraz stosunek molowy Ca/S w funkcji udziału masowego ziaren kory drzewnej w mieszance paliwowej [35]

Wraz ze wzrostem udziału masowego ziaren kory drzewnej następował wzrost stopnia wypalenia. Na jego wartość w zasadniczy sposób wpływało odmienne hy-

drodynamiczne zachowanie ziaren biomasy w stosunku do ziaren węgla w mieszance spowodowane zróżnicowaną zawartością części lotnych i kształtem ziaren. Ponadto, kora drzewna zawierała ponad 2-krotnie więcej tlenu w swojej masie niż węgiel brunatny. Wzrost udziału masowego ziaren kory drzewnej również prowadził do obniżenia konwersji C do CO. Podczas spalania węgla znacząca część paliwa spala się jako koksik, natomiast w przypadku biomasy spalanie części lotnych jest etapem dominującym. Spalanie części palnych jest szybsze podczas spalania biomasy, co powodowało niższą koncentrację koksiku w warstwie fluidalnej. Spalanie koksiku zasadniczo prowadziło do formowania CO, więc wzrost jednostkowej emisji CO był obserwowany wraz ze zmniejszeniem wartości udziału masowego ziaren kory drzewnej w mieszance paliwowej. Wraz ze wzrostem wartości udziału masowego ziaren biomasy w mieszance paliwowej następował również wzrost stosunku molowego Ca/S, co w konsekwencji prowadziło do obniżenia konwersji S do SO<sub>2</sub> [35].

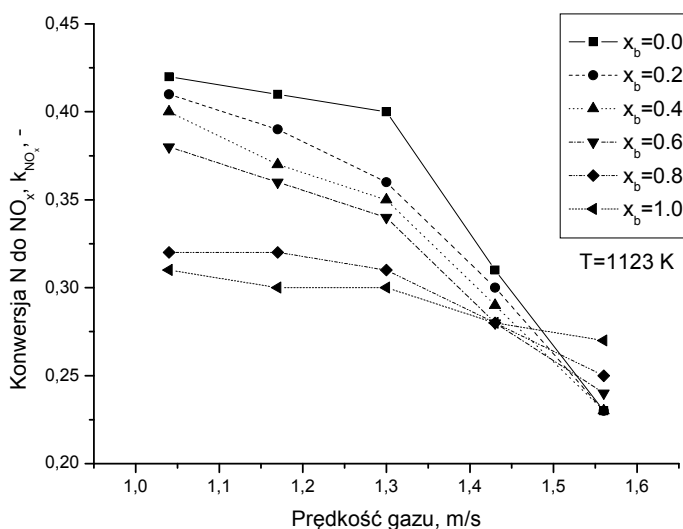


Rys. 11. Konwersja N do NO<sub>x</sub> w funkcji temperatury warstwy fluidalnej dla badanych mieszanek paliwowych [35]

Na rysunku 11 przedstawiono konwersję N<sub>2</sub> do NO<sub>x</sub> w funkcji temperatury warstwy fluidalnej dla badanych mieszanin paliwowych. Zależności dla mieszanin o udziale masowym ziaren kory drzewnej  $x_b = 0,0$  i  $x_b = 0,2$  charakteryzowały się odmiennym trendem niż pozostałe. W przypadku małych udziałów masowych ziaren kory drzewnej wraz ze wzrostem temperatury warstwy fluidalnej rosła proporcjonalnie wielkość konwersji N<sub>2</sub>, co potwierdzało jej typowy rozkład. Wraz ze wzrostem temperatury spalania obniżało się stężenie koksiku oraz CO w kolumnie CWF.

Dlatego też, ich katalityczny wpływ na reakcję rozpadu  $\text{NO}_x$  stawał się coraz mniejszy, co w konsekwencji powodowało wzrost konwersji  $\text{N}_2$ . W przypadku mieszanin o większych udziałach masowych ziaren kory drzewnej w mieszance ( $x_b=0,4-1,0$ ) widoczny był początkowy spadek konwersji  $\text{N}_2$  do  $\text{NO}_x$  wraz ze wzrostem temperatury warstwy i po osiągnięciu minimalnej wartości w zakresie temperatury 1073–1123 K, następował ponowny jej wzrost [35].

Na rysunku 12 przedstawiono konwersję  $\text{N}_2$  do  $\text{NO}_x$  w funkcji prędkości gazu dla badanych mieszanin paliwowych. Przy prędkości gazu 1,04 m/s otrzymano najwyższe wartości konwersji  $\text{N}_2$  do  $\text{NO}_x$ . Wraz ze wzrostem prędkości gazu uzyskano poprawę warunków mieszania w kolumnie CWF. Spowodowało to obniżenie konwersji  $\text{N}_2$  do  $\text{NO}_x$ . Nie mniej jednak po przekroczeniu prędkości gazu na poziomie 1,44 m/s duży unos ziaren kory drzewnej z kolumny CWF powodował obniżenie ich czasu pobytu, co powodowało wzrost konwersji  $\text{N}_2$  do  $\text{NO}_x$  wraz ze wzrostem udziału masowego ziaren kory drzewnej w mieszance paliwowej, pomimo intensywnego procesu mieszania w kolumnie CWF [35].



Rys. 12. Konwersja  $\text{N}_2$  do  $\text{NO}_x$  w funkcji prędkości gazu dla badanych mieszanek paliwowych [35]

Heinzel i współpracownicy [36] współspalali słomę, miskant, buk, owies i osady ściekowe w kotle fluidalnym o mocy 0,5 MW. Współspalanie owsa i w szczególności osadów ściekowych znacząco zwiększa zawartość popiołu, jak i przyczynia się do jego osadzania (Tabela 4).

Spalanie paliw słabej jakości prowadzi do powstania popiołu o podwyższonej zawartości metali ciężkich. Autorzy niniejszej monografii przeprowadzili analizę

składu popiołów po spaleniu brykietów powstałych z mułu węglowego i trocin sosnowych techniką WD-XRF (tabela 5). Stwierdzono, iż dodatek biomasy obniża zawartość metali ciężkich (Fe, Ni, Pb, As, Cr, Ti, Cd) w popiele.

Tabela 4. Charakterystyka popiołu i jego osadzania [36]

Frakcja	Węgiel bitumiczny	25% słomy	25% mi-skanta	25% buka	25% owsa	25% osady ściekowe
Zawartość popiołu [g/MJ]	2,4	3,0	2,3	1,9	2,5	12,5
Zawartość popiołu z biomasy [%]	0	39,2	26,1	5,1	30,1	84
Współczynnik osadzania [g/m <sup>2</sup> h)	17,5	24,2	4,3	1,7	53,9	154
Typ osadzania	p	p/ma	p	p	p	p/ma

p – proszek, ma – małe aglomeraty

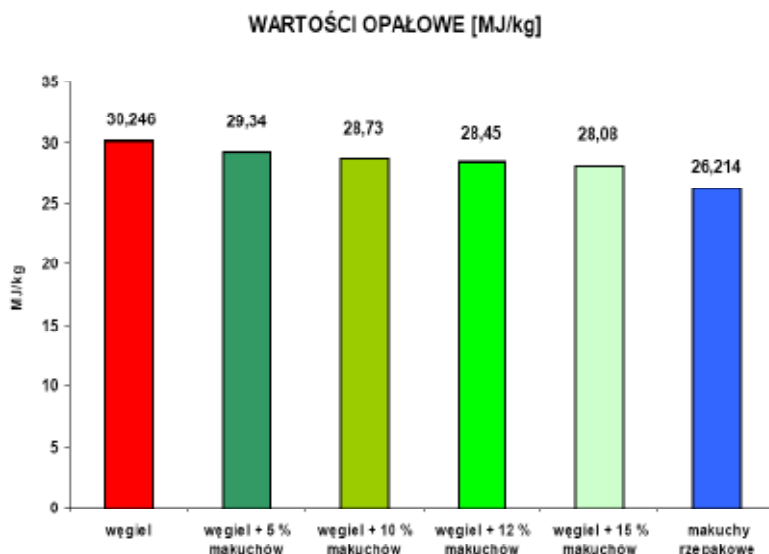
Tabela 5. Zawartość wybranych pierwiastków w popiołach po spaleniu brykietów mieszanych

Pierwiastek	Jednostka	Rodzaj próby			
		1	2	3	4
Ca	%	1,75	1,30	1,49	1,63
Mg	%	2,30	2,28	2,48	2,21
K	%	3,72	3,90	3,82	3,94
Si	%	17,9	17,7	16,2	15,9
Al	%	10,8	10,8	10,5	10,6
Fe	%	3,30	3,14	3,09	3,06
Mn	%	0,05	0,05	0,07	0,09
Zn	ppm	332	216	p.o.	p.o.
Ni	ppm	113	108	105	103
S	%	0,07	p.o.	p.o.	p.o.
Pb	%	0,0003	p.o.	p.o.	p.o.
As	ppm	24,5	22,3	p.o.	p.o.
Cr	ppm	238	235	229	225
Ti	%	0,91	0,91	0,90	0,89
Cd	ppm	2,67	p.o.	p.o.	p.o.

Symbole prób:

1. popiół po spaleniu próbki mułu węglowego
  2. popiół ze spalenia mieszanki 70% mułu węglowego i 30% trocin sosnowych
  3. popiół ze spalenia mieszanki 50% mułu węglowego i 50% trocin sosnowych
  4. popiół ze spalenia mieszanki 30% mułu węglowego i 70% trocin sosnowych
- p.o. poniżej poziomu detekcji

Cieślakowski i współautorzy [37] przeprowadzili analizę energetyczną mieszaniny paliw stałych z udziałem biokomponentu. Na podstawie otrzymanych wyników [37] stwierdzono, że wartość opałowa badanych mieszanin węgla kamiennego z makuchami mieściła się, w przedziale pomiędzy wartością opałową węgla kamiennego równą 30,246 MJ/kg a wartością opałową makuchów wynoszącą 26,214 MJ/kg. Wraz ze zwiększaniem udziału makuchów, wartość opałowa mieszaniny malała (rysunek 13). Makuchy posiadały stałą zawartość wody.



Rys. 13. Wartości opałowe mieszanek węgla z makuchami rzepakowymi [37]

W naszym kraju szeroko zakrojone prace badawcze nad wykorzystaniem biomasy w kotłach fluidalnych prowadzone są między innymi w Katedrze Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ochrony Atmosfery Wydziału Inżynierii i Ochrony Środowiska Politechniki Częstochowskiej [21, 22, 25, 28, 30, 31, 34, 35].

## Literatura

- [1] J. Hansson et al., *Co-firing with coal for electricity generation – An assessment of the potential in EU27*, Energy Policy 37, 1444–1455, 2009.
- [2] S. De, M. Assai, *Impact of cofiring biomass with coal in power plants – A techno-economic assessment*, Biomass&Bioenergy 33, 283–293, 2009.
- [3] <http://www.pigeo.org.pl> (wejście 29.09.09).

- [4] <http://www.ure.gov.pl> (wejście 30.09.09).
- [5] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 sierpnia 2003 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji, Dz. U. 2003 Nr 163, poz. 1584.
- [6] T. Pająk, E. Ing, *Współspalanie odpadów w energetyce – wybrane aspekty prawne, środowiskowe, technologiczne i uwarunkowania eksploatacyjne*, materiały I Konferencji Naukowo-Technicznej „Energia Odnawialna – Paliwa Alternatywne”, Zawiercie 2005.
- [7] T. Golec, *Współspalanie biomasy w kotłach energetycznych*, *Energetyka* 7/8, 437, 2004.
- [8] T. Atimtay, B. Kaynak, *Co-combustion of peach and apricot stone with coal in a bubbling fluidized bed*, *Fuel Processing Technology* 89, 183–197, 2008.
- [9] J. Jarosiński, *Techniki czystego spalania*, WNT Warszawa 1996.
- [10] K. Głód, P. Hrycko, M. Rysiawa, *Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w kotłach rusztowych*, <http://www.remokotly.pl> (wejście 02.10.09).
- [11] J. Werther *et al.*, *Combustion of agricultural residues*, *Progress in Energy and Combustion Science* 26, 1–27, 2000.
- [12] T. Pająk, G. Wielgosiński, *Wytyczne sporządzania przeglądów ekologicznych instalacji współspalania odpadów*, Kraków–Łódź–Warszawa 2004.
- [13] M. Juszcak, *Ekologiczne spalanie odpadów drzewnych. Badania przemysłowe ograniczenia emisji tlenu węgla i tlenu azotu*, Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań 2002.
- [14] T. Wróblewski, W. Sikorski, K. Rzepa, *Urządzenia kotłowe*, WNT, Warszawa 1973.
- [15] A.L. Robinson *et al.*, *Interaction between coal and biomass when cofiring*, *Pros. 27-th Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh 1998.
- [16] H. Spliethoff, K.R.G. Hein, *Effect of co-combustion on emission in pulverized fuel furnaces*, *Fuel Processing Technology* 54, 189–205, 1998.
- [17] M. Cichosz, *Ekologiczne skutki spalania paliw alternatywnych techniką fluidalną*, praca magisterska, UMK, Toruń 2004.
- [18] <http://energetyka.wnp.pl> (wejście 05.10.09).
- [19] <http://www.wnp.pl> (wejście 05.10.09).
- [20] W. Muskała, *Globalna analiza cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej typu BCWF na potrzeby systemu czystej produkcji energii*, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001.
- [21] T. Czakiert *i in.*, *Fuel conversion from oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed*, *Fuel Processing Technology* 87, 531–538, 2006.
- [22] R. Sekret, T. Czakiert, W. Nowak, *Kierunki rozwoju kotłów fluidalnych dla energetyki zawodowej*, w: „Osiągnięcia Proekologiczne w Przemśle i Energetyce” (red. R. Buczkowski), 57–68, Wyd. UMK, Toruń 2007.
- [23] <http://www.fosterwheeler.fi> (wejście 06.10.09)
- [24] <http://www.rafako.com.pl> (wejście 06.10.09)
- [25] R. Sekret, W. Nowak, *Energetyczne technologie wykorzystania biomasy z możliwością utylizacji odpadów komunalnych*, w: „Osiągnięcia Proekologiczne w Przemśle i Energetyce”, (red. R. Buczkowski), 281–308, Wyd. UMK, Toruń 2005.
- [26] <http://www.powermag.com> (wejście 06.10.09).
- [27] Y. Hu *et al.*, *CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases*, *Fuel* 79, 1925–1932, 2000.
- [28] T. Czakiert *et al.*, *Fluidized bed combustion in oxygen-enriched conditions*, *Proc. of the 19<sup>th</sup> International Conference on Fluidized Bed Combustion, Part 1*, Vienna, Austria, May 21–24, 2006.
- [29] <http://www.fwc.com> (wejście 06.10.09).

- [30] W. Nowak, R. Sekret, *Bark Combustion in a 40 MW<sub>t</sub> Bubbling Fluidized Bed Boiler*, The 7<sup>th</sup> Polish-Danish Workshop on Biomass for Energy, Starbienio, Poland, 7–10 December, 2000.
- [31] W. Nowak, R. Sekret, *Wykorzystanie biomasy w procesie fluidalnego spalania węgla*; Gospodarka Paliwami i Energią 8, 2–9, 2001.
- [32] W. Nowak, *Technologie energetyczne spalania biomasy z możliwością utylizacji odpadów komunalnych*, Czysta Energia 5, 30–31, 2004.
- [33] M. Blander, A.D. Pelton, *The inorganic chemistry of the combustion of wheat straw*, Biomass & Bioenergy 12(4), 295–298, 1997.
- [34] R. Sekret, W. Nowak, *Segregacja ziaren paliwa w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej*, Inżynieria Chemiczna i Procesowa 23, 229–244, 2002.
- [35] R. Sekret, *Segregacja i emisja substancji szkodliwych w procesie fluidalnego spalania mieszanki biomasy i węgla brunatnego*, rozprawa doktorska, Politechnika Częstochowska, 2001.
- [36] T. Heinzl et al., *Investigation of slagging in pulverized fuel co-combustion of biomass and coal at a pilot-scale test facility*, Fuel Processing Technology 54, 109–125, 1998.
- [37] B. Cieślowski, B. Pałczyńska-Kordon, P. Knapik, *Analiza energetyczna mieszaniny paliw stałych z udziałem biokomponentu*, Inżynieria Rolnicza 13, 55–60, 2006.



# ZGAZOWANIE, PIROLIZA BIOMASY

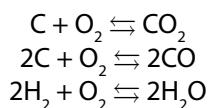
## Zgazowanie biomasy

Terminem „zgazowanie” zwyczajowo określa się cykl procesów termicznej obróbki biomasy prowadzący do wytworzenia gazu syntezowego. W procesie występuje: suszenie, piroliza (odgazowanie) i zgazowanie [1]. W zależności od rodzaju procesu i założonego składu gazu syntezowego wilgoć jest usuwana w różnym stopniu z biomasy. Należy zauważyć, iż obecność pary wodnej jest korzystna, gdyż w późniejszych procesach sprzyja zwiększeniu koncentracji wodoru i metanu w gazie syntezowym [1, 2].

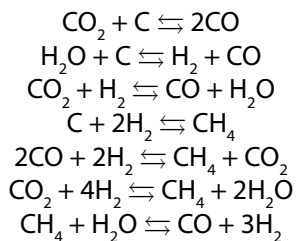
Proces zgazowania zwęglonej i odgazowanej frakcji stałej oraz ciekłej polega na realizacji szeregu egzotermicznych i endotermicznych reakcji chemicznych (przy niedostatecznej ilości tlenu), połączonych z procesami wymiany ciepła i masy, w wyniku których powstają gazowe składniki palne: CO, H<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub>. Temperatura w procesie zgazowania jest zazwyczaj wyższa niż 750°C. Proces wymaga więc doprowadzenia ciepła, którego źródłem może być reakcja utlenienia części węgla zawartego we frakcji za pomocą czynnika zgazowującego (reaktory autotermiczne) lub pośredniego czynnika cieplnego doprowadzonego z zewnątrz. Za czynniki zgazowujące uważa się: powietrze, tlen, parę wodną, dwutlenek węgla oraz inne mieszaniny gazowe. Podstawową zaletą technologii zgazowania w porównaniu do innych metod energetycznego wykorzystania biomasy jest [3]:

- możliwość różnorodnego wykorzystania wytworzonego gazu, np. produkcja ciepła i/lub energii elektrycznej, surowiec do produkcji np. metanolu, itp.,
- ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery,
- możliwość stosowania biomasy w formie nieprzetworzonej (o dużej zawartości wilgoci).

Pomimo różnorodności paliw stałych, które można poddawać zgazowaniu, układ reagujący zawiera poza azotem tylko trzy główne składniki: węgiel, wodór i tlen. Główne reakcje zgazowania zachodzą w strefie reakcyjnej, którą można podzielić na: strefę spalania (utleniania) i redukcji. Reakcje utleniania przebiegające w strefie spalania to [1, 2, 3]:



Powstały gaz, który nie zawiera tlenu, przepływa dalej do strefy redukcji, gdzie zachodzi szereg endo-, a także egzotermicznych reakcji, przedstawionych równaniami poniżej [1, 2, 3]:



Wzrost temperatury powoduje zmianę składu równowagowego reakcji endotermicznych w kierunku zwiększonego udziału składników palnych ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ). Wzrost ciśnienia w procesie zgazowania zwiększa wydajność powstawania metanu, przez wzrasta wartość opałowa gazu oraz jego liczba metanowa. Od powierzchni kontaktu gazu z fazą stałą w strefie redukcji oraz od czasu przebywania gazu w strefie redukcji zależy wydajność procesu (stopień przereagowania). Wydatne zwiększenie powierzchni strefy redukcji można uzyskać stosując technologie zgazowania fluidalnego [1].

W tabeli 1 przedstawiono skład gazu uzyskanego w procesie zgazowania biomasy na złożu stałym [4].

Tabela 1. Skład gazu uzyskany w procesie gazyfikacji na złożu stałym [4]

Składnik	Reaktor przeciwprądowy	Reaktor współprądowy
$\text{CO}$ [%]	15–20	10–22
$\text{H}_2$ [%]	10–14	15–21
$\text{CO}_2$ [%]	8–10	11–13
$\text{CH}_4$ [%]	2–3	1–5
$\text{H}_2\text{O}$ [%]	10–20	10–20
$\text{N}_2$ [%]	reszta	reszta
Wartość opałowa [ $\text{MJ}/\text{m}^3$ ]	3,7–5,1	4,0–5,6
Cząstki stałe [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]	0,1–3	0,02–8
Zanieczyszczenia smoliste [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]	10–150	0,01–6

Znane rozwiązania konstrukcyjne reaktorów do zgazowania biomasy można podzielić na 3 główne grupy [1, 4]:

- ze złożem stałym,
- ze złożem fluidalnym,
- strumieniowe.

W zakresie małej i średniej mocy, które mają kluczowe znaczenie dla rozwoju sektora energetyki rozproszonej, dominują technologie reaktorów ze złożem stałym [1]:

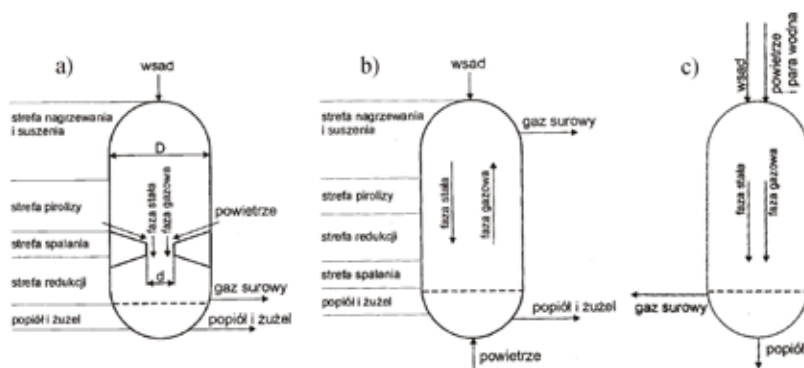
- współprądowe,
- współprądowe z otwartym rdzeniem,
- przeciwprądowe,
- strumieniowe (krzyżowo-prądowe).

Reaktory współprądowe (dolnociągowe) są najczęściej stosowanymi urządzeniami w układach wytwarzania energii elektrycznej, co wynika z niskiej zawartości zanieczyszczeń w gazie. W reaktorze tym biomasa i gaz poruszają się w tym samym kierunku (rys. 1a). Najważniejszym miejscem reaktora jest przewężenie konstrukcyjne w środkowej części. Dzięki przewężeniu powstający gaz przechodzi przez strefę spalania o wysokiej temperaturze, która w gorącym punkcie reaktora może przekraczać nawet 1000°C. Powoduje to, iż substancje smoliste rozkładane są (kalking) już w samym reaktorze. Mimo to reaktory współprądowe dolnociągowe nie cieszą się dużą popularnością, szczególnie w zakresie dużych mocy, ze względu na liczne problemy eksploatacyjne. Typowy roczny czas pracy wynosi około 6000 godzin, co powoduje obniżenie efektywności ekonomicznej inwestycji [1].

W reaktorach przeciwprądowych można poddawać zgazowaniu biomasę o wilgotności do 50%. Suszenie następuje wewnątrz reaktora na skutek kontaktu z gorącym gazem, przepływającym w górę reaktora (rys.1b). Reaktory przeciwprądowe charakteryzują się również dużą tolerancją w zakresie rozdrobnienia biomasy. W reaktorze tym strefa pirolizy znajduje się za strefą zgazowania, dlatego wydzielające się substancje smoliste i gazy węglowodorowe w niewielkim stopniu ulegają konwersji i przechodzą do produktu. Jest to najważniejsza wada reaktorów przeciwprądowych. Problem ten został w znacznym stopniu rozwiązany przez technologię opracowaną przez firmy Condens Oy i VTT Process z Finlandii. Wprowadzono tu modyfikacje polegające na tym, że część powietrza nawilżonego wodą podawana jest nad złożę biomasy, do strefy, w której znajduje się gaz przed opuszczeniem reaktora. Zabieg ten powoduje częściową konwersję węglowodorów wyższych, co zmniejsza ich udział w gazie procesowym [1].

Reaktory strumieniowe (rys. 1c) charakteryzują się najwyższą temperaturą pracy, powyżej 1200–1500°C i najkrótszym czasem procesu. Stąd też wytwarzany gaz charakteryzuje się niewielką zawartością substancji smolistych, z drugiej strony wysoka temperatura stwarza problemy z doбором materiałów oraz z mięknięciem popiołów. Reaktory strumieniowe dzieli się na zużylujące i niezużylujące. W pierwszym popiół, będący składnikiem wsadu, ulega stopieniu. Faza ciekła ścieka po ściankach reaktora, tworząc cienką warstwę skrzystalizowaną bezpośrednio

w sąsiedztwie chłodnej ścianki reaktora. Warstwa żużla pełni tu również funkcję izolacyjną oddzielającą ściankę od gorącego jądra. W celu wytworzenia żużla o odpowiedniej lepkości wprowadza się specjalne dodatki upłynniające, z reguły są to związki bogate w wapń. W reaktorze nieżużlującym żużel nie powstaje, co oznacza, iż paliwo może nie zawierać popiołu. W praktyce, dopuszczalny udział popiołu nie przekracza 1%. Obecnie istnieje dużo komercyjnych reaktorów typu strumieniowego, jednak rzadko wykorzystywane są do zgazowania biomasy. Doświadczenia pokazują, że popiół zawarty w biomase drzewnej nie ulega (lub ulega nieznacznie) stopieniu, głównie z powodu dużej zawartości CaO. Z tego powodu wydaje się, że dla zgazowania biomasy raczej powinny być wykorzystywane reaktory nieżużlujące, które są notabene również tańsze [1].



Rys.1. Schematy reaktorów: a) współprądowego, b) przeciwnieprądowego, c) krzyżowo-prądowego [1]

Podczas zgazowania biomasy powstają zanieczyszczenia: części stałe, metale alkaiczne, azot paliwowy, substancje smoliste oraz związki siarki i chloru. W tabeli 2 przedstawiono podstawowe zanieczyszczenia w gazie generatorowym i sposoby ich usuwania. Najważniejszym problemem powstającym podczas zgazowania biomasy są substancje smoliste, które mogą kondensować na różnych elementach, oddziałują z innymi zanieczyszczeniami (np. adsorpcja) przez co mogą negatywnie oddziaływać na urządzenia do usuwania innych zanieczyszczeń, np. na filtrach [1, 3].

Typowa instalacja układu energetycznego zintegrowanego ze zgazowaniem drewna składa się z następujących części [1]:

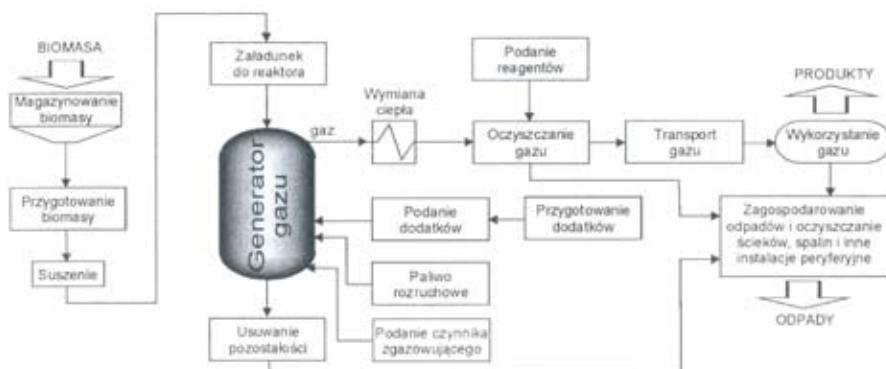
- systemu zasilania biomasą (doprowadzania wsadu),
- urządzenia gazyfikacji i spalania (reaktor),
- układu oczyszczania gazu: cyklony, chłodnice gazu (odzysk ciepła), filtry gazu, skrubery i płuczki gazu,
- układu odprowadzenia popiołu,

- sprężarki (dmuchawa) gazu,
- urządzenia energetycznego wykorzystującego gaz (turbina, silnik gazowy, kocioł, itp.)
- układu odzysku ciepła z silnika lub turbiny,
- komina,
- instalacji peryferyjnych.

Tabela. 2. Zanieczyszczenia w gazie generatorowym i sposoby ich usuwania [1, 3]

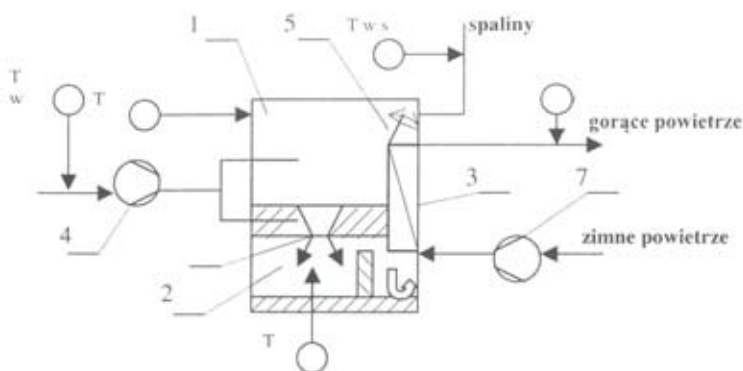
Rodzaj zanieczyszczenia	Przykład	Problemy jakie powoduje	Rozwiązanie problemu
Części stałe	Popiół, koks	Erozja elementów układu	Filtracja, skrubery
Metale alkaliczne	Związki sodu i potasu	Gorąca korozja elementów układu	Chłodzenie i kondensacja, adsorpcja, filtracja
Azot paliwowy	$\text{NH}_3$ , HCN	Tworzenie $\text{NO}_x$	Skrubery, selektywna redukcja katalityczna (SCR)
Substancje smoliste	Wyższe węglowodory	Zapychanie filtrów, formowanie depozytów, problemy ze spalaniem	Usuwanie, rozkład termiczny
Siarka, chlor	$\text{H}_2\text{S}$ , HCl	Korozja wewnętrzna i zewnętrzna	Dotatki do złoża (dolomit, wapno), skrubery, absorpcja

Uogólniony schemat układu energetycznego zintegrowanego ze zgazowaniem biomasy przedstawiono na rysunku 2 [1].



Rys. 2. Schemat układu energetycznego zintegrowanego z termicznym zgazowaniem biomasy [1]

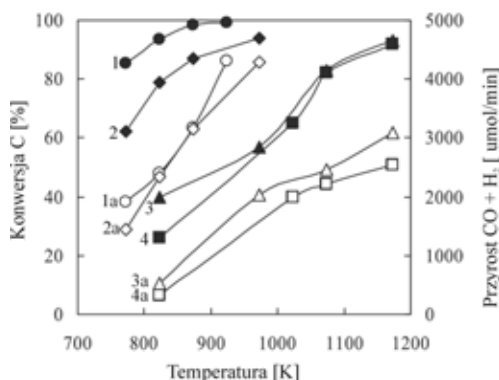
Szymański [5] przeprowadził zgazowanie odpadowej kory sosnowej o wilgotności 14–60% wykorzystując aparaturę przedstawioną na rysunku 3. Autor stwierdził, iż zgazowanie kory drzewnej jest procesem korzystniejszym od spalania, ze względu na efekty cieplne, gdyż ogólna sprawność cieplna jest o 10% wyższa. Stwierdził również, iż możliwe jest zgazowanie kory przy wilgotności występującej podczas składowania na hałdach w warunkach atmosferycznych – dochodzącej do 60%.



Rys. 3. Schemat stanowiska do badania zgazowania kory drzewnej: 1 – komora zgazowania, 2 – komora spalania gazu, 3 – wymiennik ciepła, 4 – dysza, 5 – zasuwka, 6 – wentylator podmuchu, 7 – wentylator zimnego powietrza, T – temperatura, w – prędkość przepływu, s – skład spalin [5]

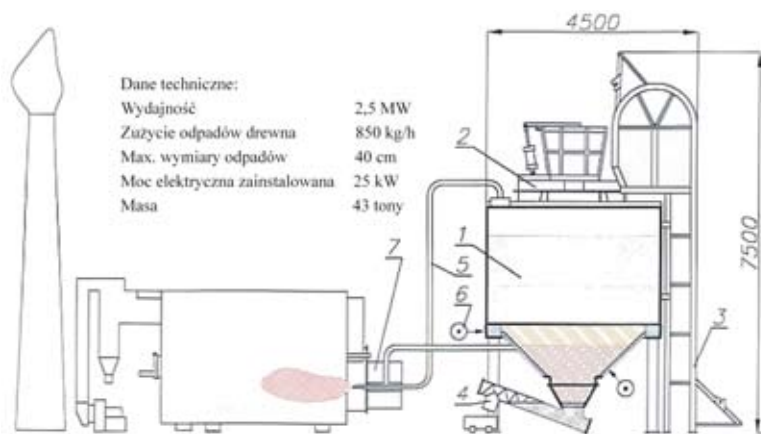
Karasmanoğlu i Tetik [6] przeprowadzili zgazowanie słomy rzepakowej. Ogrzewanie prowadzone było w atmosferze „statycznej” z szybkością 30°C/min do temperatury 650°C, w której to ogrzewanie prowadzono przez 30 minut. Osiągnięto 70,28%-owy stopień konwersji pirolitycznej, olej pirolityczny zawierał 57,29% węgla, 6,63% wodoru i 34,84% tlenu oraz posiadał wartość kaloryczną 27,15 MJ/kg.

Tomishige, Asadullah i Kunimori [7] prowadzili badania zgazowania biomasy z wykorzystaniem różnych katalizatorów. Autorzy stwierdzili, iż spośród wielu katalizatorów ( $\text{CeO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , dolomit, komercyjny G-91 zawierający 14% Ni, 65–70%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 10–14% CaO i 1,4–1,8%  $\text{K}_2\text{O}$ ) najwyższą wydajność konwersji wykazuje katalizator łączony  $\text{Rh/CeO}_2/\text{SiO}_2$  (rys. 4).



Rys. 4. Wpływ temperatury na konwersję węgla (1,2,3,4) i przyrost CO+H<sub>2</sub> (1a,2a,3a,4a) podczas zgazowania celulozy; 1,1a – katalizator Rh/CeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, 2,2a – katalizator G-91, 3,3a – katalizator dolomit, 4,4a – bez katalizatora [7]

Aktualnie można zakupić wiele komercyjnych zgazowarek. Na rysunku 5 przedstawiono polską zgazowarkę typ EKOD-I [8].

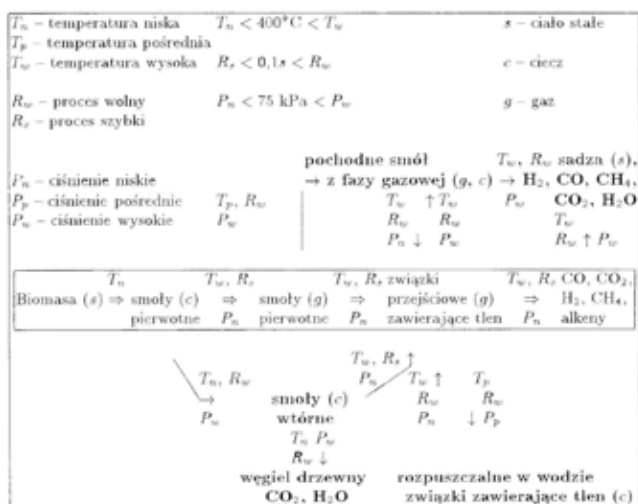


Rys. 5. Zgazowarka typ EKOD-I, 1 – generator gazu, 2 – śluza, 3 – zespół transportowo-załadowniczy, 4 – zespół usuwania popiołów, 5 – rurociąg, 6 – instalacja powietrzna, 7 – zespół palnika i komory spalania [8].

## Piroliza biomasy

Proces termicznego rozkładu drewna i innych surowców lignocelulozowych (np. kory), określane jako piroliza tych materiałów, jest jednym z najstarszych procesów chemicznych znanych i stosowanych w codziennej, praktycznej działalności człowieka [9].

W procesie pirolizy następuje uwolnienie z biomasy gazowych części lotnych w podwyższonej temperaturze w atmosferze beztlenowej w temperaturze 200–600°C. Produktami pirolizy są: sztuczne paliwo stałe (półkoks, koks) o znikomej zawartości części lotnych, produkty ciekłe w postaci różnego rodzaju smoły, wody pogażowej powstałej z wilgoci wsadu oraz gaz palny, którego głównymi składnikami są:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ . Gaz zawiera również węglowodory wyższe, które tworzą substancje smoliste [10]. Rozkład termiczny w warunkach ograniczonego dostępu tlenu jest głównym sposobem przetwarzania biomasy do wymienionych produktów, a schemat możliwych dróg przebiegu jej pirolizy zaproponowali Diebold i Scahill [11], co przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat możliwych dróg przebiegu procesu pirolitycznego biomasy [9, 11]

Ciąg procesów obramowany linią ciągłą jest sekwencją reakcji pierwotnych, szybko przebiegających w warunkach wysokiej temperatury i obniżonego ciśnienia, prowadzących do otrzymania gazów niekondensujących i mieszaniny węglowodorów nienasyconych. Niższa temperatura i wyższe ciśnienie tworzą warunki korzystne dla reakcji, w wyniku których powstają smoły wtórne będące produktem pośrednim w procesie uzyskania węgla drzewnego. Wzrost ciśnienia na dowolnym etapie wysokotemperaturowego ciągu reakcji pierwotnych powoduje zwiększenie wydajności materiału węglowego w końcowych produktach pirolizy [11].

Rozkład drewna poprzez destylację był prawdopodobnie pierwszym procesem chemicznym prowadzonym przez człowieka [12]. Archeolodzy nadal znajdują słupy sprzed kilku tysięcy lat pokrywane lub nasycane smolą drzewną. Początkowo proces termicznego rozkładu drewna przeprowadzano w zwykłych dołach,



później w tak zwanych mielerzach, które pozwalały na częściowe pozyskiwanie i wykorzystanie frakcji wodnej (tak zwanej kwaśnej wody i smoły) [9].

Na przebieg termicznego rozkładu drewna w dużym stopniu wpływają warunki reakcji, a zwłaszcza temperatura, czas grzania, środowisko. Ze względu na temperaturę reakcji wyróżnia się następujące fazy konwersji termicznej [13]:

- temperatura do 170°C – następuje wydzielanie wody,
- w temperaturze 170–270°C następuje wydzielanie gazów (CO i CO<sub>2</sub>), powstaje niewielka ilość par zawierających metanol i kwas octowy, a także smoła,
- w temperaturze 270–280°C proces nabiera charakteru egzotermicznego, następuje silne wydzielanie węglowodorów, zmniejsza się natomiast wydzielanie CO i CO<sub>2</sub>,
- w temperaturze 280–400°C następuje najsilniejsze wydzielanie węglowodorów i początek wydzielania H<sub>2</sub>.

Pirolizę biomasy prowadzi się zwykle w temperaturze 500–800°C, zgazowanie zaś w temperaturze 800–1000°C. W tabeli 3 przedstawiono dane charakteryzujące poszczególne rodzaje pirolizy [14].

Skład produktów pirolizy zmienia się w zależności od składu chemicznego biomasy oraz warunków w jakich zachodzi proces pirolizy. Szybka, względnie błyskawiczna piroliza jest wykorzystywana do maksymalizacji produkcji olejów lub gazu [9, 12].

Tabela 3. Charakterystyka poszczególnych rodzajów pirolizy [14]

Rodzaj pirolizy	Czas trwania	Szybkość grzania	Temperatura [°C]	Produkty
wolna zwęglająca	kilka dni	bardzo wolne	400	węgiel drzewny
wolna	godziny/dnie	wolne	400	węgiel drzewny, gaz
wolna konwencjonalna	5–30 min.	wolne	600	węgiel drzewny, oleje, gaz
szybka	0,5–5 s	bardzo szybkie	650	oleje
błyskawiczna ciekła	< 1 s	szybkie	< 650	oleje
błyskawiczna gazowa	< 1 s	szybkie	< 650	chemikalia, gaz
ultra błyskawiczna	< 0,5 s	bardzo szybkie	1000	chemikalia, gaz
próżniowa	2–30 s	średnie	400	oleje
wodoro-piroliza	< 10 s	szybkie	< 500	oleje
metano-piroliza	< 10 s	szybkie	> 700	chemikalia

Wolna piroliza w temperaturze 500°C, której produktem jest węgiel drzewny znana jest od tysięcy lat. Węgiel drzewny, jako paliwo spalane bez obecności dymu, jest ciągle użytkowane jako źródło ciepła [9, 12].

Zapoczątkowane w latach osiemdziesiątych XX wieku badania nad procesem szybkiej (fleszowej) pirolizy biomasy przyjęły za cel maksymalizację wydajności produktów ciekłych kosztem pozostałości węglowej i gazów niekondensujących. Biomasa podsuszana jest wstępnie do wilgotności poniżej 10%, rozdrabniana na cząstki o wymiarach poniżej 2 mm i w tej postaci pirolizowana w reaktorze, w złożu fluidalnym, w temperaturze 465°C. Produkty rozkładu natychmiast wyprowadzane są z reaktora i poprzez separator oddzielający cząstki węgla od produktów parogazowych kierowane do kondensatora. Główny produkt – ciekły kondensat uzyskiwany z wydajnością przekraczającą 80% w stosunku do suchego surowca wyjściowego nazwany został bioolejem. Dla odróżnienia go od biooleju pozyskiwanego z roślin oleistych powinien nosić nazwę biooleju pirolitycznego. Bioolej pirolityczny jest ciemnobrązową cieczą o charakterystycznym, drażniącym (wędrzarniczym) zapachu. Charakterystykę przeciętnego produktu ciekłego z szybkiej pirolizy drewna zamieszczono w tabeli 4 [15].

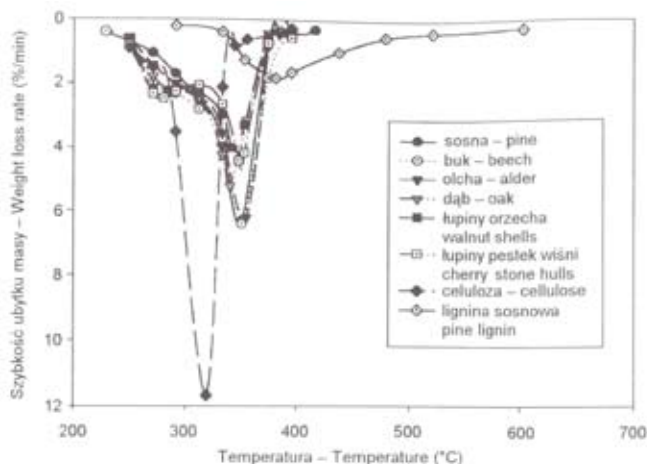
Tabela. 4. Główne składniki biooleju pirolitycznego [15]

Związek chemiczny	Zawartość w biooleju pirolitycznym [%]
Aldehyd hydroksooctowy	0,9–13,0
Kwas octowy	0,5–12,0
Kwas mrówkowy	0,3–9,1
Aldehyd octowy	0,1–8,5
Hydroksyaceton	0,7–7,4
Izoeugenol	0,1–7,2
Alkohol furfurylowy	0,1–5,2
2,6-dimetoksyfenol	0,7–4,8
Etandial	0,9–4,6
Fenol	0,1–3,8
Aldehyd mrówkowy	0,1–3,3
Aceton	0,1–2,8
Eugenol	0,1–2,3
Glikol etylenowy	0,1–2,0

Na podstawie tabeli można stwierdzić, iż bioolej pirolityczny jest cennym półproduktem do pozyskania związków chemicznych na drodze ich selektywnej ekstrakcji. Przeprowadzone testy wykazały [15], iż bioolej po odseparowaniu pozostałości węglowej może być stosowany do napędu silników Diesla bez dodatków ułatwiających samozapłon. Ewentualne przeznaczenie biooleju do konwersji na metanol na obecnym etapie badań rozwiązuje częściowo zagadnienie opa-

całości transportu surowca, pod warunkiem przetworzenia biomasy do biooleju w miejscu jej pozyskania.

Zakrzewski i Kasprzyk [16] przeprowadzili badania spektroskopowe IR stałych produktów węglowych po pirolizie drewna buku i sosny. Stwierdzili oni, że wraz z postępującą karbonizacją substancji drzewnej rośnie udział pierścieni aromatycznych i układów cyklicznych, natomiast lignina ulega nieznacznym zmianom do 350°C.



Rys. 7. Przebieg krzywych DTG podczas analizy termicznej badanych próbek w warunkach politermicznych w atmosferze helu [9]

Zakrzewski [9] przeprowadził badania procesów pirolizy na próbkach z drewna sosny, buku, dębu, olchy, łupin pestek wiśni i orzecha włoskiego oraz celulozy i ligniny wyodrębnionych z drewna sosny i buku. Autor stwierdził, iż zakres temperatury aktywnej pirolizy biomasy obejmuje przedział od 160°C (początek ubytku masy) do 340°C w warunkach małej szybkości podnoszenia temperatury. Wyniki analiz termogravimetrycznych przeprowadzonych w warunkach liniowo wzrastającej temperatury z szybkością w przedziale 1–50°C/min pozwoliły stwierdzić, iż proces termicznego rozkładu drewna oraz surowców pestkowych jest dwuetapowy. W przypadku drewna sosny, buku i olchy są to etapy, dla których można wyodrębnić tylko jedno ekstremum na krzywych DTG (rys. 7), występujące w wyższej temperaturze. Na fragmentach krzywych DTG odpowiadających pierwszemu etapowi nie można wskazać punktu ekstremum, lecz przebieg tych odcinków, z obecnym na nich punktem przegięcia, wyraźnie wskazuje na zwiększoną szybkość rozkładu, która następnie maleje, aby kolejno ponownie wzrastać do osiągnięcia wartości ekstremalnej. Dwoma ekstremami wyróżniają się krzywe DTG charakteryzujące przebieg szybkości pirolizy drewna dębu, łupin orzecha włoskiego i łupin pestek wiśni. Ustalenie temperatury granicznej dla tych etapów jest bardzo trud-

ne, co jest konsekwencją równoczesnego przebiegu wielu reakcji w całym kompleksie lignocelulozowym tworzącym badane materiały.

Autor stwierdził również zwiększoną wydajność stałej pozostałości węglowej związana z większym udziałem ligniny w składzie chemicznym biomasy. Lignina sosnowa wykazuje większą termostabilność w porównaniu z ligniną bukową [9].

Hassan i współpracownicy [17] przed pirolizą zanurzali drewno sosnowe w sześciu roztworach na czas jednej godziny (tabela 5). Pirolizę prowadzono w temperaturze 450°C.

Tabela. 5. Warunki obróbki wstępnej drewna sosnowego [17]

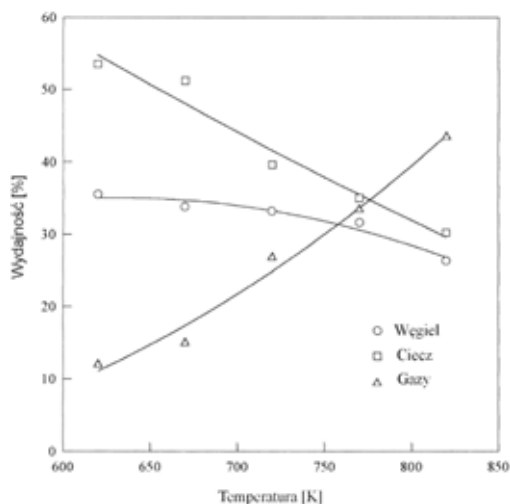
Odczynnik	Temperatura [°C]	Dodatek odczynnika [g/g s.sm.]	Woda [cm <sup>3</sup> /g s.sm.]
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	100	0,140	5
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	100	1,104	5
NaOH	100	1,106	5
Ca(OH) <sub>2</sub>	100	0,100	5
NH <sub>3</sub>	100	0,344	5
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (pH=11)	80	0,143	5

Właściwości fizykochemiczne otrzymanych bioolejów przedstawiono w tabeli 6. Wartość opałowa bioolejów wzrastała po obróbce kwasami i zasadą sodową, przy czym obróbka kwasami powodowała znaczne zwiększenie lepkości, co nie miało miejsca w przypadku zastosowania zasady sodowej. Najniższą gęstość, lepkość oraz wartość opałową stwierdzono dla biooleju otrzymanego z drewna po wstępnej obróbce H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [17].

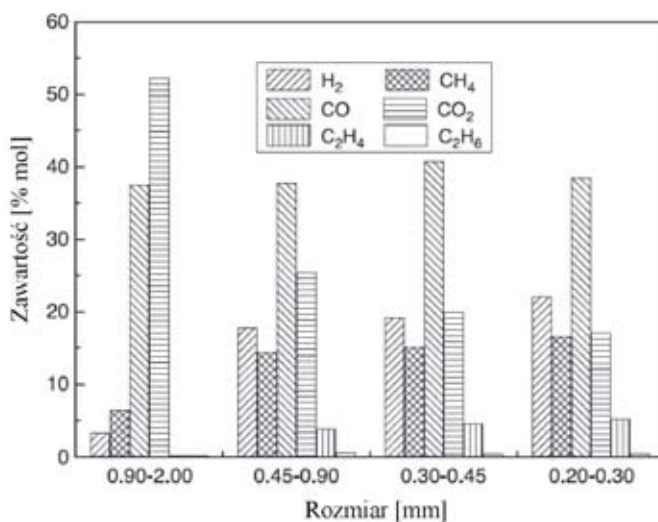
Tabela. 6. Właściwości fizykochemiczne bioolejów z drewna sosnowego [17]

Parametr	Bez obróbki	Bioolej po wstępnej obróbce					
		H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
pH	3,08	2,92	2,81	3,76	3,55	3,49	3,62
Liczba kwasowa	69,5	74,9	95,6	51,1	62,8	66,2	55,5
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	1,18	1,19	1,19	1,19	1,17	1,17	1,15
Zawartość wody [%]	16,9	17,8	18,9	17,6	17,9	19,4	24,0
Lepkość [cSt, 50°C]	55,2	84,4	91,6	53,6	43,5	31,9	12,3
Wartość opałowa [MJ/kg]	22,49	22,70	23,83	24,40	21,90	19,66	7,28

Çağlar i Demirbaş [18] przeprowadzili pirolizę kokonów bawełny osiągając najwyższą wydajność (73,7%) w temperaturze 830 K po wcześniejszej obróbce biomasy za pomocą  $K_2CO_3$  (rys. 8). Wzrost temperatury implikował wyższą wydajność gazów.



Rys. 8. Wpływ temperatury na wydajność pirolizy. Temperatura końcowa 820 K [18]

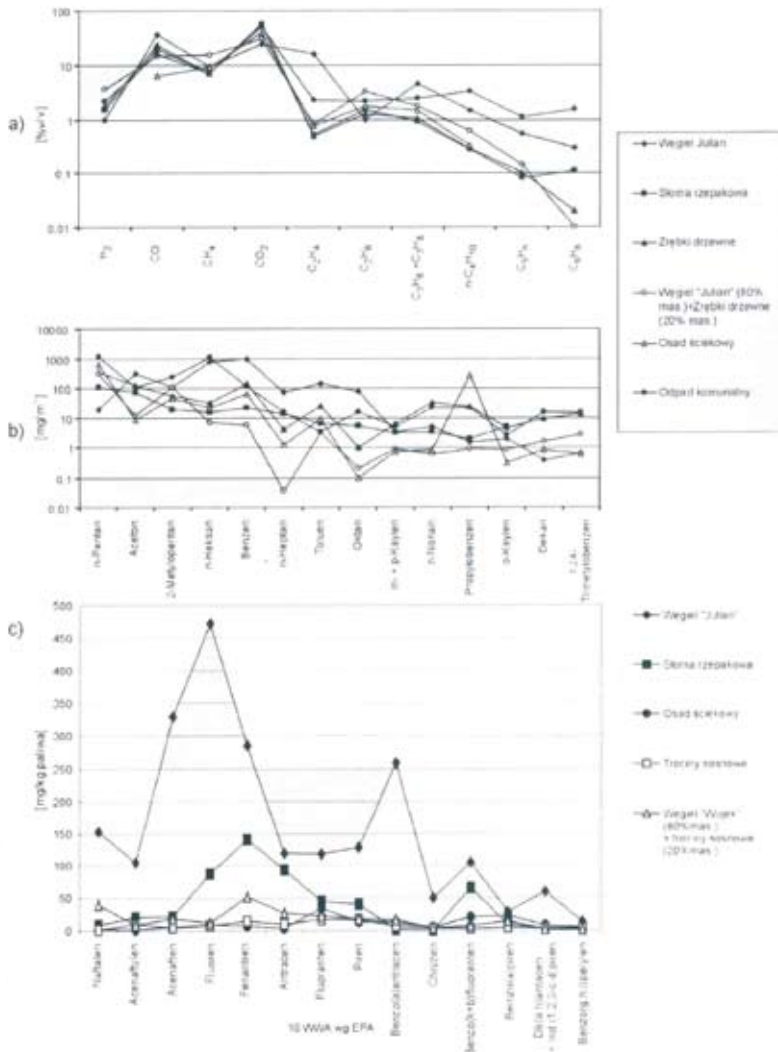


Rys. 9. Wpływ rozmiaru cząstek biomasy na skład gazów pirolitycznych pestek moreli (800°C) [19]

Li i współpracownicy [19] prowadzili „szybką” pirolizę pestek moreli i słomy z roślin strączkowych w temperaturze 500–800°C. Stwierdzono, iż udział CO i H<sub>2</sub> w gazie wynosi 65,4% mol. dla słomy i 55,7% mol. dla pestek. Autorzy zauważyli, iż rozmiar cząstek biomasy wpływa na skład otrzymanych gazów (rys. 9).

W procesie równoczesnej pirolizy składników biomasy następować będzie pękanie najstabszych energetycznie wiązań z powstawaniem rodników [20]. Szybkie reakcje rekombinacji rodników prowadzą do powstania CO, CO<sub>2</sub>, małowczątkowych węglowodorów gazowych i wody, a fragmenty pierścieniowe po rekombinacji z rodnikiem wodorowym lub tlenowym będą destylować jako smoła o średniej masie cząsteczkowej, ale o dużej zawartości tlenu, z uwagi na duże stężenie rodników tlenowych i zawierających tlen. Najważniejsze reakcje obejmują: kraking połączeń mostkowych i alifatycznych oraz tlenowych, reakcje wodorodonorowe i utworzenie małowczątkowych węglowodorów i wody, rekombinację i stabilizację rodników oraz polimeryzację i utworzenie smoły, a także reakcje polikondensacji, kopolimeryzacji z utworzeniem koksu, wydzieleniem wodoru i tlenków węgla [20].

Niekiedy dla osiągnięcia założonego celu, procesowi technologicznemu poddawana jest mieszanina surowców (współspalanie, zgazowanie węgla z biomasą). Ponieważ zarówno procesy spalania jak i zgazowania obejmują stadium pirolizy, to w przypadku zastosowania mieszanego wsadu mówimy o procesie kopirolizy. W procesie kopirolizy zachodzić będą te same reakcje destrukcji pirolizowanej substancji oraz dodatkowo zachodzić będą interakcje pomiędzy powstającymi produktami pierwotnego rozkładu termicznego, zwłaszcza w stadium rekombinacji rodników. Przedstawiona na rysunku 10 wydajność pirolizy węgla, biomasy, odpadów oraz osadów ściekowych, przeprowadzonej w temperaturze 520°C, potwierdza fakt, iż różnicowanie składu i budowy chemicznej surowców wpływa na uzysk i charakter chemiczny produktów. Dodatek biomasy do węgla powoduje nieaddytywne zmiany uzysku wody pirogenetycznej, ciekłych, gazowych i stałych produktów pirolizy. Na uwagę zasługuje fakt wyższego udziału metanu i wodoru w gazie z kopirolizy węgla i biomasy w porównaniu do gazu z biomasy i węgla pirolizowanych indywidualnie; świadczy to o zachodzących reakcjach zgazowania i metalizacji w trakcie kopirolizy węgla i biomasy [21].



Rys. 10. Profile stężeń a) H<sub>2</sub>, CO, C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub>, b) VOCs>C<sub>5</sub>, c) WWA powstających w procesie pirolizy węgla, biomasy i odpadów komunalnych oraz koprolizy węgla i biomasy [20, 21]

## Biowodór

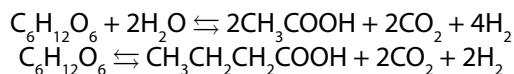
Obecnie, światowa produkcja wodoru opiera się w 95% na paliwach kopalnianych: wodór otrzymuje się z gazu ziemnego w reakcji półspalania i konwersji tlenku węgla z parą wodną [22].

Biowodór może być wytwarzany przez chemiczną przemianę biomasy (np. zgazowanie), konwersję biogazu, niektóre rodzaje fermentacji anaerobowych,

np. przez *Clostridium acetobutyllicum*, *Clostridium butyricum*, *Rhodobacter sphaeroides*, *Enterobacter cloacae*, *Enterobacter aerogenes* a także w nietypowym procesie fotosyntezy przez hydrogenazę, jak to czyni *Chlamydomonas reinhardtii* [23, 24, 25, 26].

Wodór jest jednym z głównych produktów zgazowania biomasy lub reformingu parą wodną (albo jej mieszaniną z tlenem) gazowych produktów biomasy. Bardzo ważne są mieszane metody produkcji wodoru z biomasy, polegające na szybkiej pirolizie biomasy w połączeniu z reformingiem węglowodanów (frakcji biooleju) oraz na połączeniu zgazowania biomasy i reformingu gazu surowego z pirolizy. W reformingu oleju z pirolizy drewna w temperaturze 800°C i przy użyciu katalizatora CeZrO<sub>2</sub> z dodatkiem Pt, można uzyskać nawet do 70% wodoru. Inne sposoby produkcji wodoru to metoda wysokotemperaturowego zgazowania Texaco oraz metody BCL/FERCO i IGT. Metoda BCL/FERCO łączy zgazowanie fluidalne parą wodną z katalitycznym reformingiem parowym, natomiast metoda IGT polega na połączeniu procesów zgazowania tlenem z metodą reformingu (podobną do metody poprzedzającej). Wodór można otrzymywać również w procesach reformingu metanolu i etanolu. Rozkład metanolu do wodoru zachodzi w reformingu parą wodną lub w procesie półspalania, albo w obu reformingach jednocześnie, w obecności katalizatorów Cu/Cr/SiO<sub>2</sub>. W reformingu parowym etanolu stosuje się katalizatory (Co, Ni, Rh, Pt, Ru). Możliwy jest też bezpośredni reforming etanolu w ogniwie paliwowym MCFC. Wśród metod biochemicznych produkcji wodoru znane są metody fermentacji w fazie ciemnej i fotofermentacji, które są jeszcze na etapie doświadczalnym [26]. Proces beztlenowej fermentacji biomasy (np. dla biogazu) można tak poprowadzić, aby uzyskać wodór jako końcowy i główny produkt. Innym sposobem pozyskania wodoru jako produktu końcowego jest fotofermentacja wodorowa, w wyniku której kwasy organiczne i alkohole ulegają redukcji do wodoru i dwutlenku węgla [22].

Thaurer i współpracownicy [27] pozyskiwali biowodór z wykorzystaniem *Clostridium pasteurinbum* a produktami ubocznymi były kwasy karboksylowe:

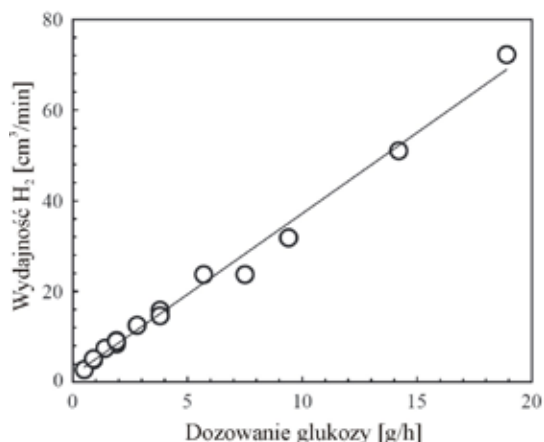


Van Ginkel i Logan [28] pozyskiwali biowodór z glukozy (otrzymanej z biomasy) (rys. 11) z wykorzystaniem bakterii *Clostridia* spp. Autorzy stwierdzili, iż wysoka wydajność wytwarzania biowodoru pociąga za sobą wysoką wydajność powstawania kwasów (octowego i masłowego).

Wilgotną biomasę oraz jej odpady można efektywnie wykorzystać do bezpośredniego wytwarzania gazu z pokaźnym udziałem wodoru i to w reakcji z wodą o nadkrytycznych parametrach (powyżej 22,1 MPa i 374°C). Wytworzony w tym procesie gaz, bogaty w wodór, można wykorzystać w elektrociepłowniach lokalnych poprzez jego spalanie w silniku (Otta lub Stirlinga), sprzężonym z generatorem elektrycznym, lub w ogniwach paliwowych, ale nadaje się on również do prze-

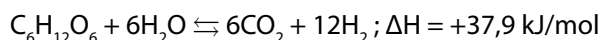


mysłowych procesów chemicznych, takich jak hydrowydobawa lub hydrokraking różnorodnych półproduktów. W tej dziedzinie wiodącą pozycję w świecie zajmują obecnie Niemcy, którzy jako pierwsi zbudowali pilotową instalację o działaniu ciągłym [29].

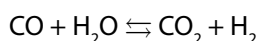


Rys. 11. Wydajność wytwarzania biowodoru [28]

Od końca lat 90-tych ubiegłego stulecia zauważa się intensywny rozwój procesu SCWG (ang. Super Critical Water Gasification) [30]. Jego istota polega na tym, że substancje organiczne (bez dodatku tlenu) reagują z wodą posiadającą parametry nadkrytyczne. Węgiel tworzy w tych warunkach CO<sub>2</sub>, a wodór uzyskuje się z substancji organicznych i obecnej w reaktorze wody. Przykładowo, glukoza przy parametrach 700°C i 35 MPa reaguje wg równania:



Surowcami w tego typu procesach są odpady z przemysłu: leśnego (drewno), rolno-spożywczego (słoma, zielona masa roślin trawiastych, odchody zwierzęce, wysłodki z cukrowni itp.) oraz organiczne odpady komunalne z osadami z oczyszczalni ścieków włącznie. Stopień przemiany surowca w tych procesach przekracza na ogół 90% m/m w temperaturze 600–700°C i pod ciśnieniem 25–35 MPa. Dodatek do substratów związków sodu lub potasu w ilości 500 ppm sprzyja przy powyższych parametrach przemianie tlenku węgla do wodoru wg reakcji [30]:



Kotowski i Konopka [31] przeprowadzili badania metodą SCWG poddając zgazowaniu rozdrobnione drewno, słomy z oczyszczalni ścieków oraz zielone tody-

gi kukurydzy. Tymi substratami zmieszany z wodą w stosunku masowym 1,5:5 załadowywano reaktor. Po osiągnięciu założonej temperatury w granicach 630–700°C przepuszczano dodatkowo wodę o tej samej temperaturze i ciśnieniu do 35 MPa z zasobnika via pompa wysokociśnieniowa oraz grzejnik. We wszystkich eksperymentach periodycznych stosowano – w przeliczeniu na suchą masę – po 6 gramów surowca.

Uzyskano następujące ilości produktów o następującym składzie chemicznym:

- z drewna 11,1 litrów gazu zawierającego 64% obj.  $H_2$ , 13%  $CH_4$ , 1% CO i 22%  $CO_2$ ,
- ze szlamów 8,9 litrów gazu zawierającego 53% obj.  $H_2$ , 18%  $CH_4$ , 2% CO i 27%  $CO_2$ ,
- z zielonych łodyg kukurydzy 8,2 litrów gazu zawierającego 48% obj.  $H_2$ , 22%  $CH_4$ , 2% CO i 28%  $CO_2$ .

Są to wydajności powyżej 90% teoretycznie możliwych, co należy uznać za zadowalające oraz motywujące do kontynuowania tych badań w Polsce. W praktyce przemysłowej dwutlenek węgla będzie usuwany na ogół na drodze wymywania (najczęściej) wodą pod ciśnieniem 3 MPa, a metan konwertowany katalitycznie parą wodną do wodoru [31].

Wodór jest tzw. „paliwem idealnym”, gdyż podczas jego spalania (w odpowiednich warunkach) powstaje tylko para wodna. Stąd też duże zainteresowanie firm motoryzacyjnych wodorem jako paliwem [32, 33].



Rys. 12. Samochód na wodór (fot. B. Igliński)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zdjęcie wykonane podczas Konferencji Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu, Poznań 2008.

Pierwszym japońskim samochodem wyposażonym w silnik spalinowy zasilany wodorem był Musashi 1 zaprezentowany w 1974 roku [34] przez Musashi Institute of Technology. Wodorowy samochód mazdy Mazda RX-8 Hydrogen RE [35] wyposażony jest w dwupaliwowy układ zasilania, składający się z wysokociśnieniowego zbiornika wodoru (35 MPa) oraz oddzielnego zbiornika benzynowego (61 dm<sup>3</sup>). Firma BMW rozwija technologię wodorową (rys. 12). W 2004 roku w Miramas (Francja) przedstawiła H2R, który ustanowił wiele rekordów szybkości. Również firma Ford przedstawiła w ostatnim czasie nowe silniki wodorowe w pojazdach Ford U i C-Max oznaczonym jako H2ICE [36]. Na rysunku 13 przedstawiono mapę Europy na której zaznaczono stacje „wodorowe”.



Rys. 13. Stacje wodorowe w Europie, kolor zielony – pracujące, kolor szary w budowie, koło żółty – planowane [34]

Więcej informacji o pojazdach na wodór znajduje się w opracowaniach Balata [32], Jaina [33], Merkisza i Pielechy [37], a także na stronach internetowych [34, 35, 36].

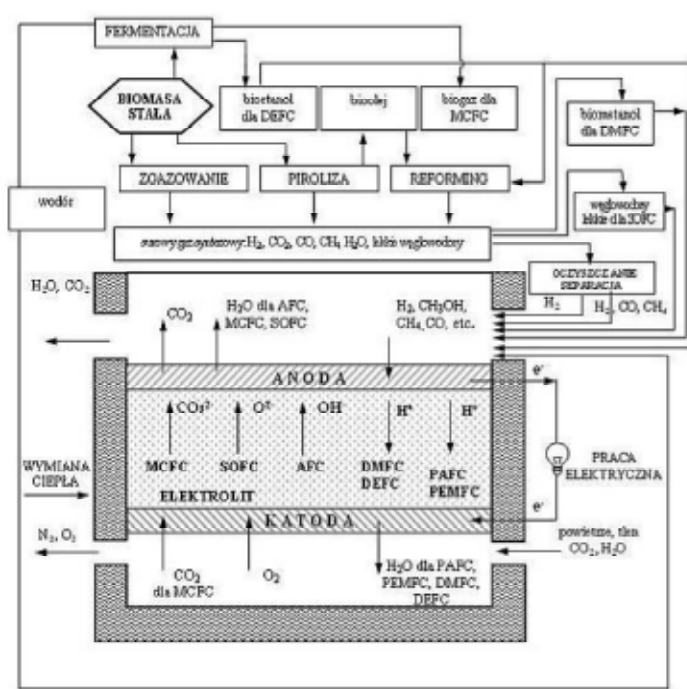
## Ogniwa paliwowe

Obecnie szybko rozwija się technologia ogniw paliwowych zasilanych głównie wodorem [22]. Ogniwa paliwowe można wykorzystać do wszystkich zastosowań energetycznych w całym zakresie mocy, zatem lokalizacja surowca i szerokie wykorzystanie ogniw paliwowych pozwalają na współzależność biomasa – ogniwo, która może być znacząca w gospodarce energetycznej.

Niektóre substancje lub ich mieszaniny produkowane z biomasy mogą być stosowane bezpośrednio lub pośrednio do napędu ogniw paliwowych. Relacje

pomiędzy paliwami z biomasy i ogniwami paliwowymi odzwierciedla rysunek 14. Do bezpośredniego zasilania ogniw można używać wodoru, metanolu, biogazu, zastępczego gazu ziemnego (SNG) i etanolu, natomiast do otrzymywania wodoru – wymienione alkohole, eter metylowy (DME), propanu-butanu i biooleje. Powyższe nośniki energii mogą być produkowane z biomasy metodami termochemicznymi (zgazowanie, kraking i reforming), w obecności lub bez katalizatorów oraz w operacjach biologicznych (fermentacja). Dzięki metodom zgazowania i reformingu po oczyszczeniu gazu (metodą adsorpcyjną lub na membranie) uzyskuje się gaz syntezowy (tlenek węgla i wodór). Dla ogniw paliwowych w układzie zgazowania dopuszcza się 15-20% obj. wody w biomacie, [22].

W ogniwach paliwowych zachodzi bezpośrednia konwersja energii chemicznej paliwa w energię elektryczną [38]. Ten typ konwersji jest istotną zaletą ogniw, bowiem efektywność zmiany jednej formy energii w drugą nie podlega ograniczeniu wynikającemu z teorii silników cieplnych. Istnieje więc potencjalna możliwość uzyskania sprawności przekraczających efektywność konwersji ciepła w energię mechaniczną przy obecnie opanowanej temperaturze doprowadzenia ciepła do obiegu, w którym pracuje silnik cieplny.



Rys. 14. Pozyskanie paliw z biomasy w powiązaniu ze schematem ogniwa paliwowego uogólnionego na wszystkie rodzaje elementarnych ogniw [22]

Istnieje wiele kryteriów podziału ogniw paliwowych. Podział podstawowy to ogniwa bezpośredniego wykorzystania danego paliwa i pośredniego wykorzystania jego konwersji (reformingu). Typowym reprezentantem pierwszej grupy jest ogniwo zasilane wodorem i tlenem. Ogniwo, do którego będzie doprowadzany metan lub biogaz oraz utleniacz będzie należeć do drugiego rodzaju ogniw. Ważnym kryterium jest temperatura pracy ogniwa, wyróżnia się ogniwa [38]:

- niskotemperaturowe: 25–100°C,
- średniotemperaturowe: 100–500°C,
- wysokotemperaturowe: 500–1000°C,
- szczególnie wysokotemperaturowe: powyżej 1000°C.

Technologicznym kryterium podziału ogniw paliwowych jest rodzaj elektrolitu. Najważniejsze typy ogniw przedstawiono w tabeli 7 [39].

Tabela 7. Najważniejsze rodzaje ogniw paliwowych [39]

Rodzaj ogniwa	Elektrolit	Temperatura pracy	Zastosowanie
Alkaliczne (AFC)	35–50% roztwór KOH	60°–90°C	Transport, astronautyka
Polimerowe (PEFC)	Membrana polimerowa	50°–80°C	Transport, astronautyka, energetyka
Fosforowe	Kwas fosforowy o dużym stężeniu	160°–220°C	Energetyczne źródła rozproszone
Węglanowe	Stopiona mieszanina węglanów litu i sodu lub litu i potasu	620°–650°C	Energetyka
Tlenkowo-ceramiczne	Dwutlenek cyrkonu stabilizowany itrem	800°–1000°C	Energetyka

W grudniu 1999 roku podano do wiadomości, że próg opanowania technologicznego przekroczyły dwa rodzaje ogniw paliwowych [40]:

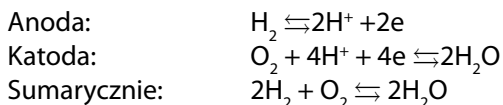
1) polimerowe ogniwa paliwowe bezpośrednio zasilane wodorem, jako przenośne lub stacjonarne źródło energii, testowane w samochodach napędzanych ogniwami paliwowymi,

2) polimerowe ogniwo paliwowe bezpośrednio zasilane metanolem, jako przenośne lub stacjonarne źródła o energii, opracowane przez firmę amerykańsko-kanadyjską Ballard,

3) ceramiczne ogniwo paliwowe, jako stacjonarne źródło energii, zasilane węglowodorowymi paliwami gazowymi jak metan, propan lub tlenek węgla oraz

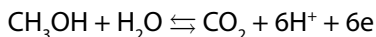
4) biologiczne ogniwa paliwowe dokonujące mikrobiologicznej konwersji glukozy do wodoru, będące na etapie rozwoju.

Pierwsze polimerowe ogniwo paliwowe (PEFC), wykonane przez firmę General Electric, USA, zostało zastosowane na statku kosmicznym Gemini. W tym ogniwie następuje rozpad atomu wodoru na proton i elektron. Elektrony płyną przez obwód zewnętrzny, stanowiący odbiornik prądu elektrycznego, protony poprzez elektrolit do katody, łącząc się z elektronami w atmosferze powietrza tworzą wodę. Reakcje zachodzące w ogniwie są następujące [40]:

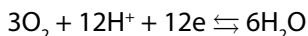


Polimerowe ogniwo paliwowe charakteryzuje się dużą gęstością mocy przy niskim ciężarze właściwym, niskich kosztach i niedużej objętości. Pracuje w niskiej temperaturze, umożliwiającą szybki rozruch i natychmiastową odpowiedź na żądaną zmianę mocy [35, 36].

Prace nad ogniwem paliwowym bezpośrednio zasilanym metanolem, w którym katalizator anody wydzielalby wodór z metanolu, eliminując konieczność stosowania układu reformowania paliw węglowodorowych, zostały zapoczątkowane przez Stell Research i przez Esso-Alsthom we Francji odpowiednio w latach 1960 i 1970. W ogniwie DMFC (Direct Metanol Fuel Cell) metanol utlenia się zgodnie z równaniem reakcji [39, 40]:



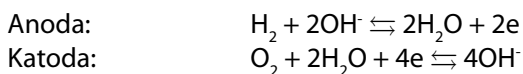
Na anodzie powstaje woda:



Ogniwa ceramiczne (SOFC) stanowią technologię wysokotemperaturowych ogniw paliwowych. Zamiast elektrolitu ciekłego wykorzystuje się elektrolit ceramiczny w postaci tlenków itru i cyrkonu. Paliwem zasilającym bezpośrednio ogniwo może być tlenek węgla(II) bądź metan pochodzące z konwersji biomasy [39, 40].

Biologiczne ogniwo paliwowe jest zasilane wodorem uzyskiwanym w wyniku przetwarzania glukozy przez drożdże. The Kyoto Research Institute (Japonia) opracowuje dla firmy Sharp Corporation technologię utylizacji odpadów organicznych poprzez upłynnianie ich oraz mikrobiologiczną konwersję glukozy w niej zawartej do wodoru [35, 36].

Ogniwo paliwowe zasadowe (AFC) zasilane jest czystym wodorem i czystym tlenem, względnie powietrzem pozbawionym dwutlenku węgla, o elektrolicie w postaci wodnego roztworu KOH. Reakcje zachodzące w ogniwie można przedstawić następująco:



Zasadowe ogniwo paliwowe działa zadowalająco przy niskiej temperaturze (60–80°C) uzyskując sprawność 50% i gęstość prądu rzędu 62,5% [35, 36].

Ogniwo paliwowe fosforowe (PAFC) składa się z trzech głównych elementów:

1. procesora paliwa, w którym przebiega reforming i reakcja zwrotna gazu wodnego, przetwarzającego paliwo w gaz bogaty w wodór,
2. zestawu ogniwi oraz
3. alternatora prądu zmiennego przetwarzającego prąd stały wytwarzany przez ogniwo paliwowe.

Kwas fosforowy jako elektrolit umożliwia pracę ogniwa paliwowego z paliwem typu gaz ziemny lub paliwo węglowodorowe. Moc większości ogniwi PAFC zawiera się w granicach 50–200 kW, największa jednostka działająca jako generator prądu stałego posiada moc 11 MW [39, 40].

Ogniwa paliwowe znalazły szerokie zastosowanie w życiu codziennym człowieka, również do napędzania pojazdów. Przykładowo, firma Mercedes-Benz (obecnie DaimlerChrysler) zastosowała ogniwa paliwowe w pojeździe klasy A o nazwie Citaro [37]. Korzystne jest wprowadzanie ogniwi jako napędu pojazdów komunikacji miejskiej, które można by często tankować, wobec czego nie zachodziłaby konieczność stosowania katalizatora [39]. W ostatnich latach, na rynek wprowadzane są samochody hybrydowe wyposażone w ogniwa paliwowe, przykładowo Toyota FCHV-4 czy Ford Focus FCV [37].

## Literatura

- [1] T. Chmielniak *i in.*, *Układy energetyczne zintegrowane ze zgazowaniem biomasy*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
- [2] J. Kotowicz, Ł. Bartela, *Energetyczne wykorzystanie biomasy drzewnej – przegląd technologii*, Rynek Energii 6, 1–12, 2007.
- [3] K. Svoboda *et al.*, *Integration of biomass drying with combustion/gasification technologies and minimalization of emission of organic compounds*, Chemical Papers 63(1), 15–25, 2009.
- [4] M. Pogoreutz, *Economical and technological comparison of small-scale CHP on the basis of biomass*, materiały 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla 2000.
- [5] M. Szymański, *Zgazowanie kory drzewnej*, materiały Międzynarodowej Konferencji Procesów Energii „Eco-Euro-Energia”, 261–264, Bydgoszcz 2004
- [6] F. Karaosmanoğlu, E. Tetik, *Fuel properties of pyrolytic oil of the straw and stalk of rape plant*, Renewable Energy 16, 1090–1093, 1999.
- [7] K. Tomishige, M. Asadullah, K. Kunimori, *Novel catalyst for gasification of biomass with high conversion efficiency*, Catalysis Surveys from Asia 7(4), 219–233, 2003.
- [8] <http://www.zamer.com.pl> (wejście 12.10.09).

- [9] R. Zakrzewski, *Niektóre aspekty termicznego rozkładu drewna i wybranych surowców lignocelulozowych*, Wyd. AR w Poznaniu, Poznań 2001.
- [10] T.B. Reed, *Principles and technology of biomass gasification*, Advances in Solar Energy, Plenum Publishing Corp., New York 1985.
- [11] J.P. Diebold, J. Scahill, *14-th Biomass Thermochemical Conversion Contractors' Review Meeting*, 234–1456, SERI/PR, 1982.
- [12] W. Ciechanowicz, *Zagadnienia termicznej konwersji biomasy*, w „Paliwa i energia XXI wieku szansą rozwoju wsi i miast” (W. Ciechanowicz, S. Szczukowski (red.)), Oficyna Wydawnicza WIT, Warszawa 2006.
- [13] S. Rosiński, *Chemia drewna*, PWRL, Warszawa 1984.
- [14] <http://www.fao.org> (wejście 14.10.09).
- [15] T.A. Milne *et al.*, *A review of the chemical composition of the fast-pyrolysis oils from biomass*, in Developments in thermochemical biomass conversion, A.V. Bridgwater, D.G.B. Boocock (ed.), Blackie Academic&Professional, London, New York 1997.
- [16] R. Zakrzewski, H. Kasprzyk, *Badania spektroskopowe w podczerwieni produktów stałych procesu termolizy drewna sosny i buka*, Roczniki AR 290, Poznań 1996.
- [17] El-Barbary M. Hassan, P.H. Steele, L. Ingram, *Characterization of fast pyrolysis bio-oils produced from pretreatment pine wood*, Biotechnology and Applied Biochemistry 154, 182–192, 2009.
- [18] A. Çağlar, A. Demirbaş, *Conversion of cotton cocoon shell to liquid products by pyrolysis*, Energy Conversion&Management 41, 1749–1756, 2000.
- [19] S. Li *et al.*, *Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas*, Fuel Processing Technology 85, 1201–1211.
- [20] M. Ściażko, H. Zieliński (red.), *Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy*, Wyd. Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla i Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zabrze–Kraków 2003.
- [21] K. Kubica, *Badanie wpływu katalizatorów typu DESONOX na przemiany substancji organicznej paliw stałych w procesie ich spalania w złożu stacjonarnym*, sprawozdanie IChPW nr 1.35/2001.
- [22] W. Warowny, K. Kwiecień, *Wykorzystanie biomasy do ogniw paliwowych*, Czysta Energia 10, 22–26, 2006.
- [23] E. Palazzo, B. Fabiano, P. Perego, *Process development of continuous hydrogen production by Enterobacter aerogenes in a packed column reactor*, Bioprocess Engineering 22, 205–213, 2000.
- [24] N. Florin, A. Harris, *Hydrogen production from biomass*, Environmentalist 27, 207–215, 2007.
- [25] M-L. Chong *et al.*, *Biohydrogen production from biomass and industrial wastes by dark fermentation*, International Journal of Hydrogen Energy 34, 3277–3287, 2009.
- [26] P.C. Hallenbeck *et al.*, *Microbiological and engineering aspects of biohydrogen production*, Indian Journal of Microbiology 49, 48–59, 2009.
- [27] R.K. Thaurer, K. Jungerman, K. Decker, *Energy conservation in chemotrophic anaerobic bacteria*, Bacteriological Reviews 41, 100–180, 1977.
- [28] S.W. van Ginkel, B. Logan, *Increased biological production with reduced organic loading*, Water Research 39, 3819–3826, 2005.
- [29] N. Boukis *et al.*, *Hydrothermal reforming of alcohols and biocrude oil*, Chemical Engineering Transactions 4, 99–107, 2004.
- [30] A. Kruse, *Supercritical water gasification*, Biofuels, Bioproducts&Biorefining 2, 415–437, 2008.



- 
- [31] W. Kotowski, E. Konopka, *Miejsce biomasy drzewnej w procesach pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych*, *Energetyka i Ekologia*, 532–537, lipiec 2006.
- [32] M. Balat, *Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems*, *International Journal of Hydrogen Energy* 33, 4013–4029, 2008.
- [33] I.P. Jain, *Hydrogen the fuel for 21st century*, *International Journal of Hydrogen Energy* 34, 7368–7378, 2009.
- [34] <http://www.netinform.net> (wejście 15.10.09).
- [35] <http://www.motofakty.pl> (wejście 15.10.09).
- [36] <http://www.bmw.com> (wejście 15.10.09).
- [37] J. Merkiś, I. Pielecha, *Alternatywne napędy pojazdów*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [38] T.J. Chmielniak, *Technologie energetyczne*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
- [39] EG&G Technical Services, Inc., *Fuel Cell Handbook* (seventh edition), U.S. Department of Energy, Morgantown, West Virginia 2004.
- [40] W. Ciechanowicz, *Ogniwa paliwowe*, w „Paliwa i energia XXI wieku szansą rozwoju wsi i miast” (W. Ciechanowicz, S. Szczukowski (red.)), Oficyna Wydawnicza WIT, Warszawa 2006.

## PALIWA ALKOHOLOWE I ETEROWE (SILNIKI ISKROWE)

W tym i następnym rozdziale przedstawiono możliwości pozyskiwania i zastosowania biopaliw płynnych w motoryzacji. Paliwa alkoholowe i oleje roślinne były pierwszymi produktami stosowanymi w motoryzacji, stopniowo wypartymi przez tanią wówczas ropę naftową [1].

Pierwszym paliwem dla silnika o zapłonie iskrowym był etanol [2]. Silnik ten skonstruował Nicolaus August Otto w połowie lat sześćdziesiątych XIX wieku. Na Paryskiej Wystawie w roku 1867 wspólnie z Eugenem Langenem, , po raz pierwszy zaprezentował publiczności swój silnik. Był to przepływowy silnik tłokowy, gdzie tłoki przekazywały energię przez zębatkę, a nie mechanizm korbowy. W 1876 Augustowi Otto udało się opracować silnik czterosurowy ze sprężoną mieszkanką paliwową. Do dzisiejszego dnia ten typ silników stanowi pierwowzór dla budowy silników spalinowych o zapłonie iskrowym (dlatego wszystkie silniki z zapłonem iskrowym i posuwisto-zwrotnym ruchem tłoka, gdzie energia jest przenoszona przez wał korbowy są nazywane silnikami Augusta Otto) [2, 3]. Zanim August Otto wynalazł swój silnik, wielokrotnie podejmowano próby zbudowania samochodu. Niektórym wynalazcom, takim jak Siegfried Marcus (w 1875 r.), Etienne Lenoir (w 1862 r.) i Nicolas Joseph Cugnot (około 1869 r.), udało się nawet zbudować modele zdolne do jazdy, ale z braku odpowiedniego rodzaju silnika – łączącego małą masę z dużą mocą – żadna z tych konstrukcji nie nadawała się do wykorzystania w praktyce. W ciągu piętnastu lat po zbudowaniu przez Augusta Otto silnika czterosurowego dwaj wynalazcy, Karl Benz i Gottlieb Daimler, skonstruowali, każdy na własną rękę, samochody zdadne do użytku i nadające się do sprzedaży [1, 2, 4].

Prototyp samochodu Henry Forda z 1896 roku był zasilany etanolem. Ford wkroczył w gorączkowy okres rozwoju motoryzacji, na którym działało już wiele nowo powstałych firm. Zrewolucjonizował system produkcji aut, wprowadzając ruchomą taśmę produkcyjną i trzymianowy dzień pracy. Szybko pokonał konkurencję, wprowadzając w 1907 Forda T, zasilanego etanolem i ograniczając produkcję wyłącznie do jednego modelu. Henry Ford wielokrotnie podkreślał zalety etanolu jako paliwa, nazywał go „paliwem przyszłości” (*the fuel of the future*) [1, 2].



Rys. 1. Henry Ford obok Forda T [5]

Etanol wykorzystany został w pierwszym pocisku balistycznym o napędzie raketowym (rakiet V-2), skonstruowanym przez zespół niemiecki pod kierunkiem Wernhera von Brauna w czasie II wojny światowej [6]. V-2 stał się podstawą rozwoju pocisków balistycznych w USA, ZSRR, Chinach oraz we Francji [7].

Pierwszym krajem, w którym na masową skalę zaczęto stosować bioetanol była Brazylia. Wskutek kryzysu naftowego Brazylia stanęła na krawędzi bankructwa, głównie wskutek zbyt wysokich cen importowanej ropy naftowej [8]. W 1975 roku rozpoczęto produkcję E85 (85% etanolu, 15% benzyny) z trzciny cukrowej osiągając w 1984 r. poziom  $12,5 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/rok (poziom produkcji jest aktualnie utrzymywany). W 1979 roku produkcję bioetanolu z kukurydzy rozpoczęły USA, ilość pozyskiwanego biopaliwa jest stopniowo zwiększana, osiągając poziom  $1 \cdot 10^7$  m<sup>3</sup>/rok. Dla porównania, kraje UE nie przekroczyły poziomu  $5 \cdot 10^5$  m<sup>3</sup>/rok [8, 9].

Etanol jako paliwo testowany jest również w lotnictwie, w 1989 roku miał miejsce przelot przez Atlantyk samolotu etanolowego „Velocity” [10].

Polskie badania nad wykorzystaniem alkoholu sięgają okresu międzywojennego [11]. Wykorzystanie bioetanolu w benzynach, zapoczątkowane zostało w Polsce w końcu 1993 roku. Dodawanie etanolu w ilościach nieprzekraczających 5% v/v umożliwiło wprowadzenie nowej normy na paliwa benzynowe PN92 C-96025 [12]. Od 1999 roku obowiązują normy znowelizowane zgodne z UE (PN-EN228) [13].

## Bioetanol

Etanol (alkohol etylowy) o wzorze  $C_2H_5OH$  znany jest od zarania dziejów. Mieszanina 95,6% v/v etanolu z wodą popularnie nazywana jest spirytusem [14]. Jest to mieszanina azeotropowa, z której nie można uzyskać etanolu 100%-owego (nazywanego alkoholem absolutnym) przez prostą destylację. Etanol absolutny jest higroskopijny, należy więc przechowywać go w szczelnie zamkniętych naczyniach. Etanol do celów spożywczych, paliwowych (bioetanol) i przemysłowych otrzymuje się w wyniku fermentacji alkoholowej (95% produkcji światowej). Etanol do celów przemysłowych jest też produkowany poprzez bezpośrednią syntezę z gazu syntezowego (mieszaniny  $CO$ ,  $H_2$  i  $H_2O$ ), która jest tańsza od procesu fermentacyjnego i prowadzi do czystszej chemicznie etanolu (5% produkcji światowej), jednak w wielu krajach świata użycie etanolu syntetycznego do celów spożywczych jest zabronione. Jest to podyktowane nie tyle względami zdrowotnymi, ile chęcią utrzymania tradycyjnego przemysłu spirytusowego i związanych z nim miejsc pracy. W Polsce, przed laty dostępna była w sprzedaży wódka „Vistula” produkowana na drodze chemicznej [1, 14, 15].

Etanol jest tani w produkcji i jednocześnie stosunkowo niegroźny dla środowiska, dlatego jest dość powszechnie wykorzystywany jako rozpuszczalnik w przemyśle chemicznym. Cena prostych napojów alkoholowych (czystych wódek i spirytusu spożywczego) w wielu krajach wynika z podatków nakładanych na te produkty, a nie z kosztów ich produkcji. Zależnie od surowca, rzeczywisty koszt wytworzenia  $1\text{ dm}^3$  spirytusu wynosi 0,20-0,40€, gdy jest on otrzymywany w procesie fermentacji [4, 14].

Do produkcji bioetanolu w procesie fermentacji, używa się: kukurydzę, ziemniaki, zboża, ryż, maniok, trawę sudańską, burak cukrowy, trzcinę cukrową, odpady z krochmalnictwa, mąki, kasze, otręby, melas, odpady z przemysłu owocowego [4, 15].

Poniżej zaprezentowano krótką charakterystykę roślin, z których pozyskuje się bioetanol.

**Burak cukrowy** (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris* con var. *crassa* var. *altissima*) jest odmianą buraka zwyczajnego, cukrodajnej rośliny przemysłowej, należącej do rodziny komosowatych. Korzeń w kształcie stożka (masa 0,5–1,0 kg) charakteryzuje się wysoką zawartością sacharozy (18,0–19,5%). Buraki cukrowe uprawiane były początkowo jako warzywa ogrodowe oraz na paszę dla zwierząt. Cukier został wyprodukowany eksperymentalnie z buraków w Niemczech w 1747 przez chemika Andreea Marggrafa, a pierwsza fabryka przetwarzająca buraki cukrowe została wybudowana w Konarach na Dolnym Śląsku w 1799 [16, 17].

Przeciętny plon korzeni wynosi ponad 40 Mg/ha (dochodzi jednak nawet do 100 Mg/ha). Buraki cukrowe uprawiane są głównie w Europie, w pasie czarnoziemów i gleb brunatnych europejskiej części Rosji, na Ukrainie, w południowej Polsce, północnych Włoszech i w krajach Beneluksu. Poza Europą ich uprawy mają duże znaczenie w Stanach Zjednoczonych, Chinach (Mandżuria) i w Turcji [18, 19].

**Kukurydza zwyczajna** (*Zea mays* L.) to gatunek rośliny jednorocznej z rodziny wiechlinowatych. Należy do zbóż i pochodzi z Meksyku [14]. Praktycznie nie występuje w formie dzikiej. Już u zarania uprawy kukurydzy przez człowieka, dzięki selekcji udało się wyhodować duże kolby kukurydzy. Początki uprawy tej rośliny w Meksyku datuje się na ok. 5 tys. lat p.n.e.; w Andach – na lata 4300–2500 p.n.e. Po raz pierwszy o uprawach kukurydzy Europa dowiedziała się od Kolumba w 1492 r., który opisał jej uprawę na Kubie (Hispanioli). On też nazwał ją „mais” od indiańskiej nazwy „machiz”. Przypuszcza się, że pierwsze nasiona kukurydzy przywiozła do Hiszpanii druga wyprawa Kolumba. Kukurydza szybko rozprzestrzeniła się na Półwyspie Iberyjskim i we Włoszech. Portugalczycy już na pocz. XVI w. przenieśli jej uprawę do zachodniej Afryki i Indii.

Pośród kilku jej podgatunków największe znaczenie gospodarcze ma kukurydza pastewna, szklista, pękająca oraz cukrowa. Stanowią one bazę surowcową nie tylko dla przemysłu rolnego i spożywczego, ale coraz szerzej wchodzi m.in. do przemysłu chemicznego i energetycznego. Podczas produkcji etanolu, fermentacji alkoholowej poddawana jest tylko podstawowa część ziarniaka kukurydzy, czyli bielmo. Pozostałe części, tj. zarodek i okrywa owocowo-nasienna są źródłem wysokiej jakości oleju, glutenu paszowego, fruktozy i białka [20, 21].

**Sorgo cukrowe** (*Sorghum bicolor*) jest gatunkiem jednorocznej rośliny uprawnej z rodziny wiechlinowatych. Sorgo cukrowe można uprawiać na większości gleb, a szczególnie na glebach lekkich. Rośliny zaczynają dynamicznie rozwijać się dopiero od połowy lipca, gdy kukurydza osiąga swą maksymalną wysokość. Obecnie, nie ma zarejestrowanych herbicydów do odchwaszczania sorga [22, 23].



Rys. 2. Sorgo cukrowe (*Sorghum bicolor*) [22]

**Trzcina cukrowa** – cukrowiec lekarski (*Saccharum officinarum* L.) to gatunek byliny należącej do rodziny wiechlinowatych (*Poaceae*). Zwyczajowo, nazywana jest trzcina cukrową, mimo że z biologicznego punktu widzenia jest to nazwa nieprawidłowa, roślina nie należy bowiem do rodzaju „trzcina”, lecz rodzaju „cukrowiec”. Trzcina cukrowa jest jedną z najstarszych upraw na świecie. Po raz pierwszy pojawiła się około 3000 lat temu jako jeden z rodzajów trawnika w Nowej Gwinei i stamtąd zawędrowała na Borneo, Sumatrę i do Indii. Według jednej z lokalnych legend pochodzących z Wysp Salomona, przodkowie rasy ludzkiej powstali właśnie z łodygi trzciny [14, 24]. Tym, który przywiózł trzcinę cukrową do Ameryki, był Krzysztof Kolumb podczas swojej drugiej wyprawy na wyspę Española w roku 1493. W Kolumbii posadzono ją po raz pierwszy w Santa María La Antigua del Darién w roku 1510. Następnie, Sebastián de Belalcázar, założyciel miasta Santiago de Cali, posadził trzcinę w dolinie rzeki Cauca, gdzie aktualnie zbiera się ją z ponad 200.000 hektarów [25].



Rys. 3. Trzcina cukrowa (*Saccharum officinarum* L.) [25]

Trzcina cukrowa jest surowcem, z którego powstaje ponad połowa światowej produkcji cukru (cukier uzyskiwany z trzciny cukrowej nazywany jest cukrem trzcinowym). Najważniejszym producentem jest Brazylia, na drugim miejscu plasują się Indie. W strefie umiarkowanej z konieczności trzcina zastępowana jest przez buraka cukrowego, z którego powstaje cukier buraczany. W Brazylii większość trzciny przeznaczana jest na produkcję etanolu, gdzie alkohol ten służy jako paliwo do samochodów. Trzcina może być również surowcem w przemyśle papierniczym i farmaceutycznym [22, 26].

**Wilec ziemniaczany** (*Ipomoea batatas* (L. Poir.) to gatunek byliny należącej do rodziny powojowatych, znany pod nazwami: batat, patat lub słodki ziemniak. Po-

chodzi z Ameryki Południowej i Ameryki Środkowej. Nie jest znany w dzikim stanie, jest natomiast popularny w uprawie w całej strefie tropikalnej. Powszechnie uprawiany w strefie międzyzwrotnikowej, na obszarach o wilgotnym i ciepłym klimacie. Głównymi producentami są Chiny, Uganda, Nigeria oraz Indonezja. Istnieje wiele odmian uprawnych o zróżnicowanych barwach i kształtach korzeni bulwiastych. Spożywane są po ugotowaniu lub upieczeniu. Wytwarza się z nich również mąkę, płatki, skrobię oraz alkohol [14, 22].



Rys. 4. Batat (*Ipomoea batatas* L. Poir.) [22]

W tabeli 1 porównano wydajność produkcji etanolu z różnych roślin uprawnych. Najwięcej etanolu z 1 ha można pozyskać z kukurydzy [18]. Niektórzy autorzy podają, iż najbardziej opłacalna jest produkcja etanolu z trzciny cukrowej [4].

Tabela 1. Wydajność produkcji etanolu z różnych roślin uprawnych [18]

Roślina	Zawartość cukru lub skrobi [%]	Wydajność etanolu [dm <sup>3</sup> /Mg]	Plon [Mg/ha]	Produkcja etanolu [dm <sup>3</sup> /ha]	Ekwiwalent benzyny [dm <sup>3</sup> ]
Kukurydza	65	417	8,0	3336	2234
Burak cukrowy	16	98	4,5	441	295
Ziemniak	17	120	16,0	1920	1280
Żyto	62	390	2,8	1092	730

## Fermentacja alkoholowa

Fermentacja etanolowa jest jedną z najstarszych technik biotechnologicznych stosowanych przez człowieka. Wykorzystuje ona drobnoustroje, najczęściej drożdże *Sacharomyces cerevisiae*, które w warunkach beztlenowych przetwarzają cukry proste do alkoholu etylowego. Technologia wytwarzania etanolu składa się z trzech etapów: przygotowania surowca, fermentacji etanolowej i wydzielenia produktu. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy schemat gorzelnicy zbożowej [27].



Rys. 5. Schemat otrzymywania alkoholu w gorzelnicy zbożowej [27]

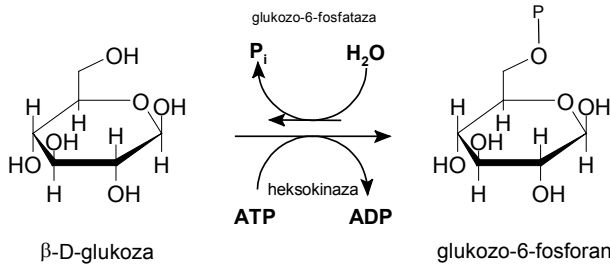
Fermentacja cukrów jest szeroko rozpowszechniona wśród drobnoustrojów. Głównym producentem etanolu są grzyby, szczególnie szczepy *Saccharomyces cerevisiae* [28]. Wiadomo, że organizmy te oddychają w sposób tlenowy, jednakże w warunkach niedostatecznego dostępu tlenu przeprowadzają proces fermentacji różnych węglowodanów (laktozy, ksylozy) do etanolu i ditlenku węgla [29, 30]. Wiele względnych i bezwzględnych beztlenowców wytwarza etanol jako główny lub uboczny produkt fermentacji węglowodanów o pięciu lub sześciu atomach węgla w cząsteczce.

Zdolność do wytwarzania etanolu z glukozy przez drożdże została odkryta w 1815 roku przez Gay-Lussaca. W pierwszym etapie pirogronian (wytworzony w szlaku fruktozo-1,6-bisfosforanowym) zostaje przekształcony do aldehydu octowego, a następnie aldehyd octowy ulega redukcji do etanolu [30].

Poniżej przedstawiono mechanizm przekształcania cząsteczki -D-glukozy do alkoholu etylowego i ditlenku węgla, jest to jeden z możliwych szlaków degradacji glukozy.

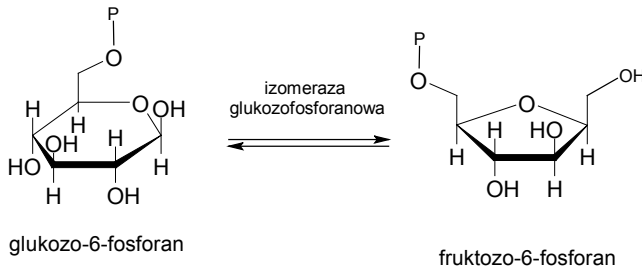


Szlak fruktozo-1,6-bisfosforanowy i przemiana powstającego kwasu pirogronowego przebiega dwunastoetapowo, pierwszym etapem jest przekształcenie -D-glukozy do glukozy-6-fosforanu przy współudziale heksokinazy i adenylotryfosforanu (ATP) (Rys. 6) [29, 30].



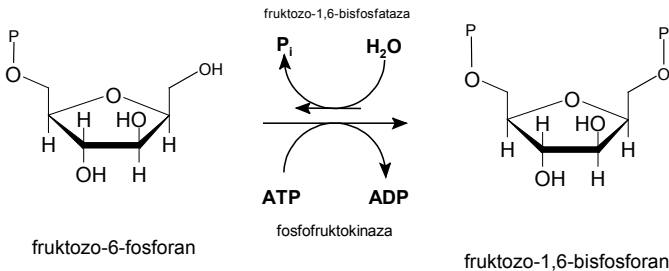
Rys. 6. Przekształcenie -D-glukozy do glukozy-6-fosforanu przy współudziale heksokinazy i ATP [30]

Etap 2, to proces, w którym glukozy-6-fosforan przy współudziale izomerazy glukozyfosforanowej ulega procesowi izomeryzacji (Rys. 7.).



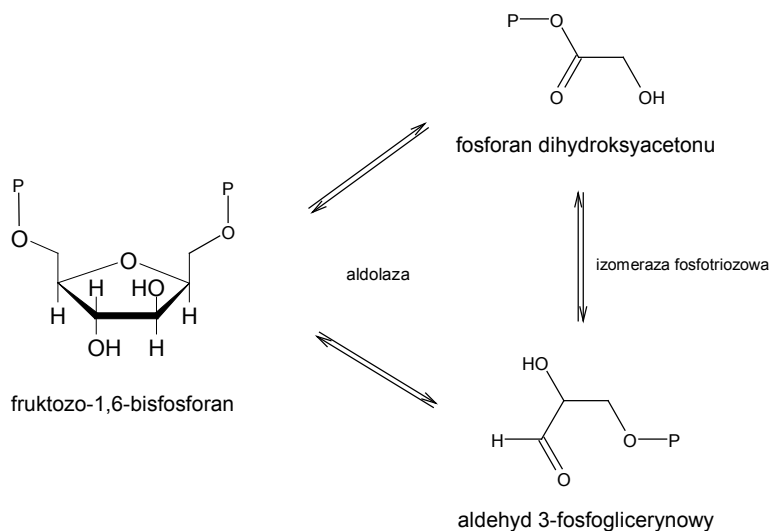
Rys. 7. Izomeryzacja glukozy-6-fosforanu przez izomerazę glukozyfosforanową do fruktozy-6-fosforanu [30]

Kolejnym etapem po izomeryzacji glukozy-6-fosforanu, jest fosforylacja przy pierwszym atomie węgla przez fosforofruktokinazę przedstawioną na rysunku 8.



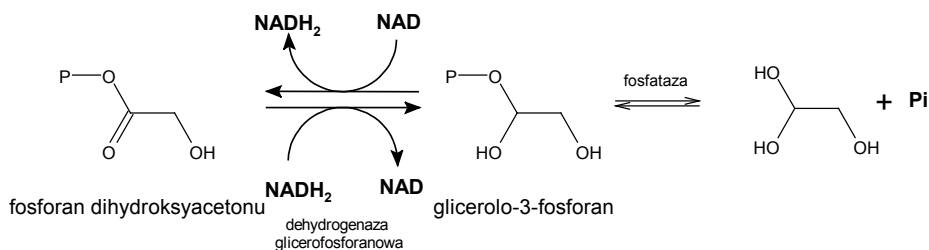
Rys. 8. Fosforylacja fruktozy-6-fosforanu przy udziale fosforofruktokinazy

Etap 4, po wytworzeniu fruktozo-1,6-bisfosforanu, polega na rozszczepieniu cząsteczki przez aldolazę fruktozobisfosforanową do dwóch różnych cząsteczek triozofosforanu (fosforan dihydroksyacetonu i aldehyd 3-fosfoglicerynowy), będących w równowadze chemicznej dzięki izomerazie triozofosforanowej (Rys. 9)



Rys. 9. Rozszczepienie fruktozo-1,6-bisfosforanu przez aldolazę fruktozobisfosforanową

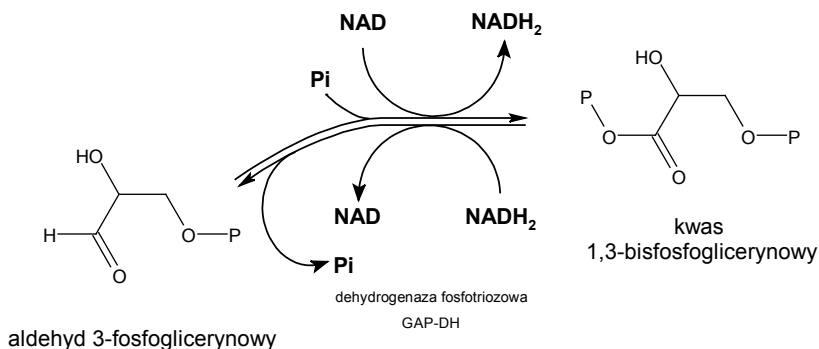
Etap piąty to redukcja fosforanu dihydroksyacetonu do glicerolo-3-fosforanu, a następnie jego hydroliza z udziałem glicerolo-1-fosfatazy do propanotriolu i jonów ortofosforanowych(V), co przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Redukcja fosforanu dihydroksyacetonu do glicerolo-3-fosforanu przy udziale dehydrogenazy glicerofosforanowej i hydroliza produktu do propanotriolu

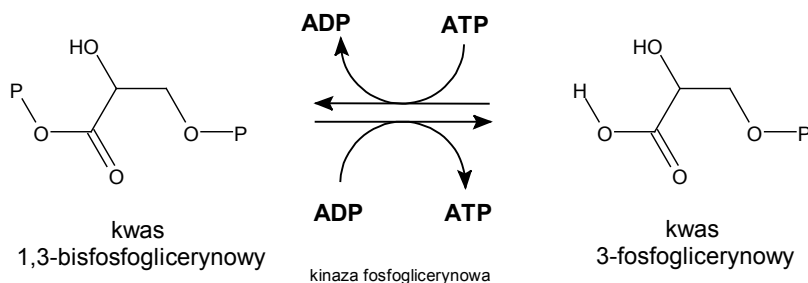
Etap 6 jest jedną z najważniejszych przemian procesu glikolizy tak pod względem energetycznym jak i dla przebiegu innych reakcji prowadzących do aldehydo-

6-fosforanu. Grupa aldehydowa zostaje w pierwszej kolejności dołączona do grupy wodorosiarczkowej dehydrogenazy aldehydu fosfoglicerynowego, a wodór zostaje przeniesiony na dinukleotyd nikotynoamidoadeninowy. Poprzez wymianę grupy S-enzym na ortofosforan(V) energia zostaje zachowana w postaci kwasu 1,3-bisfosfo-glicerynowego, a właściwie w 1-fosforanie (rys. 11.) [28].



Rys. 11. Wysokoenergetyczna przemiana aldehydu 3-fosfoglicerynowego przy współudziale GAP-DH do kwasu 1,3-bisfosfoglicerynowego

Kolejnym etapem przemian zachodzących podczas fermentacji glukozy do etanolu jest przekazanie bogatego w energię ortofosforanu przez kinazę fosfoglicerynianową do adenosynodwufosforanu (ADP) z wytworzeniem ATP, co pokazuje rysunek 12.



Rys. 12. Przemiana kwasu 1,3-bisfosfoglicerynowego przy współudziale kinazy fosfoglicerynowej do kwasu 3-fosfoglicerynowego z wytworzeniem ATP

Ważną informacją dla sterowania procesem katabolizmu glukozy jest fakt, iż utlenianie aldehydu 3-fosfoglicerynowego zależy nie tylko od obecności enzymu ale również od obecności jonów ortofosforanowych(V) i ADP. Brak którego-

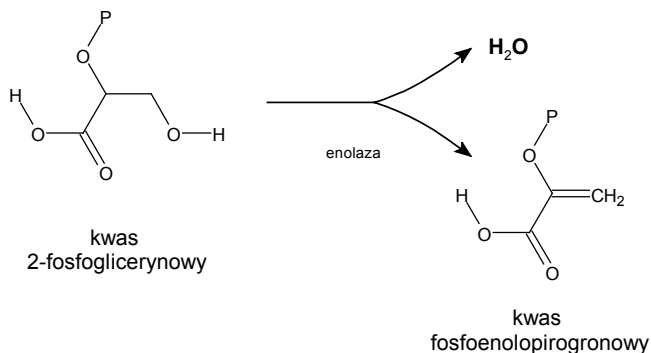
kolwiek czynnika powoduje natychmiastowe przerwanie procesu glikolizy (efekt Pasteura) [28].

Następnie kwas 3-fosfoglicerynowy zostaje przekształcony w kwas 2-fosfoglicerynowy w obecności fosfogliceromutazy, co pokazuje rysunek 13.



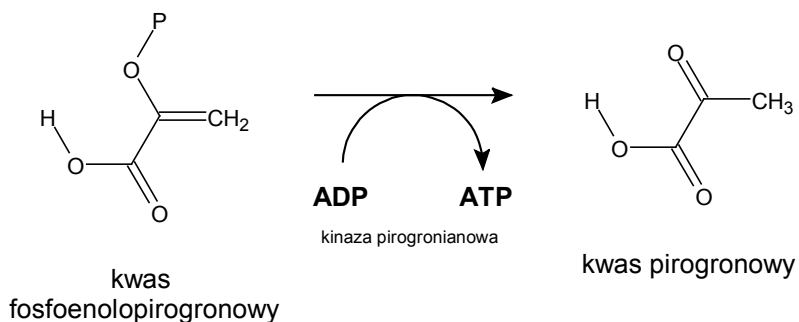
Rys. 13. Działanie fosfogliceromutazy na kwas 3-fosfoglicerynowy

Dalszym etapem jest przekształcenie kwasu 2-fosfoglicerynowego przy współdziałaniu enolazy do kwasu fosfoenolopirogronowego jak pokazano na rysunku 14.



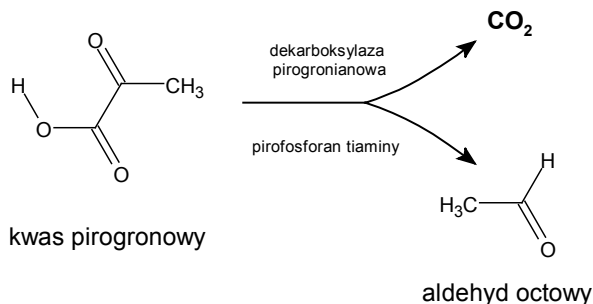
Rys. 14. Proces enolizacji kwasu 2-fosfoglicerynowego do kwasu fosfoenolopirogronowego

Bogata w energię grupa ortofosforanowa(V) zostaje przeniesiona na ADP przez enzym – kinazę pirogronianową. Powstający w tej fazie procesu kwas pirogronowy, jest ważnym prekursorem w wielu innych procesach przebiegających w komórce (Rys. 15)

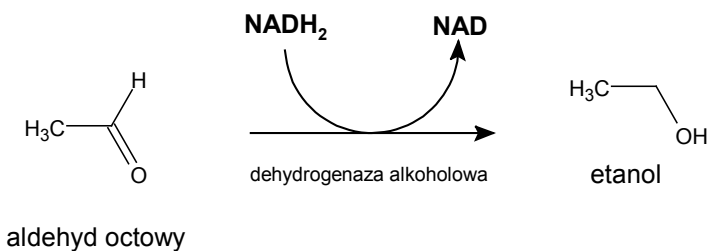


Rys. 15. Powstawanie kwasu pirogronowego z udziałem kinazy pirogronianowej

Przemiana kwasu pirogronowego w etanol dla drożdży *Saccharomyces cerevisiae* jest procesem przebiegającym w dwóch etapach. Pierwszy z nich (rys. 16) to przemiana w aldehyd octowy przy współdziałaniu dekarboksylazy pirogronianowej i pirofosforanu tiaminy. Drugi (rys. 17) polega na redukcji aldehydu przy współdziałaniu dehydrogenazy alkoholowej. Donorem wodoru jest postać zredukowana NAD – NADH<sub>2</sub>.

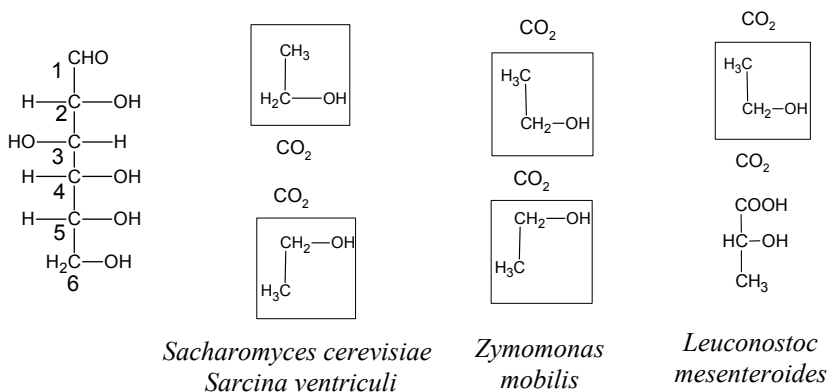


Rys. 16. Dekarboksylacja kwasu pirogronowego

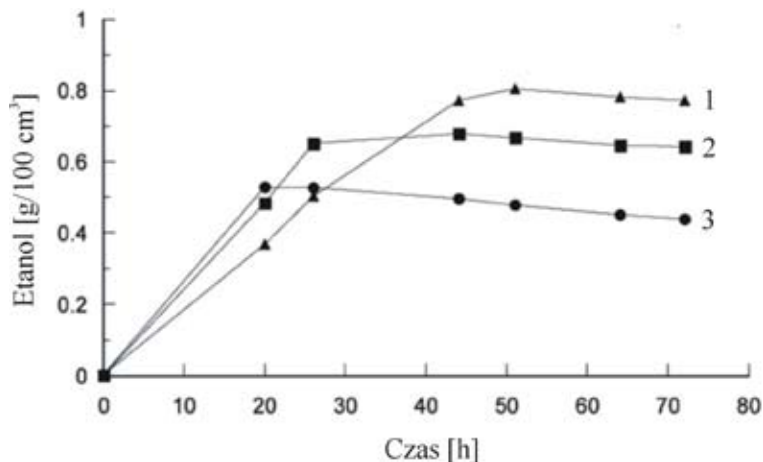


Rys. 17. Redukcja aldehydu octowego do etanolu

Wśród wszystkich zbadanych do tej pory bakterii jedynie *Sarcina ventriculi* wytwarza etanol w taki sam sposób jak drożdże. Bakteria *Zymomonas mobilis*, rozkłada cukier w szlaku 2-keto-3-deoksy-6-fosfoglukonianowym. Pochodzenie węgla w etanolu ze szkieletu węglowego glukozy rozłożonej w wyniku fermentacji przez różne organizmy przedstawiono na rysunku 18.



Rys. 18. Pochodzenie atomów węgla w cząsteczce etanolu ze szkieletu węglowego glukozy [41]



Rys. 19. Ilość otrzymanego etanolu w zależności od czasu prowadzenia fermentacji, dodatek H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [%]: 1 – 1,25, 2 – 1,5, 3 – 1,75 [28]

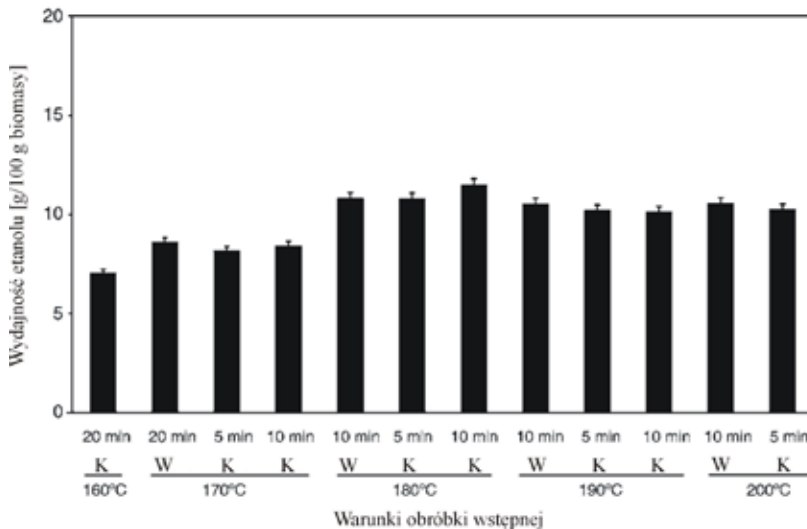
Na całym świecie prowadzone są na szeroką skalę badania nad otrzymywaniem etanolu – wprowadza się nowe surowce, szczepy, optymalizuje warunki fermentacji. Przykładowo, El Asli i Qatibi [31] zaproponowali zagospodarowanie odpadowej

biomasy roślinnej, powstałej podczas wytwarzania oliwy, w kierunku „bioetanolowym”. Obróbka wstępna polegała na dodaniu  $H_2SO_4$ , który powodował hydrolizę cukrów i rzutował na późniejszą ilość otrzymanego etanolu (rysunek). Otrzymaną „pulpę” gotowano przez 10 minut w temperaturze  $160^\circ C$ . Fermentację prowadzono z wykorzystaniem *E. coli* FBR5.

Z kolei, Ballesteros i współpracownicy [32] pozyskiwali bioetanol ze słomy pszenicznej. Autorzy stwierdzili, iż odpowiednie przygotowanie surowca ma duże znaczenie dla ilości otrzymanego bioetanolu. Najwyższą wydajność otrzymano gotując biomasę z  $H_2SO_4$  (kwas stanowił 0,9% mas.) w czasie 10 minut w temperaturze  $180^\circ C$  (rysunek 20).

Etanol jako biopaliwo powinien być wolny od wody, gdyż działa ona korozyjnie i powoduje rozwarstwienie się paliwa. Podczas oddestylowania etanolu, po procesie fermentacji, uzyskuje się tzw. mieszaninę azeotropową o składzie: 95,6% mas. EtOH i 4,4% mas.  $H_2O$ . Z tego powodu, ostatnim etapem otrzymywania bioetanolu musi być proces odwodnienia, do poziomu poniżej 0,4% mas. wody. Odwodnienie prowadzi się można poprzez zastosowanie jednej z trzech technik [13]:

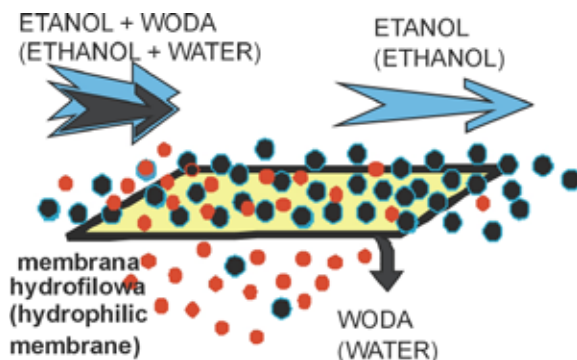
1. destylacji ekstrakcyjnej trójskładnikowej z cykloheksanem,
2. osuszania na sitach molekularnych oraz
3. perwaporacji.



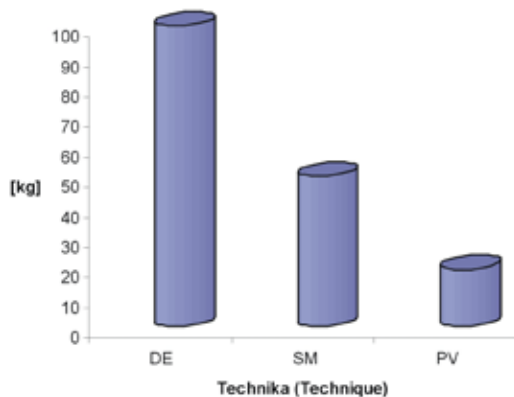
Rys. 20. Wydajność etanolu w zależności od warunków obróbki wstępnej, W – woda, K – kwas ( $H_2SO_4$ ) [32]

Dwie pierwsze techniki są powszechnie znane i szeroko wykorzystywane w skali przemysłowej, mimo wysokich kosztów eksploatacyjnych i konieczności regeneracji bądź to cykloheksanu (w przypadku destylacji) bądź sit molekularnych.

Obecnie, coraz częściej stosuje się perwaporację, wykorzystującą membrany ceramiczne lub polimerowe [33]. Odwodnianie etanolu z wykorzystaniem perwaporacji polega na doprowadzeniu mieszaniny do kontaktu z jedną stroną hydrofilowej membrany (rysunek 21).



Rys. 21. Schemat rozdziału mieszaniny ciekłej techniką perwaporacji [13]



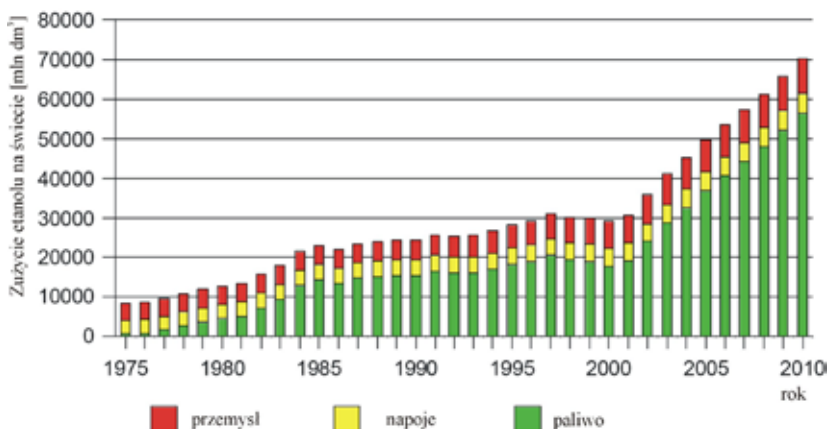
Rys. 22. Zużycie pary wodnej na odwodnienie 100 litrów etanolu (DE – destylacja ekstrakcyjna, SM – sита molekularne, PV – perwaporacja) [13]

W wyniku zastosowania obniżonego ciśnienia po drugiej stronie membrany, woda jest odparowywana, a strumień retentatu wzbogacany w etanol. W metodzie perwaporacji nie ma etapu regeneracji – proces jest ciągły i daje produkt o niezmiennych parametrach jakościowych, a zużycie energii (np. pary wodnej) jest zdecydowanie niższe niż w przypadku zastosowania dwóch pozostałych technologii. W Polsce obserwuje się rosnące zainteresowanie perwaporacją. Po okresie fascynacji techniką sit molekularnych w latach 90-tych XX wieku, producenci coraz



częściej decydują się na obniżenie kosztów odwodnienia i zmianę lub modernizację posiadanej technologii.

Znaczenie bioetanolu jako paliwa rośnie z każdym rokiem (rys. 23). Przewiduje się, iż w 2010 roku światowa produkcja etanolu przekroczy 70000 mld  $\text{dm}^3$ , z czego 80% będzie to bioetanol [1, 34].

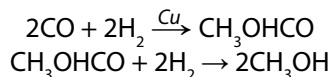


Rys. 23. Zużycie etanolu na świecie [34]

## Biometanol

Metanol (alkohol metylowy) o wzorze  $\text{CH}_3\text{OH}$ , produkowano dawniej w procesie suchej destylacji drewna w temperaturze  $500^\circ\text{C}$ , obecnie zaś produkowany jest przez utlenienie metanu z gazu ziemnego lub na drodze syntezy chemicznej. Można też wytwarzać metanol z gazu ziemnego lecz proces ten wymaga dużych nakładów energii zwiększając emisję  $\text{CO}_2$ . Metanol jako paliwo silnikowe używany jest w postaci czystej czyli nie przetworzonej lub jako komponent tlenowy do benzyny w postaci MTBE (eter metylo-*tert*-butylowy). Metanol uważany jest często za przyszłościowe, wydajne paliwo wykorzystywane w nowych rodzajach ogniw paliwowych typu DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), wewnątrz których jest on przekształcany do wodoru. Ogniw paliwowe tego typu przetwarzają energię chemiczną na elektryczną. Sprawność takiej przemiany jest prawie dwukrotnie wyższa od sprawności układów wykorzystujących klasyczny proces spalania w silnikach spalinowych ( $<40\%$ ). Sprawność ogniw paliwowych waha się obecnie od 45 do 85%. Spośród sześciu typów podstawowych ogniw paliwowych szczególne znaczenie mają ogniwa PEM (Proton Exchange Membrane), w których paliwem jest wodór i ogniwa DMFC [35, 36].

Biometanol można produkować również w wyniku gazyfikacji. Punktem wyjścia jest produkt reakcji pirolizy i gazyfikacji – gaz wodny ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ), który reaguje w obecności miedzi jako katalizatora:



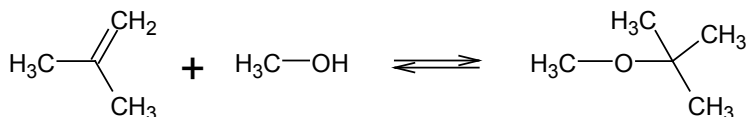
Otrzymany biometanol może być spalany bezpośrednio w silnikach spalinyowych jako paliwo samodzielne bądź z dodatkiem benzyny lub stanowić paliwo ogniów paliwowych [35–37].

Hasegawa i współpracownicy [37] porównywali produkcję biometanolu i bioetanolu. Autorzy dowodzą, iż wytwarzanie biometanolu z biomasy cechuje się wyższą wydajnością, mniejszą emisją zanieczyszczeń, ale wyższym zużyciem energii potrzebnej do jego wytworzenia.

## Bio-etry

Etery o wzorze ogólnym  $\text{R-O-R}'$  można uważać za alkilowe lub aryłowe pochodne wody, lub pochodne alkoholi, z których się je zazwyczaj otrzymuje [14].

Bio-eter metylo-*tert*-butylowy MTBE i bio-eter etylowo-*tert*-butylowy ETBE powstają w wyniku reakcji nienasyconych węglowodorów z biometanolem lub bioetanolem w obecności odpowiedniego katalizatora (rys. 24):



Rys. 24. Schemat reakcji syntezy MTBE z metanolu oraz izobutenu [13]

Syntezę eterów MTBE i ETBE prowadzi się zwykle z mieszaniny węglowodorów zawierających 20–50% izobutenu. Reakcja prowadzona jest w temperaturze ok. 100°C, z wykorzystaniem katalizatora i przy 20–30%-owym nadmiarze alkoholu, w stosunku do stechiometrii. Produktem reakcji jest mieszanina eteru, alkoholu oraz nieprzereagowanych węglowodorów, tworzących szereg układów azeotropowych. Mieszanina poreakcyjna poddawana jest wieloetapowej separacji w celu wyodrębnienia frakcji:

- eterowej, służącej jako dodatek do benzyn,
- węglowodorowej, wykorzystywanej do dalszego przetwarzania oraz
- alkoholowej, zwracanej do syntezy eteru.

Na świecie stosowanych jest kilkanaście różnych technologii prowadzących do syntezy MTBE, ETBE oraz pozostałych eterów. W ostatnich latach z powodzeniem

zastosowano perwaporację do etapu usuwania alkoholu ze środowiska poreakcyjnego, zwiększając w znacznym stopniu wydajność syntezy danego eteru [39].

W tabeli 2 zestawiono wybrane właściwości dodatków tlenowych do paliw. Wszystkie te związki wykazują zbliżone właściwości, jeśli chodzi o liczbę oktanową. Produkcja ETBE jest bowiem dogodnym sposobem wprowadzenia etanolu do benzyn, pozwalając na pogodzenie interesów przemysłu petrochemicznego i producentów rolnych [13].

Tabela 2. Porównanie właściwości dodatków tlenowych do paliw [13]

Związek	Zawartość tlenu [% mas]	Liczba oktanowa	T <sub>wrzenia</sub> [°C]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Wartość energetyczna [MJ/kg]
Metanol	49,9	105	65	0,796	19,95
Etanol	34,7	102	78	0,794	26,68
MTBE	18,2	103	55	0,745	35,18
ETBE	15,7	102	72	0,745	36,29
TAME	15,7	98	86	0,776	36,28

## Biopaliwa alkoholowe w Polsce

W Polsce do produkcji alkoholu wykorzystywany jest spirytus surowy produkowany przez stare, przestarzałe gorzelnie. Większość gorzelnii to zakłady małe, o średniej produkcji alkoholu surowego około 1 Tg rocznie, niewiele z nich produkuje 3 000 m<sup>3</sup> alkoholu i wykorzystuje wywar. Ostatnio rośnie zainteresowanie budową gorzelnii przemysłowych produkujących 100 m<sup>3</sup> spirytusu na dobę, czyli ponad 30 000 m<sup>3</sup> rocznie. Takich gorzelnii jest w kraju około 20, 10 innych jest w sferze planowania i uzgadniania szczegółów. Pomimo tego, że są to gorzelnie produkujące trzydziestokrotnie więcej spirytusu niż przeciętna gorzelnia rolnicza, to i tak jest to dziesięć razy mniej niż budowane nowoczesne fabryki etanolu. Na polski rynek trafi pokaźna ilość alkoholi z UE i spoza jej obszaru w postaci różnego rodzaju koncentratów, rozpuszczalników, płynów do spryskiwaczy i innych produktów, wobec których nie istnieją tak rygorystyczne ograniczenia celne, jakie obowiązują rodzimych producentów i dostawców spirytusu surowego i bioetanolu. Opłacalność takich przedsięwzięć wynika ponadto z bardzo korzystnych relacji ekonomicznych dla importerów. Obowiązujące w Polsce prawo celne skutecznie hamuje natomiast uruchamianie nowych gorzelnii i przemieszczanie spirytusu pomiędzy gorzelniami a podmiotami skupującymi, w tym zakładami odwodnienia [41].

Miastem, które jako pierwsze wprowadziło bioetanol w 2007 roku był Słupsk [42].



Rys. 25. Autobus MZK na E95 w Słupsku [39]

W załączniku 2 przedstawiono wykaz producentów biopaliw alkoholowych i eterowych w Polsce [43].

## Literatura

1. H.L. MacLean, L.B. Lave, *Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies*, Progress in Energy and Combustion Science 29, 1–69, 2003.
2. A.K. Agarwal, *Biofuels (alcohols and biodiesel applications as fuel for internal combustion engines)*, Progress in Energy and Combustion Science 33, 233–271, 2001.
3. <http://www.nicolaus-august-otto.de> (wejście 12.11.09).
4. A.Y. Krylowa, E.A. Kozyukov, A.L. Lapidus, *Ethanol and diesel fuel from plant raw materials: A review*, Solid Fuel Chemistry 42(6), 358–364, 2008.
5. [http://www.speedace.info/automotive\\_directory/car\\_images](http://www.speedace.info/automotive_directory/car_images) (wejście 12.11.09).
6. <http://www.v2rocket.com> (wejście 12.11.09).
7. N. Polar, K.J. Moore, *Cold war submarines: the design and construction of U.S. and soviet submarines, 1945–2001*, Brassey's, Inc., Dulles 2003.
8. <http://www.agroenergetyka.pl> (wejście 09.11.09).
9. S. Matsuoka, J. Ferro, P. Arruda, *The Brazilian experience of sugarcane ethanol industry*, In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant 5, 375–381, 2009.
10. <http://www.velocityaircraft.com/the-airplanes.html> (wejście 10.11.09).
11. K. Taylor, W. Iwanowski, *Spirytusowe mieszanki napędowe*, Przemysł Chemiczny 10, 181–206, 1926.
12. <http://www.its.hg.pl/bioetanol.html> (wejście 09.11.09).
13. B. Igliński i in., *Ekologiczne skutki stosowania biopaliw*, Ekologia i Technika 13(4), 152–158, 2005..

14. <http://pl.wikipedia.org> (wejście 09.11.09).
15. <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/summary> (wejście 09.11.09).
16. M. Bzowska-Bakalarz, K. Gołacki, *Produkcja buraków cukrowych na tle zmian technologicznych i strukturalnych w regionie lubelskim*, MOTROL 5, 36–43, 2003.
17. M. Pieniżek, J. Kusza, *Czy wiesz, że...*, Burak Cukrowy 3, 8–14, 2009.
18. S. Podlaski, *Burak cukrowy jako surowiec do produkcji etanolu*, Gazeta Cukrownicza 4, 127, 2007.
19. M. Wojtczak, *Perspektywy i ograniczenia w produkcji biopaliw na bazie buraka cukrowego*, Materiały konferencji „Postęp techniczny w przemyśle cukrowniczym”, Zakopane 8–9 maja 2009.
20. I. Niedziółka, M. Szymanek, *Przemysłowe i energetyczne wykorzystanie ziarna kukurydzy*, MOTROL 5, 115–121, 2003.
21. J. Nowak *et al.*, *Effect of the corn grain storage method on saccharification and ethanol fermentation yield*, Acta Scientiarum Polonorum. Technologia Alimentaria 7(1), 19–27, 2008.
22. S-Y. Liu, Ch-Y. Lin, *Development and perspective of promising energy plants for bioethanol production in Taiwan*, Renewable Energy 34, 1902–1907, 2009.
23. <http://www.agro-plant.pl> (wejście 09.11.09).
24. J. G. Rohwer, *Atlas roślin tropikalnych*, Bertelsmann Media, Warszawa 2002.
25. [http://www.kolumbijsko.com/kolumbia/taka\\_jest\\_kolumbia](http://www.kolumbijsko.com/kolumbia/taka_jest_kolumbia) (wejście 10.11.09).
26. <http://faostat.fao.org> (wejście 10.11.09).
27. W. Szewczuk, *Zarys możliwości wykorzystania etanolu jako odnawialnego źródła energii*, <http://www.mi.gov.pl> (wejście 12.11.09).
28. H. G. Schlegel, *Mikrobiologia ogólna*, PWN, W-wa, 2005.
29. K. Karhumaa, R. Fromanger, *High activity of xylose reductase and xylitol dehydrogenase improves xylose fermentation by recombinant Saccharomyces cerevisiae*, Applied Microbiology and Biotechnology, 73, (2007), 1039–1046
30. J. M. Berg, J. L. Tymoczko, L. Stryer, *Biochemia*, PWN, W-wa, 2005.
31. A. El Ali, A-I. Qatibi, *Ethanol production from olive cake biomass substrate*, Biotechnology and Bioprocess Engineering 14, 18–122, 2009.
32. I. Ballesteros *et al.*, *Ethanol production from steam-explosion pretreated wheat straw*, Applied Biochemistry and Biotechnology 129–132, 496–508, 2006.
33. M. Lewandowska, W. Kujawski, *Ethanol production from lactose in a fermentation/pepervaporation system*, Journal of Food Engineering 79, 430–437, 2007.
34. <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g30819b40j.pdf> (wejście 05.11.09).
35. A. Demirbas, *Biofuels sources*, Biofuel Policy, biofuels economy and global biofuels projections, Energy Conversion & Management 49, 2106–2116, 2008.
36. E. Garścia, W. Ciechanowicz, *Biometanol szansą dla wsi*, Aura 1, 11–16, 2003.
37. T. Chmielniak, M. Ściążko, *Co-gasification of biomass and coal for methanol synthesis*, Applied Energy 74, 393–403, 2003.
38. F. Hasegawa, S. Yokoyama, K. Imou, *Methanol or ethanol produced from woody biomass: Which is more advantageous?*, Bioresource Technology 101, 109–111, 2010.
39. E. Maus, H. Brueschke, *Separation of methanol from methylesters by vapour permeation: experiences of industrial applications*, Desalination, 148, 315–319, 2002.
40. L. Jarosz, *Rynek bioetanolu w Polsce*, Zeszyty Naukowe. Politechnika Łódzka 125, 243–246, 2004.

41. J. Inorowicz, *Widmo bankructwa nadal wisiąo nad gorzelniami rolniczymi*, Przemysł Spirytusowy 1, 54–55, 2008.
42. [http://www.autoflesz.pl/artykuly/490,Bioetanol\\_pierwsze\\_autobusy\\_w\\_Polsce\\_dla\\_Slupska.html](http://www.autoflesz.pl/artykuly/490,Bioetanol_pierwsze_autobusy_w_Polsce_dla_Slupska.html) (wejście 12.11.09).

## OLEJE ROŚLINNE, BIODIESEL

XIX wiek to początki motoryzacji, powstały projekty pierwszych silników zapłonowych w których stosowano paliwo pochodzenia roślinnego [1]. Twórcą silnika na olej arachidowy był Rudolf Diesel. Swoją projekt nowego rodzaju silnika ogłosił w lutym 1892 i opatentował 28 lutego 1893. W roku 1897 skonstruował wysokoprężny spalinowy silnik tłokowy o samoczynnym zapłonie, wywołanym przez sprężenie powietrza do 3,5 MPa. Ten rodzaj silnika wysokoprężnego, zwany odtąd silnikiem Diesla albo po prostu dieslem, pracował na ciężkim paliwie ciekłym, w którym zapłon paliwa wtrysniętego do komory spalania następuje od powietrza nagrzanego wskutek sprężania. W tym samym roku (1897) silnik został wdrożony do produkcji [2, 3].

W 1900 roku na Wystawie Światowej w Paryżu pojawił się zaprojektowany przez Rudolfa Diesla silnik, który wykorzystywał jako paliwo 100% olej arachidowy. 12 lat później, w swojej rozprawie patentowej, pisał: *„Chociaż wykorzystanie oleju roślinnego jako paliwa jest w obecnych czasach zagadnieniem o niewielkim znaczeniu, to nie jest wykluczone, że z biegiem lat paliwa tego rodzaju będą zyskiwać na znaczeniu, podobnie jak ma to miejsce w przypadku paliw węglu- i ropopochodnych obecnie.”* [4].

Po śmierci Rudolfa Diesla w 1913 roku silniki wysoko sprężynowe zostały przystosowane do pracy na ropę, a w latach 30-tych i 40-tych XX wieku oleje roślinne sporadycznie już zastępowały paliwa kopalne. W roku 1940 w USA, firma Colgate opatentowała transestryfikację biolipidów w poszukiwaniu technologii produkcji gliceryny, wytwarzanej na potrzeby nowych materiałów wybuchowych [5].

Powrót do pierwotnej myśli Rudolfa Diesla upatrującej w olejach roślinnych doskonałe paliwo transportowe, spowodowała chwiejna sytuacja na rynku paliwowym i związane z tym rosnące ceny ropy naftowej w latach siedemdziesiątych XX wieku. Badania nad zastosowaniem i produkcją biodiesla z oleju słonecznikowego drogą trans estryfikacji przeprowadzono ponownie w 1979 roku w Południowej Afryce. W roku 1987 austriacka firma Gaskoks zakupiła technologie biodiesla i zbudowała w 1989 roku pierwszą instalację przemysłową do produkcji tego biopaliwa z oleju rzepakowego, o wydajności 30000 ton/rok. Następne instalacje powstawały szybko w Czechosłowacji, Francji, Niemczech i Szwecji,

a do roku 1998 biodiesel produkowano już w 21 krajach. We Francji w 1990 roku uruchomiono wiele lokalnych wytwórni biodiesla poprzez trans estryfikację oleju rzepakowego [5, 6].

## Rośliny oleiste

Do grupy roślin oleistych zalicza się te gatunki roślin uprawnych, które gromadzą w swoich organach co najmniej 15–20% tłuszczu. Tłuszcz jako materiał zapasowy jest najczęściej magazynowany w nasionach lub mięsistych częściach owocu. Poza tłuszczem rośliny oleiste gromadzą duże ilości białka [7]. Około 5–6% światowej produkcji roślin oleistych zużywana jest jako materiał siewny oraz jako pasza dla zwierząt, 8% zużywane jest do bezpośredniej konsumpcji przez ludzi, a reszta, czyli około 86%, poddawana jest przerobowi na oleje i śruty [8]. Źródła tłuszczów na świecie [4, 9]:

- jadalne: sojowy, rzepakowy, słonecznikowy, jęczmienny, palmowy, bawełniany, arachidowy, owsiany, ryżowy, sorgo, pszeniczny, kukurydziany, sezamowy, sojowy, dyniowy, konopny, z orzechów laskowych, z orzechów włoskich, z pestek winogron, oliwa z oliwek, itd.,
- niejadalne: migdałowy, zaślazowy, andiroba, palmowy babassu, musztardowy, rycynowy, jatrofowy, jojoba, wawrzynowy, mahua, figowy, łososiowy,
- tłuszcze zwierzęce: smalec, łój, tłuszcz drobiowy, rybny,
- oleje pozyskiwane z bakterii, alg, grzybów.

Pomimo tego, że w skład kompleksu rynku roślin oleistych, wg statystyk FAO, wchodzi ponad 20 gatunków roślin oleistych, to globalny rynek zdominowany został przez cztery rośliny: soję, palmę oleistą, rzepak i słonecznik. Grupa tych czterech roślin określana jest mianem wielkiej czwórki i jest ona odpowiedzialna w głównej mierze za wzrost produkcji i obrotów olejami roślinnymi na światowym rynku. Globalna produkcja olejów roślinnych wzrosła z 18,862 w 1961 do 117,813 mln ton w 2005 roku, w tym produkcja oleju sojowego wzrosła z 2,981 w roku 1961 do 32,597 mln w 2005 roku, oleju palmowego z 1,479 do 32,970 mln ton, oleju rzepakowego z 1,099 do 13,912 mln ton oraz słonecznikowego z 1,946 do 10,374. Produkcja pozostałych olejów roślinnych wzrosła z 11,358 do 27,960 mln ton. Ogólny udział w produkcji olejów sojowego, palmowego, rzepakowego i słonecznikowego wzrósł z 40% w 1961 roku do 76% w 2005 roku [8].

Poniżej, przedstawiono syntetyczny opis czterech najważniejszych roślin oleistych, ze szczególnym naciskiem na rzepak, który najważniejszą główną rośliną oleistą w Polsce.

Palma oleista (*Elaeis guineensis*) pochodzi z zachodniej Afryki. Jej uprawa na plantacjach rozpoczęła się na początku ubiegłego wieku. W 1848 roku Holendrzy sprowadzili pierwsze cztery palmy oleiste do Indonezji. W minionym półwieczu uprawa żadnej rośliny oleistej nie była tak intensywna, jak omawianej palmy. Surowy olej palmowy jest pierwotnym produktem z przetwórstwa pomarańczowo-czerwone-



go miąższu. Zebrane owoce palmy trzeba jednak od razu przetwarzać na miejscu, aby uniknąć niszczących procesów gnilnych. Z 1 ha plantacji uzyskuje się 2–4 ton oleju. Podczas, gdy w miąższu zawartość kwasów tłuszczowych wynosi około 50%, to ten z ziarna zawiera ich aż 80% i dlatego jest szczególnie wartościowy dla celów spożywczych. Śruta ze zmielonych pestek bywa wartościową karmą zwierzęcą [10–12].

Słonecznik (*Helianthus L.*) – rodzaj roślin z rodziny astrowatych. Jest to jednoroczna roślina z rodziny złożonych pochodząca z Meksyku, obecnie uprawiana jest w wielu krajach dla jadalnych nasion zawierających około 40% tłuszczu zawierającego aż 88% wielo- nienasyconych kwasów tłuszczowych (62% kwasu linolowego i 26% kwasu oleinowego). Najwartościowszy odżywczo jest olej słonecznikowy nie poddany podgrzewaniu (smażenie), gdyż podczas przegrzania kwasy NNKT (Niezbędne Nienasycone Kwasy Tłuszczowe) ulegają rozkładowi. Owocem jest niełupka składająca się ze skórzastej owocni i nasienia. Słonecznik był i jest stosowany jako roślina lecznicza [2, 13].



Rys. 1. Słonecznik (*Helianthus L.*) (fot. D. Kamiński)

Soja (*Glycine Willd.*) – roślina z rodziny bobowatych, nazywana często soją zwyczajną [14]. Nasiona soi są bardzo ważnym surowcem do produkcji pasz i stanowią też cenny pokarm dla człowieka. Produkty spożywcze wytwarzane z soi są szczególnie chętnie włączane do diety przez wegetarianów, jako alternatywa dla mięsa. Na bazie nasion soi wytwarza się takie produkty, jak: olej sojowy, mączka

sojowa, kasza sojowa, mleko sojowe, tofu (doufu) czy lecytyna. Preparaty z soi dodawane są do różnych przetworów, m. in. konserw mięsnych, wędlin. Nasiona soi zawierają bardzo dużo w porównaniu z innymi roślinami, bo aż 30–50 % białka, przy czym mają bardzo odpowiedni dla człowieka skład aminokwasów. Ponadto, zawierają dużo tłuszczu (14–24%), oraz witaminy z grupy B [2]. W krajowym rejestrze odmian zarejestrowanych jest dziewięć odmian soi (Aldana, Augusta, Jutro, Mazovia, Nawiko, OAC Visio, Progres, Pripyat, Yanina), z których dwie pochodzą z Białorusi (Pripyat, Yanina), a jedna z Kanady (OAC Vision). Wśród odmian krajowych odmianę Jutro wpisano do rejestru bez badań WGO (wartości gospodarczej odmian) w Polsce [14].

W produkcji roślin oleistych soja jest na świecie najczęściej uprawianą rośliną i zajmuje pod względem powierzchni uprawy 55% areалу przeznaczanego na upraw roślin oleistych. Soja jest bardzo ważną rośliną dla przemysłu spożywczego, chemicznego, farmaceutycznego, kosmetycznego, a ostatnio również energetycznego [15].

Kapusta rzepak, rzepak (*Brassica napus* L.) – gatunek rośliny dwuletniej lub byliny, należący do rodziny kapustowatych. Jak wykazały badania genetyczne jest krzyżówką kapusty polnej (*Brassica campestris*) i kapusty warzywnej (*Brassica oleracea*) [16].



Rys. 2. Rzepak (*Brassica napus* L.) (fot. D. Kamiński)

Rzepak, wywodzący się z rodziny kapust liczącej ponad sto gatunków, znany jest w różnych odmianach. Nasiona tej rośliny są źródłem oleju do potraw i oświetlenia pomieszczeń od ponad czterech tysięcy lat. Uprawiany w Polsce

rzepak był dotychczas wykorzystywany głównie jako surowiec do produkcji oleju jadalnego [17].

W naszym klimacie możliwa jest uprawa rzepaku zarówno ozimego, jak i jarego. Uprawa tego ostatniego jest jednak mało opłacalna, ale szerszego znaczenia nabiera w momencie wymarzania rzepaku ozimego. Rzepak jest rośliną o wysokich wymaganiach glebowych, w związku z czym tylko na glebach dobrych i bardzo dobrych można uzyskać dobre i stabilne plony. Pewne ilości rzepaku mogą być również uprawiane na glebach średnich, ale w tych warunkach plony będą już niższe. Pod uprawę rzepaku ozimego nadają się szczególnie gleby klasy: I, II, IIIa i IIIb (gleby kompleksów pszennych bardzo dobrych i dobrych), ale można również osiągnąć dobre wyniki uprawiając rzepak na glebach klasy: IVa i IVb, pod warunkiem, że gleby te znajdują się w wysokiej kulturze [17–19].

Rzepak ozimy jest rośliną dobrze rosnącą głównie w rejonach o wysokiej wilgotności powietrza, potwierdzają to wysokie plony uzyskiwane w klimacie morskim, także na wybrzeżach Morza Bałtyckiego. W Polsce plony rzepaku ozimego są wyższe w rejonach o opadach przekraczających 525 mm w skali roku, niż w rejonach o opadach niższych. Rzepak ozimy jest „niewrażliwy lub tylko nieznacznie wrażliwy” na niedobory wody w okresie od wschodów do zahamowania vegetacji przed zimą. Roślina ta dzięki głęboko sięgającemu korzeniowi palowemu, pozwalającemu pobierać wodę z głębszych warstw gleby potrafi dobrze przetrwać nawet 3-6 tygodniowe susze, a w warunkach polowych polskiego klimatu nie występują jesienią susze przekraczające okres 9 tygodni. Większym problemem są susze występujące w okresie ruszenia vegetacji na wiosnę aż do osiągnięcia dojrzałości. Rzepak jary natomiast jest bardzo wrażliwy na susze, co związane jest z wysychaniem i opadaniem pąków kwiatowych, powoduje to obniżenie plonu i zawartości tłuszczu w nasionach [16–21].

Zależnie od warunków przeduprawowych (typ i skład chemiczny gleby, przedplon i sposób nawożenia), przyjmuje się różne zabiegi uprawowe. Zabiegi przed-siewne zależnie od jakości gleby mogą obejmować: podorywkę, bronowanie, talerzowanie lub kultywatorowanie. Czynności te mają na celu przygotowanie gleby, pod względem jej struktury do siewu nasion. Podorywka dodatkowo wpływa dodatnio na walkę z chwastami i pozwala na ograniczenie ilości zabiegów popłużnych. Rzepak ze względu na głęboki system korzeniowy reaguje pozytywnie na spulchnianie gleby [16–21].

Rzepak należy do roślin wysoce wrażliwych na termin siewu, dlatego też należy pamiętać o właściwym terminie ściśle dostosowanym do rejonu. Siew spóźniony o 10–14 dni w stosunku do terminu optymalnego, może spowodować obniżenie plonu do 10%. Każdy dzień opóźnienia siewu powoduje obniżenie plonu średnio o 15–50 kg/ha. Zbyt wcześnie zasiany rzepak może w sprzyjających dla niego warunkach, tj. cieplej i wilgotnej jesieni, wybujać, a nawet zakwitnąć. Z drugiej strony, rzepak wysiany zbyt późno, nie zdąży wytworzyć odpowiedniego korzenia palowego przed zahamowaniem vegetacji, w wyniku czego powstanie roślina słaba, mało odporna na warunki zimowania i dająca niski plon. Siewy rzepaku najwcze-

śniej (do 10 sierpnia) należy zakończyć w woj. podlaskim i na wschodnich krańcach woj. warmińsko-mazurskiego [17].

Oprócz chemicznej walki z chwastami można na plantacjach rzepaku zastosować również pielęgnację mechaniczną. Zabiegi te są możliwe pod warunkiem, że wystarczająca jest szerokość międzyrzędzi. Skuteczność mechanicznej walki z chwastami przy odpowiedniej wilgotności gleby jest wysoka, lecz jej pracochłonność jest znacznie wyższa niż w przypadku walki chemicznej. Rzepak jest rośliną, która stwarza szereg trudności podczas mechanicznego zbioru. Wynika to z szybkiej zmiany dojrzałości łanu pod koniec procesu dojrzewania. Rośliny rzepaku w ciągu zaledwie kilku godzin, przy słonecznej pogodzie, są w stanie zmienić diametralnie właściwości mechaniczne swoich owoców. Przyczyną jest duża utrata wody spowodowana dojrzewaniem łuszczyn, co wpływa na wzrost skłonności do ich pęknięcia i osypywania nasion. W większości krajów w których uprawiany jest rzepak w tym również i w Polsce, stosowane są dwie technologie zbioru jedno- i dwuetapowa. Jednoetapowy zbiór rzepaku chociaż daje niewątpliwe korzyści ekonomiczne i organizacyjne, to stosując go zmienia się jednak zasadniczo proces dojrzewania roślin, który przerywany jest dość gwałtownie. Zbiór jednoetapowy powinien rozpoczynać się po uzyskaniu przez rośliny dojrzałości pełnej. Koszenie łanu w terminie wcześniejszym powoduje większą ilość niedomłotów, a tym samym wzrost strat nasion. Ponadto nasiona uzyskane z niedojrzałych roślin są pośladem podatnym na samonagrzewanie i pleśnienie oraz charakteryzują się niskimi walorami technologicznymi [16–21].

Zbiór dwuetapowy realizowany jest przy użyciu kosiarki pokosującej, ścinającej zielone rośliny na pokosy oraz kombajnu, który służy do ich omłotu. Pokosy mogą być omłacane przez kombajn wyposażony w podbieracz do pokosów, bądź też może być zastosowana metoda tzw. „podwójnego cięcia”. W tym przypadku kombajn, aby omłócić pokos ścina ścierną, na której on leży. Dwuetapowy sposób zbioru był przez wiele lat uważany za najbardziej ekonomiczny, przynoszący najniższe straty i pozwalający uzyskać nasiona o najwyższych walorach użytkowych [20, 22].

Dobek [23] przeprowadził badania efektywności ekonomicznej i energetycznej produkcji biodiesla w zależności od stosowanych technologii uprawy rzepaku ozimego. Badania przeprowadzono w latach 2004–2006, w gospodarstwach rolnych województwa zachodniopomorskiego na glebach IIIa i IVa klasy bonitacyjnej. Koszty ponoszone w poszczególnych technologiach składały się z kosztów eksploatacji zastosowanych maszyn, narzędzi i ciągników, pracy ludzkiej oraz materiałów i surowców. Jednostkowy koszt eksploatacji agregatu obliczony był zgodnie z metodyką IBMER, dodatkowo w bilansie uwzględniono koszty przetworzenia nasion rzepaku na biodiesel (tabela 1). Technologia T-1 była technologią konwencjonalną (tradycyjną), w której wykorzystywane były nowoczesne agregaty uprawowe o dużej wydajności. W technologii T-2, przygotowując glebę do siewu – zaraz po zbiorze przedplonu, wykonano bronowanie za pomocą brony talerzowej, a następnie przed siewem kultywatorowanie za pomocą kultywatora podorywkowe-

go. W technologii tej siew wykonano za pomocą agregatu uprawowo-siewnego. Technologia T-3 była technologią siewu bezpośredniego, w której zrezygnowano z przygotowania roli do siewu, a siew wykonano siewnikiem do siewu bezpośredniego bezpośrednio w ściernisko. Efektywność ekonomiczna określona została jako iloraz przychodu z produkcji i przetworzenia rzepaku ozimego na biodiesel oraz kosztów związanych z wyprodukowaniem rzepaku ozimego i przetworzeniem na biopaliwo:

$$E_{ee} = \frac{P_{prz}}{K_{bio}}$$

gdzie:  $E_{ee}$  – efektywność ekonomiczna produkcji i przetworzenia rzepaku ozimego na biodiesel,  $P_{prz}$  – przychód uzyskany ze sprzedaży biodiesla oraz pozostałej biomasy [zł/ha],  $K_{bio}$  – koszty produkcji rzepaku ozimego oraz przetworzenia na biodiesel [zł/ha].

Tabela. 1. Koszty produkcji rzepaku ozimego w badanych technologiach [23]

Wyszczególnienie	Koszty dla technologii [zł/ha]		
	T-1	T-2	T-3
Koszty eksploatacji maszyn bez paliwa	776,70	571,00	526,80
Koszt paliwa	249,20	212,50	112,40
Praca ludzka	35,20	24,90	19,40
Materiały i surowce	1376,20	1376,20	1376,20
Razem	2437,30	2184,60	2034,80
Koszt produkcji [zł/tone]	781,20	670,10	776,60
Efektywność ekonomiczna	1,10	1,14	1,09

Najwyższą efektywność energetyczną podczas produkcji rzepaku uzyskano przy w technologii T-2, a najniższą w przypadku technologii T-1 i T-3. Koszt rzepaku przekładał się bezpośrednio na koszt produkowanego biodiesla [23].

Tys, Jackowska i Rybacki [24] przeprowadzili badania nasion różnych odmian rzepaku ozimego przeznaczonych na biopaliwa, które wykazały, że poziom zawartości tłuszczu w nasionach nie jest cechą stałą, dla danej odmiany, lecz ulega on zmianie zarówno w czasie dojrzewania jak i po uzyskaniu przez rośliny pełnej dojrzałości. Maksymalna ilość tłuszczu występuje w nasionach w okresie dojrzałości optymalnej, a opóźnienie zbioru pociąga za sobą spadek jego zawartości. Znaczne różnice w składzie kwasów tłuszczowych wskazują, że na ten decydujący o jakości oleju w nasionach rzepaku wskaźnik wpływają głównie czynniki. Drugim bardzo ważnym i istotnym czynnikiem wpływającym na profil kwasów tłuszczowych był termin zbioru. Zbyt wczesny zbiór wpływał zdecydowanie niekorzystnie niezależnie od odmian, jak i lat badań. Badane odmiany wykazały znaczne zróżnicowanie pod względem profilu kwasów tłuszczowych. Skład kwasów tłuszczowych odmiany Kontakt wskazuje, że jej olej może być doskonały zarówno do smażenia, jak i do

celów paliwowych. Posiada bowiem w swoim składzie małą ilość kwasów wielonienasyconych oraz dużo jedno-nienasyconego kwasu oleinowego. Według autorów [24], taka sytuacja powinna mobilizować hodowców do prowadzenia badań nad nowymi odmianami w dwu kierunkach: z jednej strony hodowla odmian na cele jadalne – z dużą ilością NNKT, z drugiej strony hodowla odmian ukierunkowanych na biodiesel (z dużą ilością kwasów nasyconych i kwasu oleinowego) [24].

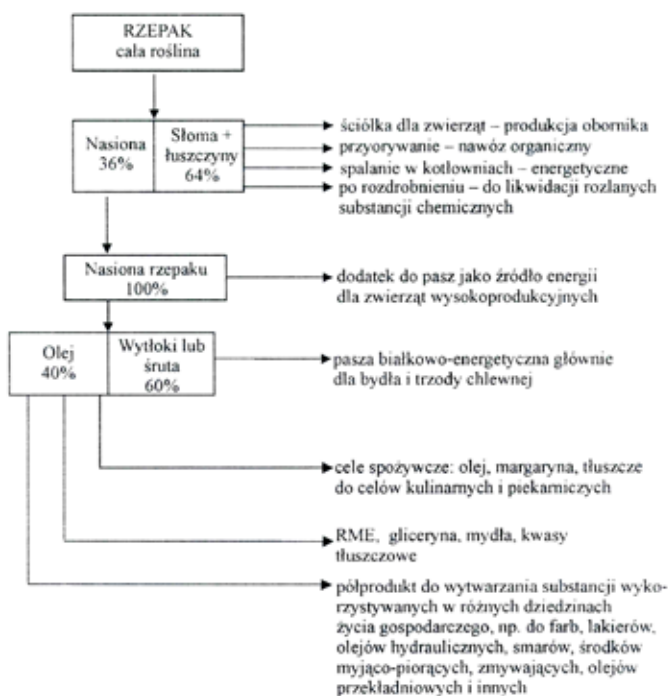
Znaczenie gospodarcze rzepaku jest bardzo duże, możliwości wykorzystania rzepaku w gospodarce przedstawiono na rysunku 3 [18, 25]. Przy zbiorze nasion uzyskuje się biomasę – słomę, która stanowi 64% masy całej rośliny. Oprócz tradycyjnego wykorzystania do produkcji obornika jest dobrym surowcem energetycznym dla kotłowni (patrz rozdział „Bezpośrednie spalanie biomasy”).

Więcej informacji o uprawie i kierunkach zagospodarowania rzepaku znajduje się w opracowaniach Muscickiego [16], Tysa i współpracowników [17] oraz Podkótki [18].

## Otrzymywanie oleju

W Polsce stosuje się trzy podstawowe technologie olejarskie, uzależnione od skali uzysku produktu finalnego. Duże olejarnie przemysłowe stosują technologię polegającą na wstępnym tłoczeniu oleju przy pomocy pras ślimakowych z ziarna uprzednio poddanego kondycjonowaniu w prażalni. Drugim etapem jest ekstrakcja pozostałej części oleju z wyłoku przy pomocy rozpuszczalnika. Technologia ta pozwala na uzyskanie trzech produktów końcowych: oleju surowego, oleju poekstrakcyjnego oraz śrutu poekstrakcyjnej. Wskaźnik uzysku oleju otrzymanego w przypadku tej technologii waha się w granicach 0,41–0,42. Zdolności przerobowe olejarni wykorzystujących technologię klasyczną zawierają się w granicach 200–700 ton rzepaku na dobę. Technologia klasyczna posiada jednak pewne wady. Śruta poekstrakcyjna ma zdecydowanie mniejszą przydatność paszową ze względu na silnie zdenaturowane białko oraz zawiera resztki rozpuszczalnika. Instalacja do ekstrakcji posiada wysoki wskaźnik zagrożenia wybuchem, emituje do atmosfery węglowodory alifatyczne, a wody technologiczne są skażone węglowodorami oraz produktami siarko organicznymi [26, 27].

Olejarnie małe, o zdolnościach przerobowych około 50 ton na dobę, stosują proces jedno- lub dwustopniowego tłoczenia na gorąco oleju z nasion rzepaku. Przed przystąpieniem do procesu właściwego tłoczenia, nasiona są odpowiednio rozdrabniane oraz kondycjonowane. W efekcie otrzymuje się olej surowy oraz wyłok. Uzysk oleju surowego jest w tym przypadku odpowiednio mniejszy i waha się w granicach 0,32–0,38, zależnie od zastosowanego procesu oraz stężenia oleju w surowcu wyjściowym. W przeciwieństwie do technologii klasycznej, technologia tłoczenia końcowego na gorąco jest proekologiczna, a walory paszowe wyłoku są zdecydowanie większe (wyższa zawartość białka rozpuszczalnego, wyższa wartość energetyczna, brak resztek rozpuszczalnika) [17, 28].



Rys. 3. Możliwości gospodarczego wykorzystania rzepaku [18, 25]

Olejarnie bardzo małe, mające zdolności przerobowe 1–15 ton na dobę, tzw. miniolejarnie wykorzystują technologię końcowego tłoczenia na zimno, stosując proces jedno lub dwustopniowy po uprzednim częściowym rozdrobnieniu nasion i podgrzaniu ich do temperatury nie wyższej niż 45°C. Stosowanie tej technologii pozwala na otrzymanie wskaźnika uzysku oleju z nasion rzepaku 0,25–0,29 [17]. Proces otrzymywania oleju rzepakowego jako surowca do produkcji estrów oleju rzepakowego, składa się z trzech podstawowych operacji technologicznych: rozdrabnianie nasion rzepaku, tłoczenie oleju, filtracja oleju. Zabiegi te mogą być prowadzone w małych olejarniach o niewielkich zdolnościach przerobowych, tj. 0,1–0,5 ton nasion na godzinę, jak również w olejarniach przemysłowych o znacznie większej wydajności osiągających nawet 50 000 ton rocznie. W zakładach olejarskich o dużych zdolnościach przerobowych proces pozyskiwania oleju z nasion jest wzbogacony w dodatkowe procesy: ekstrakcję, bielenie i ponowną filtrację [29].

Obecnie, na rynku ogólnodostępne są urządzenia do otrzymywania oleju dla inwestorów indywidualnych [30]. Przykładem jest prasa ślimakowa Farmet-UNO (rys. 4). Prasa jest przeznaczona do wyłaczania nasion oleistych metodą na zimno bez wcześniejszego przygotowania nasion. Dane techniczne prasy:

- wymiary (mm): 300 x 870 x 460

- ciężar-masa tłoczni: 70 kg
- napięcie zasilania: 3 x 400 V/Hz
- pobór mocy: 1,1 kW
- wydajność w nasionach rzepaku: 9–12 kg/h [30]



Rys. 4. Prasa ślimakowa Farmet-UNO [30]

## Wytwarzanie estrów

Z chemicznego punktu widzenia olej roślinny to głównie ester gliceryny i wyższych kwasów tłuszczowych. Właśnie duża masa triglicerydu decyduje o jego niekorzystnych paliwowych właściwościach fizykochemicznych. Rozwiązaniem tego problemu jest skrócenie łańcucha węglowego – kraking termiczny i katalityczny, elektroliza i metoda transestryfikacji. Przemysłowe wykorzystanie znalazła przede wszystkim metoda transestryfikacji, polegająca na otrzymywaniu estrów niższych alkoholi i wyższych kwasów tłuszczowych olejów roślinnych w reakcji mieszaniny oleju z alkoholem etylowym lub metylowym w obecności alkalicznego katalizatora. W standardowym procesie wytwarzania biopaliwa z oleju rzepakowego wyodrębnia się następujące operacje technologiczne [17, 18]:

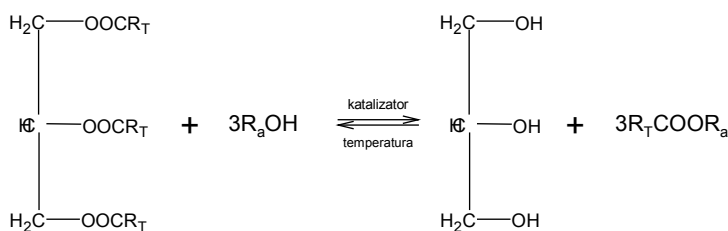
- estryfikacja oleju rzepakowego,
- rozdzielanie produktów estryfikacji,
- oddestylowanie metanolu,
- oczyszczanie estru.

W reakcji transestryfikacji katalizatorami są alkalia i kwasy. Ze względu na koszt, do wytwarzania estrów powszechnie używa się dzisiaj alkoholu metylowego, rzadziej alkoholu etylowego [31].

Metoda ciśnieniowa produkcji estrów polega na prowadzeniu procesu w systemie ciągłym w temperaturze 240°C i pod ciśnieniem około 9 MPa. Surowy olej wraz z alkoholem i katalizatorem w odpowiednich proporcjach jest pompowany do kolektora, gdzie następuje zmieszanie. Następnie mieszanina trafia do podgrzewacza, w którym następuje zainicjowanie reakcji. Podgrzana mieszanka po-



dawana jest do reaktora. Wyptywające z reaktora reagenty są rozprężane i rozdzielane w rozdzielaczu metanolowym na metanol oraz estry i glicerol. Alkohol jest kierowany do kolumny destylacyjnej i po oczyszczeniu jest zawracany do procesu reestryfikacji. Mieszanina estrów i glicerolu odpływająca z dolnej części rozdzielacza metanolowego przepływa rurociągami do rozdzielacza glicerynowego. Pod wpływem różnicy gęstości obu substancji następuje ich naturalna sedymentacja. Znajdujący się w dolnej warstwie glicerol jest odprowadzany, zaś estry przechodzą do kolejnego etapu produkcji. Z rozdzielacza glicerynowego „czyste” estry metylowe podawane są przy pomocy pompy do podgrzewacza, skąd kierowane są do kolumny destylacyjnej. W zależności od wymaganej jakości i kierunku zastosowania estrów, poddaje się je destylacji frakcjonującej lub odpędowej [17, 32, 33].



Rys. 5. Reakcja transestryfikacji

W metodzie bezciśnieniowej proces reestryfikacji przebiega pod ciśnieniem atmosferycznym, zaś temperatura procesu zawiera się w granicach 20–70°C. Niezbędna jest jednak obecność katalizatora alkalicznego, którego ilość zależy w dużym stopniu od temperatury prowadzenia reakcji. Im niższa temperatura tym większa ilość katalizatora. Zmniejszenie ilości katalizatora wpływa dodatkowo na ułatwienie rozdzielania produktów reakcji oraz na zmniejszenie ilości odpadów poprodukcyjnych. Takie warunki prowadzenia procesu pozwalają na zmniejszenie nadmiaru metanolu w stosunku do ilości oleju rzepakowego. W tej metodzie stosuje się mieszkankę katalizującą sporządzoną z metanolu i katalizatora alkalicznego, najczęściej w postaci wodorotlenku potasu lub wodorotlenku sodu. Po przeprowadzeniu reakcji w mieszalniku z mieszadłem pionowym, reagenty są rozdzielane na dwie fazy: estrową (warstwa górna) i glicerynową (warstwa dolna). Glicerol jest odprowadzany na zewnątrz, natomiast surowy ester poddany jest oczyszczaniu. W przeciwieństwie do procesu ciśnieniowego, prowadzenie reakcji estryfikacji metodą bezciśnieniową wymaga zastosowania surowca o niskiej zawartości wolnych kwasów tłuszczowych. Obie metody posiadają wady i zalety. Proces wysokociśnieniowy pozwala uzyskać paliwo wyższej jakości, a jednostkowy koszt przerobu jest stosunkowo niski. Wymaga jednak zapewnienia dostaw dużych ilości surowca oraz dość znacznych nakładów inwestycyjnych, wynikających z konieczności budowy skomplikowanej instalacji, spełniającej parametry pracy

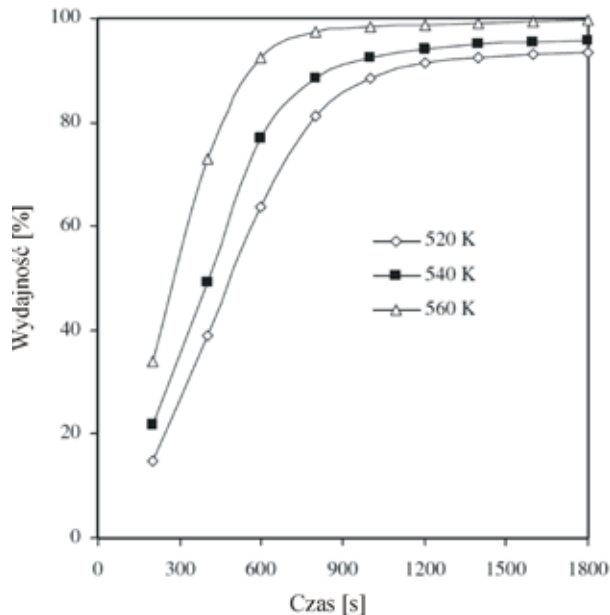
w wysokich ciśnieniach i wysokiej temperaturze. Natomiast w procesie prowadzonym pod ciśnieniem atmosferycznym, wykorzystuje się olej rzepakowy o niskiej zawartości wolnych kwasów tłuszczowych, ale otrzymuje się produkt finalny o niższej jakości. Koszt jednostkowy przerobu w tej metodzie jest wyższy, jednak nie wymaga zastosowania drogiej aparatury ciśnieniowej i może być realizowany w niewielkich przetwórnich wiejskich. Przerób w agrorafineriach pozwala na zmniejszenie kosztów związanych z transportem surowca na duże odległości oraz kosztów inwestycyjnych [16, 17].

Tabela. 2. Warunki prowadzenia reakcji transestryfikacji dla różnych olejów

Olej	Katalizator	Dodatek katalizatora [%]	Alkohol	Stosunek molowy alkoholu/olej	Warunki reakcji	Wydajność estru [%]	Konwersja estru [%]
Olej rzepakowy posmażalniczy [34]	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4	MeOH	1:20	95°C, 10 h	-	90
Olej z karanji [35]	KOH	1	MeOH	1:6	65°C, 2 h, 360 rpm	98	-
Olej z pongamii pinatty [36]	KOH	1	MeOH	1:10	60°C, 1,5 h	-	92
Olej rzepakowy [37]	KOH	1	MeOH	1:6	65°C, 2 h, 600 rpm	96	-
Olej słonecznikowy [38]	NaOH	1	MeOH	1:6	60°C, 2 h, 600 rpm	97,1	-
Olej posmażalniczy rzepakowy Canola <sup>1</sup> [39]	NaOH KOH CH <sub>3</sub> ONa	1,1 1,5 1,3	MeOH	1:7,5	70°C, 0,5 h	85,3 86,0 89,0	
Olej sojowy [40]	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3	n-BuOH	1:6	120°C, 1 h	-	>95
Olej sojowy [41]	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	MeOH EtOH BuOH	1:30	65°C, 50 h 78°C, 18 h 117°C, 3 h	-	>99 >99 >99
Olej sojowy [42]	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,5	MeOH	1:9	3,5 bar, 8 h	-	99
Olej słonecznikowy, posmażalniczy [43]	KOH	6	MeOH	różny	różny	do 100%	-

W wielu ośrodkach badawczych trwają intensywne badania nad optymalizacją reakcji transestryfikacji [34–43]. W tabeli 2 przedstawiono najczęściej wykorzy-

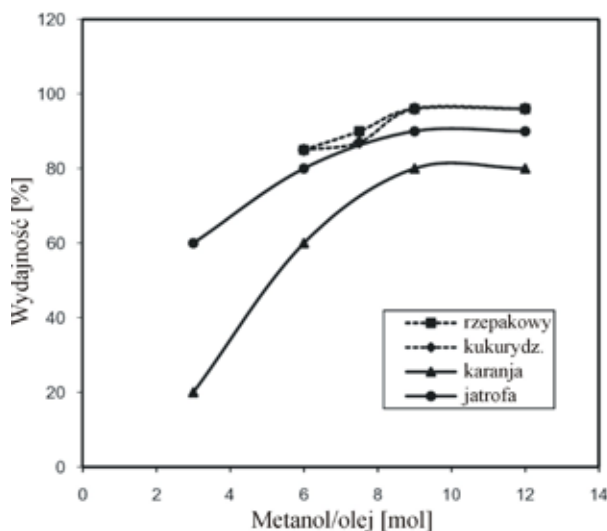
stywane oleje w badaniach, katalizatory, jaki i w jakim stosunku molarnym stosowano alkohol, optymalne warunki prowadzenia reakcji oraz wydajność (liczoną jako wydajność bądź stopień konwersji). Surowcem do produkcji biopaliwa, może być olej rzepakowy, zarówno świeży, jak też olej zużyty w gastronomii. Odpadowe oleje roślinne powstające w lokalach gastronomicznych stanowią atrakcyjny surowiec do przetwarzania w biopaliwo Demirbas [43] pozyskiwał biodiesel z oleju słonecznikowego posmażalniczego. Olej został przefiltrowany i ogrzany do 395 K celem usunięcia wody. W reakcji transestryfikacji wykorzystano metanol i katalizator zasadowy (KOH). Demirbas stwierdził, iż wydajność procesu jest niższa niż w przypadku oleju surowego (duża zawartość wolnych kwasów tłuszczowych), co i tak rekompensuje zdecydowanie niższa cena oleju. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie metanolu w stanie nadkrytycznym (rys. 6). Zastosowanie metanolu w stanie nadkrytycznym pozwala pominąć etap przygotowania oleju posmażalniczego (filtracja, odpędzenie wody), czystość zarówno estrów (99,6%) i gliceryny (96,5%) jest wysoka.



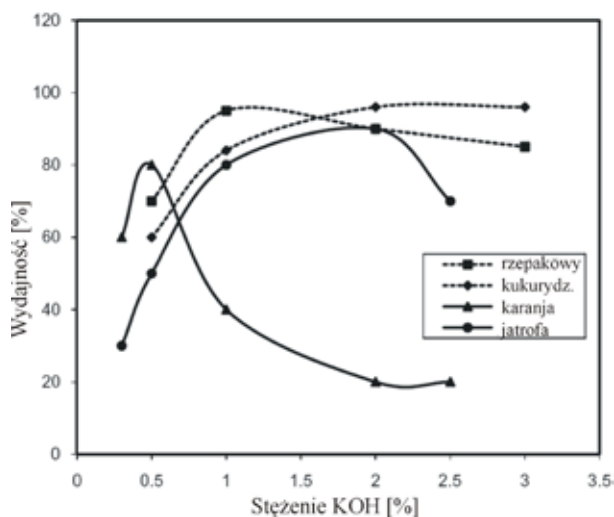
Rys. 6. Wpływ temperatury na wydajność transestryfikacji, stosunek molowy olej: metanol 41:1 [43]

Patil i Deng [44] wytwarzali biodiesel z olejów jadalnych (rzepakowego i kukurydzianego) oraz olejów niejadalnych (karanja, jatrofa). Autorzy stwierdzili, iż najkorzystniejszy stosunek molowy metanol/olej to 9:1; dodatkowo porównując

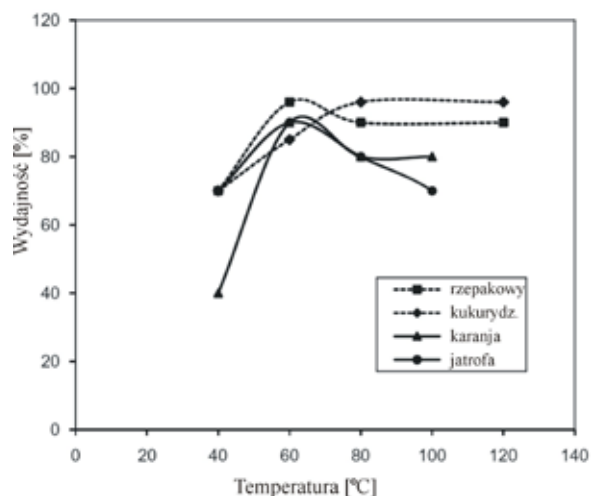
poszczególne oleje stwierdzono wyższą wydajność dla olejów jadalnych. Dla oleju jatrofa optymalny był dodatek katalizatora (KOH) w ilości 0,5%, dla oleju rzepakowego 1%, zaś dla kukurydzianego i karanja 1,5%; dla oleju jatrofa stwierdzono najniższe wydajności (rys. 7). Optymalna temperatura prowadzenia reakcji transestryfikacji to 60°C, dalsze jej podnoszenie powoduje lekkie obniżenie się wydajności, najwyższe wydajności otrzymano dla olejów jadalnych (rys. 8).



Rys. 7. Wpływ dodatku metanolu na wydajność transestryfikacji [44]



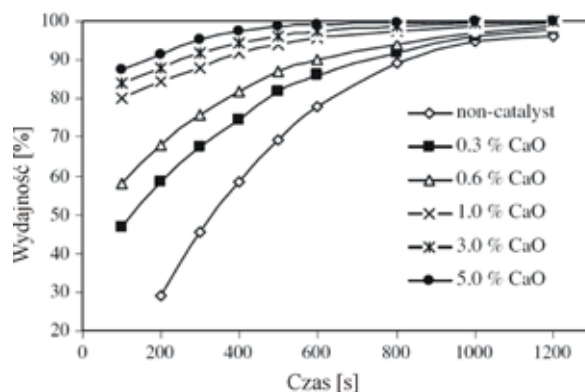
Rys. 8. Wpływ dodatku KOH na wydajność transestryfikacji [44]



Rys. 9. Wpływ temperatury na wydajność transestryfikacji [44]

Jednym z najważniejszych kierunków w badaniach procesu transestryfikacji jest dobór odpowiedniego katalizatora, który będzie zapewniał krótki czas reakcji i wysoką wydajność. Oprócz katalizatorów alkaicznych (wodorotlenki, węglany, alkoholany) [36–39, 43, 44] i kwaśnych (najczęściej kwasy mineralne) [34, 40–42] w reakcji transestryfikacji wykorzystuje się również katalizatory heterogeniczne (metale i ich tlenki, zeolity, i in.) [45–60], a w ostatnim czasie również katalizatory enzymatyczne [61].

Wpływ dodatku katalizatora (CaO) na proces transestryfikacji przedstawił w swojej pracy Demirbas [60] (rys. 10).



Rys. 10. Wpływ dodatku CaO na wydajność transestryfikacji, temperatura 525 K, stosunek molowy oleju do metanolu 1:41 [60]

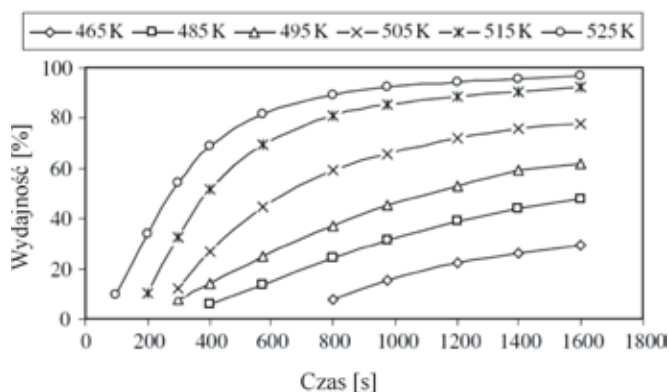
Tabela 3. Wykorzystanie wybranych katalizatorów w procesie transestryfikacji

Katalizator	Dodatek katalizatora [%]	Olej	Alkohol	Stosunek molarny alkohol/olej	Warunki prowadzenia reakcji	Konwersja estru [%]	Wydajność estru [%]
MgO/La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [45]	5	słonecznikowy	MeOH	53:1	65°C, 0,5 h	-	100
S-ZrO <sub>2</sub> [46]	5	sojowy	MeOH	20:1	120°C, 1 h	-	98,6
Ca(OCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> [47]	3	sojowy	MeOH	12:1	120°C, 1 h	-	95,0
Ca(OCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> [47]	3	sojowy	EtOH	12:1	120°C, 1 h	-	91,8
Li/CaO [48]	2	karanja	MeOH	12:1	120°C, 1 h	-	94,8
KF/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [49]	4	palmowy	MeOH	12:1	120°C, 1 h	-	90,0
KNO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [50]	6,5	sojowy	MeOH	15:1	120°C, 1 h	87,0	-
KNO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [51]	6,0	z hatrofy	MeOH	12:1	120°C, 1 h	84,0	-
KF/Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [52]	3	rzepakowy	MeOH	12:1	120°C, 1 h	92,5	-
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [53]	10	sojowy	MeOH	6:1	120°C, 1 h	63,0	-
KI/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [54]	2,5	sojowy	MeOH	15:1	120°C, 1 h	96,0	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /TiO <sub>2</sub> ·SiO <sub>2</sub> [55]	3	odpadowy (sojowy, rzepakowy, kukurydziany)	MeOH	9:1	120°C, 1 h	92,0	-
Mq-Al [56]	7,5	sojowy	MeOH	15:1	120°C, 1 h	67,0	-
Zn/Si [57]	3	odpadowy (waste cooking oil (WCO))	MeOH	18:1	120°C, 1 h	-	98,0
KOH/NaX [58]	3	sojowy	MeOH	10:1	120°C, 1 h	85,6	-
CaO [59]	8	sojowy	MeOH	12:1	120°C, 1 h	-	95,0
CaO [60]	0-5	słonecznikowy	MeOH	41:1	192–252 °C, do 0,5h	zmienna	

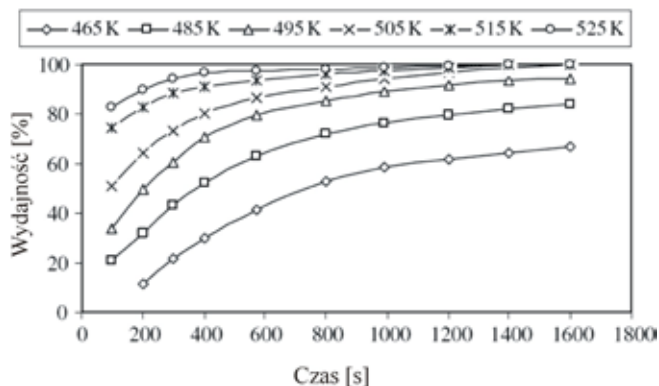
Dodatkowo, na podstawie rysunków 11 i 12 można stwierdzić, iż dodatek katalizatora znacząco przyspiesza proces transestryfikacji [60].

Transestryfikacja enzymatyczna z wykorzystaniem lipaz staje się coraz bardziej atrakcyjna ze względu na łatwy sposób odbierania produktu, braku reakcji ubocznych oraz mniejsza ilość powstających zanieczyszczeń. Barierą dla tej metody jest jej wysoki koszt oraz problem z pełnym oczyszczeniem estrów [61].

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie wykorzystaniem promieniowania mikrofalowego w reakcji transestryfikacji, które zapewnia krótszy czas trwania procesu, wyższą wydajność oraz zmniejszenie nakładów energetycznych [62]. W tabeli 4 przedstawiono porównanie zapotrzebowania na energię konwencjonalnego i mikrofalowego ogrzewania podczas wytwarzania biodiesla.



Rys. 11. Wpływ temperatury na wydajność transestryfikacji bez katalizatora [60]



Rys. 12. Wpływ temperatury na wydajność transestryfikacji z dodatkiem katalizatora (3% CaO) [60]

Tabela 4. Porównanie zapotrzebowania na energię konwencjonalnego i mikrofalowego ogrzewania podczas wytwarzania biodiesla [62]

Warunki prowadzenia reakcji	Zużycie energii [kJ/dm <sup>3</sup> ]	Wydajność konwersji
Konwencjonalne grzanie	94,3	różna, patrz tabela 2 i 3
Mikrofałe, proces ciągły, przepływ reagentów 7,2 dm <sup>3</sup> /min	26,0	98,9
Mikrofałe, proces ciągły, przepływ reagentów 2 dm <sup>3</sup> /min	60,3	97,9
Mikrofałe, proces okresowy, wsad 4,6 dm <sup>3</sup>	90,1	brak danych

Kolejny z kierunków badań procesu transestryfikacji to wykorzystanie ultradźwięków [63–66]. W tabeli 5 zestawiono warunki prowadzenia reakcji dla trioleiny, oleju sojowego i oleju rybnego.

Tabela 5. W reakcji transestryfikacji wykorzystywane są również ultradźwięki

Substrat	Katalizator	Dodatek katalizatora [%]	Alkohol	Częstotliwość [kHz]	Źródło ultradźwięków	Warunki prowadzenia reakcji	Konwersja estru [%]	Wydajność estru [%]
Trioleinian glicerolu [63]	NaOH	1	EtOH	40	Oczyszczacz ultradźwiękowy (1200 W)	25°C, 0,3h	98	-
Trioleinian glicerolu [64]	KOH	1	MeOH	40	Oczyszczacz ultradźwiękowy (1200 W)	25°C, 0,6h	>90	-
Olej sojowy [65]	NaOH	1,5	MeOH	24	Mikrofalówka (200 W)	60°C, 0,3h	-	97
Olej rybny [66]	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ONa	0,8	EtOH	20	Czujnik ultradźwiękowy	60°C, 1h	-	98,2

## Zagospodarowanie gliceryny

Glicerol jest produktem ubocznym powstającym w procesie estryfikacji oleju rzepakowego. Wraz z nim w procesie tym powstają również mydła i wolne kwasy tłuszczowe. Faza glicerynowa przedstawiająca właściwie wysoko skoncentrowany glicerol (około 80% roztwór), może być przekazywana do zakładów specjalizujących się w oczyszczaniu glicerolu (np. zakłady kosmetyczne, farmaceutyczne). Możliwe jest również zastosowanie instalacji do oczyszczania glicerolu połączonej z urządzeniem do reestryfikacji, ale wiąże się to ze znacznym podwyższeniem kosztów inwestycyjnych. Koszt uzyskania glicerolu surowego podczas estryfikacji olejów roślinnych jest niższy od kosztów w dotychczasowo stosowanych tradycyjnych metodach rozszczepiania tłuszczów. Więcej informacji o zagospodarowaniu gliceryny zawierają opracowania Tysa i współpracowników [17] oraz Podkówki [18].

Glicerol jest wartościowym chemicznie substratem, wykorzystywanym do produkcji takich substancji jak: 1,3-propenodiol, dihydroksyaceton czy chociażby wodor – tabela 6.



Tabela 6. Chemiczne i biotechnologiczne transformacje glicerolu pochodzącego z produkcji biodiesla [81]

Produkt z glicerolu	Droga chemiczna	Droga fermentacyjna
1,3-propenodiol	Selektywne hydroksylo- wanie	<i>Clostridium butyricum</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i>
1,2-propenodiol	Hydrogenoliza	Brak
Dihydroksyaceton	Selektywne katalityczne utlenianie	<i>Gluconobacter oxydans</i>
Kwas bursztynowy	Brak	<i>Anaerobiospirillum succini- ciproducens</i>
Wodór	Reforming katalityczny	<i>Enterobacter aerogenes</i>
Poliestry	Katalizowana, kwasowa estryfikacja	Brak
Poliglicerole	Selektywna eteryfikacja	Brak
Polihydroksyalkanole	Brak	Różne gatunki bakterii osmofilnych

## Wykorzystanie alg do produkcji biodiesla

W ostatnim czasie duże nadzieje wiąże się z algami (mikroalgami, glonami) (nazywane są biopaliwem 3-ej generacji), które są 15–300 razy bardziej wydajne pod względem produkcji oleju niż tradycyjne źródła. Algi są grupą organizmów plechowych, najczęściej samożywnych, żyjących w środowisku wodnym lub miejscach wilgotnych [67]. Ciało alg stanowi jednorodna lub zbudowana z mało zróżnicowanych komórek plecha, o wielkości od kilku mikrometrów do kilku metrów. Algi występują w wodach słodkich, słonych, chłodnych i ciepłych. żyją one we wszystkich strefach geograficznych, ale najliczniej występują na półkuli północnej, gdzie rocznie wydobywa się ich ok. 1,5 mln t [68].

Algi, które dostarczają wielu cennych związków chemicznych, znalazły zastosowanie przede wszystkim w przemyśle kosmetycznym i farmaceutycznym. Otrzymywane są z nich ekstrakty i mączki; ekstrakty wykorzystywane są zwykle w kremach, tonikach i szamponach, mączki natomiast stosuje się w maseczkach i kąpielach wyszczuplających. W aspekcie paliw alternatywnych algi są miniaturowymi biologicznymi „fabrykami”, które w procesie fotosyntezy przekształcają dwutlenek węgla i światło słoneczne w bogatą w składniki mineralne biomasę. Dodatkowo te fotosyntetyzujące mikroorganizmy są użyteczne w bioremediacji środowisk zanieczyszczonych [69]. Algi traktowane są jako „łapacze” dwutlenku węgla, gdyż na wytworzenie 100 Mg biomasy alg potrzebują około 183 Mg CO<sub>2</sub>, dodatkowo nieszkodliwiane są zanieczyszczenia emitowane do atmosfery [70].

Zbiór roślin energetycznych oleistych przeprowadza się przeważnie raz w roku, zaś cykl dojrzwiania alg trwa 1–10 dni, dodatek pożywki i dogodne warunki wegetacji sprawiają iż czas ten jest jeszcze krótszy, a wydajność wyższa [67–70].

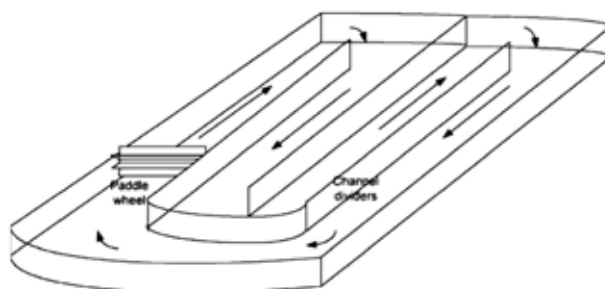
Do prawidłowego wzrostu alg wymagane jest światło, dwutlenek węgla, woda i sole mineralne. Temperatura, w której hodowane są glony musi oscylować w granicach 20–30°C. W celu zminimalizowania kosztów wytwarzania biomasy, jej produkcja powinna opierać się o łatwo dostępne światło słoneczne. Podłoża do wzrostu alg muszą dostarczać składników mineralnych, których wymagają komórki glonów. Głównie chodzi o takie pierwiastki jak: azot, fosfor, żelazo i w pewnych przypadkach krzem [2, 67].

Tabela 7. Porównanie wydajności i zawartości oleju roślin oleistych i alg [70]

Uprawa	Wydajność oleju [dm <sup>3</sup> /ha]	Zawartość oleju [% s.m.]
Kukurydza	172	
Soja	446	
Rzepak	1190	
Jatrofa	1892	
Orzech kokosowy	2689	
Olej palmowy	5950	
Mikroalgi		
<i>Botryococcus braunii</i>		25–75
<i>Chlorella sp.</i>		28–32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>		20
<i>Cylindrotheca sp.</i>		16–37
<i>Dunaliella primolecta</i>		23
<i>Isochrysis sp.</i>		25–33
<i>Monallanthus salina</i>	59000–137000	>20
<i>Nannochloris sp.</i>		20–35
<i>Nannochloropsis sp.</i>		31–68
<i>Neochloris oleoabundans</i>		35–54
<i>Nitzschia sp.</i>		45–47
<i>Phaeodactylum tricorutum</i>		20–30
<i>Schizochytrium sp.</i>		50–77
<i>Tetraselmis sueica</i>		15–23

Praktyczne metody hodowli mikroalg na dużą skalę, to systemy otwarte (stawy „kanałowe”) i zamknięte na powietrzu i w pomieszczeniach (fotobioreaktory) [71]. Pierwsze systemy otwarte powstały już w latach 40-tych XX wieku w Niemczech i USA [72]. Staw do hodowli alg jest zbudowany w formie zamkniętej pętli recykulacyjnej tworzącej kanał o głębokości około 0,3 m. Mieszanie i cyrkulację zapewnia

turbina wprowadzająca zawieszinę w ruch. Turbina pracuje ciągle zapobiegając sedymentacji glonów. Biomasa glonów jest odprowadzana za turbiną na końcu pętli recykulacyjnej. Nakłady na budowę i utrzymanie systemów otwartych są niewielkie, problemem jest utrudniony zbiór alg, co podraża pozyskanie biopaliwa [73].



Rys. 13. Schemat stawu do produkcji alg [73]

W systemach zamkniętych (fotobioreaktory) można w dużym stopniu kontrolować warunki rozwoju mikroorganizmów, dzięki czemu można uzyskać więcej biomasy niż w przypadku systemów otwartych. Fotoreaktory zbudowane są z materiału przepuszczającego światło i pozwalają na hodowlę dokładnie pożądanego gatunku mikroalg. Generalnie wyróżnia się 3 typy fotobioreaktorów:

- cylindryczne (rurowe),
- panelowe,
- pionowo-kolumnowe [70].

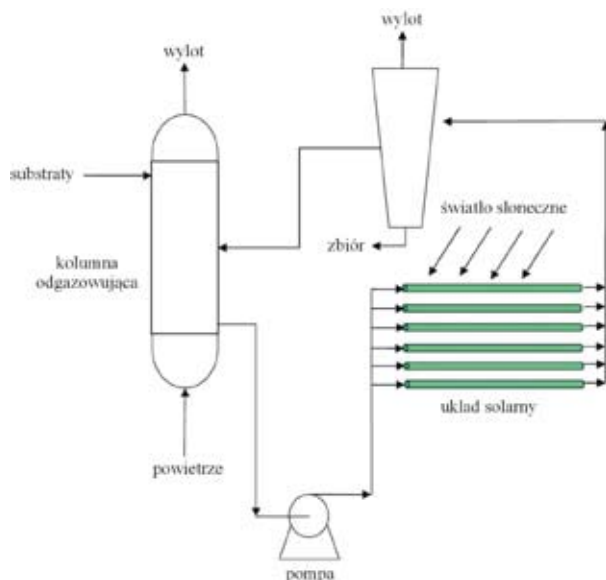
Na rysunku 14 przedstawiono schemat rurowego bioreaktora [74], na rysunku 15 hodowlę glonów w szklarni (bioreaktor rurowy), zaś na rysunku 16 bioreaktor płytowy.

Wewnątrz fotobioreaktora wyróżnić można strefę jasną – blisko źródła światła oraz strefę ciemną – daleko od naświetlanej powierzchni. Obecność strefy zmroku jest spowodowana absorpcją światła przez mikroorganizmy i ich samozacienianiem. Takie zjawisko powoduje tworzenie się w reaktorze:

- zewnętrznej warstwy glonów narażonej na zbyt duże natężenia światła, które może powodować fotoinhibicję,
- środkowej warstwy o idealnym oświetleniu,
- wewnętrznej warstwy glonów z brakiem światła, gdzie procesy oddychania przebiegają z dużą intensywnością [67, 77].

Aby zapewnić algom właściwe warunki świetlne, w niektórych bioreaktorach używane są specjalne panele emitujące światło w zakresie czerwieni. Łącząc stosowną geometrię naświetlania z cyrkulacją medium można sprawić, że komórki będą krążyły między strefą świetlną i strefą zmroku reaktora w pewnej częstotli-

wości i regularnych odstępach. Aktualnie trwają prace nad udoskonaleniem bioreaktorów. Przykładowo, Hsieh i Wu [78] testowali różne układy komór bioreaktora (rys. 17a), co bezpośrednio wpływało na stężenie pozyskanej biomasy alg *Chlorella* sp. (rys. 17b).



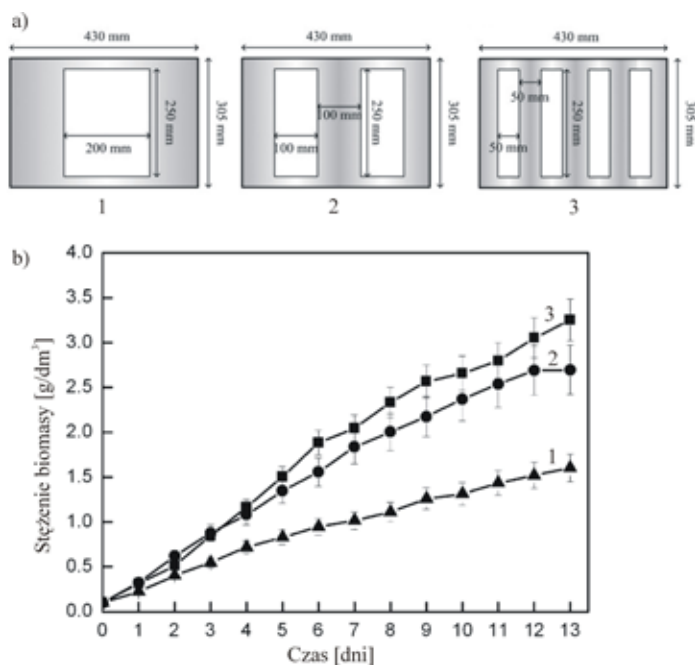
Rys. 14. Schemat bioreaktora rurowego [74]



Rys. 15. Hodowla mikroalg [75]



Rys. 16. Bioreaktor płytowy [76]



Rys. 17. Układ komór bioreaktora a) i zmiana stężenia biomasy alg w czasie b) [78]

Algi, w przeciwieństwie do kukurydzy, z której powstaje także bioetanol oraz rzepaku czy soi, z których produkuje się biodiesel, nie stanowią konkurencji na rynku produktów spożywczych, w dodatku łatwo można je hodować w dużych ilościach, a także można do nich znacznie swobodniej wprowadzać modyfikacje genetyczne zwiększające wydajność produkcji [79, 80]. Według najnowszych obliczeń, produkcja takiej ilości biodiesla, który pokryłby zapotrzebowanie całych Stanów Zjednoczonych w paliwo do transportu, wymagałby wykorzystania jedynie 5% powierzchni do stworzenia bioplantacji (biofarm) alg [81].

## Literatura

- [1] E.M. Ahahid, Y. Jama, *A review of biodiesel as vehicular fuel*, Renewable&Sustainable Reviews 12, 2477–2487, 2008.
- [2] <http://pl.wikipedia.org> (wejście 12.11.09).
- [3] A. Murugesan et al., *Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines – A review*, Renewable&Sustainable Reviews 13, 653–662, 2009.
- [4] <http://www.carodiesel.com> (wejście 12.11.09).
- [5] A. Kołtuniewicz, J. Kapłon, *Nowoczesne technologie i charakterystyka wybranych procesów wytwarzania biopaliw*, 35–47, Materiały konferencyjne „Alternatywne odnawialne źródła energii. Nowoczesne technologie. Od biomasy do wodoru – praktyka i perspektywy”, Karczowiska, 2006.
- [6] S. Dołęgowska, *Biopaliwa – krok ku zrównoważonemu rozwojowi*, Problemy Ekorozwoju 4(1), 117–121, 2009.
- [7] H. Niewiadomski, *Technologia tłuszczów jadalnych WNT*, Warszawa 1994.
- [8] P. Boczar, *Niektóre aspekty światowego rynku olejów roślinnych w latach 1961–2005*, Stowarzyszenie Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu. Roczniki Naukowe 9(4), 20–23, 2007.
- [9] P. Singh, D. Singh, *Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review*, Renewable&Sustainable Reviews 14, 200–216, 2010.
- [10] J. Maley, A. Chepstow-Lusty, *Elaeis guineensis Jacq. (oil palm) fluctuations in central Africa during the late Holocene: climate or human driving forces for this pioneering species*, Vegetation History and Archaeobotany 10, 117–120, 2001.
- [11] N. Luyindula et al., *Effects of inbreeding on growth and yield of oil palm*, Euphytica 143, 9–17, 2005.
- [12] <http://en.wikipedia.org> (wejście 12.11.09).
- [13] M. Kluza-Wieloch, Cz. Muśnicki, *Dynamika jakościowych niełupek słonecznika zwyczajnego (Helianthus annuus L.) w trakcie ich dojrzewania*, Rośliny Oleiste 2, 231–242, 2006.
- [14] <http://www.farmer.pl> (wejście 13.11.09).
- [15] O. Śańec, P. Śańec, T. Dobek, *Uprawa i zbiór soi*, Inżyniera Rolnicza 4, 255–261, 2006.
- [16] C. Muśnicki (red.), *Technologia produkcji rzepaku*, Wyd. Wieś Jutra, Warszawa 2005.
- [17] J. Tys i in., *Technologie i ekonomiczne uwarunkowania produkcji biopaliwa z rzepaku*, Rozprawy i Monografie, Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2003.

- [18] W. Podkówka (red.), *Biopaliwo Gliceryna Pasza z rzepaku*, Wyd. Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 2004.
- [19] Poradnik dla producentów. *Rzepak*. Biopaliwa, Wyd. Biznes-Press sp. z o.o., Warszawa 2006.
- [20] Poradnik dla plantatorów. *Rzepak*. Nowe wyzwania, Wyd. Biznes-Press sp. z o.o., Warszawa 2008.
- [21] J. Herse, *Szczegółowa uprawa roślin*, PWN, Warszawa 1986.
- [22] F. Dembiński, *Jak uprawiać rzepak i rzepik*, Wyd. PWRiL, Warszawa 1983.
- [23] T.K. Dobek, *Efektywność ekonomiczna i energetyczna produkcji biodiesla w zależności od stosowanych technologii uprawy rzepaku ozimego*, Acta Agrophysica 1192), 369–379, 2008.
- [24] J. Tys, I. Jackowska, R. Rybacki, *Wartość technologiczna nasion różnych odmian rzepaku ozimego przeznaczonych na biopaliwa*, Acta Agrophysica 8(4), 1017–1030, 2006.
- [25] W. Podkówka, *Rzepak – roślina przyszłości – surowiec do produkcji biopaliwa i pasz*, Ekologia i Technika 10(5), 131–138, 2002.
- [26] <http://www.reflex.com.pl> (wejście 15.11.09).
- [27] J. Krzymański (red.), *Olej rzepakowy – nowy surowiec, nowa prawda*, Polskie Stowarzyszenie Producentów Oleju, Warszawa 2009.
- [28] G. Wiśniewski (red.), *Ocena stanu i perspektywy produkcji krajowej urządzeń dla energetyki odnawialnej*, EC BREC, Warszawa 2007.
- [29] B. Malthus, *Production of high-quality virgin rapeseed oil – why so difficult?*, 139–150, in. "Advances in analysis and technology of rapeseed oil", Wyd. UMK, Toruń 2008.
- [30] <http://www.biopaliwa.pl> (wejście 15.11.09).
- [31] H.-J. Kim, B.-S. Kang, *Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogenous base catalyst*, Catalysis Today 93–95, 315–320, 2004.
- [32] P. Frąckowiak, *Otrzymywanie ekologicznego paliwa ciągnikowego z oleju rzepakowego w warunkach wiejskich*, Prace Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych 46(1), 61–75, 2001.
- [33] Z. Helwani et al., *Solid heterogeneous catalysts for transesterification of triglycerides with methanol: A review*, Applied Catalysis A: General 363, 1–10, 2009.
- [34] W. Yong et al., *Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil*, Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 252, 107–112, 2006.
- [35] L. Meher et al., *Optimization of alkali-catalyzed transesterification of Pongamia pinnata oil for production of Biodiesel*, Bioresource Technology 97, 1392–1397, 2006.
- [36] S. K. Karmee, A. Chadha Anju, *Preparation of biodiesel from crude oil of Pongamia pinnata*, Bioresource Technology 96, 1425–1429, 2005.
- [37] U. Rashid, F. Anwar, *Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil*, Fuel 87, 265–273, 2008.
- [38] U. Rashid et al., *Production of sunflower oil methyl esters by optimized alkali-catalyzed methanolysis*, Biomass&Bioenergy 32, 1202–1205, 2008.
- [39] D.Y.C. Leung, Y. Guo, *Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production*, Fuel Processing Technology 87, 883–890, 2006.
- [40] B.D. Wahlen, B.M. Barney, L.C. Seefeldt, *Synthesis of biodiesel from mixed feedstocks and longer chain alcohols using an acid-catalyzed method*, Energy Fuels 22, 4223–4228, 2008.
- [41] K. Narasimharao, A. Lee, K. Wilson, *Catalysts in production of biodiesel: a review*, Journal of Biobased Materials and Bioenergy 1, 19–30, 2007.

- [42] M.J. Goff et al., *Acid-catalyzed alcoholysis of soybean oil*, Journal of the American Oil Chemists' Society 81(4), 415–420, 2004.
- [43] A. Demirbas, *Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification*, Energy Conversion&Management 50, 923–927, 2009
- [44] P.D. Patil, S. Deng, *Optimalization of biodiesel production from edible and non-edible vegetable oils*, Fuel 88, 1302–1306, 2009.
- [45] B.N. Seshu et al., *Room-temperature transesterification of edible and non edible oils using a heterogeneous strong basic Mg/La catalyst*, Energy Fuels 22, 1965–1971.
- [46] C.M. Garcia et al., *Transesterification of soybean oil catalyzed by sulfated zirconia*, Bioresource Technology 99, 6608–6613, 2008.
- [47] X. Liu Xuejun et al., *Calcium ethoxide as a solid base catalyst for the transesterification of soybean oil to biodiesel*, Energy Fuels 22, 1313–1317, 2008.
- [48] L.Ch. Meher et al., *Transesterification of karanja (Pongamia pinnata) oil by solid basic catalysts*, European Journal of Lipid Science and Technology 108, 389–397, 2006.
- [49] X. Xu et al., *Transesterification of palm oil with methanol to biodiesel over a  $KF/Al_2O_3$  heterogeneous base catalyst*, Energy Fuels 21, 3109–3112, 2007.
- [50] W. Xie, H. Peng, L. Chen, *Transesterification of soybean oil catalyzed by potassium loaded on alumina as a solid-base catalyst*, Applied Catalysis A: General 300, 67–74, 2006.
- [51] A.P. Vyas et al., *Production of biodiesel through transesterification of jatropha oil using  $KNO_3/Al_2O_3$  solid catalyst*, Fuel 88, 525–628, 2009.
- [52] H. Sun et al., *Biodiesel production from transesterification of rapeseed oil using  $KF/Eu_2O_3$  as a catalyst*, Energy Fuels 22, 2756–2760, 2008.
- [53] X. Li et al., *A novel solid super base of  $Eu_2O_3/Al_2O_3$  and its catalytic performance for the transesterification of soybean oil to biodiesel*, Catalysis Communication 8, 1969–1972, 2007.
- [54] W. Xie, H. Li, *Alumina-supported potassium iodide as a heterogeneous catalyst for biodiesel production from soybean oil*, Journal of Molecular Catalysis A: Chemistry 255, 1–9, 2006.
- [55] B-X. Peng et al., *Biodiesel production from waste oil feedstocks by solid acid catalysis*, Process Safety and Environmental Protection 86, 441–447, 2008.
- [56] W. Xie, H. Peng, L. Chen, *Calcined Mg–Al hydrotalcites as solid base catalysts for methanolysis of soybean oil*, Journal of Molecular Catalysis A: Chemistry 246, 24–32, 2006.
- [57] K. Jacobson Kathlene et al., *Solid acid catalyzed biodiesel production from waste cooking oil*, Applied Catalysis B: Environmental 85, 86–91, 2008.
- [58] W. Xie, X. Huang, H. Li, *Soybean oil methyl esters preparation using NaX zeolites loaded with KOH as a heterogeneous catalyst*, Bioresource Technology 98, 936–939, 2007.
- [59] X. Liu et al., *Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst*, Fuel 87, 216–221, 2008.
- [60] A. Demirbas, *Biodiesel from sunflower oil in supercritical methanol with calcium oxide*, Energy Conversion&Management 48, 937–941, 2007.
- [61] A.P. Vyas, J.L. Verma, N. Subrahmanyam, *A review on FAME production processes*, Fuel 89, 1-9, 2010.
- [62] T.M. Barnard et al., *Continuous-flow preparation of biodiesel rusing microwave heating*, Energy&Fuels 21, 1777–1781, 2007.
- [63] H.C. Hanh et al., *Effects of molar ratio, catalyst concentration and temperature on transesterification of triolein with ethanol under ultrasonic irradiation*,. Journal of the Japan Petroleum Institute 50(4), 195–199, 2007.



- [64] H.C. Hanh et al., *Biodiesel production through transesterification of triolein with various alcohols in an ultrasonic field*, *Renewable Energy* 34, 766–768, 2009.
- [65] K.G. et al., *Biodiesel production: reaction and process parameters of alkali-catalyzed transesterification of waste frying oils*, *Energy Fuels* 21, 2023–2027, 2007.
- [66] R.E. Armenta et al., *Transesterification of fish oil to produce fatty acid ethyl esters using ultrasonic energy*, *Journal of the American Oil Chemist's Society* 84, 1045–1052, 2007.
- [67] M. Frąc, S. Jezierska-Tys, J. Tys, *Algi – energia jutra (biomasa, biodiesel)*, *Acta Agrophysica* 13(3), 627–638, 2009.
- [68] <http://www.pure-energy-fuels.com> (wejście 17.11.09).
- [69] R. Munoz, B. Guieysse, *Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review*, *Water Research* 40, 2799–2815, 2006.
- [70] Y. Chisti, *Biodiesel from microalgae*, *Biotechnology Advances* 25, 294–306, 2007.
- [71] E.M. Grima et al., *Scale-up of tubular photobioreactors*, *Journal of Applied Phycology* 12, 355–368, 2000.
- [72] I.S. Suh, Ch-G. Lee, *Photobioreactor engineering: design and performance*, *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 8, 313–321, 2003.
- [73] O. Jorquera et al., *Comparative energy life cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors*, *Bioresource Technology* 101, 1406–1413, 2010.
- [74] Q. Li, W. Du, D. Liu, *Perspectives of microbial oils for biodiesel production*, *Applied Microbiology and Biotechnology* 80, 749–756, 2008.
- [75] <http://biotec.molecularpharming.org> (wejście 18.11.09).
- [76] <http://www.invenia.es> (wejście 18.11.09).
- [77] A.H. Scragg et al., *Growth of microalgae with increased calorific values in a tubular bioreaktor*, *Biomass & Bioenergy* 23, 67–73, 2002.
- [78] Ch-H. Hsieh, W-T. Wu, *A novel photobioreactor with transparent rectangular chambers for cultivation of microalgae*, *Biochemical Engineering Journal* 46, 300–305, 2009.
- [79] <http://www.biodiesel.pl> (wejście 18.11.09).
- [80] P. Spolaore et al., *Commercial applications of microalgae*, *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101(2), 87–96, 2006.
- [81] D.M. Mousdale, *Biofuels: Biotechnology, Chemistry and Sustainable Development*, CRC Press, New York, 2008.

# WPŁYW BIOPALIW NA SILNIKI I EMISJĘ ZANIECZYSZCZEŃ

Mimo, iż światowa motoryzacja nadal opiera się na paliwach konwencjonalnych, to na drogach coraz częściej można spotkać pojazdy zasilane biopaliwami, głównie alkoholami i estrami olejów roślinnych. Alkohole są coraz częściej stosowane jako dodatki do paliw konwencjonalnych, jak również w postaci czystej głównie do paliw silników o zapłonie iskrowym, jak i samoczynnym [1, 2]. Alkohole, proste związki węgla, tlenu i wodoru, w stosunku do benzyn charakteryzują się [3, 4]:

- niższą wartością opałową (tabela 1),
- mniejszym teoretycznym zapotrzebowaniem powietrza do spalania,
- większą odpornością na spalanie stukowe, co pozwala stosować większe stopnie sprężania,
- lepszą zapalnością,
- wyższą higroskopijnością oraz
- zwiększoną rozpuszczalnością niektórych metali

W tabeli 1 przedstawiono właściwości biopaliw i paliw tradycyjnych [4, 5].

Tabela 1. Właściwości biopaliw i paliw tradycyjnych [4, 5]

Właściwość	Metanol	Etanol	Olej rzepakowy	EMKOR	Benzyna	Olej napędowy
Gęstość w 20°C [kg/m <sup>3</sup> ]	791	789	915	880	740	840
Lepkość kinematyczna [cSt]	0,8	0,9	0,8	0,8	0,6	4,0
Wartość opałowa [MJ/kg]	19,8	27	42,5	55	44	42,5
Skład elementarny						
C [kg C/kg paliwa]	0,375	0,52	0,78	0,76	0,86	0,86
H [kg H/ kg paliwa]	0,125	0,13	0,11	0,13	0,14	0,11
O [kg O/kg paliwa]	0,5	0,34	0,11	0,1	0	0
S [kg S/kg paliwa]	0	0	0,02	ślady	0	0,03

Szlachta [6] podaje, iż etanol można by wykorzystywać również w rolnictwie ze względu na dostępność surowca. Etanol mógłby być stosowany w silnikach w pełni do tego celu przystosowanych, gdyż w silnikach nie przystosowanych do tego paliwa istnieje ryzyko wzrostu emisji nie tylko aldehydów, ale i tlenku węgla. Jednym z często spotykanych rozwiązań jest przystosowanie silnika wysokoprężnego do spalania paliw alkoholowych poprzez zmianę zapłonu samoczynnego na zapłon iskrowy (podobnie jak to ma miejsce w przypadku zasilania paliwem gazowym). Realizowane jest to poprzez wyposażenie silnika w instalację zapłonową i zmianę stopnia sprężania oraz kształtu komory spalania. Pomimo dużego stopnia modyfikacji silnika, można osiągnąć wzrost jego mocy dzięki utajonemu ciepłu parowania alkoholu, które schładzając ładunek, zwiększa jego gęstość i pozwala na spalanie większych ilości paliwa.

Obecnie, zaawansowane badania nad wykorzystaniem metanolu prowadzi firma MAN. Do zasilania metanolem wykorzystywany jest silnik określany jako „wysokoprężny z dodatkowym zapłonem iskrowym”. Metanol wtryskiwany jest bezpośrednio do komory spalania, a jego znaczna część gromadzi się na ściankach komory i stopniowo odparowuje. Ładunek powietrza zawirowany z dużą prędkością wzdłuż osi cylindra podczas suwu dolotu kieruje paliwo do płomienia. Nie ma problemów z uruchomieniem silnika w niskiej temperaturze, a zużycie paliwa jest na podobnym poziomie [4].

Firma Bosch opracowała technologię dwupaliwowego zasilania silnika o zapłonie iskrowym benzyną, alkoholem lub mieszaniną obu paliw. System wtryskowy firmy Bosch zapewnia dowolne mieszanie obu paliw [3, 4].

Firma Saab Biopole zdobyła w 2006 roku nagrodę za innowacyjność Future-Auto, przyznaną przez BJAP (Beroepsjournalisten van de AuomobilPers). Saab 9-5 2.0t BioPower zasilany bioetanolem rozwija większą moc (133 kW) niż jego benzynowy odpowiednik (110 kW). System sterowania Trionic monitoruje jakość paliwa i dokonuje korekt pod kątem zasilania paliwem E85 [3, 4].

Aktualnie trwają prace nad wykorzystaniem alkoholi nie tylko jako paliw w samochodach, ale również w innych urządzeniach. Przykładowo, Maciak [7] badał wpływ zawartości etanolu na parametry silnika pilarki spalinowej. Badania wykazały, że praca silnika pilarki na mieszankach benzynowo-etanolowych nie uległa zmianie, poza tym dodatek bioetanolu w badanym zakresie wpływa korzystnie na charakterystykę silnika, tj. powoduje wzrost mocy, momentu obrotowego oraz zmniejszenie zużycia paliwa. Nie wpływa natomiast w istotnym stopniu na elastyczność silnika.

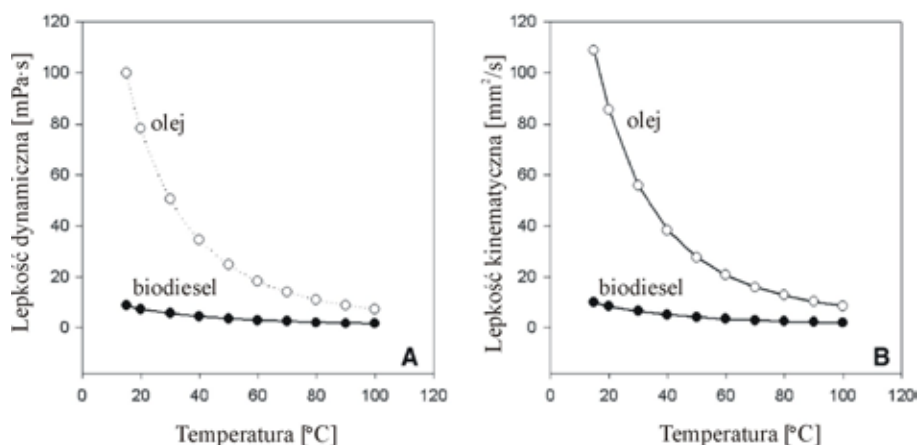
Budowa chemiczna cząsteczek olejów roślinnych jest całkowicie odmienna od oleju napędowego pochodzącego z ropy naftowej. Oleje roślinne są estrami glicerolu i kwasów tłuszczowych. Kwasy tłuszczowe wchodzące w skład olejów roślinnych zawierają od 14 do 24 atomów węgla z wyraźną przewagą kwasów z 16–18 atomami węgla w cząsteczce [8]. Większość olejów roślinnych w ponad 50% składa się z estrów kwasów nienasyconych o 1–3 wiązaniach podwójnych. Zawartość tych kwasów decyduje o ich lepkości i im większa jest ich zawartość, tym lepkość

oleju jest mniejsza. W konsekwencji decyduje to o obniżeniu temperatury krzepnięcia, dzięki czemu taki olej odznacza się korzystniejszymi cechami ze względu na zastosowanie w silniku. Jednak oleje te są mniej stabilne termicznie oraz bardziej skłonne do polimeryzacji, w wyniku czego wytwarzają osady węglowe na elementach aparatury wtryskowej i komory spalania silnika [9].

Do głównych korzyści wynikających z przeestryfikowania naturalnego oleju rzepakowego należy zaliczyć [8, 9]:

- istotne zmniejszenie cząsteczek i zmniejszenie lepkości (nawet 10-krotnie),
- wyeliminowanie obecności triglicerydów powodujących osady w komorze spalania oraz
- obniżenie temperatury mętnienia i krzepnięcia oraz polepszenie lotności paliwa.

Davis i współpracownicy [10] pozyskiwali biodiesel z orzeszków ziemnych. Autorzy porównali lepkość nierafinowanego oleju arachidowego i biodiesla (rysunek), stwierdzając iż transestryfikacja znacząco obniża zarówno lepkość dynamiczną, jak i kinematyczną.



Rys. 1. Lepkość dynamiczna (A) i kinematyczna (B) nierafinowanego oleju arachidowego i otrzymanego z niego biodiesla [10]

Estry metylowe kwasów oleju rzepakowego (EMKOR) cechują się lepszą smarnością, niż niskosiarkowe oleje napędowe. W wyniku rozbicia triglicerydu ograniczone zostają zarówno rozmiary monomerów, jak i liczba molekuł zawierających podwójne wiązania. Tlen zawarty w paliwie, charakteryzuje się większą aktywnością chemiczną podczas procesu spalania, niż tlen cząsteczkowy, zawarty w powietrzu. Zdecydowaną zaletą estrów metylowych kwasów tłuszczowych jest bardzo niska lub prawie zerowa zawartość siarki, co jest nie tylko istotne z punktu widzenia mniejszej emisji cząstek stałych, lecz także obniża korozyjne zużycie

elementów silnika. Niewątpliwą wadą estrów metylowych kwasów tłuszczowych jest zawartość w nich wody, którą w przeciwieństwie do oleju napędowego stosunkowo trudno oddzielić od estru. Temperatura zablokowania zimnego filtra jest jednym ze wskaźników określających zdolności przepływowe paliwa w niskich temperaturach. W przypadku oleju napędowego w miarę spadku temperatury następuje wytrącenie się kryształków parafiny, które przepływając przez filtr paliwa będą zatykały wkład filtracyjny i przerywały przepływ paliwa. Paliwa rzepakowe są praktycznie pozbawione parafin co powoduje że badania temperatury zablokowania zimnego filtra dla oleju napędowego nie są reprezentatywne dla paliw rzepakowych. W niskich temperaturach w paliwach tych mogą krystalizować estry nienasycone oraz woda zawarta w paliwie [7].

Ze względu na swoje właściwości, paliwa pochodzenia roślinnego mogą powodować pewne problemy z rozruchem silników w obniżonych temperaturach. Związane jest to nie tylko z wysoką temperaturą mętnienia wynoszącą ok.  $-7^{\circ}\text{C}$  oraz zablokowania zimnego filtra wynosząca ok.  $-13^{\circ}\text{C}$  ale również z gwałtownie rosnącą lepkością w temperaturze około  $-10^{\circ}\text{C}$ , która powoduje wzrost oporów przepływu przez filtry paliwa. Na właściwości rozruchowe duży wpływ ma również niekorzystna krzywa destylacji, tj. brak niskowrzących frakcji oraz wysoka temperatura wrzenia wymagająca wyższej temperatury w komorze spania [11]. Właściwości niskotemperaturowe można jednak poprawić poprzez wprowadzenie depresatorów, podobnie jak w przypadku olejów napędowych lub poprzez mieszanie estrów z olejami napędowymi o dobrych właściwościach niskotemperaturowych [4, 11].



Rys. 2. Ciągnik na biopaliwo (fot B. Igliński)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zdjęcie wykonane podczas Konferencji Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu, Poznań 2008.

W artykule [12] przedstawiono wyniki badań i analizę wpływu prędkości narastania ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym na emisję akustyczną wtryskiwacza silnika AD3.152 pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej i zasilanego olejem napędowym oraz paliwami roślinnymi. Wykazano, że rodzaj paliwa, którym zasilany jest silnik wywiera istotny wpływ na przebieg procesu wtrysku paliwa i emisję akustyczną wtryskiwacza. Podstawowe wybrane właściwości fizykochemiczne paliw: węglowodorowego Ekodiesel Plus 50B i roślinnego Biodiesel D-FAME (EMKOR) przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wybrane właściwości fizykochemiczne paliw Ekodiesel Plus 50B oraz Biodiesel D-FAME (EMKOR) [12]

Właściwości	Ekodiesel Plus 50B	Biodiesel D-FAME
Liczba cetanowa	51,8	51,3
Napięcie powierzchniowe [ $10^{-2}$ N/m <sup>2</sup> ]	3,47	3,52
Gęstość w 20°C [kg/m <sup>3</sup> ]	848	882
Lepkość kinematyczna w 40°C [mm <sup>2</sup> /s]	3,00	3,55
Wartość opałowa [MJ/kg]	43,0	36,7

Wartości uśrednionych przebiegów ciśnień różnych paliw w przewodzie wtryskowym i prędkości narastania ciśnienia oraz wzniosy iglicy wtryskiwacza, zmierzonych w zakresie prędkości obrotowych 1000–2000 obr/min okazały się większe przy zasilaniu silnika paliwem roślinnym EMKOR w porównaniu z tymi wartościami otrzymanymi przy zasilaniu silnika paliwem węglowodorowym Ekodiesel Plus 50B.

W pracach [13, 14] przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury na lepkość dynamiczną biopaliw typu biodiesel RME (estry oleju rzepakowego) i SME (estry oleju sojowego) oraz dla porównania oleju napędowego. Badania stanowiskowe przeprowadzono na reometrze RHEOLABQC niemieckiej firmy Anton Paar GmbH. W celu określenia wpływu temperatury na lepkość dynamiczną reometr został wyposażony w wannę termostatyczną firmy GRANT. Dla badanych paliw wyznaczono zmienność lepkości w zakresie temperatury od -10 do 20°C. W temperaturze -10°C najwyższą lepkością wynoszącą 42 mPa·s charakteryzował się RME, nieco niższą wartość lepkości uzyskano dla SME – 36 mPa·s, natomiast najniższą lepkością cechuje się olej napędowy - 10,3 mPa·s. Wraz ze wzrostem temperatury lepkość malała, przy czym dla RME i SME gwałtownie w zakresie temperatury od -10 do -6°C. Dla pozostałego zakresu temperatury lepkość maleje praktycznie liniowo wraz ze wzrostem temperatury. W temperaturze 20°C lepkość przyjmowała następujące wartości około 13 mPa·s dla RME oraz SME i odpowiednio 8,4 mPa·s dla oleju napędowego.

Myung i współpracownicy [15] badali zmianę ilości i masę części stałych emitowanych podczas spalania paliw ropopochodnych i biopaliw. Autorzy stwierdzili, iż stosowanie biopaliw zmniejsza zadymienie i emisję cząstek stałych; o 37% dla E85 w porównaniu z benzyną oraz o 22% dla biodiesla. Najniższymi emisjami podczas spalania charakteryzowały się paliwa gazowe (biogaz, CNG).

W ostatnim czasie Volkswagen wprowadził na rynek wielopaliwowy samochód Golf Ecomatic przystosowany do pracy na paliwie rzepakowym i mieszankach z olejem napędowym. Krajem, który dynamicznie rozwija rynek biopaliw jest Francja [4]. Na biopaliwo jeździ tam ponad 3500 samochodów.

Od 26 września 2009 r. Wodociągi Miejskie w Portland w stanie Oregon posiadają największą w Stanach Zjednoczonych flotę 84 pojazdów zasilanych paliwem z zawartością co najmniej 99% biodiesla. Od sierpnia 2004 r. do tego dnia zużywały paliwo B20 (20% biodiesla, 80% oleju napędowego). Przedsiębiorstwo kupuje rocznie ponad 470 tys. litrów paliwa. Na pojazdach umieszczona jest naklejka z napisem „Powered by Biodiesel”. Biodiesel będzie wlewany do koparek, wywrotek, kompresorów, wózków widłowych, traktorów, kosiarek, agregatów prądotwórczych i innych urządzeń oraz pojazdów osobowych, będących w posiadaniu firmy [16].

W Polsce pionierem produkcji biodiesla była Rafineria Trzebinia SA, której głównym udziałowcem jest PKN Orlen SA (77,15%) [17]. Zaledwie w kilka miesięcy po uruchomieniu, wykorzystanie instalacji osiągnęło poziom 95–98%. Zdecydowana większość biodiesla produkowanego w Trzebini sprzedawana jest odbiorcom zagranicznym w cenie ok. 800 euro za tonę. Na krajowym rynku odbiorcami nowego paliwa, określanego jako ON BIO, są firmy transportowe i kolej. Uruchomiono też pilotażową sprzedaż detaliczną – na stacji znajdującej się na terenie rafinerii. Miesięcznie sprzedaje się tam ok. 17 Gg biodiesla. Cena jest o około 20-30 groszy niższa od ceny zwykłego oleju napędowego, dzięki uldze w podatku akcyzowym. Ulgi wprowadzono w styczniu 2004 r., a ich wysokość zależy od wielkości domieszki. Paliwo z Trzebini zawiera 20% biokomponentu, gdyż taka domieszka ma najlepiej odpowiadać charakterystyce olejów napędowych produkowanych w zakładzie głównym w Płocku.

Co drugi autobus Przedsiębiorstwa Komunikacji Miejskiej w Białymstoku będzie od marca 2010 jeździł na ekologicznym oleju napędowym, tzw. bioestrze. Spółka zakończyła testy tego paliwa w swoich pojazdach. Przedsiębiorstwo Komunikacji Miejskiej w Białymstoku szacuje, że rocznie przyniesie to ok. 900 tys. zł oszczędności. Ma to zminimalizować straty wynikające z planów podniesienia akcyzy na olej napędowy od przyszłego roku [18].

Na rysunku 3 przedstawiono liczbę stacji paliwowych w poszczególnych województwach, na których można zatankować biopaliwa [19].



Rys. 3. Stacje „biopaliwowe” w Polsce [19]

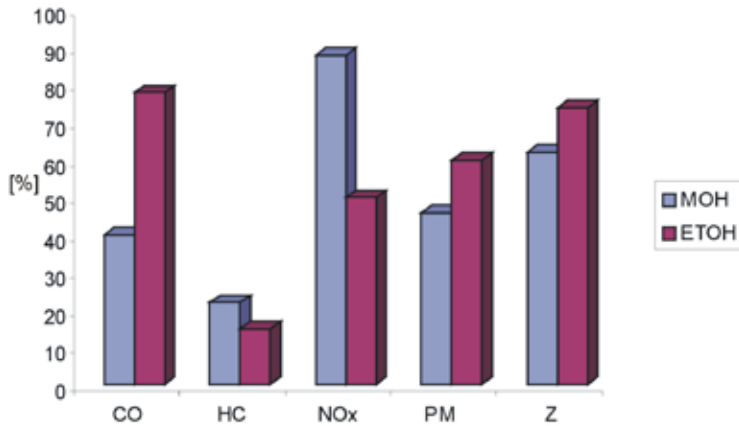
## Biopaliwa a ochrona środowiska

Ogólnie, biopaliwa jako produkty naturalne, bardzo łatwo ulegają biodegradacji. Wynika to z ich budowy chemicznej. Tradycyjne paliwa ropopochodne stanowią bardzo skomplikowane mieszaniny węglowodorów z wieloma wiązaniami podwójnymi, a także łańcuchami cyklicznymi. W skład paliw pochodzenia mineralnego wchodzi również związki niebezpieczne dla zdrowia człowieka (m.in. węglowodory aromatyczne), decydując o ich dużej toksyczności [1, 12].

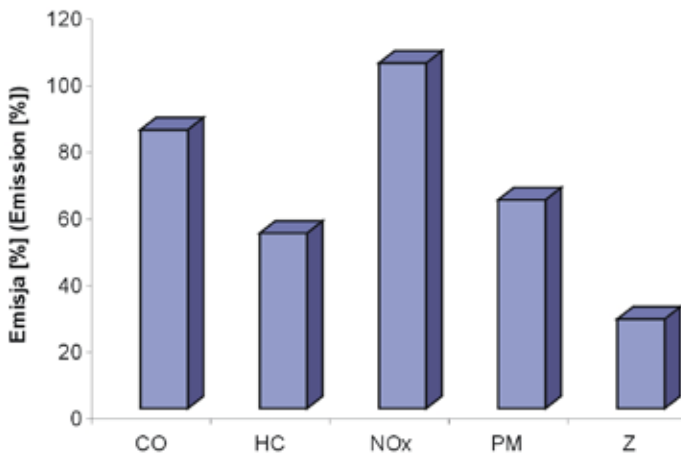
Cząsteczki biopaliw, w szczególności alkoholi, mają prostą budowę i zawierają więcej tlenu, który sprzyja ich rozkładowi przez destruentów, a zarazem przyczynia się do pełniejszego spalania biopaliwa. Cząsteczki alkoholi nie zawierają w ogóle, a cząsteczki estrów około 300 razy mniej niż paliwa konwencjonalne siarki, której tlenki odpowiedzialne są za powstawanie kwaśnych deszczy [1, 2, 20].

Skład chemiczny paliwa i przebieg procesu spalania ma bezpośrednie odzwierciedlenie w składzie gazów po spalaniu. W przypadku paliw ropopochodnych, podczas spalania, wprowadza się do obiegu pierwiastki (głównie C, S, N) zakumulowane wiele tysięcy lat temu, silnie zaburzając równowagę ekologiczną. W przypadku biopaliw stwierdza się znaczne zmniejszenie emisji szkodliwych gazów oraz spadek stopnia zadymienia (rys. 4 i rys. 5) [21, 22].



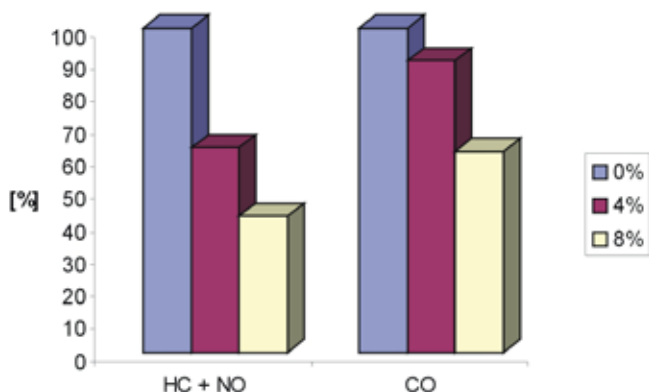


Rys. 4. Emisja CO, węglowodorów (HC), NO<sub>x</sub>, cząstek stałych (PM) i zadymienie (Z) metanolu i etanolu względem benzyny bezołowiowej (100% odpowiada benzynie) [21, 22].



Rys. 5. Emisja CO, węglowodorów (HC), NO<sub>x</sub>, cząstek stałych (PM) i zadymienie (Z) dla Biodiesla względem oleju napędowego (100% odpowiada olejowi napędowemu) [21, 22]

Stwierdzono, iż już niewielki dodatek alkoholu do paliwa konwencjonalnego wywiera pozytywny wpływ na środowisko [22]. Kilkoprocentowy dodatek alkoholu „rozcieńcza” benzynę, a obecny w cząsteczce tlen zapewnia pełniejsze spalanie, dzięki czemu obserwuje się spadek emisji NO<sub>x</sub>, CO i niespalonych węglowodorów nawet do 60% w stosunku do benzyn niezawierających alkoholu (rys. 6).



Rys. 6. Wpływ dodatku etanolu [%] do benzyny na emisję tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu [11, 21, 22].

Dodatek do oleju napędowego olejów roślinnych i ich estrów powoduje również redukcję emisji  $\text{NO}_x$ , CO, cząstek stałych, tlenków siarki i metali ciężkich. Wynika to przede wszystkim z mniejszej zawartości siarki czy metali ciężkich w olejach roślinnych niż w oleju napędowym. Dowiedziono, iż przy spalaniu olejów roślinnych (i ich estrów) powstaje zdecydowanie mniej związków o działaniu nowotworowym, przede wszystkim wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych. Bardzo ważnym aspektem w przypadku biopaliw jest zamknięty obieg pierwiastków – tyle ile przyroda „wyprodukuje”, tyle wraca przy spalaniu, by ponownie je mogły pobrać rośliny w procesie fotosyntezy [21, 22, 23].

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż na etapie pozyskiwania biopaliwa, można prowadzić działania odciążające środowisko naturalne. Pod uprawę roślin, z których pozyskuje się biopaliwa można wykorzystać grunty leżące odłogiem i skażone, nienadające się na produkcję żywnościową, rekultywując je. Co więcej, biopaliwo można pozyskać z produktów odpadowych. Bardzo dużym zainteresowaniem na całym świecie cieszą się wszelkiego rodzaju oleje posmażalniane. Surowiec ten ma tę przewagę nad świeżym olejem roślinnym, że jest znacznie tańszy [2, 24].

Zastosowanie związków tlenowych w benzynach jest powszechnie stosowaną praktyką kontrolowania emisji CO w wyniku spalania benzyny. Badania wykazują, że dodatek eterów do benzyny w ilości odpowiadającej 2% tlenu daje optymalne obniżenie emisji szkodliwych substancji do atmosfery. Wprowadzenie do benzyn związków tlenowych w ilości około 2,7% mas. tlenu, powoduje obniżenie emisji CO oraz HC zarówno z samochodów z katalizatorem jak i bez katalizatora. Na podstawie badań wielu typów samochodów europejskich bez katalizatora stwierdzono, że dodatek 15% MTBE do benzyny zmniejsza emisję CO od 4% do 43%,

a HC maksymalnie do 14% [25–27]. Zastosowanie związków tlenowych w benzynie wpływa także na zmniejszenie efektu cieplarnianego. Benzyny reformułowane emitują o około 2–3% mniej dwutlenku węgla. Jest to wynikiem zmniejszenia w benzynach zawartości związków aromatycznych i zastąpienia ich związkami tlenowymi [27].

Więcej informacji na temat wykorzystania biopaliw w motoryzacji znajduje się w opracowaniach Merkisza i współpracowników [3, 4, 22] oraz Szlachty i współpracowników [6, 11].

## Literatura

- [1] A.K. Agarwal, *Biofuels Alcohols and biodiesel applications as fuel for internal combustion engines*, Progress in Energy and Combustion Science 33, 233–271, 2001.
- [2] A.Y. Krylowa, E.A. Kozyukov, A.L. Lapidus, *Ethanol and diesel fuel from plant raw materials: A review*, Solid Fuel Chemistry 42(6), 358–364, 2008.
- [3] J. Merkisz, *Ekologiczne problemy silników spalinowych*, Tom 2., Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [4] J. Merkisz, I. Pielucha, *Alternatywne napędy pojazdów*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [5] K. Górski, W. Olszewski, W. Lotko, *Alkohole i etery jako paliwa dla silników o zapłonie samoczynnym*, Czasopismo Techniczne 7-M, 13–24, 2008.
- [6] Z. Szlachta, S. Dudek, *Zasilanie biopaliwami silników pojazdów rolniczych*, [www.pan-ol.lublin.pl/wydawnictwa/Motrol5/Szlachta.pdf](http://www.pan-ol.lublin.pl/wydawnictwa/Motrol5/Szlachta.pdf) (wejście 20.11.09).
- [7] A. Maciak, *Wpływ zawartości etanolu w paliwie na parametry silnika pilarki spalinowej*, Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna 6, 1–3, 2008.
- [8] E.M. Ahahid, Y. Jama, *A review of biodiesel as vehicular fuel*, Renewable&Sustainable Reviews 12, 2477–2487, 2008.
- [9] J. Tys i in., *Technologie i ekonomiczne uwarunkowania produkcji biopaliwa z rzeaku*, Rozprawy i Monografie, Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2003.
- [10] J.P. Davis et al., *Comparison of biodiesel produced from unrefined oils of different peanut cultivars*, Journal of the American Oil Chemists' Society 86, 353–361, 2009.
- [11] Z. Szlachta, *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi*, Wyd. Komunikacji i łączności, Warszawa, 2002.
- [12] A. Ambroziak i in., *Wpływ właściwości paliw mineralnych i roślinnych na prędkość narastania ciśnienia w przewodzie wtryskowym i emisję akustyczną wtryskiwacza*, MOTROL 9, 7–14, 2007.
- [13] W. Szczypiński-Sala, P. Strzępek, *Właściwości smarne wybranych kompozycji biopaliw do silników o zapłonie samoczynnym*, Czasopismo Techniczne 8, 143–150, 2008.
- [14] G. Wcisło, *Wyznaczenie wpływu temperatury na lepkość dynamiczną biopaliw roślinnych*, Inżynieria Rolnicza 10(108), 2008.
- [15] C.L. Myung et al., *Effects of gasoline, diesel, LPG, and low-carbon fuels and various certification modes on nanoparticle emission characteristics in light-duty vehicles*, International Journal of Automotive Technology 10(5), 537–544, 2009.
- [16] <http://www.portlandonline.com/water> (wejście 20.11.09).
- [17] <http://www.cire.pl/pliki/2/rynbiop.pdf> (wejście 20.11.09).

- [18] <http://www.kib.pl> (wejście 23.11.09).
- [19] <http://www.e-biopaliwa.pl/biosprzedaz> (wejście 23.11.09).
- [20] H.L. MacLean, L.B. Lave, *Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies*, Progress in Energy and Combustion Science 29, 1–69, 2003.
- [21] B. Igliński i in., *Ekologiczne skutki stosowania biopaliw*, Ekologia i Technika 13(4), 152–158, 2005.
- [22] J. Merkisz, I. Pielecha, *Alternatywne paliwa i układy napędowe pojazdów*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
- [23] C. Carraretto, A. Macor, A. Mirandola, *Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluation*, Energy 29, 2195–2211, 2004.
- [24] H-J. Kim, B-S. Kang, *Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogenous base catalyst*, Catalysis Today, 93–95, 315–320, 2004.
- [25] D. Laforgia, V. Ardito, *Biodiesel fueled IDI engines: performances, emission and heat release investigation*, Bioresource Technology 51, 53–59, 1995.
- [26] A. Srivastava, R. Prasad, *Triglycerides-based Diesel fuels*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 4, 111–133, 2000.
- [27] H. Fukuda, A. Kondo, *Biodiesel fuel production by transesterification of oils*, Journal of Bioscience and Bioengineering 92, 405–416, 2001.

## POZYSKIWANIE I WZBOGACANIE BIOGAZU

Wzrost liczby ludności na ziemi, uprzemysłowienie oraz wzrastający poziom życia sprzyjają rozwojowi i wdrażaniu nowych przedsięwzięć w dziedzinie energetyki, ochrony czystości powietrza, wód oraz gleb.

Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii powoduje wiele wymiernych korzyści społecznych, gospodarczych i środowiskowych. Wymienić należy powstawanie nowych miejsc pracy, wykorzystanie nieprzydatnych terenów rolniczych, rozwój nowych technologii oraz oszczędność naturalnych zasobów paliwowych i dywersyfikację dostaw paliw. Dzięki wykorzystaniu biomasy perspektywy rozwoju widnieją również przed polskim rolnictwem. Niezwykle pilną potrzebą staje się podjęcie działań w kierunku zabezpieczenia minimalnego wynagrodzenia za wytworzoną energię elektryczną oraz dopłat do upraw roślin wykorzystywanych w procesie wytwarzania energii

Wśród gatunków roślin wykorzystywanych do produkcji biogazu dominuje kukurydza twarda, spotyka się również sorgo afrykańskie, topinambur oraz rozmaite rodzaje traw. O przeznaczeniu całych roślin kukurydzy twardej na produkcję biogazu decydują takie czynniki, jak: wysoka wydajność produkcji biogazu, brak zmian w dotychczasowej technice uprawy i zbioru, łatwa konserwacja zapewniająca długotrwałe magazynowanie oraz uniknięcie faktu sezonowości. Spośród roślin przeznaczanych na produkcję biogazu kukurydza posiada największy „plon metanu” ( $\text{m}^3\text{CH}_4 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ), wypierając tym samym bardziej kosztowne uprawy w rolnictwie krajowym [122].

Fermentacja metanowa przebiegająca w fermentatorze jest porównywalna z procesem trawiennym zachodzącym w żwaczu krowy. Istnieje możliwość jego regulacji m. in. poprzez odpowiednie proporcje składników pokarmowych. Procesy fermentacyjne przebiegają w ten sam sposób do momentu wytworzenia krótkołańcuchowych lotnych kwasów tłuszczowych, takich jak kwas metanowy czy etanowy. W kolejnym etapie następuje zróżnicowanie przemian, w żwaczu procesy zachodzą w kierunku syntezy nowej cząsteczki glukozy, natomiast w fermentatorze anaerobowym następuje produkcja metanu. Proces ten zależy od wielu czynników środowiskowych, fizycznych, biologicznych i chemicznych. Jednym z nich jest stężenie metali ciężkich we wsadzie fermentacyjnym. Obecność metali

ciężkich w środowisku fermentacyjnym może powodować stymulację bądź inhibicję procesu, a nawet działać toksycznie.

Artykuł ten poświęcono zagadnieniom związanym z pozyskiwaniem biogazu oraz procesami jego energetycznego wzbogacania stosowanymi na świecie. Jego aplikacyjny charakter przejawia się w tym, iż obecnie na świecie obserwuje się tendencję do rozwoju technologii produkcji i wykorzystania oraz stosowania biogazu. Stanowi o tym fakt ujęcia problematyki biogazu w VI Programie Ramowym Unii Europejskiej – Priorytet SUSTDEV – 1.1.5, w którym uczestniczy 28-miu partnerów z 8-miu krajów europejskich. Jego podstawę stanowi dyrektywa Unii Europejskiej 2003/30/WE zakładająca zastąpienie do roku 2020, 20% tradycyjnych paliw ropopochodnych paliwami alternatywnymi – 10% gazem ziemnym, 8% - biopaliwami, w tym biogazem i 2% paliwami wodorowymi. Częścią powyższego projektu jest program BIOGASMAX, w którym aktywny udział bierze Zakład Chemicznych Procesów Proekologicznych Wydziału Chemii UMK, jego prace skupiają się głównie na prowadzeniu procesów doświadczalnych, mających na celu uzasadnienie planowanej budowy i eksploatacji biogazowni rolniczej w regionie toruńskim.

## Rola i znaczenie fermentacji metanowej w przyrodzie

Fermentacja metanowa jest jednym z beztlenowych procesów biochemicznych powszechnie zachodzących w przyrodzie przy udziale naturalnej mikroflory występującej np.: w wodach gejzerów, fermentujących osadach ściekowych, pojawiającej się również w torfie, osadach dennych rzek i jezior, wyrobiskach węgla kamiennego, pokładach ropo- i gazonośnych oraz szczelinach wulkanów.

Pojęcie fermentacji metanowej oraz opis zjawiska zależą w dużej mierze od dalszego wykorzystania zawartych w nim informacji. Definicja ewoluowała do dwuetapowego wyjaśnienia procesu, po stricte opisowy charakter. Poniżej, przedstawiono kilka obecnie stosowanych pojęć fermentacji metanowej.

Fermentacja metanowa (*ang.* methane fermentation, *fr.* méthane fermentation, *niem.* die Methangärung, *ros.* ферментация метана) przebiega w dwóch różniących się fazach wywołanych przez różne grupy drobnoustrojów. Bakterie saprofityczne powodują rozkład złożonych substancji organicznych do niższych kwasów tłuszczowych i związków pokrewnych. W drugiej fazie procesu bakterie metanowe zużywają produkty hydrolizy w procesie metanogenezy [1]. Angelidaki opisał proces fermentacji metanowej nie określając liczby etapów przebiegu procesu uznał on, że jest to beztlenowy rozkład, który może zostać zdefiniowany jako biologiczny proces konwersji bez zewnętrznego źródła akceptorów elektronu, takich jak np. tlen w procesach rozkładu tlenowego, czy azotany (V) i (III) lub siarczany (VI) i (IV) w procesach beztlenowych. Podczas procesu fermentacji metanowej węgiel organiczny przechodzi przez kolejne reakcje utlenienia i redukcji, do jego najwyższego stopnia utlenienia w CO<sub>2</sub> i najniższego w CH<sub>4</sub> [2].

Tatara i in. uważają, że beztlenowy rozkład (fermentacja metanowa) jest swoistego rodzaju systemem biologicznym składającym się z serii współdziałań metabolicznych, które mogą zostać sklasyfikowane jako trzy główne procesy. Pierwszy to hydroliza polimerów takich jak węglowodany, tłuszcze i białka do substancji prostszych rozpuszczalnych w wodzie. Drugi proces to acetogeneza, w którym mieszanina związków rozpuszczalnych zostaje przekształcona w wyniku reakcji do jonów octanowych. Trzecim i końcowym procesem jest metanogeneza. Bakterie metanogenne zarówno hetero- jak i autotroficzne wykorzystują jony octanowe, tlenek węgla(IV) oraz wodór do produkcji metanu [3].

Według Jeyaseelana, fermentacja metanowa materii organicznej jest złożonym procesem biologicznym i konwersją materii organicznej do metanu i tlenu węgla(IV) zaprzęgamą kilka grup mikroorganizmów. Badania nad ekologią bakterii procesu fermentacji metanowej wykazują, iż konwersja zachodzi w sześciu różnych etapach, które zostały sklasyfikowane jako: hydroliza biopolimerów (białek, węglowodanów, tłuszczów), fermentacja aminokwasów i cukrów, beztlenowe utlenianie długołańcuchowych kwasów tłuszczowych i alkoholi, beztlenowe utlenianie produktów procesu hydrolizy, takich jak lotne kwasy tłuszczowe i konwersja wodoru do metanu [4]. Bazując na etapach procesu fermentacyjnego możliwa jest symulacja procesu fermentacji metanowej oraz prognoza składu i pozyskiwania biogazu, opierająca się na różnicach w zastosowanej biomacie.

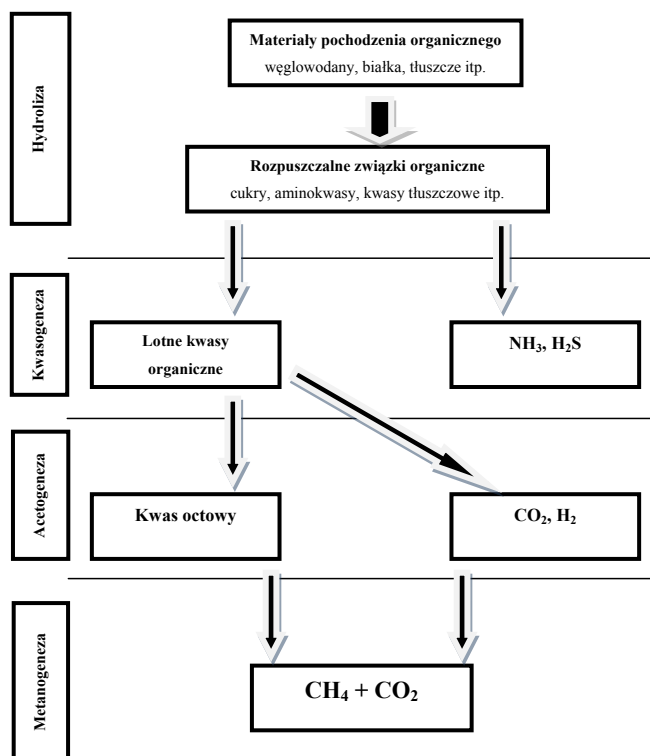
Ezeonu i in. stwierdzili, iż produkcja metanu w fermentatorze przebiega zasadniczo jako reakcja dwuetapowa. W pierwszym etapie, mikroorganizmy kwasogenne redukują kompleksy makromolekuł do jonów octanowych i być może innych lotnych kwasów tłuszczowych, takich jak masłowy czy propionowy. W drugim etapie rozpatrywanej przemiany, bakterie metanogenne przeprowadzają konwersję kwasu octowego i być może lotnych kwasów tłuszczowych do metanu [5].

Mając na uwadze powyższe rozważania dotyczące ilości etapów procesu fermentacji metanowej można stwierdzić, iż wszystkie wymienione definicje nie odzwierciedlają faktycznej natury procesu. Istnieją definicje, które opisują nawet dziewięcioetapowy rozkład materii organicznej do  $\text{CO}_2$  i  $\text{CH}_4$ . Na potrzeby niniejszej pracy, procesy zachodzące podczas fermentacji metanowej podzielono na cztery główne etapy, które przedstawiono na rysunku 1.

Bakterie metanogenne należą do *Prokaryota* wśród domeny *Archea* [6]. Bakterie metanogenne należą do ośmiu rodzajów: *Methanobacterium*, *Ethanobrevibacter*, *Methanococcus*, *Methanomicrobium*, *Methanogenium*, *Methanospirillum*, *Methano-sarcina*, *Methanothrix* [6, 7, 8].

Czynniki środowiskowe, takie jak: temperatura, pH, dostępność substratu, itp. mają wpływ na metabolizm drobnoustrojów, a tym samym na zmianę szybkości tworzenia produktów anaerobowych [9].

Jednym z dwóch głównych produktów procesu fermentacji metanowej jest metan. Zajmuje on drugie miejsce wśród gazów powodujących efekt cieplarniany, wskutek wzrastającego stężenia w atmosferze [10, 11].



Rys. 1. Schemat procesów przebiegających podczas fermentacji metanowej

Metan jest najprostszym węglowodorem nasyconym. Jest bezbarwnym gazem, bez zapachu, pali się niebieskim płomieniem. Jest lżejszy od powietrza, zaś jego gęstość w temperaturze 25°C, pod ciśnieniem 1 atm. wynosi 0,657 kg·m<sup>-3</sup>. Rozpuszczalność metanu w wodzie (w temperaturze 25°C) wynosi 0,0345 dm<sup>3</sup>·dm<sup>-3</sup>. Średnia prędkość cząsteczek CH<sub>4</sub> wynosi 680,9 m·s<sup>-1</sup>. W mieszaninie z powietrzem atmosferycznym w stosunku objętościowym 5-15% ma właściwości wybuchowe. Metan w atmosferze występuje w ilościach śladowych, ale jest czynny chemicznie, posiada zdolność pochłaniania promieniowania podczerwonego, czas życia wynosi około 10 lat [11].

Można wymienić wiele znaczących źródeł emisji CH<sub>4</sub>, w tym źródła naturalne (siedliska bakterii metanogennych), do których zaliczamy:

- tereny podmokłe,
- oceany oraz zbiorniki wody słodkiej,
- wulkany i pęknięcia skorupy ziemskiej oraz
- układy pokarmowe zwierząt przeżuwających i termitów – fermentacja celulozy w procesie trawienia.



Naturalne źródła metanu stanowią około 30% emisji globalnej, czyli 100–200 Tg rocznie [11]. W ostatnim czasie wiele uwagi poświęca się hydratowi metanu, zalegającym na dnie mórz i oceanów (np.  $\text{CH}_4 \cdot 46\text{H}_2\text{O}$ ). Przypuszcza się, że zaburzenia związane z uwalnianiem metanu mogą być przyczyną niewyjaśnionych zatoneń statków i zaginięć samolotów w tzw. Trójkącie Bermudzkim. Badania geologiczne potwierdzają istnienie dużych ilości hydratów metanu, których uwolnienie spowodowane na przykład osuwiskami na dnie oceanów lub upadkiem meteorytu, mogłoby stać się przyczyną globalnej katastrofy. Do antropogenicznych źródeł metanu zalicza się:

- wydobycie węgla, gazu ziemnego i ropy naftowej,
- transport i przetwórstwo bogactw naturalnych,
- hodowlę zwierząt domowych (przeżuwacze 12,5% globalnej emisji [22]),
- pola ryżowe,
- wysypiska i oczyszczalnie ścieków oraz
- spalanie materii organicznej [11].

W literaturze można spotkać się również z innym podziałem źródeł emisji metanu: na źródła biologiczne i niebiologiczne, które uwzględniają sposób formowania się metanu na drodze czysto chemicznej bądź biologicznej. Większość występującego w atmosferze metanu produkowana jest przez bakterie beztlenowe, rozkładające materię organiczną. Procesy te zachodzą zarówno w ekosystemach naturalnych takich jak: podmokłe łąki, bagna jak również w ekosystemach antropogenicznych np. wysypiska czy oczyszczalnie ścieków. Przeważająca część emisji antropogenicznej ma pochodzenie biologiczne, a tylko niewielka część powstaje w wyniku niecałkowitego spalania związków organicznych [12].

Znaczenie procesu fermentacji metanowej dla człowieka jest niewątpliwie ważne. Z jednej strony produkcja metanu w procesach usystematyzowanych i w pełni kontrolowanych daje wymierne korzyści w postaci zdecentralizowanych źródeł energii odnawialnej, z drugiej procesy powodujące nieuporządkowaną emisję  $\text{CH}_4$  do atmosfery przyczyniają się do pogłębiania efektu cieplarnianego. Należy szczegółowo zapoznać się oraz dokonać analizy procesów fermentacji beztlenowej, stosując odpowiednie dodatki można pokierować procesem fermentacyjnym w ten sposób, aby w uzasadnionych przypadkach uzyskać jak najwięcej metanu przeznaczonego na cele energetyczne.

## Zastosowanie fermentacji metanowej

Proces fermentacji metanowej można wykorzystać na wiele sposobów, m.in. w procesie utylizacji odpadów jak również w produkcji wysokoenergetycznych produktów takich jak metan.

Obecnie, fermentacja metanowa jest bardzo rozpowszechniona na świecie i stosuje się ją głównie do produkcji biogazu, który wykorzystywany jest w celach energetycznych. Technologiczne elementy fermentacji metanowej cały czas są

rozwijane. Firmy wprowadzają swoje innowacje, zmieniają warunki prowadzenia procesu, aby zwiększyć wydajność i efektywność [13]. Najistotniejsze cechy różniące procesy fermentacyjne to:

- 1) sposób fermentacji:
  - technologie jednostopniowe,
  - technologie dwuetapowe oraz
  - technologie wieloetapowe,
- 2) zawartość suchej masy wsadu:
  - proces suchy ( $> 20\% \text{ DM}^1$ ) lub
  - proces mokry ( $< 20\% \text{ DM}$ ),
- 3) temperatura prowadzenia procesu:
  - proces termofilowy ( $55\text{--}60^\circ\text{C}$ ),
  - proces mezofilowy ( $34\text{--}37^\circ\text{C}$ ) oraz
  - proces psychrofilowy ( $15\text{--}25^\circ\text{C}$ ),
- 4) typ załadunku komory fermentacyjnej:
  - periodyczny,
  - quasi-ciągły lub
  - ciągły.

W biogazowniach rolniczych często znajduje zastosowanie jedno- bądź dwu-etapowa metoda produkcyjna, przy czym główne zainteresowanie skupia się na instalacjach jednoetapowych [13].

W instalacjach jednoetapowych nie występuje przestrzenne rozdzielanie różnych faz procesu technologicznego fermentacji metanowej (hydrolizy, fazy kwasogennej oraz fazy acetogennej i metanogennej). Wszystkie etapy procesu są przeprowadzane w jednym zbiorniku.

W metodach dwu- lub wieloetapowych dokonuje się przestrzennego oddzielenia poszczególnych faz procesu technologicznego na różne zbiorniki.

Rozważając temperaturę procesu, to biogazownie pracujące w trybie mezofilowym eksploatuje się w przedziale temperatury  $32\text{--}38^\circ\text{C}$ , natomiast w termofilowym w przedziale  $42\text{--}55^\circ\text{C}$ , przy czym wyszczególnione tutaj granice są płynne. Ponadto temperatura fermentatora może być optymalizowana w zależności od rodzaju substratu. W trybie mezofilowym pracuje około 80 % biogazowni rolniczych. Instalacje pracujące w trybie termofilowym mogą być częściowo łączone z mezofilowym etapem procesu technologicznego [14].

Napełnianie fermentatora jest w znacznym stopniu zdeterminowane poprzez dostępność świeżego substratu dla mikroorganizmów procesu fermentacyjnego, a tym samym oddziałuje na uwalnianie biogazu. Zasadniczo istnieje podział różniący periodyczny, quasi-ciągły i ciągły sposób zapełniania komór fermentacyjnych:

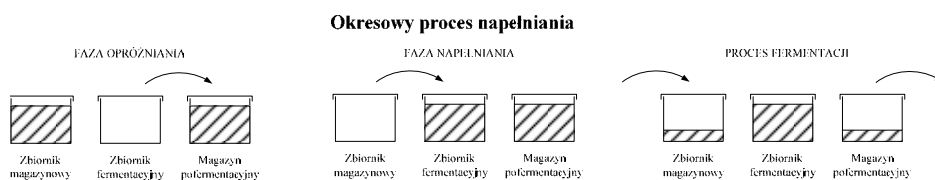
- napełnianie periodyczne – mówiąc o periodycznym sposobie napełniania można wyróżnić proces okresowy i metodę zbiorników wymiennych. Napełnianie nieciągłe posiada duże znaczenie w fermentacji suchej.

---

<sup>1</sup> Dry matter – sucha masa.

W procesie okresowym, zbiornik fermentacyjny jest w całości napełniany świeżym substratem i hermetycznie zamykany przy braku dostępu powietrza. Aż do końca zadanego okresu przetrzymania (retencji) substrat pozostaje w zbiorniku, przy czym w międzyczasie nie dodaje się do komory nowych substancji, nie wybierając produktu przefermentowanego. Po upływie zadanego czasu przetrzymania, fermentator zostaje opróżniony i napełniony nowym wsadem, przy czym na dnie zbiornika pozostawia się niewielką ilość przefermentowanego materiału traktując go jako inokulum mikrobiologiczne. Do sprawnego napełniania i opróżniania zbiornika okresowego wymagany jest dodatkowo zbiornik magazynowy oraz zbiornik na materiał pofermentacyjny. W procesie periodycznym produkcja gazu początkowo po zapełnieniu fermentatora, biegnie powoli, a po osiągnięciu wartości maksymalnej znowu maleje, dlatego nie można w tym przypadku planować stałej produkcji i jakości biogazu.

Okres przetrzymania można zmieniać i bezpiecznie utrzymywać, dobierając wielkość zbiornika [14]. Przebieg tego procesu przedstawiono schematycznie na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat procesu okresowego napełniania komór fermentacyjnych

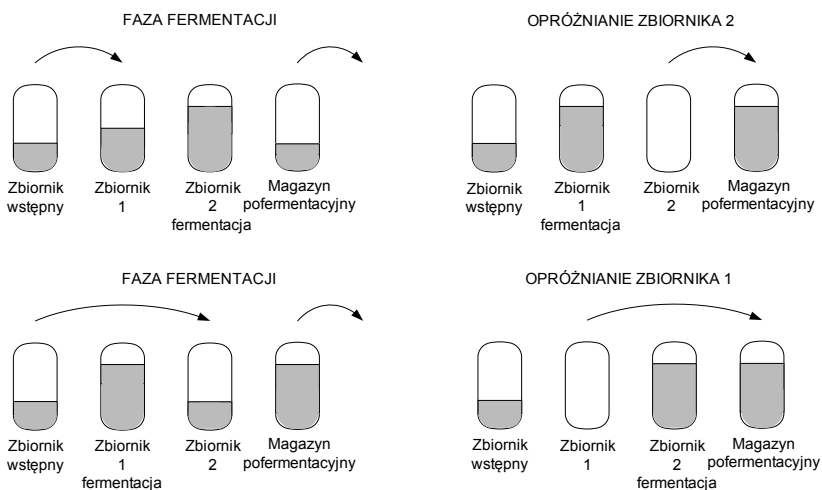
Metoda zbiorników wymiennych opiera się na pracy dwóch reaktorów fermentacyjnych. Pierwszy zbiornik jest powoli i równomiernie napełniany substratem pobieranym ze zbiornika wstępnego, podczas gdy substrat zalegający w drugim zapełnionym zbiorniku jest poddawany procesowi fermentacyjnemu. Kiedy napełnianie pierwszego zbiornika zostanie zakończone, wówczas zawartość drugiego zbiornika zostaje w całości przeniesiona do zbiornika magazynowego, natomiast sam drugi zbiornik jest znowu powoli napełniany. Technikę tego procesu przedstawiono na rysunku 3.

Zastosowanie układu kilku zbiorników umożliwi równomierną produkcję gazu. Metoda ta pozwala również na utrzymanie zdefiniowanego czasu przetrzymania substratu w środowisku reakcji [14].

- Napełnianie w trybie quasi-ciągłym i ciągłym – w tym trybie można wyróżnić trzy metody: przepływową, magazynowania oraz kombinowaną metodę magazynowo-przepływową. W przeciwieństwie do ciągłego sposobu napełniania, w trybie quasi-ciągłym nieprzefermentowany substrat przynajmniej raz w ciągu doby roboczej wprowadza się do fermentatora.

Zaletą tej metody okazało się napełnianie zbiornika niewielkimi porcjami substratów, po kilka razy w ciągu doby.

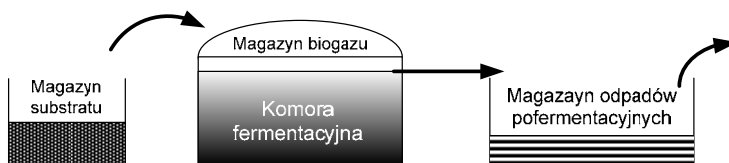
### Metoda zbiorników wymiennych



Rys. 3. Schemat techniki zbiorników wymiennych

#### a) Metoda przepływowa

Znaczna liczba biogazowni pracuje na zasadzie metody przepływowej. Z jednego zbiornika magazynowego, ewentualnie ze zbiornika wstępnego substrat jest przepompowywany kilka razy na dobę do zbiornika fermentacyjnego. Taka sama ilość świeżego substratu, która trafia do fermentatora, przedostaje się wskutek wyporu albo jest wygarniana do zbiornika magazynującego odpady pofermentacyjne, co schematycznie przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Uproszczony schemat metody przepływowej

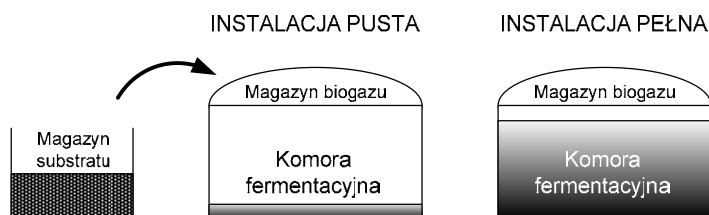
Fermentator używany w takim procesie jest przez cały czas zapełniony i jeśli jest opróżniany, to wyłącznie na czas remontów. Technika ta charakteryzuje się równomierną produkcją gazu i dobrym wykorzystaniem wydajności komory

fermentacyjnej. Niemniej jednak istnieje pewne zagrożenie wywołania przepływu obejściowego przez fermentator, tzn. należy liczyć się z taką sytuacją, że część świeżo doprowadzonego substratu może od razu zostać wyprowadzona ze zbiornika fermentacyjnego [14, 15].

#### b) Metoda magazynowa

W metodzie magazynowej fermentator i magazyn odpadów pofermentacyjnych są połączone i funkcjonują jako jeden zbiornik. Przy odprowadzaniu przefermentowanego substratu ten połączony zbiornik fermentacyjno-składowy nie jest opróżniany do końca, ponieważ pozostawia się w nim pewną ilość materiału fermentacyjnego potrzebną do zaszczepienia świeżego substratu. Następnie, zbiornik ten jest powoli zapełniany substratem pobieranym ze zbiornika wstępnego. Przebieg tego procesu przedstawiono na rysunku 5.

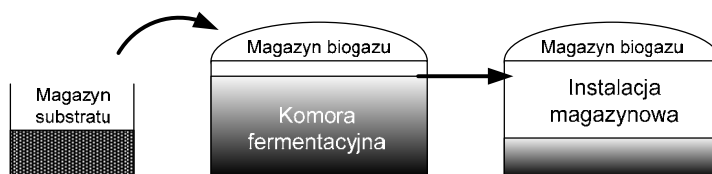
Ten sposób produkcji gazu jest mniej równomierny niż w metodzie przepływowej, ale charakteryzuje się łatwością zapewnienia dłuższego czasu przetrzymywania mieszaniny reakcyjnej [14].



Rys. 5. Schemat przebiegu procesu w metodzie magazynowej

#### c) Łączona metoda przepływowo-magazynowa

W biogazowniach pracujących według łączonej metody przepływowo-magazynowej zbiornik osadów pofermentacyjnych jest zakryty. W ten sposób powstający w tym miejscu ciąg technologicznego biogaz może być wykorzystywany. Zbiornik odpadów pofermentacyjnych funkcjonuje jako pewnego rodzaju „instalacja magazynowania”. W tym układzie instalacyjnym część magazynującą poprzedza podłączony do niej fermentator przepływowy. Z tego fermentatora również można usuwać substrat, jeżeli zaistnieje zapotrzebowanie na duże ilości przefermentowanego produktu do nawożenia. Schematyczny przebieg tego procesu pokazano na rysunku 6. Niniejsza metoda pozwala na równomierną produkcję gazu, przy czym niemożliwe jest dokładne ustalenie czasu przetrzymania mieszaniny fermentacyjnej, ponieważ w fermentatorze przepływowym mogą powstawać przepływy strefowe [14].



Rys. 6. Schemat przebiegu procesu w metodzie przepływowo-magazynowej

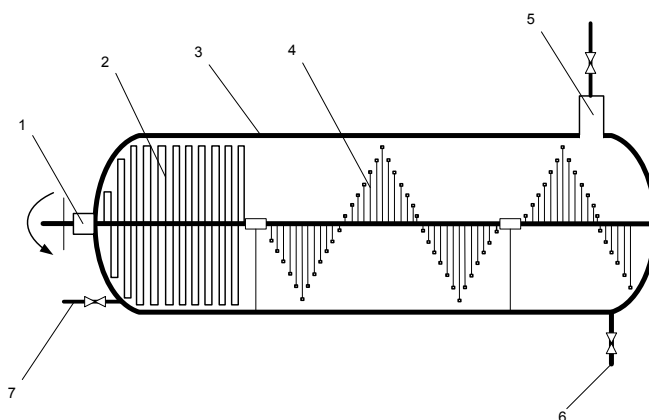
Konsystencja substratów zależy od zawartości substancji suchej. Proces fermentacji mokrej funkcjonuje z wykorzystaniem substratów pompowalnych, podczas gdy w fermentacji suchej stosuje się substraty składowane luzem. W biogazowniach rolniczych niemal wyłącznie zastosowanie znajduje proces fermentacji mokrej.

- Proces fermentacji mokrej

Do tego procesu można zastosować metody przepływu tłokowego, metody przepływu pełnego (z całkowitym mieszaniem) oraz metody specjalne.

- a) Metoda przepływu tłokowego

Biogazownie z przepływem tłokowym, znane również jako zbiornikowe instalacje przepływowe, wykorzystują efekt wyporu doprowadzanego substratu, aby wywołać przepływ tłokowy przez poziomy fermentator, mający przekrój okrągły bądź czterokątny. Zjawisko przepływu w poprzek do kierunku strumienia jest najczęściej realizowane za pomocą wałów łopatkowych albo specjalnie skonstruowanego przewodu przepływowego. Charakterystyczną strukturę tej instalacji przedstawiono na rys. 7.

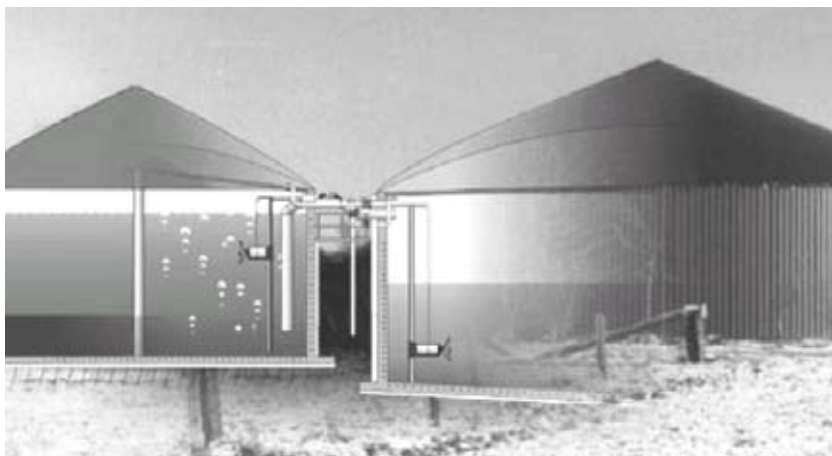


Rys. 7. Poziomy fermentator zbiornikowy z przepływem tłokowym. 1 – silnik, 2 – element grzewczy, 3 – zbiornik stalowy z izolacją, 4 – mieszadło łopatkowe, 5 – odbiór biogazu, 6 – odprowadzenie masy przefermentowanej, 7 – doprowadzenie substratu

#### b) Procesy z całkowitym mieszaniem

Reaktory z całkowitym mieszaniem budowane w formie cylindrycznej stojącej, stosuje się do wytwarzania biogazu przede wszystkim w gospodarce rolnej. W zasadzie pod względem konstrukcyjnym odpowiadają one standardowym zbiornikom na gnojowicę, które jak najbardziej można przystosować do produkcji biogazu dokonując odpowiedniej przebudowy. Fermentatory takie składają się ze zbiornika z betonowym dnem i stalowymi lub żelbetonowymi ściankami. Zbiornik może być całkowicie lub częściowo wpuszczony w podłoże albo zostać zbudowany całkowicie nad powierzchnią gruntu. Na takim zbiorniku nadbudowuje się gazoszczelne przykrycie, które może być wykonane w różny sposób, zależnie od lokalnych wymogów i typu konstrukcji instalacji. Całkowite przemieszanie substratu zapewnia mieszadło lub sam reaktor biogazowy. Specyfikę budowy takiej instalacji przedstawiono na rysunku 8.

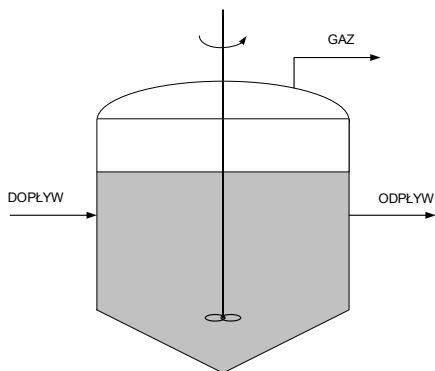
Fermentatory stojące przeważnie występują jako zbiorniki okrągłe i są budowane w miejscu przeznaczenia. Mogą być eksploatowane jako reaktory z całkowitym mieszaniem lub z przepływem tłokowym.



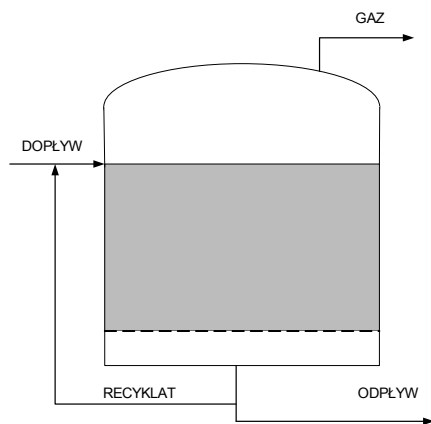
Rys. 8. Fermentator z całkowitym przemieszaniem zawartości, przekrój [16]

Rozwiązania konstrukcyjne układów do prowadzenia procesu fermentacji metanowej czyli pozyskiwania biogazu mogą różnić się zarówno w systemie zasilania substratem, jak i też w sposobie odbierania produktów. Można zatem wyróżnić następujące fermentatory:

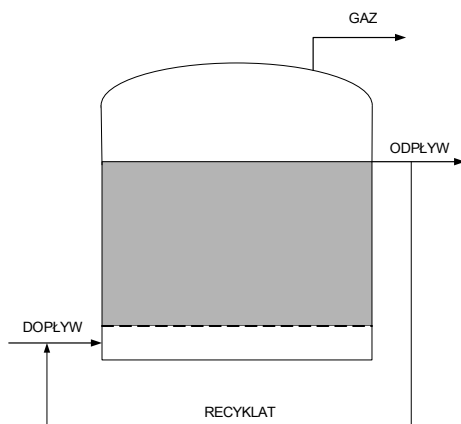
- z mieszaniem i przyrostem mieszaniny fermentacyjnej (rys. 9),
- dolnoprzepływowy (rys. 10),
- górnoprzepływowy (rys. 11) oraz
- hybrydowy, górno przepływowy ze złożem stałym (rys. 12).



Rys. 9. Fermentator z przyrostem i mieszaniem zawiesiny fermentacyjnej

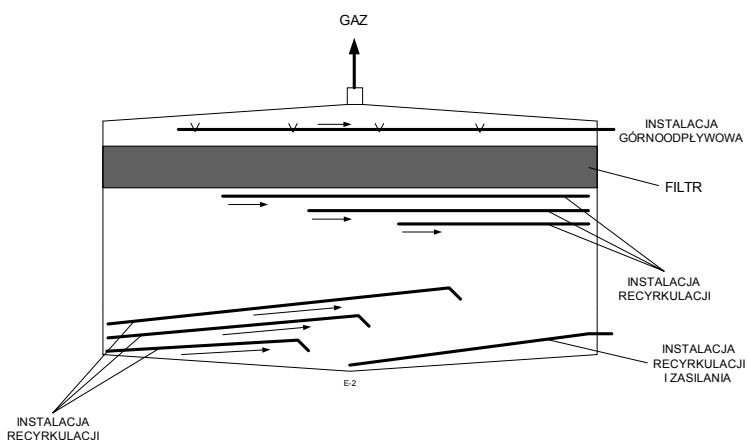


Rys. 10. Fermentator dolnoprzepływowy



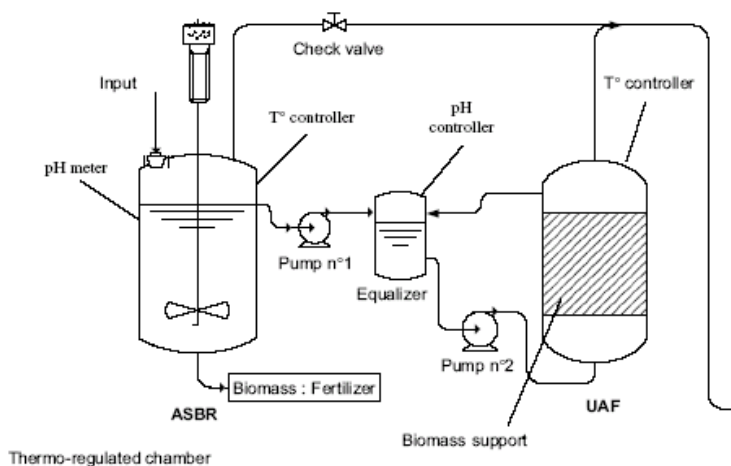
Rys. 11. Fermentator górnoprzepływowy





Rys. 12. Fermentator hybrydowy górnoprzepływowo

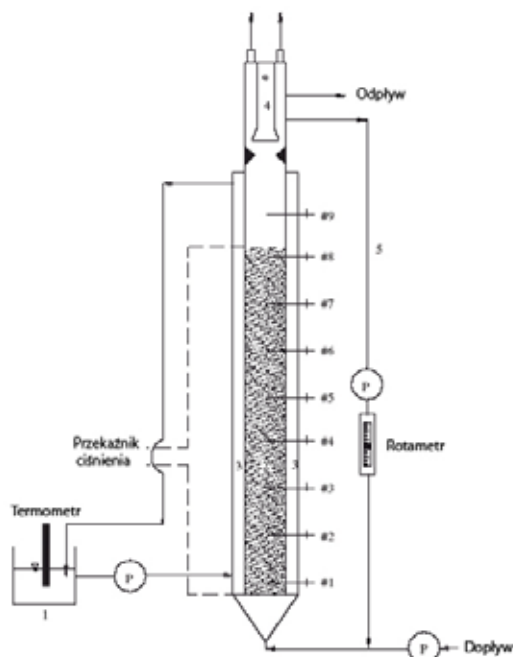
Istnieje wiele modyfikacji bioreaktorów służących do procesu fermentacji metanowej. Modyfikacje dotyczą przede wszystkim sposobu podawania substratów i odbierania produktów oraz sposobu przemieszania biomasy i zastosowania odpowiednich systemów filtracyjnych. Jedną z takich modyfikacji jest beztlenowy sekwencyjny reaktor okresowy (ASBR) z górnoprzepływowym filtrem anaerobowym (UAF) przedstawiony na rysunku 13 [17].



Rys. 13. Schemat dwustopniowego systemu ASBR-UAF [17]

W ostatnich dwóch dekadach beztlenowe reaktory ze złożem fluidalnym (AFBR) zaczęto stosować do oczyszczania wysokoobciążonych ścieków biologicz-

nych. Złoże wypełnione jest węglem aktywnym o granulacji cząstek wynoszącej  $633\mu\text{m}$ . Użyteczność tej metody polega na efektywnym upłynnianiu i separacji części stałych z oczyszczanych ścieków [18].



Rys. 14. Beztlenowy reaktor ze złożem fluidalnym (AFBR) [18]

Polityka zrównoważonego rozwoju ma na celu analizę wpływu oraz usuwanie negatywnych skutków działalności człowieka na otaczające go środowisko naturalne. W obliczu wzrostu liczby ludności na Ziemi, wzrastającego poziomu życia i uprzemysłowienia, uzasadnione jest poszukiwanie i wdrażanie nowych technologii w zakresie energetyki, gospodarki odpadami, ochrony powietrza, gleb oraz wód [19].

Według Holm-Nielsen i Al Seadi, cykl wytwarzania biogazu jest zintegrowanym systemem: wykorzystania zasobów naturalnych, unieszkodliwiania odpadów organicznych, zawracania i dystrybucji składników nawozowych, produkcji energii odnawialnej, co przynosi korzyści zarówno energetyczne, środowiskowe jak i rolnicze [20].

Dzięki produkcji biogazu z odchodów zwierzęcych, jako kosubstratu w biogazowniach rolniczych, następuje eliminacja patogenów w procesie higienizacji, takich jak: bakterie *Salmonella*, *Escherichia coli*, prątki gruźlicy, wirusy przyszczy. Dodatkowo osiąga się poprawę warunków nawożenia pól uprawnych w porównaniu z nieprzefermentowaną gnojowicą oraz zdolność do utrzymania równowa-

gi humusu w glebie i zniszczenie nasion chwastów, a tym samym zmniejsza się zużycie chemicznych środków ochrony roślin. Poprzez wytwarzanie i wykorzystanie biogazu z odchodów zwierzęcych osiąga się redukcję emisji odorów o ponad 80%, zmniejsza się ryzyko zanieczyszczenia wód gruntowych i powierzchniowych, ogranicza się emisję gazów cieplarnianych, przede wszystkim metanu [21], bowiem głównie metan jest odpowiedzialny za efekt cieplarniany, jest około 20 razy bardziej szkodliwy niż tlenek węgla(IV).

Fermentacja metanowa w krajach rozwijających się jest źródłem gazu do przyrządzenia potraw, czy też ogrzewania mieszkań.

Rola procesu fermentacji metanowej jest niezwykle ważna dla środowiska. Proces fermentacyjny jest jednym z wielu elementów obiegu węgla w przyrodzie, prowadzony w odpowiednich i kontrolowanych warunkach może być odnawialnym źródłem energii. Rozważając politykę gospodarką odpadami, proces fermentacji metanowej będzie stał się coraz ważniejszym konkurentem w utylizacji odpadów organicznych, jego zaletą jest to, iż produkt konwersji można wykorzystać w miejscu wytwarzania.

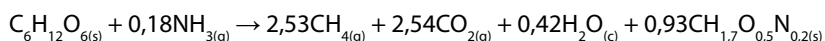
Realizacja tego zadania wymaga odpowiedniego oczyszczenia pozyskanego biogazu, co przedstawiono w kolejnej części artykułu.

## Fermentacja metanowa i techniki oczyszczania biogazu

Fermentacja metanowa jest procesem złożonym z ciągu występujących kolejno po sobie przemian chemicznych katalizowanych przez układy biologiczne. Przemiany te mogą być współbieżne. Polegają one głównie na tym, iż następuje depolimeryzacja polimerów naturalnych przez takie organizmy anaerobowe jak: *Clostridium*, *Fibrobacter*, *Bacteroides* i *Ruminococcus* [23], które to z kolei w etapie kwaso-, aceto- i metanogenezy są przekształcane w metan.

Porównując procesy konwersji różnego rodzaju biomasy do biogazu, biologiczny rozkład beztlenowy jest jednym z ekonomicznie uzasadnionych przedsięwzięć [54]. Można założyć, iż 90% organicznej biomasy poddawanej procesowi fermentacji metanowej to polimery glukozy: celuloza i hemiceluloza [24]. Dla przykładu w tabeli 1 przedstawiono kilka występujących w przyrodzie polimerów.

Podczas gdy celuloza i skrobia ulegają biodegradacji, to inne węglowodany wprowadzone z mieszaniną komórkową nie są biodegradowalne i przekształcane w reakcji Maillarda do kwasów huminowych [25]. Wobec powyższych założeń, skład glukozy może zostać przyjęty jako reprezentatywny dla materii organicznej poddawanej zgazowaniu [24] a cały proces w obecności amoniaku można ogólnie scharakteryzować równaniem (1):



Powyższa reakcja reprezentuje całkowity proces zachodzący podczas beztlenowego wykorzystania materii organicznej ( $C_6H_{12}O_6$ ) zawartej w odpadach organicznych, do syntezy masy komórki bakteryjnej ( $CH_{1,7}O_{0,5}N_{0,2}$ ) i produktów ubocznych metabolizmu bakteryjnego ( $CH_4$ ,  $CO_2$ , i  $H_2O$ ) [4].

Tabela 1. Polisacharydy i ich pochodne występujące w przyrodzie [25]

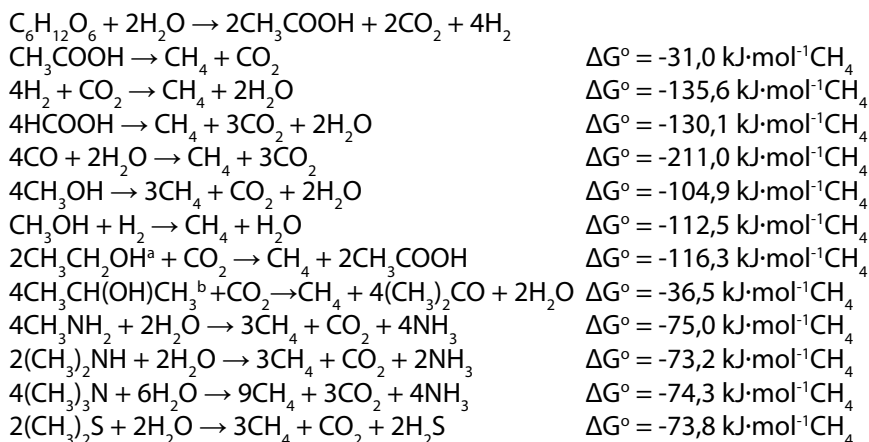
Związek	Wiązanie	Jednostka	Występowanie
celuloza	$\beta$ -1,4-	glukoza	ściana komórkowa roślin
chityna	$\beta$ -1,4-	N-acetyloglukozamina	komórki grzybów i szkielet zewnętrzny insektów
mureina	$\beta$ -1,4-	N-acetyloglukozamina, kwas N-acetylomuraminowy	ściana komórkowa bakterii
chitozan	$\beta$ -1,4-	N-glukozamina podstawiona resztami acetylowymi	materiał budulcowy grzybów i insektów
	$\beta$ -1,4-	mannoza	materiał roślinny
	$\beta$ -1,4-	ksylopiranoza podstawiona resztami acetyloarabinofuranozowymi	materiał roślinny
skrobia	$\alpha$ -1,4-	glukoza, amyloza (zawierająca kilka odgałęzień-1,6-), amylopektyna (zawierająca wiele odgałęzień-1,6-)	materiał roślinny
glikogen	$\alpha$ -1,4-	wysoce rozgałęziona glukoza z wiązaniami -1,6-	materiał zapasowy bakterii
dekstran	$\alpha$ -1,2-	glukoza	materiał zapasowy drożdży
	$\alpha$ -1,3-	glukoza	egzopolimer bakterii
	$\alpha$ -1,4-	glukoza	
	$\alpha$ -1,6-	glukoza	
laminaryna	$\beta$ -1,3-	glukoza	materiał zapasowy alg

## Degradacja biomasy w obecności nieorganicznych akceptorów elektronu podczas rozkładu anaerobowego

W ekosystemach, gdzie występuje niedobór tlenu cząsteczkowego – takich jak bagna, mokradła, żwacz zwierząt, obszar trawienny człowieka czy też osady rzek i jezior – następuje beztlenowe utlenienie biomasy poprzez redukcję takich akceptorów elektronowych, jak: azotany(III), azotany(V), siarczany(VI), siarczki,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$  lub  $CO_2$  [27]. Podobny proces zachodzi również podczas procesu prowadzonego w komorach fermentacyjnych.

Poniżej, przedstawiono szereg reakcji chemicznych, które mogą być katalizowane przez metanogeny. To może skutkować wydzielaniem się gazowego metanu. Podczas rozkładu odpadowych substancji organicznych około  $\frac{2}{3}$  metanu

pochodzi z rozkładu jonów octanowych, natomiast  $1/3$  z redukcji tlenku węgla(IV) wodorem cząsteczkowym. Jeżeli – jak poprzednio założono – heksozy są substratem procesu i glikoliza główną ścieżką rozkładu, wtedy 2 mole jonów pirogronianowych mogą ulec dekarboksylacji z udziałem oksydoreduktazy ferrodoksynowej dając 2 mole jonów octanowych i 2 mole tlenku węgla(IV). Atomy wodoru dwóch moli  $\text{NADH}_2$  z procesu glikolizy i dwóch moli  $\text{FdH}_2$  z dekarboksylacji jonów pirogronianowych są uwalniane jako wodór cząsteczkowy, co opisano równaniem (2):



<sup>a</sup> – lub inny pierwszorzędowy alkohol jako donor wodoru do redukcji  $\text{CO}_2$

<sup>b</sup> – lub inny drugorzędowy alkohol jako donor wodoru do redukcji  $\text{CO}_2$  [28, 29]

W złożonych ekosystemach jony mrówczanowe tworzą się przy wysokim stężeniu nagromadzonego wodoru. Wzajemne interakcje są powiązane z międzygatunkowym przeniesieniem wodoru, ale również jonów mrówczanowych i przykład takiego międzygatunkowego przeniesienia został przedstawiony już w 1988 roku [30]. Prawdopodobieństwo przeniesienia elektronu zależy od rozpuszczalności nośnika – która jest dużo mniejsza dla wodoru niż dla jonów mrówczanowych – oraz współczynnika dyfuzji w wodzie, który dla wodoru jest trzydzieści razy większy niż dla jonów mrówczanowych. Wynika stąd, że współczynnik wydajności odpowiedniego przeniesienia elektronu zależy głównie od odległości pomiędzy komórką producenta a konsumenta. Można oczekiwać, iż transfer jonów mrówczanowych będzie uprzywilejowany, gdy odległość pomiędzy skomunikowanymi bakteriami będzie duża, a przeniesienie wodoru, gdy będzie mała [31].

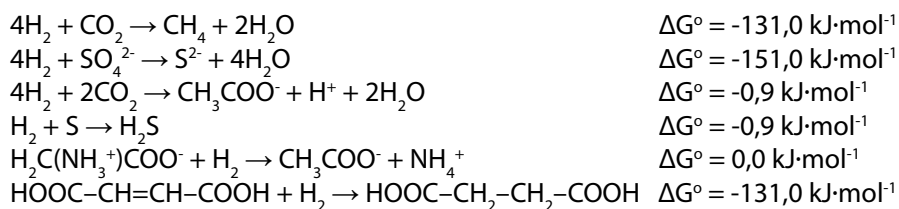
Uważa się, iż międzygatunkowe przeniesienie jonów mrówczanowych odgrywa główną rolę w syntroficznej degradacji jonów maślanianowych [32] i propionowych [33, 34]. Podczas występowania zwiększonego ciśnienia parcjalnego wodoru, metanogeny produkują również jony mrówczanowe, bądź to w czystych kulturach bakteryjnych bądź np. w komorach fermentacyjnych, co może stanowić

przyczynę zwiększonego stężenia jonów mrówczanowych. Dla bakterii metanogennych inne substancje (równania 3-14), takie jak alkohol metylowy, pochodzący np. z grup metoksyłowych monomerów ligniny lub metyloamina i siarczek dime-tylu, pochodzące np. z metylosulfonopropionianów zawartych w algach [35] są istotne tylko w przypadku rozpatrywania ekosystemów, gdzie substancje te powstają w procesie rozkładu mikrobiologicznego. Kilka rodzajów metanogenów może wykorzystywać również związki zredukowane takie jak pierwszorzędowe, drugorzędowe czy cykliczne alkohole jako źródło elektronów do redukcji tlenu węgla (IV) [36, 37].

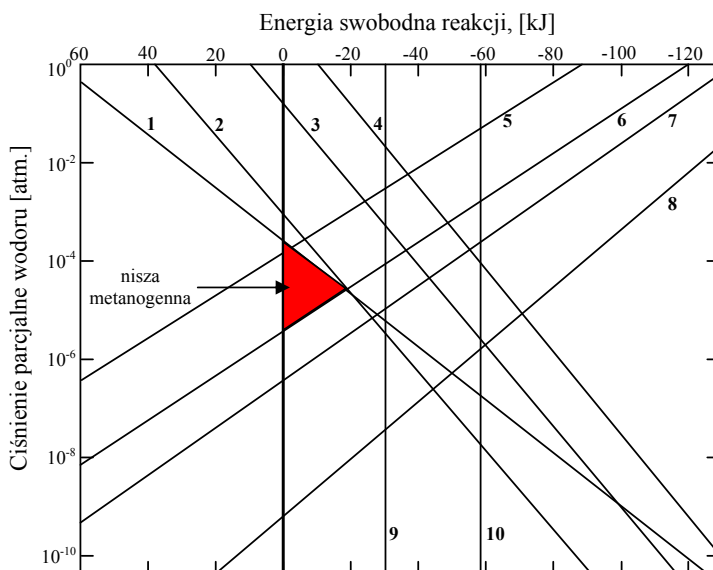
### Rola jonów octanowych i wodoru cząsteczkowego podczas beztlenowego rozkładu biopolimerów

Wodór cząsteczkowy jest wytwarzany podczas różnych stadiów rozkładu beztlenowego. W stadium fermentacji organizmy z takich grup jak *Clostridium sp.* i *Eubacterium sp.* produkują z węglowodanów kwasy tłuszczowe, wodór cząsteczkowy i tlenek węgla(IV). W fazie acetogennej, organizmy takie jak *Syntrophobacter wolinii* i *Syntrophomonas wolfei* produkują jony octanowe, tlenek węgla (IV) i wodór cząsteczkowy lub jony octanowe i wodór cząsteczkowy wykorzystując proces beztlenowego utleniania jonów propionianowych i jonów n-maślanowych [27].

Bakterie fermentacyjne, np. *Clostridia*, *Ruminococcus*, *Eubacterium sp.* uwalniają wodór cząsteczkowy nawet przy wysokim ciśnieniu parcjalnym jednocześnie wydzielając zredukowane produkty. Uwolnienie wodoru cząsteczkowego podczas procesu acetogenezy może zdarzyć się tylko wtedy, kiedy powstający wodór nie akumuluje się, co jest uzasadnione termodynamicznie (rys. 15). Produkowany wodór jest substratem w procesie metanogenezy (równanie 15) lub służy jako reduktor jonów siarczanowych (VI) w procesie przeniesienia międzygatunkowego (równanie 16).



W żwaczach zwierząt i w komorach fermentacyjnych stężenie wodoru cząsteczkowego jest obniżane poprzez syntezę jonów octanowych z tlenu węgla(IV) i wodoru cząsteczkowego (równanie 17) przez bakterie takie jak *Acetobacterium woodii* i *Clostridium thermoaceticum*. Dodatkowe reakcje chemiczne zużywające wodór przedstawiono równaniami (18)–(20).



Rys. 15. Graficzna prezentacja reakcji beztlenowych, uprzywilejowanych termodynamicznie w zależności od parcjalego ciśnienia wodoru. 1 – utlenianie kwasu propionowego do kwasu octowego, 2 – utlenianie kwasu masłowego do kwasu octowego, 3 – utlenianie etanolu do kwasu octowego, 4 – utlenianie kwasu mlekowego do kwasu octowego, 5 – acetogenna redukcja tlenku węgla(IV), 6 – metanogenna redukcja tlenku węgla (IV), 7 – redukcja jonów siarczanowych(VI) do jonów siarczkowych, 8 – redukcja jonów siarczanowych(IV) do jonów siarczkowych, 9 – metanogenne rozszczepienie kwasu octowego, 10 – rozszczepienie kwasu octowego przez bakterie redukujące jony siarczanowe [15]

Całkowita beztlenowa degradacja kwasów tłuszczowych z produkcją wodoru przez obligatoryjne bakterie acetogenne jest możliwa tylko przy ciśnieniu parcjale wodoru cząsteczkowego: dla kwasu n-masłowego – niższym niż  $1 \cdot 10^{-4}$  atm., dla kwasu propionowego – niższym niż  $1 \cdot 10^{-5}$  atm. Jednakże, transport elektronów może zostać odwrócony, poprzez przesunięcie równowagi w stronę niższego potencjału redoks, właściwego dla redukcji protonu [38].

Metabolizm fermentacyjny bakterii metanogennych jest egzoenergetyczny, nawet przy parcjale wodoru większym od  $1 \cdot 10^{-4}$  atm. Podczas gdy bakteriom acetogennym pozornie zależy na produkcji adenozyntrójfosforanów głównie podczas chemoosmotycznej fosforylacji, bakterie fermentacyjne produkują większość ATP poprzez fosforylację z substratów. Może to być powodem, iż bakterie fermentacyjne są niezależne od syntroficznego oddziaływania z bakteriami pobierającymi elektrony jak metanogeny czy redukcenci jonów siarczanowych [25].

## Konwersja biopolimerów do metanu i tlenku węgla(IV)

Prawo beztlenowego rozkładu biopolimerów zostało sformułowane w pionierskich pracach Wolina [39] i Bryanta [40].

Najważniejszym parametrem w trakcie przekształceń węgla na drodze: substrat–biogaz jest parcjalne ciśnienie wodoru cząsteczkowego. Wprowadzenie substratu do procesu biometanizacji musi być ograniczone, aby powoli rozwijająca się grupa obligatoryjnych acetogenów w łańcuchu pokarmowym mogła nadal syntezować wodór cząsteczkowy z maksymalną wydajnością, ale w tym samym czasie musi zostać zachowane, większe niż  $1 \cdot 10^{-5}$  atm. ciśnienie parcjalne wodoru dla właściwego przebiegu metanogenezy lub redukcji jonów siarczanowych [40]. Podczas gdy wodór uważany jest za najbardziej wrażliwy regulator procesu fermentacji metanowej [41], to zwiększenie stężenia zarówno jonów mrówczanowych, octanowych oraz innych lotnych kwasów tłuszczowych nie tłumi procesów rozkładu beztlenowego. Gdyby doszło do zbyt dużego nagromadzenia się wodoru, chociażby z takich przyczyn jak zbyt duża podaż substratów, czy zahamowanie rozwoju metanogenów, to proces rozkładu zostaje zakłócony w kolejnych fazach. Początkowo, w fazie acetogennej zawodzi -oksydacja kwasów tłuszczowych i alkoholi prowadząc do nadmiernej akumulacji tych metabolitów. W kolejnej fazie spektrum metabolitów flory fermentacyjnej ulega zmianie w kierunku związków bardziej zredukowanych, takich jak alkohol etylowy, kwas mlekowy, kwas propionowy i n-masłowy, doprowadzając do dalszego spadku pH. Przy pH poniżej 6,5, reakcje metanogenne zostają prawie całkowicie zahamowane [25].

## Rozkład węglowodanów

Węglowodany to homo- i heteropolimery heksoz, pentoz lub pochodnych cukrów, które występują w formie rozpuszczalnej, lub jako włókna czy inne rodzaje cząsteczek różnej wielkości. W niektórych roślinach skrobia tworzy ziarna o średnicy osiągającej wielkość 1 mm, to jest 1000 razy więcej niż rozmiary bakterii [25].

Badania nad wybranymi kulturami bakterii metanogennych wykazały, że nagromadzone węglowodany są materiałem zapasowym. Dla przykładu, inkluzje glikogenu zaobserwowano w *Clostridium spp.* [42], trehalozę ( $\alpha$ -D-glukopiranozylo-(1,1)- $\alpha$ -D-glukopiranozyd) w *Propionibacterium spp.* [43].

Metabolizm skrobi przez bakterie wymaga hydrolitycznego rozszczepienia przez amylazy na rozpuszczalne monomery lub dimery, bowiem tylko substancje rozpuszczalne mogą być metabolizowane.

Betzlenowy rozkład biopolimerów, a w szczególności celulozy może zostać ogólnie podzielony na fazy: hydrolizy, kwasogenezy, acetogenezy i metanogenezy, co zaprezentowano na rysunkach 16 i 17. Hydroliza i kwasogeneza produk-



tów hydrolizy są katalizowane przez te same grupy troficzne mikroorganizmów. Rozróżnienie tych dwóch procesów posiada aspekt bardziej teoretyczny niż praktyczny. Szybkość fermentacji metanowej w fermentatorze, który jest zasilany substratem stałym, jest ograniczona raczej procesem hydrolizy aniżeli kwasogenezą monomerów [44]. Szybkość hydrolizy różnych polimerów może być bardzo zróżnicowana. Hemiceluloza i pektyna są dziesięć razy szybciej hydrolizowane niż lignina inkrustowana celulozą [44, 45]. W dwustopniowym reaktorze rozkładu beztlenowego, w fazie zakwaszania hydroliza polimerów jest wolniejsza niż kwasogeneza monomerów do kwasów tłuszczowych i innych produktów tego procesu. Z tego powodu na tym etapie procesu, żadne monomery węglowodanów nie mogą zostać wykryte. W fazie fermentacji metanowej etapem limitującym szybkość procesu jest  $\beta$ -oksydacja kwasów tłuszczowych [45].

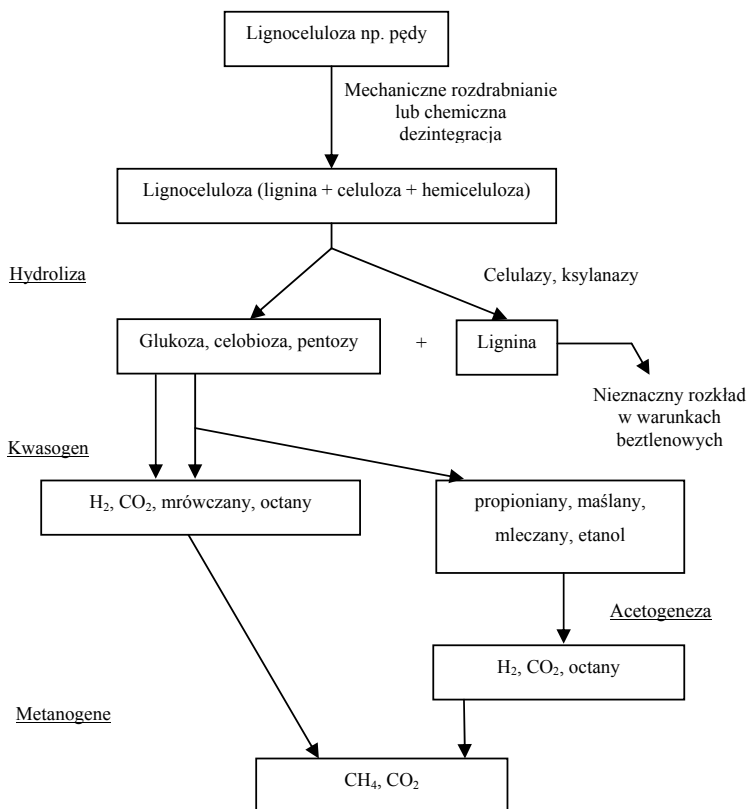
Szybkość wydzielania się metanu w przybliżeniu można opisać wykorzystując stężenia różnych węglowodanów zawartych w substracie podawanym do procesu fermentacji metanowej. Zależność tę opisano równaniem (21):

$$\text{CH}_4 [\text{g}\cdot\text{d}^{-1}] = 123 + 84 \times \text{celuloza} [\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}] - 30 \times \text{hemiceluloza} [\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}] + 58 \times \text{skrobia} [\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}] + 73 \times \text{cukry} [\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}] - 95 \times \text{lignina} [\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}] \quad [46]$$

Proces hydrolizy biopolimerów jest zwykle rozważany pod kątem liczby stadiów mogących wpływać na ograniczenie rozkładu biomasy do  $\text{CH}_4$  [47, 48, 49]. Można wyróżnić pięć faz, które mogą limitować powstawanie  $\text{CH}_4$  [50].

- Faza 1 wyróżnia się ostateczną akumulacją cukrów redukujących, wskazując na proces kwasogenezy jako bardziej limitujący niż proces hydrolizy polisacharydów. Mała szybkość kwasogenezy wpływa na proces metanogenezy przez niewystarczającą ilość wodoru i jonów octanowych.
- Faza 2 charakteryzuje się wyczerpaniem cukrów redukujących oraz akumulacją wodoru cząsteczkowego i jonów octanowych, wskazując, że to proces kwasogenezy przebiega szybciej niż hydrolityczny rozpad polisacharydów, ale procesy wykorzystujące produkty fermentacji są nadal ograniczone. Produkcja metanu w tym stadium zachodzi bardzo wolno, chociaż przyspiesza wykładniczo [51, 52].
- Faza 3 wyróżnia się zużyciem wodoru cząsteczkowego. Jego akceptorem mogą być żelazo(III) i jony siarczanowe(VI) w obecności organizmów metanogennych.
- Faza 4 charakteryzuje się stopniowym obniżaniem stężenia jonów octanowych oraz maksymalną szybkością wydzielania metanu z jednej strony i stałym, niskim ciśnieniem parcjalnym wodoru z drugiej strony. W tym etapie proporcja acetotroficznych *Methanosarcina* nieznacznie wzrasta [53]. Wysoka i specyficzna działalność metanogenów wraz z ciągle wysokim stężeniem jonów octanowych, tłumaczy dlaczego produkcja metanu podczas tej fazy osiąga najwyższy poziom [50].
- Ostatnia faza 5 charakteryzuje się niskim stałym ciśnieniem parcjalnym

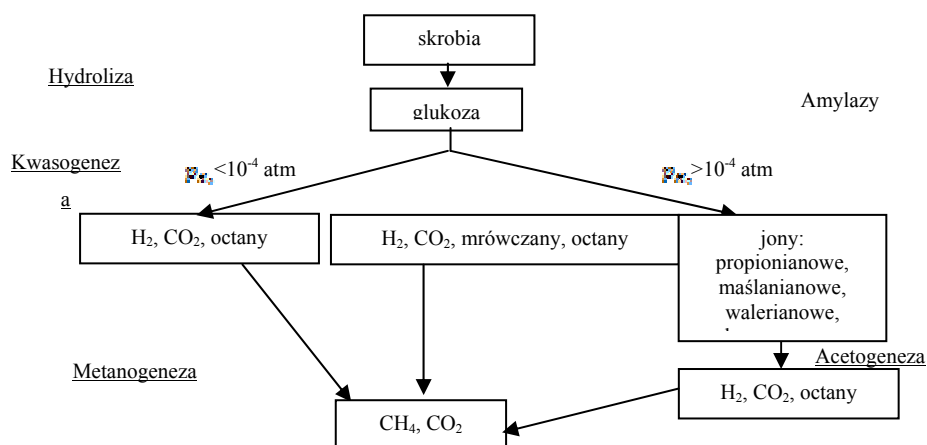
wodoru cząsteczkowego i jonów octanowych. Szybkość wydzielania  $\text{CH}_4$  jest niższa niż w fazie czwartej ale raczej stała. W tej fazie wszystkie procesy zachodzące podczas degradacji metanogennej materii organicznej przechodzą w stan quasi stały czego dowodem jest równomierna produkcja metanu i tlenku węgla (IV) [55]. Interesujące jest, że środowisko acetotrofów metanogennych wydaje się zmieniać podczas tej fazy, rodzaj *Methanosaeta* zaczyna dominować nad rodzajem *Methanosarcina* [56]. Dowodzi tego fakt, iż bakterie z rodzaju *Methanosaeta* są w stanie utylizować jony



octanowe występując w niższym stężeniu aniżeli *Methanosarcinales* [57].

Rys. 16. Beztlenowy rozkład lignocelulozy i celulozy do  $\text{CH}_4$  i  $\text{CO}_2$

Zestawienie czynników limitujących wybrane fazy procesu metanogenezy przedstawiono w tabeli 2, gdzie B – ograniczenie procesu przez aktywność bakterii,



S – ograniczenie poprzez dostępność substratów, IS – hamowanie procesu poprzez zbyt duże stężenie substratów.

Rys. 17. Beztlenowy rozkład skrobi do  $\text{CH}_4$  i  $\text{CO}_2$

Nadal prowadzona jest dyskusja na temat zdolności mikroorganizmów do degradacji ligniny w warunkach beztlenowych. Stwierdzono, iż w warunkach środowiska naturalnego, bez limitu czasowego lignina została zdegradowana beztlenowo [58]. Jednakże, odkąd wyniki zostały oparte o długoterminowe doświadczenia wykonane *in situ* i proces beztlenowy niekontrolowany, pozostaje niepewność, czy mały ubytek ligniny spowodowany jej degradacją w warunkach beztlenowych. Przypadki wzorujące się na węglu i ropie naftowej sugerują, że związki ligniny są wysoce odporne na działanie mikrobiologiczne.

Tabela 2. Czynniki limitujące różne etapy w metanogennym rozkładzie substancji

Krok degradacji	Faza tworzenia $\text{CH}_4$				
	Faza 1	Faza 2	Faza 3	Faza 4	Faza 5
Hydroliza	- <sup>a</sup>	S	S	S	S
Fermentacja cukrów	B	-	S	S	S
$\text{H}_2 + \text{CO}_2 \Rightarrow \text{CH}_4$	B	-	IS	S	S
octany $\Rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	B	B	B	-	S

<sup>a</sup> – nielimitowany

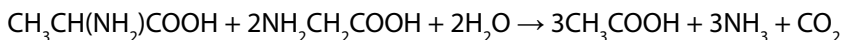
Metanogeneza prowadzona przez kultury metanogenne może zostać zakłócona przez zbyt wysokie lub zbyt niskie stężenie cukrów lub przez obecność takich substancji inhibitujących jak amoniak, siarkowodór, antybiotyki [59] lub kseno-biotyki. W efekcie, rośnie ciśnienie parcjale wodoru cząsteczkowego i produkcja lotnych kwasów tłuszczowych [29, 61, 62], produkowane są jony propionianowe lub n-maślanianowe, a rozkład beztlenowy wymaga obecności organizmów acetogennych do procesu  $\beta$ -oksydacji.

## Rozkład białek

Większość prowadzonych badań dotyczących beztlenowego rozkładu materiału organicznego skupiła się na metabolizmie węglowodanów. Jednakże wiele przemysłowych i rolniczych odpadów zawiera znaczne ilości innych związków, takich jak tłuszcze czy białka [63]. W tym rozdziale skupiono się na rozkładzie białek i peptydów.

W środowisku odpowiednim dla rozkładu metanogenne, białka są hydroli-zowane do peptydów i aminokwasów, które to następnie rozkładane są głównie do krótkich i rozgałęzionych kwasów tłuszczowych, jonów amonowych, tlenu węgla(IV) oraz często wodoru cząsteczkowego [27]. Kilka badań zademonstrowało utylizację wodoru cząsteczkowego z wykorzystaniem międzygatunkowego przeniesienia, podczas rozkładu aminokwasów w warunkach mezofilowych [64, 65, 66, 67] przy niskiej efektywności tego procesu w warunkach termofilowych [68, 69].

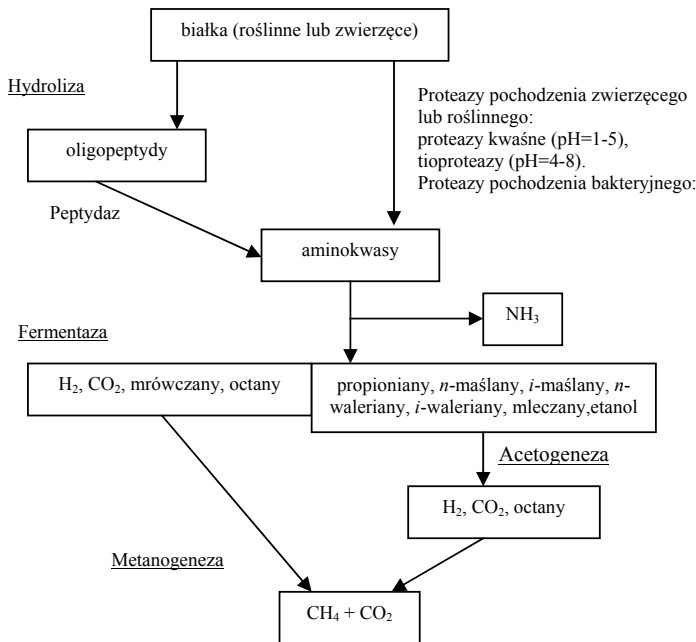
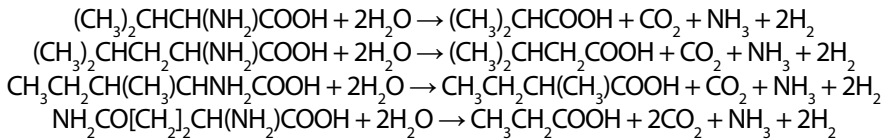
Aminokwasy mogą również być degradowane parami w reakcji Sticklanda, gdzie jeden z aminokwasów ulega deamonifikacji utleniającej, a powstające elek-trony są przenoszone do drugiego aminokwasu, ulegającego deamonifikacji re-dukcyjnej [70]. Proces ten wyjaśniono równaniem reakcji (21).



Schemat kolejnych etapów reakcji koniecznych do degradacji białka przedsta-wiono na rysunku 18. Hydroliza białek jest katalizowana przez kilka typów proteaz, które rozrywają błony przepuszczalne dla aminokwasów, dipeptydów i oligopep-tydów. W odróżnieniu od procesu hydrolizy węglowodanów, który wymaga słabo kwaśnego środowiska reakcji, optymalnym dla procesu hydrolizy protein jest odczyn obojętny lub lekko zasadowy [27]. Podczas procesu fermentacji amino-kwasów w fermentatorach nie dochodzi do znacznej zmiany odczynu środowiska. Spowodowane to jest współbieżną syntezą kwasów oraz jonów amonowych. Na-leży zwrócić uwagę, iż fermentacja węglowodanów powoduje zakwaszenie środo-wiska produkując lotne kwasy tłuszczowe. Zakwaszenie mieszaniny fermentacyj-nej zawierającej białka daje wartości pH wynoszące około 7 i powyżej [71], a jony amonowe ( $\text{NH}_4^+$ ) z jonami węglanowymi(IV) ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) tworzą układ buforowy (bufor węglanowy) stabilizujący odczyn środowiska reakcyjnego.

Acetogeneza kwasów tłuszczowych powstających w wyniku reakcji deaminacji aminokwasów wymaga niskiego ciśnienia parcjalego wodoru cząsteczkowego z tych samych powodów, co podczas rozkładu węglowodanów. Może to być osiągnięte poprzez wzajemne syntroficzne oddziaływanie bakterii fermentacyjnych, rozkładających aminokwasy i bakterii acetogennych, metanogennych oraz redukujących jony siarczanowe, wykluczając bakterie *Clostridium* i inne rodzaje mogące przeprowadzać reakcję Stricklanda [25].

Do całkowitego rozkładu aminokwasów w systemie beztlenowym wymagany jest syntrofizm bakterii fermentujących aminokwasy z metanogenami lub bakteriami redukującymi jony siarczanowe [60, 73, 74]. Jeżeli rozkładane są długocuchowe amino-kwasy, to bezpośrednio powstają takie kwasy, jak: propionowy, *i*-masłowy i *i*-walerianowy, które wymagają do rozłożenia bakterii acetogennych, co przedstawiono równaniami:



Rys. 18. Schemat beztlenowego rozkładu białek

W przeciwieństwie do rozkładu węglowodanów, gdzie produkcję propionianów i maślanów przez bakterie acetogenne można „oszuścić” poprzez limitowanie substratu, podczas rozkładu aminokwasów te kwasy powstają jako produkt deamonifikacji, zaś ich produkcja nie może zostać zahamowana poprzez utrzymywanie niskiego cząstkowego ciśnienia wodoru. W fazie metanogenezy węglowodanów i białek jedyną różnicą w aktywności metanogenów jest fakt, iż w przypadku aminokwasów muszą się one charakteryzować wyższą tolerancją na jony amonowe i wyższe pH [25].

Główne bakterie anaerobowe, które przeprowadzają fermentację aminokwasów zestawiono w tabeli 3. Bazując na literaturze [74, 75, 76, 77] bakterie zaklasyfikowano do 5 grup biorąc pod uwagę reakcję Sticklanda oraz typ rozkładanych aminokwasów.

Grupa 1 to bakterie, które przeprowadzają reakcje Sticklanda. Wszystkie organizmy z tej grupy rozkładają prolinę i produkują  $\alpha$ -aminowaleriany,  $\alpha$ -aminomaśłany lub  $\alpha$ -aminomaśłany jako produkty pośrednie procesu fermentacji. Organizmy, które nie przeprowadzają reakcji Sticklanda ale fermentują aminokwasy przedstawiono w grupach 2–5. Zawierają one głównie formy przetrwalnikowe (gatunki *Clostridia*), i kilka nieprzetrwalnikowych, obligatoryjnych beztlenowców takich jak: *Peptostreptococcus (Micrococcus) spp.* Inne organizmy, które zostały wykryte, jako rozkładające aminokwasy ale nie zawarte w tabeli 3 to: *Campylobacter spp.*, *Acidaminococcus fermentans*, *Acidamino-bacter hydrogenoformans*, *Megasphaera elsdenii*, *Eubacterium acidaminophilum* oraz kilka gatunków redukujących aminokwasy [74].

Wszystkie bakterie grupy 2 rozkładają glicynę, niektóre gatunki również argininę, histydynę i lizynę. Wszystkie organizmy z grupy 3 rozkładają histydynę, serynę i glutaminę, a niektóre gatunki dodatkowo argininę, asparaginę, treoninę, tyrozynę i tryptofan. Grupa 4 bakterii zawiera tylko organizmy *Clostridium putrefaciens*, które wykorzystują serynę i treoninę. Grupa 5 zawiera tylko *Clostridium propionicum*, które wykorzystują alaninę, serynę, treoninę i cysteinę. Żaden rodzaj organizmów z grup 2–5 nie produkuje  $\alpha$ -aminowalerianianów.

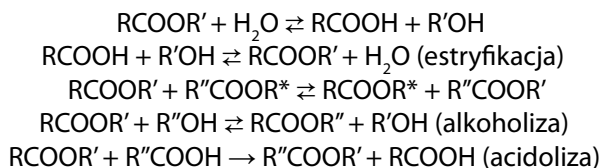
Rozprzegająca degradacja aminokwasów w mieszaninie kultur bakteryjnych i mieszaninie aminokwasów zachodzi tylko wtedy, gdy zaistnieje niedobór aminokwasów, które mogą działać jako akceptory elektronów [64]. Obliczono, że dla białek takich jak: kazeina, i albumina, mniej niż 10% całkowitej zawartości aminokwasów zostało przefermentowane. To wyjaśnia, iż uprzywilejowaną drogą degradacji aminokwasów jest reakcja Sticklanda [64].

Z prac Ramsay'a i in. wynika, iż zmiana warunków zasilania komory fermentacyjnej, np. podwojenie stężenia protein, nie powoduje zmiany szlaku fermentacji aminokwasów. Wybór reakcji Sticklanda daje dobre porównanie, bowiem bazując na procesach równowagi elektronowej tylko około 40% aminokwasów mogło wziąć udział w tych reakcjach. Pozostała część reakcji musiała zależeć od obecności bakterii zużywających wodór, jako akceptorów elektronów [82].

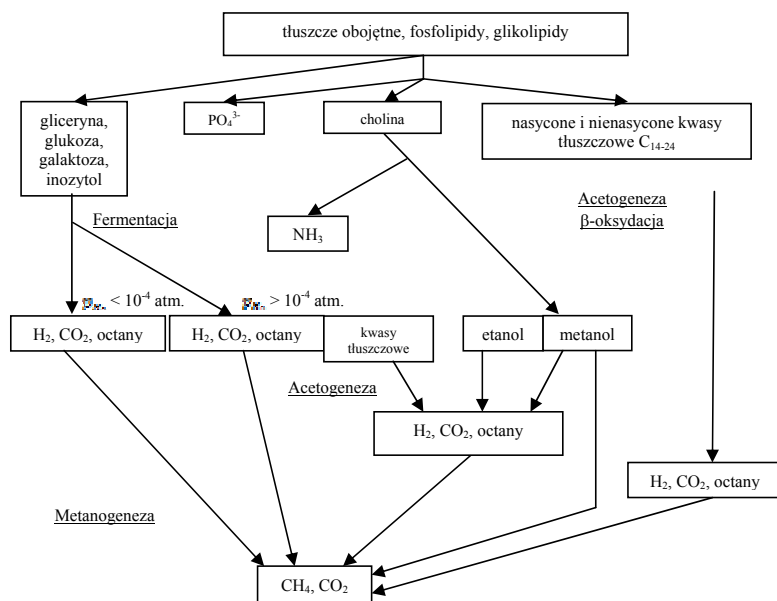
## Rozkład lipidów

Lipidy są naturalnymi, obojętnymi tłuszczami, powstającymi w reakcji estryfikacji długołańcuchowych kwasów tłuszczowych i gliceryny [96]. Wiele przedsiębiorstw specjalizujących się w branżach takich jak: mleczarstwo, rzeźnictwo i ubojnie, rafinerie olejów i tłuszczów jadalnych, produkcja margaryn, czyszczenie skór czy chociażby pakowanie produktów mięsnych, wytwarzają odpady zawierające znaczną ilość tłuszczów [97]. Aby dostarczyć wystarczającej powierzchni dla hydrolytycznego rozpadu tłuszczów przez lipazy lub fosfolipazy, tłuszcze stałe, lipidy oraz oleje muszą zostać zemulgowane. Podczas rozpadu tłuszczów obojętnych z udziałem zewnątrz-komórkowych lipaz, powstaje glicerol oraz nasycone i nienasycone kwasy karboksylowe (np. kwas mirystynowy (14:0), kwas palmitynowy (16:0), kwas linolowy (18:2), kwas linolenowy (18:3), kwas stearynowy (18:0)). Lipolityczny rozkład fosfolipidów generuje kwasy tłuszczowe, glicerynę, alkohole (np. serynę, etanoloaminę, cholinę, inozytol) i jony fosforanowe (V). Podczas rozpadu sfingolipidów powstają kwasy tłuszczowe, aminoalkohole (np. sfingozyne). Rozpad glikolipidów daje kwasy tłuszczowe, aminoalkohole oraz heksozy (np. glukozę, galaktozę).

Dwa główne rodzaje reakcji chemicznych katalizowane przez lipazy produkowane przez różnego rodzaju bakterie to hydroliza i syntezy. Równania często nazywane są jednym terminem – transestryfikacji [98].



Schemat beztlenowej degradacji tłuszczów przedstawiono na rysunku 19. Proces hydrolizy lipidów może być inhibitowany poprzez nagromadzenie produktów reakcji rozpadu. Zależy to w dużej mierze od zasady działania i specyficzności enzymów lipolitycznych, które to dla swojej aktywności wymagają przyłączenia do substratu. Mechanizm hydrolizy lipidów, jako zjawisko powierzchniowe, jest funkcją stężenia substratu i „jakości” połączenia enzymu z substratem [99]. Konkludując, lipidy nie są rozkładane w kwaśnej fazie procesu fermentacyjnego [100, 101, 106, 107].



Rys. 19. Schemat metanogenego rozkładu tłuszczów [27]

## Techniki oczyszczania biogazu

Uwzględniając aspekt aplikacyjny niniejszej pracy, należy zwrócić uwagę na techniki oczyszczania biogazu (wzbogacania w metan) do parametrów zbliżonych do gazu ziemnego, bowiem każdy proces fermentacji metanowej prowadzi do otrzymania mieszaniny gazów głównych: tlenku węgla(IV) i metanu oraz pobocznych, takich jak: siarkowodór, amoniak, i chlorowcopochodne związków organicznych. Zawartość metanu jest czynnikiem limitującym zastosowanie biogazu chociażby do napędzania silników samochodowych czy możliwości iniekcji do sieci gazowej.

Istnieje wiele technik oczyszczania biogazu. W niniejszym rozdziale pracy przedstawiono pokrótce najważniejsze techniki oczyszczania surowego biogazu, stają się one bowiem czynnikiem warunkującym aspekt aplikacyjny późniejszego zastosowania.

Ekwiwalent energetyczny wzbogaconego i oczyszczonego biogazu oraz innych paliw przedstawia się następująco:

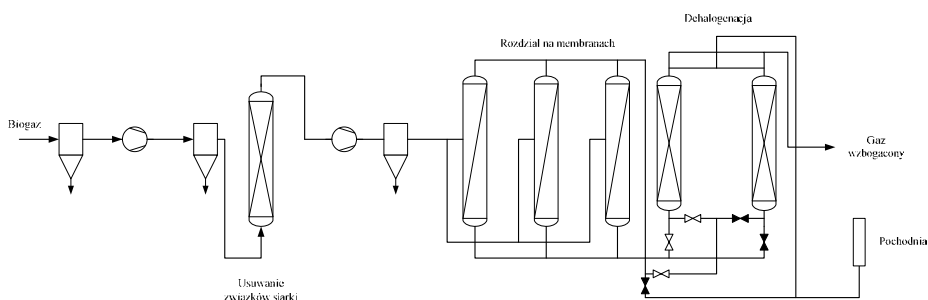
- a) 1 Nm<sup>3</sup> biogazu (97% CH<sub>4</sub>) – 9,67 kWh,
- b) 1 Nm<sup>3</sup> gazu ziemnego – 11,0 kWh,
- c) 1 dm<sup>3</sup> benzyny – 9,06 kWh,
- d) 1 dm<sup>3</sup> oleju napędowego – 9,8 kWh,



- e)  $1 \text{ Nm}^3$  biogazu – około  $1,1 \text{ dm}^3$  benzyny,  
 f)  $1 \text{ Nm}^3$  gazu ziemnego – około  $1,2 \text{ dm}^3$  benzyny.

## Technika membranowa

Instalacje membranowe lokalizowane są bezpośrednio na ujęciach gazów. Zadaniem docelowym jest rozdzielenie strumienia gazu na dwa: permeat zawierający od 92 do 95 %v/v  $\text{CO}_2$  i gaz wzbogacony w metan czyli retentat. W metodzie membranowej separację gazów osiąga się dzięki różnej zdolności przenikania gazu przez błony półprzepuszczalne. Wcześniej należy jednak usunąć siarkowodor, gdyż uszkadza on membrany wykonane z octanu celulozy, silikonów lub materiałów poliwęglanowych (rysunek 20).

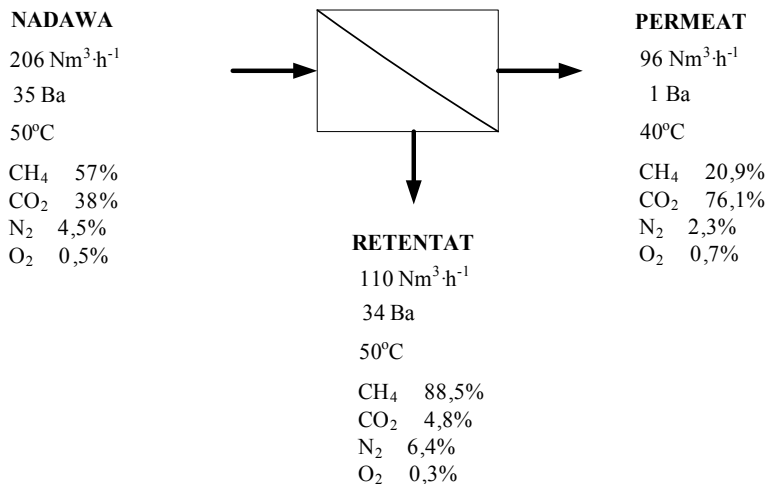


Rys. 20. Schemat instalacji do membranowej separacji tlenku węgla(IV) i metanu

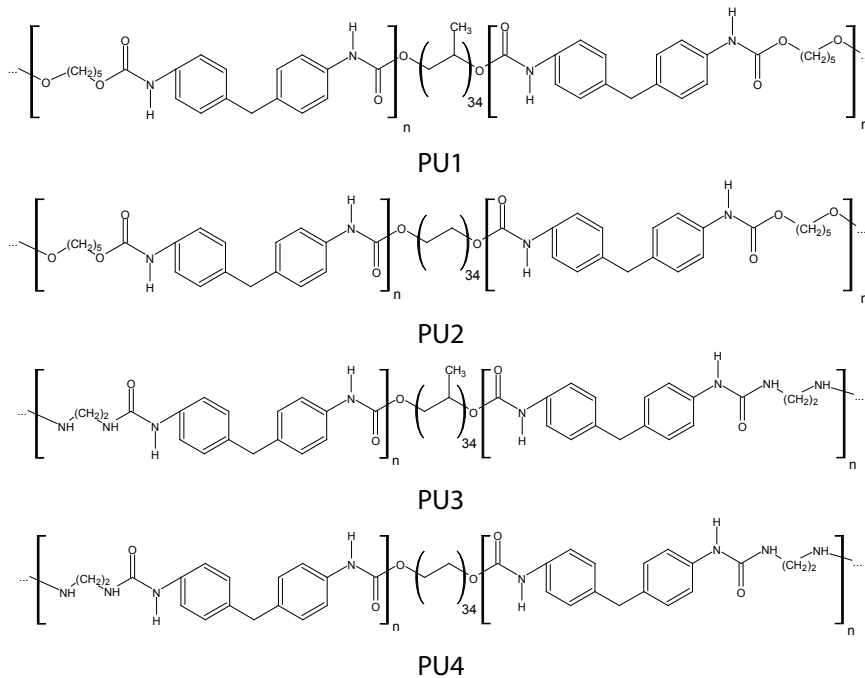
W metodzie membranowej można stosować różnego rodzaju membrany np. poliimidowe, gdzie przenikalność przez membranę dla tlenku węgla(IV) jest 13 razy większa niż dla metanu [108]. Przykładowy skład permeatu i retentatu przedstawiono na rysunku 21.

Membrany poliimidowe mogą być stosowane również do innego rodzaju przedsięwzięć, gdzie należy dokonać separacji układu  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  np. wzbogacania gazu wysypiskowego. Pojedyncza jednostka membranowa może wzbogacić gaz do zawartości 94 %v/v  $\text{CH}_4$ . Redukcja zawartości siarkowodoru wynosi 47,5% (nadawa – 2%, retentat – 0,95%) [109].

Aby doprowadzić do głębokiego zredukowania zawartości  $\text{H}_2\text{S}$  można użyć dwóch rodzajów membran jednocześnie. Po pierwsze wysoselektywnej w układzie  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ , po drugie membrany wysoce sprawnej w układzie  $\text{H}_2\text{S}/\text{CH}_4$ . Struktury membran poliuretanowych cechujących się bardzo dużą selektywnością w układzie  $\text{H}_2\text{S}/\text{CH}_4$  pokazano na rysunku 22 [110].



Rys. 21. Przykładowa charakterystyka strumieni podczas rozdzielania biogazu na membranach

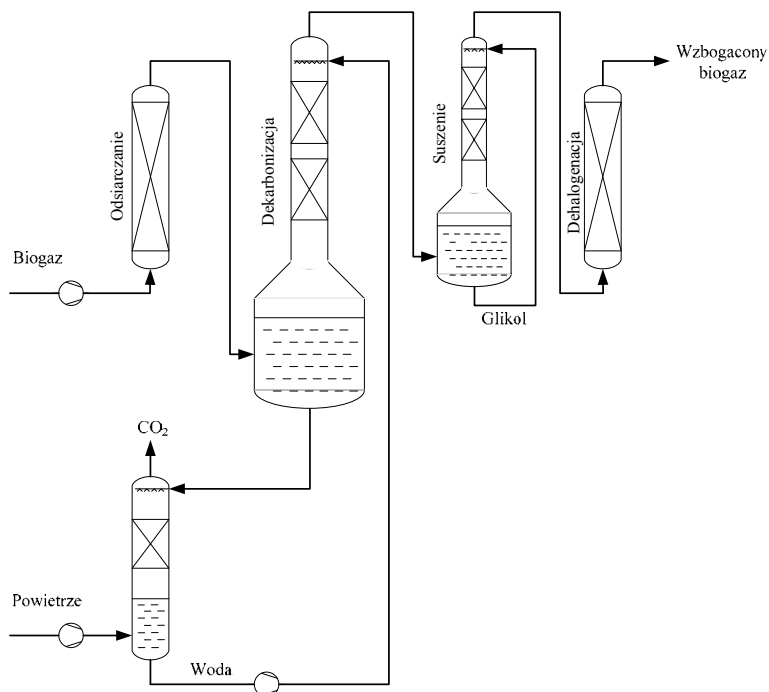


Rys. 22. Poliuretany tworzące wysokoselektywne membrany układu H<sub>2</sub>S/CH<sub>4</sub>. PU1 i PU2 – poli(etero uretany), PU3 i PU4 poli(etero uretanowe mocznika) [110]

## Technika absorpcji fizycznej

W procesie absorpcji fizycznej  $\text{CO}_2$  może być absorbowany przez rozpuszczalnik, zgodnie z prawem Henry'ego i regenerowany poprzez redukcję ciśnienia i wzrost temperatury (jednoczesna zmiana obu parametrów lub jednego z nich). Efektywność procesu rośnie wraz ze wzrostem całkowitego ciśnienia gazu i stężenia separowanych związków. Proces powinien przebiegać przy niskiej temperaturze zapewniającej odpowiednią rozpuszczalność wydzielanych składników gazów. Zapotrzebowanie na energię w procesie absorpcji zależy od rozpuszczalności separowanych składników i temperatury procesu. Wydajność procesu separacji  $\text{CO}_2$  wzrasta wraz ze spadkiem temperatury, dlatego wymagane jest doprowadzenie dodatkowej energii do ochłodzenia gazów. Zapotrzebowanie na energię w procesie absorpcji fizycznej zależne jest od rozpuszczalności absorbowanego składnika i dla tlenku węgla(IV) zawiera się w granicach od 0,03 do 0,11  $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1} \text{CO}_2$  [111].

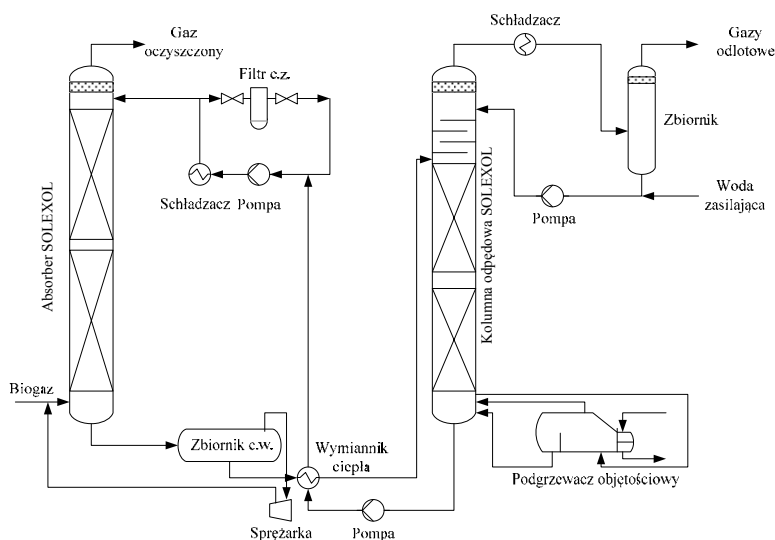
Absorpcja fizyczna w wodzie stanowi klasyczny przypadek wzbogacania biogazu (rysunek 23). Proces prowadzi się w temperaturze otoczenia, przy ciśnieniu około 10 barów.



Rys. 23. Schemat procesu fizycznej absorpcji  $\text{CO}_2$  w wodzie

Przed wprowadzeniem gazu na kolumnę absorpcyjną usuwa się siarkowodor. Często stosuje się układ absorpcyjno-desorpcyjny z zamkniętym obiegiem wody, w którym czynnikiem desorbującym jest sprężone powietrze. W tym przypadku „odpędzony” z wody tlenek węgla(IV) uwalniany jest do atmosfery. Gaz opuszczający absorber poddaje się osuszeniu za pomocą glikolu, a następnie usuwa się z niego halogenowęglowodory.

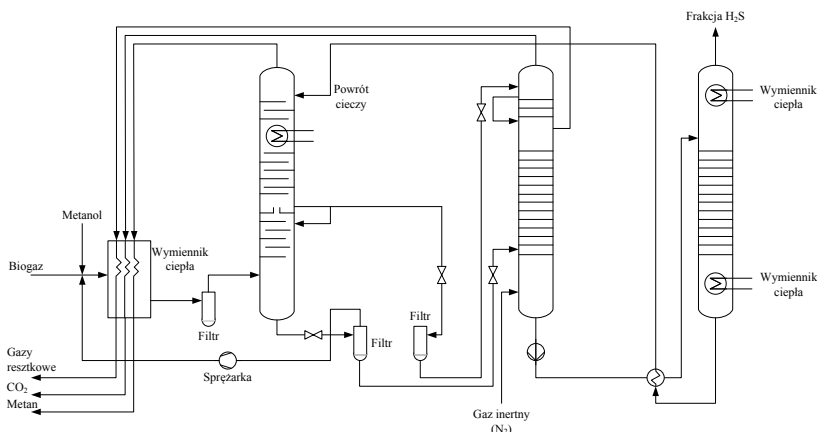
Istnieje kilka technologii usuwania siarkowodoru oraz dwutlenku węgla z biogazu. Jedną z nich jest technologia SELEXOL [114], której schemat przedstawiono na rysunku 24.



Rys. 24. Technologia SELEXOL [138]. c.w. – ciecz wzbogacona, c.z. – ciecz zubożona

W metodzie tej stosowany jest eter dietylowy glikolu propylenowego jako składnik absorpcji fizycznej, może on absorbować również merkaptany, amoniak oraz cyjanowodor

Kolejna z technologii pod nazwą „RECTISOL” – obejmuje wmywanie  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{S}$  w dwóch zimnych obiegach, metanolem schłodzonym do  $-16^\circ\text{C}$  oraz  $-35^\circ\text{C}$  [119]. Na gorąco następuje ich desorpcja. Z wykorzystaniem tej metody można oczyścić gaz do zawartości siarki poniżej 0,1 ppmv/v i poniżej kilku ppmv/v  $\text{CO}_2$ . Uproszczony schemat procesu RECTISOL przedstawiono na rysunku 25. Charakterystyczną cechą procesu są spiralne wymienniki ciepła znacząco poprawiające ekonomikę procesu [113].

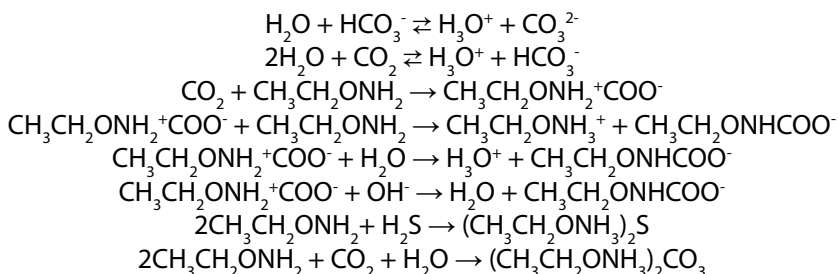


Rys. 25. Schemat procesu RECTISOL Wash [112]

## Technika absorpcji chemicznej

W celu usprawnienia procesu wykorzystania biogazu należy usunąć z niego zanieczyszczenia takie jak  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{S}$  stosując techniki, które charakteryzują się późniejszym odzyskaniem zaabsorbowanego substratu jak i dostępnością sorbentu. Jednymi z najtańszych technik są metody absorpcji chemicznej z powtórным wykorzystaniem sorbentu. Metody te opierają się na prowadzeniu procesu absorpcji w kolumnach absorpcyjnych, przy odpowiednim stężeniu absorbentu i w odpowiednich warunkach termodynamicznych. Poniżej przedstawiono kilka metod absorpcji  $\text{CO}_2$ , a mianowicie:

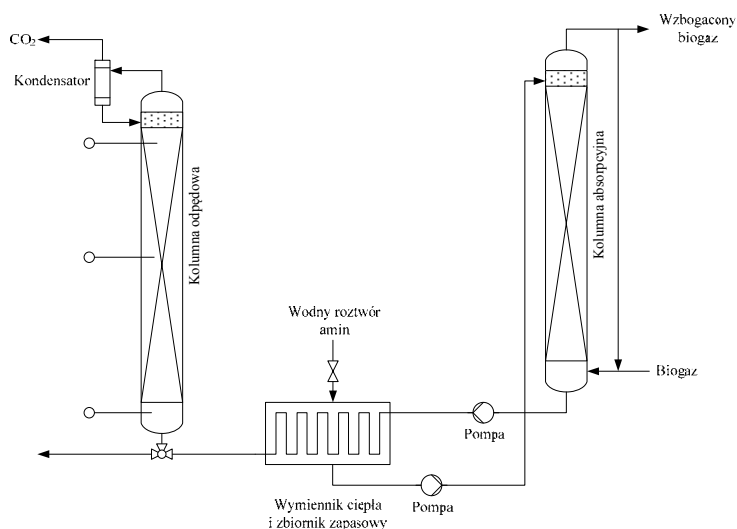
- absorpcja w wodnym roztworze monoetanolaminy (MEA) i dietanolaminy (DEA), którą można przedstawić za pomocą równań [141]:



dla dietanolaminy reakcje są podobne. Reakcja pomiędzy MEA i  $\text{CO}_2$  została opisana poprzez mechanizm reakcji trójcząsteczkowej i fakt istnienia jonu obojaczego [115].

- absorpcja w amoniakalnym roztworze 2-amino-2-metylo-1-propanolu (AMP);
- do absorpcji zastosowano 30% AMP i 5%  $\text{NH}_3$  w wodzie, temperatura regeneracji AMP wynosiła  $110^\circ\text{C}$  a temperatura regeneracji amoniaku  $80^\circ\text{C}$ . Połączenie absorbentów AMP/ $\text{NH}_3$  dało lepsze rezultaty niż technologia z wykorzystaniem MEA [116] oraz
- absorpcja w wodnym roztworze metyldietanoloaminy (MDEA); do absorpcji zastosowano roztwór 40%. MDEA, który daje gorsze efekty niż roztwór AMP. Dodatek AMP do MDEA poprawia wyniki sorpcji  $\text{CO}_2$  [122].

We wszystkich typach absorpcji z zastosowaniem amin można wykorzystać układ technologiczny zaprezentowany na rysunku 26.

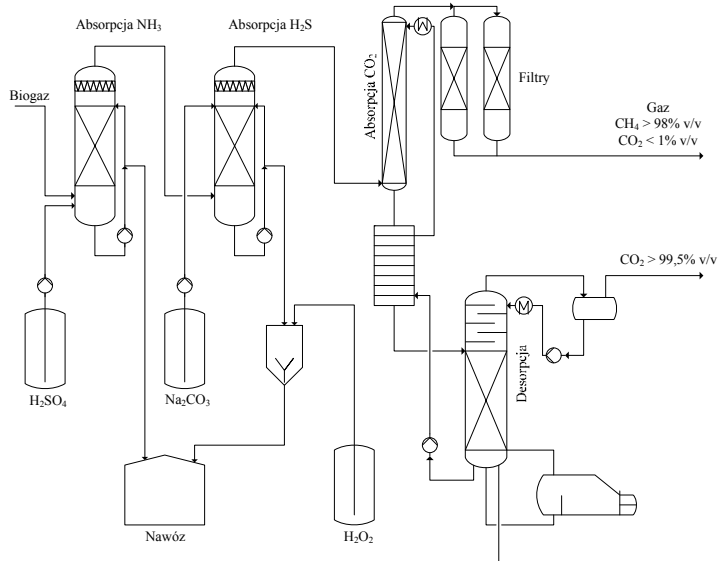


Rys. 26. Schematyczny układ technologiczny do sorpcji  $\text{CO}_2$  w roztworach amin [117]

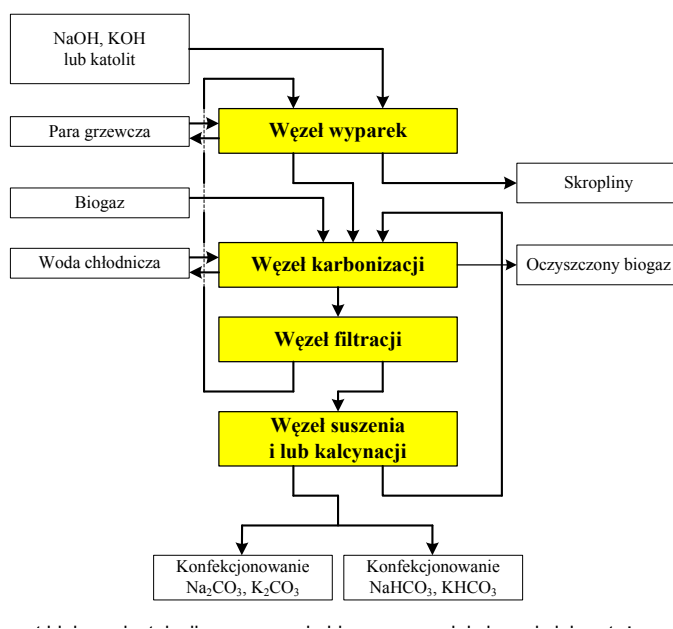
Ekonomia procesów absorpcyjnych polega na odpowiednim doborze sorbentu lub konstrukcji układu sorpcja-desorpcja, w ten sposób, aby jego regeneracja pochłaniała jak najmniejszą ilość energii. Jednocześnie sorbent musi być selektywny w stosunku do założonego produktu.

Na świecie stosuje się wiele technik oczyszczania biogazu, powszechną jest sorpcja amoniaku i siarkowodoru w alkaliach oraz zastosowanie produktu reakcji w celach nawozowych. Sorbentem  $\text{NH}_3$  jest kwas siarkowy(VI), a sorbentem  $\text{H}_2\text{S}$  soda. Schemat powyższego procesu sorpcyjnego przedstawiono na rysunku 27.

Istnieje możliwość sorpcji  $\text{CO}_2$  w roztworach alkaliów takich jak NaOH czy KOH lub roztwór katolitu. Efektem końcowym procesów absorpcyjnych jest odpowiednia redukcja  $\text{CO}_2$  oraz  $\text{H}_2\text{S}$  z biogazu oraz produkcja  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  lub  $\text{K}_2\text{CO}_3$  – atrakcyjnych ekonomicznie. Schemat blokowy układu oczyszczania biogazu z produkcją sody lub potażu przedstawiono na rysunku 28.



Rys. 27. Schemat instalacji oczyszczania biogazu techniką absorpcji chemicznej

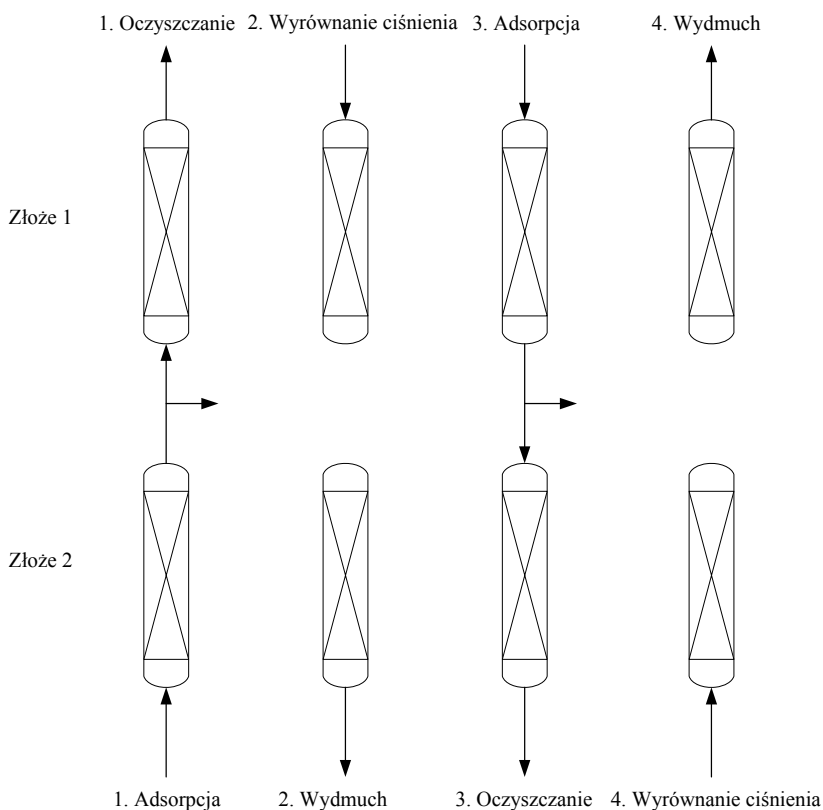


Rys. 28. Schemat blokowy instalacji oczyszczania biogazu z produkcją sody lub potażu

## Technika adsorpcyjna

Najczęściej terminem adsorpcja określa się proces wiązania substancji gazowej na powierzchni substancji ciekłej lub stałej, lub też proces wiązania substancji ciekłej na powierzchni substancji stałej. Adsorpcja może mieć charakter chemiczny (chemisorpcja) lub fizyczny. Proces ten ma charakter powierzchniowy, czym różni się od absorpcji polegającej na pochłanianiu w całej objętości. Często procesy adsorpcji oraz absorpcji występują równocześnie i mówimy wtedy o sorpcji. Termin sorpcja stosuje się również wtedy, gdy nie można sprecyzować mechanizmu zjawiska.

Zjawisko może mieć charakter monowarstwowy (tzn. jednowarstwowy), chemisorpcja jest z reguły monowarstwowa – lub wielowarstwowa (poliwarstwowa), adsorpcja par przy ciśnieniu bliskim ciśnieniu pary nasyconej, gdy następuje samorzutna kondensacja pary [119].



Rys. 29. Czteroetapowy cykl pracy dwukolumnowego złoże PSA [120]

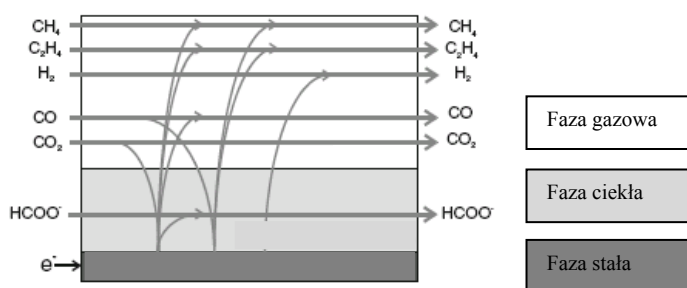


Powszechnie stosowaną metodą jest metoda zwrotnej adsorpcji ciśnieniowej (PSA), w której wykorzystuje się różnice w szybkości adsorpcji gazów na węglowych sitach molekularnych. Po powodującym adsorpcję stopniowym zwiększaniu ciśnienia następuje desorpcja przez dekompresję. Przy końcowej ewakuacji zostaje głównie usunięty tlenek węgla(IV), ponieważ jako pierwszy w przeciwieństwie do metanu ulatnia się.

Tlenek węgla(IV) jest adsorbowany z biogazu sprężonego do 5–10 hPa na węglowym sicie molekularnym. Równocześnie są zatrzymywane niewielkie ilości tlenu oraz azotu, i w ten sposób usuwane z przewodu odpływowego. Ponowna zmiana ciśnienia przywraca zdolność do pracy wyczerpanego sita molekularnego. Podobnie jak w metodach absorpcyjnych, tak i w przypadku zwrotnej adsorpcji ciśnieniowej wcześniej należy pozbyć się halogenowęglowodorów i siarkowodoru.

Schemat czterostopniowego cyklu metody PSA na złożu dwukolumnowym przedstawiono na rysunku 29.

Jak już wspomniano, istnieje wiele technik oczyszczania biogazu charakteryzujących się różnym kosztem przypadającym na jednostkę objętości oczyszczonego gazu oraz różnymi parametrami otrzymywanego produktu.



Rys. 30. Ideowy schemat elektrolitycznej redukcji CO<sub>2</sub> i CO [121]

Z chemicznego i ekologicznego punktu widzenia istotne jest otrzymanie metanu o jak najwyższej czystości, co wiąże się z odpowiednio dużymi kosztami oczyszczania. Pod względem finansowym dokładne oczyszczanie biogazu jest ekonomicznie nieuzasadnione. Istnieją techniki, które dla poprawnej realizacji wymagają tylko 60 % v/v zawartości CH<sub>4</sub>, np. spalanie kogeneracyjne. Należy również dodać, iż wzbogacony, wysokometanowy biogaz jest jednym z najlepszych nośników energii odnawialnej.

Mając na uwadze cechy użytkowe biogazu to zaletami charakteryzują się fizyczne metody oczyszczania, oparte na rozdziale lub procesach absorpcyjno-adsorpcyjnych. Zastosowanie mają tu różne techniki, począwszy od membranowych – niezbyt selektywnych i kosztownych – poprzez absorpcję w roztworach wodnych, skończywszy na adsorbentach węglowych w technikach PSA. Istnieją meto-

dy bardziej zaawansowane np. metoda CRYO, oferowana przez firmę Scandinavian Biogas, gdzie finalnym produktem może być LBG (skroplony, oczyszczony biogaz), czy też metoda elektrochemicznej redukcji  $\text{CO}_2$  do  $\text{CH}_4$ , której schemat ideowy przedstawiono na rysunku 30.

Rozważając ekonomikę usuwania  $\text{CO}_2$  i mikrozanieczyszczeń zawartych w biogazie, na pierwszym miejscu plasują się metody polegające na chemisorpcji, podczas których powstają użyteczne produkty uboczne. Do tych metod należą: absorpcja w MEA, DEA, AMP, oraz chemisorpcja w katolicy lub w wodnych roztworach zasad.

Ekonomika i użyteczność wyróżniają metody polegające na chemisorpcji jako najbardziej odpowiednie do oczyszczania i wzbogacania biogazu.

## Literatura

- [1] J. Chmielowski, *Kinetyka i mechanizm fermentacji metanowej*, Politechnika Śląska, 86, 1963, 6.
- [2] I. Angelidaki, W. Sanders, *Assessment of the anaerobic biodegradability of macro-pollutants*, *Rev in Environ Sci and Biotechnol*, 3, 2004, 117–129.
- [3] M. Tataru, A. Yamazawa, Y. Ueno, H. Fukui, M. Goto, K. Sode, *High-rate thermophilic methane fermentation on short-chain fatty acids in a down-flow anaerobic packed-bed reactor*, *Bioprocess Biosyst Eng*, 27, 2005, 105–113.
- [4] S. Jeyaseelan, *A simple mathematical model for anaerobic digestion process*, *Wat Sci Tech*, 35, 1997, 185–191.
- [5] F.C. Ezeonu, A. N. C. Okaka, *Process kinetics and digestion efficiency of anaerobic batch fermentation of brewer's spent grains (BSG)*, *Proc Biochem*, 31, 1996, 7–12.
- [6] Z. Stępniewska, G. Przywara, R.P. Bennicelli, *Reakcja roślin w warunkach anaerobiozy*, *Acta Agrophys*, 113, 2007, 17.
- [7] W. J. H. Kunicki-Goldfinger, *Życie bakterii*, PWN, Warszawa, 2001..
- [8] H.G. Shlegl, *Mikrobiologia ogólna*, PWN, Warszawa, 2005.
- [9] J. Gliński, W. Stępniewski, *Soil Aeration and Its Role for Plants*, CRC, Boca Raton, 1985.
- [10] P. O'Neil, *Chemia Środowiska*, PWN Warszawa-Wrocław, 1998.
- [11] W. H. Schlesinger, *Biogeochemistry, An analysis of global change*, Academic Press, San Diego, 1997, 231–238.
- [12] Starck Z., Chołuj D., Niemyska B.: *Fizjologiczne reakcje roślin na niekorzystne czynniki środowiska*, SGGW, Warszawa, 1995.
- [13] H. Schulz, B. Eder, *Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiel, 2. überarbeitete, Auflage*, Ökobuch Verlag, Freiburg, 1996, 2001.
- [14] P. Weiland, Ch. Rieger, *Wissenschaftliches Messprogramm zur Bewertung von Biogasanlagen im Landwirtschaftlichen Bereich*, (FNR-FKZ: 00NR179), 3. Zwischenbericht; Institut für Technologie i Systemtechnik/Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, 2001.
- [15] J.F. Mahlina, F.G. Pohland, *Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes*, Lancaster, Basel, 1992.

- [16] Materiały reklamowe firmy Biogaz Nord GmbH.
- [17] A. Vergara-Fernández, G. Vargasa, N. Alarcónb, A. Velascoc, *Evaluation of marine algae as a source of biogas in a two-stage anaerobic reactor system*, *Biomass and Bioenergy*, **32**, 2008, 338–344.
- [18] Ch-Sh. Wua, Ju-Sh. Huangb, H-H. Choub, *Influence of internal biogas production on hydrodynamic behavior of anaerobic fluidized-bed reactors*, *Wat Res*, **40**, 2006, 126–136.
- [19] A. Błaszczuk-Pasteczka, W. Żukowski, *Energetyczne wykorzystanie biogazu*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Czasopismo Techniczne, 1-Ch, 2007, 12–17.
- [20] J Wiese, *Biogas/Biogas Plants – An Overview*. ASA GmbH. Bad Oeynhausen 05. August 2005.
- [21] A. Kowalczyk-Jusko, B. Laursen, S. Rusak, *Biogazownia rolnicza firmy Poldanor w Pawłótku*. Przegląd Komunalny, październik 2005.
- [22] S. Giger-Reverdin, P. Morand-Fehr, G. Tran, *Literature survey of the influence of dietary fat composition on methane production in dairy cattle*, *Live Prod Sci*, **82**, 2003, 73–79.
- [23] M. P. Coughlan, F. Mayer, *The cellulose-decomposing bacteria and their enzymes*, in: *The Prokaryotes – A Handbook on the Biology of Bacteria*, New York, 1, 1991, 461–516.
- [24] R. L. Meraza, A. M. Vidalesb, A. Domínguez, *A fractal-like kinetics equation to calculate landfill methane production*, *Fuel*, **83**, 2004, 73–80.
- [25] C. Gallert, J. Winter, *Bacterial metabolism in Wastewater systems*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.
- [26] G. Tchobanoglous, H. Theisen, S. Vigil, *Integrated solid waste management*, McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, New York: McGraw-Hill; 1993.
- [27] M.J. McInerney, *Anaerobic hydrolysis and fermentation of fats and proteins*, *Biology of Anaerobic Microorganisms*, (A. J. B. Zehnder, ed.), Wiley, New York 1988, 373–415.
- [28] W. B. Whitman, T. L. Bowen, D. R. Boone, *The methanogenic bacteria*, *The Prokaryotes* (A. Balows, H. G. Trüper, M. Dworkin, W. Harder, K. H. Schleifer, eds.), Springer-Verlag, New York, 1992 719–767.
- [29] J Winter, *Anaerobic waste stabilization*, *Biotechnol Adv*, **2**, 1984, 75–99
- [30] J. H. Thiele, M. Chartrain, J.G. Zeikus, *Control of interspecies electron flow during anaerobic digestion: role of the floc formation*, *Appl Environ Microbiol* **54**, 1988, 10–19.
- [31] De Bok, F. A. M., Plugge, C. M., Stams, A. J. M., *Interspecies electron transfer in methanogenic propionate degrading consortia*, *Water Res.* 2004, **38**, 1369–1375.
- [32] D. R. Boone, R. L. Johnson, Y. Liu, *Diffusion of the interspecies electron carriers H<sub>2</sub> and formate in methanogenic ecosystems, and applications in the measurement of KM for H<sub>2</sub> and formate uptake*, *Appl Environ Microbiol*, **55**, 1989, 1735–1741.
- [33] A. J. M. Stams, *Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments*, *Antonie von Leeuwenhoek*, **66**, 1994, 271–294.
- [34] B. Schink, *Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation*, *Microbiol Mol Biol Rev*, **61**, 1997, 262–280.
- [35] W. Fritsche, *Umwelt-Mikrobiologie*, Jena, Gustav Fischer Verlag, 1998.
- [36] F. Widdel, *Growth of methanogenic bacteria in pure culture with 2-propanol and other alcohols as hydrogen donors*, *Appl Environ Microbiol*, **51**, 1986, 1056–1062.
- [37] G. Zellner, K. Bleicher, E. Braun, H. Kneifel, B. J. Tindall, et al., *Characterization of a new mesophilic, secondary alcohol-utilizing methanogen, Methanobacterium palustre spec. nov. from a peat bog*, *Arch Microbiol*, **151**, 1989, 1–9.

- [38] B. Schink, *Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation*, *Microbiol Mol Biol Rev*, 61, 1997, 262–280.
- [39] M. J. Wolin, *Interactions between H<sub>2</sub>-producing and methane-producing species, Microbial Formation and Utilization of Gases (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO)*, (Schlegel, H. G., Gottschalk, G., Pfennig, N., eds.), Gölitz, Göttingen, 1976, 14–15.
- [40] M. P. Bryant, *Microbial methane production: theoretical aspects*, *J Anim Sci*, 48, 1979, 193–201.
- [41] K. Bleicher, J. Winter, *Formate production and utilization by methanogens and by sludge consortia: interference with the concept of interspecies formate transfer*, *Appl Microbiol Biotechnol*, 40, 1994, 910–915.
- [42] P. N. Hobson, H. Nasr, *An amylopectin-type polysaccharidesynthesised from sucrose by Cl. butyricum*. *J Chem Soc* 51, 1951, 1855–1857.
- [43] R. Stjerholm, *Formation of trehalose during dissimilation of glucose by Propionibacterium*, *Acta Chem Scand* 12, 1958, 646–649.
- [44] K. Buchholz, E. Stoppock, R. Emmerich, *Kinetics of anaerobic hydrolysis of solid material*, 5th Int Symp Anaerobic Digestion, Poster papers, (Tilche, A., Rozzi, A., eds.), Bologna, Monduzzi Editore, 1988, 15–18.
- [45] K. Buchholz, E. Stoppock, R. Emmerich, *Untersuchungen zur Biogasgewinnung aus Rübenpreßschnitzeln*, *Zuckerindustrie*, 111, 1986, 873–845.
- [46] I. K. Hindrichsen, H.R. Wettstein, A. Machmüller, B. Jörg, M. Kreuzer, *Effect of the carbohydrate composition of feed concentrates on methane emission from dairy cows and their slurry*, *Environ Monitor and Assess*, 107, 2005, 329–350.
- [47] G. Billen, *Modelling the processes of organic matter degradation and nutrients recycling in sedimentary systems*, (D. B. Nedwell, C. M. Brown, eds.), *Sediment microbiology*, Academic Press, New York, 1982, 15–52.
- [48] G. M. King, *Characterization of  $\beta$ -glucosidase activity in intertidal marine sediments*, *Appl Environ Microbiol* 51, 1986, 373–380.
- [49] T. Miyajima, E. Wada, Y. T. Hanba, P. Vijarnsorn, *Anaerobic mineralization of indigenous organic matters and methanogenesis in tropical wetland soils*, *Geochim Cosmochim Acta* 61, 1997, 3739–3751.
- [50] K. Glissmann, R. Conrad, *Saccharolytic activity and its role as a limiting step in methane formation during the anaerobic degradation of rice straw in rice paddy soil*, *Biol Fertil Soils*, 35, 2002, 62–67.
- [51] R. Roy, H. D. Klüber, R. Conrad, *Early initiation of methane production in anoxic rice soil despite the presence of oxidants*, *FEMS Microbiol Ecol* 24, 1997, 311–320.
- [52] H. Yao, R. Conrad, R. Wassmann, H. U. Neue, *Effect of soil characteristics on sequential reduction and methane production in sixteen rice paddy soils from China, the Philippines, and Italy*, *Biogeochemistry* 47, 1999, 269–295.
- [53] T. Lueders, M. Friedrich, *Archaeal population dynamics during sequential reduction processes in rice field soil*, *Appl Environ Microbiol* 66, 2000, 2732–2742.
- [54] B. Demirel, P. Scherer, *The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review*, *Rev Environ Sci Biotechnol*, 7, 2008, 173–190.
- [55] H. Yao, R. Conrad, *Electron balance during steady-state production of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> in anoxic rice soil*, *Eur J Soil Sci* 51, 2000, 369–378.

- [56] A. Fey, R. Conrad, *Effect of temperature on carbon and electron flow and on the archaeal community in methanogenic rice field soil*, Appl Environ Microbiol 66, 2000, 4790–4797.
- [57] M. S. M. Jetten, A. J. M. Stams, A. J. B. Zehnder, *Methanogenesis from acetate – a comparison of the acetate metabolism in Methanotherix soehngenii and Methanosarcina spp.*, FEMS Microbiol Rev 88, 1992, 181–197.
- [58] P. J. Colberg, L. J. Young, *Anaerobic degradation of soluble fractions of (<sup>14</sup>C-lignin)-lignocellulose*, Appl Microbiol Biotechnol, 49, 1985, 345–349.
- [59] W. Hammes, J. Winter, O. Kandler, *The sensitivity of pseudomurein-containing genus Methanobacterium to inhibitors of murein synthesis*, Arch Microbiol, 123, 1979, 275–279.
- [60] J. Örlygsson, F. P. Houwen, B. H. Svensson, *Thermophilic anaerobic amino acid degradation: deamination rates and end-product formation*, Appl Microbiol Biotechnol, 43, 1995, 235–241.
- [61] J. Winter, G. Knoll, T. Sembiring, P. Vogel, G. Dietrich, *Mikrobiologie des anaeroben Abbaus von Biopolymeren und von aromatischen und halogenaromatischen Verbindungen*, Biogas: Anaerobtechnik in der Abfallwirtschaft (K.J. Thomé-Kozmiensky, ed.), Berlin, EF-Verlag für Energie und Umweltschutz, 1989.
- [62] G. Zellner, J. Winter, *Analysis of a highly efficient methanogenic consortium producing biogas from whey*, Syst Appl Microbiol, 9, 1987b, 284–292.
- [63] S. Tarlera, A. J. M. Stams, *Degradation of proteins and amino acids by Caloramator proteoclasticus in pure culture and in coculture with Methanobacterium thermoformicum Z245*, Appl Microbiol Biotechnol, 53, 1999, 133–138.
- [64] M. Nagase, T. Matsuo, *Interaction between amino-acid degrading bacteria and methanogenic bacteria in anaerobic digestion*, Biotechnol Bioeng, 24, 1982, 2227–2239.
- [65] A. J. M. Stams, T. A. Hansen, *Fermentation of glutamate and other compounds by Acidaminobacter hydrogeniformans gen. nov. sp. nov., an obligate anerobe isolated from black mud. Studies with pure cultures and mixed cultures with sulfate-reducing and methanogenic bacteria*, Arch Microbiol 137, 1984, 329–337.
- [66] H. J. Nanninga, J. C. Gottschal, *Amino acid fermentation and hydrogen transfer in mixed cultures*, FEMS Microbiol Ecol 31, 1985, 261–269.
- [67] J. Winter, F. Schindler, F. X. Wildenauer, *Fermentation of alanine and glycine by pure and syntrophic cultures of Clostridium sporogenes*, FEMS Microbiol Ecol 45, 1987, 153–161.
- [68] C. Guangsheng, C. M. Plugge, W. Roelofson, F. P. Houwen, A. J. M. Stams, *Selenomonas acidaminovorans sp. nov., a versatile thermophilic proton-reducing anaerobe able to grow by decarboxylation of succinate to propionate*, Arch Microbiol 57, 1992, 169–175.
- [69] J. Örlygsson, *The role of interspecies hydrogen transfer on thermophilic protein and amino acid metabolism*, Ph.D. thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 1994.
- [70] G. Gottschalk, S. Peinemann, *The anaerobic way of life*, (A. Balows, H. G. Trüper, M. Dworkin, W. Harder, K. H. Schleifer eds.), The prokaryotes, vol. 1, Springer, New York Berlin Heidelberg, 1992, 300–311.
- [71] R. Winterberg, H. Sahn, *Untersuchungen zum anaeroben Proteinabbau bei der zweistufigen anaeroben Abwasserreinigung*, Lecture: DECHEMA Arbeitsausschuß Umweltbiotechnologie, January 1992.
- [72] F. X. Wildenauer, J. Winter, *Fermentation of isoleucine and arginine by pure and syntrophic cultures of Clostridium sporogenes*, FEMS Microbiol Ecol, 38, 1986, 373–379

- [73] J. Winter, F. Schindler, F. Wildenauer, *Fermentation of alanine and glycine by pure and syntrophic cultures of Clostridium sporogenes*, FEMS Microbiol Ecol, 45, 1987, 153–161.
- [74] U. Zindel, W. Freudenberg, M. Rieth, J. R. Andreesen, J. Schnell, F. Widdel, *Eubacterium acidaminophilum sp. nov., a versatile amino acid-degradating anaerobe producing or utilizing H<sub>2</sub> or formate*, Archiv Microbiol, 150, 1988, 254–266.
- [75] H. Hippe, J. R. Andreesen, G. Gottschalk, *The genus Clostridium-Nonmedical*, (M. P. Sarr, H. Stolp, H. G. Trüper, A. Balows, H. G. Schlegel eds.), Prokaryotes, Vol. VII, Springer-Verlag, Berlin, 1992, 1800–1866.
- [76] S. R. Elsdén, M. G. Hilton, *The end products of the metabolism of aromatic amino acids by clostridia*, Archiv Microbiol, 107, 1976, 283–288.
- [77] S.R. Elsdén, M. G. Hilton, *Volatile acid production from threonine, valine, leucine and isoleucine by clostridia*, Archiv Microbiol, 117, 1978, 165–172.
- [78] S. R. Elsdén, M. G. Hilton, *Amino acid utilization patterns in clostridial taxonomy*, Archiv Microbiol, 123, 1979, 137–141.
- [79] G. C. Mead, *The amino acid-fermenting Clostridia*, J Gen Microbiol, 67, 1971, 47–56.
- [80] H. A. Barker, Fermentation of nitrogenous organic compounds, (I. C. Gansalus, R. Y. Stanier eds.), The bacteria, Vol. 2, Academic Press, New York, 1961, 151–207.
- [81] B. Nisman, The Stickland Reaction. Bacteriol Rev 18, 1954, 16.
- [82] I. R. Ramsay, P. C. Pullammanappallil, *Protein degradation during anaerobic wastewater treatment: derivation of stoichiometry*, Biodegr, 12, 2001, 247–257.
- [83] L. D'Ari, H. A. Barker, *p-cresol formation by cell-free extracts of Clostridium difficile*, Archiv Microbiol, 143, 1985, 311–312.
- [84] B. Seto, *The Stickland Reaction*, (C. J. Knowles ed.), Diversity in Bacterial Respiratory Systems, Vol. 2, CRC Press, Boca Raton, 1980, 49–64.
- [85] H. Lebertz, J. R. Andreesen, *Glycine fermentation by Clostridium histolyticum*, Archiv Microbiology, 150, 1988, 11–14.
- [86] J. Bader, P. Rauschenbach, H. Simon, *On a hitherto unknown fermentation path of several amino acids by proteolytic clostridia*, FEBS Letters 140, 1982, 67–72.
- [87] S. Wiesendanger, B. Nisman, *La L-methionine demercaptodesaminase Un nouvel enzyme a pyridoxal-phosphate*. Compt Rend Acad Sci, **237**, 1953, 764–765.
- [88] M. Tokushigo, O. Hayaishi, *Threonine metabolism and its regulation in Clostridium tetanomorphum*, J Biochem, 72, 1972 469–477.
- [89] J. E. Carter, R.D. Sagers, *Ferrous ion-dependent L-serine dehydratase from Clostridium acidu-urici*, J Bacteriol, 109, 1972, 757–763.
- [90] J. K. Hardman, T. C. Stadtman, *Metabolism of  $\beta$ -aminoacids. I. fermentations of -aminobutyric acid by Clostridium aminobutyricum n. sp.* J Bacteriol, 79, 1960, 544–548.
- [91] A. Meister, H. A. Sober, S. V. Tice, *Enzymatic decarboxylation of aspartic acid to -alanine*, J Biol Chem, 189, 1951, 577–590.
- [92] M. J. Pickett, *Studies on the metabolism of Clostridium of Clostridium tetani*, J Biol Chem, 151, 1943, 203–209.
- [93] J. R. Andreesen, H. Bahl, G. Gottschalk, *Introduction to the physiology and biochemistry of the genus Clostridium*, (N. P. Minton, D. C. Clarke eds.), Clostridia, Vol. 3, Plenum Press, New York, 1989, 27–62.
- [94] H. A. Barker, *Amino acid degradation by anaerobic bacteria*, Ann Rev Biochem, 50, 1981, 23–40.
- [95] S. R. Elsdén, M. G. Hilton, *Amino acid utilization patterns in clostridial taxonomy*, Archiv Microbiol, 123, 1979, 137–141.

- [96] K. Larsson, *Lipids – Molecular Organisation, Physical Functions and Technical Applications*, The Oily Press, Dundee, Scotland, 1994.
- [97] R. Petruy, G. Lettinga, *Digestion of a milk fat emulsion*, *Biores Technol*, 61, 1997, 141–149.
- [98] N. N. Gandhi, *Applications of lipase*, *J Amer Oil Chem Soc*, 74, 1997, 621–634.
- [99] D.G. Cirnea, X. Paloumeta, L. Björnsson, M.M. Alves, B. Mattiasson, *Anaerobic digestion of lipid-rich waste—Effects of lipid concentration*, *Renew Energy*, 32, 2007, 965–975.
- [100] Y. Miron, G. Zeeman, J. B. van Lier, G. Lettinga, *The role of sludge retention time in the hydrolysis and acidification of lipids, carbohydrates and proteins during digestion of primary sludge in CSTR systems*, *Wat Res*, 34, 2000, 1705–1713.
- [101] D. R. Loveley, *Anaerobic benzene degradation*, *Biodegr*, 11, 2000, 107–116.
- [102] P. W. Milligan, M.M. Häggblom, *Biodegradation and biotransformation of dicamba under different reducing conditions*, *Environ Sci Technol*, 33, 1999, 1224–1229.
- [103] M.M. Häggblom, P. W. Milligan, *Anaerobic biodegradation of halogenated pesticides: influence of alternate electron acceptors*, (J-M. Bollag, G. Stotzky G eds.), *Soil biochemistry*, Marcel Dekker, New York, 10, 2000, 1–34.
- [104] P. W. Milligan, M. M. Häggblom, *Anaerobic degradation and dehalogenation of chlorosalicylates and salicylate under four reducing conditions*, *Biodegr*, 12, 2001, 159–161.
- [105] M.D. Mikesell, S. A. Boyd, *Complete reductive dechlorination and mineralization of pentachlorophenol by anaerobic microorganisms*, *Appl Environ Microbiol*, 52, 1986, 861–886.
- [106] J. Harder, *Anaerobic degradation of cyclohexane-1,2-diol by a new Azoarcus species*, *Arch Microbiol*, 168, 1997, 199–204.
- [107] O. S. Fatoki, A. O. Ogunfowokan, *Determination of phthalate esters plasticizers in the aquatic environment of southwestern Nigeria*, *Environ Int*, 19, 1993, 619–623.
- [108] B. V. Chang, G. S. Liao, S. Y. Yuan, *Anaerobic Degradation of Di-n-butyl Phthalate and Di-(2-ethylhexyl) Phthalate in Sludge*, *Bull, Environ Contam Toxicol*, 75, 2005, 775–782.
- [109] C. Vargas, B. Song, M. Camps, M. M. Häggblom, *Anaerobic degradation of fluorinated aromatic compounds*, *Appl Microbiol Biotechnol*, 53, 2000, 342–347.
- [110] B.V. Chang, F. Chiang, S.Y. Yuan, *Anaerobic degradation of nonylphenol in sludge*, *Chemosph*, 59, 2005, 1415–1420.
- [111] G. Chatterjee, A. A. Houde, S. A. Stern, *Poly(ether urethane) and poly(ether urethane urea) membranes with high  $H_2S/CH_4$  selectivity*, *J Membr Sci*, 135, 1997, 99–106.
- [112] . Göttlicher, R. Pruschek, *Comparison of  $CO_2$  removal systems for fossil-fuelled power plant processes*, *Energy Convers Mgmt*, 38, 1997, S173–S178.
- [113] UOP LLC, *Gas Processing, Selexol Process™*, 2002, 25 East Algonquin RoadDes Plaines, IL 60017-5017, [www.uop.pl](http://www.uop.pl).
- [114] Linde Engineering Division, [www.linde-le.com/process\\_plants](http://www.linde-le.com/process_plants), 2005.
- [115] W. Kotowski, *Wylapać metan*, *Gigawat energia*, AGENT Public Relations, 82, 2006.
- [116] N. Palmeri, S. Cavallaro, J. C. J. Bart, *Carbon dioxide absorption by MEA. A preliminary evaluation of a bubbling column reactor*, *J Therm Anal Cal*, 91, 2008, 87–91.
- [117] D. H. Lee, W. J. Choi, S. J. Moon, S. H. Ha, I. G. Kim K. J. Oh, *Characteristics of absorption and regeneration of carbon dioxide in aqueous 2-amino-2-methyl-1-propanol/ammonia solutions*, *Korean J Chem Eng*, 25, 2008, 279–284.
- [118] M.K. Aroua, M.Z. Haji-Sulaiman, K. Ramasamy, *Modelling of carbon dioxide absorption in aqueous solutions of AMP and MDEA and their blends using Aspenplus*, *Sep Purific Technol*, 29, 2002, 153–162.

- [119] *Encyklopedia techniki*, WNT, Warszawa, 1966.
- [120] V. G. Gomes, K. W. K. Yee, *Pressure swing adsorption for carbon dioxide sequestration from exhaust gases*, *Sep Pur Technol*, 28, 2002, 161–171.
- [121] M. Gattrell, N. Gupta, A. Co, *Electrochemical reduction of CO<sub>2</sub> to hydrocarbons to store renewable electrical energy and upgrade biogas*, *Energ Conv Mgmt*, 48, 2007, 1255–1265.
- [122] W. Gruber, *Produktionkosten pro m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>*, *Mais*, 2, 2006.



# BIOENERGIA Z ODPADÓW

Ze względu na rosnącą liczbę ludności, zwiększającą się produkcję dóbr konsumpcyjnych oraz postęp technologiczny, generowanie odpadów staje się coraz bardziej poważnym problemem w skali światowej [1, 2].

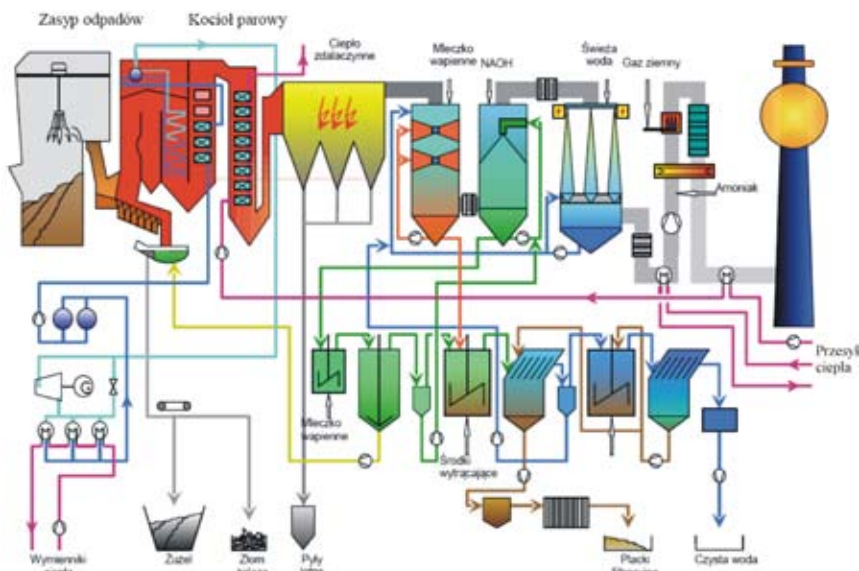
Każdy odpad można zagospodarować, pozyskując bioenergię. Problematyka pozyskiwania odpadowej biomasy została przedstawiona w rozdziale „Drewno, słoma”, jej piroliza lub zgazowanie w rozdziale „Zgazowanie, piroliza biomasy”, spalanie w rozdziale „Bezpośrednie spalanie biomasy”, a współspalanie w rozdziale „Współspalanie biomasy”. Możliwości pozyskiwania biogazu ze składowisk odpadów komunalnych, jak też z osadów ściekowych opisane zostały w rozdziale „Pozyskiwanie i wzbogacanie biogazu”.

Bioenergię pozyskuje się również w wyniku spalania odpadów komunalnych (frakcja organiczna), w spalarniach odpadów medycznych czy w piecach cementowych.

## Spalarnie odpadów komunalnych

Instalacje termicznego przekształcania odpadów komunalnych są od dziesiątek lat powszechnie stosowane w krajach UE [3]. Ich dynamiczny rozwój datuje się od połowy lat 60-tych ubiegłego wieku, kiedy ich zastosowanie stało się odpowiedzią na gwałtowny wzrost ilości odpadów wynikający z dynamicznego rozwoju przemysłu i konsumpcji w najbardziej uprzemysłowionych krajach Europy Zachodniej. Od tamtych czasów, obiekty te istotnie zmieniały swój standard technologiczny oraz ekologiczny i wraz z równoległym zachodzącym wzrostem wymagań prawa wspólnotowego dotyczącym oddziaływania na środowisko systematycznie podnosiły standardy bezpieczeństwa ekologicznego, osiągając wraz z wejściem w życie z dniem 28 grudnia 2005 r. dyrektywy 2000/76/WE w sprawie spalania odpadów poziom oddziaływania, który w opinii uznanych autorytetów jest absolutnie bezpieczny dla środowiska i zdrowia ludzi. Obecnie, największy udział spalarni odpadów w systemach gospodarki odpadami komunalnymi widoczny jest

w takich krajach UE, jak: Dania, Luksemburg, Szwecja, Holandia, Francja, Belgia czy Niemcy. W krajach UE-15 udział spalania w systemach zagospodarowania odpadów komunalnych stanowi 26% [3, 4]. Dla przykładu na rysunku 1 przedstawiono schemat instalacji w Spittelau [5].



Rys. 1. Schemat instalacji termicznego przekształcania odpadów w Spittelau [5]

Gospodarka odpadami komunalnymi, w tym ich termiczne przekształcanie została przedstawiona w opracowaniach Rosik-Dulewskiej [1], Żygadło [2] i Wandrasza [3].

### Bioenergia w spalarniach odpadów medycznych

Odpady medyczne to substancje stałe, ciekłe i gazowe powstające przy leczeniu, diagnozowaniu oraz profilaktyce [6]. Powstają one w szpitalach, klinikach, laboratoriach, stacjach krwiodawstwa, sanatoriach, ośrodkach weterynaryjnych, prywatnych gabinetach lekarskich, aptekach oraz w trakcie domowego leczenia. Według danych statystycznych WHO, ilość odpadów medycznych wymagających specjalnego traktowania wynosi od 10 do 25% ogólnej ich masy [6]. Podobną charakterystykę podaje też Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (US EPA), stwierdzając, że odpady infekcyjne stanowią od 10 do 15% masy wszystkich odpadów wytwarzanych przez służbę zdrowia [8].

Odpady medyczne zaliczane do niebezpiecznych nie mogą być poddawane odzyskowi – zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 23 grudnia 2002 r.

w sprawie rodzajów odpadów medycznych i weterynaryjnych, których poddawanie odzyskowi jest zakazane (Dz. U. Nr 8, poz. 102 i 103). W związku z tym, odpady te poddawane są różnym sposobom unieszkodliwiania, takim jak: przekształcanie termiczne, autoklawowanie, dezynfekcja termiczna, działanie mikrofalami oraz obróbka fizyczno-chemiczna [9].

Najbardziej popularnym sposobem unieszkodliwiania odpadów medycznych jest poddawanie ich procesowi termicznego przekształcania, czyli spalania w specjalnych spalarniach. Proces ten wiąże się najczęściej z odzyskiem ciepła. Na terenie województwa kujawsko-pomorskiego znajdują się trzy spalarnie odpadów medycznych [9].

### *Spalarnia odpadów medycznych w Toruniu*

W związku ze świadczeniem usług zdrowotnych na terenie WSzZ w Toruniu przez cały czas działalności wytwarzane są odpady medyczne, które do 1995 roku spalano w piecu typu KHK-50 produkcji węgierskiej. Przystosowany był on do spalania materiałów organicznych z wykorzystaniem palników olejowych, odpady częściowo spalane były również na terenie kotłowni w kotłach typu PCO-60. Z uwagi na fakt, że przeprowadzona w 1995 roku modernizacja kotłowni spowodowała wycofanie tychże kotłów, koniecznym było zainstalowanie nowych urządzeń, w których utylizowanoby odpady pochodzące z WSzZ w Toruniu oraz z zakładów opieki zdrowotnej znajdujących się w regionie toruńskim (teren byłego województwa toruńskiego) [9, 10].

W 1996 roku dokonano odbioru i przekazano do eksploatacji nowoczesną Spalarnię Odpadów Medycznych zlokalizowaną w budynku kotłowni głównej na terenie WSzZ w Toruniu. W skład spalarni wchodzi następujące urządzenia:

- spalarka typu HP 500 (komora pirolizy wraz z termoreaktorem) produkcji ATI Muller,
- zespół automatycznego załadunku i odpopielania,
- zespół odzysku ciepła,
- fluidalna stacja oczyszczania spalin metodą moką,
- fluidalna stacja oczyszczania spalin metodą suchą,
- zespół śluzy wagowej oraz
- chłodnia odpadów medycznych.

Ilość odpadów poddana utylizacji od początku funkcjonowania spalarni przekroczyła wielkość 1405 Mg.

Instalacja Spalarni Odpadów Medycznych pracowała w systemie dwuzmianowym (16 h/dobę). Wydajność instalacji kształtuje się na poziomie od 5–50 kg/h w zależności od składu chemicznego oraz wartości opałowej spalanych odpadów. Odpady medyczne po uprzednim dostarczeniu transportem zewnętrznym do spalarni oraz zmagazynowaniu w chłodni poprzez system automatycznego załadunku zostają wprowadzone do spalarki i poddawane są w komorze

pirolitycznej procesowi spalania w temperaturze 800–900°C. Powstające spaliny poddawane są procesowi dopalania w komorze reaktora w temperaturze 1100–1300°C. Po opuszczeniu komory reaktora spaliny przechodzą do rekuperatora ciepła i po schłodzeniu kierowane są do fluidalnej stacji oczyszczania spalin metodą moką, gdzie poddane zostają procesowi zraszania roztworem wodorotlenku sodu o pH 11,2. Po tej operacji spaliny kierowane są do fluidalnej stacji oczyszczania spalin metodą suchą, która zbudowana jest ze złoża węgla aktywnego, po przejściu którego spaliny za pośrednictwem wentylatora wyciągowego oraz kolumna odprowadzane są na zewnątrz instalacji do otoczenia [9, 10].

Hydrauliczny zespół załadunku i odpopielania pozwala na automatyczne umieszczanie odpadów przeznaczonych do utylizacji wewnątrz komory pirolizy. Sterowanie i kontrola odbywa się za pomocą programu komputerowego. Natomiast hydrauliczny zespół odpopielania umożliwia automatyczne usunięcie pozostałości z procesu spalania z wnętrza komory pirolizy. Po rozpoczęciu procedury odpopielania, system zaprzestaje wykonywania kolejnych załadunków odpadów i przeprowadza proces dopalania odpadów obniżając temperaturę komory pirolizy spalarki. Gdy temperatura osiągnie wymagany poziom, po ręcznym otwarciu drzwi służących do odpopielania, pozostałość procesu spalania zostaje usunięta z wnętrza spalarki do przygotowanego pojemnika na popioły [9, 10].



Rys. 2. Zespół automatycznego załadunku i odpopielania [9]

Komora pirolizy jest poziomą komorą wykonaną z blachy stalowej, której wewnętrzna powierzchnia wyłożona jest cegłami ogniotrwałymi. Izolację termiczną

zapewnia ogniotrwały materiał włóknisty. Na korpusie spalarki zamontowany jest palnik gazowy. Mechaniczne napowietrzanie realizowane jest poprzez wentylator nadmuchowy. Efektem tego jest chłodzenie płaszcza spalarki przy jednoczesnym wstępnym podgrzaniu powietrza procesowego. Nadmuchy powietrza do komory pirolitycznej regulowane są przy pomocy siłowników ustawiających przepustnice doprowadzające powietrze. Pozwala to na kontrolowane spalanie odpadów w procesie pirolitycznym z niedomiarem tlenu, w zakresie temperatury 800–900°C, przy niewielkim podciśnieniu. Temperatura gazów spalinowych mierzona jest za pomocą termopary i przekazywana jest do sterownika komputerowego [9, 10].

Termoreaktor składa się z poziomej komory z wewnętrzną wykładziną wykonaną z betonu żaroodpornego z dodatkiem tlenku glinu. Izolacja termiczna wykonana jest w sposób analogiczny jak w komorze pirolizy. W początkowej części komory zamontowano palnik gazowy, który przeznaczony jest do dopalania gazów pochodzących z komory pirolizy spalarki. W celu zapewnienia optymalnych warunków dopalania gazów tj. prawidłowego napowietrzania oraz wydłużenia czasu retencji, do termoreaktora dobudowano segmenty przedłużające z rozbudowanym systemem nadmuchu powietrza. Taka budowa termoreaktora zapewnia utrzymanie temperatury procesu w zakresie 1100–1300°C, właściwy nadmiar powietrza i zachowanie dwusekundowego czasu retencji. Wzdłuż termoreaktora umieszczone są czujniki, z których sygnały pomiarowe doprowadzane są do sterownika komputerowego. Sygnały te są niezbędne do kontroli i regulowania prawidłowości procesu spalania [9, 10].

Na wyjściu termoreaktora znajduje się odcinek przewodu doprowadzającego gorące spaliny wylotowe z termoreaktora do kotła odzysknicowego i dalej do fluidalnej stacji oczyszczania spalin. Dodatkowo na wyjściu z termoreaktora znajduje się trójnik bypassu umożliwiający awaryjne wyłączenie z pracy kotła i fluidalnej stacji oczyszczania spalin podczas pracy spalarki. Przewód wylotowy gorących spalin z termoreaktora wykonany jest z blachy stalowej izolowanej termicznie wykładziną z ogniotrwałego betonu. W kotle wodnym następuje odzysk ciepła z procesu spalania, z jednoczesnym wstępnym schłodzeniem [9, 10].

Odzysknicowy kocioł wodny jest kotłem płomieniówkowym, dwuciągowym. Medium grzewcze stanowią tu spaliny ze spalarki odpadów o wydajności do 150 kg/h. Podgrzana woda odprowadzana jest do magistrali zewnętrznej poprzez króciec wylotowy znajdujący się w górnej części kotła [10].

### *Współspalanie odpadów w piecach cementowych (Lafarge Cement S.A.)*

Piece cementowe można z całą pewnością zaliczyć do szczególnie wartościowych pod względem ekonomicznym i ekologicznym instalacji dla termicznego przekształcania odpadów komunalnych, zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa oraz realizowaną strategią zagospodarowania frakcji biodegradowalnych tychże odpadów. Urządzenia te spełniają bardzo ostro zdefiniowane wymagania

w zakresie standardów emisyjnych i parametrów procesowych [11, 12]. W województwie kujawsko-pomorskim odpady spalane są w Cementowni Kujawy w Białawach (Lafarge Cement S.A.) [13].

Piece cementowe całkowicie spełniają warunki bezpiecznego spalania w/w odpadów, gdyż temperatura panująca w fazie gazowej podczas wypalania klinkieru przekracza 1200°C, zaś nominalny czas przebywania gazów w tych urządzeniach wynosi 4–6 sekund. Opublikowane przez Agencję Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych rezultaty wieloletnich testów spalania odpadów w piecach cementowych wykazują jednoznacznie, że wartości współczynnika efektywności niszczenia i usuwania (*destruction and removal efficiency – DRE*), stanowiącego podstawowe kryterium bezpieczeństwa termicznej degradacji odpadów organicznych, przekraczają minimalną normę dla DRE wynoszącą 99,99% i są w większości przypadków wyższe od wartości tego wskaźnika wyznaczonego w tradycyjnych incineratorach [12, 13].

W cementowni Kujawy stosuje się trzy rodzaje paliw alternatywnych: stałe rozdrobnione (PASr), opony samochodowe oraz wysuszone osady ściekowe (DSS). Należą one do kategorii odpadów innych niż niebezpieczne. W skład odpadów PASr wchodzi rozdrobnione odpady opakowaniowe (z tworzyw sztucznych, papieru) – pochodzące z przemysłu spożywczego oraz materiały i przedmioty nieprzydatne do użytku lub przeterminowane, odpady poprodukcyjne z przetwórstwa tworzyw sztucznych, produkty tekstylne, makulatura z przemysłu papierniczego oraz drewno, trociny (kod odpadu 19 12 10). Odpady te powinny być pozbawione części metalowych, powinny być pocięte do wymaganej wielkości oraz wymieszane. Szacunkowe ilości głównych składników wprowadzonych z odpadem [13, 14]:

- tworzywa sztuczne 35%,
- papier 30%,
- guma 10%,
- drewno 5%,
- tkaniny 20%.
- gęstość nasypowa 0,2–0,6 Mg/m<sup>3</sup>,
- zawartość popiołu < 15 %,
- zawartość wilgoci < 15%,
- wartość opałowa > 18 GJ/Mg,
- chlor < 1% oraz
- siarka < 1%.

Uruchomienie instalacji spalania paliw alternatywnych miało miejsce na początku 2007 roku. Z uwagi na charakter paliw, spalane są one w kalcynatorze. Kalcynator to dodatkowa komora spalania, która w nowoczesnych instalacjach piecowych z cyklonowymi wymiennikami ciepła instalowana jest przed walczakiem pieca, za wymiennikiem cyklonowym. Dzięki doprowadzeniu dodatkowego powietrza, proces spalania w kalcynatorze jest niezależny od procesu spalania w piecu. Spalanie w kalcynatorze przebiega w mieszaninie paliwa z materiałem wypalnym, a temperatura spalania wynosi około 1000–1100 °C. Paliwa spalane

są całkowicie bezodpadowo; popiół z ich spalania wchodzi w skład mieszanki surowcowej. Składnikami popiołu są głównie tlenki wapnia, krzemu, żelaza i glinu. Obecnie, paliwo konwencjonalne zastępowane jest w około 15% paliwem alternatywnym typu PASr [13, 14].

Wysuszone osady ściekowe (ang. Dried Sewage Sludge, DSS) (kod odpadu 19 08 05) są mieszaniną osadu wstępnego otrzymanego z oczyszczania mechanicznego oraz osadu biologicznego z oczyszczania biologicznego. Mieszanina osadów poddawana jest fermentacji (z otrzymaniem biogazu), dzięki czemu powstaje osad ustabilizowany. Następnym krokiem jest odwadnianie i suszenie osadu, które dodatkowo powoduje pełną jego higienizację. Cementownia planuje uruchomienie spalania odpadów po rozpoczęciu regularnych dostaw, pierwsze próby zastosowania tego paliwa zostały przeprowadzone w 2008 roku. Charakterystyka odpadu:

- wartość opałowa > 9 MJ/kg,
- gęstość nasypowa 800 kg/m<sup>3</sup>,
- wilgotność < 10%,
- siarka < 1.8% oraz
- chlor < 0.5% [13, 14].



Rys. 3. Widok pieca cementowego z boku (Lafarge S.A.) (fot. R. Studziński) [15]

Współspalanie odpadów przygotowanych w oparciu o odpady paliw alternatywnych obwarowane jest szeregiem aktów prawnych dotyczących transportu, odbioru, magazynowania oraz warunków spalania i dopuszczalnych poziomów

emisji. Cementownia Kujawy musiała spełnić szereg wymagań, aby móc wykorzystywać paliwa alternatywne w sposób bezpieczny i zgodny z obowiązującym prawem. Konsekwencją tego stanu rzeczy były zrealizowane inwestycje obejmujące swoim zakresem instalację urządzeń odpylających jak i wybudowanie instalacji dozujących wraz z zapleczem magazynowym. Zakład posiada stosowne decyzje Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska regulujące zagadnienia związane z współspalaniem, które określają dopuszczalne wielkości emisji pyłowo-gazowych przy termicznej utylizacji odpadów. Wprowadzone zostały także wewnętrzne procedury kontrolne jakości dostarczanych paliw [13, 14].

Analizując ekonomikę tych przedsięwzięć można stwierdzić, że nakłady inwestycyjne na budowę typowej spalarni o wydajności 60 tysięcy ton odpadów/rok wynoszą 160 mln USD, podczas gdy adaptacja pieca cementowego do spalania około 40 tys. ton tych samych odpadów nie przekracza kwoty 1,5 mln USD. Ponadto, budowa zakładu przetwarzania paliwa o zdolności 100 tys. ton/rok, który zapewniłby dostawę paliwa o wielkości odpowiadającej energii pozyskanej z termicznej degradacji odpadów wymagałaby nakładów wielkości 5 mln USD. W podsumowaniu należy stwierdzić, że średnia ekonomiczna korzyść netto, wynikająca z utylizacji odpadów w charakterze paliwa zastępczego wynosi 1,94 USD na jedną tonę klinkieru [12, 16].

## Literatura

- [1] C. Rosik-Dulewska, *Podstawy gospodarki odpadami*, PWN, Warszawa 2002.
- [2] M. Żygadło, *Gospodarka odpadami komunalnymi*, wyd. Pol. Świętokrzyskiej, Kielce 2002.
- [3] W. Wandrasz (red.), *Termiczne unieszkodliwianie odpadów. Restrukturyzacja procesów termicznych*, Wyd. Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych, Poznań 2007.
- [4] A. Starek, *Spalarnie odpadów komunalnych – ryzyko zdrowotne*, *Bezpieczeństwo Pracy* 11, 24–25, 2004.
- [5] <http://gospodarka-odpadami.pl/inne/Spittelau.pdf> (wejście 23.11.09).
- [6] M. Mühlich, M. Scherrer, F.D. Dascher, *Comparison of infectious waste management in European hospitals*, *Journal of Hospital Infection* 55, 260–268, 2003.
- [7] M. Kela, S. Nazareth, R. Agarwal, *Managing Hospital Waste. A guide for health care facilities*, SRISTHTI, New Delhi, 1998.
- [8] R. Buczkowski [red.], *Technologie proekologiczne w przemyśle i energetyce województwa kujawsko-pomorskiego*, UMK, Toruń 2004.
- [9] M. Szymczak, *Modernizacja gospodarki energetycznej Wojewódzkiego Szpitala Zespołowego w Toruniu na bazie nowoczesnych technologii proekologicznych*, *Osiągnięcia Proekologiczne w Przemśle i Energetyce* 391–408, UMK, Toruń 2005.
- [10] R. Kikuchi, *Recycling of municipal solid waste for cement production: pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker*, *Resources, Conservation & Recycling* 31, 137–147, 2001.



- 
- [11] K.H. Karstensen, *Formation, release and control of dioxins in cement kilns*, Chemosphere 70, 543–560, 2008.
- [12] B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Energia alternatywna w województwie kujawsko-pomorskim*, UMK, Toruń 2008.
- [13] Informacje przesłane przez Radosława Radzimskiego, Lafarge S.A.
- [14] R. Studziński, *Spalanie osadów z oczyszczalni ścieków komunalnych w piecu cementowym przedsiębiorstwa Lafarge*, praca magisterska, UMK, Toruń 2005.
- [15] R. Kikuchi, *Recycling of municipal solid waste for cement production: pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker*, Resources, Conservation & Recycling 31, 137–147, 2001.

## ANKIETY – OPIS

### Plantacje roślin energetycznych

Wierzba wiciowa jest zdecydowanie najpopularniejszą rośliną energetyczną w Polsce – tylko jeden respondent zajmuje się uprawą ślazuwca pensylwańskiego. Powierzchnia plantacji wynosi 3–150 ha, przy czym najczęściej są to plantacje 10–20 ha. Biomasa z upraw energetycznych zbierana jest najczęściej w cyklu 3-letnim i jest to od 200 Mg do 2 Gg.

Koszt inwestycji to w głównej mierze koszt sadzonek, a także wydatki związane z przygotowaniem gruntu: odchwaszczenie, środki ochrony roślin, robocizna. Koszt inwestycji zależy w głównej mierze od areалу i wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset tysięcy PLN. Oprócz środków własnych, środki finansowe zostały pozyskane poprzez zaciągnięcie pożyczek/kredytów. W niektórych przypadkach pieniądze zostały wyłożone przez inwestorów prywatnych lub państwowych, nieliczni respondenci uzyskali wsparcie z programu SAPARD. Plantacje roślin energetycznych (głównie wierzby) funkcjonują w Polsce od niedawna – większość powstała w latach 2004–2008.

Respondenci ankiety „Plantacje roślin energetycznych” jako jedyni spośród wszystkich respondentów uważają iż inwestycja nie charakteryzowała się zbyt wysokimi kosztami (niektórzy podają „umiarkowanymi”). Zwracają jednak uwagę na inne problemy:

- wierzba nie przyjęła się na terenach podmokłych z powodu nieczystych rowów melioracyjnych,
- silne zagłuszenie roślin przez chwasty w pierwszym roku uprawy oraz
- szkody wśród sadzonek dokonane przez zwierzęta.

Respondenci wskazują również na problemy, które występują podczas uprawy i zbioru biomasy, a mianowicie:

- rośliny chorują na choroby wywołane przez grzyby,
- wierzbę atakują szkodniki: mszyce, mątwka, lipówka śluzuveczka, kręto-ryjek,
- szkody w uprawach czynią dzikie zwierzęta (sarny, dziki, bobry, zające; jelenie łamią wierzbę na wysokości 1 m, co znacznie hamuje rozwój),

- brak na rynku atestowanych środków ochrony roślin,
- ciepłe zimy utrudniają zbiór wierzby,
- wysokie koszty zbioru,
- brak rąk do pracy,
- słabo rozwinięty rynek zbytu biomasy,
- uprawa wierzby wyjąławia ziemię (niektórzy respondenci chcąc temu zapobiec stosują nawożenie, np. osadami ściekowymi) oraz
- brak zainteresowania władz państwa rozwojem i promocją produkcji biomasy.

Całą, bądź znaczną część pozyskanej biomasy respondenci sprzedają. Odbiorcami są głównie lokalne ciepłownie, jak również wytwórnie peletów i brykietów. Niektórzy respondenci prowadzą również sprzedaż sadzonek, inni produkują brykiety.

Pomimo problemów związanych z uprawą i zbiorem biomasy, większość respondentów planuje zwiększyć areał pod rośliny energetyczne. Twierdzą, iż mimo wielu przeciwności popyt na biomasę rośnie. Respondenci podają, że przystępując do zakładania/rozszerzania plantacji warto znaleźć wcześniej odbiorców na biomasę (podpisanie umowy).

Respondenci piszą, iż dla nowych inwestorów/plantatorów dużym problemem jest brak odpowiedniej wiedzy, szkoleń, warsztatów na temat uprawy, zbioru i dofinansowania plantacji energetycznych. Wielu z nich zaczynało od przysłowio-wego zera, ucząc się na własnych błędach.

## **Produkcja brykietów/peletów**

Aglomeryzacji poddawana była następująca biomasa: słoma (zbożowa, rzepakowa), trociny, siano, mieszanki słomy i siana, zrębki, wióry drzewne, łupiny, odpady liściaste i iglaste, biomasa roślin energetycznych z wykorzystaniem pras do paletyzacji lub brykietowania metodą hydraulicznego lub mechanicznego prasowania. Do aglomeryzacji biomasy respondenci rekomendują urządzenia/linie produkcyjne: Biomasser, Hotpress, BrikStar, BT-86M „WAMAG”, HLS, VEKTOR, VAMAG, pleciarka P-300 i inne. Warto zaznaczyć, iż niektórzy respondenci wykorzystują własną myśl techniczną i prowadzą proces zagęszczania biomasy w instalacjach własnego pomysłu. Biomasa przed aglomeryzacją jest suszona i rozdrabniana (np. za pomocą młynów). Gotowy produkt jest kondycjonowany i pakowany. Ilość produkowanych brykietów/peletów w 2008 r. wyniosła 10–2000 ton.

Okres realizacji instalacji mieścił się najczęściej w granicach 1–6 miesięcy, koszt inwestycji wynosił do kilkunastu tysięcy PLN (pleciarki) do kilkuset tysięcy PLN (wydajne brykieciarki). Źródłem środków finansowych na realizację inwestycji były nakłady własne oraz pożyczki/kredyty.

Niemal wszyscy respondenci podają, iż głównym problemem z realizacją projektu były jego wysokie koszty. Inne problemy to:

- brak odpowiedniej ilości surowca,
- surowiec nieodpowiedniej jakości,
- brak na rynku producenta całej linii produkcyjnej oraz
- awaryjność urządzeń, szczególnie linii rozdrabniającej.

Produkcja brykietów/peletów z biomasy w Polsce to nowa dziedzina gospodarki. Większość instalacji powstała w ostatnich latach, a mianowicie:

- 6% w 1995–2000,
- 38% w 2001–2005,
- 56% w 2006–2009.

Respondenci zadowoleni są z ilości produkowanej biomasy – w 75% przypadków spełnia ona wstępne założenia inwestycyjne, 15% przewyższa ją, zaś 10% nie osiąga jej.

Respondenci sprzedają brykiety/pelety państwowym bądź prywatnym zakładom przemysłowym, osobom prywatnym, instytucjom użyteczności publicznej. Na potrzeby własne zużywają niewiele, najczęściej 1–10% produkowanej biomasy.

Producenci brykietów/peletów są na etapie zwiększania produkcji, większość z nich planuje podwoić, a nawet potroić produkcję w najbliższym czasie. Wykorzystane na ten cel zostaną środki własne i kredyty/pożyczki.

## **Bezpośrednie spalanie biomasy**

Respondenci, do celów ciepłowniczych stosują szeroką gamę surowców: trociny, zrębki, słomę (rzepakową, pszenną, żytnią, jęczmienną), siano, łuski słonecznika, śrutę zbożową, drewno odpadowe z wycinki leśnej i tartaków, wióry z fabryk obróbki drewna i meblarskich, ziarno owsa, pelety i brykiety z odpadowego drewna, słomy i roślin energetycznych, jak również bezpośrednio biomasę roślin energetycznych. Należy zauważyć, iż niektóre kotłownie spalają kilka rodzajów biomasy. Ilość spalanego materiału waha się w bardzo szerokich granicach i wynosi od kilku Mg do powyżej Tg rocznie.

Do spalania wykorzystuje się różne typy kotłów, dostępnych na polskim i unijnym rynku. Z ilością spalanego biomasy i wydajnością kotła wiąże się wielkość produkowanego ciepła roczne, która waha się od kilkuset GJ do kilkuset TJ. Pozyskiwana energia przeważnie (70% respondentów) wykorzystywana jest na potrzeby własne lub częściowo bądź w całości jest sprzedawana.

Koszt inwestycji wahał się w granicach od 20 tys. PLN do powyżej 3 mln PLN (duże ciepłownie), który pokrywany był w większości przypadków ze środków własnych, kredytów i pożyczek. Czasem środki pochodziły z kilku źródeł, a mianowicie:

- 53% – środki własne,
- 22% – pożyczki/kredyty,
- 16% – inne (środki krajowe, unijne)
- 6% – inwestorzy państwowi,
- 3% brak danych.

Niemal wszyscy respondenci jako główny problem z realizacją projektu podali zbyt wysokie koszty inwestycji, część nie była zadowolona ze zbyt dużej biurokracji, zaś jeden z respondentów podał, iż Bank Ochrony Środowiska kazał udowodnić, iż spalanie słomy jest ekologiczne.

Większość instalacji powstała w ostatnim czasie:

- 6% przed rokiem 1995,
- 14% w okresie 1995–2000,
- 45% od 2001 do 2005 roku,
- 35% w latach 2006–2009<sup>1</sup>.

Respondenci są zadowoleni z ilości produkowanej energii – wielkość ta spełnia lub nawet przewyższa ilość założoną podczas planowania inwestycji.

Najważniejsze problemy związane z funkcjonowaniem instalacji to:

- zbyt duża wilgotność biomasy,
- relatywnie mała ilość dostawców biomasy,
- wysokie ceny „komercyjnej” biomasy,
- duża awaryjność instalacji oraz
- brak fachowego serwisu instalacji na biomasę w kraju.

Co trzeci respondent planuje zwiększyć ilość produkowanej bioenergii w najbliższym czasie, większość z nich zamierza wykorzystać środki unijne. Kilku respondentów planuje pozyskiwać energię odnawialną z innych źródeł (kolektory słoneczne do ogrzewania cwu, panele fotowoltaiczne, biogazownie rolnicze).

## Biopaliwa, biokomponenty

Substraty do pozyskiwania biopaliw płynnych to zboża (pszenica, pszenżyto, żyto, jęczmień, kukurydza), buraki, melasa, odpady owocowe w przypadku bioetanolu, zaś w przypadku biodiesla (estrów metylowych) to rzepak i pozyskiwany z niego olej rzepakowy.

Jeśli chodzi o technologię produkcji bioetanolu, to niemal wszyscy respondenci wykorzystują metodę opartą na sitach molekularnych, w jednym przypadku stosuje się perwaporację. W przypadku wytwarzania estrów metylowych wykorzystuje się metodę transestryfikacji w obecności katalizatora zasadowego i metanolu.

Budowa instalacji pozyskiwania biopaliw płynnych trwała od ośmiu miesięcy do dwóch lat, zaś koszt inwestycji zawierał się w granicach 1–150 mln PLN (część

<sup>1</sup> Stan na maj 2009

respondentów nie podała kosztów, gdyż są to dane zastrzeżone). Źródłem pieniędzy były środki własne oraz pożyczki/kredyty.

Najważniejszym problemem respondentów podczas realizacji inwestycji były jej wysokie koszty oraz duża ilość wymaganych dokumentów.

Niemal wszystkie instalacje powstały bądź zostały przystosowane do produkcji biopaliw i biokomponentów po 2004 roku. Ilość produkowanego paliwa to 1–110 mln dm<sup>3</sup> rocznie. Głównym odbiorcą jest PKN Orlen.

Wydajność, jaką uzyskują instalacje nie spełnia obecnie założeń przyjętych na etapie inwestycji (60% respondentów), w pozostałych przypadkach spełnia ją (40%), zaś w żadnym przypadku jej nie przewyższa.

Respondenci przeważnie są zainteresowani zwiększeniem produkcji biopaliwa, warunkują to jednak rozwojem sytuacji na rynku paliw, jak też rozmiarami kryzysu gospodarczego. Dodatkowym problemem jest nadal brak dostatecznej pomocy państwa dla wytwórców energii odnawialnej.

## Biogaz

Substraty do pozyskiwania biogazu to najczęściej osad surowy i osad nadmierny z oczyszczalni ścieków, odpady komunalne (składowiska odpadów), oraz odpady przemysłu spożywczego.

Budowa biogazowni trwała od sześciu miesięcy do dwóch lat, zaś koszt inwestycji w większości przypadków przekraczał 1 mln PLN. W przypadku biogazowni, niemal w każdym przypadku środki finansowe pochodziły z kilku źródeł. Oprócz środków własnych były to kredyty, pożyczki (często z NFOŚiGW), środki unijne (np. Fundusz Spójności), a także środki budżetowe danej miejscowości, ZPORR, WFOŚiGW, programu Phare i Thermie oraz inwestorów prywatnych.

Najważniejszym problemem respondentów podczas realizacji inwestycji były jej wysokie koszty, w niektórych przypadkach występowały problemy z uzyskaniem przyłączenia do sieci elektroenergetycznej.

Większość instalacji powstała na przełomie XX i XXI wieku:

- 8% przed 1995r.,
- 45% w latach 1995–2000,
- 24% w okresie 2001–2005 oraz
- 23% w latach 2006–2009.

Wydajność, jaką obecnie uzyskują biogazownie spełnia założenia przyjęte na etapie inwestycji (90% respondentów), w nielicznych przypadkach przewyższa ją bądź jest poniżej wstępnych założeń.

Większość biogazowni (77%) sprzedaje część lub całość wytworzonej energii, przede wszystkim państwowej spółce energetycznej, w kilku przypadkach odbiorcą jest prywatna firma handlowa. Energia na potrzeby własne użytkowana jest głównie przez biogazownie funkcjonujące przy oczyszczalniach ścieków.

Połowa respondentów zamierza w najbliższym czasie zwiększyć ilość produkowanego biogazu (przeważnie o 20–40%), przy czym w większym stopniu mają być wykorzystane fundusze unijne. Respondenci informują, iż zmienność przepisów podatkowych jest podstawowym problemem przy planowaniu/rozbudowie inwestycji.

## Spalarnie odpadów

W instalacjach spala się odpady: komunalne, medyczne, osady ściekowe, niebezpieczne (środki ochrony roślin, opakowania zawierające substancje toksyczne, farby, kleje, itp.). Ilość spalonych odpadów w 2008 roku, w poszczególnych spalarniach wyniosła od 50 Mg do 1Gg.

Do spalania respondenci używają następujących urządzeń/instalacji: HOVAL MULTI ZONE,,Purotherm – Pyrolise“, GGJ Multi Zone, ATI Muler, ENTECH Renewable Energy Technologies, spalarkę SP-50, spalarkęHP 500, spalarkę pirolityczną CP 100, spalarkę P60-M2. Ilość produkowanego ciepła waha się w granicach 20–35000GJ i w większości przypadków spełnia wstępne założenia na etapie planowania inwestycji. Większość respondentów zużywa wyprodukowaną energię na potrzeby własne.

Spalarnie odpadów to drogie inwestycje – respondenci podają, iż koszt instalacji wyniósł 3–300 mln PLN, koszty pokryto ze źródeł własnych, jak i zaciągnięte zostały pożyczki/kredyty, w niektórych przypadkach duży wkład wnieśli inwestorzy państwowi bądź zagraniczni, wykorzystano środki unijne, samorządowe, dotację z NFOŚ. Spalarnie powstały w ciągu ostatnich 15 lat.

Główne problemy związane z realizacją inwestycji to:

- wysokie koszty inwestycji,
- opór społeczności lokalnej i organizacji ekologicznych oraz
- problemy technologiczne.

Z kolei główne problemy związane z funkcjonowaniem instalacji to:

- wysokie koszty eksploatacji instalacji,
- duża awaryjność,
- brak profesjonalnego serwisu,
- brak na rynku części zamiennych oraz
- dotrzymanie warunków emisyjnych.

Mimo wielu kłopotów, połowa respondentów planuje zwiększyć ilość spalanych odpadów bądź zainwestować w budowę nowych spalarni. Środki finansowe będą pochodzić z tych samych źródeł, jak również ze środków unijnych.

# ZAŁĄCZNIK 1

## ANKIETA – PLANTACJE ENERGETYCZNE

### INFORMACJE WSTĘPNE

1. Rośliny „energetyczne” uprawiane na plantacji:  
.....  
.....
- 1a) powierzchnia plantacji [ha]:  
.....
2. Ilość biomasy wytworzonej w roku 2008 (lub 2007) wynosiła:  
.....  
.....
3. Długość okresu realizacji inwestycji (w miesiącach):  
.....
4. Całkowity koszt realizacji inwestycji (w zł):  
.....
5. Źródło środków finansowych na realizację inwestycji: \*
  - środki własne
  - inwestorzy prywatni
  - inwestorzy państwowi
  - inwestorzy zagraniczni
  - pożyczki /kredyty
  - inne .....\* proszę podkreślić właściwe
6. Główne problemy związane z realizacją przez Panią /Pana/Państwa inwestycji: \*
  - wysokie koszty inwestycji
  - opór władz lokalnych
  - opór społeczności lokalnej
  - opór grup ekologicznych
  - inne .....\* proszę podkreślić właściwe

### FUNKCJONOWANIE

7. Rok rozpoczęcia funkcjonowania plantacji .....



8. Czy ilość produkowanej biomasy obecnie spełnia wstępne założenia zakładane przez Panią/Pana/Państwa na etapie planowania inwestycji?

- Tak                       Przewyższa je                       Jest poniżej wstępnych założeń

9. Najważniejsze problemy uprawy (szkodniki, choroby roślin):

.....  
.....  
.....

#### **WYKORZYSTANIE I SPRZEDAŻ PRODUKTÓW**

10. Czy uzyskane przez Panią/Pana/Państwa biomasa jest sprzedawana, jeżeli tak to komu? Tak  Nie

.....

11. Jeśli nie jest sprzedawana w całości, to jaki procent/ilość wyprodukowanej biomasy zużywane jest na potrzeby własne? W jaki sposób?

.....

#### **PLANY ROZWOJOWE**

12. Czy planuje Pan/Pani/Państwo zwiększenie ilości produkowanego bioenergii, jeśli tak to w jakim czasie i o ile?

.....

13. Czy fundusze do planowanego rozwoju pobierane będą z tych samych źródeł, co wcześniej?

- Tak  Nie

14. Inne uwagi:

.....  
.....  
.....

W podziękowaniu za odesłanie ankiety, prześlemy Państwu nieodpłatny egzemplarz monografii.

*Dziękujemy*

## ZAŁĄCZNIK 2

### Rejestr wytwórców biopaliw i biokomponentów (stan na 05.11.09)<sup>1</sup>

Wytwórca	Miejsce wytwarzania biopaliwa	Rodzaj instalacji	Roczna wydajność instalacji [mln dm <sup>3</sup> ]
AKWAWIT-BRASCO	64-100 Leszno 51-501 Wrocław	Instalacja do produkcji bioetanolu	95,0 70,0
Podlaskie Gorzelnie Sp. z o.o.	16-150 Suchowola	Instalacja do produkcji bioetanolu	4,2
Wielkopolskie Zakłady Farmaceutyczne BIO-WIN S.A.	62-095 Murowana Goślina	Instalacja do produkcji bioetanolu	13,0
Wawrzyniak Wiesław - PHP	62-800 Niedźwiady	Instalacja do produkcji bioetanolu	20,0
Przedsiębiorstwo Obrotu Paliwami ORTUS Jan Ostrowski i Wspólnicy Sp. J.	19-400 Lenarty	Instalacja do produkcji bioetanolu	16,8
UNI-MALEW Sp. z o.o.	62-230	Instalacja do produkcji bioetanolu	18,0
Destylarnia SOBIESKI S.A.	83-200 Starogard Gdański	Instalacja do produkcji bioetanolu	70,0
Rafineria Trzebinia S.A.	32-540 Trzebinia	Instalacja do produkcji estrów metylowych	110,0
SOLANIUM Sp. z o.o.	99-300 Kutno	Instalacja do produkcji bioetanolu	20,0
Rafineria ESTRY METYLOWE Sp. z o.o.	76-256 Sycewice	Instalacja do produkcji estrów metylowych Ageratec	1,065
DESTYLACJE POLSKIE S.A.	64-600 Oborniki	Instalacja do produkcji bioetanolu	150,0
SOLVENT WISTOL S.A.	32-600 Oświęcim	Instalacja do produkcji estrów metylowych	6,0

<sup>1</sup> Na podstawie „Rejestru wytwórców” ([www.arr.gov.pl/data/01670/rejestr\\_wytworcow\\_bio\\_2009.pdf](http://www.arr.gov.pl/data/01670/rejestr_wytworcow_bio_2009.pdf)) bez podmiotów magazynujących biopaliwa i biokomponenty; spis wg kolejności wpisu do Rejestru; kody pocztowe na podstawie <http://www.zumi.pl>.

Wytwórca	Miejsce wytwarzania biopaliwa	Rodzaj instalacji	Roczna wydajność instalacji [mln dm <sup>3</sup> ]
POLMAX S.A.	66-200 Świebodzin	Instalacja do produkcji estrów metylowych	4,0
EUROSERVICE Zakłady Przemysłu Tłuszczowego w Surochowie Sp. z o.o.	Surochów, 37-400 Jarosław	Instalacja do produkcji estrów metylowych	20,0
Zakład Przetwórstwa Alkoholu WIRASET Sp. J. S. Wierzbicki, R. Wierzbicki, R. Wieczorek	Promna Kolonia, 26-803 Promna	Instalacja do produkcji bioetanolu	11,0
Zakłady Tekstylne WOMAREX Sp. z o.o.	Giebułtów, 59-630 Mirsk	Instalacja do produkcji estrów metylowych	56,81
BIOETANOL AEG Sp. z o.o.	87-140 Chełmża	Instalacja do produkcji bioetanolu	20,0
PPHU GES Sp. z o.o.	Bidziny, 27-532 Wojciechowice	Instalacja do produkcji estrów metylowych	1,5
ALEKS-FRUIT Sp. z o.o.	87-700 Aleksandrów kujawski	Instalacja do produkcji estrów metylowych	10,0
PPH KAREX Jarosław Romańczuk	Cieślów, 72-405 Świerzno	Instalacja do produkcji estrów metylowych	0,75
Laborex Sp. z o.o.	35-959 Rzeszów	Instalacja do produkcji estrów metylowych	6,0
PETRO-NAFT Sp. z o.o.	09-100 Płońsk	Instalacja do produkcji estrów metylowych	1,0
Bioenergia Sieradz Sp. z o.o.	98-200 Sieradz	Instalacja do produkcji estrów metylowych	56,0
JK EKO – ENERGY Sp. z o.o.	21-512 Zalesie	Instalacja do produkcji estrów metylowych	17,0
AGROPIN Sp. z o.o.	89-200 Szubin	Wytwarzanie czystego oleju rzepakowego Instalacja do produkcji estrów metylowych	5,0 25,0
ADM Szamotuły Sp. z o.o.	64-500 Szamotuły	Wytwarzanie czystego oleju rzepakowego	155,0
BIOPALIWA S.A.	82-200 Malbork	Instalacja do produkcji estrów metylowych	120,0
Polski Koncern Spirytusowy Sp. z o.o.	73-140 Ińsko	Instalacja do produkcji bioetanolu z urządzeniem do permeacji PV 2002	45,0
Zakłady Tłuszczowe KRUSZWICA S.A.	49-300 Brzeg	Wytwarzanie czystego oleju rzepakowego	220,0
Zakłady Tłuszczowe w Bodaczowie Sp. z o.o.	22-460 Szczepieszyn	Wytwarzanie czystego oleju rzepakowego	54,0
BAUKUR M. Kurowska, H. Kurowski Sp. J	88-100 Inowrocław	Instalacja do produkcji estrów metylowych (bezcisnieniowa)	3,0
Przedsiębiorstwo Wielobranżowe JAGAT Agata Bródka	62-090 Rokietnica Wielkopolska	Instalacja do produkcji estrów metylowych (bezcisnieniowa)	21,6

<b>Wytwórca</b>	<b>Miejsce wytwarzania biopaliwa</b>	<b>Rodzaj instalacji</b>	<b>Roczna wydajność instalacji [mln dm<sup>3</sup>]</b>
WRATISLAVIA – BIO Sp. z o.o.	51-501 Wrocław	Instalacja do produkcji estrów metylowych	170,087
PPHU AS – GOLS Sp. z o.o	87-702 Koneck	Instalacja do produkcji estrów metylowych	18,0
LOTOS Biopaliwa Sp. z o.o.	43-502 Czechowice-Dziedzice	Instalacja do produkcji estrów metylowych	113,25
Komers International Franciszek Mądry	Goszyn, 83-010 Straszyn	Instalacja do produkcji bioetanolu	32,0
BIOAGRA S.A.	48-300 Nysa	Instalacja do produkcji bioetanolu (sita molekularne)	140,0