

**Energia odnawialna
w województwie
warmińsko-mazurskim**

Bartłomiej Igliński
Mateusz Skrzatek
Paweł Iwański
Krzysztof Krukowski

Energia odnawialna w województwie warmińsko-mazurskim

WYDAWNICTWO NAUKOWE
UNIWERSYTETU
MIKOŁAJA KOPERNIKA

Toruń 2020

Recenzent
Jerzy Gaca
Kazimierz Szymański

Opracowanie wydawnicze
Magdalena Szczepańska

Projekt okładki
Bartłomiej Iglński

Skład
Dariusz Żulewski

© Copyright by
Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika

ISBN 978-83-231-4485-4

WYDAWNICTWO NAUKOWE
UNIwersytetu MIKOŁAJA KOPERNIKA
Redakcja: Gagarina 5, 87-100 Toruń
tel. 56 611 42 95, fax 56 611 47 05
e-mail: wydawnictwo@umk.pl
www.wydawnictwo.umk.pl

Dystrybucja: ul. Mickiewicza 2/4, 87-100 Toruń
Tel./fax 56 611 42 38
e-mail: books@umk.pl

Druk:
Drukarnia Wydawnictwa Naukowego Uniwersytetu Mikołaja Kopernika

Spis treści

Wprowadzenie	9
Wybrane aspekty geograficzne województwa warmińsko-mazurskiego	13
Biomasa	19
1. Brykiety i pelety	22
2. Rośliny energetyczne	23
3. Biopaliwa ciekłe	26
4. Biogaz	27
5. Wykorzystanie biomasy na cele energetyczne na świecie	31
6. Wykorzystanie biomasy na cele energetyczne w Polsce	32
7. Przykłady wykorzystania biomasy na cele energetyczne w województwie warmińsko-mazurskim	33
8. Ilość energii z odpadowego drewna pozyskanego bezpośrednio z lasów i pośrednio z przemysłu drzewnego	49
9. Ilość energii z odpadowego drewna pozyskanego bezpośrednio z sadów	51
10. Ilość energii z nadwyżek słomy	52
11. Ilość energii z siana z nieużytkowanych łąk i pastwisk	53
12. Ilość energii z wierzby wiciowej uprawianej na gruntach ugorowanych i nieużytkach oraz 5% powierzchni uprawnej	54
13. Ilość energii z biogazu z odpadów rolniczych i spożywczych	56
13.1. Ilość energii z biogazu z gnojowicy zwierzęcej i pomiotu ptasiego	56
13.2. Ilość energii z biogazu składowiskowego	57
13.3. Ilość energii z biogazu na oczyszczalniach ścieków	58
13.4. Produkcja biogazu z odpadów biodegradowalnych z przemysłu rolno-spożywczego	59
14. Łączna ilość bioenergii	61
15. Analiza SWOT bioenergii	62
15.1. Mocne strony	64

15.2. Słabe strony	65
15.3. Szanse	66
15.4. Zagrożenia	67
Energetyka wodna	69
1. Hydroenergetyka na świecie	73
2. Hydroenergetyka w Polsce	74
3. Hydroenergetyka w województwie warmińsko-mazurskim	76
4. Ilość energii z hydroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim	84
5. Analiza SWOT hydroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim	86
5.1. Mocne strony	86
5.2. Słabe strony	87
5.3. Szanse	88
5.4. Zagrożenia	89
Energetyka wiatrowa	91
1. Aeroenergetyka na świecie	95
2. Aeroenergetyka w Polsce	96
3. Aeroenergetyka wiatrowa w województwie warmińsko-mazurskim ..	99
4. Ilość energii z aeroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim	102
4.1. Zabudowa mieszkalna wraz z buforem 2150 m	103
4.2. Formy ochrony przyrody i leśne kompleksy promocyjne wraz z buforem 2150 m	103
4.3. Lasy wraz z buforem 200 m	104
4.4. Wody powierzchniowe wraz z buforem 90 m	105
4.5. Infrastruktura wraz z buforem 90 m	105
4.6. Sumaryczny obszar dostępny dla rozwoju aeroenergetyki	106
4.7. Metodyka obliczania ilości energii z aeroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim	107
5. Analiza SWOT aeroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim	108
5.1. Mocne strony	109
5.2. Słabe strony	110
5.3. Szanse	111
5.4. Zagrożenia	111
Energetyka słoneczna	113
1. Energetyka słoneczna na świecie	114
2. Energetyka słoneczna w Polsce	116

3. Energetyka słoneczna w województwie warmińsko-mazurskim	118
4. Ilość energii z helioenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim	123
4.1. Dachy	123
4.2. Nieużytki	124
4.3. Drogi	124
5. Analiza SWOT helioenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim	125
5.1. Mocne strony	126
5.2. Słabe strony	127
5.3. Szanse	128
5.4. Zagrożenia	130
Energetyka geotermalna	131
1. Geotermia na świecie – stan aktualny	134
2. Geotermia w Polsce – stan aktualny	134
3. Geotermia w województwie warmińsko-mazurskim	136
4. Pompy ciepła w województwie warmińsko-mazurskim	137
5. Potencjał geotermii w województwie warmińsko-mazurskim	138
6. Ilość energii z pomp ciepła	139
6.1. Pompy ciepła w szkołach i przedszkolach	139
6.2. Pompy ciepła w obiektach noclegowych	140
6.3. Pompy ciepła w obiektach kultury	140
6.4. Pompy ciepła w kościołach	141
7. Analiza SWOT pomp ciepła w województwie warmińsko- mazurskim	141
7.1. Mocne strony	142
7.2. Słabe strony	143
7.3. Szanse	143
7.4. Zagrożenia	144
Perspektywy i podsumowanie	145
Literatura	149

Wprowadzenie

W XX w. zaludnienie globalne wzrosło trzykrotnie, natomiast zużycie paliw kopalnianych – aż dwudziestokrotnie. W sytuacji drastycznego zmniejszania się zasobów kopalnianych dąży się do wypracowania efektywnych metod pozyskiwania energii z zasobów odnawialnych, jakie stanowią: biomasa, Słońce, wiatr, woda czy naturalne ciepło Ziemi. Z tego też względu w ostatnich latach widoczny jest wzrost znaczenia energii elektrycznej i ciepła pochodzących ze źródeł odnawialnych (OZE), który stanowi istotny składnik w działaniach służących zapobieganiu globalnemu ociepleniu klimatu.

Energia jest jednym z najważniejszych czynników determinujących rozwój cywilizacyjny, każdy bowiem proces gospodarowania musi być zasilany energetycznie. Jednak nigdy wcześniej gospodarka i życie społeczne nie były od niej aż tak zależne. Nieprzerwana podaż energii jest niezbędną dla funkcjonowania współczesnej gospodarki, gospodarstw domowych, a w efekcie jakości życia. Jednocześnie jej produkcja z surowców kopalnianych stanowi największe źródło emisji zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych – GHG (Greenhouse Gases), przede wszystkim CO₂. To groźne antropogeniczne obciążenie biosfery prowadzi do zachwiania równowagi w przebiegu globalnych procesów przyrodniczych [1].

Rozwój odnawialnych źródeł energii wiąże się nie tylko z rozwojem technologii i redukcją emisji gazów cieplarnianych, ale przyczynia się także do tworzenia nowych miejsc pracy, zwanych *green jobs* (zielone stanowiska pracy). Czysta energia najczęściej bazuje na posiadanym potencjale energetycznym, dlatego też jest generowana i konsumowana w niedalekich odległościach. Daje to możliwości czerpania bezpośrednich lub po-

średnich korzyści samym konsumentom, ponieważ powstają nowe stanowiska pracy i likwidowany jest odpływ funduszy do krajów posiadających paliwa kopalne, np. Arabii Saudyjskiej czy Rosji [2].

Województwo warmińsko-mazurskie energię elektryczną częściowo kupuje z zewnątrz, płacąc najwyższe stawki w Polsce. Jest to spowodowane tym, że w województwie nie pracuje żadna elektrownia węglowa, więc cena energii wzrasta, gdyż doliczane są opłaty za przesył. Wysokie ceny energii w pewnym stopniu hamują rozwój gospodarczy regionu [3].

Jak wcześniej wspomniano, energia elektryczna płynie do województwa warmińsko-mazurskiego z odległych o setki kilometrów elektrowni. Wichury lub mokry śnieg bardzo często zrywają kable energetyczne, w wyniku czego do niektórych regionów przestaje dopływać prąd. Rozwiązaniem wcześniej wymienionych problemów jest szybszy rozwój własnej energetyki opartej na lokalnych źródłach energii, czyli na energetyce odnawialnej. Energetyka odnawialna to najczęściej niewielkie jednostki wytwórcze zlokalizowane blisko odbiorcy, co pozwala na podniesienie lokalnego bezpieczeństwa energetycznego oraz zmniejszenie strat przesyłowych. Wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych cechuje się niewielką lub zerową emisją zanieczyszczeń, co zapewnia pozytywne efekty ekologiczne.

Rozwój OZE sprzyja zdecentralizowanemu społeczeństwu, zasilanemu siecią mniejszych i bezpieczniejszych elektrowni, i wzmocnieniu społeczności lokalnych. Dziś pieniądze na zakup paliw i prądu wypływają ze wsi szerokim strumieniem, zubożając ją. Rozwój OZE sprawia, że to mieszkańcy wsi będą beneficjentami – to oni będą dostarczać odpady do biogazowni, a niektórzy znajdą pracę w nowych zakładach. Własna produkcja energii poprawi też jakość infrastruktury i życia na wsi. Sieci energetyczne w rejonach wiejskich są często w fatalnym stanie i sytuacja ta się nie poprawia – koncerny energetyczne nie chcą tam inwestować, bo rozległa infrastruktura jest kosztowna, a odbiorców mało [3].

Zwiększenie udziału wykorzystania OZE w krajowej gospodarce energetycznej wpływa na wzrost bezpieczeństwa energetycznego państwa. Sprzyja też dywersyfikacji sektora energetycznego, zmniejszając uzależnienie od dostawców paliw kopalnych. Dzięki powszechności źródeł od-

nawialnych ten rodzaj energetyki może przyjmować formę rozproszoną i rozwiązywać problemy obszarów cierpiących na deficyt energii oraz tych, na których występują liczne przerwy w dostawach energii. Rozwój technologii przetwarzających odnawialne nośniki energii może w dalszej perspektywie doprowadzić do zmniejszenia kosztów produkcji energii.

Celem pracy było opisanie stanu aktualnego energetyki odnawialnej w województwie warmińsko-mazurskim, oszacowanie potencjału technicznego OZE, jak i perspektyw rozwoju.

Wybrane aspekty geograficzne województwa warmińsko-mazurskiego

Województwo warmińsko-mazurskie położone jest w północno-wschodniej części Polski, granicząc od północy z Rosją. Zajmuje powierzchnię 24 403 km², co stanowi 7,7% powierzchni Polski. W jego strukturach administracyjnych znajduje się 19 powiatów oraz dwa miasta na prawach powiatu (ryc. 1). Na szczeblu gminnym funkcjonuje 116 gmin oraz 49 miast. W województwie znajduje się 3875 miejscowości wiejskich, z czego 2303 pełnią funkcję sołectw. W 2019 r. województwo zamieszkiwało 1 425 967 osób, z czego większość w miastach z łączną liczbą 842 964 mieszkańców. Współczynnik gęstości ludności w 2018 r. wynosił 59 os./km² [4]. Siedzibą administracyjną głównych władz administracyjnych jest Olsztyn, który jest jednocześnie największym miastem w województwie. Oprócz niego do największych miast można zaliczyć Elbląg i Ełk. W granicach województwa znalazło się 116 gmin. W podziale terytorialnym według gmin 16 jednostek zostało sklasyfikowanych jako gminy miejskie. Strukturę gminną tworzą również jednostki wiejskie – 67 gmin, oraz miejsko-wiejskie – 33 gminy. W miastach obecnie zamieszkuje 60,2% ludności województwa [4].

Wybrane aspekty geograficzne województwa warmińsko-mazurskiego



Ryc. 1. Podział administracyjny województwa warmińsko-mazurskiego [6]

Rzeźba powierzchni obszaru województwa jest młoda i bardzo zróżnicowana. Powstała głównie w wyniku akumulacji i erozji ostatniego zlodowacenia oraz późniejszych procesów czwartorzędowych. Do podstawowych form krajobrazowych można zaliczyć morenę denną falistą, wzgórze moreny czołowej oraz sandry. Najwyższym wzniesieniem całego regionu jest leżąca w okolicach Lubawy Dylewska Góra (312 m n.p.m.), nieco niżej położona jest Góra Szeska (309 m n.p.m.). Znacznym urozmaiceniem rzeźby terenu są rynny polodowcowe, których obniżenia dochodzą do 40 m [7].

Klimat regionu plasuje się w strefie ścierania się frontów morskiego i lądowego. Średnia temperatura roczna wynosi $+7^{\circ}\text{C}$. W lipcu temperatura średnia wynosi 17°C , a w styczniu $-2,5^{\circ}\text{C}$. Ilość opadów w ciągu roku wynosi około 600 mm, najwięcej ich przypada na miesiące lipiec i sierpień, najmniej zaś na luty i maj. Okres zimowy trwa na tym obszarze od 80 do 100 dni. Lato jest krótsze niż na południu Polski i trwa od 70 do 80 dni. Wiosna mimo dużej zmienności pogody jest łagodna [7].

Gleby województwa powstały na utworach pochodzenia lodowcowego i wodnolodowcowego. W głównej mierze powstały na nich gleby bielcowe oraz płowe zaliczane do III i IV klasy użytkowej. Znaczne obszary zajmują również bielice zaliczane do słabych klas – V i VI. Gleby klasy II, czyli mady i czarne ziemie, występują w niewielkim areale głównie w dolinach rzecznych i obecnych nieckach jeziornych, w obrębie dawnych zbiorników wodnych [7].

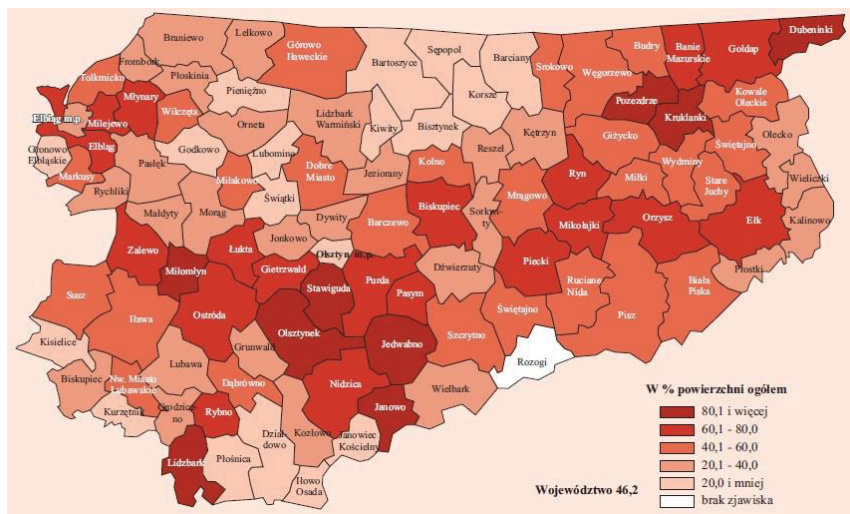
Województwo leży w dorzeczu Wisły i pojedynczych rzek pobraża Bałtyku. Do głównych rzek należy zaliczyć Pasłękę i Łynę na północy oraz płynącą w kierunku południowo-zachodnim Drwęcę. W województwie warmińsko-mazurskim znajduje się największa liczba jezior w całym kraju. Zajmują one około 5% powierzchni całego regionu. Do największych jezior należy zaliczyć Śniardwy o powierzchni $109,7\text{ km}^2$ oraz Mamry z powierzchnią $102,3\text{ km}^2$ [5,6].

Lasy na tym obszarze stanowią blisko 30% pokrycia terenu. Najsilniej zalesione są obszary południowo-wschodnie i centralne. W składzie drzewostanu przeważa sztucznie zasadzona sosna zwyczajna. Sam drzewostan został silnie przekształcony w XIX w. Do największych kompleksów leśnych należy zaliczyć Puszcze: Borecką, Napiwodzko-Ramucką, Nidzicką, Piską i Romincką oraz Lasy Iławskie [5,6].

Długość sieci wodociągowej rozdzielczej w województwie warmińsko-mazurskim w 2018 r. wynosiła 16 431 km. Pobór wody na skutek eksploatacji sieci wodociągowej wynosił 52,1% całości poboru, przy czym dotyczy to pomiaru przed wtłoczeniem do sieci [8]. Z kolei długość sieci kanalizacyjnej rozdzielczej wynosiła 7341 km. Długość sieci gazowej – 3293 km. Łączny kilometrów dróg publicznych o twardej nawierzchni wy-

nosił 13 843 km [4]. W 2018 r. było tam zarejestrowanych 1 030 456 sztuk samochodów [8].

W 2012 r. obszary chronione zajmowały powierzchnię 1 126 155 ha, czyli 46,6% obszaru całego województwa (ryc. 2). W województwie było osiem parków krajobrazowych, 110 rezerwatów przyrody, 71 obszarów chronionego krajobrazu, 2576 pomników przyrody, 297 użytków ekologicznych i 18 zespołów przyrodniczo-krajobrazowych [9].

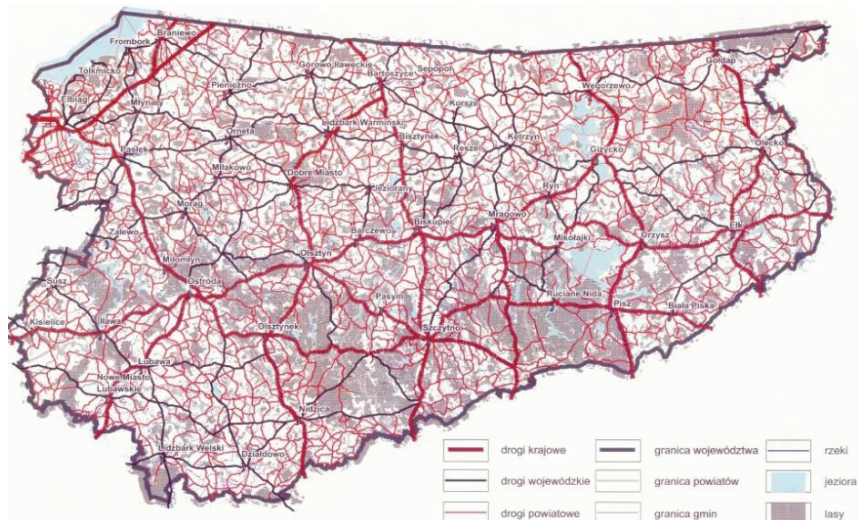


Ryc. 2. Udział powierzchni obszarów prawnie chronionych województwa według gmin [5,9]

W 2020 r. użytki rolne w dobrej kulturze rolnej w województwie wyniosły w sumie około 925 804 h. Można je podzielić na grunty orne (606 546 ha), pasze zielone na gruntach ornym (104 385 ha), łąki i pastwiska (314 379 ha), grunty ugorowane (10 737 ha), uprawy wieloletnie (4199 ha) oraz ogrody przydomowe (680 ha) [8].

Przez obszar województwa nie przebiegają drogi autostradowe, powstało za to sześć dróg ekspresowych. W województwie istnieje 12 dróg krajowych, oznaczonych numerami 7, 15, 16, 22, 51, 53, 54, 57, 58, 59, 63 i 65. Na obszarze tym funkcjonuje 51 dróg wojewódzkich o łącznej dłu-

gości 1870,250 km (ryc. 3). Transport kolejowy jest stosunkowo dobrze rozwinięty i łączy niemal wszystkie większe miasta.



Ryc. 3. Drogi województwa warmińsko-mazurskiego [5]

Biomasa

Przez biomasę rozumie się masę materii organicznej (substancje pochodzenia roślinnego i zwierzęcego). Do jej powstania niezbędna jest energia słoneczna, która dzięki procesowi fotosyntezy kumulowana jest w roślinach. Następnie jest ona przekazywana do organizmów zwierzęcych poprzez kolejne ogniwa łańcucha pokarmowego. Biomasa jako paliwo towarzyszy człowiekowi od samego początku. To właśnie ona służyła i nadal służy do ogrzewania, gotowania, pieczenia, odstraszenia zwierząt, a od około 120 lat również do produkcji energii elektrycznej. W wielu krajach świata biomasa jest podstawowym źródłem energii [10].

Najstarszą formą biomasy wykorzystywaną do celów energetycznych jest drewno, które było najczęściej używanym paliwem do czasu rewolucji przemysłowej, kiedy to zaczęto wykorzystywać na masową skalę węgiel kamienny [10].

Biomasę w kontekście energetycznym interpretuje się jako źródło energii pierwotnej, na które składają się wszelkie substancje pochodzenia roślinnego i/lub zwierzęcego ulegające biodegradacji i którego wykorzystanie w celach energetycznych nie jest ograniczone przepisami prawa (definicja zaproponowana przez Polską Izbę Gospodarczą Energii Odnawialnej). Traktowana jako nośnik energii, może być wykorzystywana zarówno w formie nieprzetworzonej, jak i po przejściu różnych procesów (fizycznych, biologicznych, chemicznych). Biomasa i produkty jej przetworzenia występują w trzech postaciach: stałej, ciekłej i gazowej [11].

Do biomasy stałej zalicza się: drewno niskiej jakości i odpady z obróbki drewna, rośliny energetyczne (wierzba wiciowa, rdest sachaliński, ślaziovec pensylwański, trawy i inne), produkty i odpady z rolnictwa oraz

część odpadów komunalnych i przemysłowych. Wymienione wcześniej produkty po przekształceniu (wzbogaceniu, uszlachetnieniu) mogą przyjmować formy brykietu czy peletu z biomasy [10].

Szerokie zastosowanie mają biopaliwa ciekłe wykorzystywane do zasilania silników spalinowych. Biopaliwa te klasyfikuje się jako biopaliwa I, II i III generacji. Biopaliwa I generacji powstają z materii organicznej wykorzystywanej do produkcji żywności lub pasz, takich jak: ziemniaki, rzepak, kukurydza i trzcina cukrowa. Zalicza się do nich alkohole (głównie biometanol i bioetanol) oraz biodiesel. Biopaliwa drugiej generacji są pochodną przetworzonych produktów celulozowych, do których zalicza się drewno, słomę i rośliny wieloletnie. Najbardziej zaawansowana technologicznie jest metoda pozyskiwania energii z surowców energetycznych z alg [12].

Biomasa jest uznawana za paliwo niepowodujące emisji ditlenku węgla. Takie przeświadczenie podyktowane jest tym, że emisję podczas spalania biomasy równoważy pochłanianie ditlenku węgla podczas wzrostu roślin. Dlatego bilans ekologiczny określany jest jako zerowy. Kolejnym argumentem za wykorzystaniem biomasy do celów energetycznych jest użyteczność wykorzystania terenów uznawanych do tej pory za nieużytki. Produkcja biopaliw płynnych zmniejsza uzależnienie od ropy naftowej i jej importu. Do negatywnych zjawisk zalicza się emisję gazów cieplarnianych podczas przetwarzania biomasy oraz jej przewozu na znaczne odległości. Negatywnie oceniane jest karczowanie lasów pod uprawy energetyczne. Zagrożeniem może być również produkcja na cele energetyczne kosztem produkcji żywnościowej, która skutkować będzie wyższymi cenami żywności oraz zmniejszeniem bioróżnorodności w wyniku stosowania upraw jednego rodzaju [10].

Raporty European Environment Agency pokazują, że zasoby biomasy w Europie są bardzo duże. W przypadku biomasy leśnej znaczne zasoby występują w krajach skandynawskich, nadbałtyckich i w Niemczech. Porównanie zasobów bioenergii krajów członkowskich UE w 2010, 2020 i 2030 roku [13] stawia Polskę jako jednego z głównych producentów obok Niemiec, Francji i Hiszpanii. Należy więc w większym stopniu wykorzystywać polskie zasoby biomasy.

Jedną z możliwości gospodarczego zastosowania drewna jest jego spalanie w celu uzyskania energii (głównie ciepła). Na opał należy przeznaczać tylko drewno niskiej jakości (wadliwe), trociny i część innych odpadów obróbki przemysłowej. Szacuje się, że odpady drewniane stanowią do 60%, a produkt finalny (np. biurko) to 40% biomasy wyciętych drzew [10]. Na rycinie 4 przedstawiono trociny drewniane powstające podczas obróbki drewna w tartaku (Cierpice k. Torunia). Trociny te z powodzeniem można wykorzystać na cele energetyczne bezpośrednio lub zrobić z nich pelety/brykiety.



Ryc. 4. Odpady powstające w tartaku (fot. B. Igliński)

Wykorzystanie bioenergii można podzielić na dwie główne kategorie: „tradycyjne” i „nowoczesne”. Tradycyjne zastosowanie dotyczy spalania biomasy w takich postaciach jak drewno, odpady zwierzęce i tradycyjny węgiel drzewny. Nowoczesne technologie bioenergetyczne obejmują biopaliwa płynne wytwarzane z wycieczyny z trzciny cukrowej i innych

roślin; biorafinerie; biogaz powstały w wyniku beztlenowego rozkładu pozostałości; systemy ogrzewania na pelet drzewny; inne technologie [10].

1. Brykiety i pelety

Surowce pochodzenia roślinnego, poddawane procesowi brykietowania (ryc. 5) zawierają 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. żelowaniu skrobi, kleikowaniu białka, stapianiu 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 [14].



Ryc. 5. Brykiety z biomasy (fot. B. Igliński; zdjęcie wykonane na 7. Międzynarodowych Targach Urzędzeń, Technologii do Wytwarzania i Zastosowania Peletu i Brykietu „PELETS-EXPO & BRYKIET-EXPO”, 24–26 czerwca 2009 w Bydgoszczy)

Niska wilgotność sprawia, że wartość opałowa brykietów jest wyższa niż drewna i dwukrotnie wyższa niż węgla brunatnego. Dzięki dużemu zagęszczeniu materiału w stosunku do objętości proces spalania jest stopniowy i powolny. Z kolei biomasa sprasowana do małych granulek o kształcie cylindrycznym o średnicy 6-25 mm i długości do kilku cm nazywa się pelety.

Zalety brykietów i peletów to:

- duża gęstość – łatwość przechowywania i dystrybucji,
- niemal zamknięty obieg CO₂,
- brak emisji metali ciężkich,
- 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 może być wykorzystany jako nawóz ogrodniczy,
- szerokie spektrum zastosowania: w kotłowniach indywidualnych, kotłowniach zasilających sieci grzewcze, kominkach [10].

2. Rośliny energetyczne

Na wstępie należy zaznaczyć, że pojęcie „rośliny energetyczne” 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 [15].

Rośliny energetyczne charakteryzują się dużym przyrostem rocznym, wysoką wartością opałową, znaczną odpornością na choroby i szkodniki oraz stosunkowo niewielkimi wymaganiami glebowymi.

Niezwyczajnie istotną sprawą jest również możliwość mechanizacji prac agrotechnicznych związanych z zakładaniem plantacji oraz zbieraniem plonu [16].

W Europie miskant olbrzymi uprawiany jest od około 60 lat, początkowo jako roślina ozdobna, a od kilkunastu lat na plantacjach energetycznych. 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 [16]. 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 (ryc. 6). Już w pierwszym roku uprawy z 1 ha powierzchni można uzyskać do 8 ton suchej masy, ale dopiero w trzecim roku miskant osiąga najwyższe plony – nawet powyżej 30 ton suchej masy na hektar (s.m./ha) [17].

Topinambur (słonecznik bulwiasty) (*Helianthus tuberosus*) jest byliną pochodzącą z Ameryki Północnej, dorastającą do 4 m wysokości [17]. 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 peletu. Wysoki potencjał plonowania (średnio 10–16 ton 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 [18]. Czyli prowadzi się „2 w 1” – produkcję biomasy i rekultywację terenów zdegradowanych [19].



Ryc. 6. Plantacja miskanta, okolice Grudziądza (fot. B. Igliński)

Spośród roślin energetycznych największym zainteresowaniem cieszy się wierzba „energetyczna” (*Salix viminalis* L.) Wierzbę można uprawiać na wielu rodzajach gleb, od bielicowych gleb piaszczystych do gleb organicznych. Zbiory wierzby wiciowej 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%, a po przesuszeniu wiosną i latem w przewiewnym miejscu zaledwie 15% [20].

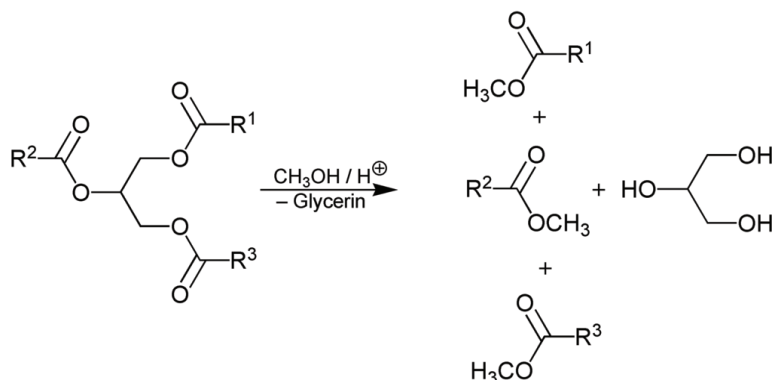
3. Biopaliwa ciekłe

Etanol (bioetanol, alkohol etylowy) o wzorze C_2H_5OH znany jest od zarania dziejów człowieka. Mieszanina 95,6% etanolu z wodą popularnie nazywana jest spirytusem [21]. Jest to mieszanina azeotropowa, z której nie można przez prostą destylację uzyskać etanolu 100%-owego (nazywanego alkoholem absolutnym).

Fermentacja alkoholowa 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 [22].

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 [23]. Rozwiązaniem tego problemu jest skrócenie łańcucha węglowego – kraking termiczny i katalityczny, elektroliza i metoda transestryfikacji (ryc. 7). 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:

- estryfikacja oleju rzepakowego,
- rozdzielenie produktów estryfikacji,
- oddestylowanie metanolu,
- oczyszczanie estru [24].



Ryc. 7. Reakcja transestryfikacji

4. Biogaz

Biomasa ulega rozkładowi w obecności tlenu lub w warunkach beztlenowych. Jest to naturalny obieg materii w przyrodzie. W wyniku fermentacji beztlenowej (tu metanowej) biomasy powstaje biogaz [26].

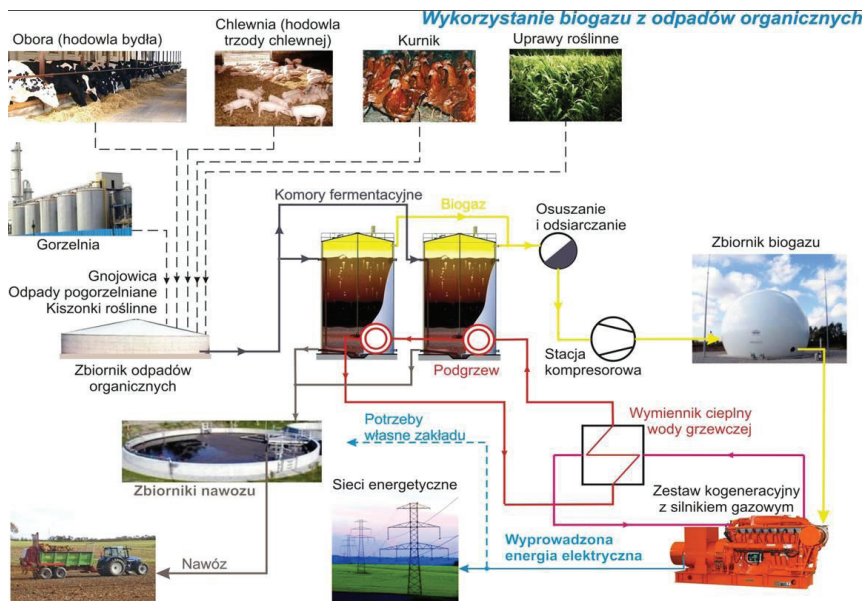
Fermentacja metanowa jest procesem złożonym z ciągu występujących kolejno po sobie przemian chemicznych katalizowanych przez układy biologiczne (ryc. 8). Przemiany te mogą być współbieżne. Polegają one głównie na tym, że następuje depolimeryzacja polimerów naturalnych przez takie organizmy anaerobowe, jak: *Clostridium*, *Fibrobacter*, *Bacteroides* i *Ruminococcus*, które z kolei w etapie kwaso-, aceto- i metanogenezy są przekształcane w metan [26].

W zależności od warunków prowadzenia fermentacji oraz od substratów z jednego grama substancji organicznych można uzyskać do 500 cm³ biogazu. Głównymi składnikami biogazu są: metan (40–80%), ditlenek węgla (20–55%), siarkowodór (0–5%) oraz wodór, tlenek węgla, azot i tlen w ilościach śladowych [26].

Schemat typowej biogazowni rolniczej w Polsce przedstawiono na rysunku 9 [27].



Ryc. 8. Etapy fermentacji metanowej

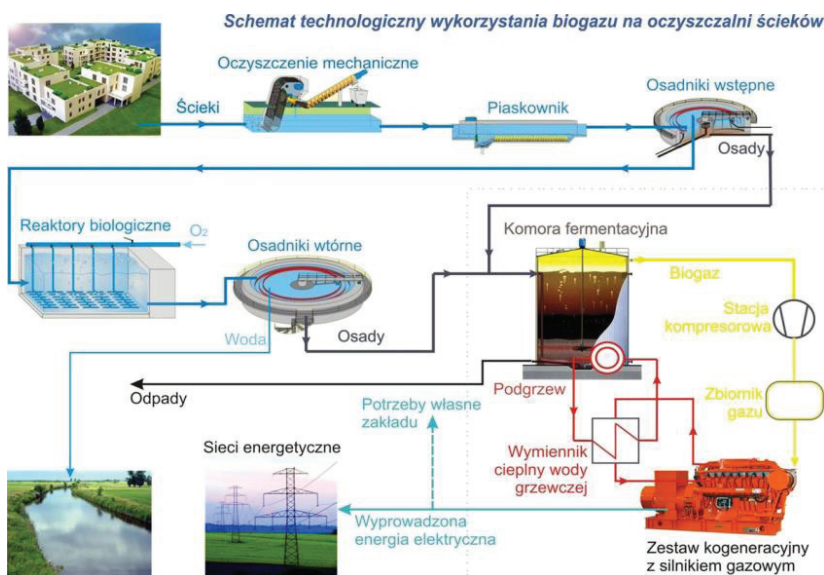


Ryc. 9. Schemat produkcji biogazu z odpadów rolniczych (autor: Z. Wyszogrodzki)

W Polsce, podobnie jak w całej Europie, prowadzi się głównie fermentację mezofilową (temp. 32–42°C), jedynie w biogazowni rolniczej w Mełnie biogaz otrzymywany jest w wyniku fermentacji termofilowej (50–57°C). Z biogazu można pozyskać:

- energię elektryczną w silnikach iskrowych lub turbinach,
- ciepło – w kotłach gazowych,
- energię elektryczną i ciepło – w agregatach kogeneracyjnych, służących do skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, co jest najpowszechniejszą (i praktycznie jedyną) metodą energetycznego wykorzystania biogazu w Polsce [28].

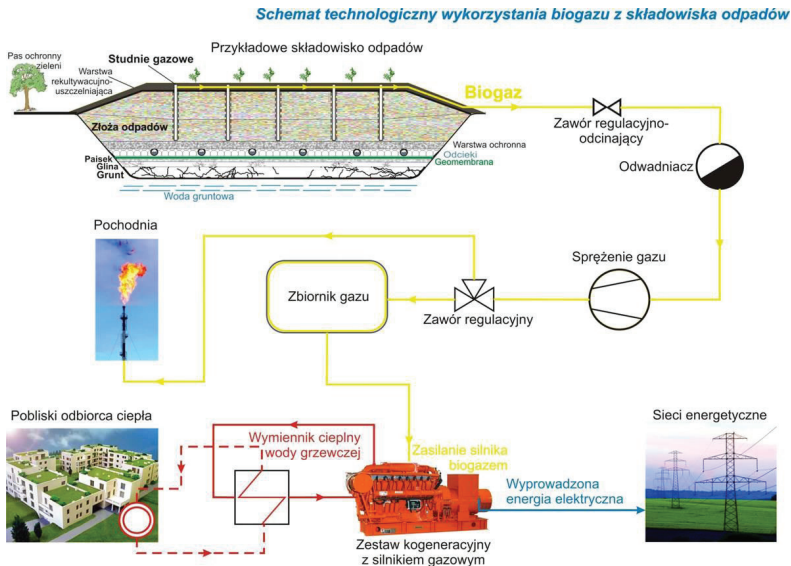
Zastosowanie agregatu do skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła zapewnia wyższą sprawność całego układu, pozwalając na produkcję energii w sposób bardziej ekonomiczny. Sprawność pozyskania energii elektrycznej w najnowszych agregatach mieści się w granicach 35–40%, a sprawność odzysku ciepła wynosi 40–45%, co pozwala na uzyskanie całkowitej sprawności wykorzystania paliwa rzędu 75–85% [29].



Ryc. 10. Schemat produkcji energii w biogazowni przy oczyszczalni ścieków (autor: Z. Wyszogrodzki)

W Polsce działa około 1700 oczyszczalni przemysłowych i około 1500 oczyszczalni komunalnych, co oznacza, że jest duży potencjał produkcji biogazu z osadów ściekowych [30]. Na rycinie 10 przedstawiono schemat technologiczny wykorzystania biogazu w oczyszczalni ścieków.

Odgazowanie składowisk odpadów komunalnych jest czynnikiem zmniejszającym zagrożenie ludzi i środowiska. Główny składnik tej mieszaniny, metan, jest gazem łatwopalnym i wybuchowym, na dodatek mającym bardzo duży wpływ na pogłębianie efektu cieplarnianego i niszczenie powłoki ozonowej. Z punktu widzenia przeciwdziałania zagrożeniom efektywnym sposobem ich uniknięcia jest odbiór biogazu i jego wykorzystanie do celów energetycznych lub tylko spalanie. Realizuje się to w sposób aktywny, przy zastosowaniu podciśnienia panującego w złożu (ryc. 11). Przy odpowiednio dobranych parametrach spalania praktycznie istnieje możliwość przetworzenia wszystkich związków organicznych w ditlenek węgla i uzyskania produktów spalania zawierających bardzo małe ilości takich zanieczyszczeń jak tlenek węgla, tlenki azotu i ditlenek siarki [31].



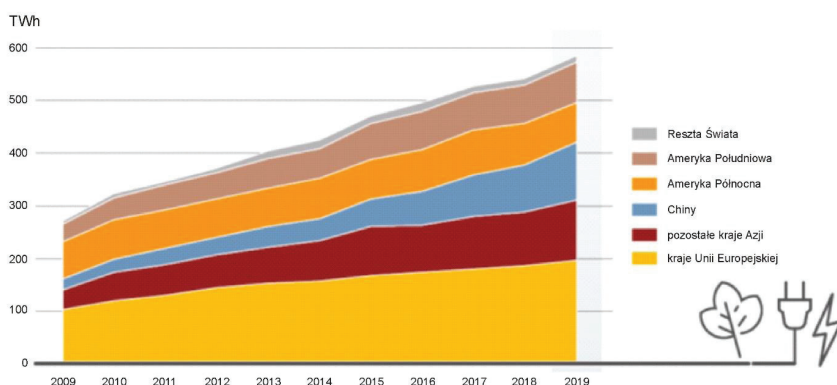
Ryc. 11. Schemat produkcji energii w biogazowni składowiskowej (autor: Z. Wyszogrodzki)

5. Wykorzystanie biomasy na cele energetyczne na świecie

Na świecie biomasa odgrywa decydującą rolę – jest wykorzystywana do produkcji prądu, ciepła, jak i w transporcie. W 2018 r. było to 45,2 EJ (eksadżula, $1 \text{ EJ} = 10^{18} \text{ J}$) [32].

Moc bioelektrowni wzrosła w 2019 r. o około 6%, z 131 do 139 GW. Najwięcej elektrowni biomasowych pracuje w Chinach, Brazylii, Indiach, Niemczech, UK, Szwecji i Japonii [32].

Łączna produkcja energii elektrycznej z biomasy wzrosła do 591 TWh w 2019 r. (ryc. 12).



Ryc. 12. Produkcja energii elektrycznej z biomasy na świecie [32]

Do produkcji ciepła dla przemysłu i rolnictwa wykorzystywane jest 8,9 EJ z biomasy. Biomasę zagospodarowuje głównie branża papiernicza, meblarska oraz żywnościowa – to one wykorzystują odpadową biomasę na cele energetyczne [32].

Nowoczesne pozyskiwanie energii z biomasy to około 19 EJ, z czego 13,6 EJ spożytkowane jest na cele grzewcze, 3,7 EJ na transport, a 1,7 EJ na produkcję prądu [32].

Globalna produkcja biopaliw płynnych wzrosła w 2019 r. o 5%, do 161 miliardów litrów (równowartość 4 EJ). Stany Zjednoczone pozostały

wiodącym producentem, z 41% udziałem, kolejni najwięksi producenci to Brazylia (26%), a w dalszej kolejności Indonezja (4,5%), Chiny (2,9%) i Niemcy (2,8%) [32].

Biometan jest wykorzystywany jako paliwo transportowe głównie w Europie i w USA, które są największym producentem i użytkownikiem biometanu do transportu. Produkcja w USA przyspieszyła od 2015 r., kiedy biometan został po raz pierwszy włączony do kategorii biopaliw celulozowych amerykańskiej energii odnawialnej. W Europie zużycie biometanu w transporcie wzrosło w 2018 r. o 20% (najnowsze dostępne dane), do 8,2 PJ (petadżula, 1 PJ = 10^{18} J). Szwecja pozostaje największym konsumentem biometanu w regionie, z którego korzysta prawie 60% transportu ogółem, a następnie Niemcy i Norwegia, gdzie zużycie paliwa wzrosło czterokrotnie, do 0,6 PJ w 2018 r. [32].

6. Wykorzystanie biomasy na cele energetyczne w Polsce

Rynek biomasy, zarówno w Polsce, jak i w województwie warmińsko-mazurskim, jest w fazie postępującego rozwoju. Biomasa, głównie odpadowe drewno, słoma, pelety i brykiety wykorzystywane są na coraz większą skalę zarówno w domowych kotłowniach, jak i do spalania w elektrociepłowniach i dużych elektrowniach. Polska ma jeden z największych potencjałów bioenergii w Europie. Wykorzystanie jej w większym stopniu zapewni Polsce bezpieczeństwo energetyczne [33].

Na koniec 2019 r. pracowało w Polsce 38 elektrowni na biomasę o łącznej mocy powyżej 1,1 GW, a 20 elektrowni współspalało biomasę [34].

Według danych Agencji Rynku Rolnego z 1 lipca 2020 r., 14 zakładów produkowało bioetanol o łącznej objętości 838,4 mln dm^3 , 10 zakładów produkowało biodiesel o łącznej objętości 1520,67 mln dm^3 , sześć zakładów wytwarzało inne biopaliwa w ilości 265 mln dm^3 rocznie [35].

Na koniec 2019 r. działało w Polsce około 300 dużych biogazowni o łącznej mocy ponad 220 MW [34].

7. Przykłady wykorzystania biomasy na cele energetyczne w województwie warmińsko-mazurskim

W województwie warmińsko-mazurskim działają trzy elektrownie na biomasę o łącznej mocy 26,044 MW [34].

Według danych Agencji Rynku Rolnego z 1 lipca 2020 r., w województwie warmińsko-mazurskim, a dokładniej w Olecku znajduje się zakład wytwarzający bioetanol w ilości 16 mln dm³ [35].

Pierwsza biogazownia rolnicza w województwie warmińsko-mazurskim została uruchomiona w 2012 r. Początkowo miała moc elektryczną 1 MW, która została zwiększona do 2 MW [34].

Obecnie (stan na czerwiec 2020 r.) pracuje 13 biogazowni rolniczych o łącznej mocy 26,06 MW [36] (według danych URE z końca 2019 r. – 10 biogazowni rolniczych o łącznej mocy 9,469 MW [34]).

Gmina Łukta jako pierwsza w województwie zmodernizowała wyeksploatowaną kotłownię węglową, zmieniając ją na nowoczesną kotłownię na biomasę, dostarczającą ciepło i podgrzaną wodę do osiedla bloków mieszkalnych przy ul. Słonecznej, bloku szkolnego przy ul. Warszawskiej oraz Zespołu Szkolno-Przedszkolnego i ośrodka zdrowia. Modernizacja polegała na montażu dwóch kotłów wodnych, pierwszy typu C150 DH o mocy cieplnej = 1,5 MW (5,4 GJ/h) i sprawności energetycznej 83%, drugi mniejszy kocioł o mocy 0,5 MW (1,8 GJ/h) i sprawności energetycznej 80%, oraz wybudowaniu sieci przesyłowej o łącznej długości 650 mb i siedem sztuk węzłów cieplnych, w których następuje przemiana jakościowa. Łącznie z modernizacją kotłowni wymieniona i dobudowana została sieć przesyłowa. W obiektach zaopatrywanych w ciepło przez Zakład Gospodarki Komunalnej wybudowano nowoczesne, kompaktowe węzły cieplne odpowiednio reagujące na temperaturę zewnętrzną [37].

Ciepłownia miejska w Piszku o mocy 21 MW, spalająca biomasę, uruchomiona w 2003 r., wytwarza ciepło na cele centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej miasta. Wyposażenie obiektu stanowią trzy kotły typu VRF 6000 o mocy nominalnej 6 MW każdy oraz jeden kocioł typu VRF 3000 o mocy 3 MW. Kotły, przystosowane do spalania biomasy

w postaci zrębków drzewnych i kory, są produkcji szwajcarskiej firmy Polytechnik.

Odpadowe zrębki dostarczane są do ciepłowni Pisz przez liczne w tamtym regionie tartaki (ryc. 13), odpadowa biomasa zaś, głównie gałęziowa (ryc. 14), przez służby miejskie (przycinki drzew), jak i przez okolicznych mieszkańców. Prezentowane na rycinach ilości biomasy pozwolą na funkcjonowanie ciepłowni przez najbliższe pół roku.



Ryc. 13. Odpadowe zrębki zmagazynowane na terenie PEC Pisz (fot. B. Igliński)

W Piszu kotły wyposażono w specjalne rozwiązania techniczne ograniczające emisje ze spalania drewna. Emisje pyłów ograniczane są poprzez odpylacze multicyklonowe zamontowane za każdym kotłem. Spaliny są odprowadzane do atmosfery indywidualnymi kominami o wysokości 28 m n.p.t. [38].



Ryc. 14. Odpadowa biomasa gałęziowa zmagazynowana na terenie PEC Pisz (fot. B. Igliński)

Ciepłownia w Piszcu wyposażona jest w instalację uzdatniania i uzupełniania wody, instalację podawania paliwa do kotłów oraz instalację odprowadzania popiołu. Ciepłownia eksploatowana jest praktycznie przez cały rok ze zmiennym obciążeniem cieplnym, uzależnionym od zewnętrznych warunków pogodowych i zapotrzebowania na ciepłą wodę użytkową. W okresie grzewczym w ekstremalnych warunkach pracują wszystkie kotły, natomiast w okresie pozagrzewczym jeden kocioł o mocy 3 MW na potrzeby ciepłej wody użytkowej [38].

Spalanie biomasy wiąże się z powstawaniem niewielkiej ilości popiołu (0,5% masy), co więcej popiół ten można nazwać bionawozem, gdyż zawiera znaczne ilości wapnia, magnezu, fosforu i potasu (tab. 1). Popiół ten może znaleźć zastosowanie do nawożenia kompleksów leśnych czy upraw roślin energetycznych.

Tabela 1. Skład chemiczny popiołu z biomasy (dzięki uprzejmości PEC Sp. z o.o. w Pisz)u)

Pierwiastek	Oznaczony jako	Jednostka	Wynik
Żelazo	Fe ₂ O ₃	%	1,25 ±0,07
Glin	Al ₂ O ₃	%	3,15 ±0,29
Wapń	CaO	%	28,1 ±1,42
Magnez	MgO	%	2,17 ±0,11
Fosfor	P ₂ O ₅	%	2,02 ±0,15
Potas	K ₂ O	%	5,26 ±0,73
Nikiel	Ni	ppm	7,33 ±0,77
Chrom	Cr	ppm	16,7 ±3,09
Kadm	Cd	ppm	3,16 ±0,59
Węgiel	C	%	2,90 ±0,15
Wodór	H	%	0,13 ±0,01
Azot	N	%	0,16 ±0,01
Siarka	S	%	0,38 ±0,02

Wybudowana w latach 2002–2003 miejska kotłownia we Fromborku, opalana słomą, o mocy 6,5 MW była na ówczesne możliwości obiektem nowoczesnym, gromadzącym wieloletnie doświadczenia w budowie i eksploatacji kotłowni na słomę w Polsce [39]. Zainstalowano w niej dwa kotły o mocy 2,5 MW i jeden kocioł 1,5 MW. Dodatkowo została wykonana nowa sieć ciepłownicza z rur preizolowanych, zainstalowano 69 nowoczesnych węzłów ciepłowniczych, zakupiono sprzęt do transportu i załadunku opału. Ponaddwunastoletnia praca doprowa-

dziła do wyeksploatowania istniejących urządzeń, które coraz częściej ulegały awariom. Po kolejnej z nich, w maju 2015 r., władze Fromborka podjęły decyzję o zaniechaniu dalszych remontów i wymianie jednego z dużych kotłów na nowy. Decyzja nie była łatwa z uwagi na koszt przedsięwzięcia, szacowany na 1,4 mln zł, ale uznano, że dotychczasowa polityka remontowa zupełnie się nie sprawdziła i nie było ich stać na kolejny cząstkowy remont za kilkaset tysięcy zł. W miejsce uszkodzonego kotła, opierając się na dotychczasowych doświadczeniach eksploatacyjnych, zainstalowano opalany biomasą, nowoczesny kocioł wodny o mocy 3,0 MW. Gotowość do podania ciepła kocioł osiągnął tuż przed świętami Bożego Narodzenia, natomiast końcowy odbiór prac nastąpił 15 lutego 2016 r. Koszt przedsięwzięcia wyniósł 1 420 650 zł, na które pozyskano preferencyjną pożyczkę z wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Olsztynie [39].

Spółka MPEC z Olsztyna, która zaopatruje w ciepło ponad 60% odbiorców w mieście, zakupiła kocioł grzewczy o mocy 25 MW, spalający biomasę w postaci leśnej zębki drzewnej o wartości opałowej 8–12 MJ/kg, wyposażony w system zmniejszania objętości NO_x w gazach wylotowych (poniżej 300 mg/Nm³), oparty na metodzie SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction). Uruchomienie kotła nastąpiło w maju 2019 r. W należącej do MPEC Olsztyn ciepłowni Kortowo pracuje pięć kotłów WR-25, w tym dwa zmodernizowane (technologia ścian szczelnych), przystosowane do współspalania biomasy [40].

Budynek Zespołu Szkół Samorządowych w Ełku dostosowany został do wykorzystywania biomasy – zainstalowane tam zostały specjalne kotły na biomasę pełniące funkcję źródła centralnego ogrzewania. Co więcej, poprawiono charakterystykę energetyczną obiektu oraz przeprowadzono modernizację instalacji wewnętrznych. Wykonane także zostały nowe instalacje wodociągowe, nawiewowo-wywiewne w pomieszczeniach: sali gimnastycznej, szatni i łazienek, zaplecza sanitarnego sali, stołówki szkolnej oraz kuchni [41].

Do roku 1995 Dom Pomocy Społecznej „Tęczowy Dom” w Ełku ogrzewany był przez dwie lokalne kotłownie węglowe. W latach 1995–1996 wykonano częściową modernizację kotłowni. Stalowe kotły

wodne opalane węglem zastąpiono dwoma kotłami olejowymi o łącznej mocy 1,19 MW. Stare kotły węglowe nie zostały jednak całkowicie zdemontowane. Wobec radykalnego wzrostu cen oleju opałowego w roku 2003 rozważano powrót do opalania węglem. Jako alternatywę przyjęto modernizację systemu grzewczego polegającą na zredukowaniu mocy kotłowni dzięki termorenowacji budynku oraz na wykorzystaniu alternatywnych źródeł energii. Inwestycja realizowana była od grudnia 2003 do stycznia 2005 r. Wiata o powierzchni 250 m² służy jako magazyn biomasy. Zamontowano dwa kotły wielopaliwowe firmy UNIVEX o mocy nominalnej $Q_1 = 300$ kW każdy, współpracujące z automatycznym zespołem podawania paliwa (ruchoma podłoga, system podajników ślimakowych). W kotłach spalane są kawałowe odpady drzewne, zrębki drzewne oraz trociny. Docelowo istotnym źródłem spalanej biomasy mają być zrębki wierzby energetycznej z własnej plantacji [42].

W roku 2005 w Zespole Szkół nr 1 w Ełku przeprowadzono inwestycję pod nazwą „Modernizacja systemu grzewczego w Zespole Szkół nr 1 w Ełku”. Inwestycja ta polegała na budowie nowej kotłowni oraz ociepleniu budynku szkoły w celu uniknięcia strat ciepła. Starą szkolną kotłownię zastąpiono nową, opalaną zrębkami drzewnymi. Docelowe zapotrzebowanie mocy wynosi $q = 567,5$ kW. Instalacja została zlokalizowana w obrębie istniejącego budynku kotłowni. Ciepło jest dostarczane za pośrednictwem wewnętrznej instalacji cieplnej, która została wykonana jako rurociągi preizolowane. Źródło ciepła stanowią dwie jednostki kotłowe o mocy nominalnej 2×300 kW. Wszystkie jednostki kotłowe przystosowane są do spalania trocin i zrębków drewna o wilgotności do 50% oraz drewna kawałkowego o wymiarach 0,6–1,0 m, co znacząco obniżyło emisje (tab. 2). System zabezpiecza moc kotłowni 600 kW przy paliwie o wilgotności 50%. Kotłownia wyposażona została w stację uzdatniania wody o wydajności około 1 m³/h [43].

Tabela 2. Emisje do powietrza przed i po wprowadzeniu kotłów na biomasę w ZS nr 1 w Ełku [43]

Substancja	Jednostka	Emisja przed realizacją	Emisja po realizacji	Zmiana [%]
SO ₂	Mg/rok	9,7	0,07	99
NO _x (w przeliczeniu na NO ₂)		3,4	0,15	96
CO		22,1	1,72	92
CO ₂		1496,3	0	100
Pyły		10,9	0,11	99

Mieszkańcy Elbląga są ogrzewani ekologicznym ciepłem powstającym z biomasy [44]. Instalacja powstała, by zastąpić część wyeksploatowanej infrastruktury produkcyjnej spółki. Ciepło, które dostarczane jest mieszkańcom miasta, powstaje w skojarzeniu (kogeneracji) z energią elektryczną, czyli w najbardziej efektywny sposób. Roczne zużycie biomasy szacuje się na około 135 tys. ton. Budowa bloku biomasowego pozwoliła spółce zwiększyć moce wytwórcze ciepła o 12% i energii elektrycznej o 50%. Taki sposób wytwarzania energii zapewnia wyższą sprawność niż produkowanie ciepła i prądu w oddzielnych instalacjach. Energa Kogeneracja dodatkowo ograniczyła emisję CO₂, ponieważ jako paliwo wykorzystuje biomasę rolniczą. Jej wykorzystanie daje niemal zerowy bilans emisji ditlenku węgla. Szacuje się, że blok biomasowy zmniejsza bilans emisji tego gazu o ponad 150 tys. ton rocznie w porównaniu do instalacji o podobnej mocy opalanej węglem kamiennym. Wykorzystanie biomasy rolniczej jako paliwa uruchamia naturalne zasoby energetyczne, które w innym wypadku pozostałyby niewykorzystane. Energa Kogeneracja, która rocznie zużywa około 135 tys. ton biomasy, tworzy naturalny popyt na ten surowiec. Projekt budowy bloku biomasowego w Elblągu został w części sfinansowany przez Unię Europejską ze środków Funduszu Spójności w ramach działania – 9.4 Wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych, priorytetu IX Infrastruktura energetyczna przyjazna środowisku i efek-

tywność energetyczna Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko 2007–2013 [44].

W Olsztynie pracuje biogazownia na oczyszczalni ścieków „Łyna”. W pierwszej kolejności osad kierowany jest do zamkniętych komór fermentacyjnych (ZKF), w których zachodzi fermentacja w obecności bakterii metanowych i saprofitycznych. Procesowi temu towarzyszy wydzielanie się biogazu, który jest zagospodarowywany na cele energetyczne. Po zakończeniu fermentacji metanowej osad kierowany jest do otwartych basenów fermentacyjnych (OBF), gdzie w warunkach tlenowych zachodzi dalsza fermentacja [45].

W biogazowni wytwarza się 6100 m³ biogazu na dobę, przy średnim przepływie 255 m³/h i maksymalnym przepływie 300 m³/h. Ciepło spalania biogazu wynosi 24,7 MJ/m³. Surowy gaz fermentacyjny wytworzony w ZKF poddawany jest odsiarczaniu w odsiarczalni wyposażonej w trzy odsiarczalniki, wykorzystujące metodę suchą na złożu rudy darniowej. Proces ten obniża zawartość siarkowodoru do ilości przewidywanej normą, tj. 0,013% objętości. Oczyszczony gaz gromadzony jest w powłokowym zbiorniku gazu o objętości $V = 1350 \text{ m}^3$, skąd za pomocą dmuchaw przetłaczany jest pod ciśnieniem $p = 25 \text{ kPa}$ do zakładowej sieci gazowej. Dmuchawy umożliwiają przetłoczenie 350 Nm³/h gazu. Z funkcjonowaniem oczyszczalni związane są pośrednio: kotłownia biogazowa o mocy $P = 2,16 \text{ MW}$ oraz zasilana biogazem siłownia elektryczna o mocy zainstalowanej generatorów $P = 700 \text{ kW}$. Wytworzony w ZKF biogaz jest używany do zasilania wyżej wymienionych obiektów, ewentualny zaś jego nadmiar jest spalany w pochodni gazowej, zlokalizowanej w pobliżu kotłowni. Wyposażona w trzy kotły gazowe, o mocy 720 kW każdy, kotłownia służy do wytworzenia ciepłej wody procesowej wykorzystywanej między innymi do podgrzewania osadu ściekowego, ciepłej wody użytkowej oraz do zasilania instalacji centralnego ogrzewania w budynkach oczyszczalni. Kotłownia zużywa 303,5 m³/h gazu przy zapotrzebowaniu na moc do celów grzewczych $P_{co} = 664,4 \text{ kW}$ i technologicznych $PT = 1000,6 \text{ kW}$ oraz stratach na sieci sięgających 15%. Funkcję siłowni elektrycznej pełnią trzy pracujące równolegle kogeneracyjne agregaty prądotwórcze, w tym dwa o mocy elektrycznej $P = 225 \text{ kW}$ oraz jeden o mocy

elektrycznej $P = 252$ kW. Przy równoczesnej pracy wszystkich trzech agregatów z mocą znamionową siłownia zużywa około $300 \text{ m}^3/\text{h}$ gazu. Przy osiągnięciu pełnej mocy elektrycznej agregaty zapewniają około 1000 kW mocy cieplnej, która może zostać przekazana do zakładowej sieci ciepłowniczej i tym samym odciążać pracę kotłowni lub – w przypadku braku zapotrzebowania na ciepło – zostać oddana do otoczenia poprzez system chłodnic zlokalizowanych w pobliżu agregatów. Równoczesny odbiór ciepła i energii elektrycznej zwiększa sprawność agregatów kogeneracyjnych, co obniża koszty eksploatacyjne oraz ma korzystny wpływ na środowisko naturalne [45].

W Nowej Wsi Elckiej (pow. elcki) biogaz powstający podczas fermentacji metanowej osadów wykorzystywany jest jako dodatkowe źródło energii elektrycznej i ciepła. Zamiana biogazu na energię odbywa się w kotłowni i w agregatorni. Kotłownia wyposażona jest w cztery kotły opalane biogazem, a otrzymane ciepło wykorzystuje się do ogrzewania osadów w komorach fermentacyjnych oraz na potrzeby socjalne oczyszczalni. Nadwyżki biogazu przetwarzane są obecnie na energię elektryczną, przy równoczesnym odzyskiwaniu ciepła za pomocą trzech jednostek kogeneracyjnych [46].

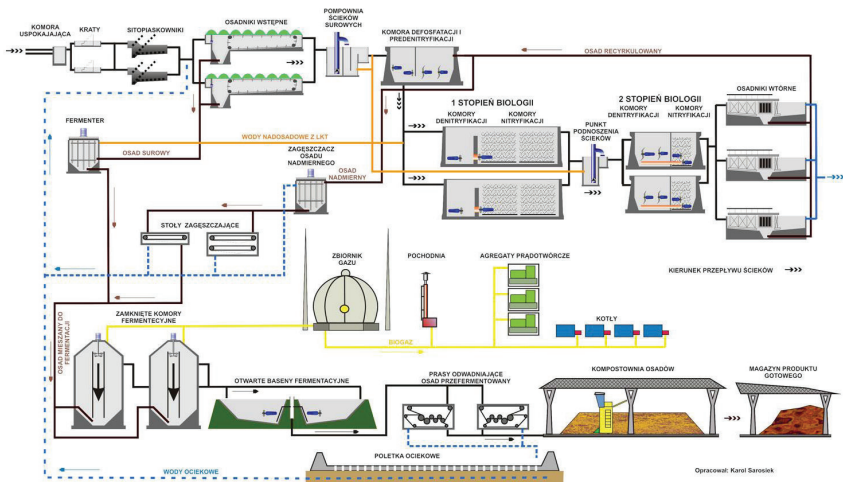
Produkcja biogazu średnio to około $3 \text{ tys. m}^3/\text{dobę}$. Urządzenia techniczne biorące udział w gospodarce cieplnej i energetycznej:

- Zbiornik gazu (ryc. 15) – zbiornik suchy z podwójną powłoką typu B9 120 firmy SATTLER o pojemności użytkowej 780 m^3 i maksymalnym napływie i odpływie gazu $200 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Agregaty prądotwórcze:
 - 2 agregaty prądotwórcze typu HE-SEC 190/244 firmy HORUS Energia o mocy elektrycznej 190 kW i mocy cieplnej 244 kW ,
 - agregat prądotwórczy typu HE-MG124-B firmy HORUS Energia o mocy elektrycznej 123 kW i mocy cieplnej 210 kW [46].



Ryc. 15. Instalacja do energetycznego wykorzystania biogazu z oczyszczalni ścieków w Nowej Wsi Ełckiej, PWiK w Ełku [47]

Schemat technologiczny oczyszczalni ścieków w Nowej Wsi Ełckiej przedstawiono na rycinie 16.



Ryc. 16. Schemat technologiczny oczyszczalni ścieków w Nowej Wsi Ełckiej (opr. K. Sarosiek [48])

W Iławie przeprowadzono modernizację stacji zagęszczania osadów (zakup nowego urządzenia do zagęszczania osadów) oraz kolejnego agregatu kogeneracyjnego wykorzystującego biogaz do produkcji energii elektrycznej i ciepła [49]. Obecnie oczyszczalnia posiada trzy jednostki kogeneracyjne o łącznej mocy 0,69 MW. W ramach projektu rozbudowano także słoneczną suszarnię osadów pościekowych, dostawiając drugą halę, oraz uruchomiono monitoring on-line i Nadrzędny System Sterowania. Przed wybudowaniem słonecznej suszarni funkcjonowały tzw. poletka ociekowe, gdzie proces suszenia osadów był żmudny, pracochłonny i mało efektywny. Za wyborem słonecznego suszenia osadów przemawiały argumenty natury ekonomicznej i ekologicznej. Dla zwiększenia efektywności suszenia wykorzystuje się pompę ciepła oraz ciepło odpadowe ze spalania biogazu w agregacie kogeneracyjnym. Celem tego procesu jest zmniejszenie masy końcowej osadu, z czym wiąże się większa ekonomia transportu i magazynowania. Dodatkowo w wyniku suszenia jako produkt końcowy uzyskuje się wysuszony, ustabilizowany biologicznie, neutralny zapachowo i łatwy do przechowywania susz osadowy. Po wykonaniu badań gleby i osadów oraz ustaleniu dawki aplikacji wykorzystywany jest on rolniczo, ponieważ to bogaty w azot i fosfor oraz inne składniki nawóz [49].

W 2012 r., chcąc zwiększyć produkcję biogazu w Iławie, rozpoczęto aplikowanie do komór fermentacyjnych dodatkowych substancji – kofermentów. Początkowo jedynym substratem była pozyskiwana z podczyszczalni ścieków w ubojni drobiu emulsja tłuszczowa, co zapewniło skokowy wzrost produkcji biogazu, a co za tym idzie – wzrost produkcji energii elektrycznej i ciepła o około 30%. W efekcie tych działań oczyszczalnia stała się w 100% samowystarczalna pod względem zapotrzebowania na ciepło. Ciepło jest wykorzystywane do ogrzewania budynków technologicznych, komór fermentacyjnych i pomieszczeń socjalnych. Nadwyżka jest kierowana do słonecznej suszarni osadów pościekowych w celu ogrzewania jej posadzki. Obiekt osiągnął również pełną samowystarczalność energetyczną, a nadwyżki sprzedaje do sieci [49].

W Elblągu fermentacja osadu surowego przebiega w dwóch równoległe eksploatowanych, zamkniętych mezofilowych komorach fermentacyjnych

[50]. Są to żelbetowe zbiorniki cylindryczne ze stożkiem dolnym i górnym. Pojemność czynna każdego zbiornika $V_1 = 4400 \text{ m}^3$. Ogrzewanie osadu w ZKF do temperatury 32–35°C ciepłem doprowadzonym do osadu za pomocą zewnętrznych wymienników typu „rura w rurze”. Źródłem ciepła są kotły opalane biogazem. Ujmowanie biogazu odbywa się w studniach gazowych wyniesionych ponad strop komór, z odprowadzeniem do dwupowłokowego zbiornika biogazu o pojemności 2200 m³. Zbiornik biogazu stanowi magazyn retencyjny, pełni również funkcję stabilizatora ciśnienia w instalacji biogazu. Przestrzeń wewnętrzna zbiornika biogazu znajduje się pod ciśnieniem około 25 mbar, regulowana ciśnieniem powietrza między-membranowego za pomocą dwóch wentylatorów. Wyposażenie zbiornika biogazu to: zawór nadmiarowy powietrza, zawór nadmiarowy biogazu, układ położenia membrany gazowej, detektor metanu przestrzeni między-powłokowej, przewód doprowadzający powietrze do zbiornika [50].

W zakładzie w Elblągu znajduje się elektrownia biogazowa z zespołem kogeneracyjnym o mocy 0,4 MW. Elektrownia wyposażona jest w dwa zespoły prądotwórcze produkcji PZL WOLA ZPG.255-1 1-1OSH 120, każdy o mocy 200 kW, zespół szaf sterowniczo-energetycznych oraz układy pomiarowe energii wytworzonej. Energia wytworzona dostarczana jest liniami kablowymi do rozdzielni nn-0,4 kV. Układ pomiaru wyprodukowanej energii elektrycznej zabudowany jest przez Energa-Operator na terenie elektrowni biogazowej [50].

Rolnicy, zwłaszcza ci „więksi”, coraz częściej zainteresowani są zagrodowymi elektrowniami na biogaz z gnojowicy. Ich ogromną zaletą jest wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła przez 24 godziny na dobę niezależnie od pory roku. Dzięki temu w większości przypadków w całości pokrywają zapotrzebowanie gospodarstw i zapewniają im niezależność energetyczną. Mała, ale efektywna elektrownia na biogaz wytwarzany z gnojowicy powstała w gospodarstwie hodowlanym w Kolwinach (pow. kętrzyński). Właściciel skorzystał z unijnego dofinansowania. Koszt budowy tej małej elektrowni oszacowano na 1,061 mln zł, z czego blisko 734 tys. zł stanowiły unijne środki z Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Warmińsko-Mazurskiego na lata 2014–2020. Obiekt w Kolwinach ma moc 73,8 kW (z czego 22 kW to moc elektryczna, a 51,8 cieplna) [51].

Biogazownia w Giżach (pow. olecki) działa prawie sześć lat. Zaledwie kilka kilometrów dalej, w Zajdach, funkcjonuje nieco młodszy, siostrzany obiekt. Obie o mocy po 1,063 MW. Do produkcji energii stosują odpady z pobliskich gospodarstw rolnych, a ciepło wykorzystują do suszenia drewna dla zakładu meblarskiego. Biogazownia w Giżach przetwarza w ciągu doby kiszonkę kukurydzy (około 30 ton), gnojowicę (około 40 m³) – pochodzącą z fermy trzody chlewnej i z gospodarstw, w których hodowane są krowy mleczne, i około 10 ton innych odpadów pochodzących z przetwórstwa rolno-spożywczego w postaci odpadowej serwatki, mierzwy – treści pokarmowej żołądków zwierząt, odpadów owocowo-warzywnych oraz pomiotu kurzego [52,53].

W Jarnoławie (pow. ostródzki) działa biogazownia rolnicza, której moc elektryczna wynosi 250 kW, a cieplna 220 kW. Stosuje się jednostki kogeneracyjne, których sprawność elektryczna wynosi 45,5%, a cieplna niewiele mniej, bo 40% – daje to łączną sprawność układu 85,5%. Ciepło jest wykorzystywane na miejscu do potrzeb technologicznych, ale również do ogrzewania budynków inwentarskich. W ten sposób wykorzystanie odpadów rolnych obniża koszt energii, ponieważ do tej pory budynki były zasilane gazem ziemnym, zwiększając koszty utrzymania. Ponadto wszelkie nadwyżki zostają dodatkowo odsprzedane do sieci [54].

W Perkunowie (pow. giżycki) pracuje biogazownia rolnicza o mocy 0,49 MW. Biogazownia produkuje energię elektryczną oraz ciepło z biogazu powstałego w procesie fermentacji metanowej z biomasy, tj. z kiszonki z kukurydzy, gnojowicy, obornika i wywaru gorzelnianego. Na ponad 200 ha pola spółki Perkun rośnie kukurydza przeznaczona jako substrat. Ponadto na terenie gospodarstwa powstają znaczne ilości gnojowicy oraz obornika. I te wszystkie składniki trafiają do biogazowni. W biogazowni przewiduje się także zastosowanie wywaru gorzelnianego [55].

W gminie Kisielice koło Olsztyna uruchomiono kolejną biogazownię na Warmii i Mazurach. Substratem wykorzystywanym do produkcji energii jest kiszonka kukurydzy zbierana z około 500 ha upraw. Inwestorem jest spółka BIO-NIK Elektra Sp. z o.o. Moc elektryczna biogazowni rolniczej uruchomionej w Kisielicach wynosi 0,99 MW, a moc

ciepła nieznacznie przekracza 1 MW. Szacowana roczna produkcja energii elektrycznej to 8 tys. MWh, a ciepła – 8,25 MWh [56].

Mimo początkowych protestów dziś mieszkańcy cenią biogazownię w Boleszynie (pow. nowowiejski), która m.in. zapewnia ciepło i umożliwia zagospodarowanie części odpadów [57]. Biogazownia w Boleszynie funkcjonuje już blisko dekadę. Przy kolejnych rozbudowach zyskuje coraz większe poparcie lokalnej społeczności i obala krążące wokół biogazu mity. „Udowodniliśmy, że ciepło z biogazowni jest solidne, tanie i bezobsługowe. Obaliliśmy też mit o uciążliwościach zapachowych. Do tej pory nie mieliśmy żadnej skargi. To mówi samo za siebie...” – przekonuje w rozmowie z „Teraz Środowisko” Andrzej Galiński, prezes BIOGAL sp. z o.o., który w 2012 r. zbudował wspomnianą instalację. W roku wybudowania chęć podłączenia do sieci ciepłowniczej zasilanej z biogazowni zgłosiło około 40 gospodarstw oraz budynki użyteczności publicznej, jak szkoła czy kościół. W 2016 r. powstał najnowszy moduł o mocy 1,6 MW oraz nowe 16 km sieci. Tę inwestycję zrealizowano ze wsparciem Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Projekt pn. „Budowa sieci ciepłowniczej do miejscowości Boleszyn i Mroczno wraz z przyłączeniami i wymiennikami” uzyskał ponad 6 mln zł dofinansowania (przy wartości projektu wynoszącej ponad 9 mln zł) w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko 2014–2020 Priorytet 1. Zmniejszenie emisyjności gospodarki Działanie 1.5 Efektywna dystrybucja ciepła i chłodu. Obecnie wybudowana na potrzeby biogazowni sieć ciepłownicza ma długość 21 km, a łączna moc instalacji to 3,6 MW. Do sieci podłączeni są już prawie wszyscy mieszkańcy Boleszyna i cała miejscowość Mroczno. Dodatkowo w okresie letnim ciepło technologiczne z biogazowni jest kierowane do suszarni w celu produkcji nawozu [57].

W tabeli 3 przedstawiono charakterystykę biogazowni rolniczych w województwie warmińsko-mazurskim (stan na 16.07.2020 r.) [36].

Wykorzystywanie odpadów w biogazowniach rolniczych pozwala na zagospodarowanie (utylicację) odpadów np. z przemysłu spożywczego, stąd coraz częściej używa się określenia biogazownie rolniczo-utylicacyjne bądź biogazownie utylizacyjne, w których poza produkcją biogazu następuje utylizacja odpadów [27,58].

Tabela 3. Charakterystyka biogazowni rolniczych w województwie warmińsko-mazurskim (opracowanie własne za: [36])

Ip.	Miejscowość	Substraty	Wydajność [mln m ³ biogazu/rok]	Moc [MW]		Roczna produkcja [GWh/rok]	
				elektryczna	ciepłota	energii elektrycznej	ciepła
1	Boleszyn	gnojowica, kiszonka kukurydziana, wywar z gorzelnii, serwatka	7,84	2,00	0,50	4,6	4,4
2	Boleszyn	gnojowica, kiszonka kukurydziana, wywar z gorzelnii, serwatka	3,14	0,80	b.d.	b.d.	b.d.
3	Lęguty	gnojowica, kiszonka kukurydziana, wywar z gorzelnii, kurzeniec ze słomą, gliceryna	5,00	1,20	1,62	12,8	13,0
4	Sławkowo	kiszonka kukurydziana, gnojowica, obornik i wywar z gorzelnii	1,85	0,40	0,64	5,5	5,3
5	Giży	kiszonka kukurydziana, trawy, kurzeniec ze słomą	4,20	1,20	1,10	8,4	8,8
6	Upałty Małe	kukurydza, obornik, gnojowica	5,80	1,00	1,01	8,3	8,4
7	Kisielice	kiszonka kukurydziana	4,45	1,00	0,65	5,0	5,4
8	Zajdy	produkty organiczne pochodzenia rolniczego	3,90	1,20	0,64	5,5	5,3

Cd. tab. 3

Lp.	Miejscowość	Substraty	Wydajność [mln m ³ biogazu/rok]	Moc [MW]		Roczna produkcja [GWh/rok]	
				elektryczna	ciepłna	energii elektrycznej	ciepła
9	Jarnołtowo	gnojowica, odpady organiczne z przemysłu spożywczego, odpady poubojowe	1,10	0,25	b.d.	b.d.	b.d.
10	Giżycko	odpady organiczne pochodzące z rolnictwa oraz przetwórstwa żywności	2,20	0,50	2,05	15,2	16,4
11	Brzeźnica	kiszonka kukurydziana i wywar z gorzelnii	4,21	1,00	b.d.	b.d.	b.d.
12	Małdyty	b.d.	1,10	0,25	b.d.	b.d.	b.d.
13	Morąg	b.d.	2,50	0,50	b.d.	b.d.	b.d.

* Ciepło służy do suszenia drewna.
b.d. – brak danych.

8. Ilość energii z odpadowego drewna pozyskanego bezpośrednio z lasów i pośrednio z przemysłu drzewnego

W ostatnim okresie lesistość Polski stopniowo zwiększa się, osiągając w 2019 r. poziom 29,6% [59]. Zgodnie z Narodowym Programem Zwiększania Lesistości w 2050 r. lasy mają stanowić 33% powierzchni kraju [60]. Dane Głównego Urzędu Statystycznego wskazują, że objętość drewna pozyskiwanego rocznie z lasów (państwowych i prywatnych) w Polsce wynosi około 40 mln m³/rok [59].

W celu oszacowania możliwej do uzyskania rocznie energii z odpadowego drewna z lasów poczyniono następujące założenia:

- 15% drewna pozyskiwanego bezpośrednio w lesie to drewno odpadowe (część kory, drobnicy gałęziowej, odpadów kawałkowych powstających podczas wycinki) [61],
- wartość opała drewna z lasów wynosi średnio 7 GJ/m³ (w polskich lasach dominującym gatunkiem jest sosna) [10],
- sprawność pozyskiwania energii wynosi 80%.

Wzór 1 przedstawia roczną ilość energii, którą można pozyskać z odpadowego drewna pozyskiwanego bezpośrednio, tj. w trakcie wycinki w lasach:

$$E_{lw} = 0,15 \cdot 0,8 \cdot I_l \cdot W_p \quad (1)$$

gdzie:

E_{lw} – roczna energia z odpadowego drewna powstającego podczas wycinki lasów [PJ/rok],

I_l – ilość drewna pozyskiwanego rocznie w lasach (3,75 mln m³/rok),

W_p – wartość opała drewna z lasów (7 GJ/m³).

Ilość energii, jaką można wytworzyć z odpadowego drewna z lasów, wynosi 3,1 PJ/rok.

Znaczne ilości odpadów powstają również w przemyśle drzewnym – w tartakach, zakładach produkujących meble, zakładach przemysłu papierniczego i celulozowego. Innym źródłem biomasy jest drewno użytkowe. Najwięcej powstaje go w budownictwie – jest to drewno pochodzące z wyburzeń, przebudowy, rozbiórek. Duże ilości odpadowej biomasy powstają w gospodarstwach domowych i instytucjach publicznych: meble, płyty, ławki, altanki itp. Ważnym źródłem drewna użytkowego w Polsce są opakowania (głównie używane w handlu i transporcie) [62].

W celu oszacowania możliwej do uzyskania rocznie energii z odpadowego drewna z przemysłu drzewnego przyjęto założenia jak poprzednio, z tym że założono, iż odpadowe drewno przemysłowe i użytkowe stanowi 25% drewna pozyskiwanego w lesie [61].

Wzór 2 przedstawia roczną ilość energii, którą można pozyskać z odpadowego drewna pozyskiwanego pośrednio, tj. w trakcie obróbki drewna w przemyśle drzewnym.

$$E_{ip} = 0,25 \cdot 0,8 \cdot I_l \cdot W_p \quad (2)$$

gdzie:

E_{ip} – roczna energia z odpadowego drewna powstającego podczas obróbki drewna w przemyśle drzewnym [PJ/rok],

I_l – ilość drewna pozyskiwanego rocznie w lasach (3,75 mln m³/rok),

W_l – wartość opałowa drewna z lasów (7 GJ/m³).

Ilość energii, jaką można wytworzyć z odpadowego drewna z przemysłu drzewnego, wynosi 5,2 PJ/rok.

Na cele energetyczne można więc łącznie przeznaczyć 40% odpadowego drewna pochodzącego z lasów (wzór 3):

$$E_l = 0,4 \cdot 0,8 \cdot I_l \cdot W_p \quad (3)$$

gdzie:

E_l – roczna energia z odpadowego drewna powstającego podczas wycinki lasów i obróbki drewna w przemyśle drzewnym [PJ/rok],

I_1 – ilość drewna pozyskiwanego rocznie w lasach województwa (3,75 mln m³/rok),

W_1 – wartość opałowa drewna z lasów (7 GJ/m³).

Obliczona ilość energii możliwa do pozyskania rocznie z odpadowego drewna w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 8,3 PJ/rok.

9. Ilość energii z odpadowego drewna pozyskanego bezpośrednio z sadów

Zgodnie z danymi Głównego Urzędu Statystycznego powierzchnia sadów w Polsce wynosi 376,5 tys. ha [63]. Drewno z sadów pochodzi zarówno z karczowania, jak też z prac pielęgnacyjnych (np. cięcie gałęzi). W wyniku karczowania sadów można uzyskać około 80 Mg/ha biomasy w przypadku starszych plantacji (wiek około 30 lat) oraz około 60 Mg/ha w przypadku nowoczesnych niskopiennych plantacji (wiek około 15 lat) [64]; rocznie daje to w przybliżeniu (zakładając karczowanie odpowiednio raz na 30 lub 15 lat) średnio 3,5 Mg/(ha-rok). Natomiast ilość biomasy powstającej rocznie podczas prac pielęgnacyjnych waha się, w zależności od wieku i gatunku drzew, od 4 do 10 Mg/(ha-rok), tj. w przybliżeniu średnio 7 Mg/(ha-rok) [64].

W celu oszacowania możliwej do uzyskania rocznie energii z odpadowego drewna z sadów poczyniono następujące założenia:

- 30% drewna pozyskiwanego w sadach można wykorzystać na cele energetyczne [65],
- w wyniku karczowania powstaje 3,5 Mg/(ha-rok) drewna,
- w wyniku prac pielęgnacyjnych powstaje 7 Mg/(ha-rok) drewna,
- wartość opałowa drewna drzew owocowych wynosi średnio 11,5 GJ/Mg [66],
- sprawność pozyskiwania energii wynosi 80%.

Wzór 4 przedstawia roczną ilość energii, którą można pozyskać z odpadowego drewna z sadów:

$$E_s = 0,3 \cdot 0,8 \cdot (K_k + K_p) \cdot P_s \cdot W_s, \quad (4)$$

gdzie:

E_s – roczna energia z odpadowego drewna z sadów [PJ/rok],

K_k – ilość drewna pozyskiwanego rocznie w wyniku karczowania hektara sadu (3,5 Mg/(ha·rok)),

K_p – ilość drewna pozyskiwanego rocznie w wyniku prac pielęgnacyjnych na hektarze sadu (7 Mg/(ha·rok)),

P_s – powierzchnia sadów [mln ha],

W_s – wartość opałowa drewna z sadów (11,5 GJ/Mg).

Obliczona ilość energii możliwa do pozyskania rocznie z odpadowego drewna z sadów w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 0,12 PJ/rok.

10. Ilość energii z nadwyżek słomy

W ostatnich latach w rolnictwie polskim dominuje uprawa zbóż: pszenicy, żyta, jęczmienia, pszenżyta, owsa, mieszanek zbożowych. Zgodnie z danymi Głównego Urzędu Statystycznego roczna masa ziarna zbóż zbieranego w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 594 tys. Mg/rok pszenicy, 90 tys. Mg/rok żyta, 133 tys. Mg/rok jęczmienia, 62 tys. Mg/rok owsa, 200 tys. Mg/rok pszenżyta [63].

Słoma zbóż wykorzystywana jest na potrzeby produkcji zwierzęcej, jako materiał ściółkowy i jako pasza dla zwierząt. Część słomy musi być pozostawiona na polu w celu użyzniania gleby [67].

Spadek pogłowia zwierząt hodowlanych w Polsce oraz wprowadzenie bezściółkowego chowu przyczyniły się do znacznych nadwyżek słomy w Polsce [66].

W celu oszacowania możliwej do uzyskania rocznie energii z nadwyżek słomy poczyniono następujące założenia:

- stosunek ziarno/słoma wynosi odpowiednio: 0,8 dla pszenicy, 1,4 dla żyta, 0,9 dla jęczmienia, 1,05 dla owsa, 0,95 dla pszenżyta [61],
- 30% wytwarzanej słomy stanowi nadwyżkę, którą można wykorzystać na cele energetyczne [68],
- wartość opałowa słomy (o wilgotności około 20%) wynosi średnio 15 GJ/Mg [61],
- sprawność pozyskiwania energii wynosi 80%.

Wzór 5 przedstawia roczną ilość energii, którą można pozyskać ze słomy:

$$E_{st} = 0,3 \cdot 0,8 \cdot (Z_p/w_p + Z_z/w_z + Z_j/w_j + Z_o/w_o + Z_{pż}/w_{pż}) \cdot W_{st} \quad (5)$$

gdzie:

- E_{st} – roczna energia ze słomy [PJ/rok],
 W_{st} – wartość opałowa słomy (15 GJ/Mg) [61],
 $Z_p, Z_z, Z_j, Z_o, Z_{pż}$ – roczne zbiory ziarna zbóż (pszenicy, żyta, jęczmienia, owsa, pszenżyta) [mln Mg/rok],
 $w_p, w_z, w_j, w_o, w_{pż}$ – stosunek ziarno/słoma, odpowiednio: 0,8, 1,4, 0,9, 1,05, 0,95 [61].

Obliczona ilość energii możliwa do pozyskania rocznie z nadwyżek słomy w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 3,51 PJ/rok. Oszacowany powyżej potencjał wskazuje na możliwość wykorzystania słomy w kotłowniach i elektrociepłowniach na większą niż obecnie skalę.

11. Ilość energii z siana z nieużytkowanych łąk i pastwisk

Województwo warmińsko-mazurskie posiada znaczną powierzchnię łąk i pastwisk; zgodnie z danymi Głównego Urzędu Statystycznego wynosi ona odpowiednio 217 tys. ha i 98 tys. ha [63]. Ze względu na ograniczenie pogłowia zwierząt gospodarskich (głównie bydła), a także zmianę systemu żywienia zwierząt, większość łąk i pastwisk nie jest użytkowana. Siano

można wykorzystać zarówno jako paliwo stałe w procesie spalania, jak również jako substrat w biogazowniach rolniczych. W niniejszym opracowaniu przyjęto, że siano zostanie wykorzystane jako paliwo stałe.

W celu oszacowania możliwej do uzyskania rocznie energii z siana z nieużytkowanych łąk i pastwisk poczyniono następujące założenia:

- 15% powierzchni łąk i pastwisk można przeznaczyć pod uprawę siana na cele energetyczne [61],
- masa zbieranego rocznie siana z hektara łąk wynosi 4,9 Mg/(ha·rok), a z hektara pastwisk 3,6 Mg/(ha·rok) [61],
- wartość opałowa siana wynosi średnio 14 GJ/Mg [61],
- sprawność pozyskiwania energii wynosi 80%.

Wzór 6 przedstawia roczną ilość energii, którą można pozyskać z siana z nieużytkowanych łąk i pastwisk [PJ/rok].

$$E_{sn} = 0,15 \cdot 0,8 \cdot (z_l \cdot P_l + z_p \cdot P_p) \cdot W_s \quad (6)$$

gdzie:

E_{sn} – roczna energia z siana z łąk i pastwisk [PJ/rok],

z_l, z_p – masa siana zbieranego rocznie z hektara łąk i pastwisk (odpowiednio 4,9 Mg/(ha·rok) i 3,6 Mg/(ha·rok)),

P_l, P_p – powierzchnia łąk i pastwisk [mln ha],

W_s – wartość opałowa siana (14 GJ/Mg).

Obliczona ilość energii możliwa do pozyskania rocznie z siana z nieużytkowanych łąk i pastwisk w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 2,5 PJ/rok.

12. Ilość energii z wierzby wiciowej uprawianej na gruntach ugorowanych i nieużytkach oraz 5% powierzchni uprawnej

Województwo warmińsko-mazurskie posiada znaczną powierzchnię gruntów ugorowanych i nieużytków (grunty zdewastowane i zdegradowane); zgodnie z danymi Głównego Urzędu Statystycznego wynosi ona

odpowiednio 10,7 tys. ha i 67,7 tys. ha [65]. Można je wykorzystać do produkcji roślin energetycznych: traw (np. *Miscantus*), zbóż (słoma i bio- etanol), drzew (topola – *Populus* L.) czy krzewów (wierzba wiciowa – *Salix viminalis* L.). W opracowaniu przyjęto, że będzie to wierzba wiciowa *Salix viminalis*; jest to gatunek rodzimy [69]. Wierzba wiciowa bardzo dobrze toleruje warunki agroklimatyczne praktycznie w całej Polsce, jest również odpowiednią rośliną do rekultywacji nieużytków [69]. Założono dodatkowo, że 5% powierzchni gruntów rolnych, tj. 47,7 tys. ha, zostanie wykorzystanych do produkcji bioenergii.

W celu oszacowania możliwej do uzyskania rocznie energii z wierzby wiciowej z gruntów ugorowanych i nieużytków poczyniono następujące założenia:

- 50% powierzchni ugorów, 20% powierzchni nieużytków i 5% powierzchni gruntów rolnych można przeznaczyć pod uprawę wierzby wiciowej na cele energetyczne* [65],
- roczny plon wierzby wiciowej z hektara wynosi 8 Mg/(ha·rok), zarówno na gruntach ugorowanych, jak i nieużytkach, a na gruntach uprawnych 16 Mg/(ha·rok) [61],
- wartość opała wierzby wiciowej wynosi 19 GJ/Mg [69],
- sprawność pozyskiwania energii wynosi 80%.

Wzór 7 przedstawia roczną ilość energii, którą można pozyskać z wierzby wiciowej uprawianej na nieużytkowanych ugorach i nieużytkach:

$$E_{un} = 0,8 \cdot [Q_w \cdot (0,5 \cdot P_u + 0,2 \cdot P_n) + Q_{wo} \cdot 0,05 \cdot P_o] \cdot W_w, \quad (7)$$

gdzie:

E_{un} – roczna energia z wierzby wiciowej uprawianej na gruntach ugorowanych, nieużytkach i gruntach rolnych [TJ/rok],

Q_w – roczny plon wierzby wiciowej z hektara na ugorach i nieużytkach (8 Mg/(ha·rok)),

* Wierzba może być jednocześnie wykorzystywana do rekultywacji nieużytków.

- Q_{wo} – roczny plon wierzby wiciowej z hektara na gruntach ornych (16 Mg/(ha-rok)),
- P_u, P_n, P_o – powierzchnia gruntów ugorowanych, nieużytków i ornych [tys. ha],
- W_w – wartość opałowia wierzby wiciowej (19 GJ/Mg).

Obliczona ilość energii możliwa do pozyskania rocznie z wierzby wiciowej uprawianej na ugorach, nieużytkach i gruntach rolnych w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 13,9 PJ.

13. Ilość energii z biogazu z odpadów rolniczych i spożywczych

13.1. Ilość energii z biogazu z gnojowicy zwierzęcej i pomiotu ptasiego

Zgodnie z danymi Głównego Urzędu Statystycznego liczba sztuk bydła, trzody chlewnej i drobiu wynosi odpowiednio: 474 tys. sztuk, 573 tys. sztuk i 4841 tys. sztuk [65].

W celu oszacowania możliwej do uzyskania rocznie energii z biogazu z gnojowicy zwierzęcej lub pomiotu ptasiego poczyniono następujące założenia:

- współczynniki przeliczeniowe sztuk zwierząt na duże jednostki inwentarza *DJP* (500 kg) wynoszą: dla bydła 0,8, dla trzody chlewnej 0,2, dla drobiu 0,004 [70],
- średnia masa gnojowicy zwierzęcej lub pomiotu ptasiego wytwarzanych przez dużą jednostkę przeliczeniową inwentarza wynosi 44,9 kg/doba = 16,4 Mg/rok dla bydła, 43,5 kg/doba = 15,9 Mg/rok dla trzody chlewnej oraz 26,8 kg/doba = 9,8 Mg/rok dla drobiu,
- uzysk biogazu z gnojowicy bydlęcej wynosi 0,050 m³/kg = 50 m³/Mg, z gnojowicy świńskiej 0,055 m³/kg = 55 m³/Mg, a z pomiotu ptasiego 0,140 m³/kg = 140 m³/Mg [61],
- biogaz z gnojowicy zwierzęcej lub pomiotu ptasiego zawiera 60% metanu o wartości opałowej 35,73 MJ/m³ [10],

- potencjał techniczny biogazu utylizacyjnego stanowi 20% potencjału teoretycznego,
- sprawność pozyskiwania energii wynosi 80%.

Wzór 8 przedstawia roczną ilość energii, którą można pozyskać z biogazu uzyskanego z gnojowicy zwierzęcej lub pomiotu ptasiego:

$$E_{bg} = 0,2 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot (0,8 \cdot N_b \cdot I_{gb} \cdot U_{bb} + 0,2 \cdot N_t \cdot I_{gt} \cdot U_{bt} + 0,004 \cdot N_d \cdot I_{gd} \cdot U_{bd}) \cdot W_m \quad (8)$$

gdzie:

- E_{bg} – roczna energia z biogazu uzyskanego z gnojowicy zwierzęcej lub pomiotu ptasiego [TJ/rok],
- N_b, N_t, N_d – liczba sztuk bydła, trzody chlewnej, drobiu [mln sztuk],
- I_{gb}, I_{gt}, I_{gd} – roczna masa gnojowicy zwierzęcej lub pomiotu ptasiego z dużej jednostki przeliczeniowej bydła (16,4 Mg/rok), trzody chlewnej (15,9 Mg/rok), drobiu (9,8 Mg/rok),
- U_{bb}, U_{bt}, U_{bd} – uzysk biogazu z gnojowicy bydła (50 m³/Mg), z gnojowicy świńskiej (55 m³/Mg), z pomiotu ptasiego (140 m³/Mg) [66],
- W_m – wartość opałowa metanu (35,73 MJ/m³).

Obliczona ilość energii możliwa do pozyskania rocznie z biogazu utylizacyjnego z gnojowicy zwierzęcej lub pomiotu ptasiego w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 1,51 PJ.

13.2. Ilość energii z biogazu składowiskowego

Zgodnie z danymi Głównego Urzędu Statystycznego roczna masa odpadów komunalnych powstających w gospodarstwach domowych i obiektach użyteczności publicznej wynosi w województwie warmińsko-mazurskim około 441 tys. Mg/rok, z czego około połowa to frakcja biodegradowalna [71]. Ze względu na duże rozproszenie źródeł bioodpadów, jak też (nadal) niski stopień segregacji odpadów, potencjał techniczny

biogazu z odpadów komunalnych można oszacować na poziomie 20% potencjału teoretycznego.

W celu oszacowania możliwej do uzyskania rocznie energii z biogazu z frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych poczyniono następujące założenia:

- uzysk biogazu z frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych wynosi $90 \text{ m}^3/\text{Mg}$ [61],
- biogaz z frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych zawiera 55% metanu o wartości opałowej $35,73 \text{ MJ}/\text{m}^3$ [61],
- potencjał techniczny biogazu utylizacyjnego stanowi 20% potencjału teoretycznego,
- sprawność pozyskiwania energii wynosi 80%.

Wzór 9 przedstawia roczną ilość energii, którą można pozyskać z biogazu uzyskanego z frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych:

$$E_{bok} = 0,2 \cdot 0,8 \cdot 0,55 \cdot N_{ok} \cdot U_{ok} \cdot W_m, \quad (9)$$

gdzie:

E_{bok} – roczna energia z biogazu z frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych [TJ/rok],

N_{ok} – roczna masa frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych [mln Mg/rok],

U_{ok} – uzysk biogazu z frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych ($90 \text{ m}^3/\text{Mg}$) [66],

W_m – wartość opałowa metanu ($35,73 \text{ MJ}/\text{m}^3$).

Obliczona ilość energii możliwa do pozyskania rocznie z biogazu z frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych w województwie warmińsko-mazurskim wynosi $0,125 \text{ PJ}/\text{rok}$.

13.3. Ilość energii z biogazu na oczyszczalniach ścieków

W województwie warmińsko-mazurskim oczyszczane jest $44,8 \text{ mln m}^3$ ścieków komunalnych rocznie [71]. Założono, że z 50% ścieków do-

plywających do oczyszczalni otrzymany zostanie osad (stanowiący 1% dopływających ścieków) oraz że z 1 m³ osadu można uzyskać 15 m³ biogazu [10].

W celu oszacowania możliwej do uzyskania rocznie energii z biogazu z osadów ściekowych (komunalnych) poczyniono następujące założenia:

- do otrzymywania biogazu wykorzystane zostanie 50% ścieków komunalnych,
- objętość osadów ściekowych wynosi 1% dopływających ścieków komunalnych,
- uzysk biogazu z osadów ściekowych wynosi 15 m³/m³ = 15 [61],
- biogaz z osadów ściekowych zawiera 60% metanu o wartości opałowej 35,73 MJ/m³ [61],
- sprawność pozyskiwania energii wynosi 80%.

Wzór 10 przedstawia roczną ilość energii, którą można pozyskać z biogazu uzyskanego z osadów ściekowych:

$$E_{bos} = 0,5 \cdot 0,01 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot V_{\dot{s}} \cdot U_{os} \cdot W_m, \quad (10)$$

gdzie:

E_{bos} – roczna energia z biogazu utylizacyjnego z osadów ściekowych [TJ/rok],

$V_{\dot{s}}$ – roczna objętość ścieków komunalnych dopływających do oczyszczalni [mln m³/rok],

U_{os} – uzysk biogazu z osadów ściekowych (15 m³/m³ = 15) [61].

W_m – wartość opałowa metanu (35,73 MJ/m³).

W województwie warmińsko-mazurskim można pozyskać 3,4 miliona m³ biogazu, czyli 0,12 PJ/rok energii.

13.4. Produkcja biogazu z odpadów biodegradowalnych z przemysłu rolno-spożywczego

Biogaz można pozyskać również z odpadów spożywczych, odpadów produkcyjnych, zepsutej żywności, zwrotów żywności ze sklepów, odpa-

dów zielonych, odpadów pogorzelnianych, odpadów browarniczych itd. (tab. 4). Przyjęto, że potencjał techniczny odpadów rolno-spożywczych stanowi 20% potencjału teoretycznego [61].

Tabela 4. Odpady z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności powstałe w województwie warmińsko-mazurskim w 2015 r. [72]

Podgrupa odpadów	[tony]	Ilość biogazu z 1 tony
02 01, odpady z rolnictwa, ogrodnictwa, upraw hydroponicznych, leśnictwa, łowiectwa i rybołówstwa	48 261	70–220
02 02, odpady z przygotowania i przetwórstwa produktów spożywczych pochodzenia zwierzęcego	47 023	20–280
02 03, odpady z przygotowania, przetwórstwa produktów i użytków spożywczych oraz odpady pochodzenia roślinnego	12 048	50–280
02 05, odpady z przemysłu mleczarskiego	39 848	20–480
02 06, odpady z przemysłu piekarniczego i cukrowniczego	323	60–300
02 07, odpady z produkcji napojów alkoholowych i bezalkoholowych, z wyłączeniem kawy, herbaty i kakao	48 046	30–200
Suma [tys. ton]	196	

Znaczne ilości odpadów biodegradowalnych to odpady z Grupy 02, czyli odpady z przemysłu rolno-spożywczego. W województwie warmińsko-mazurskim masa takich odpadów wynosi 196 tys. Mg/rok [72].

W celu oszacowania możliwej do uzyskania rocznie energii z biogazu z odpadów biodegradowalnych z przemysłu rolno-spożywczego poczyniono następujące założenia:

- 20% odpadów biodegradowalnych z przemysłu rolno-spożywczego zostanie poddanych fermentacji metanowej,
- uzysk biogazu z odpadów biodegradowalnych z przemysłu rolno-spożywczego wynosi $100 \text{ m}^3/\text{Mg}$ [61],
- biogaz z odpadów biodegradowalnych z przemysłu rolno-spożywczego zawiera 55% metanu [10] o wartości opałowej $35,73 \text{ MJ}/\text{m}^3$ [61],
- sprawność pozyskiwania energii wynosi 80%.

Wzór 11 przedstawia roczną ilość energii, którą można pozyskać z biogazu uzyskanego z odpadów biodegradowalnych z przemysłu rolno-spożywczego:

$$E_{ib} = 0,2 \cdot 0,8 \cdot 0,55 \cdot M_{ib} \cdot U_{ib} \cdot W_m, \quad (11)$$

gdzie:

E_{ib} – roczna energia z biogazu z odpadów biodegradowalnych z przemysłu rolno-spożywczego [TJ/rok],

M_{ib} – roczna masa odpadów biodegradowalnych z przemysłu rolno-spożywczego [mln Mg/rok],

U_{ib} – uzysk biogazu z odpadów biodegradowalnych z przemysłu rolno-spożywczego (100 m³/Mg),

W_m – wartość opałowa metanu (35,73 MJ/m³).

Obliczona ilość energii możliwa do pozyskania rocznie z biogazu z odpadów biodegradowalnych z przemysłu rolno-spożywczego w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 0,06 PJ/rok.

14. Łączna ilość bioenergii

W niniejszym opracowaniu założono, że energia elektryczna z biomasy stałej zostanie pozyskana ze sprawnością 30%, ciepło zaś ze sprawnością 50%, podczas gdy w przypadku biogazu sprawność pozyskania energii elektrycznej wyniesie 35%, ciepła natomiast 45%. Łączną ilość możliwej do pozyskania energii elektrycznej oszacowano jako 2,54 TWh, ciepła zaś 14,99 PJ (tab. 5).

Tabela 5. Możliwe do pozyskania rocznie ilości energii elektrycznej i ciepła z biomasy w województwie warmińsko-mazurskim (obliczenia własne)

Rodzaj biomasy	Ilość energii elektrycznej [TWh/rok]	Ilość ciepła [PJ/rok]
Biomasa stała	2,36	14,17
Biogaz	0,18	0,82
Suma	2,54	14,99

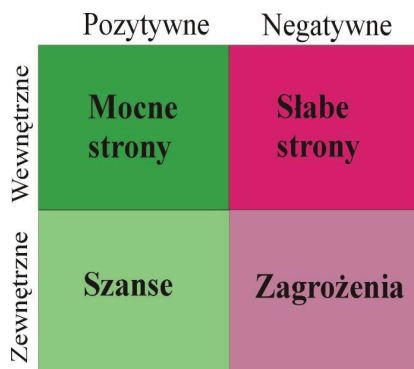
Obliczona ilość energii elektrycznej pozwoliłaby pokryć potrzeby województwa w 64%, ciepła zaś w całości [73]. W 2018 r. zużyto w województwie warmińsko-mazurskim 4 TWh energii elektrycznej oraz 12 PJ ciepła.

Według Wiśniewskiego i współpracowników [74] potencjał techniczny biomasy roślin energetycznych w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 1476 tys. ton.s.m. Potencjał słomy zbędnej w rolnictwie to 417 tys. Mg.s.m. Potencjał techniczny biogazu rolniczego wynosi 2,1 PJ energii pozyskanej z nawozu naturalnego, 1,5 PJ energii pozyskanej z odpadów rolno-spożywczych oraz 10,5 PJ energii uzyskanej z roślin energetycznych.

15. Analiza SWOT bioenergii

Analiza SWOT jest kompleksową metodą analizy strategicznej, która uwzględnia zarówno badanie wnętrza przedsięwzięcia lub organizacji, jak i badanie ich otoczenia zewnętrznego. Polega na identyfikacji kluczowych atutów i słabości oraz na skonfrontowaniu ich z aktualnymi i przyszłymi szansami oraz zagrożeniami. Analiza SWOT jest jednym z najpowszechniej stosowanych narzędzi analizy strategicznej [75]. Na podstawie analizy SWOT otrzymuje się zestaw:

- **S** (Strengths) – silnych stron, które należy wzmocnić,
- **W** (Weaknesses) – słabych stron, które należy niwelować/redukować,
- **O** (Opportunities) – szans, które należy wykorzystywać,
- **T** (Threats) – zagrożeń, które należy unikać (ryc. 17).



Ryc. 17. Diagram analizy SWOT (opracowanie własne)

Analiza SWOT pozwala usystematyzować wiedzę, dostrzec nowe możliwości lub zagrożenia, wyczuła na pewne kwestie. Jest to dobra metoda do rozpoznania rynku lub środowiska, zweryfikowania założeń projektowych, badania trendów itd. [61,75].

W tabeli 6 przedstawiono analizę SWOT bioenergii w województwie warmińsko-mazurskim.

Tabela 6. Analiza SWOT energii pozyskanej z biomasy [61,76]

Mocne strony	Słabe strony
<ul style="list-style-type: none"> – duży potencjał biomasy leśnej – duży potencjał biomasy rolniczej – potencjał obszarowy do upraw roślin energetycznych – duży potencjał pozostałości z produkcji rolniczej i odpadów z przemysłu rolno-spożywczego – technologia znana i dość prosta w realizacji – technologia biogazowa to technologia dezodoryzująca i unieszkodliwiająca odpady – kogeneracja bioenergii – zwiększenie plonów dzięki wykorzystaniu pulpy pofermentacyjnej jako nawozu – nadwyżki siły roboczej na obszarach wiejskich 	<ul style="list-style-type: none"> – niska i zmienna cena zielonych certyfikatów – słabe zainteresowanie rolników wieloletnimi uprawami roślin energetycznych – słaba wiedza w zakresie agrotechniki i warunków ekonomicznych wieloletnich upraw energetycznych – wysokie koszty inwestycyjne – niskie zainteresowanie przerobem biomasy na pelet lub brykiet – brak stabilnego rynku biomasy – problem z zagospodarowaniem ciepła – czasem opór społeczny przy budowie biogazowni

Cd. tab. 6

Szanse	Zagrożenia
<ul style="list-style-type: none"> - dodatkowe dochody w sektorze rolnym - uprawy nowych gatunków roślin energetycznych - rozwój biopaliw II i III generacji - wykorzystanie biogazu na cele motoryzacyjne - zagospodarowanie ciepła ze spalania biogazu do ogrzewania upraw szklarniowych 	<ul style="list-style-type: none"> - sezonowe wahania cen za paliwa stałe z biomasy - trudności w zapewnieniu stabilności dostaw - niestabilność cen substratów pochodzących z rolnictwa - nadmierny fiskalizm

15.1. Mocne strony

Do mocnych stron należy zaliczyć fakt, że województwo warmińsko-mazurskie posiada duży potencjał techniczny biomasy stałej (zarówno odpadowej leśnej, odpadowej rolniczej, jak i roślin energetycznych), którą można spalić bądź współspalić, jak również poddać procesom pirolizy czy zgazowania [61,76].

Spalanie biomasy, głównie drewna, jest znane od tysięcy lat, to technologia dobrze opanowana i stosunkowo prosta. Oczywiście, drewno czy słomę powinno się spalać lub współspalać tylko w kotłach na odpowiedni rodzaj paliwa.

Mocną stroną energetyki biogazowej jest również fakt, iż jest to technologia dezodoryzująca i unieszkodliwiająca odpady. Biogazownia pozwala w sposób kontrolowany zagospodarować odpadową materię organiczną. W wyniku naturalnych procesów rozkładu biomasy powstaje metan, który przedostając się do atmosfery, wzmaga efekt cieplarniany. Energetyczne wykorzystanie biogazu rolniczego pozwala ograniczyć emisję CO₂, który powstałby podczas spalania paliw konwencjonalnych. Dodatkowo, biogazownia rolnicza pozwala utylizować uciążliwe odpady, jak np. gnojowicę [61,76].

Zastosowanie agregatu do skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła zapewnia wyższą sprawność całego układu, pozwalając na produkcję energii w sposób bardziej ekonomiczny. Sprawność pozyskania energii elektrycznej w najnowszych agregatach mieści się

w granicach 35–40%, a sprawność odzysku ciepła wynosi 40–45%, co pozwala na uzyskanie całkowitej sprawności wykorzystania paliwa rzędu 75–85%.

Kolejną mocną stroną energetyki biogazowej jest fakt, że poferment jest dobrym, naturalnym nawozem rolniczym, który pozwala zwiększyć plony. Poferment może być bezpośrednio wylewany na pola bądź suszony i przerabiany na pelety. Pelety mogą z powodzeniem być wykorzystywane jako opał bądź jako suchy, niemal bezwonny nawóz rolniczy [61,76].

Województwo warmińsko-mazurskie to region, w którym dominuje ludność wsi i małych miasteczek. I właśnie ta ludność mogłaby znaleźć zatrudnienie w elektrociepłowniach czy biogazowniach, zmniejszając bezrobocie na terenach wiejskich.

15.2. Słabe strony

Niskie i zmienne ceny zielonych certyfikatów negatywnie wpływają na płynność finansową bioelektrowni w województwie warmińsko-mazurskim.

Rośliny energetyczne są coraz popularniejsze w Polsce, jednak nadal wielu rolników ma niewielką wiedzę na temat ich uprawy i zbioru. Przyczyną tego jest niestabilny rynek biomasy, jej niskie i zmienne ceny. Poprawić sytuację mogłoby wprowadzenie stałych, wcześniej zakontraktowanych cen biomasy. Co więcej, w ostatnich latach obserwuje się „huśtawkę” cenową biomasy i niestety wielu rolników [77] uważa, że będzie tak też w przyszłości. Jest to jeden z głównych powodów nierozszerzania produkcji rolnej o biomasę na cele energetyczne.

Pelety i brykiety są coraz chętniej kupowane, jednak ich rynek nadal jest zbyt mały. Wynika to ze zbyt niestabilnego rynku biomasy i zmiennych jej cen.

Inwestorzy i właściciele podkreślają, że kapitałochłonna budowa bioelektrowni napotyka na bariery ekonomiczne, a wśród nich niedobór programów pomocy finansowej podczas realizacji projektu. Inwestorom trudno spiąć montaż finansowy, bo banki wstrzymały pomoc finansową

na tego typu przedsięwzięcia, a pieniądze z banków rzutują na wkład własny inwestorów, który jest niezbędny. Rozwój sektora biogazowego zależy w dużym stopniu od regulacji dotyczących wsparcia dla odnawialnych źródeł energii w postaci zielonych certyfikatów i aukcji [27].

Część z już pracujących (jak i planowych) biogazowni ma problem z zagospodarowaniem ciepła, szczególnie w miesiącach letnich [27]. Rozwiązaniem jest sytuowanie biogazowni w pobliżu np. zakładu produkcyjnego, który ma zapotrzebowanie na ciepło przez cały rok.

Mniej więcej co druga inwestycja w biogazownię rolniczą napotkała lub napotyka na opór społeczny. Jako główne przyczyny sprzeciwu można podać:

- brak wiarygodnych źródeł informacji na temat biogazowni,
- efekt NIMBY – akceptacja potrzeby rozwoju sektora OZE, ale „nie w moim sąsiedztwie” [27].

15.3. Szanse

Rozwój sektora bioenergetycznego pozwoli zwiększyć dochody rolników. Do bioelektrowni będą mogli dostarczać słomę, biomasę roślin energetycznych czy odpady rolno-spożywcze.

Są duże szanse, że rolnicy z województwa warmińsko-mazurskiego przekonają się do roślin energetycznych. Oprócz wierzby wiciowej będą mogli uprawiać miskanta, ślazuwca pensylwańskiego, topinambura czy trzcinę [10].

Do szans należą zaliczyć rozwój biopaliw II i III generacji. Nie konkurują one z produktami przeznaczonymi na cele żywieniowe. Nad energetycznym wykorzystaniem alg pracują naukowcy z Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego.

W Polsce biogaz wykorzystuje się do produkcji energii elektrycznej i ciepła. W innych krajach rośnie jego rola jako paliwa motoryzacyjnego. Na przykład w Szwecji, po wzbogaceniu, jako biometan stosowany jest do zasilania samochodów osobowych, autobusów czy pojazdów wolnobieżnych [27].

Jak już wspomniano, część z istniejących, jak i projektowanych biogazowni ma problem z zagospodarowaniem ciepła. Dobrym rozwiązaniem jest wykorzystanie ciepła ze spalania biogazu do ogrzewania upraw szklarniowych. Jako pierwsza pomysł ten zrealizowała biogazownia w miejscowości Koczergi (lubelskie). Ciepło z biogazowni przez cały rok ogrzewa szklarnie, głównie z pomidorami, o powierzchni 4 ha. Połączenie szklarni z biogazownią umożliwia zmniejszenie lub zupełne wyeliminowanie nawozów mineralnych, gdyż mogą one być zastąpione masą pofermentacyjną z biogazowni [27].

15.4. Zagrożenia

Do głównych zagrożeń rozwoju bioelektrowni w województwie warmińsko-mazurskim należy zaliczyć niestabilność cen substratów, jak i samych dostaw. Nagły wzrost cen surowców np. do fermentacji metanowej stawia biogazownię niemal na skraju bankructwa. Dobrym rozwiązaniem problemu jest podpisywanie długoterminowych umów na dostawę substratów dla bioelektrowni. Już na etapie wyboru lokalizacji pod bioelektrownię należy uznać ten problem za priorytetowy – obiekt musi znajdować się w pobliżu surowca [27].

Budowa bioelektrowni wymaga podpisywania umów z wieloma podmiotami i na różnym etapie realizacji inwestycji. Typowymi umowami związanymi z budową i eksploatacją bioelektrowni są umowy na: dostawę technologii, wykonawstwo inwestycji, kompleksowe wykonanie prac projektowych, dostawę substratów, przyłączenie do sieci elektroenergetycznej (czasem z tym jest duży problem), dostawę i odbiór mediów, w tym sprzedaż ciepła, ubezpieczenie w okresie budowy, finansowanie projektu inwestycyjnego [10].

Energetyka wodna

Hydrosfera Ziemi zawiera $1,37 \cdot 10^9$ km³ wody. Największy w niej udział, wynoszący 97,25%, mają morza i oceany, które pokrywają 2/3 powierzchni Ziemi. W wyniku przemian fizykochemicznych i biologicznych woda jest w ciągłym obiegu. Siłą napędową jest energia Słońca, geotermalna i grawitacyjna. Dla przykładu, energia słoneczna ogrzewa wodę na powierzchni Ziemi, która parując, tworzy chmury. Ogrzana woda, zarówno w postaci ciekłej, jak i gazowej, na skutek różnic gęstości, przemieszcza się w wyniku ruchów konwekcyjnych. Opad, a następnie spływ grawitacyjny, zamienia energię potencjalną wody w energię kinetyczną (mechaniczną) [78].

Energią wodną nazywana jest energia ruchów wód morskich i śródlądowych. Jest ona wykorzystywana przez ludzkość od czasów starożytnych. Początkowo energią wodną napędzano koła wodne w młynach, następnie młoty w kuźniach i piły w tartakach [78].

Młyny wodne są najstarszymi młynami wykorzystywanymi w gospodarce człowieka. Mechanizm koła wodnego był znany w III w. p.n.e. na terenie Bizancjum. Około roku 85 przed Chrystusem wspominał o wodnym młynie Antypater z Tessalonik. Powszechnie jest znany szczegółowy opis Witruwiusza młyna rzymskiego z kołem podsiębiernym z I w n.e. Z czasem liczba młynów wodnych na świecie ogromnie wzrosła, na przykład pod koniec XI w. w samej tylko Anglii było ich ponad 5600 [79].

Pierwsze instalacje przetwarzające energię płynącej wody i wykorzystywane przez ludzi były prostymi urządzeniami zwanymi kołami wodnymi. Wśród nich można wymienić trzy rodzaje kół wodnych: podsiębierne – poruszane przez prąd przepływającej rzeki, śródsiębierne – poruszane

przez wodę napływającą w połowie średnicy koła oraz nadsiębierne – poruszane przez wodę opadającą na jego zakrzywione łopatki (ryc. 18) [80].



Ryc. 18. Młyn z kołem nadsiębiernym (fot. H.-J. Paape)

Oprócz młynarstwa spożywczego (ryc. 19) stosunkowo wcześniej (XII w.) urządzenia młyńskie stosowano w kuźnicach, drutarniach, do kruszenia kamieni, do produkcji prochu strzelniczego, do produkcji papieru [80]. Wentylacja kopalni, odwadnianie, nawadnianie pól – to inne zastosowania młynów wodnych w Polsce. O tym, że energia wody odgrywała ogromną rolę w gospodarce i kulturze Polski, świadczą liczne herby powiatów, gmin czy miejscowości. 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, trzy młyny zbożowe, dwie papiernie, fabryka sukna, młyn kory dębowej, kuźnica miedzi i rusznikarnia [81,82].

Sprawność koła śródsiębierne dochodziła nawet do 80%. Stało się ono pierwowzorem turbiny wodnej, rozpowszechnionej w wieku XIX. Jej konstruktorem był Benoît Fourneyron, francuski inżynier mechanik, któ-

ry swoją turbinę reakcyjną uruchomił w roku 1827. Turbina, w następnych dziesięcioleciach wielokrotnie modyfikowana, rozwiązała problemy z kołem wodnym, zapewniając większą moc i wydajność. W Polsce pierwsza taka turbina pracowała w 1838 roku w Minasówce, w tamtejszym młynie. Wcześniej jednak, w roku 1828, francuski inżynier Philippe de Girard skonstruował w Dowspuddie na Suwalszczyźnie turbinę akcyjną, którą napędzano młockarnię [83].



Ryc. 19. Młyn wodny w Muzeum Etnograficznym w Toruniu (fot. B. Igliński)

Pierwsze turbiny Francisa, nazwane na cześć wynalazcy – Jamesa Francisa, miały nieruchomy aparat kierowniczy. Dopiero w 1859 roku opracowano przestawne łopatki kierownicy, umożliwiając regulację mocy turbiny. Turbiny Francisa wykorzystywane są do dzisiaj i najlepiej pracują przy spadach od 5 do 500 m [83].

Jedną z najbardziej znanych turbin akcyjnych jest turbina Peltona, skonstruowana po raz pierwszy w 1880 roku przez Lestera Allena Peltona [84]. Kolejną turbiną reakcyjną jest turbina zbudowana w 1912 roku przez austriackiego inżyniera Viktora Kapłana. Jest to turbina typu śmigłowe-

go z regulacją zarówno łopat wirnika, jak i łopat aparatu kierowniczego (ryc. 20). Mechanizm odpowiedzialny za ustawienie kąta łopat wirnika sprzężony jest z mechanizmem odpowiedzialnym za ustawienia łopat kierownicy, tak aby możliwe było osiągnięcie najwyższych sprawności. Turbiny te stosowane są dla spadów do 75 m [85].



Ryc. 20. Turbina Kaplana w Muzeum Techniki w Wiedniu (fot. R. Rein)

Do czasu wynalezienia maszyny parowej w przemyśle powszechnie stosowana była energia wody. Wykorzystanie energii wodnej zostało zrewolucjonizowane dzięki wynalezieniu w XIX w. generatora elektrycznego. Dzięki temu wynalazkowi możliwe stało się przekształcanie energii mechanicznej (która z kolei była pochodną energii wodnej) na elektryczną. Zakładami przekształcającymi wymienione wcześniej rodzaje energii są elektrownie wodne, a dział energetyki zajmujący się pozyskaniem energii z siły wody to hydroenergetyka. Współcześnie wykorzystuje się w głównej mierze wody śródlądowe o dużym natężeniu przepływu i znaczącej różnicy poziomów. W mniejszym stopniu użytkowana jest energia fal i pływów morskich [83].

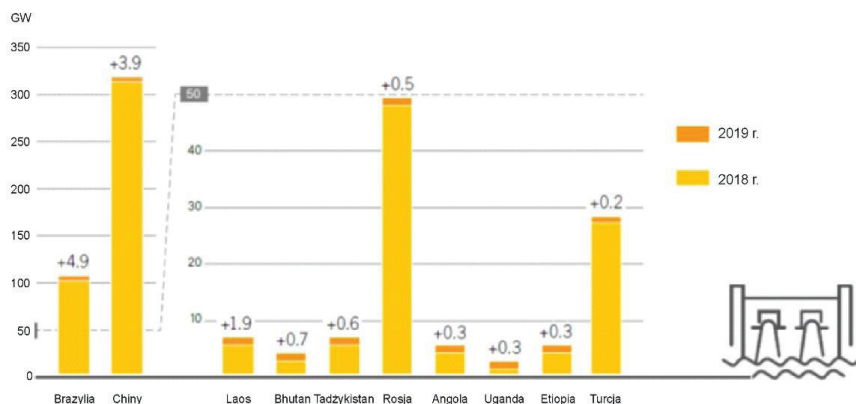
Elektrownie wodne dzieli się ze względu na wielkość na małe elektrownie wodne (MEW) oraz duże systemowe jednostki. W Polsce za

MEW uznaje się zakłady produkujące energię o mocy do 5 MW. W skład elektrowni wodnych wchodzi nie tylko urządzenia przekształcające jeden rodzaj energii w drugi, ale także urządzenia hydrotechniczne. W celu zwiększenia efektywności energetycznej stosuje się spiętrzenia wody, których formami są m.in. jazy, zbiorniki i zapory wodne [83]. Rozróżnia się trzy podstawowe typy elektrowni wodnych: przepływowe, zbiornikowe i szczytowo-pompowe.

1. Hydroenergetyka na świecie

Jeszcze do niedawna energia odnawialna była produkowana praktycznie tylko w elektrowniach wodnych (100%). Mimo corocznego przyrostu mocy o 3–4% obecnie hydroenergetyka ma około 65% udziału w światowym mikście energii odnawialnej. Wynika to z bardzo szybkiego rozwoju innych rodzajów OZE na świecie, w tym energetyki wiatrowej i słonecznej [32].

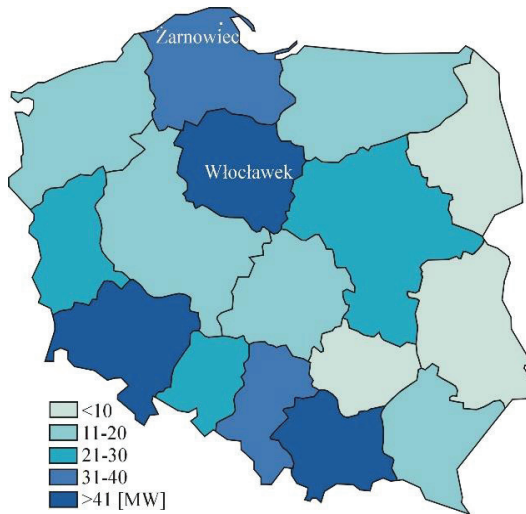
Na świecie w 2019 r. zainstalowano 15,9 GW mocy w hydroenergetyce. Całkowita światowa moc energetyki wodnej wynosi już 1150 GW. Największy przyrost tej mocy nastąpił w Brazylii (4,9 GW w 2019 r.), natomiast Chiny są liderem, jeśli idzie o moc całkowitą hydroenergetyki – posiadają już ponad 320 GW (ryc. 21) [32].



Ryc. 21. Moc hydroenergetyki na świecie [32]

2. Hydroenergetyka w Polsce

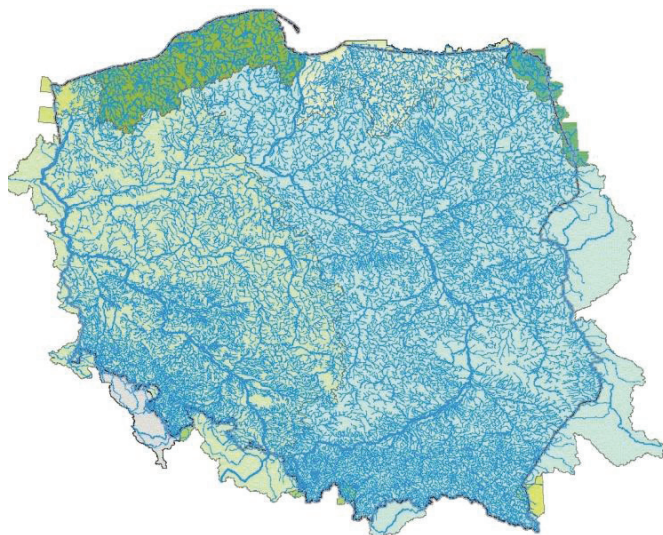
Obecnie moc urządzeń produkujących energię elektryczną z wykorzystaniem turbin wodnych w Polsce to blisko 1 GW w ponad 750 elektrowniach wodnych (ryc. 22) [34]. Największą elektrownią wodną w Polsce jest elektrownia Włocławek (przy stopniu wodnym na Wiśle). Stopień wodny we Włocławku składa się z następujących elementów: zapory ziemnej czołowej, jazu zamykanego stalowymi zasuwami powłokowymi, elektrowni i śluzy żeglugowej w wymiarach 12×115 m, zaprojektowanej na przepustowość 6 mln ton rocznie, oraz przepławki dla ryb usytuowanej w filarze działowym między jazem a elektrownią. W elektrowni pracuje sześć hydrozespołów Kaplana o łącznej mocy zainstalowanej 160,2 MW [86].



Ryc. 22. Moc elektrowni wodnych w Polsce (opracowanie własne za: [34])

Analizując sieć hydrograficzną (ryc. 23), można stwierdzić, że Polska posiada duży potencjał do budowy elektrowni wodnych, a w szczególności małych elektrowni wodnych, uwzględniając również dawne piętrzenia (często 1–2-metrowe) [87]. Realne jest osiągnięcie liczby elektrowni

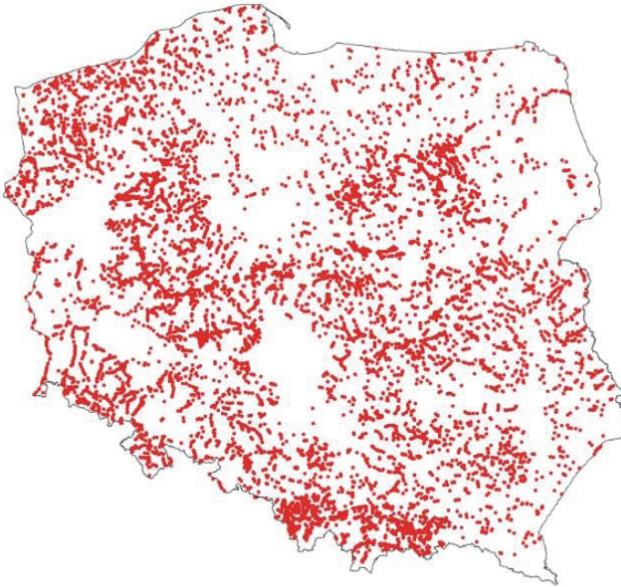
i młynów wodnych sprzed II wojny światowej (nawet 20 tys.). Pozwoliłoby to w pewnym stopniu pokryć potrzeby energetyczne Polski.



Ryc. 23. Sieć hydrograficzna Polski (opracowanie własne za: [87])

W Polsce wykorzystanie zasobów energii wodnej kształtuje się na poziomie jedynie 12%, dla porównania Niemcy korzystają z nich w 80%, Norwegia w 84%, Francja zaś – w prawie 100%. Wdrożenie nowych technologii, np. turboregulatorów umożliwiających produktywnie wykorzystanie wód powodziowych lub jazów powłokowych pozwalających na podpiętrzanie wody bez konieczności prowadzenia poważnych prac hydrotechnicznych, może przynieść dodatkowe zyski energetyczne, a także w wielu przypadkach znacznie obniżyć koszty inwestycji [88].

Według danych Krajowego Zarządu Gospodarki Wodnej (KZGW) [89], liczba obiektów piętrzących w Polsce wynosi około 16 tys. (ryc. 24).



Ryc. 24. Lokalizacja obiektów piętrzących wg KZGW [89]

3. Hydroenergetyka w województwie warmińsko-mazurskim

W województwie warmińsko-mazurskim na koniec 2019 r. pracowało 76 elektrowni wodnych o łącznej mocy 15,115 MW [34].

Również 76 elektrowni wodnych podaje redakcja czasopisma „Energetyka Wodna” [90], w tym:

- 44 – o mocy poniżej 100 kW,
- 28 – o mocy większej lub równej 100 kW, ale poniżej 1 MW,
- 4 – o mocy większej lub równej 1 MW.

Największą elektrownią wodną w województwie warmińsko-mazurskim jest EW Pierzchały (pow. braniewski), o mocy 3,3 MW [91]. Elektrownia usytuowana jest na rzece Pasłęka, w rezerwacie objętym programem NATURA 2000. Obiekt hydrologiczny został wybudowany na lewym zboczu doliny rzeki w latach 1913–1916. Celem powstania elek-

trowni było zasilenie w energię elektryczną elbląskiej stoczni oraz prawdopodobnie stworzenie w niej laboratorium do badania turbin wodnych. Elektrownia w czasie działań wojennych nie uległa zniszczeniu i jesienią 1945 r. zasiłała w energię elektryczną miasto Elbląg [91].

W EW Pierzchały są zainstalowane trzy hydrozespoły z podwójnymi turbinami Francisa (tzw. bliźniacze) o przepływie wody wynoszącym 11 m³/s każdy. Turbiny sprzężone są bezprzekładniowo z generatorami synchronicznymi o łącznej mocy 2,64 MW. Spad elektrowni w aktualnych warunkach piętrzenia wynosi 14 m. Woda od jazu piętrzącego do turbin doprowadzana jest kanałem derywacyjnym o długości 1270 m. Elektrownia pracuje w systemie przepływowym. Wielkość produkcji energii elektrycznej zależna jest od aktualnych warunków hydrologicznych występujących na stopniu [91].

W EW Pierzchały kompleksowo zmodyfikowano część hydrotechniczną i energetyczną elektrowni, zachowując unikatowe walory architektoniczne obiektu. Z uwagi na bardzo duży zakres prac, kompleksowa modernizacja części elektroenergetycznej, automatyki oraz elementów hydrotechnicznych była rozłożona na kilka etapów. Prace rozpoczęto w 2014 r. Najpierw przeniesiono nastawnię i pomieszczenia dyżurne do nowego pomieszczenia, zainstalowano nowoczesne regulatory obrotów turbin oraz regulatory napięcia, wraz z układami automatycznej synchronizacji. W 2016 r. przystąpiono do najważniejszego etapu modernizacji części energetycznej – do przebudowy układów pierwotnych wyprowadzenia mocy. Zakres prac obejmował zainstalowanie trzech niezależnych transformatorów blokowych w miejsce wysłużonego transformatora – wspólnego dla wszystkich hydrozespołów. Nowe transformatory zainstalowano w budynku elektrowni, jednocześnie usunięto dotychczasowe stanowisko olejowego transformatora blokowego. W miejsce starej rozdzielni 10,5 kV zamontowano nowoczesną 7-polową rozdzielnię 15 kV typu D-24 z wyłącznikami próżniowymi. Wymienione zostały wszystkie kable w obwodzie pierwotnym i wtórnym, zainstalowano nowe cyfrowe zabezpieczenia podstawowej i rezerwowej linii wyprowadzenia mocy [91,92].

Elektrownia Wodna Kasztanowo (pow. lidzbarski) (ryc. 25) to mała elektrownia wodna, która powstała w 1902 r. na bazie budowli piętrzących

rzeki Pasłęki, przy granicy gminy Lubomino, około 100 m na północ od wsi Pityny. Po całkowitym zniszczeniu w latach 1944–1950 została odbudowana i uruchomiona 19 września 1989 r. [93,94].

Siłą napędową obiektu Kasztanowo jest wolnobieżna turbina wodna Francisa firmy Voith z 1901 r. Turbina, poddana kapitalnemu remontowi, pracuje obecnie z wysokosprawnym generatorem asynchronicznym o mocy znamionowej 90 kW. MEW Kasztanowo jest siłownią wodną przepływową z derywacją kanałową o niskim spadzie użytecznym. Obiekt wyposażony jest w przepławkę dla ryb na jazie roboczym elektrowni (kanał kaskadowy o świetle – 0,53 m). Wolumen oddawanej produkcji rocznej zależy od stanu wód rzeki Pasłęki i wynosi 400 do 500 MWh energii elektrycznej [93,94].

Elektrownia Wodna Kasztanowo (ryc. 25) zlokalizowana jest na terenie administracyjnym rezerwatu przyrody „Ostoja bobrów na rzece Pasłęce” oraz w granicach Obszaru Chronionego Krajobrazu Doliny Pasłęki. Tereny te objęte są obszarem specjalnej ochrony ptaków „Dolina Pasłęki” oraz specjalnym obszarem ochrony siedlisk „Rzeka Pasłęka” (NATURA 2000). Elektrownia uwzględniona jest w wykazie Europejskiego Centrum Energii Odnawialnej [93,94].



Ryc. 25. Logo Elektrowni Wodnej „Kasztanowo” (fot. H. Janowiak) [94]

W Wojdytach (pow. lidzbarski) zbudowano elektrownię wodną na Łynie [95,96]. Jest to jedna z pięciu MEW na tej rzece. Oddano ją do użytku w listopadzie 2002 r. Jest ona pierwszym stopniem projektowanego systemu MEW między Lidzbarkiem Warmińskim a granicą państwa w Stopkach. Kolejne stopnie wodne miały powstać w Kotowie, Ardapach, Bartoszycach, Szylinie i Smolance. Do tej pory zbudowano MEW w Kotowie (lipiec 2010 r.). Stopień wodny w Wojdytach piętrzy wody Łyny na wysokość około 4 m. Powstały wskutek tego zbiornik wodny ma powierzchnię około 30 ha. W elektrowni pracują dwie bezobsługowe turbiny o mocy 300 kW każda, wykorzystując wodę płynącą rzeki. Przeciętny przepływ wynosi 18,5 m³/s, jednak ze względów bezpieczeństwa tama elektrowni przystosowana jest do przepływu nawet 200 m³ wody na sekundę. Możliwa osiągalna moc czynna obiektu wynosi 540 kW. Nowością na progach piętrzących jest zastosowanie jazu gumowego napełnianego wodą rzeczną, z automatycznym układem sterującym, utrzymującym zadany poziom wody. W celu zapewnienia ciągłości pracy elektrowni wybudowano urządzenia samoczyszczące kraty wlotowe wody do komory turbiny. Umożliwiają one czyszczenie krat bez wyłączania turbiny [95,96].

Elektrownia w Ołowniku (pow. węgorzewski) została wybudowana w latach 20. XX w. przez Niemców, którzy spiętrzyli wody dzięki zbudowaniu niewielkiego jazu. Elektrownia, która mieściła się w dużym murywanym budynku, po wojnie zaopatrywała w energię miejscowy majątek i pobliskie wsie. W czasie wojny została częściowo zniszczona. Do odbudowy przystąpiono w 1949 r., co w niedługim czasie zaowocowało przywróceniem produkcji energii. W połowie lat 70. XX w. elektrownię sprywatyzowano. Obiekt został wyłączony z eksploatacji, a zabytkowe urządzenia (generatory i turbiny z lat 1918 i 1920) wywiezione na złom. W roku 2002 r. nowy właściciel rozpoczął odbudowę. W 2004 r. ukończono remont, elektrownia wznowiła produkcję energii, a zalew przy obiekcie, utworzony przez zaporę spiętrzącą wodę na wysokość 5 m, tworzy jedno z najlepszych łowisk ryb na Mazurach [97].

Mała elektrownia wodna Samogowo (pow. olsztyński) to niezwykle malowniczy obiekt pracujący na 4-metrowym spiętrzeniu niewielkiej rzeki Jemiołówki [98]. Turbina Francisa z przełomu 1938/1939 roku, za spr-

wą wody przepływającej przez nią w ilości 0,23 m³/s, produkuje średnio 3-4 kW energii elektrycznej. Do roku 1962/1963 w tym miejscu działał młyn, który wykorzystywał naprzemiennie energię wytworzoną przez 500 mm turbinę Francisa bądź spalinowy silnik Diesla. W czasie pracy silnika gromadzono wodę do kolejnego cyklu pracy turbiny wodnej. Rozwiązanie takie zapewniało ciągłość pracy młyna przy odpowiedniej mocy napędu. W roku 1966 budynek młyna został rozebrany na cegłę rozbiórkową, a urządzenie sprzedano na złom. W roku 1987 działka wraz z pozostałymi fundamentami młyna, spiętrzeniem wodnym oraz komorą turbiny nabyta została przez prywatnego inwestora. Na pozostałościach młyna postawiono nowy budynek i wstawiono znacznie mniejszą, dostosowaną do warunków hydrologicznych rzeki turbinę Francisa. Od 1990 r. elektrownia dostarcza do sieci „zieloną energię” [98].

Mała elektrownia wodna Waplewo (pow. olszyński) zbudowana została w latach 1989/1990 na ruinach młyna wodnego. Do pracy wykorzystuje wody rzeki Marózki. Przed rokiem 1989 wysokość piętrzenia wynosiła tu 4 m, a na skutek pogłębienia dna zwiększono ją do 7 m. Średni przepływ wody wynosi 1 m³/s. Obecnie elektrownia jest wyposażona w jeden turbospół Francisa o średnicy wirnika 800 mm i mocy 45 kW. Turbina zbudowana została około 1910 r. i jest obecnie zamontowana w blaszanym, nitowanym kotle. Budynki elektrowni, z racji pierwotnego przeznaczenia również na inne cele, mają bardzo rozbudowane zaplecze socjalne, wykorzystywane obecnie przez jej właścicieli do celów prywatnych [98].

Mała elektrownia wodna Kurki (pow. iat olsztyński) to obiekt przebudowany, pracujący na niewielkim, dochodzącym do 2 m spadzie, wyposażony w turbinę Francisa z okresu międzywojennego. Turbina została umieszczona w blaszanym, nitowanym kotle, a woda jest do niej dostarczana za pośrednictwem kilkunastometrowej rury. Elektrownia jest usytuowana na rzece Marórze. Ciekawostką są niewątpliwie stawy hodowlane na dolnej wodzie elektrowni, w których w oddzielonych metalowymi kramami zbiornikach prowadzona jest między innymi hodowla pstrąga [98].

Na rzece Ełk, w miejscowości Nowa Wieś Ełcka (pow. ełcki), zbudowany został młyn wodny, który zaczął działać 15 czerwca 1953 r. [99]. Korzystał on z energii wodnej do napędu urządzeń poprzez dwie zainsta-

lowane turbiny. Po roku 1987 młyn przestał działać, a urządzenia piętrzące zostały rozebrane. W 1992 r. ponownie uruchomiono turbinę służącą do napędu wyremontowanego młyna. Poziom wody w jeziorze i rzece Ełk ustabilizował się, przynosząc szereg korzyści całemu środowisku naturalnemu.

Charakterystyka MEW w Nowej Wsi Ełckiej (ryc. 26):

- jaz piętrzący wodę zlokalizowany na rzece Ełk,
- ujęcie wody z upustem jałowym i upustem na elektrownię,
- wysokość piętrzenia: stałe 130/140 cm, ruchome 130/140 cm,
- pojemność utrzymywanego przez budowlę piętrzenia zbiornika wodnego 60 139 tys. m³,
- elektrownia przepływowa, wyposażona w turbinę Francisa o przepłyku 4 m³/s, napędzająca dwa generatory synchroniczne o mocy 40 kW [47,99].



Ryc. 26. Mała Elektrownia Wodna w Nowej Wsi Ełckiej [47]

Mała elektrownia wodna w Stradunach (pow. ełcki) powstała przed 1939 r. W budynku elektrowni wcześniej mieścił się młyn, wykorzystujący energię wodną do napędu maszyn.

Charakterystyka MEW w Stradunach:

- jaz piętrzący wodę, zlokalizowany na rzece Ełk,
- ujęcie wody z upustem jałowym i upustem na elektrownię,
- wysokość piętrzenia: stałe 130/160 cm, ruchome 130/160 cm,
- pojemność utrzymywanego przez budowle piętrzenia zbiornika wodnego 118 648 tys. m³,
- elektrownia przepływowa, wyposażona w turbinę Francisa o przepłyku 4 m³/s, napędzającą dwa generatory synchroniczne o mocy 40 kW [47,99].

Elektrownia wodna w Sypitkach (pow. ełcki) również powstała przed rokiem 1939. W budynku elektrowni wcześniej mieścił się młyn, wykorzystujący energię wodną do napędu maszyn. Dobrze zachowały się kamienne fundamenty z konstrukcją koryta odprowadzającego wodę z turbiny.

Charakterystyka MEW w Sypitkach:

- jaz piętrzący wodę zlokalizowany na rzece Małkiń,
- ujęcie wody z upustem jałowym i upustem na elektrownię,
- wysokość piętrzenia: stałe 153/163 cm, ruchome 153/163 cm,
- pojemność utrzymywanego przez budowle piętrzenia zbiornika wodnego 98 436 tys. m³,
- elektrownia przepływowa, wyposażona w turbinę śmigłową o przepłyku 3,76 m³/s, napędzająca cztery generatory synchroniczne o mocy 40 kW [99].

Elektrownia „Niewodnik I” (pow. kętrzyński) (ryc. 27) istnieje od 1989 r. na ruinach dawnego młyna wodnego z połowy XVI w., obecny układ hydrotechniczny ukształtowano na początku XX w., w elektrowni zainstalowano dwie turbiny śmigłowe o średnicy 395 i 700 mm, woda spada z wysokości 2,40 m. Elektrownia „Niewodnik II” (ryc. 28) powstała w 1994 r. i jest elektrownią z największą w województwie warmińsko-mazurskim różnicą poziomów wody – 9,00 m [100].



Ryc. 27. MEW Niewodnik I (dzięki uprzejmości K. Jabłońskiego i J. Stasińskiego)



Ryc. 28. MEW Niewodnik I (dzięki uprzejmości K. Jabłońskiego i J. Stasińskiego)

Elektrownia „Stachowizna” (pow. kętrzyński) (ryc. 29) powstała w 1992 r. na ruinach dawnego młyna wodnego z XVI w., obecny układ hydrotechniczny powstał na początku XX w., w elektrowni zainstalowano trzy turbiny śmigłowe, woda spada z wysokości 4,20 m [100].



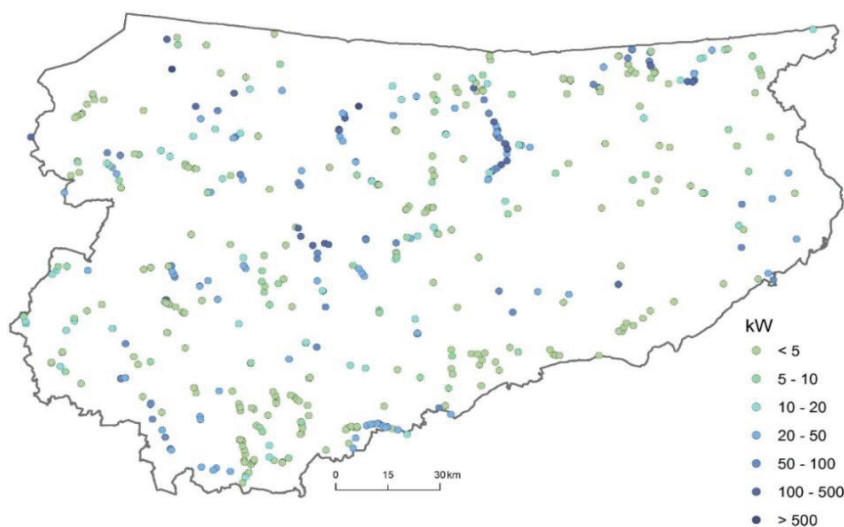
Ryc. 29. MEW Stachowizna (dzięki uprzejmości K. Jabłońskiego i J. Stasińskiego)

4. Ilość energii z hydroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim

W województwie warmińsko-mazurskim liczba istniejących piętrzeń wynosi:

- 230 piętrzeń, na których można postawić MEW o mocy poniżej 5 kW,
- 58 piętrzeń, na których można postawić MEW o mocy 5–10 kW,
- 49 piętrzeń, na których można postawić MEW o mocy 10–20 kW,
- 87 piętrzeń, na których można postawić MEW o mocy 20–50 kW,
- 43 piętrzenia, na których można postawić MEW o mocy 50–100 kW,
- 33 piętrzenia, na których można postawić MEW o mocy 100–500 kW,
- 2 piętrzenia, na których można postawić MEW o mocy powyżej 500 kW (ryc. 30).

Łączna teoretyczna moc elektryczna wszystkich piętrzeń wynosi 16,3 MW, co oznacza, że potencjał z wykorzystaniem już istniejących piętrzeń jest niewielki. Chcąc zwiększyć ten potencjał, należałoby podpiętrzać wodę.



Ryc. 30. Lokalizacja istniejących piętrzeń i moc możliwych do postawienia elektrowni wodnych w województwie warmińsko-mazurskim

5. Analiza SWOT hydroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim

W tabeli 7 przedstawiono analizę SWOT hydroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim.

Tabela 7. Analiza SWOT hydroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim [61,76]

Mocne strony	Słabe strony
<ul style="list-style-type: none"> - doświadczenie w obsłudze i eksploatacji elektrowni wodnych - stabilna produkcja energii elektrycznej - zwiększenie retencji wód powierzchniowych i gruntowych - oczyszczanie wód - małe elektrownie mogą być budowane w wielu miejscach, nawet na małych ciekach wodnych 	<ul style="list-style-type: none"> - konieczność piętrzenia lub budowy zbiorników wodnych przed elektrowniami - konieczność budowy przepławek - opór grup ekologicznych - skomplikowane i długotrwałe procedury przygotowania inwestycji - praca niektórych MEW uzależniona od poziomu wody w rzece
Szanse	Zagrożenia
<ul style="list-style-type: none"> - budowa małych elektrowni wodnych na byłych/obecnych piętrzeniach - udostępnianie zbiorników wodnych - poprawa bilansu hydrologicznego regionu - nowe kierunki rozwoju MEW 	<ul style="list-style-type: none"> - małe zainteresowanie inwestorów - niejasne przepisy prawne - postępujące zmiany klimatu

5.1. Mocne strony

Już w 1896 r. uruchomiono oficjalnie pierwszą w Polsce elektrownię wodną – Struga na Słupi [101]. Od tego czasu powstały w Polsce setki elektrowni wodnych; niektóre pracują już ponad 100 lat. Z całą pewnością należy stwierdzić, że hydroenergetyka to dobrze opanowana technologia, tym bardziej że obecnie wspierana jest m.in. przez Towarzystwo Rozwoju Małych Elektrowni Wodnych [102] czy Małe Elektrownie Wodne [103].

Elektrownie wodne, szczególnie zbiornikowe, zalicza się do w miarę stabilnych źródeł energii. Nawet w czasie suszy produkują energię elektryczną.

Do mocnych stron można zaliczyć fakt, że MEW są elementem systemu regulacji stosunków wodnych, poprawiają wilgotność gleb i poziom wód gruntowych. Współtworzą zatem, dzięki licznym podpiętrzeniom i zbiornikom retencyjnym, małą retencję wodną [83].

Małe Elektrownie Wodne nie tylko zapewniają retencję wody w środowisku, ale poprawiają również jakość wody, ponieważ oczyszczanie mechaniczne oraz natlenienie wody poprawia zdolność rzek do samooczyszczania biologicznego. Ponadto, z reguły hydroelektrownie dobrze wkomponowują się w krajobraz i uznawane są za najbardziej przyjazne człowiekowi źródło energii odnawialnej, gdyż nie powodują emisji jakichkolwiek gazów lub wytwarzania ścieków [104]. MEW mogą być budowane nawet na niewielkich ciekach wodnych, dostarczając energię pobliskim gospodarstwom rolniczym.

5.2. Słabe strony

Do słabych stron należy zaliczyć fakt, iż budowa dużych, zbiornikowych elektrowni powoduje konieczność przegradzania rzek. Wiąże się to z zalaniem znacznego obszaru, co z kolei implikuje przesiedlenia i protesty społeczne [101]. Każda elektrownia wodna musi mieć co najmniej przepławkę dla ryb, co podnosi koszty inwestycyjne.

Budowa elektrowni wodnych, w szczególności dużych, wiąże się z oporem grup ekologicznych. Argumentują one m.in., że przegradzanie rzek ma negatywny wpływ na populację ryb, a w szczególności na ryby dwuśrodowiskowe, czyli wędrujące do Bałtyku: węgorz, łosoś, troć. Jazy, zapory i stopnie wodne sprawiają, że na spiętrzonej odcinku rzeki w wodzie zachodzą procesy fizyko-chemiczne oraz biologiczne, które wpływają na zmianę warunków bytowania ryb, co pociąga za sobą przekształcenia w strukturze gatunkowej ichtiofauny. Krainy ryb łososiowatych zmieniają się w obszary występowania ryb karpiovatych. Reofilne gatunki rzeczne,

np. pstrąg potokowy, lipień, brzana, świnka, kleń, jelec, boleń czy jaź ustępują, a na ich miejsce wchodzą ryby typowe dla wód wolno płynących lub stojących – np. leszcz, płoć, krąp, okoń i inne [101].

Inwestor, który planuje budowę MEW, musi być uzbrojony w cierpliwość. Budowa elektrowni wiąże się z uzyskaniem wielu pozwoleń, co ciągnie się często miesiącami (a nawet latami) [101].

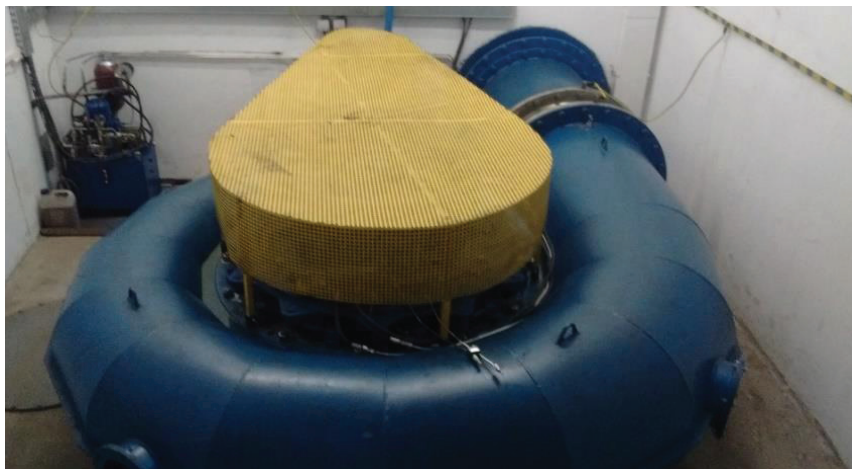
Kolejną słabą stroną jest fakt, że praca elektrowni wodnych przepływowych, a także zbiornikowych posiadających mały zbiornik jest bardzo mocno uzależniona od stanu wody w rzece. Długotrwała susza pociąga za sobą stopniowe obniżenie się poziomu wody, co powoduje spadek mocy elektrowni i mniejszą produkcję energii elektrycznej [101].

5.3. Szanse

Aby móc w pełni wykorzystać potencjał MEW w województwie warmińsko-mazurskim, należy elektrownie stawiać na byłych/obecnych piętrzeniach, a jest ich całkiem sporo. Jeszcze przed II wojną światową na Warmii i Mazurach pracowało kilkaset instalacji wodnych, a więc realne jest ich przywrócenie w formie MEW.

Budowa zbiorników przy elektrowni wodnej powinna wiązać się z udostępnianiem ich dla społeczności lokalnej do celów turystyczno-rekreacyjnych (co może zmniejszyć opór społeczny wobec jego budowy). Należy tak zaprojektować zbiornik, aby nadawał się do uprawiania sportów wodnych i wędkowania [101].

Szansą na rozwój MEW jest wykorzystanie wody odpadowej. Elektrownie tego typu są kwalifikowane jako małe elektrownie wodne pracujące przepływowo. Największe możliwości wykorzystania wody użytkowej występują w energetyce przy układach chłodniczych elektrowni ciepłych czy w oczyszczalniach ścieków. Przepływ strumienia wody użytkowej jest w niewielkim stopniu zależny od warunków pogodowych [101]. Przykładowo, instalacja MEW w oczyszczalni ścieków w Toruniu jest pionierskim rozwiązaniem, mającym na celu odzysk energii z oczyszczonej wody. „Sercem” hydroelektrowni jest turbina Francisa (ryc. 31).



Ryc. 31. Wnętrze hydroelektrowni w oczyszczalni ścieków w Toruniu (fot. B. Igliński)

5.4. Zagrożenia

Biurokracja, wysokie koszty inwestycyjne i niepewny zysk sprawiają, że jest stosunkowo niewiele inwestorów w MEW. Są to entuzjaści, posiadający często MEW z dziada pradiada.

Zarówno właściciele elektrowni wodnych [101], jak i eksperci OZE [105] uważają, że rozwój energetyki wodnej będzie nadal hamowany przez zbyt liczne, niejasne i zmieniające się prawo. Ważność niektórych dokumentów jest zbyt krótka, wobec czego nie zawsze są w stanie zebrać i przedłożyć wszystkie dokumenty w odpowiednim czasie. Nic więc dziwnego, że inwestorzy podchodzą z dużą rezerwą do budowania nowych elektrowni wodnych i w województwie warmińsko-mazurskim, i w całej Polsce. Co prawda przybywa ich, ale jest to kilka lub kilkanaście obiektów w ciągu roku.

Innym zagrożeniem są postępujące zmiany klimatu. Charakteryzują się one długimi okresami bezopadowymi, mającymi ogromny wpływ na pracę hydroelektrowni i produkcję energii elektrycznej. Z kolei ulewne deszcze i silne wiatry (orkany) mogą niszczyć infrastrukturę elektrowni wodnej.

Energetyka wiatrowa

Wiatr definiuje się jako poziomy ruch mas powietrza, w kierunku od wyżu do niżu. Pierwotnym tego powodem jest fakt, że promienie słoneczne ogrzewają pewien obszar powierzchni Ziemi bardziej niż sąsiednie. Przyczyn jest wiele, np. ciemniejszy kolor gleby powoduje silniejsze pochłanianie ciepła przez ląd. Powietrze znajdujące się nad nim zaczyna się nagrzewać, czyli rozszerza się. Masa tego powietrza będzie się rozpręstrzeniać w kierunku niższego ciśnienia, więc ku górze. Wypiętrzanie słupa powietrza powoduje jego przepływ górą nad sąsiednie obszary, gdzie następuje wzrost ciśnienia (powstaje wyż). Z kolei nad obszarem nagrzanym kształtuje się niż. Różnica ciśnień wywołuje wiatr [106].

Energia wiatru wykorzystywana jest przez człowieka od dawna, np. – obok promieni słonecznych – do suszenia płodów rolnych. Niewielu z nas zdaje sobie sprawę, że wielkie odkrycia geograficzne były możliwe właśnie dzięki energii wiatru, która „zasilała” żaglowce [107].

Egipcjanie już 2000 lat przed naszą erą wykorzystywali energię wiatru do napędu swoich łodzi. Z Kodeksu Hammurabiego (ok. 1750 r. p.n.e.) wynika, że energia wiatru była wykorzystywana również w Persji. W Indiach w IV w. p.n.e. powstał pierwszy opis zastosowania wiatraka do pompowania wody, a już w II w. p.n.e. w Chinach stosowano wiatraki w kształcie kołowrotów do nawadniania pól uprawnych. Na początku naszej ery wiatraki konstruowano w krajach basenu Morza Śródziemnego [108].

Pierwsze wiatraki europejskie pojawiły się w Anglii w IX w., we Francji w XI, a od XIII stulecia upowszechniły się w Europie Zachodniej. Najstarszy obraz wiatraka w Europie znajduje się na inicjale pierwszej

strony rękopisu angielskiego z 1270 r. Pierwotnie wiatrak był drewnianą „budką”, którą obracano wokół centralnie usytuowanego słupa, tak aby ustawić skrzydła na wiatr. Rewolucji w konstrukcji wiatraków dokonali Holendrzy, którzy w 1390 r. wprowadzili konstrukcje czteroskrzydłowe. Rozwój wiatraków typu „holender” (ryc. 32) przypadł w Europie na wiek XVII [108].



Ryc. 32. Wiatrak holender (fot. z archiwum MBL-PE w Olsztynku)

W roku 1745 angielski konstruktor Edmund Lee wprowadził w budowie wiatraka pomocnicze koło, kierujące automatycznie wiatrak w stronę wiatru. Największy rozkwit wiatraków nastąpił w połowie XIX w. W Europie pracowało wówczas około 200 tys. tego typu obiektów. Szacuje się, że młyny napędzane energią wiatru pracowały z łączną mocą około 1 TW. Pod koniec XIX stulecia rozwój maszyny parowej spowodował wyparcie napędu wiatrowego z wielu dziedzin życia gospodarczego, co przyczyniło się do zastoju w tej dziedzinie techniki. W tym czasie na terenie Danii

pracowało około 30 tys. młynów wietrznych, podobna ilość wiatraków była ówczesnie także w Holandii [109].

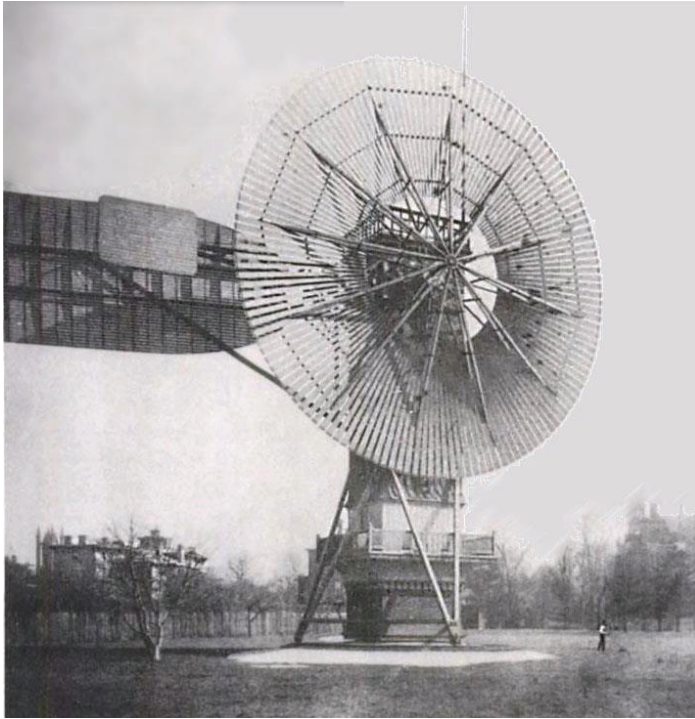
W Europie dość popularne były również koźlaki (szczególnie w Polsce) i paltraki (ryc. 33). Paltrak to typ wiatraka, w którym zasadniczą częścią są obracane wiatrem śmigła (skrzydła) poruszające urządzenia do mielenia ziarna. Paltrak (podobnie jak koźlak) obracany jest w całości wraz z maszynami na kierunek wiatru. Główny korpus opiera się na murowanej podstawie, którą widać pod spodem. Mechanizm paltraka (maszyna oraz mechanizm obrotu) oraz właściwości mielące (wydajność) są identyczne jak u koźlaka. Paltrak jest jednak konstrukcją solidniejszą i bardziej odporną na silny wiatr. Koźlak podparty jest na jednym słupie utrzymywanym przez kozioł, dlatego stosunkowo łatwo może być wywrócony, a osiowy słupek nośny złamany [108].



Ryc. 33. Wiatrak paltrak (fot. z archiwum MBL-PE w Olsztynku)

W czasie zimy 1887–1888 Charles F. Brush zbudował w Stanach Zjednoczonych pierwszą samoczynnie działającą siłownię wiatrową o mocy

12 kW, produkującą energię elektryczną. Jak na owe czasy turbina Brusha była imponująca: wirnik miał średnicę 17 m i składał się ze 144 łopat zrobionych z drzewa cedrowego (ryc. 34) [108].



Ryc. 34. Pierwsza turbina wiatrowa zbudowana przez Charlesa Brusha (autor zdjęcia nieznan, fot. z zasobów Wikipedii)

Konstrukcja Amerykanina dostarczała przez okres około 20 lat energii do ładowania akumulatorów znajdujących się w piwnicy jego posiadłości. W Europie pierwszy wiatrak do produkcji energii elektrycznej pojawił się w Danii w 1890 r. W 1940 r. uruchomiono tu pierwszą turbinę o mocy 1,25 MW. Duński pionier energetyki wiatrowej i aerodynamiki Poul la Cour odkrył, że znacznie wydajniejsze dla generatorów elektrycznych są wirniki o kilku łopatach. Energię elektryczną uzyskaną z siłowni

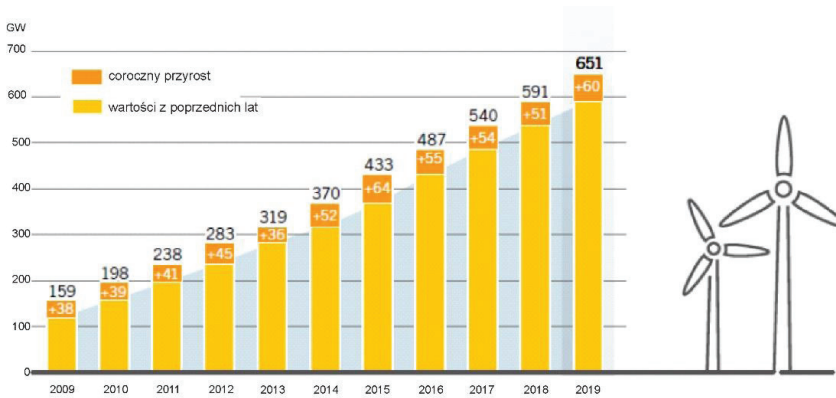
wiatrowych wykorzystywał on do procesu elektrolizy, z niego zaś otrzymywał wodór, który służył mu do oświetlania jego szkoły. Do 1940 r. Dania miała ponad 1300 działających generatorów wiatrowych. W tym samym czasie w USA zbudowano około 6 mln takich generatorów. Turbiny wiatrowe były w tamtych czasach jedynym dostępnym dla mieszkańców wsi źródłem elektryczności. W 1950 r. inżynier Johannes Juul jako pierwszy skonstruował siłownię wiatrową z generatorem prądu przemiennego [108,109].

Przemysł zainteresował się szerzej elektrowniami wiatrowymi na początku lat 80. XX w. Z inicjatywy duńskich zakładów energetycznych zdecydowano się na opracowanie turbiny o mocy 660 kW. Kolejne lata to rozstrzygnięcie wielu problemów technicznych związanych z konstrukcją generatora, wytrzymałością mechaniczną, doborem odpowiednich materiałów na wieże i skrzydła wirników. Ostatnie 20 lat to już prawdziwy rozkwit aeroenergetyki na świecie [108,109].

W wielu krajach pracują obecnie turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine). Uważa się, że jednym z prekursorów turbiny VAWT był Francuz Georges J.M. Darrieus, który opatentował ją w 1931 r. Turbina Darrieusa ma dwie lub trzy długie cienkie łopaty w kształcie pętli „C”, łączące się na górze i dole osi obrotu albo łopaty proste równoległe do osi obrotu. Najważniejszą zaletą turbin VAWT jest ich skuteczne działanie niezależnie od kierunku wiatru [110].

1. Aeroenergetyka na świecie

Energetyka wiatrowa odgrywa coraz większą rolę w światowej gospodarce. W latach 1995–2019 moc istniejących elektrowni wiatrowych zwiększyła się ponad 100-krotnie, osiągając w 2019 r. 651 GW (ryc. 35). Przyrost względem 2018 r. to ponad 51 GW [32]. Ponad połowa (27,5 GW) nowych mocy została zainstalowana w Chinach.



Ryc. 35. Moc aeroenergetyki na świecie [32]

2. Aeroenergetyka w Polsce

Historia państwa polskiego wiąże się nierozdzielnie z wykorzystywaniem energii odnawialnej w młynach wiatrowych i wodnych, na długo przed wykorzystaniem węgla. Gloger uważa, że młyny wietrzne przywędrowały do Polski z zachodu, a „kiedy to się stało nikt latami nie określi” [111]. Z kolei za wschodnim pochodzeniem wiatraków opowiadają się Małyszczycy [112], Sackiewicz [113] i Klaczyński [114]. Wszystko jednak wskazuje na to, że wiatraki przywędrowały do Polski z Europy Zachodniej. Świadczy o tym fakt, że kolejne wzmianki o młynach wietrznych mówią o kolejnych lokalizacjach, które „postępują” z zachodu na wschód. Ponadto XIV-wieczne wizerunki wiatraków w Polsce jednoznacznie przedstawiają typ wiatraka o poziomej osi, a zatem zachodnioeuropejski.

Pierwsze zezwolenie na budowę wiatraka w Polsce zostało wydane w 1271 r. przez księcia Wiesława z Rugii dla klasztoru w Białym Buku. Zapis z 1289 r. książąt pomorskich na rzecz cystersek w Szczecinie wyraźnie informuje o istniejącym wiatraku, także kolejne wzmianki – z 1303 r. o wiatrakach w Kobylinie (Wielkopolska) i Wschowie – z 1325 r. Z XIV w. pochodzą również pierwsze w Polsce wizerunki wiatraków. Jeden z nich znajduje się na pieczęci sygnetowej przywieszanej do dokumentu z 1382 r. [108].

W XIV i XV stuleciu wiatraki były już powszechnie znane na ziemiach północnej i środkowej Polski. Na południu kraju pojawiły się o wiele później, bo w XVII w. W następnym stuleciu młyny na dobre zadomowiły się w krajobrazie wsi polskiej, zwłaszcza w okolicach Poznania, na północnym Śląsku, Kujawach, Mazurach i ziemi lubuskiej [108].

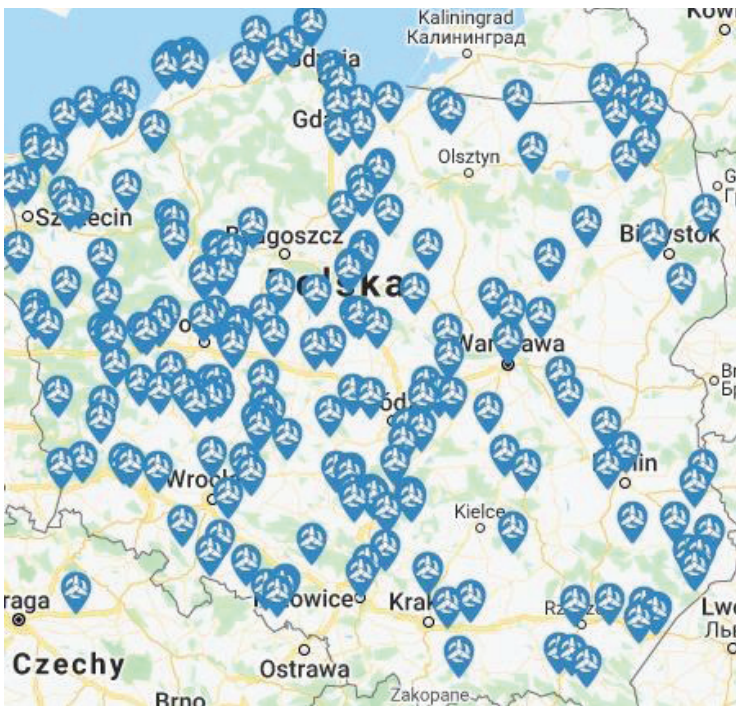
Najstarszym typem wiatraka występującym na ziemiach polskich jest wiatrak koźłowy, czyli wspomniany „koźlak” (ryc. 36). Stawiano je już w pierwszej połowie XIV w. na Kujawach i w Wielkopolsce, natomiast rozpowszechnienie ich stosowania przypada na wiek XV. Koźlaki stanowiły najliczniejszą grupę wiatraków i bez zmian konstrukcyjnych dotrwały do XX w. Ich cechą charakterystyczną było to, że cały budynek wiatraka wraz ze skrzydłami był obracalny wokół pionowego, drewnianego słupa, tzw. sztembra. Sztember podparty był najczęściej czterema zastrzałami, a jego dolne zakończenie tkwiło w dwóch krzyżujących się podwalinach. Tak skonstruowane podparcie budynku wiatraka nosiło nazwę koźła. Z tylnej (przeciwnej skrzydłom) ściany wiatraka wystawał specjalny dyszel współpracujący z kołowrotem, za pomocą którego następowało nastawianie budynku skrzydłami do kierunku wiatru [109].



Ryc. 36. Wiatrak koźlak (fot. z archiwum MBL-PE w Olsztynku)

Łączna moc aeroenergetyki w Polsce to 5,2 GW, przy czym silnie rozwija się w województwie pomorskim, kujawsko-pomorskim, wielkopolskim i zwłaszcza w zachodniopomorskim [34,115]. Rokroczny wzrost na skutek ustawy odległościowej jest niewielki – kilkadziesiąt MW rocznie.

Na rycinie 37 przedstawiono lokalizację największych farm wiatrowych w Polsce [116,117].



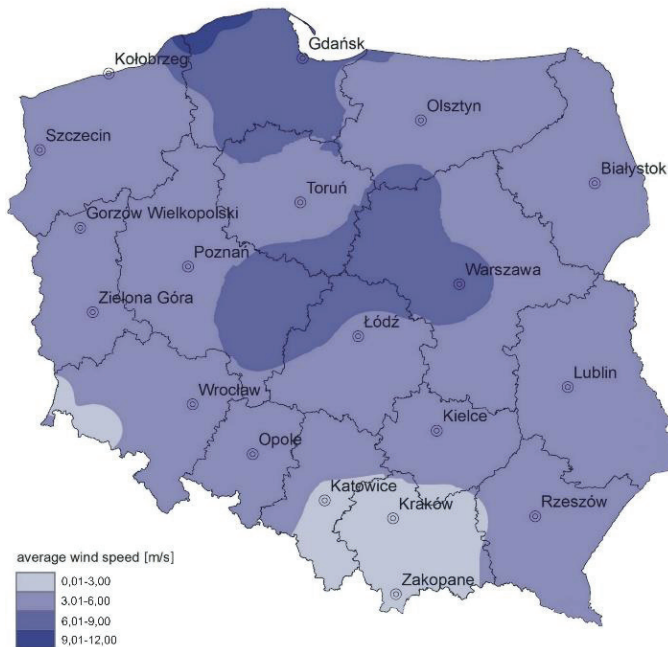
Ryc. 37. Lokalizacja farm wiatrowych w Polsce [116,117]

W latach 2005–2015 głównym systemem wsparcia energetyki wiatrowej był system zielonych certyfikatów. Od roku 2015 funkcjonuje system aukcyjny, w którym wytwórcy energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii mogą licytować energię elektryczną. Aukcję wygrywają uczestnicy, którzy zaoferowali najniższą cenę sprzedaży energii i których oferty łącznie nie przekroczyły 100% wartości lub ilości energii określonej

w ogłoszeniu o aukcji i 80% ilości energii elektrycznej objętej wszystkimi złożonymi ofertami. Wsparcie udzielane jest na 15 lat, a wylicytowana kwota jest indeksowana co roku średniorocznym wskaźnikiem wzrostu cen i usług [61].

3. Aeroenergetyka w województwie warmińsko-mazurskim

Patrząc na mapę prędkości wiatru na wysokości 140 m (ryc. 38), należy stwierdzić, że województwo warmińsko-mazurskie ma korzystne i bardzo korzystne warunki do rozwoju aeroenergetyki. I rzeczywiście, energetyka wiatrowa rozwija się dość dobrze – w województwie na koniec 2019 r. pracowały łącznie 43 turbiny/farmy wiatrowe o łącznej mocy 356,985 MW [34].



Ryc. 38. Prędkość wiatru na wysokości 140 m (opracowanie własne)

Zdecydowana większość (78%) mieszkańców województwa warmińsko-mazurskiego widzi potencjał, jaki ich regionowi może przynieść inwestycja w energetykę wiatrową [118]. Najczęściej respondenci wskazują następujące korzyści z wdrożenia takich inwestycji: korzyści dla środowiska (65%), wzrost dochodów gmin z podatków płaconych przez inwestora (51%) oraz spadek bezrobocia (46%). Z badań wynika, że mieszkańcy gmin z farmami wiatrowymi w porównaniu do ogółu mieszkańców dostrzegają znacząco więcej korzyści związanych z budową elektrowni wiatrowych. Zdecydowana większość respondentów (87%) jest zdania, że elektrownie wiatrowe są dobrym źródłem energii [118].

Farma wiatrowa Korsze (pow. kętrzyński), choć mniejsza od tej w Margoninie, nadal jest jedną z największych działających w Polsce farm wiatrowych [119]. Składa się z 35 turbin wiatrowych typu Gamesa G90 o nominalnej mocy 2 MW każda. Łączna moc zainstalowana farmy wiatrowej Korsze wynosi zatem 70 MW. Turbiny G90 to nowoczesne turbiny wiatrowe o rurowej konstrukcji wieży, z gondolą mieszczącą cały sprzęt mechaniczny i elektryczny niezbędny do przetwarzania energii wiatrowej w energię elektryczną. Turbiny postawione na terenie farmy mają wysokość 100 m, a średnica ich wirników wynosi 90 m. Energia elektryczna wytwarzana przez turbiny przesyłana jest kablami podziemnymi do stacji transformatorowej (ST) oraz podziemną linią wysokiego napięcia (PLWN) między ST farmy wiatrowej a ST operatora sieci dystrybucyjnej na przedmieściach Korsz. Trasy kablowe przebiegają w większości wzdłuż istniejących dróg śródpolnych i publicznych. Turbiny obsługiwane są automatycznie i nie wymagają stałej obecności personelu na terenie farmy. Jednakże, w celu serwisowania i konserwacji, niezbędny jest dostęp do poszczególnych turbin. Dlatego też turbiny połączone są z siecią dróg publicznych drogami dojazdowymi, mającymi place manewrowe. Na terenie gminy Korsze powstaje kolejna inwestycja „zielona” Korsze III, docelowo 15 sztuk turbin wiatrowych o łącznej mocy 37,5 MW. Inwestorem tej inwestycji, jak i poprzednich – Korsze I i Korsze II, jest EDP Renewables. Prace budowlane już się rozpoczęły, a ich zakończenie zaplanowane jest na rok 2020. Obecnie

prace polegają na zalewaniu fundamentów i przygotowaniu infrastruktury drogowej do transportu wielkogabarytowego ładunku. Inwestor planuje uruchomienie pierwszej siłowni wiatrowej do końca tego roku. Elektrownie wiatrowe zlokalizowane będą w okolicach miejscowości Gudziki, Płutniki i Chmielnik. Wysokość turbiny będzie wynosiła 125 m, a średnica wirnika 114 m, moc pojedynczej turbiny to 2,5 MW, producent Siemens Gamesa. Uruchomienie kolejnych siłowni wiatrowych w gminie Korsze przełoży się na korzyści dla lokalnej społeczności, m.in. dodatkowe wpływy do budżetu gminy i domowych budżetów właścicieli działek, na których budowane są kolejne elektrownie wiatrowe [119].

Farma wiatrowa Kisielice (pow. iławski) uruchomiona została w grudniu 2006 r. Składa się z 21 elektrowni wiatrowych o mocy 1,520 MW oraz sześciu elektrowni wiatrowych o mocy 1,545 MW każda. Łączna moc farmy to 41,190 MW [120].

Farma wiatrowa Gołdap składa się z 16 elektrowni Vestas V90 3 MW o wysokości 105 m. Łączna moc farmy wynosi 48 MW. Farma wiatrowa Gołdap podłączona jest do sieci wysokiego napięcia za pomocą stacji transformatorowej GPO Wronki [121].

W okolicach miejscowości Krasin (pow. elbląski) zlokalizowane są dwie siłownie wiatrowe – jedna o mocy 0,9 MW, druga zaś o mocy 1 MW. Energia elektryczna niskiego napięcia wytworzona przez turbinę przesyłana jest do transformatora wyjściowego nn/SN, który podnosi napięcie do średniego. Następnie energia elektryczna średniego napięcia zostaje przesłana podziemną linią kablową do zacisków prądowych linii napowietrznej 15 kV, na rozłączniku słupowym [122].

W województwie warmińsko-mazurskim można oczywiście spotkać pojedyncze turbiny – na rycinie 39 elektrownia napotkana w drodze do Pizsa.



Ryc. 39. Turbina wiatrowa w okolicach Pizsa (fot. B. Igliński)

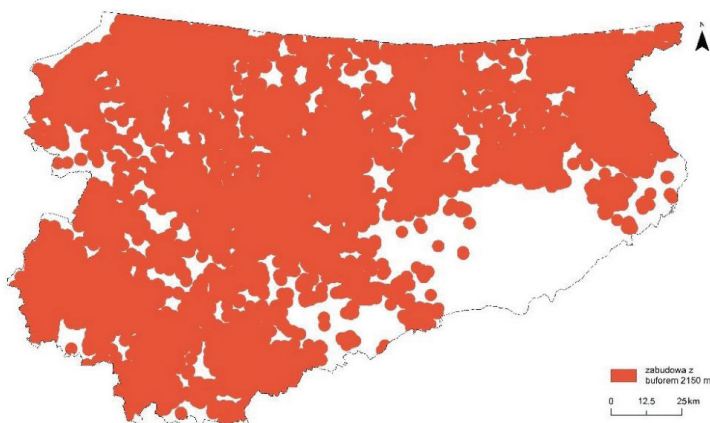
4. Ilość energii z aeroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim

Obliczono potencjał techniczny aeroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim. Założono, że stawiane będą turbiny 140-metrowe, czyli że ich wysokość wraz ze śmigłem wyniesie 215 m. Według „ustawy odległościowej” [123], turbina musi stać w odległości równej co najmniej 10-krotności wysokości (czyli w tym przypadku w odległości co najmniej

2150 m) od budynków mieszkalnych oraz od wybranych form ochrony przyrody (parki narodowe, parki krajobrazowe, rezerваты przyrody i obszary NATURA 2000) i leśnych kompleksów promocyjnych [123].

4.1. Zabudowa mieszkalna wraz z buforem 2150 m

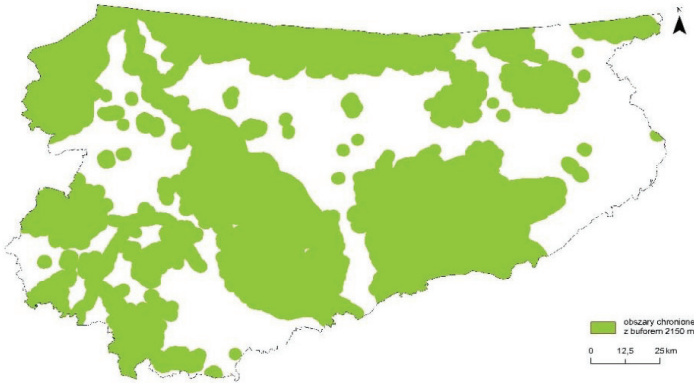
Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w województwie warmińsko-mazurskim, z uwzględnieniem strefy buforowej 2150 m od zabudowy mieszkalnej, wynosi 5147 km² (ryc. 40).



Ryc. 40. Zabudowa z buforem 2150 m

4.2. Formy ochrony przyrody i leśne kompleksy promocyjne wraz z buforem 2150 m

Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w województwie warmińsko-mazurskim, z uwzględnieniem strefy buforowej 2150 m od takich form ochrony przyrody jak parki narodowe, parki krajobrazowe, rezerваты przyrody i obszary NATURA 2000, oraz od leśnych kompleksów promocyjnych, wynosi 9637 km² (ryc. 41).



Ryc. 41. Obszary chronione z buforem 2150 m

4.3. Lasy wraz z buforem 200 m

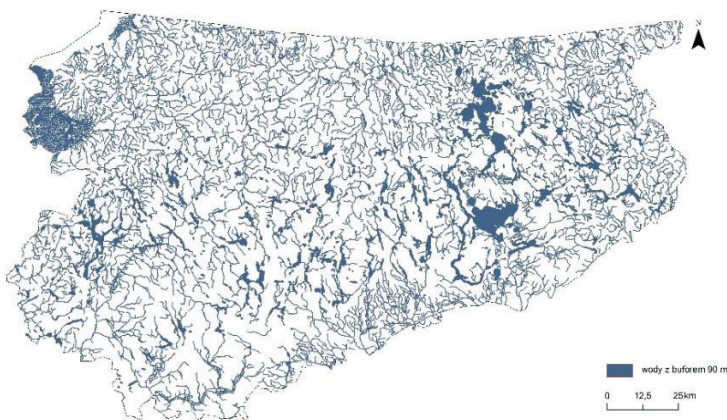
Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w województwie warmińsko-mazurskim, z uwzględnieniem strefy buforowej 200 m od lasów (warunek wynikający z konieczności ochrony nietoperzy [61]) wynosi 11 166 km² (ryc. 42).



Ryc. 42. Lasy z buforem 200 m

4.4. Wody powierzchniowe wraz z buforem 90 m

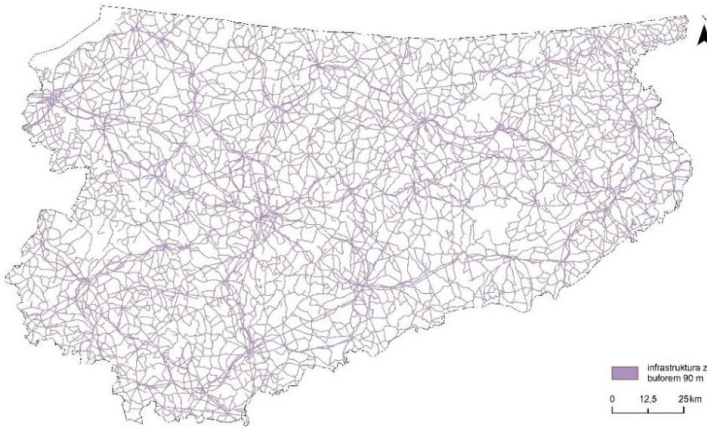
Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w województwie warmińsko-mazurskim z uwzględnieniem sieci hydrograficznej i strefy buforowej 90 m (długość śmigła 75 m powiększona o dodatkowe 15 m) od wód powierzchniowych [61] wynosi 20 067 km² (ryc. 43).



Ryc. 43. Wody powierzchniowe z buforem 90 m

4.5. Infrastruktura wraz z buforem 90 m

Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w województwie warmińsko-mazurskim, z uwzględnieniem sieci infrastruktury i strefy buforowej 90 m (długość śmigła 75 m powiększona o dodatkowe 15 m) [61] wynosi 20 865 km² (ryc. 44).



Ryc. 44. Infrastruktura z buforem 90 m

4.6. Sumaryczny obszar dostępny dla rozwoju aeroenergetyki

Biorąc pod uwagę wszystkie kryteria ograniczające, powierzchnia obszarów dostępnych to 245 km², tj. 1,0% terytorium województwa warmińsko-mazurskiego (ryc. 45).



Ryc. 45. Obszar dostępny dla rozwoju aeroenergetyki

4.7. Metodyka obliczania ilości energii z aeroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim

Energia kinetyczna ruchu powietrza E_k [J] o masie m [kg] poruszającego się z prędkością v [m/s] określona jest znanym z mechaniki klasycznej wzorem:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2, \quad (12)$$

podczas gdy moc powietrza P_w przepływającego w czasie t wynosi:

$$P_w = \frac{E_k}{t} \quad (13)$$

Biorąc pod uwagę, że masa powietrza o gęstości ρ przepływającego w czasie t przez powierzchnię S (np. powierzchnię zakreślaną przez łopaty wirnika, tj. tzw. koło wiatrowe) jest równa:

$$m = \rho \cdot S \cdot v \cdot t \quad (14)$$

to otrzymuje się wyrażenie na moc powietrza przepływającego przez koło wiatrowe:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3. \quad (15)$$

Gęstość powietrza jest uzależniona od aktualnych parametrów pogody, tj. temperatury i ciśnienia. Do obliczeń zwykle przyjmuje się średnią gęstość powietrza $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$. Równanie (16) przedstawia energię kinetyczną wiatru przepływającego przez jednostkową powierzchnię prostopadłą do kierunku wiatru w czasie t :

$$P_w = 0,625v^3. \quad (16)$$

W celu obliczenia, ile energii można pozyskać z turbin wiatrowych, wykorzystano dane godzinowe odnośnie do prędkości wiatrów uzyskane z IMGW. Przydzielono je do zbiorów: 0 m/s, 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s itd. Przyjęto, że energetyczne wykorzystanie wiatru zaczyna się od 3 m/s, pełną moc turbina osiąga zaś przy 10 m/s. Przy prędkości 25 m/s i większej turbina jest wyłączana i nie jest produkowany prąd elektryczny. Do analizy wzięto dane ze stacji meteorologicznych w Elblągu, Mikołajkach i Kętrzynie. Przyjęto, że turbiny zostaną postawione na 50% dostępnego obszaru.

Ilość energii z aeroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 7,3 PJ, czyli 2,05 TWh.

Według Wiśniewskiego i współpracowników [74] potencjał ekonomiczny energii wiatru w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 7 GW. Co więcej, na terenie województwa może pracować 1,5 tys. turbin do 10 kW. W warunkach krajowych, biorąc pod uwagę koszty i system wsparcia, małe elektrownie wiatrowe są jedną z najbardziej obiecujących technologii generacji rozproszonej i mikrogeneracji. Są elementem budowy mikrosieci, inteligentnych sieci energetycznych i prosumenckiego filaru generacji rozproszonej, zwłaszcza w rolnictwie.

5. Analiza SWOT aeroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim

W tabeli 8 przedstawiono analizę SWOT aeroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim.

Tabela. 8. Analiza SWOT aeroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim [61,76]

Mocne strony	Słabe strony
<ul style="list-style-type: none"> - dobre warunki wietrzności zwłaszcza w północnej części regionu - duże zainteresowanie inwestorów - dobrze opanowana technologia - wsparcie finansowe, w tym zielone certyfikaty i aukcje - obowiązek zakupu energii 	<ul style="list-style-type: none"> - ustawa odległościowa - duża powierzchnia województwa objęta obszarami NATURA 2000 oraz innymi formami ochrony - skomplikowane, długotrwałe procedury przygotowania inwestycji

Cd. tab. 8

Mocne strony	Słabe strony
	<ul style="list-style-type: none"> - brak akceptacji niektórych grup społecznych dla dużej energetyki wiatrowej - ograniczone możliwości przyłączenia do sieci energetycznych - ingerencja w krajobraz dużych elektrowni wiatrowych
Szanse	Zagrożenia
<ul style="list-style-type: none"> - rozwój polskiego przemysłu aeroenergetyki - wejście na rynek lokalnych producentów i dystrybutorów małych siłowni wiatrowych - zainteresowanie lokalnych inwestorów małą energetyką wiatrową - rozwój społeczeństwa prosumenckiego 	<ul style="list-style-type: none"> - zmiany klimatu - trudności z uzyskaniem niektórych metali do produkcji turbin - brak jasnej polityki energetycznej

5.1. Mocne strony

Do mocnych stron aeroenergetyki można zaliczyć fakt, że województwo warmińsko-mazurskie ma dobre warunki wietrzne, zwłaszcza w północnej jego części, a co za tym idzie – duży potencjał teoretyczny energii z wiatru [61,76].

Energetyka wiatrowa, nawet wobec ustawy odległościowej, cieszy się dużym zainteresowaniem wśród inwestorów. Przyczyniają się do tego: znaczne zyski z inwestycji, wzorowanie się na innych właścicielach siłowni lub farm wiatrowych oraz chęć ochrony środowiska [61,76].

Producenci energii z wiatru w województwie warmińsko-mazurskim mają bogate doświadczenie – od ponad dwóch dekad pracują tam siłownie wiatrowe.

Uruchomione do końca czerwca 2016 turbiny wiatrowe mogą liczyć na wsparcie finansowe w postaci zielonych certyfikatów. Nowa ustawa [124] wprowadza aukcje w miejsce dotychczas stosowanych certyfikatów. Co więcej, sprzedawca zobowiązany jest do zakupu energii elektrycznej z nowo budowanych instalacji odnawialnego źródła energii od wytwórcy energii z mikroinstalacji po określonej stałej cenie jednostkowej. Gwaran-

towana cena zakupu energii elektrycznej wpływa pozytywnie na rozwój mikroinstalacji wiatrowych.

5.2. Słabe strony

Wprowadzona w 2016 r. ustawa odległościowa [123] praktycznie zahamowała rozwój aeroenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim.

Do słabych stron można zaliczyć fakt, że inwestor zainteresowany aeroenergetyką w województwie musi wykazać się dużą cierpliwością i samozaparciem. Bariery, jakie napotyka, związane są z długim i skomplikowanym procesem inwestycyjnym, którego powodzenie zależy nie tylko od kompetencji i determinacji inwestora, ale także od przychylności władz lokalnych oraz organizacji samorządowych i ekologicznych [108].

Znaczny obszar województwa warmińsko-mazurskiego zajmuje NATURA 2000 i inne formy ochrony przyrody, co implikuje, że na obszarach tych (jak również obszarach przyległych) nie mogą być stawiane turbiny wiatrowe.

Aby uzyskać pozwolenie na budowę elektrowni wiatrowej, konieczne jest uzyskanie decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach, w ramach której może zostać stwierdzony wymóg przeprowadzenia procedury oceny oddziaływania na środowisko. Posiadając prawomocną decyzję o środowiskowych uwarunkowaniach, inwestor może wystąpić o wydanie decyzji o warunkach zabudowy lub – w przypadku, gdy na terenie objętym wnioskiem obowiązuje miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego – niemalże od razu o pozwolenie na budowę [108].

Budowa elektrowni wiatrowych wiąże się często z oporami grup ekologicznych, podkreślających negatywne oddziaływanie turbin na człowieka, faunę i krajobraz [108].

Inwestorzy chcący rozwijać aeroenergetykę w województwie warmińsko-mazurskim mają coraz większe problemy z przyłączeniem instalacji do sieci elektroenergetycznej. Ma to związek ze złym stanem sieci elektroenergetycznej, jak i ze zbyt wieloma dotychczas wydanymi pozwoleniami na przyłączenie, z których wiele jest tylko „wirtualnych” (na papierze) [125].

Elektrownie wiatrowe jako urządzenia wysokie (coraz częściej ponad 100 m), o kolorze kontrastowym w stosunku do tła nieba oraz powierzchni ziemi z różnymi formami jej użytkowania, w dodatku poruszające się, wpływają na krajobraz. Większość przypadków, w których uważa się, że elektrownie wiatrowe w znaczący sposób zaszkodziły walorom krajobrazowym terenu, związanych jest z błędami lokalizacyjnymi popełnianymi w początkowej fazie rozwoju aeroenergetyki w Polsce. Często efektem tego jest nagromadzenie na stosunkowo małym obszarze wielu elektrowni różnych typów i wysokości, rozmieszczonych w sposób nieregularny, co tworzy subiektywne poczucie „bałaganu” przestrzennego [125].

5.3. Szanse

Ze względu na powolny i hamowany barierami administracyjnymi rozwój energetyki wiatrowej w Polsce (jak i w województwie warmińsko-mazurskim) nie rozwinęła się produkcja kompletnych turbin wiatrowych. Istnieje za to stosunkowo znacząca i dysponująca dużym potencjałem rozwojowym produkcja i dystrybucja małych turbin wiatrowych [61,76].

Przewiduje się że w najbliższych latach coraz większą popularnością będą cieszyć się małe, przydomowe elektrownie wiatrowe o mocy kilku/kilkunastu kW. Będą one współpracować z panelami fotowoltaicznymi, pompą ciepła i akumulatorem, dzięki czemu taki budynek będzie zero- lub plus-energetyczny. Nadmiar energii elektrycznej zostanie wykorzystany do zasilenia samochodu elektrycznego bądź sprzedany do sieci. W ten sposób rozwinie się społeczeństwo prosumenckie, które będzie producentem i konsumentem energii [61,76].

5.4. Zagrożenia

Postępujące zmiany klimatu pociągają za sobą coraz częstsze występowanie gwałtownych zjawisk pogodowych, jak orkany, gradobicia czy trąby

powietrzne. Zjawiska te mogą negatywnie wpływać na pracę czy wręcz niszczyć turbiny i sieć energetyczną [61,76].

Do zagrożeń należy dodać trudności z uzyskaniem niektórych metali do produkcji turbin – by to ograniczyć, należałoby wprowadzić pełny recykling turbin wiatrowych.

Ostatnie miesiące przynoszą co chwila nowe informacje na temat wizji przyszłości energetyki w Polsce. Dużo się mówi o energetyce jądrowej, nowych elektrowniach węglowych, po czym zmienia się stanowisko o 180 stopni i decyduje, że elektrownia jądrowa nie powstanie, a elektrownia w Ostrołęce będzie ostatnią elektrownią węglową (a może gazową) w Polsce. Brak jasnych planów co do przyszłości energetyki w Polsce negatywnie wpływa na każdy sektor energetyki, w tym sektor aeroenergetyki.

Energetyka słoneczna

Życie na Ziemi zawdzięczamy naszej gwiazdzie. Energię słoneczną można nazwać „motorem życia” dla organizmów żywych. W biochemicznym procesie fotosyntezy rośliny generują biomasę, będącą podstawą cyklu pokarmowego [126]. W uproszczonej formie sumaryczny przebieg fotosyntezy z glukozą jako syntezowanym węglowodanem można zapisać następująco:



Potocznie „światłem” nazywa się widzialną część promieniowania elektromagnetycznego, czyli promieniowanie widzialne odbierane przez siatkówkę oka ludzkiego. Precyzyjne ustalenie zakresu długości wchodzących w grę fal elektromagnetycznych nie jest możliwe, gdyż wzrok każdego człowieka charakteryzuje się nieco inną wrażliwością, stąd za wartości graniczne przyjmuje się zwykle 380 nm i 780 nm. W nauce pojęcie światła jest znacznie szersze (używa się pojęcia promieniowanie optyczne), gdyż obejmuje nie tylko światło widzialne, ale i sąsiednie zakresy, czyli ultrafiolet i podczerwień [127].

Na powierzchni Ziemi gęstość strumienia promieniowania słonecznego jest funkcją szerokości geograficznej i pory roku, a także godziny dnia. Największą wartość uzyskuje ona, gdy Słońce znajduje się w zenicie – przykładowo na równiku 21 marca lub 23 września, na zwrotniku Raka 22 czerwca, a na zwrotniku Koziorożca 22 grudnia (we wszystkich przypadkach o godzinie 12) [128].

Ludzie pierwotni wykorzystywali światło do suszenia pożywienia, drewna, opału, a także do ogrzewania pomieszczeń. Szersze zastosowanie w życiu codziennym energia Słońca znalazła w starożytnej Grecji – w machinach wojennych oraz przy rozniecaniu ognia dzięki zastosowaniu soczewek [128].

Rzymianie potrafili budować domy pasywne dostosowane do różnych stref klimatycznych; co więcej, prawo rzymskie dawało każdemu gwarancję dostępu do światła słonecznego. Odpowiednio sytuowano budynki, a w oknach wykorzystywano materiały o dobrej przepuszczalności światła, np. szkło [128].

W drugiej połowie XVIII w. profesor Uniwersytetu Genewskiego Horace-Bénédict de Saussure zbudował pierwsze kolektory słoneczne. Były to zaizolowane skrzynki z pomalowanym na czarno wnętrzem i jedną ścianką wykonaną ze szkła. Dziś na podobnej zasadzie działają tzw. kuchenki słoneczne i w takim właśnie celu kolektory te były wówczas bardzo często wykorzystywane [129].

W pierwszej połowie XIX w. zauważone zostało zjawisko pochłaniania promieni słonecznych przez pewne substancje – jest to tzw. zjawisko fotowoltaiczne. Początkowo elementy składające się z selenu były w stanie przekształcić energię słoneczną w elektryczną w zaledwie 1–2%. Mimo niewielkiej efektywności i strat energii w postaci wydzielanego ciepła był to moment potwierdzenia słuszności teorii [130].

Milowym krokiem w historii fotowoltaiki stało się zastosowanie krzemu przy tworzeniu ogniw słonecznych, co doprowadziło do zwiększenia efektywności nawet do 6% zwrotu energetycznego. Moment ten możemy traktować jako początek gwałtownego wzrostu zainteresowania tą technologią. Instytucje naukowe na całym świecie rozpoczęły badania w celu usprawnienia istniejących rozwiązań, uzyskując coraz lepszą wydajność ogniw [130].

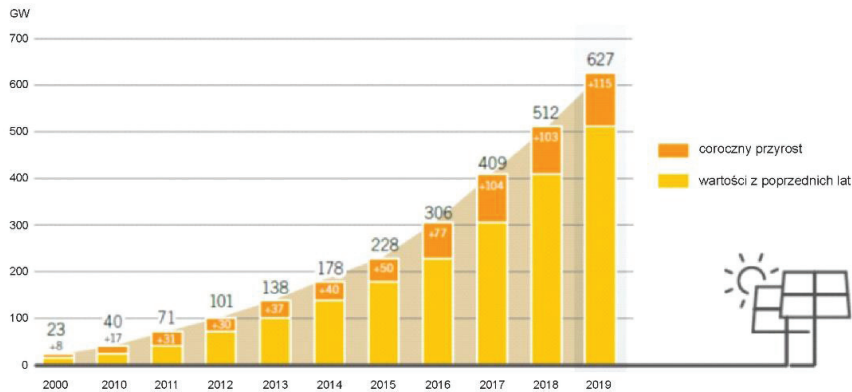
1. Energetyka słoneczna na świecie

Systemy solarne ogrzewania i chłodzenia obsługują miliony budynków mieszkalnych, biurowych, przemysłowych i miejsc publicznych. W 2019 r.

systemy te zostały sprzedane w co najmniej 134 krajach do użytku w szerokim zakresie zastosowań, w tym podgrzewania wody, ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń, suszenia produktów i odsalania wody [32].

W 2019 r. dodano łącznie 31,3 GW kolektorów, co oznacza, że na koniec roku ich skumulowana moc wyniosła 479 GW. Pozwoliło to wyprodukować 1402 PJ ciepła równoważne wartości energetycznej 229 milionów baryłek ropy. Najwięcej kolektorów znajduje się, jak i zainstalowano w 2019 r., w Chinach, Turcji i Brazylii. Polska znalazła się na 11 miejscu [32].

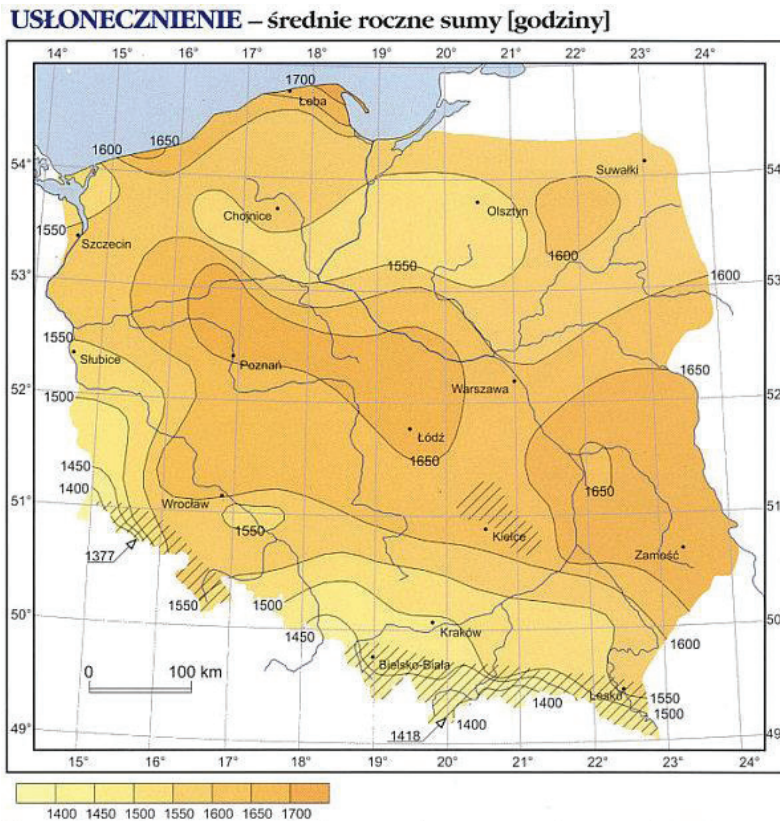
Energetyka słoneczna, w tym przede wszystkim fotowoltaika, jest najszybciej rozwijającą się gałęzią przemysłu na świecie (ryc. 46). Tylko w 2019 r. osiągnięto 12% wzrost – zainstalowano 115 GW nowych mocy. Sumaryczna moc PV wynosi 627 GW, co oznacza 15-krotny wzrost w ciągu ostatnich 10 lat. W 2019 r. aż 18 krajów zainstalowało co najmniej 1 GW nowych mocy w porównaniu do 11 krajów w 2018 r. Największą sumaryczną mocą mogą pochwalić się Chiny (ponad 200 GW), później USA (prawie 80 GW), Japonia (ponad 60 GW) i Niemcy (50 GW) [32].



Ryc. 46. Moc [GW] wyprodukowanych ogniw słonecznych na świecie w latach 2000–2019 [32]

2. Energetyka słoneczna w Polsce

W Polsce panują umiarkowane warunki do rozwoju energetyki słonecznej ze względu na specyfikę klimatu charakterystycznego dla tej szerokości geograficznej. Średnio w ciągu roku do Polski dociera energia mieszcząca się w przedziale 950–1100 kWh/m² (nasłonecznienie) (ryc. 47). Około 80% tej wartości jest generowane podczas sześciu miesięcy wiosenno-letnich (od początku kwietnia do końca września). Średnie usłonecznienie w skali roku znajduje się w przedziale 1350–1800 godzin [131].



Ryc. 47. Usłonecznienie Polski (za: [131])

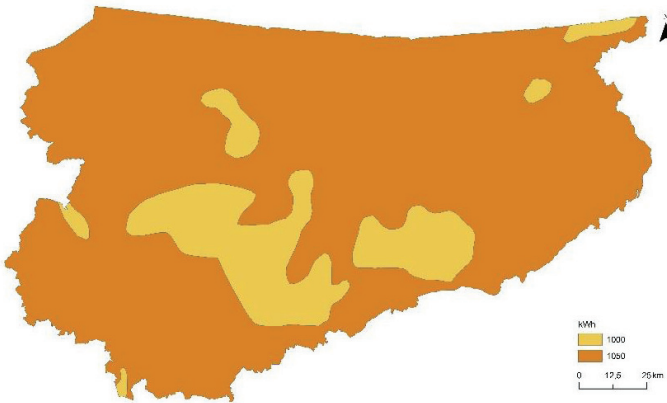
W latach 1958–1960 w Instytucie Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa (obecnie Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa, IBMER) w Warszawie rozpoczęto pierwsze w Polsce próby budowy kolektorów słonecznych do podgrzewania powietrza. Właśnie tam w 1963 r. zbudowano pierwszy w Polsce i zarazem jeden z pierwszych w Europie kolektor słoneczny o powierzchni 40 m² do podgrzewania powietrza w suszarce zielonek i słomy lnianej [132].

W Polsce rynek kolektorów słonecznych rozwija się dość dobrze, niemniej jego nasycenie jest nadal znacznie niższe niż w krajach europejskich o dłuższym doświadczeniu w tej dziedzinie. Wskaźnik zainstalowanej powierzchni kolektorów słonecznych, w przeliczeniu na liczbę mieszkańców, wynosi w naszym kraju około 35 m²/1000 osób [128].

Do 2012 r. praktycznie nie było w Polsce instalacji fotowoltaicznych. Ostatnie lata to prawdziwy boom na fotowoltaikę. Łączna moc zainstalowana w źródłach fotowoltaicznych na koniec 2019 r. wynosiła prawie 1500 MW, a we wrześniu 2020 r. przekroczyła 2500 MW [132,133]. Obecnie największy przyrost nowych mocy obserwowany jest w segmencie mikroinstalacji, oznacza to dużą aktywność prosumentów indywidualnych i biznesowych. W 2019 r. Polska osiągnęła przyrost nowych mocy na poziomie około 0,9 GW i uplasowała się w pierwszej piątce w Unii Europejskiej. Następnie w latach 2021–2022, wraz z kończącym się terminem realizacji projektów, które wygrały aukcje w latach 2018–2019, większość inwestycji skupi się w sektorze farm fotowoltaicznych. Fotowoltaika w 2019 r. odnotowała największe przyrosty mocy zainstalowanej wśród wszystkich OZE. Oznacza to, że jest obecnie głównym obszarem inwestycji w elektroenergetyce odnawialnej. W 2025 r. całkowita moc zainstalowana w fotowoltaice może osiągnąć 7,8 GW, co oznacza, że już w tym roku moc źródeł PV przekroczy zakładaną w Krajowym Planie na rzecz Energii i Klimatu (KPEiK) moc na 2030 r. [133].

3. Energetyka słoneczna w województwie warmińsko-mazurskim

Jak wynika z ryciny 47, usłonecznienie województwa warmińsko-mazurskiego wynosi 1500–1600 godzin rocznie. Z kolei na rycinie 48 przedstawiono nasłonecznienie w województwie. Dla powierzchni 3638 km² wynosi ono 1000 kWh, a dla powierzchni 20 539 km² – 1050 kWh.



Ryc. 48. Nasłonecznienie w województwie warmińsko-mazurskim (opracowanie własne za: [87])

W województwie warmińsko-mazurskim na koniec 2019 r. pracowały 73 elektrownie fotowoltaiczne o łącznej mocy 43,208 MW [34]. Dużo więcej (tysiące) pracowało kolektorów słonecznych.

W Parku Wodnym w Ełku przeprowadzono modernizację układu z wykorzystaniem kolektorów słonecznych. Kolektory zastosowano do podgrzewania wody basenowej, prysznicowej i ciepłej wody użytkowej, a także do celów technologicznych (klimatyzacji i wentylacji wody). Inna instalacja solarna (fotowoltaiczna) została wykorzystana do oświetlenia obiektu Parku. Dodatkowo odzyskiwana jest energia odnawialna z ciepłej wody ściekowej, która powstaje podczas płukania filtrów basenowych i odprowadzana jest do kanalizacji, oraz z ciepłych ścieków prysznicowych i ciepłej wody użytkowej odprowadzanej do kanalizacji [134].

W połowie grudnia 2011 r. oddano do użytku instalację solarną na dachu Samodzielnego Publicznego Zespołu Gruźlicy i Chorób Płuc w Olsztynie [135]. Inwestycja ta pozwoliła zredukować koszty eksploatacji budynków szpitala o około 40 tys. zł rocznie. Instalacja składa się z 16 kolektorów słonecznych, których łączna powierzchnia wynosi 50 m². Instalacja solarna pozwoliła zredukować emisję CO₂ o około 9,3 tony w skali roku. Warto podkreślić, że Szpital Pulmonologiczny w Olsztynie jest kolejną „ekologiczną” placówką medyczną w tym mieście. Jesienią 2011 r. na dachu olsztyńskiej Polikliniki zamontowano kolektory słoneczne, których powierzchnia wynosi 373,5 m² [135].

Jak już wcześniej wspomniano, do roku 1995 Dom Pomocy Społecznej „Tęczowy Dom” w Ełku ogrzewany był za pomocą dwóch lokalnych kotłowni węglowych. W latach 1995–1996 wykonano częściową modernizację kotłowni. Stalowe kotły wodne opalane węglem zastąpiono dwoma kotłami olejowymi o łącznej mocy 1,19 MW. Stare kotły węglowe nie zostały jednak całkowicie zdemontowane. Wobec radykalnego wzrostu cen oleju opałowego w roku 2003 rozważano powrót do opalania węglem. Jako alternatywę przyjęto modernizację systemu grzewczego polegającą na zredukowaniu mocy kotłowni dzięki termorenowacji budynku oraz na wykorzystaniu alternatywnych źródeł energii. Zmodernizowano istniejący budynek kotłowni. Zastosowano kaskadowy system wykorzystania różnych źródeł ciepła: kolektory słoneczne – biomasa – olej opałowy. Zastosowano 90 sztuk próżniowych kolektorów słonecznych o nominalnej mocy cieplnej $Q_s < 74$ kW. Kolektory rozmieszczone zostały na dachu nowo wybudowanej wiaty na stelażach pozwalających na optymalne ich nachylenie. Wiaty o powierzchni 250 m² służy jako magazyn biomasy [42, 136].

W 2014 r. powstała farma fotowoltaiczna w miejscowości Guja (pow. węgorzewski). W jej skład wchodzi 4000 modułów fotowoltaicznych marki SolarWorld, każdy o mocy 250 W, 50 inwerterów marki Fronius, a także elementów konstrukcyjnych, które wyprodukowała firma Oberhauser. „Elektrownia powstanie na powierzchni około dwóch hektarów, a cała wyprodukowana energia przekazywana będzie do sieci. Szacujemy, że inwestycja powinna zwrócić się w ciągu 8–9 lat” – zapewniał Piotr Linkowski, prezes firmy PL 2011 [137].

W miejscowości Siedliska (pow. ełcki) powstały dwie farmy fotowoltaiczne o łącznej wielkości blisko 5 ha. Każda z farm mieści 3696 paneli o mocy 270 W każdy, co w sumie daje 7392 ogniwa, które są w stanie osiągnąć moc obliczeniową 1848 kW. Panele są łączone szeregowo-równolegle (ryc. 49). Ponadto w ramach instalacji zamontowane zostały inwertery służące do zamiany wytworzonego przez ogniwa fotowoltaiczne prądu stałego na prąd zmienny. Powstały również kontenerowe stacje transformatorowe wyposażone w transformatory suche, mające za zadanie podniesienie napięcia do poziomu sieci elektroenergetycznej za pomocą przyłącza kablowego [138].



Ryc. 49. Farma fotowoltaiczna w Siedliskach (za: [47])

Pod Olsztynkiem uruchomiono instalacje fotowoltaiczne o mocy 6 MW. To już kolejne inwestycje tego typu w powiecie olsztyńskim, gdzie kilka lat temu powstała pierwsza elektrownia słoneczna na Warmii i Mazurach. Z kolei elektrownia słoneczna o mocy ponad 1 MW została uruchomiona na dawnym składowisku odpadów w Wilkowie (pow. olsztyński). Władze nie kryją zadowolenia, że w ten sposób udaje się zagospodarować trudne tereny. W miejscowości, gdzie mieścił się kiedyś PGR, może powstać w kolejnych miesiącach jeszcze elektrownia słoneczna o mocy 2 MW. Prywatny inwestor pozyskał na ten projekt dofinansowanie z regionalnego programu operacyjnego (RPO) [139].

W Bajtkowie (pow. ełcki) postawiono farmę fotowoltaiczną o mocy 4 MW [140]. Farma fotowoltaiczna składa się z paneli fotowoltaicznych instalowanych na aluminiowych stelażach za pomocą kotew wbijanych w ziemię (ryc. 50). Panele są nachylone pod kątem 30° – 70° i ustawione względem powierzchni terenu w rzędach, pomiędzy którymi pozostawione zostały ścieżki technologiczne, stanowiące teren biologicznie czynny, porośnięty rodzimymi gatunkami traw. Teren farmy został ogrodzony, a na ogrodzeniu założono system monitoringowo-alarmowy [140].



Ryc. 50. Farma fotowoltaiczna w Bajtkowie (za: [47])

Farma Wesołówko (pow. szczycieński), której powierzchnia wynosi blisko 1 ha, jest już włączona do sieci energetycznej. Jest w stanie wyprodukować około 700 MWh energii elektrycznej rocznie, a tym samym zasilać nawet około 150 średnich gospodarstw domowych. Instalacja składa się z 2640 modułów polikrystalicznych o łącznej powierzchni około 3,3 tys. m², z których energia przekazywana jest za pomocą połączeń kablowych do inwerterów. Panele zainstalowane w rzędach stoją na stelażach ustawionych na gruncie. Inwertery to urządzenia, które zmieniają prąd stały generowany w panelach solarnych na prąd zmienny o napięciu wyjściowym 400 V. Następnie poprzez specjalną stację transformatorową instalacja doprowadza prąd do sieci elektroenergetycznej [141].

W dniu 8 sierpnia 2018 r. w Urzędzie Gminy Kurzętnik jej wójt Wojciech Dereszewski wraz ze skarbnikiem gminy p. Bożeną Zaborowską dokonali uroczystego podpisania umowy na zadanie inwestycyjne pn. „Budowa instalacji fotowoltaicznej w 6 budynkach użyteczności publicznej w ramach zadania »Słoneczna Gmina«”. Zadanie obejmowało budowę instalacji fotowoltaicznej na budynku Urzędu Gminy w Kurzętniku, Gminnym Ośrodku Pomocy Społecznej w Kurzętniku, Szkole Podstawowej w Brzoziu Lubawskim, Szkole Podstawowej w Tereszewie, Zespole Szkół w Kurzętniku i Szkole Podstawowej w Marzęcicach [142].

Przedsiębiorstwo Energetyki Ciepłej w Pisz, oprócz produkcji ekologicznego ciepła, posiada również elektrownię słoneczną o mocy 50 kW (ryc. 51).



Ryc. 51. Zdjęcie instalacji solarnej na dachu PEC w Pisz (dzięki uprzejmości PEC w Pisz)

Instalacje fotowoltaiczne wykorzystywane są na coraz większą skalę do zasilania lamp ulicznych. Na rycinie 52 ulica w okolicach Olsztyna.



Ryc. 52. Panele fotowoltaiczne zasilające lampy uliczne, okolice Olsztyna (fot. M. Korprowski)

4. Ilość energii z helioenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim

4.1. Dachy

Ponieważ spalanie biomasy stałej i biogazu pokrywa zapotrzebowanie na ciepło województwa, przyjęto, że będą montowane panele fotowoltaiczne. Założono, że fotowoltaiką zostanie pokryte 10% dachów w województwie warmińsko-mazurskim. Obliczono, ile energii elektrycznej można pozyskać przy sprawności paneli fotowoltaicznych 15%, korzystając ze wzoru:

$$E_d = 0,1 \cdot 0,15 \cdot P_d \cdot U \cdot N, \quad (17)$$

gdzie:

E_d – energia elektryczna możliwa do pozyskania rocznie z fotowoltaiki na dachach [J/rok],

P_d – powierzchnia dachów (62,3 km²) [m²],
 U – usłonecznienie [h/rok], przeliczone na [s/rok],
 N – nasłonecznienie [W/m²].

Otrzymana roczna ilość energii wynosi 695 TJ, czyli 0,193 TWh.

4.2. Nieużytki

Województwo warmińsko-mazurskie posiada znaczny obszar nieużytków, których powierzchnia wynosi 67,7 tys. ha [65]. Założono, że technicznie jest możliwe, aby 10% powierzchni nieużytków poddać rekultywacji w kierunku „energetycznym” i postawić na nich elektrownie słoneczne. Uwzględniono usłonecznienie i nasłonecznienie poszczególnych obszarów Polski (dane pozyskano z IMGW), a następnie obliczono, ile energii elektrycznej można pozyskać przy sprawności paneli fotowoltaicznych 15%, korzystając z wzoru:

$$E_n = 0,10 \cdot 0,15 \cdot P_n \cdot U \cdot N, \quad (18)$$

gdzie:

E_n – energia elektryczna możliwa do pozyskania rocznie z fotowoltaiki na nieużytkach [J/rok],
 P_n – powierzchnia nieużytków [m²],
 U – usłonecznienie [h/rok], przeliczone na [s/rok],
 N – nasłonecznienie [W/m²].

W województwie możliwa będzie produkcja 3385 TJ energii, czyli 0,94 TWh.

4.3. Drogi

Łączna długość dróg publicznych o twardej nawierzchni wynosi w województwie warmińsko-mazurskim 13 843 km [4]. Przyjęto, że technicznie

jest możliwe postawienie na 5% długości dróg paneli fotowoltaicznych o szerokości 10 m. Obliczono, ile energii elektrycznej można pozyskać przy sprawności paneli fotowoltaicznych 15%, korzystając z wzoru:

$$E_a = 0,05 \cdot 0,15 \cdot D_a \cdot U \cdot N, \quad (19)$$

gdzie:

E_a – energia elektryczna możliwa do pozyskania rocznie z fotowoltaiki przy autostradach i drogach ekspresowych [J/rok],

D_a – długość autostrad i dróg ekspresowych [m],

U – usłonecznienie [h/rok], przeliczone na [s/rok],

N – nasłonecznienie [W/m^2].

Obliczona ilość możliwej do pozyskania energii elektrycznej to 3,86 PJ (1,072 TWh). Produkowany prąd elektryczny może być wykorzystywany do zasilania sygnalizacji świetlnej, przydrożnych barów, restauracji itp.

Łączna ilość energii z helioenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 2,20 TWh.

5. Analiza SWOT helioenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim

W tabeli 9 przedstawiono analizę SWOT energetyki słonecznej w województwie warmińsko-mazurskim.

Tabela 9. Analiza SWOT energetyki słonecznej w województwie warmińsko-mazurskim [61,76]

Mocne strony	Słabe strony
<ul style="list-style-type: none"> – dobrze rozwinięta sieć instalatorów i dystrybutorów kolektorów i paneli – bardzo duża akceptacja społeczna – możliwość uzyskania dofinansowania – możliwość wykorzystania w miejscach niepodłączonych do sieci energetycznej – niskie koszty operacyjne instalacji 	<ul style="list-style-type: none"> – wysokie koszty instalacji – sezonowość pozyskiwania energii

Cd. tab. 9

Mocne strony	Słabe strony
<ul style="list-style-type: none"> - mała awaryjność instalacji solarnej i niewielkie potrzeby konserwatorskie - możliwość łączenia z innymi instalacjami, np. z pompą ciepła 	
Szanse	Zagrożenia
<ul style="list-style-type: none"> - bardzo duże zainteresowanie inwestorów fotowoltaiką - spodziewany duży postęp technologiczny w ogniwach fotowoltaicznych - rozwój perowskitów - spadające ceny fotoogniw - rosnąca sprawność fotoogniw - postęp technologiczny w zakresie magazynowania energii 	<ul style="list-style-type: none"> - postępujące zmiany klimatu - brak dobrego systemu magazynowania energii

5.1. Mocne strony

Z każdym rokiem rozwija się w Polsce (i w województwie warmińsko-mazurskim) sieć instalatorów i dystrybutorów kolektorów i paneli słonecznych. Coraz więcej ofert sprawia, że ceny w tej branży sukcesywnie spadają [61,76].

Ze wszystkich rodzajów energii odnawialnej to właśnie energetyka słoneczna cieszy się największym poparciem społecznym w Polsce (i w województwie warmińsko-mazurskim). Badanie Centrum Badania Opinii Społecznej (CBOS) „Polacy o źródłach energii, polityce energetycznej i stanie środowiska” [143] pokazało, że spośród wszystkich źródeł OZE Polacy zdecydowanie preferują instalacje fotowoltaiczne (73%).

Do budowy instalacji solarnej można dostać dofinansowanie inwestycji – są to środki unijne bądź krajowe. Program priorytetowy „Mój Prąd” [144] stanowi unikatowy na dotychczasową skalę w Polsce instrument dedykowany wsparciu rozwoju energetyki prosumenckiej, a konkretnie segmentu mikroinstalacji fotowoltaicznych (PV). Wdrożenie programu jest silnym impulsem dla dalszego rozwoju energetyki prosumenckiej

i znacząco przyczynia się do spełnienia międzynarodowych zobowiązań Polski w zakresie rozwoju energetyki odnawialnej. Dotychczasowe efekty programu „Mój Prąd” – 73 tys. wniosków o dotacje – to 408 MW zainstalowanej mocy [144].

Do mocnych stron fotowoltaiki można zaliczyć fakt, że instalacja paneli fotowoltaicznych wraz z magazynem energii zapewnia prąd w miejscach, gdzie utrudniony jest dostęp do sieci energetycznej, np. na wyspach mazurskich [145].

Mocną stroną są również niskie koszty operacyjne i niewielkie potrzeby konserwatorskie instalacji solarnych [61].

Coraz popularniejsze staje się łączenie instalacji solarnej z innymi instalacjami OZE, np. z pompami ciepła. Instalacja fotowoltaiczna zapewnia energię elektryczną dla pompy ciepła, która z kolei zasila centralne ogrzewanie i instalację ciepłej wody użytkowej. Nadmiar energii elektrycznej może zasilić samochód elektryczny bądź być sprzedany do sieci energetycznej [61].

5.2. Słabe strony

Instalacje solarne są nadal dość drogie, dlatego bez dofinansowania decyduje się na nie niewiele osób prywatnych. Cena systemu fotowoltaicznego dla Olsztyna wynosi od około 18 tys. zł dla paneli o mocy 3,33 kW oraz około 38 tys. zł dla paneli o mocy 9,99 kW [146]. Mimo corocznego spadku cen cena instalacji solarnej jest nadal dość wysoka, co oznacza długi okres zwrotu. Kolektory są tańsze, cały zestaw można kupić za mniej niż 10 tys. zł [147].

Do słabych stron należy zaliczyć fakt, że w polskich warunkach klimatycznych są duże dysproporcje w ilości energii słonecznej docierającej w ciągu roku. Większość całkowitej rocznej sumy nasłonecznienia przypada na sześć miesięcy sezonu wiosenno-letniego, od początku kwietnia do końca września, przy czym czas operacji słonecznej w lecie wydłuża się do 16 godzin dziennie, natomiast w zimie skraca się do 8 godzin dziennie [61].

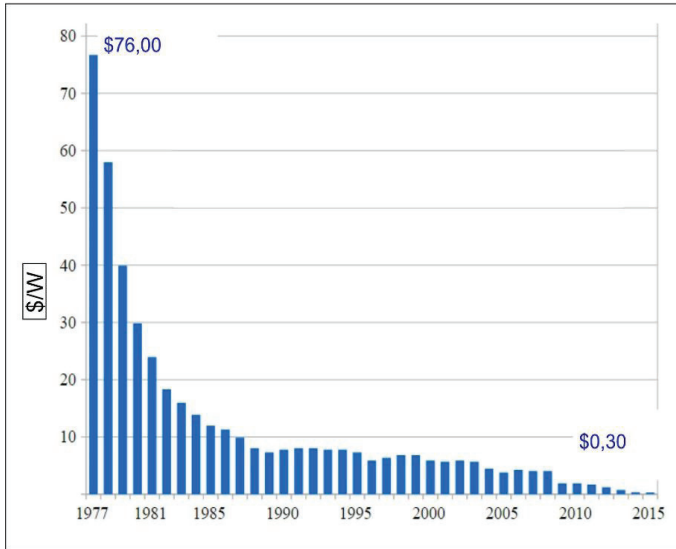
5.3. Szanse

W Polsce, jak i w województwie warmińsko-mazurskim obserwuje się boom na kolektory i fotowoltaikę. Kolektory i panele zakładają osoby prywatne, spółki państwowe, firmy. Przewiduje się, że ten boom będzie trwał i tylko do końca 2020 r. łączna moc fotowoltaiki przekroczy w Polsce 3 GW [148].

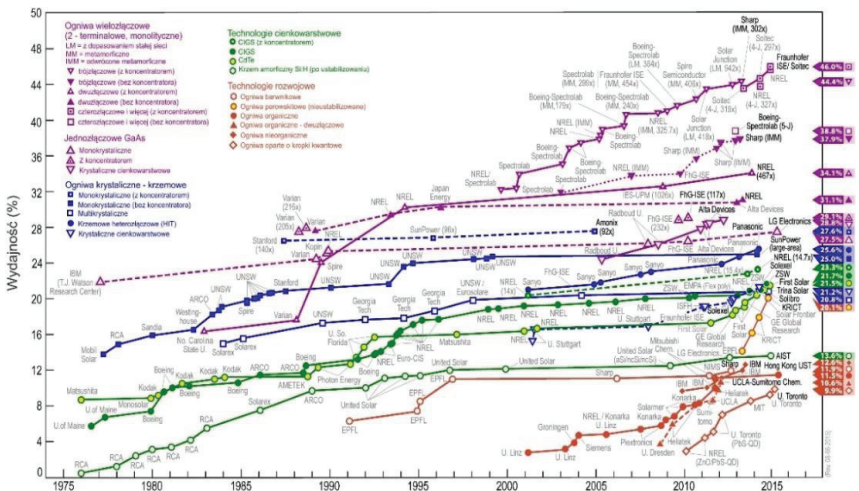
Na całym świecie bardzo wiele ośrodków naukowych pracuje nad udoskonalaniem już istniejących materiałów bądź opracowuje nowe do wykorzystania w instalacjach solarnych. Być może już wkrótce fotowoltaikę zrewolucjonizują perowskity [149]. Zalet tych minerałów jest rzeczywiście wiele, a najważniejsze wśród nich to: wysoka zdolność pochłaniania światła, elastyczność, przezroczystość i lekkość. Ogniwa mogą służyć do pokrywania najróżniejszych materiałów – począwszy od cienkich folii PET, przez dachówki i ściany, na ubraniach i elektronice skończywszy. W ten sposób każdy z tych przedmiotów stałby się minielektrownią produkującą czystą energię [149].

Od 1977 r. cena fotoogniwa, w przeliczeniu na jednostkę mocy elektrycznej, obniżyła się nominalnie około 250 razy – z 76 dolarów do niemal 30 centów za wat (ryc. 53); warto w tym miejscu podkreślić, że realny spadek tej ceny był jeszcze większy, gdyż w ciągu 40 lat wartość pieniądza, również amerykańskiego, znacząco spadła. Jeśli trend spadku cen fotoogniw zostanie utrzymany, wkrótce energia elektryczna z modułów fotowoltaicznych będzie znacząco tańsza od tej z paliw kopalnych [150].

Do szans należy zaliczyć fakt, że spadkowi cen fotoogniw towarzyszył w ostatnich trzech dekadach kilkakrotny wzrost ich sprawności, która współcześnie jest rzędu 10–30% (zależnie od typu), a w przypadku tych najbardziej wydajnych (ogniwa czterołączowe z tzw. koncentratorem) zbliża się do 50% (ryc. 54) [151].



Ryc. 53. Ceny fotoogni w latach 1977–2015 [\$/W] (opracowanie własne za: [150])



Ryc. 54. Sprawność ogniw w latach 1976–2016 (opracowanie własne za: [151])

Trwają również prace nad domowymi akumulatorami energii elektrycznej. Przykładowo, Powerwall ma wymiary zaledwie $130 \times 86 \times 18$ cm, waży około 100 kg i pozwala zmagazynować 10 kWh [152].

5.4. Zagrożenia

Postępujące zmiany klimatu są zagrożeniem dla helioenergetyki w województwie warmińsko-mazurskim. Gradobicia czy trąby powietrzne mogą uszkadzać instalacje solarne. Długotrwałe upały źle wpływają na działanie kolektorów czy paneli słonecznych.

Do zagrożeń należy jeszcze zaliczyć brak dobrego systemu magazynowania energii – stąd też w najbliższych czasach ważny będzie rozwój przydomowych magazynów energii, być może wraz z samochodem elektrycznym, który również może służyć za magazyn energii.

Energetyka geotermalna

Energią geotermalną nazywa się energię zawartą we wnętrzu Ziemi, powstającą na skutek procesów zachodzących w jej jądrze (rozpadu pierwiastków promieniotwórczych). Energia geotermalna występuje w postaci dwóch nośników: hydrotermicznego i petrotermicznego. Przez pierwszy z nich rozumie się mieszaninę wody i pary wodnej (o temperaturze 200–300°C) lub zasób gorącej wody (o temperaturze 50–70°C), drugi odnosi się do rozgrzanych, suchych, porowatych skał [153].

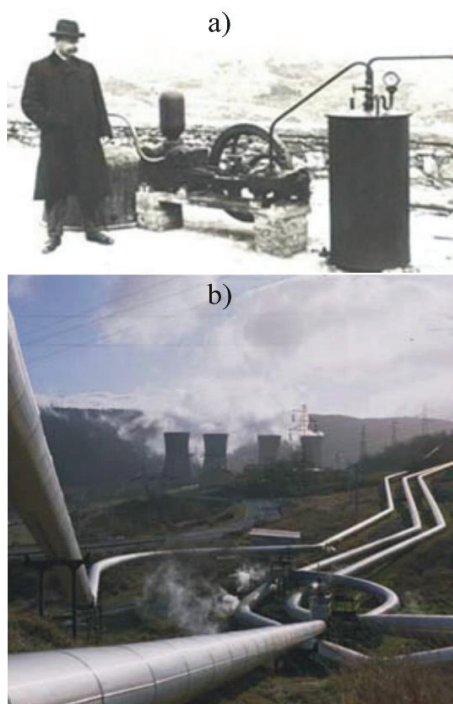
Technologie geoenergetyczne obejmują rozwiązania z zakresu pozyskiwania i wykorzystania energii z wnętrza Ziemi. Wykorzystanie energii geotermalnej może być bezpośrednie: baseny i kąpieliska z wodą geotermalną (baseny „termy”, balneologia, uzdrowiska), ogrzewanie budynków mieszkalnych, stawów hodowlanych i szklarni, suszenie produktów rolnych, topnienie śniegu itp. Od ponad 100 lat nowy rozdział technologii geoenergetycznych to wytwarzanie prądu elektrycznego w elektrowniach geotermalnych [153].

Zasoby energii geotermicznej są ogromne – do głębokości 10 km 50 tys. razy przewyższają ilość ciepła, jaką można uzyskać z ropy naftowej, gazu ziemnego, węgla czy z pierwiastków promieniotwórczych [154]. Polska należy do krajów posiadających bogate zasoby wód geotermalnych o niskiej i średniej entalpii. Potencjał energetyczny wód geotermalnych został opracowany na podstawie danych z głębokich otworów wiertniczych wykonanych głównie celem poszukiwania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego [155].

Kultura, religia i historia rdzennych mieszkańców Nowej Zelandii (Maorysi) jest nierozdzielnie związana ze zjawiskami geotermalnymi, w które kraj ten obfituje. Ich podejście można byłoby nazwać dziś „równoważonym rozwojem”, gdyż wierzono (i nadal się wierzy), że wszystkie zasoby naturalne, w tym gorące źródła, przekazane zostały ludzkiej opiece przez bogów, należy się nimi opiekować, tak by mogły korzystać z nich następne pokolenia. Najstarsze ślady korzystania przez ludzi z wód geotermalnych na terenie dzisiejszej Turcji pochodzą sprzed 12 tys. lat. Chińczycy od dawna wykorzystują gorącą wodę do prania, gotowania, nawadniania pól uprawnych oraz w celach leczniczo-zdrowotnych. Lekarz dynastii Ming, Li Shi-zhen, mawiał, że „jeśli zachorujesz, najlepszym lekarstwem jest kąpiel w gorących źródłach” [154].

Historia i kultura Cesarstwa Rzymskiego wiąże się nierozdzielnie z gorącą wodą geotermalną, którą powszechnie wykorzystywano w łaźniach i pomieszczeniach kąpielowych. O skali wykorzystania gorących wód świadczy fakt, że w antycznym Rzymie funkcjonowało ponad tysiąc term. Obok gorących źródeł powstawały całe kompleksy sportowo-wypoczynkowo-balneologiczne, gdzie prócz łaźni i term budowano boiska, miejsca spacerowe i biblioteki [156].

Przemysłowe wykorzystanie wody geotermalnej we włoskim Larderello datuje się na 1800 r. – wykorzystywano ją do produkcji soli boru i podgrzewania solanki. Właśnie w Larderello 4 lipca 1904 r. po raz pierwszy na świecie wyprodukowano energię elektryczną z geotermii (ryc. 55). Skala nie powalała, gdyż silnik parowy napędzany cieczą geotermalną zespółono z dynamem, uzyskany zaś prąd wykorzystywano do oświetlenia (pięć żarówek) zakładu chemicznego produkującego sole boru, ale pierwszy ważny krok został zrobiony. W 1905 r. zastosowano tłokowy silnik Caila zasilany przez czystą parę uzyskaną w separatorze, sprzężony z dynamem o mocy 20 kW. Pozwoliło to oświetlić pobliską rezydencję oraz niektóre budynki publiczne w Larderello [153].



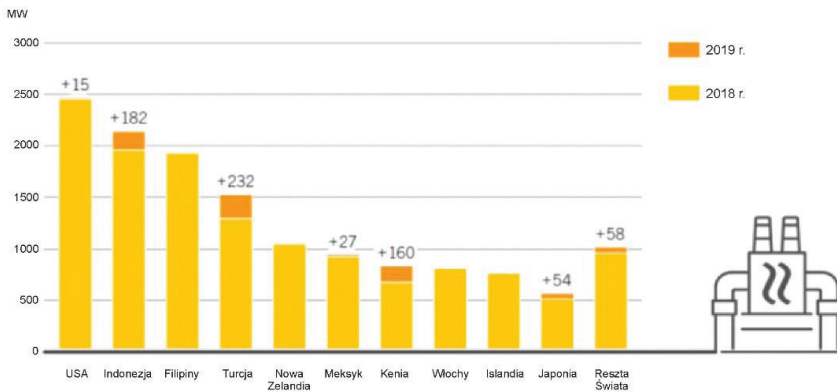
Ryc. 55. Elektrownia geotermalna w Larderello: a) na początku XX w., b) na początku XXI w. (za: [153])

Zasada działania pompy ciepła (czyli lodówki) ma prawie 200-letnią historię, gdyż już w 1824 r. jako pierwszy opublikował ją Carnot. Dziesięć lat później Perkins skonstruował pierwszą chłodziarkę sprężarkową z eterem dietylowym jako czynnikiem roboczym. W 1852 r. szczegółowe podstawy teoretyczne pomp ciepła przedstawił Kelvin, który udowodnił, że maszyny chłodnicze mogą być wykorzystywane także do ogrzewania. Wykazał ponadto, że do ogrzewania przy użyciu pompy ciepła potrzeba dużo mniej energii pierwotnej niż do bezpośredniego ogrzewania, ponieważ ciepło pobierane jest z otoczenia (powietrze, woda lub grunt), co przynosi zysk energetyczny [157]. Na skalę przemysłową pompę ciepła zastosowano w 1914 r. do zateżniania ługu sodowego w farbiarni w Szwajcarii, która stała się kolebką „przemysłu pompy ciepła”.

1. Geotermia na świecie – stan aktualny

Zasoby geotermalne są wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej i ciepła, rzadziej produkowane są w kogeneracji prąd i ciepło. W 2019 r. produkcja energii elektrycznej wynosiła około 95 TWh, podczas gdy bezpośrednio użyteczna wydajność cieplna wynosiła około 117 TWh (421 PJ) [32].

W 2019 r. w geoenergetyce przybyło około 700 MW nowych mocy, z czego 32% przypadło na Turcję, 25% na Indonezję oraz 22% na Kenię (ryc. 56). Światowym liderem zainstalowanej mocy w geotermii pozostały USA, z łączną mocą blisko 2,5 GW, następnie Indonezja (blisko 2,2 GW) i Filipiny (1,9 GW) [32].



Ryc. 56. Moc elektrowni geotermicznych na świecie (za: [32])

2. Geotermia w Polsce – stan aktualny

Tradycje wykorzystywania wód podziemnych w Polsce do celów leczniczych sięgają XI w., kiedy to żona króla Władysława Hermana leczyła dolegliwości, stosując gorące kąpiele w Inowłodzu nad Pilicą. Z roku 1281 pochodzi akt nadania zakonowi joannitów ze Strzegomia prawa użytkowania źródeł wód mineralnych w Cieplicach i Łądku. Uzdrowisko

w Cieplicach rozpoczęło działalność kilka lat później, by w XVI w. stać się znanym europejskim kurortem. W XVII w. leczyła tam swe dolegliwości królowa Maria Kazimiera, żona króla Jana Sobieskiego [153].

W połowie lat 80. XX w. rozpoczęto prace badawcze i wdrożeniowe nad zagospodarowaniem energii geotermalnej w ciepłownictwie: do ogrzewania pomieszczeń, a na skalę póltechniczną także w rolnictwie i hodowli ryb. Doprowadziły one do uruchomienia pracujących dzisiaj geotermalnych zakładów ciepłowniczych w Bańskiej Niżnej, Pyrzycach, Uniejowie, Mszczonowie, Stargardzie Szczecińskim, Toruniu i Poddębicach (ryc. 57) [158].



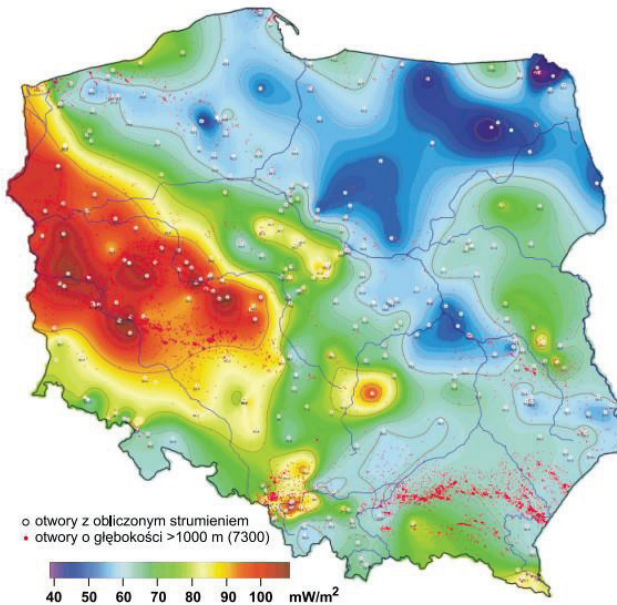
Ryc. 57. Ciepłownie geotermalne w Polsce (opracowanie własne)

Obecnie w Polsce instaluje się kilkanaście tysięcy pomp ciepła rocznie. Wśród instalowanych urządzeń większość stanowią pompy typu: grunt–woda, powietrze–woda oraz woda–woda (pierwszy wyraz oznacza dolne źródło ciepła). Prognozy rozwoju rynku pomp ciepła w Polsce

(przez analogię do innych krajów) wskazują na roczne zapotrzebowanie na poziomie 50–70 tys. sztuk [61].

3. Geotermia w województwie warmińsko-mazurskim

W Polsce gęstość ziemskiego strumienia ciepłego wykazuje duże zróżnicowanie; zależnie od budowy geologicznej waha się od 40 do 110 mW/m². W województwie warmińsko-mazurskim gęstość strumienia ciepłego wynosi około 50–60 mW/m² (ryc. 58) [159,160].



Ryc. 58. Mapa gęstości strumienia ciepłego Polski [159,160]

4. Pompy ciepła w województwie warmińsko-mazurskim

Dąbrówno to miejscowość położona w południowo-zachodniej części województwa warmińsko-mazurskiego. Projekt geotermii płytkiej polegał na termomodernizacji budynku szkoły podstawowej i sali sportowej w Dąbrównie oraz budowie kotłowni opartej na gruntowych pompach ciepła typu solanka/woda wraz z modernizacją instalacji centralnego ogrzewania. Maszynownia składa się z jednego bloku grzewczego, który stanowią dwie pompy ciepła o łącznej mocy grzewczej 160 kW. Inwestycja została ukończona w październiku 2017 r. [161].

W Zespole Szkół w Drogoszach (pow. kętrzyński) 19 września 2014 r. dokonano uroczystego otwarcia instalacji ciepłowniczej. Dotychczas źródło ciepła stanowiły tam kotły olejowe. Były one przede wszystkim mało ekonomiczne i szkodliwe dla środowiska naturalnego. Rocznie na ogrzewanie placówki wydawano około 200 tys. zł. Po modernizacji koszty znacznie się obniżyły – do maksymalnie 40 tys. zł w skali roku. W ślady placówki w Drogoszach poszła również placówka w Mołtajnach. W ZS w Mołtajnach będą zainstalowane trzy pompy ciepła typu solanka-woda o mocy 53,4 kW każda. Jako dolne źródło pomp ciepła zastosowane zostaną kolektory pionowe powstałe w wyniku odwiertów umieszczonych na terenie boiska szkolnego. Inwestycja pozwoliła zaoszczędzić około 60 tys. złotych rocznie [162].

Termomodernizacja szkoły w Spręcowie (pow. olsztyński) polegała na kompleksowej modernizacji systemu ogrzewania opartej na odnawialnych źródłach energii i dociepleniu ścian zewnętrznych. W ramach inwestycji opracowano dokumentację projektową oraz wymieniono istniejące źródło ciepła w szkole podstawowej w Spręcowie (kotły olejowe) na jedną pompę ciepła typu solanka-woda. Inwestycja objęła również wymianę grzejników, modernizację węzła cieplnego i docieplenie ścian zewnętrznych budynku szkoły [163].

Odzysk ciepła z płytkich poziomów gruntu za pomocą pomp ciepła pozwala ogrzewać i klimatyzować budynki oraz podgrzewać wodę użyt-

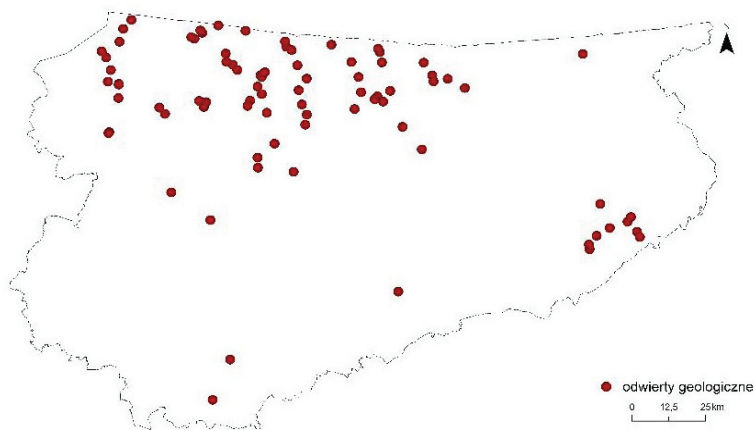
kową. Pompy ciepła wykorzystuje m.in. Dom Pomocy Społecznej w Nowej Wsi Ełckiej (ryc. 59) [47].



Ryc. 59. Dwusekcyjna pompa ciepła (za: [47])

5. Potencjał geotermii w województwie warmińsko-mazurskim

Na rycinie 60 przedstawiono odwierty geologiczne o głębokości co najmniej 500 m w województwie warmińsko-mazurskim. Część z nich w przyszłości można by wykorzystać do budowy ciepłowni lub/i term geotermalnych.



Ryc. 60. Odwierty geologiczne w województwie warmińsko-mazurskim (opracowanie własne na podstawie danych Państwowego Instytutu Geologicznego)

Województwo warmińsko-mazurskie ma dużo większy potencjał, jeśli chodzi o rozwój tzw. geotermii płytkiej, czyli pomp ciepła.

6. Ilość energii z pomp ciepła

6.1. Pompy ciepła w szkołach i przedszkolach

W roku szkolnym 2018/2019 w województwie działało 2134 placówek szkolnych i przedszkoli [164]. Przyjęto założenia, że średnio ogrzewana będzie co 10. placówka o powierzchni budynku 1500 m^2 , moc grzewcza pompy ciepła wyniesie zaś 70 W/m^2 . Moc całkowita pompy ciepła P stanowi iloczyn powierzchni i jednostkowej mocy 70 W/m^2 . Zakładając czas pracy 2000 godzin w roku i współczynnik wydajności pompy ciepła COP (Coefficient Of Performance) 3.8, można obliczyć roczną ilość wyprodukowanego ciepła:

$$E = P \cdot COP \cdot t, \quad (20)$$

gdzie:

E – roczna energia wyprodukowanego ciepła [MJ/rok],

P – łączna moc pomp ciepła [MW],

COP – Coefficient Of Performance,

t – średni roczny czas pracy pompy ciepła (2000 h/rok = 7 200 000 s/rok).

Obliczona ilość energii dla pomp ciepła w szkołach wynosi 0,61 PJ.

6.2. Pompy ciepła w obiektach noclegowych

W 2018 r. było w województwie warmińsko-mazurskim 507 turystycznych obiektów noclegowych: hotele, motele, pensjonaty [165]. Założono, że 10% takich obiektów będzie posiadać pompę ciepła, średnio powierzchnia pojedynczego obiektu wynosi 1000 m², a moc grzewcza pompy ciepła to 70 W/m² [61]. Zakładając pracę pomp ciepła przez 2000 godzin w roku, na podstawie wzoru (20) obliczono, że roczna produkcja ciepła w turystycznych obiektach noclegowych wyniesie 0,10 PJ.

6.3. Pompy ciepła w obiektach kultury

W 2018 r. funkcjonowało w województwie łącznie 507 obiektów kultury [166]. Założono, że 10% tego typu obiektów będzie posiadać pompę ciepła, średnio powierzchnia pojedynczego obiektu wynosi 500 m², a moc grzewcza pompy ciepła to 70 W/m² [153]. Zakładając pracę pomp ciepła przez 1500 godzin w roku, na podstawie wzoru (20) obliczono, że roczna produkcja ciepła w obiektach kultury wyniesie 0,04 PJ.

6.4. Pompy ciepła w kościołach

W 2015 r. było w województwie warmińsko-mazurskim 569 kościołów [167]. Założono, że 10% kościołów będzie posiadać pompę ciepła, średnio powierzchnia pojedynczego kościoła wynosi 1200 m², a moc grzewcza pompy ciepła to 70 W/m². Zakładając pracę pomp ciepła przez 1500 godzin w roku, na podstawie wzoru (20) obliczono, że roczna produkcja ciepła w kościołach wyniesie 0,10 PJ.

7. Analiza SWOT pomp ciepła w województwie warmińsko-mazurskim

W tabeli 10 przedstawiono analizę SWOT pomp ciepła w województwie warmińsko-mazurskim.

Tabela 10. Analiza SWOT pomp ciepła [61,76,153]

Mocne strony	Słabe strony
<ul style="list-style-type: none"> - brak szkodliwego oddziaływania na środowisko - niskie koszty eksploatacyjne - szeroki wachlarz dolnego źródła ciepła - komfort użytkowania - mała awaryjność - bardzo duża akceptacja społeczna 	<ul style="list-style-type: none"> - wysokie koszty inwestycyjne - mała wiedza o pompach ciepła
Szanse	Zagrożenia
<ul style="list-style-type: none"> - postęp technologiczny przy wykorzystaniu energii geotermalnej - krajowe i unijne dofinansowania inwestycji - współpraca z innymi instalacjami OZE 	<ul style="list-style-type: none"> - duże ryzyko przy wykonywaniu odwiertów poszukiwawczych i związane z tym zmienne koszty inwestycji - brak efektywnej polityki promocyjnej wobec pomp ciepła

7.1. Mocne strony

Bezpośrednio pompa ciepła nie emituje gazów, nie generuje ścieków i odpadów. Jeśli pompa ciepła zasilana jest prądem z OZE, wówczas nie ma również pośrednich emisji zanieczyszczeń [153].

Dzięki coraz wyższej sprawności nowe pompy ciepła pobierają stosunkowo mało prądu. Jeśli cała instalacja jest właściwie dobrana, to koszty eksploatacyjne są niskie [61,76].

Dolne źródło pomp ciepła można dobierać w zależności od potrzeb, jak i możliwości lokalizacyjnych. Cechą charakterystyczną pomp ciepła jest to, że temperatura dolnego źródła może być niższa od wymaganej temperatury czynnika grzewczego, co pozwala na wykorzystanie niskotemperaturowych źródeł energii, takich jak:

- powietrze (zewnątrzne lub wywiewane),
- wody powierzchniowe,
- grunt,
- wody gruntowe,
- niskoparametrowe wody geotermalne,
- ścieki [153].

Obliczony wcześniej potencjał techniczny pomp ciepła w województwie warmińsko-mazurskim wynosi 0,85 PJ ciepła rocznie, co pozwoliłoby pokryć 7,1% potrzeb ciepła w województwie.

Pompy ciepła są to urządzenia wygodne w obsłudze i niemal bezawaryjne. Właściciel najdłużej (od 1996 r.) pracującej pompy ciepła podkreśla, że pracuje ona cały czas bezawaryjnie [153].

Do mocnych stron należy zaliczyć też fakt, że pompy ciepła, podobnie jak instalacje solarne, cieszą się dużą popularnością wśród Polaków. Można wręcz stwierdzić, że posiadanie pompy ciepła stało się modne [61].

7.2. Słabe strony

Słabą stroną pomp ciepła są wysokie koszty inwestycji. Warto zaznaczyć, że relatywnie niski jest ich koszt w nowo budowanych budynkach z ogrzewaniem podłogowym. Koszt instalacji pompy ciepła to kilkadziesiąt tysięcy zł. Wysokie koszty powodują, że jest dość długi okres zwrotu zakupu pompy ciepła. Jeden z respondentów [153] napisał, że pompa ciepła zwraca się po kilkunastu latach, a piec na węgiel nigdy.

Do słabych stron należy zaliczyć fakt, że szczególnie starsze społeczeństwo z dużą rezerwą podchodzi do alternatywnych źródeł energii, co wynika przede wszystkim ze zbyt małej wiedzy. Ludzie obawiają się, że u nich pompa ciepła się nie sprawdzi. Należy jednak tu nadmienić, że w ciągu ostatniej dekady [153] wiedza na temat OZE i pomp ciepła sukcesywnie wzrasta.

7.3. Szanse

Mimo że pompy ciepła stosowane są od blisko 100 lat, to nadal trwają badania nad optymalizacją ich pracy. Powoduje to wzrost ich wydajności i mniejszą awaryjność. Upowszechnienie się pomp ciepła jako źródła ciepła sprawi, że cena jednostkowa instalacji będzie spadać [153].

Instalacja pomp ciepła to świetne rozwiązanie w walce z niską emisją, a więc i ze smogiem. Zauważyły to organy unijne i krajowe, dzięki czemu już są i w najbliższym czasie będą do pozyskania fundusze bądź kredyty na zamontowanie pompy ciepła. Przykładowo w programie „Czyste Powietrze” [168] najwyższe możliwe poziomy dofinansowania mają dotyczyć inwestycji w pompy ciepła (i fotowoltaikę), na które dotychczas w programie „Czyste Powietrze” można było pozyskać tylko finansowanie w formie preferencyjnych pożyczek – a nie dotacji, jak w przypadku pozostałych urzędzeń [168].

Do szans można też zaliczyć fakt, że pompy ciepła mogą współpracować z innymi instalacjami OZE, np. z panelami fotowoltaicznymi.

7.4. Zagrożenia

Pompy ciepła są bardzo dobrym rozwiązaniem, zmniejszającym zanieczyszczenie powietrza (smog) w Polsce. Mimo to nadal brak efektywnej polityki promocyjnej. Władze centralne oraz samorządowe powinny wprowadzić więcej programów wspierających dalszy rozwój „płytkiej” geotermii w Polsce [153].

Perspektywy i podsumowanie

Województwo warmińsko-mazurskie w pewnej części jest już samowystarczalne energetycznie. Z danych GUS wynika, że w 2018 r. aż 82,8% energii w regionie wyprodukowano z OZE. Wiatraki czy farmy fotowoltaiczne nikogo już specjalnie nie dziwią, a do tego województwo też ma sporo niewielkich elektrowni wodnych [169].

W tabeli 11 przedstawiono ilość energii, którą można pozyskać z OZE w województwie warmińsko-mazurskim. Należy rozwijać mix energetyczny, oparty głównie na bioenergii, aeroenergetyce i helioenergetyce. Mix różnych źródeł OZE zapewni samowystarczalność energetyczną województwa warmińsko-mazurskiego.

Tabela 11. Możliwe do pozyskania rocznie ilości energii elektrycznej i ciepła z OZE w województwie warmińsko-mazurskim

Rodzaj OZE	Ilość energii elektrycznej [TWh/rok]	Ilość ciepła [PJ/rok]
Bioenergetyka	2,54	14,99
Hydroenergetyka	0,14	
Aeroenergetyka	2,05	
Helioenergetyka	2,20	
Pompy ciepła		0,85
Suma	6,93	15,84

W 2018 r. zużyto w województwie warmińsko-mazurskim 4 TWh energii elektrycznej i 12 PJ ciepła. Obliczony potencjał techniczny wska-

zuje, że województwo mogłoby magazynować nadmiar energii elektrycznej w magazynach energii i samochodach elektrycznych. Warmia i Mazury mogą już w niedalekiej przyszłości stać się eksporterem energii elektrycznej/nośników energii, jak na przykład wodoru. Wodór, który będzie powstawał w wyniku elektrolizy, będzie mógł być eksportowany do innych województw czy nawet krajów.

Rozwój rodzimych instalacji OZE, ich montaż i prace konserwatorskie to ogromny impuls dla rozwoju gospodarczego województwa warmińsko-mazurskiego. A należy zacząć od tego, że rozwój OZE to nowe, w miarę dobrze płatne miejsca pracy w regionach wiejskich, o dość dużym bezrobociu. Elektrownia/instalacja OZE to nie tylko miejsca pracy, ale też duże korzyści finansowe, gdyż płaci różnego rodzaju podatki, VAT, odprowadza pieniądze na Fundusz Pracy i Fundusz Gwarantowanych Świadczeń Pracowniczych, podatek od osób fizycznych i osób prawnych, a także różnego rodzaju opłaty eksploatacyjne, wspiera lokalną kulturę. Zyskuje gmina i Skarb Państwa [61].

Zrównoważone wykorzystanie zasobów energii odnawialnej w województwie warmińsko-mazurskim pozwoli radykalnie zmniejszyć emisję szkodliwych związków, w tym pyłów odpowiedzialnych za smog. OZE generuje również mniej odpadów niż paliwa konwencjonalne. Poprawa jakości powietrza wpłynie pozytywnie na zdrowie mieszkańców, jak również przyciągnie więcej turystów. Polskie Zielone Płuca naprawdę staną się zielone.

Rozwój OZE sprzyja zdecentralizowanemu społeczeństwu, zasilanemu siecią mniejszych i bezpieczniejszych elektrowni, i wzmocnieniu społeczności lokalnych. Na tereny rolnicze przeniesie się znaczna część produkcji energii (biogaz, biomasa, Słońce itd.), za czym pójdą korzyści gospodarcze. Dziś pieniądze na zakup paliw i prądu wypływają ze wsi szerokim strumieniem, zubożając ją. Rozwój OZE sprawia, że to mieszkańcy wsi będą beneficjentami – będą dostarczać odpady do biogazowni, na ich terenie będą pracować np. farmy słoneczne. To oni znajdą pracę w nowych zakładach produkujących energię z OZE. Dochody rolników zostaną zdywersyfikowane. Własna produkcja energii poprawi też jakość infrastruktury na wsi i jakość życia. Sieci energetyczne w rejonach wiej-

skich są często w fatalnym stanie i sytuacja ta się nie poprawia – koncerny energetyczne nie chcą tam inwestować, bo rozległa infrastruktura jest kosztowna, a odbiorców mało [170].

Należy ponadto w tym miejscu wskazać, że wzrost energii elektrycznej pozyskiwanej z odnawialnych źródeł energii, poza mniejszym w porównaniu do konwencjonalnych źródeł energii negatywnym wpływem na środowisko naturalne, może się przełożyć na poprawę bezpieczeństwa energetycznego województwa i kraju. Tak więc faktyczny wzrost udziału w zużyciu energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych może przyczynić się do stopniowego wdrażania idei zrównoważonego rozwoju w życie społeczno-gospodarcze [171].

Literatura

1. B. Gradziuk, P. Gradziuk, *Ranga odnawialnych źródeł energii w gminnych planach gospodarki niskoemisyjnej*, Stowarzyszenie Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu, 4(18), 67–72, 2017.
2. M. Renigier-Biłozor, K. Góbczyński, *Efektywność zastosowania odnawialnych źródeł energii w gospodarce nieruchomościami mieszkaniowymi – Część II*, Acta Scientiarum Polonorum, Administratio Locorum (1)10, 73–85, 2011.
3. B. Igliński, R. Buczkowski, *Potencjał techniczny i możliwości wykorzystania biogazu utylizacyjnego na przykładzie województwa warmińsko-mazurskiego*, Rynek Energii 4(131), 56–62, 2017.
4. <https://olsztyn.stat.gov.pl/dane-o-województwie/województwo-927/tablice-przegladowe-geografia-podzial-administracyjny-i-samorzad-terytorialny/> (dostęp 24.07.20).
5. D. Śledź (red.), *Statystyczny atlas województwa warmińsko-mazurskiego – 2005*, Wyd. Urząd Statystyczny w Olsztynie, Olsztyn 2006.
6. M. Morze, D. Rogalińska (red.), *Atlas statystyczny województwa warmińsko-mazurskiego*, Wyd. Urząd Statystyczny w Olsztynie, Olsztyn 2018.
7. J. Bałdowski, *Warmia i Mazury z Kaliningradem*, Wyd. Laumann-Polska, Piechowice 1997.
8. <https://bdl.stat.gov.pl/> (dostęp 25.07.20).
9. <http://olsztyn.rdos.gov.pl/> (dostęp 25.07.20).
10. B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Technologie bioenergetyczne*, Wyd. UMK, Toruń 2009.
11. Z. Strzelecki (red.), *Rozwój energetyki opartej na źródłach odnawialnych w województwie mazowieckim – stan i wyzwania*, Mazowieckie Biuro Planowania Regionalnego w Warszawie, Warszawa 2015.
12. B. Igliński, R. Buczkowski, G. Piechota, *Algi: źródło energii i substancji chemicznych*, Przemysł Chemiczny 6(90), 1186–1190, 2010.

13. M.F. Demirbaş, M. Balat, H. Balat, *Potential contribution of biomass to the sustainable energy development*, Energy Conversion&Management 50, 1746–1760, 2009.
14. F. Krzysik, *Nauka o drewnie*, PWN, Warszawa 1978.
15. B. Igliński, R. Buczkowski, *Wykorzystywanie biomasy na cele energetyczne w Polsce*, VI Dni Energii Odnawialnej: powiat brodnicki 2014, 53–72, Polskie Wydawnictwo Reklamowe, Toruń 2014.
16. B. Kościak (red.), *Rośliny energetyczne*, Wyd. AR., Lublin 2003.
17. L. Rutkowski, *Klucz do oznaczania roślin naczyniowych Polski niżowej*, PWN, Warszawa 2006.
18. S. Góral, *Zmienność morfologiczna i plonowanie wybranych klonów słonecznika bulwiastego – topinamburu (Helianthus tuberosus L.)*, Hodowla Roślin i Nasiennictwo 2, 6–10, 1998.
19. M. Kaszak, *Efektywność energetyczna produkcji nośników energii z biomasy*, praca inżynierska, Bydgoszcz 2006.
20. A. Grzybek, J.W. Dubas (red.) *Wierzba energetyczna – uprawa i technologie przetwarzania*, Wyższa Szkoła Ekonomii i Administracji w Bytomiu, Bytom 2004.
21. B. Igliński, A. Iglińska, W. Kujawski, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Bioenergy in Poland*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 2099–3007, 2011.
22. H.G. Schlegel, *Mikrobiologia ogólna*, PWN, Warszawa 2005.
23. W. Lotko, *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami węglowodorowymi i roślinnymi: zagadnienia wybrane*, WNT, Warszawa 1997.
24. B. Igliński, R. Buczkowski, G. Piechota, M. Cichosz, *Biodiesel production from rapeseed oil in Poland*, w: *Advances in research and technology of rapeseed oil: monograph* (ed. E. Szlyk), Wyd. UMK, Toruń 2011.
25. B. Igliński, G. Piechota, R. Buczkowski, *Development of biomass in polish energy sector: an overview*, Clean Technologies and Environmental Policy 2(17), 2015.
26. M. Cichosz, *Wpływ wybranych metali ciężkich na efektywność fermentacji metanowej kukurydzy twardej (Zea mays var. indurata)*, rozprawa doktorska, Toruń 2009.
27. B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Biogazownie rolnicze w Polsce: stan aktualny, potencjał, analiza SWOT*, Rynek Energii 3(118), 93–101, 2015.
28. B. Igliński, R. Buczkowski, A. Iglińska, M. Cichosz, G. Piechota, W. Kujawski, *Agricultural biogas plants in Poland: investment process, economical and en-*

- vironmental aspects, biogas potential*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 7(16), 2890–2900, 2012.
29. G. Piechota, M. Hagmann, R. Buczkowski, *Removal and determination of trimethylsilanol from the landfill gas*, Bioresource Technology 1(103), 16–20, 2012.
 30. B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Biogas production in Poland: current state, potential and perspectives*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 50, 686–695, 2015.
 31. B. Igliński, J. Sobólski, *Bioenergy production in the Toruń biogas plant (Poland)*, 33–40, Linköping: Linköping University Electronic Press, 2011.
 32. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, *Renewables 2020, Global Status Report*, Paris 2020.
 33. B. Igliński, G. Piechota, A. Iglińska, M. Cichosz, R. Buczkowski, *The study on the SWOT analysis of renewable energy sector on the example of the Pomorskie Voivodeship (Poland)*, Clean Technologies and Environmental Policy 1(18), 45–61, 2015.
 34. Instalacje odnawialnych źródeł energii wg stanu na dzień 31 grudnia 2019 r., www.ure.gov.pl/pl/oze/potencjal-krajowy-oze/8108.Instalacje-odnawialnych-zrodel-energii-wg-stanu-na-dzien-31-grudnia-2019-r.html (dostęp 29.05.20).
 35. Agencja Rynku Rolnego, Rejestr wytwórców biopaliw i biokomponentów, www.kowr.gov.pl/uploads/pliki/DI/Biokomponenty_i_biopaliwa/W/Rejestr_wytworcow_2020.07.01.pdf (dostęp 13.06.20).
 36. Rejestr wytwórców biogazu rolniczego, www.kowr.gov.pl/uploads/pliki/oze/biogaz/Rejestr%20wytw%C3%B3rc%C3%B3w%20biogazu%20rolniczego%20z%20dnia%202003.07.2020%20r.pdf (dostęp 16.07.20).
 37. <http://archiw.lukta.com.pl/modernizacja-kotlowni-w-lukcie-%E2%80%93-2001-r/> (dostęp 23.06.20).
 38. www.pecpisz.pl/?page_id=64 (dostęp 23.06.20).
 39. www.frombork.pl/aktualnosc-10-692-MODERNIZACJA_KOTLOWNI_MIEJSKIEJ.html (dostęp 24.06.20).
 40. www.gramwzielone.pl/bioenergia/30747/biomasa-ogrzeje-mieszkancow-olsztyna (dostęp 24.06.20).
 41. www.pnec.org.pl/projekty_gmin/12.08.2010%20Elk%20inwestuje%20w%20odnawialne%20zrodla%20energii.pdf (dostęp 24.06.20).
 42. www.pnec.org.pl/projekty_gmin/Elk_-_modernizacja_systemu_grzewczego_w_domu_pomocy_spolecznej_Teczowy_Dom.pdf (dostęp 24.06.20).

43. www.pnec.org.pl/projekty_gmin/Elk_-_modernizacja_systemu_grzewczego_w_zespole_szkol_nr_1.pdf (dostęp 25.06.20).
44. www.energa-kogeneracja.pl/s28-blok_biomasowy_elblag (dostęp 25.06.20).
45. J. Fieducik, A. Gawroński, R. Matuszczak, *Osady ściekowe i ich utylizacja w przedsiębiorstwie wodociągów i kanalizacji w Olsztynie*, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury 31(61), 121–131, 2014.
46. <http://pwik.elk.com.pl/technologie/oczyszczalniasciekow/> (dostęp 25.06.20).
47. Materiały udostępnione przez Urząd Gminy w Elku.
48. http://pwik.elk.com.pl/wp-content/uploads/2017/08/schem_2016.jpg (dostęp 25.06.20).
49. www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/sposoby-na-zwiekszenie-wykorzystania-biogazu-w-oczyszczalni-sciekow-7018.html (dostęp 25.06.20).
50. M. Neumann, W. Borecki, A. Wojciechowska-Świergoń, M. Tasz, *Raport o oddziaływaniu oczyszczalni ścieków przy ul. Mazurskiej w Elblągu*, Wrocław 2016.
51. <https://www.agropolska.pl/zielona-energia/biogaz/beda-miec-prad-i-cieplo-z-gnojowicy,26.html> (dostęp 25.06.20).
52. <https://magazynbiomasa.pl/biogazownia-w-gizach-dziala-juz-prawie-piec-lat/> (dostęp 25.06.20).
53. www.gramwzielone.pl/bioenergia/10425/w-woj-warminsko-mazurskim-uruchomiono-kolejna-biogazownie-rolnicza (dostęp 25.06.20).
54. <http://odnawialnezrodlaenergii.pl/biomasa-aktualnosci/item/1754-kolej> (dostęp 25.06.20).
55. www.prawo.pl/biznes/kolejna-biogazownia-w-woj-warminsko-mazurskim,158247.html (dostęp 26.06.20).
56. www.gramwzielone.pl/bioenergia/12958/nowa-biogazownia-rolnicza-w-woj-warminsko-mazurskim (dostęp 26.06.20).
57. www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/biogazownia-dofinansowanie-NFO-SiGW-OZE-cieplo-7757.html (dostęp 24.07.20).
58. E. Głodek, *Biogazownie utylizacyjne, przewodnik*. Wyd. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Opole 2010.
59. GUS, *Leśnictwo w 2019 r.*, Warszawa 2019.
60. Ministerstwo Środowiska, *Krajowy Program Zwiększania Lesistości*, Warszawa 2003.
61. B. Igliński, *Badanie sektora energii odnawialnej w Polsce. Potencjał techniczny, badania ankietowe, analiza SWOT, analiza PEST*, Wyd. Naukowe UMK, Toruń 2019.

62. E. Ratajczak, A. Szostak, G. Bidzińska, *Drewno użytkowe w Polsce*, Wyd. Instytutu Technologii Drewna, Poznań 2003.
63. GUS, *Rocznik statystyczny województw*, Warszawa 2019.
64. M. Jasiulewicz, *Potencjał biomasy w Polsce*, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2010.
65. GUS, *Rocznik statystyczny rolnictwa 2019*, Warszawa 2019.
66. R. Buczkowski, B. Igliński, M. Cichosz, G. Ojczyk, M. Stańczak, G. Piechota, *Biomasa w energetyce*, Wyd. Naukowe UMK, Toruń 2012.
67. P. Gradziuk, *Ekonomiczne i ekologiczne aspekty wykorzystania słomy na cele energetyczne w lokalnych systemach grzewczych*, *Acta Agrophysica* 8(3), 591–601, 2006.
68. J. Kuś, A. Madej, J. Kopiński, *Bilans słomy w ujęciu regionalnym*, 211–226, w: I. Marcinkowska (red.), *Regionalne zróżnicowanie produkcji rolniczej w Polsce*, Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa, Państwowy Instytut Badawczy, Puławy 2006.
69. W. Sobczyk, *Plonowanie wierzby wiciowej – w świetle badań*, *Polityka Energetyczna* 10, 547–555, 2007.
70. J. Kutera, S. Hus, *Rolnicze oczyszczanie i wykorzystanie ścieków i gnojowicy*, Wyd. Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław 1998.
71. GUS, *Ochrona środowiska 2019*, Warszawa 2019.
72. Sejmik województwa warmińsko-mazurskiego, *Plan gospodarki odpadami dla województwa warmińsko-mazurskiego na lata 2016–2022*, Olsztyn, 28 grudnia 2016.
73. GUS, *Zużycie paliw i nośników energii w 2018 r.*, Warszawa 2018.
74. G. Wiśniewski (red.), *Określenie potencjału energetycznego regionów Polski w zakresie odnawialnych źródeł energii – wnioski dla Regionalnych Programów Operacyjnych na okres programowania 2014–2020*, Warszawa 2011.
75. W.-M. Chen, H. Kim, H. Yamaguchi, *Renewable energy in eastern Asia: Renewable energy policy review and comparative SWOT analysis for promoting renewable energy in Japan, South Korea, and Taiwan*, *Energy Policy* 74, 319–329, 2014.
76. A. Koniecko, M. Cygan, E. Cieślińska, Ł. Przybylski, *Koncepcja rozwoju OZE w województwie warmińsko-mazurskim do 2020 roku*, Olsztyn 2013.
77. A. Zyadin, K. Natarajan, B. Igliński, A. Iglińska, A. Kaczmarek, J. Kajdanek, A. Pappinen, P. Pelkonen, *Farmers' willingness to supply biomass for energy generation: evidence from South and Central Poland*, *Biofuels* 4(8), 421–430, 2017.

78. Z.W. Kundzewicz, *Gdyby mała wody miarka... Zasoby wodne dla trwałego rozwoju*, PWN, Warszawa 2000.
79. M.P. Vitruvius, *O architekturze ksiąg dziesięć*, Biblioteka Antyczna, Warszawa 1956.
80. S. Michałowski, J. Plutecki, *Energetyka wodna*, WNT, Warszawa 1975.
81. F. Światała (red.), *Elektrownia wodna w systemie elektroenergetycznym*, Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1989.
82. M.S. Rudnicki, *Odtwarzanie małych elektrowni wodnych*, Oficyna Wydawnicza OKP Zachodniopomorskie Centrum Edukacyjne, Szczecin 2003.
83. B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, P. Iwański, P. Rzymyszkiewicz, *Technologie hydroenergetyczne*, Wyd. Naukowe UMK, Toruń 2017.
84. K. Jackowski, *Elektrownie wodne*, WNT, Warszawa 1971.
85. S. Michałowski, J. Plutecki, *Energetyka wodna*, WNT, Warszawa 1975.
86. P. Rzymyszkiewicz, B. Igliński, R. Buczkowski, G. Piechota, *Przyszłość energetyczna województwa kujawsko-pomorskiego*, Wyd. Naukowe UMK, Toruń 2012.
87. Materiały otrzymane od IMGW.
88. F. Światała (red.), *Elektrownia wodna w systemie elektroenergetycznym. III Sesja Naukowa*, Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej, Zakład Wydawniczo-Poligraficzny Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992.
89. www.kzgw.gov.pl (dostęp 02.07.20).
90. Materiały uzyskane z redakcji czasopisma „Energetyka Wodna”.
91. <https://media.energa.pl/pr/373972/energa-zmodernizowala-unikatowa-elektrownie-wodna> (dostęp 02.07.20).
92. www.energa-wytwarzanie.pl/obiekty/lista-obiektow/pierzchaly,19,obiekt.html (dostęp 05.07.20).
93. <http://mewkasztanowo.vfirma.pl> (dostęp 03.07.20).
94. https://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownia_Wodna_Kasztanow (dostęp 03.07.20).
95. <http://mojemazury.pl/76791,Wojdyty-elektrownia-wodna-na-Lynie.html> (dostęp 04.07.20).
96. <http://funduszfilmowy.warmia.mazury.pl/lokacje-filmowe/wojdyty-elektrownia-wodna/> (dostęp 25.07.20).
97. https://powiatwegorzewski.pl/atraccje/atracja/867/zabytkowa_elektr (dostęp 04.07.20).
98. www.pnec.org.pl/projekty_gmin/Olsztynek_-_male_elektrownie_wodne.pdf (dostęp 25.07.20).
99. www.pnec.org.pl/smart/pdf/powiat_e.pdf (dostęp 25.07.20).

100. <http://podroze.wm.pl/105743,Szlak-rzeki-Dajna-czyli-Rynna-Mragowska.html> (dostęp 02.09.2020).
101. B. Igliński, *Hydro energy in Poland: the history, current state, potential, SWOT analysis, environmental aspects*, International Journal of Energy and Water Resources 1(3), 61–72, 2019.
102. <http://trmew.pl/index.php?id=31> (dostęp 08.07.20).
103. www.mew.pl/ (dostęp 08.07.20).
104. B. Igliński, G. Piechota, A. Iglińska, M. Cichosz, R. Buczkowski, *The study on the SWOT analysis of renewable energy sector on the example of the Pomorskie Voivodeship (Poland)*, Clean Technology and Environmental Policy 1(18), 45–61, 2016.
105. B. Igliński, *Przyszłość sektora OZE w Polsce – badania ankietowe*, Toruń 2017.
106. A. Woś, *ABC meteorologii*, Wyd. Naukowe UAM, Poznań 2005.
107. A. Piskozub, *Morze w dziejach cywilizacji*, Wyd. Adam Marszałek, Toruń 1998.
108. R. Buczkowski, B. Igliński, M. Cichosz, *Technologie aeroenergetyczne*, Wyd. UMK, Toruń 2014.
109. D. Brykała, *Etapy rozwoju energetyki wiatrowej w województwie kujawsko-pomorskim*, http://archiwum.kujawsko-pomorskie.pl/pliki/planowanie/20140206_ekspertyza/modul_e1.pdf (dostęp 08.07.20).
110. M. Augustyn, J. Ryś, *Kinematyka i moment obrotowy turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu*, Czasopismo Techniczne 1, 3–17, 2007.
111. Z. Gloger, *Encyklopedia staropolska ilustrowana*, t. 4, Druk. P. Laskauera i S-ki, Warszawa 1903.
112. S. Małyszczycycki, *Młynarstwo zbożowe*, Wyd. Arkonii, Warszawa 1890.
113. E. Sackiewicz, *Z dziejów młynarstwa w Polsce*, Studia i Materiały Kultury Materialnej, PWN, Warszawa 1957.
114. F. Klaczyński, *Wiatraki w Polsce*, Rocznik Muzeum Narodowego Rolnictwa w Szreniawie, t. 12, 27–65, 1981.
115. <http://psew.pl/> (dostęp 19.07.20).
116. B. Igliński i in., *Wind energy in Poland – History, current state, surveys, Renewable Energy Sources Act, SWOT Analysis*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 64, 19–33, 2016.
117. http://gramwzielone.pl/mapa-instalacji-oze/energia?fbclid=IwAR151rMMLNj4DPveNPfj2UGTqaxagaQbn5XWRY5J7iW8EzbgQx7H3GFqc_9g (dostęp 18.07.20).

118. www.uwmfm.pl/news/677/czytaj/982/warmia-i-mazury-za-rozwojem-energetyki-wiatrowej.html (dostęp 09.07.20).
119. https://korsze.pl/PL/1000/365/ROZBUDOWA_FARMY_WIATROWE-J_W_KORSZACH/k/ (dostęp 09.07.20).
120. <https://pgeo.pl/Nasze-objekty/Elektrownie-wiatrowe/Kisielice> (dostęp 10.07.20).
121. www.tauron-ekoenergia.pl/elektrownie/energia-wiatrowa/goldap (dostęp 10.07.20).
122. Pismo burmistrza Pasłęka z dnia 24.07.2020.
123. Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych, Dz.U. 2016, poz. 961.
124. Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, Dz.U. 2015, poz. 476.
125. A. Brzezińska-Rawa, J. Góździewicz-Biechońska, *Recent developments in the wind energy sector in Poland*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38, 79–87, 2014.
126. D.O. Hall, *Fotosynteza*, WNT, Warszawa 1999.
127. H. Drozdowski, *Fizyczny obraz świata*, Wyd. Naukowe UAM, Poznań 2007.
128. B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, G. Ojczyk, M. Plaskacz-Dziuba, G. Piechota, *Technologie helioenergetyczne*, Wyd. Naukowe UMK, Toruń 2013.
129. K. Lis, *Jak tanio zbudować kolektor słoneczny?*, Wyd. EscapeMagazine.pl, Toruń 2010.
130. <https://sunergo.pl/blog/fotowoltaika-kiedys-i-dzis/> (dostęp 11.07.20).
131. H. Lorenc, *Atlas klimatu Polski*, IMGW, Warszawa 2000.
132. www.rp.pl/Biznes/310019891-Energia-sloneczna-rosnie-w-sile.html (dostęp 09.10.20).
133. IEO, *Rynek fotowoltaiki w Polsce*, Warszawa 2020.
134. http://www.pnec.org.pl/projekty_gmin/12.08.2010%20Elk%20inwestuje%20w%20odnawialne%20zrodla%20energii.pdf (dostęp 12.07.20).
135. <https://budownictwob2b.pl/dachy/puls-branzy/9950-kolektory-sloneczna-na-dachu-olsztyńskiego-szpitala-pulmonologicznego> (dostęp 12.07.20).
136. <https://teczowydom.pl> (dostęp 12.07.20).
137. www.gramwzielone.pl/energia-sloneczna/13800/warminsko-mazurskie-powstaje-kolejna-farma-fotowoltaiczna (dostęp 13.07.20).
138. <https://elk.dlwas.info/wiadomosci/farma-fotowoltaiczna-w-siedliskach-kolo-elku/cid,11150,a> (dostęp 17.07.20).

139. <https://wysokienapiecie.pl/10719-sloneczny-rekord-po-drodrodze-na-mazury/> (dostęp 13.07.20).
140. http://elk-ug.bip.eur.pl/public/get_file_contents.php?id=299658 (dostęp 17.07.20).
141. <http://inwestycjeenergetyczne.itc.pw.edu.pl/inwestycja/farma-sloneczna-wesolowo/> (dostęp 13.07.20).
142. https://dev.kurzetnik.pl/PL/3269/Sloneczna_Gmina/ (dostęp 13.07.20).
143. Centrum Badania Opinii Społecznej, *Polacy o źródłach energii, polityce energetycznej i stanie środowiska*, Warszawa 2016.
144. <https://mojprad.gov.pl/> (dostęp 14.07.20).
145. B. Igliński, M. Cichosz, W. Kujawski, M. Plaskacz-Dziuba, R. Buczkowski, *Helioenergy in Poland – Current state, surveys and prospects*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 58, 862–870, 2016.
146. <http://ekofachowcy.pl/fotowoltaika/fotowoltaika-cena> (dostęp 14.07.20).
147. www.poseidon-laziska.pl/hewalex-zestaw-solarny-2t1p-kompakt-300hb-p2?utm_source=ceneo&utm_medium=referral (dostęp 15.07.20).
148. www.gramwzielone.pl/energia-sloneczna/103398/swietny-czerwiec-w-polskiej-fotowoltaice-na-koniec-roku-realne-3-gw?fbclid=IwAR0S32j9ODlWcR36lRNLt9qwmVNz4ELVPADyECEZxBD5pQbxdBBYvK4SOk (dostęp 15.07.20).
149. www.gramwzielone.pl/energia-sloneczna/102388/perowskity-podbijaja-sprawnosci-ogniwa-fotowoltaicznego-do-niemal-30-proc (dostęp 15.07.20).
150. www.greentechmedia.com/articles/read/solar-pv-module-costs-to-fall-to-36-cents-per-watt (dostęp 15.07.20).
151. www.nrel.gov (dostęp 16.07.20).
152. <https://gadzetomania.pl/57412,powerwall-tesla-ujawnia-akumulatory-ktore-zasila-nasze-domy-energia-na-dlugie-tygodnie> (dostęp 16.07.20).
153. B. Iglinski, R. Buczkowski, M. Cichosz, G. Piechota, *Technologie geoenergetyczne*, Wyd. Naukowe UMK, Toruń 2010.
154. A. Oniszcz-Popławska, *Ciepło z wnętrza Ziemi*, EC BREC/IMBER, Gdańsk–Warszawa 2003.
155. R. Sobański, M. Kabat, W. Nowak, *Jak pozyskać ciepło z Ziemi?*, Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa 2000.
156. B. Kępińska, A. Łowczowska, *Wody geotermalne w lecznictwie, rekreacji i turystyce*, Wyd. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 2002.

157. W. Oszczak, *Ogrzewanie domów z zastosowaniem pomp ciepła*, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 2009.
158. B. Igliński, R. Buczkowski, W. Kujawski, M. Cichosz, G. Piechota, *Geoenergy in Poland*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(5), 2545–2557, 2012.
159. J. Szewczyk, D. Gientka, *Terrestrial heat flow in Poland – a new approach*, *Geological Quarterly* 53(1) (2009), 125–140.
160. <http://web3.pgi.gov.pl/website/cbdg/viewer.htm> (dostęp 18.07.20).
161. www.rencraft.eu/realizacje/pompy-ciepła-szkola-podstawowa-dabrown/ (dostęp 18.07.20).
162. www.barciany.pl/asp/pl_start.asp?typ=13&menu=84&działy=84&akcja=artykuł&artykuł=1794 (dostęp 18.07.20).
163. <http://gminadywity.pl/strona/84> (dostęp 18.07.20).
164. <https://www.ko.olsztyn.pl/category/adresy-szkol-i-placowek/> (dostęp 27.07.20).
165. https://olsztyn.stat.gov.pl/files/gfx/olsztyn/pl/defaultstronaopisowa/73/2/1/turystyka_2018_2.pdf (dostęp 27.07.20).
166. GUS, *Działalność centrów kultury, domów kultury, ośrodków kultury, klubów i świetlic w 2018 r.*, Warszawa 2019.
167. GUS, *Struktura administracyjna Kościoła katolickiego w Polsce i podstawowe statystyki*, Warszawa 2017.
168. <http://czystepowietrze.gov.pl/> (dostęp 18.07.20).
169. <http://gazetaolsztynska.pl/617636,Niemal-83-proc-energii-która-powstaje-na-Warmii-i-Mazurach-została-wyprodukowana-z-odnawialnych-zródeł-energii.html> (dostęp 25.07.20).
170. Zarząd województwa warmińsko-mazurskiego, *Program ekoenergetyczny województwa warmińsko-mazurskiego na lata 2005–2010*, Olsztyn 2005.
171. Ł. Kozar, *Produkcja energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych w krajach Unii Europejskiej i w Polsce w kontekście koncepcji zrównoważonego rozwoju*, *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Problemy Rolnictwa Światowego*, (2)17, 126–135, 2017.