

Technologie

HELIOENERGETYCZNE

monografia

Bartłomiej Igliński
Roman Buczkowski
Marcin Cichosz
Grzegorz Ojczyk
Marta Plaskacz-Dziuba
Grzegorz Piechota



WYDAWNICTWO NAUKOWE
UNIWERSYTETU MIKOŁAJA KOPERNIKA

Toruń 2013

Recenzent
Barbara Dejevska

Projekt okładki
Wirgiliusz Małecki

Redakcja
Zespół Autorski
(**Bartłomiej Igliński, Roman Buczkowski, Marcin Cichosz,**
Grzegorz Ojczyk, Marta Plaskacz-Dziuba, Grzegorz Piechota)

Druk materiałów dofinansowany ze środków
Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Toruniu

Printed in Poland
© Copyright by Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika
Toruń 2013

ISBN 978-83-231-3059-8

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

www.wydawnictwoumk.pl

Wydanie pierwsze
Druk: Wydawnictwo Naukowe UMK
ul. Gagarina 5, 87–100 Toruń

SPIS TREŚCI

Słowo wstępne	9
Wprowadzenie	11
Literatura	18
Powstanie, budowa i przemiany zachodzące na Słońcu	19
1. Powstanie wszechświata	19
2. Ewolucja gwiazd	20
3. Narodziny i przemiany zachodzące na Słońcu	23
4. Budowa Słońca	25
5. Energia Słońca	29
6. Literatura	30
Światło, jego natura i oddziaływanie z materią	31
1. Czym jest światło	31
2. Korpuskularno-falowa natura światła	32
3. Promieniowanie elektromagnetyczne – charakterystyka, źródła promieniowania	34
4. Oddziaływanie światła na materię	37
4.1. Rozpraszanie światła	38
4.2. Efekt fotoelektryczny	39
5. Wpływ atmosfery ziemskiej na promieniowanie słoneczne	40
6. Rola Słońca i światła w życiu człowieka	42
7. Literatura	45
Promieniowanie słoneczne padające na Ziemię	47
1. Wpływ ruchu obrotowego i obiegowego Ziemi na promieniowanie słoneczne	47
2. Wpływ atmosfery na promieniowanie słoneczne	49
3. Ilość dostępnej energii słonecznej	52

3.1. Sumy dzienne promieniowania	53
3.2. Szacowanie godzinnych sum promieniowania słonecznego	54
3.3. Promieniowanie słoneczne padające na płaszczyznę pochyloną.	55
4. Literatura	56
Pasywne systemy ogrzewania	57
1. Transport ciepła	57
2. Ogólna charakterystyka pasywnego pozyskiwania ciepła	60
3. System zysków bezpośrednich	61
4. System zysków pośrednich	62
5. System pasywny kompilacyjny	64
6. Architektura pasywna	66
7. Magazynowanie ciepła pozyskanego w sposób bierny.	68
8. Aspekty ekonomiczno-ekologiczne budynków pasywnych	69
9. Literatura	70
Aktywne systemy ogrzewania – kolektory słoneczne	73
1. Ogólna charakterystyka kolektorów słonecznych niskotemperaturowych	73
2. Kolektory słoneczne niskotemperaturowe	75
2.1. Płaskie cieczowe kolektory słoneczne	75
2.2. Próżniowe kolektory słoneczne	76
2.3. Systemy podgrzewania wody w budownictwie	78
2.4. Stawy słoneczne	79
2.5. Destylarki słoneczne	80
3. Kolektory słoneczne średnio- i wysokotemperaturowe	81
3.1. Kolektory paraboliczne	81
3.2. Kolektory Fresnela	83
3.2.1. Wieżowe elektrownie słoneczne	84
3.3. Kolektory Dish	84
3.4. Kominy słoneczne	85
3.5. Wieża słoneczna	85
4. Literatura	87
Fotowoltaika	89
1. Właściwości półprzewodników	89
2. Układy p-n	93
3. Budowa i zasada działania ogniw słonecznych	93
4. Technologie produkcji ogniw fotowoltaicznych	96
4.1. Krzem monokrystaliczny	96
4.2. Krzem polikrystaliczny	96
4.3. Cienkowarstwowe, amorficzne ogniwa krzemowe	99
4.4. Polikrystaliczne, cienkowarstwowe ogniwa heterozłączone	99

4.5. Ogniwia polimerowe.	102
4.6. Barwnikowe ogniwia fotowoltaiczne.	103
5. Fotowoltaika wczoraj i dziś.	103
6. Literatura	106
Technologie helioenergetyczne na świecie.	109
1. Historia wykorzystania energii Słońca na świecie	109
2. Kolektory słoneczne na świecie.	111
3. Współczesne wykorzystanie fotowoltaiki na świecie	113
4. Największe termiczne elektrownie słoneczne na świecie	118
5. Największe fotowoltaiczne elektrownie słoneczne na świecie	122
6. Inne zastosowania energii Słońca w gospodarce człowieka.	124
7. Elektrownia orbitalna.	126
8. Literatura	128
Technologie helioenergetyczne w Polsce	131
1. Historia wykorzystania energii Słońca w Polsce.	131
2. Warunki słoneczne w Polsce.	133
3. Celowość stosowania instalacji solarnych w Polsce.	137
4. Rynek kolektorów słonecznych w Polsce	141
5. Przykłady instalacji kolektorów słonecznych w Polsce.	142
6. Fotowoltaika w Polsce.	149
7. Przykłady instalacji fotowoltaicznych w Polsce	150
8. Ankiety „helioenergetyka w Polsce”	155
9. Literatura	158
Podsumowanie	161
Załącznik nr 1	165
Załącznik nr 2	166

SŁOWO WSTĘPNE

Z prawdziwą przyjemnością przekazujemy Państwu opracowanie monograficzne „Technologie helioenergetyczne”. Naszym zamierzeniem było zaprezentowanie stanu aktualnego i perspektyw rozwoju energetyki opartej na energii Słońca.

Polska, w 88% pozyskuje energię ze źródeł konwencjonalnych. Ich wydobycie, transport oraz spalanie bardzo negatywnie oddziałują na środowisko naturalne i na człowieka. Ceny węgla, jak i energii rosną coraz bardziej; uwzględniając siłę nabywczą, w Polsce mamy jedno z najwyższych na świecie cen za energię.

W ostatnich latach najszybciej rozwijającą się gałęzią przemysłu na świecie są technologie solarne, przede wszystkim fotowoltaika. Ceny ogniw fotowoltaicznych spadają z każdym rokiem, przy rosnącej ich sprawności. Jeśli „boom słoneczny” się utrzyma, to za 20 lat większość energii elektrycznej na świecie będzie produkowana w termicznych elektrowniach słonecznych oraz w fotowoltaicznych elektrowniach słonecznych. Przykładowo, sumaryczna moc elektrowni fotowoltaicznych w Niemczech w 2007 wynosiła „zaledwie” 3,8 GW, zaś w 2013 r. ponad 35 GW.

Polska posiada lepsze warunki słoneczne niż Niemcy, należy więc rozwijać energetykę słoneczną. Elektrownie te nie wykazują negatywnego oddziaływania na środowisko. Duże koszty inwestycyjne, aczkolwiek spadające z każdym rokiem, rekompensowane są niewielkimi kosztami eksploatacyjnymi – nie trzeba kupować paliwa, spalać go, oczyszczać spalin, utylizować popiołów, itp.

W naszej ocenie, opublikowany materiał w przeważającym stopniu ma charakter faktograficzny, a przytoczone rozwiązania proekologiczne z całą pewnością wymagają pełniejszej analizy technicznej. Licząc zatem na życzliwe przyjęcie przekazanego Państwu opracowania, wyrażamy pełne przekonanie, iż następną edycja monografii poświęconej energetyce słonecznej pozwoli nam zamieścić kolejne przykłady wdrażanych technologii proekologicznych w tym obszarze.

Autorzy

WPROWADZENIE

Człowiek od dawna wykorzystuje energię na cele gospodarcze. Początkowo była to energia odnawialna, oparta na biomasie, energii Słońca, geotermii czy wietrze. Rewolucja przemysłowa i promowanie paliw kopalnych sprawiły, że to węgiel i ropa naftowa są obecnie najważniejszymi źródłami energii w większości krajów na świecie. Do lat 70-tych XX wieku paliwa kopalne były tanie, obecnie ich ceny rosną w zatrważającym tempie, dławiąc gospodarkę wielu państw.

Energetyka i ciepłownictwo oparte na węglu są największym źródłem zanieczyszczeń powietrza w wielu krajach, w tym również w Polsce. Zanieczyszczenie powietrza stanowi istotny czynnik ryzyka obniżający poziom zdrowia publicznego. Wskutek spalania paliw kopalnych statystyczny Europejczyk żyje o dziewięć miesięcy krócej [1].

W UE funkcjonuje obecnie około 300 dużych elektrowni węglowych, w których produkowana jest ¼ energii elektrycznej. Instalacje te odpowiedzialne są za ponad 70% emisji ditlenku siarki i blisko 50% emisji tlenków azotu. W znaczącym stopniu zanieczyszcza atmosferę tzw. niska emisja. Ze względu na dużą liczbę elektrowni węglowych oraz zaawansowany wiek instalacji, polska energetyka znajduje się w czołówce krajów UE pod względem emisji szkodliwych zanieczyszczeń do atmosfery oraz ich negatywnych skutków dla zdrowia [1].

Szacuje się, że w Polsce pracuje kilkaset tysięcy indywidualnych pieców na węgiel. Są to najczęściej przestarzałe jednostki, a spalany jest w nich przeważnie węgiel bardzo słabej jakości. Warto zaznaczyć, że nawet „ekologiczny” węgiel nazywany ekogroszkiem emituje ogromne ilości szkodliwych substancji do środowiska. W Polsce, nagminnie jest również spalanie w piecach wszystkiego, co jest palne. Butelki PET, opony, plastiki, torebki foliowe, śmieci, pieluchy, ubrania, itp. Jest to zachowanie karygodne. Warto sobie uzmysłowić, że przykładowo, spalając 1 kg polichloru winylu PCW, który zawarty jest w butelkach plastikowych czy foliach, wytwarzane jest

aż 280 dm³ gazowego chlorowodoru. W dużych miastach do powstawania smogu przyczynia się również transport samochodowy [2].

W Polsce, do kosztów energii i ciepła wlicza się tylko koszty bezpośrednie pozyskania energii czy ciepła. Nie uwzględnia się natomiast kosztów pośrednich związanych z wydobyciem, transportem, spalaniem węgla i towarzyszącą emisją zanieczyszczeń, oddziaływaniem produktów spalania na człowieka, florę, faunę i budynki, zagospodarowaniem popiołów, rekultywacją terenów pokopalnianych. W tabeli 1 przedstawiono wpływ zanieczyszczeń powietrza powstających podczas spalania paliw kopalnych, na zdrowie, środowisko i klimat. Skutki te odczuwamy na własnej skórze od wielu lat. Ażeby je zmniejszyć, potrzeba ogromnych nakładów finansowanych, każdy z nas za nie płaci. Przykładowo, choroby układu oddechowego przyczyniają się do absencji w pracy i kosztownych kuracji. Korzystanie z odnawialnych źródeł energii diametralnie wpłynęłoby na poprawę naszego zdrowia i kondycji finansowej społeczeństwa. W tabeli 1 przedstawiono wpływ wybranych zanieczyszczeń powietrza na zdrowie, środowisko i klimat. Skala zagrożeń jest oczywiście większa, zachęcamy czytelników do przestudiowania następującej literatury [3-5].

Tabela 1. Wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie, środowisko i klimat [1]

Zanieczyszczenie	Skutki		
	zdrowotne	środowiskowe	klimatyczne
Pył (PM)	Powoduje lub pogłębia choroby płuc i układu krążenia, wpływa na centralny układ nerwowy, układ rozrodczy i powoduje nowotwory. Prowadzi do przedwczesnej śmierci	Wpływa na zwierzęta w podobny sposób, jak na ludzi. Wpływa negatywnie na wzrost roślin. Zaburza pracę ekosystemu. Może powodować uszkodzenia budynków. Ogranicza widoczność	W zależności od wielkości cząstek i ich składu, może skutkować wzrostem bądź obniżeniem temperatury. Zakłóca opady atmosferyczne
Ozon	Może zmniejszyć wydolność płuc; prowadzić bądź pogłębiać astmę i inne choroby płuc. Może prowadzić do przedwczesnej śmierci.	Negatywnie oddziałuje na wegetację roślin; upośledza reprodukcję, obniża plony. Zaburza ekosystem, zmniejsza bioróżnorodność roślin, prowadzi do upośledzenia pochłaniania CO ₂	Jest gazem cieplarnianym, powoduje globalne ocieplenie
Tlenki azotu	Atakują wątrobę, płuca, śledzionę i krew. Pogłębiają choroby płuc, zwiększają podatność na zakażenia dróg oddechowych	Przyczynia się do zakwaszenia i eutrofizacji gleby i wody, co prowadzi do zmian w różnorodności gatunkowej. Działa jako prekursor O ₃ i PM. Może prowadzić do uszkodzenia budynków	Przyczyniają się do powstawania PM i O ₃ . Prowadzą do zmian klimatu
Tlenki siarki	Pogłębiają astmę i mogą zmniejszać czynność płuc. Powodują bóle głowy, ogólne uczucie dyskomfortu i niepokoju	Przyczyniają się do zakwaszenia gleby i wód powierzchniowych. Powodują szkody w ekosystemach wodnych i lądowych. Uszkadzają budynki	Powstające siarczany oziębiają atmosferę

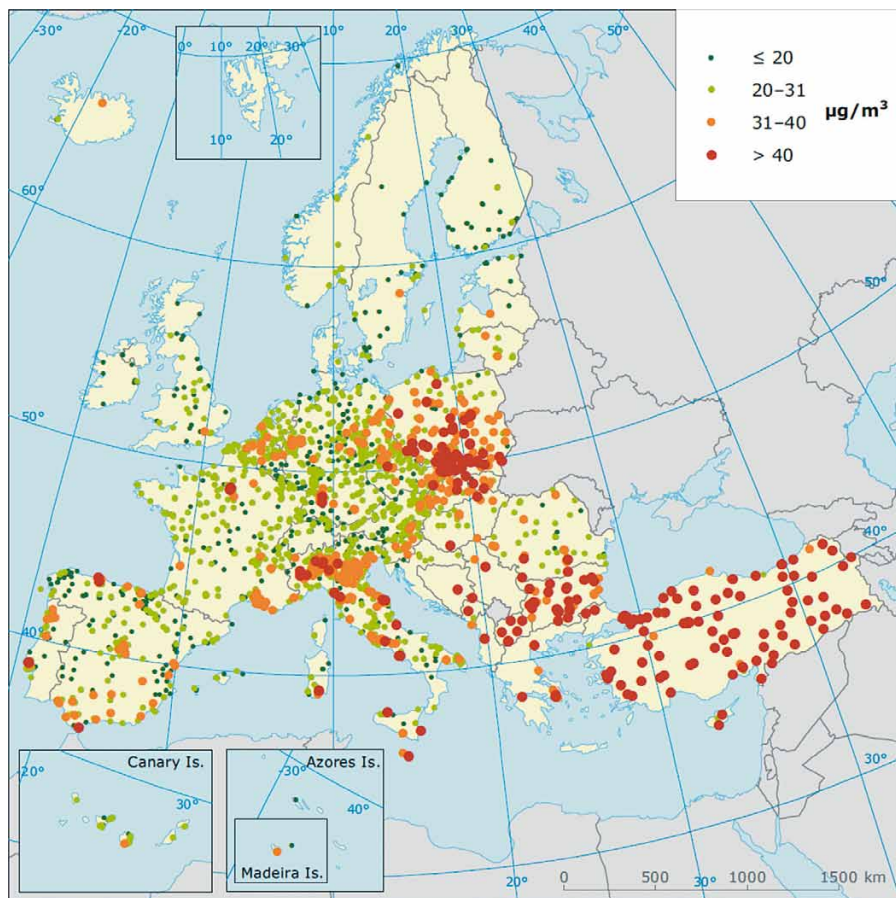
ciąg dalszy Tabeli 1

Tlenek węgla (czad)	Powoduje choroby serca, uszkadza system nerwowy, powoduje bóle i zawroty głowy, zmęczenie, a w skrajnych przypadkach śmierć	Podobny wpływ na zwierzęta, jak na ludzi	Przyczynia się do powstawania gazów cieplarnianych, takich jak CO ₂ i O ₃ .
Arsen	Kancerogeny. Uszkadza serce, wątrobę i nerki. Upośledza pracę układu krwionośnego i nerwowego.	Wysoce toksyczny dla środowiska wodnego, ptaków i zwierząt lądowych. Obniża plony roślin. Organiczne związki arsenu są trwałe i ulegają bioakumulacji	Brak
Kadm	Kancerogeny, uszkadza system nerwowy. Obniża rozrodność	Silnie toksyczny dla środowiska wodnego. Kadm jest bioakumulowany	Brak
Ołów	Uszkadza praktycznie każdy organ, a w szczególności układ nerwowy. Może spowodować przedwczesny poród, zaburzenia rozwoju umysłowego i mniejszy wzrost	Negatywnie wpływa na ekosystemy wodne i lądowe, prowadząc m.in. do zaburzeń zachowania, problemów z rozrodem, itp.	Brak
Rtęć	Powoduje uszkodzenie wątroby, nerek, przewodu pokarmowego i układu oddechowego. Może powodować uszkodzenia mózgu, układu nerwowego i zaburzać wzrost	Ulega bioakumulacji. Oddziaływanie podobne jak na ludzi. Silnie toksyczny dla środowiska wodnego	Brak
Nikel	Powoduje reakcje alergiczne, uszkadza układ oddechowy. Niektóre związki niklu są rakotwórcze	Oddziaływanie podobne jak na ludzi. Silnie toksyczny dla środowiska wodnego	Brak
Bezen	Rakotwórczy, powoduje białaczkę i wady wrodzone. Uszkadza centralny układ nerwowy i produkcję krwi	Oddziaływanie podobne jak na ludzi. Silnie toksyczny dla środowiska wodnego, szczególnie dla bezkręgowców. Uszkadza plantacje rolnicze	Gaz cieplarniany. Przyczynia się do powstawania O ₃ i wtórnych aerozoli organicznych, które negatywnie wpływają na klimat
Benzopireny	Kancerogenne. Podrażniają układ oddechowy	Toksyczne dla ekosystemów wodnych i ptaków. Ulegają bioakumulacji	Brak

Eksperti Światowej Organizacji Zdrowia WHO podkreślają, że cząstki pyłu PM10 mogą przedostać się do płuc, a następnie do krwiobiegu i stać się przyczyną chorób serca, raka płuc, astmy i ostrych infekcji układu oddechowego. WHO szacuje, że z powodu wdychania szkodliwych pyłów, które unoszą się w powietrzu, rocznie umiera ponad 2 mln ludzi na świecie. Jednocześnie eksperci zaznaczają, że ograniczenie emisji trujących gazów mogłoby zmniejszyć liczbę przedwczesnych zgonów nawet o 70% [6].

Polska energetyka, ciepłownictwo i motoryzacja korzystają z konwencjonalnych źródeł energii. W związku z tym jesteśmy jednymi z największ-

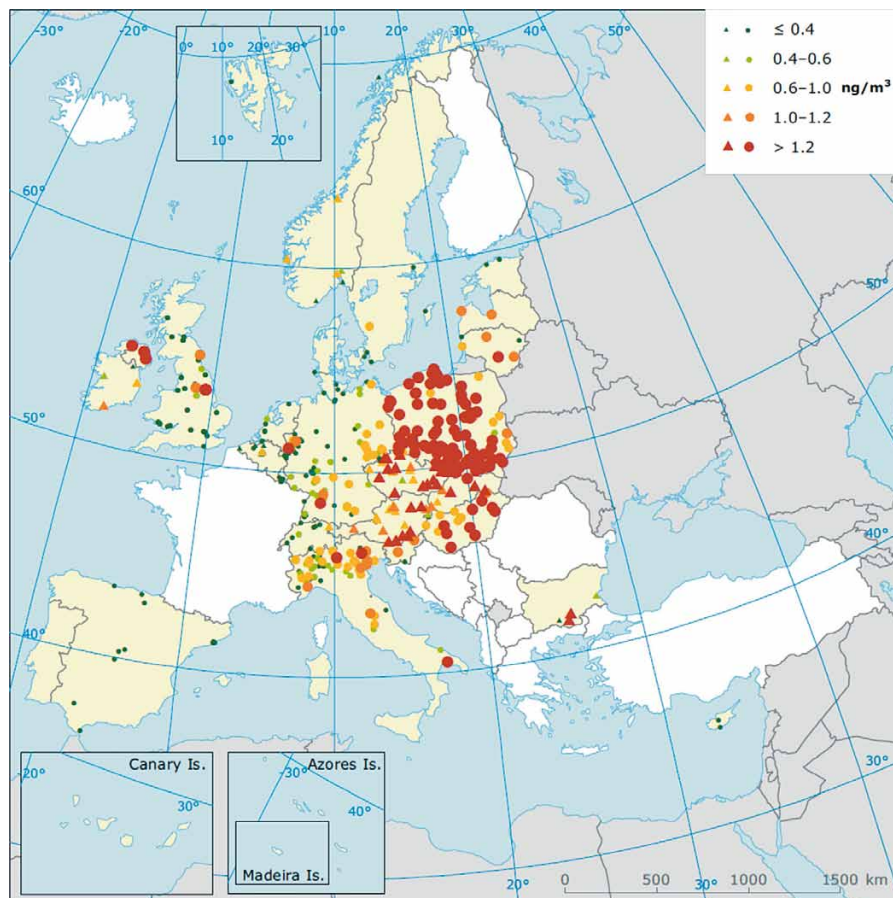
szych trucicieli w UE i na świecie. Trujemy nie tylko sąsiadów, ale przede wszystkim siebie, a najbardziej odczuwają to nasze dzieci. Przykładowo, na rysunkach 1 i 2 została przedstawiona roczna emisja PM10 i benzopirenów [1].



Rys. 1. Roczna emisja PM10 [1]

Wysoki poziom zanieczyszczenia powietrza w uprzemysłowionym rejonie Śląska wiąże się ze zwiększonym ryzykiem zachorowania na choroby nowotworowe. Do najbardziej rakotwórczych i mutagennych zanieczyszczeń powietrza należą wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, wytwarzane głównie przy spalaniu węgla. Badania uszkodzeń molekularnych i genetycznych w próbkach krwi mieszkańców Śląska wykazały, że narażenie na zanieczyszczenia powietrza wiąże się ze znaczącym wzrostem adduk-

tów kancerogennych DNA w procesie wymiany chromatyd siostrzanych i z aberacjami chromosomów [7,8].



Rys. 2. Roczna emisja benzopirenów [1]

W Polsce, najbardziej zanieczyszczonym miastem jest Kraków. Głównym winowajcą takiego stanu rzeczy jest niska emisja, przede wszystkim spalanie węgla i śmieci w piecach węglowych, którymi ogrzewa się mieszkania około 30 tysięcy gospodarstw domowych. Zagrożenie potęgują takie czynniki jak bezwietrzna pogoda, brak opadów i niska temperatura. Najgorsza sytuacja jest oczywiście zimą. Przykładowo, w grudniu 2012 roku na stacji pomiarowej w Al. Krasieńskiego średniodobowy poziom stężenia pyłu PM_{10} wyniósł $352 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (704% normy!), zaś w Nowej Hucie stężenie PM_{10} przekroczyło normę o ponad 800%. Gazy i pyły zawieszane, np. we mgłę, osadza-

ją się w błonach śluzowych i jamie ustnej, torując drogę wirusom. U osób z chorobami dróg oddechowych występuje nasilenie objawów astmy, kaszel, duszności. W Krakowie obserwuje się pandemię schorzeń układu oddechowego u najmłodszych. Dzieci mają coraz częściej uszkodzoną błonę śluzową wyścielającą drogi oddechowe, właśnie przez substancje toksyczne, takie jak gazy i pyły. Uszkodzona błona sprzyja namnażaniu wirusów i bakterii w organizmie [9].

Aby zapobiec zatrutowaniu mieszkańców Krakowa, władze opracowały kilkuletni program naprawczy. Jego celem będzie znaczące ograniczenie emisji trujących pyłów i gazów, które wnikając do płuc i układu krążenia, powodują ciężkie choroby od astmy po zawał serca. Zakaz palenia węglem zacznie obowiązywać od 1 stycznia 2014 roku, jednak nie od razu mieszkańcy będą z tego rozliczani. Radni zaproponowali 5-letni okres przejściowy w trakcie którego z Krakowa i większości miast Małopolski mają zniknąć piece węglowe. Zgodnie z projektem, władze Krakowa mają refundować aż 90% kosztów wymiany pieca węglowego na ogrzewanie gazowe lub centralne ogrzewanie. Wysokość dopłat do rachunków za ogrzewanie będzie uzależniona od zamożności rodziny, a więc od poziomu jej dochodów [10]. Warto podkreślić, że do 2020 r. Polacy będą musieli przestać ogrzewać domy węglem. Rząd chce wprowadzić program antysmogowy.

Według Raportu [11], w 2010 r. w Polsce emisja zanieczyszczeń gazowo-pyłowych tylko z elektrowni węglowych doprowadziła do utraty niemal 1,2 mln dni pracy oraz blisko 5400 przedwczesnych zgonów. Dla porównania, w 2010 r. w Polsce w wypadkach drogowych zginęły „zaledwie” 3907 osoby [12].

Wytwarzanie energii elektrycznej w Polsce wiąże się z pracą tysięcy górników. Oprócz bezpośredniego zagrożenia, (np. wybuch metanu), są oni narażeni na wdychanie pyłu węglowego, a to prowadzi do pylicy węglowej płuc, jest to choroba zawodowa. Analizy stężenia pyłu węglowego w polskich kopalniach węgla wykazały, że w 90% stanowisk pracy pod ziemią przekroczone są dopuszczalne wartości. Otworowa eksploatacja deformuje budowę geologiczną, rzeźbę terenu, poziom wód podziemnych i powierzchniowych, a jednocześnie zanieczyszcza chemicznie glebę i szatę roślinną. Kopalnie odkrywkowe powodują dewastację gruntu, dodatkowo wypompowywana woda jest przyczyną opadania wód gruntowych i powierzchniowych. W 2012 r. polskie kopalnie węgla brunatnego wypompały 514 mln m³ wody [13], która odpływa do Bałtyku bądź paruje. Pogłębia to stepowanie kraju, gdyż zasoby wodne Polski są bardzo małe, porównywalne z Egiptem.

W tabeli 2 porównano energetykę konwencjonalną i odnawialną w kontekście kosztów zewnętrznych, akceptacji społecznej, zasobów i ich dostępności w każdym regionie.

Tabela 2. Porównanie energetyki konwencjonalnej i odnawialnej w kontekście kosztów zewnętrznych, akceptacji społecznej, zasobów i ich dostępności w każdym regionie (opracowanie własne)

Elektrownia	Koszty zewnętrzne	Akceptacja społeczna	Zasoby w Polsce		Dostępność w każdym regionie
			obecnie	za 100 lat	
Węglowa na węgiel kamienny	++	+/-	++	--	--
Węglowa na węgiel brunatny	++	--	++	+/-	--
Jądrowa	+/-	--	--	--	--
Gazowa	-	+/-	-	--	--
Wodna	-	+/-	+/-	+/-	+/-
Wiatrowa	-	+/-	+	+	+/-
Geotermalna	-	+/-	+	+	+/-
Biogazowa	-	+/-	++	++	++
Słoneczna	--	++	+	+	+

Analizując tabelę 2 można stwierdzić, że energetyka oparta na węglu generuje największe koszty zewnętrzne. Budowa elektrowni (kociołni) tego typu nie jest zbyt akceptowana społecznie, największe protesty w Polsce obserwuje się w przypadku energetyki opartej na węglu brunatnym i energetyki jądrowej. Energetyka słoneczna cieszy się dużym poparciem. Obecnie, w Polsce są znaczące zasoby węgla, jednak za 100 lat, przy obecnym wydobyciu, praktycznie skończą się pokłady węgla kamiennego i znacząco zmniejszą zasoby węgla brunatnego. Energetyka odnawialna, a szczególnie oparta na biomasie i energii Słońca posiada zasoby niewyczerpane. Zasoby węgla w Polsce skoncentrowane są głównie w południowo-zachodniej części Polski, do pozostałych regionów węgiel bądź energia muszą być dostarczane. Zasoby energii słonecznej są znaczące praktycznie w każdym regionie Polski.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie Państwu historycznych, ale i najnowszych osiągnięć człowieka w pozyskiwaniu energii Słońca. Helioenergetyka będzie w najbliższym czasie silnie rozwijana na całym świecie. Motorem tego są aspekty ekonomiczne (coraz droższy węgiel, coraz tańsze i wydajniejsze kolektory słoneczne), środowiskowe, wyczerpywanie się zasobów paliw konwencjonalnych. Polska ma ogromne zasoby energii odnawialnej, które są w stanie pokryć potrzeby energetyczne zarówno odbiorców przemysłowych, jak i indywidualnych. Niezrozumiałą sprawą jest, że wiele osób nadal stawia na konwencjonalne źródła energii. Pozyskiwanie energii elektrycznej i ciepła ze źródeł odnawialnych nie degraduje środowiska, jest tańsze, daje pracę w kraju.

Zachęcamy Państwa do zapoznania się z naszymi wcześniejszymi monografiami, poświęconymi energetyce odnawialnej: „Technologie bioenergetyczne” [14] oraz „Technologie geoenergetyczne” [2].

Literatura

1. Europejska Agencja Środowiska, *Air quality in Europe – 2012 report*, Kopenhaga 2012.
2. B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, G. Piechota, *Technologie geoenergetyczne*, Wyd. UMK, Toruń 2010.
3. J. Greszta, A. Gruszka, M. Kowalkowska, *Wpływ emisji na ekosystem*, Wydawnictwo Naukowe „Śląsk”, Katowice 2002
4. J.N.B. Bell, M. Treshow, *Zanieczyszczenie powietrza a życie roślin*, WNT, Warszawa 2004.
5. W. Seńczuk (red.), *Toksykologia współczesna*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2006.
6. <http://www.who.int/en> (wejście 03.10.13.)
7. A. Strupczewski, *Koszty zewnętrzne wytwarzania energii elektrycznej*, Biuletyn miesięczny PSE, 11-27, grudzień 2005.
8. A. Strupczewski, U. Radovic, *Koszty zewnętrzne wytwarzania energii elektrycznej w Polsce*, Biuletyn Miesięczny PSE, 14-29, styczeń 2006.
9. <http://krakow.gazeta.pl> (wejście 04.10.13.).
10. <http://www.twojapogoda.pl/wiadomosci/112876,zima-bedzie-zakaz-palenia-weglem?page=2>(wejście 04.10.13.).
11. L. Myllyvirta, J. Jerabek, I. Łoś, L. Pazderski, *Węgiel zabija. Analiza kosztów zdrowotnych emisji zanieczyszczeń z polskiego sektora energetycznego*, Fundacja Greenpeace Polska, Warszawa 2013.
12. Komenda Główna Policji, *Wypadki drogowe w Polsce w 2010 r.*, Warszawa 2011.
13. A. Pietraszewski, *Sytuacja gospodarcza Polski w roku 2012*, Węgiel Brunatny 1(83), 2013.
14. B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Technologie bioenergetyczne*, Wyd. UMK, Toruń 2009.

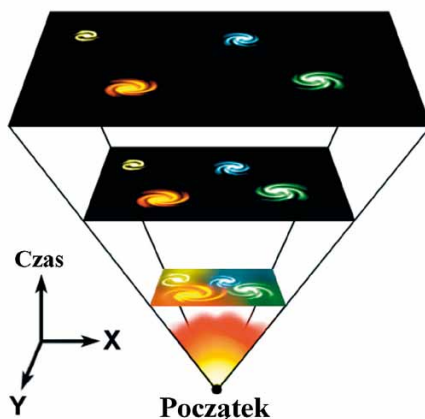
POWSTANIE, BUDOWA I PRZEMIANY ZACHODZĄCE NA SŁOŃCU

1. Powstanie wszechświata

Historia wszechświata zaczyna się od Wielkiego Wybuchu (Bing-Bang), który dał początek najlżejszemu pierwiastkowi – wodorowi. Wielki Wybuch na początku wszechświata nastąpił jednocześnie w całej przestrzeni: każda cząstka materii zaczęła się oddalać od wszystkich innych cząstek [1]. Koncepcję Wielkiego Wybuchu zaproponował belgijski ksiądz i astronom Georges-Henri Lemaître – jego zdaniem świat powstał z Atomu Pierwotnego około 14 mld lat temu [2]. Próbę opisu stanu wszechświata można rozpocząć od momentu, jaki nastąpił po upływie 10^{-44} s [3]. Po tak krótkim odstępie czasu, wszechświat miał promień o długości $L_0 \approx 10^{-35}$ m, jego temperatura przekraczała $t_0 > 10^{37}$ K, a gęstość wynosiła $d_0 \approx 10^{98}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Przy taki dużych gęstościach zaczęły odgrywać rolę kwantowe właściwości czasoprzestrzeni. Około 10^{-35} sekund przemiana fazowa spowodowała, że wszechświat wszedł w fazę inflacji kosmologicznej, podczas której rozszerzał się wykładniczo. Kiedy ta inflacja zatrzymała się, materialne składowe wszechświata były w stanie plazmy kwarkowo-gluonowej, w której cząstki składowe poruszały się relatywistycznie. W miarę jak wszechświat dalej rozszerzał się i stygł, zaszła przemiana zwana bariogenezą, podczas której kwarki i gluony połączyły się w bariony – protony i neutrony [3].

Od momentu Wielkiego Wybuchu trwa ekspansja wszechświata. Proces ten można porównać do powiększającego się, nadmuchiwanego balonu (trzeba jednak pamiętać, że w tym porównaniu powłoka przedstawia wszystkie wymiary wszechświata). Potwierdziły to badania Edwin Powell Hubbela i Milтона Humasona blisko sto lat temu. Naukowcy korzystając z największego wówczas teleskopu świata o średnicy 2,5 m, umieszczone-

go na górze Mount Wilson w Pasedenie odkryli, że dalekie galaktyki oddalają się od Ziemi z prędkością proporcjonalną do ich odległości od nas [4]. Na rysunku 1 przedstawiono schemat rozszerzania się wszechświata.



Rys. 1. Schemat rozszerzania się wszechświata (Fredrik, zmienione)

Opisując rozwój materii, wyróżnia się okresy nazywane erami. W każdym z nich określone oddziaływania i właściwości materii dominowały i wpływały na strukturę procesów (tabela 1) [3].

Tabela 1. Ewolucja wszechświata [3]

Nazwa ery	Czas od Wielkiego Wybuchu	Gęstość na końcu ery [kg·m ⁻³]	Temperatura na końcu ery [K]	Pozostałości
Kwantowa	?	?	?	
Plancka	0-10 ⁻⁴⁴ s	10 ⁹⁶	10 ³³	
Hadronowa	10 ⁻⁴⁴ -10 ⁻⁴ s	10 ¹⁷	10 ²²	nuleony
Leptonowa	10 ⁻⁴ s-10 ⁴ s	10 ⁷	10 ¹⁰	tło neutrinowe
Radiacyjna	10 ⁴ s-3·10 ⁵ lat	10 ⁻¹⁸	3·10 ³	hel, promieniowanie tła
Galaktyczna (materii)	3·10 ⁵ lat-nadal	6·10 ⁻²⁷	2,7	galaktyki

2. Ewolucja gwiazd

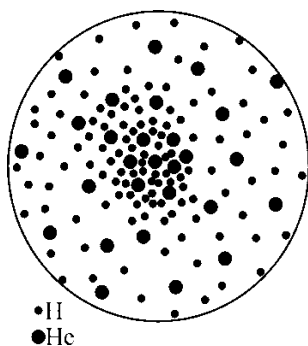
Gwiazdy powstają z materii międzygwiazdowego (obłoku międzygwiazdowej), która składa się głównie z atomów wodoru. Typowa gęstość obłoku molekularnego to kilka milionów cząstek w cm³. Obłoki pyłowo-gazowe

wypełniające galaktyki mogą zagęszczać się w wyniku lokalnej fluktuacji gęstości, ale częściej dochodzi do zagęszczenia w wyniku „zderzenia” dwóch obłoków. Inicjatorem zagęszczania się materii obłoku może być silne promieniowanie elektromagnetyczne będące wynikiem wybuchu innej gwiazdy, powoduje ono ruch cząsteczek obłoku od jednej strony, tworząc linowy wzrost zagęszczenia. Stopniowo obłok ten zaczyna się zapadać pod wpływem grawitacji, zapadaniu przeciwdziała ciśnienie obłoku, wywołane temperaturą gazu [5].

Wnętrze protogwiazdy podlega prawom fizyki gazu, który ulega ścisaniu; wzrasta jego gęstość, ciśnienie i temperatura. W początkowej fazie kolapsu (zapadania grawitacyjnego) nie następuje gwałtowny wzrost ciśnienia i temperatury, ponieważ wydzielana energia (grawitacyjna) zostaje prawie w całości natychmiast wypromieniowana. Przyczyna tego tkwi w niemal całkowitej przezroczystości obłoku dla promieniowania długofalowego, a na takich właśnie falach wypromieniowują najwięcej energii gazy o temperaturze 1000 K. Wydzielana energia grawitacyjna zostaje więc zamieniona na kwanty promieniowania, które bez problemu mogą opuścić wnętrze obłoku. Sytuacja ulega zmianie, gdy temperatura we wnętrzu kolapsującego obłoku wzrasta do około 10000 K. Następuje wówczas jonizacja materii i wzrost jej nieprzezroczystości. Moment ten można uznać za początek narodzin gwiazdy [6].

Proces narodzin gwiazd składa się więc z dwóch faz: gwałtownego, grawitacyjnego zapadania się obłoku materii (faza kolapsu) i z przebiegającego znacznie spokojniej, grawitacyjnego kurczenia się materii (faza kontrakcji). Ostatecznie, w centrum gwiazdy powstają odpowiednie warunki do reakcji jądrowych z udziałem wodoru [6].

Nowonarodzona, typowa gwiazda, ma skład chemiczny jednorodny w całej objętości (rysunek 2). Stanowi go około 80% wodoru, niecałe 20% helu i śladowe ilości pozostałych pierwiastków.



Rys. 2. Schemat budowy wewnętrznej budowy gwiazdy w chwili jej narodzin

Synteza termojądrowa dostarcza energię, która rozgrzewa gwiazdę. O szybkości przebiegu syntezy jąder atomów wodoru w hel decyduje prędkość zderzających się cząstek (czyli temperatura gazu) oraz liczba zderzeń (czyli gęstość, a pośrednio – ciśnienie gazu). Równowaga w gwieździe jest dynamiczna, a jej warunki zmieniają się w miarę upływu czasu. Wzrost energii wydzielającej się w centrum gwiazdy powoduje wzrost temperatury, co z kolei owocuje rozprężeniem się gazu, które skutkuje zmniejszeniem się liczby zderzających się cząsteczek i zmniejszeniem się szybkości reakcji termojądrowych, co prowadzi do zmniejszenia temperatury itd. Zmiany mogą być powolne, ale mogą też być w pewnych obszarach gwiazdy gwałtowne, co obserwujemy pośrednio jako rozbłyski na Słońcu [7].

Po milionach lub miliardach lat, w zależności od masy początkowej, w jądrze gwiazdy zaczyna kończyć się wodór. Spowalniane są reakcje jądrowe i tworzone są coraz bardziej masywne pierwiastki, wskutek czego rośnie gęstość gwiazdy, może ona zająć mniejszą objętość, maleje też przewodnictwo cieplne gazu. W wyniku czego spada temperatura powierzchni, ale rośnie temperatura wnętrza, zapadają się zewnętrzne warstwy materii (tak jak w czasie zagęszczania się obłoku gazowo-pyłowego na początku ewolucji gwiazdy). Temperatura gwiazdy nagle wzrasta, zewnętrzne warstwy są znów wypychane i gwiazda rośnie do rozmiarów, jakich nigdy wcześniej w czasie swej ewolucji nie przyjmowała. Staje się ona czerwonym olbrzymem [3].

Gwiazdy o masie mniejszej niż połowa masy Słońca nigdy nie będą w stanie dokonać dalszej syntezy z helu, nawet gdy w jądrze zakończy się już synteza helu z wodoru. Powodem tego jest niska masa gwiazdy, która nie pozwala jej wyrzeć wystarczająco dużego ciśnienia na jądro. Te gwiazdy to czerwone karły, takie jak np. Proxima Centauri i żyją one przez setki miliardów lat [3].

Kiedy gwiazda średniej wielkości (np. Słońce) osiągnie fazę czerwonego olbrzyma, jej zewnętrzne warstwy ekspandują, a jądro zapada się do środka. W jego wnętrzu zachodzi synteza atomów helu w węgiel; synteza ta uwalnia energię. W gwieździe wielkości Słońca proces ten może zająć tylko parę minut. Struktura atomowa węgla jest zbyt mocna, by być dalej ściskana przez otaczającą go materię. Jądro staje się stabilne i koniec gwiazdy jest blisko. Gwiazda zaczyna teraz odrzucać swoje zewnętrzne warstwy, które utworzą rozmytą chmurę nazywaną mgławicą planetarną. Pod koniec pozostanie już tylko 20% początkowej masy gwiazdy, a gwiazda spędzi resztę swoich „dni” na stopniowym ochładzaniu się i kurczeniu, aż osiągnie średnicę zaledwie kilku tysięcy kilometrów. Stanie się białym karłem. Węglowe jądro zapada się, a zewnętrzne warstwy uciekają w przestrzeń. Gwiazda dogorywa jako biały karzeł, w którym ustały już reakcje syntezy termojądrowej [8].

Ewolucja gwiazd bardziej masywnych (więcej niż 5 mas Słońca) poprzez stadium błękitnego olbrzyma czy błękitnego nadolbrzyma może prowadzić do stadium czerwonego nadolbrzyma. W gęstniejącym i gorącym jądrze następuje wychwyt elektronów przez protony – powstawanie neutronów i neutrino (gwiazda protoneutronowa). Neutrony przedostając się przez spadającą materię wywołują reakcje syntezy cięższych jąder niż jądro Fe. Bez wybuchów supernowych żadne cięższe niż żelazo pierwiastki nie mogłyby istnieć. Propagująca się ku powierzchni fala uderzeniowa wraz z neutrino rozpędza materię na zewnątrz gwiazdy. Materia ta może później utworzyć następane gwiazdy czy liczne planety [9].

3. Narodziny i przemiany zachodzące na Słońcu

Na początku nasza galaktyka wyglądała prawdopodobnie jak rozległy zespół przypadkowo poruszających się chmur materii międzygwiazdowej. Kurczenie się galaktyki zachodziło równolegle z tworzeniem się kolejnych gwiazd. Pierwsze pokolenia gwiazd, które powstały wtedy z kondensacji obłoków materii międzygwiazdowej, zachowały chaotyczny charakter ruchów z przypadkowymi kierunkami i wartościami prędkości. Przypadkowy charakter ruchów w galaktyce powoli był zastępowany przez tendencję do obiegu wokół środka galaktyki. Powstające wówczas gwiazdy poruszały się po prawie równoległych, zamkniętych torach [3].

Za moment narodzin Słońca można uznać chwilę, gdy w jego wnętrzu, w centralnej części zaczęły przebiegać reakcje termojądrowe przemiany wodoru w hel. Dla zapoczątkowania reakcji jądrowych w zagęszczającym się obłoku plazmy, składającej się przede wszystkim z jąder i atomów wodoru, konieczna jest gęstość rzędu $10^2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ i temperatury $2\cdot 10^7 \text{ K}$ – warunki te są w centrum gwiazdy. Wówczas w zderzeniach pomiędzy protonami p dochodzi do powstania ciężkiego izotopu wodoru deuteru D . Ażeby proces mógł zajść, jeden z protonów musi stać się neutronem, wysyłając przy tym pozyton (e^+) i neutrino elektronowe (ν_e):



Powstały pozyton dość szybko ginie – łączy się z pierwszym napotkanym wolnym elektronem w plazmie i ulega anihilacji na 2 kwanty gamma (γ):

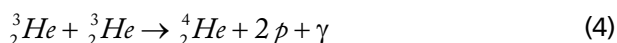


Powstające neutrino elektronowe (ν_e), ze względu na bardzo mały przekrój czynny, bardzo słabo oddziaływają z materią. Neutrino w ciągu 2 s opuszcza Słońce, niosąc maksymalnie energię 0,42 MeV.

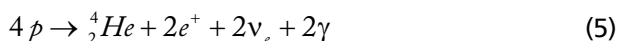
Jądro deuteru jest bardzo aktywne; szybko oddziałuje z protonem, przy czym powstaje jądro lekkiego izotopu helu, a nadmiar energii unosi kwant gamma:



Gdy 2 wytworzone w ten sposób jądra lekkiego izotopu helu zderzą się, wtedy powstaje jądro cięższego izotopu helu, w którym nukleony są silniej związane:



Sumarycznie (wzory 1-4), na Słońcu zachodzi proces:



Słońce „spala” w ciągu roku 10^{19} kg wodoru, tracąc zarazem 1% masy w okresie jednego miliarda lat. Energia wyzwolana podczas syntezy 1 kg helu jest równoważna energii uzyskiwanej przez spalenie około 20 mln kg węgla.

Jądro 4_2He , które powstało w pierwotnej nukleosyntezie kosmicznej, może reagować z jądrem 3_2He :



Promieniotwórczy 7_4Be po wychwycie elektronu z plazmy przekształca się w lit 7_3Li :



Przedstawione wyżej sposoby „spalania” wodoru należą do cyklu p-p, w którym rolę katalizatora spełnia sam wodór. Nazwa cyklu pochodzi od 2 protonów (reakcja 1), zaczynających cały cykl [3].

Hans Albert Bethe [10] zaproponował inny mechanizm zamiany wodoru w hel. Proces ten jest złożonym cyklem katalitycznym węglowo-azotowo-tlenowym (oznaczanym CNO) „spalania” wodoru w obecności ${}^{12}C$:



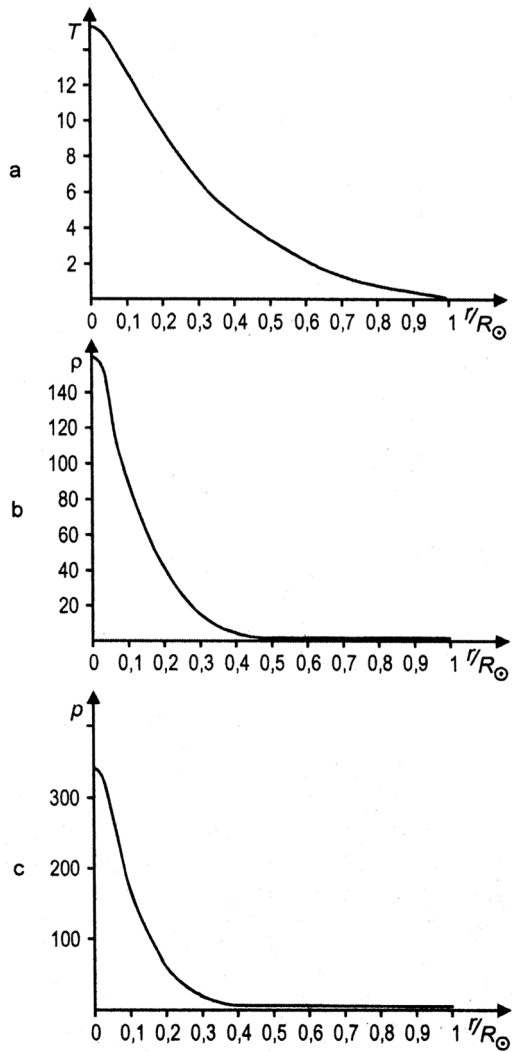
Cykl CNO również prowadzi do powstania jądra helu, zgodnie z równaniem (5). Zarówno w cyklu protonowym i CNO wydziela się ta sama ilość energii – 26,73 MeV.

4. Budowa Słońca

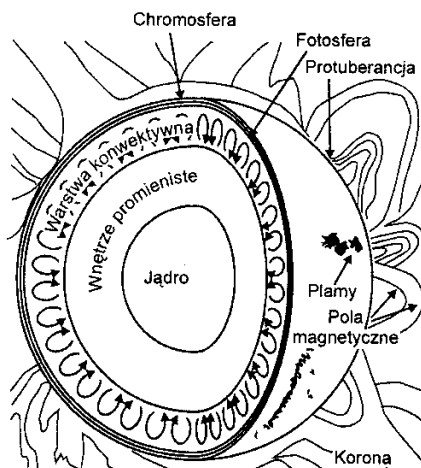
Słońce jest kulą zjonizowanego gazu o masie około 2×10^{30} kg, z czego 74% stanowi wodór, 25% hel, a niespełna 1% pierwiastki cięższe i sporadycznie występujące proste związki chemiczne. Kula plazmy utrzymywana jest w równowadze hydrostatycznej dzięki sile grawitacji materii znajdującej się powyżej z jednej strony i rosnącym wraz z głębokością ciśnieniem gazu [11].

O strukturze Słońca można wnioskować na podstawie modeli określających teoretyczny opis wewnętrznej struktury Słońca przy uwzględnieniu założenia, że zachowanie się gazów w różnych warunkach temperatury, gęstości i ciśnienia daje takie same wyniki we wnętrzu Słońca, jaki w ziemskich laboratoriach. W centrum Słońca panuje temperatura około 15,5 mln K (rysunek 3), umożliwiającą zachodzenie cyklu jądrowego p-p i w mniejszym stopniu cyklu CNO. Zmiany gęstości i ciśnienia są gwałtowniejsze niż zmiana temperatury (rysunek 3) [11].

Ze względu na gęstość, około 90% masy Słońca mieści się w kuli o promieniu $r \approx 0,5R$ ($R = 6,96 \cdot 10^5$ km). Z kolei 90% energii wytwarzane jest w kuli o średnicy $r \approx 0,2R$. Schematycznie strukturę Słońca przedstawiono na rysunku 4. Kula o promieniu około 0,25 promienia Słońca stanowi jądro. W jądrze i wewnętrznej części otoczki jądra do odległości około 0,8R, transport energii w kierunku powierzchni odbywa się przez promieniowanie. Obszar, w którym już nie zachodzą procesy termojądrowe, leżący bezpośrednio nad jądrem, to część promienista otoczki [3].



Rys. 3. Przebieg temperatury (a) [mln K], gęstości (b) [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] i ciśnienia (c) [mld atm] we wnętrzu Słońca w zależności od odległości od centrum ($R=0$) [11].

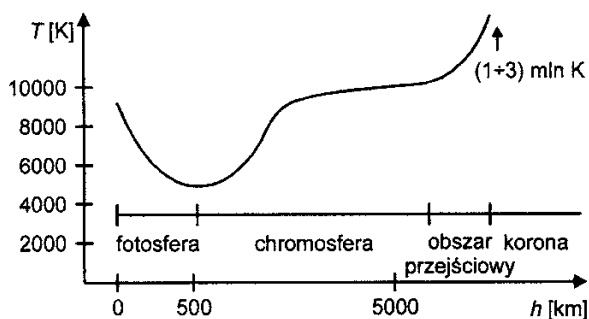


Rys. 4. Przekrój przez Słońce [12]

Powierzchnia Słońca charakteryzuje się istnieniem różnych zjawisk, których natężenie zmienia się z cyklem aktywności słonecznej (plamy, protuberancje, pola magnetyczne). Słońce otoczone jest niezwykle rozrzedzoną, gorącą koroną gazową, która łączy się przez chromosferę z jego świecąca powierzchnią – fotosferą. Fotosfera jest warstwą o długości około 500 km, to tu powstaje obserwowane przez nas widmo ciągłe promieniowania. Postrzeganie fotosfery jako powierzchni gwiazdy wynika ze zmian optycznej przezroczystości materii dla głębszych warstw gwiazdy. Obserwacje fotosfery wykazują, że powierzchnia Słońca ma strukturę ziarnistą, tworzą ją tzw. granule, rozdzielone ciemniejszymi granicami. Granule to górne powierzchnie komórek konwekcyjnych, tworzonych przez ruch wznoszący materii ogrzewanej wewnątrz Słońca, która wypływa na powierzchnię, po czym ochładza się i opada na granicach granul. Granule mają temperaturę wyższą niż otoczenie o około 100 K, średnicę około 1000 km i istnieją 8 minut. Po tym czasie rozplývają się one po powierzchni; zastępują je kolejne granule. Oprócz sieci granul typowej wielkości są również tak zwane supergranule o promieniach do 30000 km istniejące dłużej, do 24 godzin [13].

Nad fotosferą znajdują się niejednorodne warstwy plazmy: chromosfera i korona (rysunki 4 i 5). Chromosfera jest niejednorodną warstwą gazów, wymieszane są w niej włókna plazmy o różnej temperaturze. Najniższe warstwy chromosfery mają temperaturę ok. 4500 K, która wzrasta wraz z wysokością i osiąga kilkadziesiąt tysięcy kelwinów u podstaw warstwy przejściowej. Za ten wzrost odpowiedzialne jest pole magnetyczne

Słońca. Chromosfera jest widoczna gołym okiem jedynie podczas całkowitych zaćmień Słońca. Zaraz po zakryciu fotosfery przez Księżyc widać cienką purpurową obwódkę otaczającą z jednej strony ciemny dysk Księżycy. Charakterystyczna barwa tej obwódki jest powodem, dla którego nazwano ją chromosferą [14].



Rys. 5. Zmiany temperatury w atmosferze Słońca [3]

Warstwa przejściowa w atmosferze Słońca jest cienkim obszarem rozgraniczającym chromosferę od korony. Grubość warstwy przejściowej nie przekracza kilku kilometrów i w tym wąskim obszarze następuje silna zmiana warunków fizycznych. Temperatura materii zmienia się w bardzo szerokim zakresie, od około 30000 K w górnej chromosferze do około miliona kelwinów w koronie. Charakterystyczna temperatura plazmy w warstwie przejściowej to kilkaset tysięcy kelwinów. W warstwie przejściowej dokonuje się pełna jonizacja wodoru i helu, które są głównymi składnikami materii słonecznej. Występuje tam także bardzo silne pole magnetyczne, wywierające znaczny wpływ na materię i gaz uwalniany z powierzchni Słońca [15].

Korona słoneczna jest najbardziej zewnętrzną częścią atmosfery Słońca. Korona ma zdecydowanie wyższą temperaturę od warstw leżących niżej. Odpowiedzialne są za to rozbłyski – najgwałtowniejsza forma wyładowań na powierzchni Słońca. W rozbłyskach, trwających zwykle około godziny, wyzwolana jest energia rzędu 10^{27} J, a temperatura sięga 40 mln K. Korona słoneczna jest źródłem wiatru słonecznego – jest to strumień elektronów i protonów poruszających się z prędkością 10^5 m·s⁻¹ [16,17].

Słońce jest oddalone od Ziemi o około 150 mln km, leży w Ramieniu Oriona w galaktyce Drogi Mlecznej, 26 tys. lat świetlnych od jej środka i około 26 lat świetlnych od płaszczyzny równika Galaktyki. Okrąża centrum Drogi Mlecznej z prędkością ok. 220-260 km/s w czasie około 226 mln lat, co daje ponad 20 obiegów w ciągu dotychczasowej historii gwiazdy [18].

Obecnie Słońce jest żółtym karłem. Średnica Słońca wynosi $1,39 \cdot 10^6$ km (109 średnic Ziemi), powierzchnia $6,09 \cdot 10^{12}$ km², objętość $1,41 \cdot 10^{18}$ km³, masa zaś $1,99 \cdot 10^{30}$ kg [19]. Gdy zapasy wodoru wyczerpią się, co nastąpi za mniej więcej 5 mld lat, Słońce zmieni się w czerwonego olbrzyma i najprawdopodobniej pochłonie trzy najbliższe sobie planety, po kolejnym miliardzie lat odrzuci zewnętrzne warstwy i będzie zapadało pod własnym ciężarem przeistaczając się w białego karła. Według hipotez, przez wiele miliardów lat będzie stygło, aż stanie się czarnym karłem [20].

5. Energia Słońca

Jak już wspomniano, energia słoneczna generowana jest w wyniku przemian termojądrowych zachodzących w jądrze Słońca (równania 1-13). Zgodnie z równaniem Einsteina (14), w każdej sekundzie około 4,3 mln Mg materii ulega anihilacji:

$$E = mc^2 = 4,3 \cdot 10^9 \text{ g} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \approx 3,9 \cdot 10^{26} \text{ J} \quad (14)$$

Wyzwolona w jądrze energia jest następnie przenoszona ku jego powierzchni za pomocą fal elektromagnetycznych. Dyfundujące przez Słońce fotony niosące energię E (h – stała Plancka, ν – częstość fali, λ – długość fali):

$$E = h\nu = hc\lambda^{-1} \quad (15)$$

zderzają się z jądrami atomów lub elektronami, albo też zmieniają kierunek ruchu przy zbliżeniu się do tych cząstek. Wskutek takiego oddziaływania foton traci część energii, przez co jego długość fali staje się większa. Silne pochłanianie fotonów ma miejsce w odległości większej od $0,86 R$ od środka Słońca. Panuje tam znacznie niższa temperatura niż w centrum, wobec czego wiele swobodnych elektronów porusza się na tyle wolno, że mogą one być wychwytywane przez jądra wodoru lub innych pierwiastków. W ten sposób tworzą się atomy, które łatwo absorbują promieniowanie elektromagnetyczne. W wyniku absorpcji fotonów o dużej energii, a następnie ich emisji o większej fali, zwiększa się gradient temperatury. Tak więc generowane w jądrze Słońca promieniowanie gamma zamienia się kolejno w promieniowanie rentgenowskie, nadfioletowe i na koniec w światło widzialne, które dociera do Ziemi [17].

Jeśli Państwa zainteresowała tematyka związana z budową i przemianami zachodzącymi na Słońcu, zachęcamy do zapoznania się z poniższą literaturą [1-20].

6. Literatura

1. M. Ross, *Introduction to Cosmology*, Wiley, Chichester 1997.
2. M. Heller, *Kosmologia Lemaître'a*, Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2008.
3. H. Drozdowski, *Fizyczny obraz świata*, Wyd. Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza, Poznań 2007.
4. E. Hubble, *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 15, 168-173, 1929.
5. D. Pralnik, *An introduction to the theory of stellar structure and evolution*, Cambridge University Press, Cambridge 2000.
6. R.B. Larson, *The physics of star formation*, Reports on Progress in Physics 66, 1651-1697, 2003.
7. S. Atzeni, J. Meyer-ter-Vehn, *Nuclear fusion reactions*, University of Oxford Press, Oxford 2004.
8. R.J. Tayler, *The Sun as a star*, Cambridge University Press, Cambridge 1997.
9. G. Laughlin, P. Bodenheimer, F.C. Adams, *The end of main sequence*, The Astrophysical Journal 482, 420-432, 1997.
10. H.A. Bethe, *Energy production in stars*, Physical Review 55, 434-456, 1939.
11. L. Oster, *Astronomia współczesna*, PWN, Warszawa 1986.
12. J. Włodarczyk, *Słońce niesforne*, Wiedza i Życie (6)654, 34, 1989.
13. B.W. Carroll, *An introduction to modern astrophysics*, Addison-Wesley, Reading Mass 1996.
14. E.P. Kontar, I.G. Hannah, A.L. MacKinnon, *Chromospheric magnetic field and density structure measurements using hard X-rays in a flaring coronal loop*, Astronomy&Astrophysics 489, 57-60, 2008.
15. J.S. Lewis, *Physics and chemistry of the solar system*, Elsevier Academic Press, Amsterdam 2004.
16. M.J. Aschwanden, *Physics of the solar corona: an introduction with problems and solutions*, Praxis Publishing, Chichester 2006.
17. Z.M. Jarzębski, *Konwersja fotowoltaiczna*, PAN, Warszawa 1990.
18. O. Gerhard, *Mass distribution in our Galaxy*, Space Science Reviews 100, 1290138, 2002.
19. NASA website, *Solar System Exploration*.
20. A. Heger et al., *How massive single stars end their life*, Astrophysical Journal 1(591), 288-300, 2003.

ŚWIATŁO, JEGO NATURA I ODDZIAŁYWANIE Z MATERIAŁ

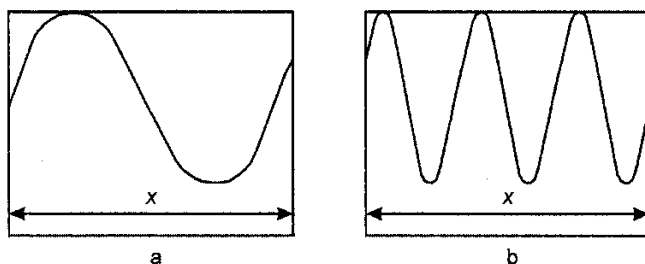
1. Czym jest światło

Potocznie „światłem” nazywa się widzialną część promieniowania elektromagnetycznego, czyli promieniowanie widzialne odbierane przez siatkówkę oka ludzkiego. Precyzyjne ustalenie zakresu długości fal elektromagnetycznych nie jest tutaj możliwe, gdyż ludzki wzrok charakteryzuje się nieco inną wrażliwością, stąd za wartości graniczne przyjmuje się maksymalnie 380-780 nm. W nauce pojęcie światła jest znacznie szersze (używa się często pojęcia promieniowanie optyczne), gdyż jest to nie tylko światło widzialne, ale i sąsiednie zakresy, czyli ultrafiolet i podczerwień [1,2].

Opisując światło, warto „przyrzeć się” jego najmniejszej cząstce – fotonowi. Foton jest cząstką elementarną nieposiadającą ładunku elektrycznego ani momentu magnetycznego, o masie spoczynkowej równej zero ($m_0 = 0$) i liczbie spinowej $s = 1$. Fotony są nośnikami oddziaływań elektromagnetycznych, a ponieważ wykazują dualizm korpuskularno-falowy są równocześnie falą elektromagnetyczną. W zależności od energii fotonów promieniowanie, na które się składają, ma różną nazwę. I tak, mówi się (poczynając od najwyższej energii fotonu) o promieniowaniu gamma, rentgenowskim (promieniowaniu X), nadfiolecie, świetle widzialnym, podczerwieni, mikrofalach, falach radiowych (promieniowaniu radiowym) [3].

Fotony powstają w chwili zmiany struktury atomu, cząstki lub jądra – w chwili powstania uzyskują całą energię. Fotony powstają i istnieją z prędkością graniczną – prędkością światła. Zerowa masa spoczynkowa fotonów powoduje, że nie można stosować do nich praw Newtona. Fotony z grupy innych cząstek wyróżnia jeszcze to, że w próżni wszystkie poruszają się z prędkością światła, niezależnie od ich energii czy pędu [2].

Foton można sobie wyobrazić jako małą „paczkę” fal określoną rozmiarami stałej Plancka ($h=6,6\cdot 10^{-34}$ J·s). W paczce znajduje się fala elektromagnetyczna, która porusza się z prędkością światła. Rozmiary paczki są zawsze takie same. Paczka rozciąga się na odległość x , która reprezentuje nieokreśloność położenia fotonu. Im więcej fal zmieści się w paczce, tym większa energia w niej zawarta; foton o wyższej częstotliwości niesie większą energię (rysunek 1) [2].

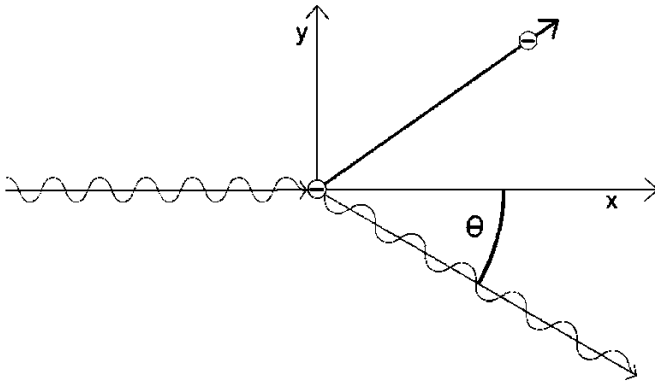


Rys. 1. Foton jako paczka falowa, $E_b > E_a$ [2]

2. Korpuskularno-falowa natura światła

Fotony charakteryzują się dualizmem korpuskularno-falowym polegającym na przejawianiu, w zależności od sytuacji, właściwości korpuskularnych (pęd, dobrze określona lokalizacja, doświadczenie Comptona) lub właściwości falowych (dyfrakcja, interferencja). Aby zrozumieć naturę światła, należy myśleć o nim zarówno jak o strumieniu cząstek, jak i fali [4].

Bardzo dobrym przykładem na korpuskularną naturę promieniowania elektromagnetycznego jest zjawisko Comptona. Arthur Holly Compton wysunął w 1923 r. hipotezę, że padająca wiązka promieni X nie jest falą, lecz zbiorem fotonów o określonej energii, które ulegają sprężystym zderzeniom ze swobodnymi elektronami. Padający foton przekazuje część swojej energii elektronom, z którym się zderza, więc foton rozproszony ma energię niższą niż padający, a więc niższą częstotliwość i większą długość fali. Za słabo związany uważany jest przy tym elektron, którego energia wiązania w atomie, cząsteczce lub sieci krystalicznej jest znacznie niższa, niż energia padającego fotonu [5].



Rys. 2. Schemat zjawiska Comptona [6]

Przesunięcie Comptona $\Delta\lambda$ można przedstawić:

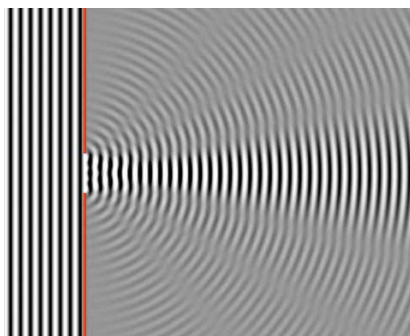
$$\lambda_c = h(m_e c)^{-1} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} (9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1} \cong 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ m} \quad (1)$$

Na podstawie wzoru (1) można stwierdzić, że zmiana długości fali nie zależy od jej początkowej długości. Dla wyników Comptona nie dawało się jednak znaleźć wyjaśnienia na gruncie teorii falowej, zaś proste i eleganckie wyjaśnienie opierało się na założeniu, że kwanty światła rozpraszają się w zderzeniach z pojedynczymi elektronami, że tak przed jak i po zderzeniu mają jednoznacznie określony kierunek ruchu i że niosą nie tylko energię, ale i pęd – czyli że zachowują się jak klasyczne cząstki. Jednocześnie, w tym samym doświadczeniu pomiar energii (długości fali) rozproszonego promieniowania opierał się o wykorzystanie jego falowej natury, a konkretnie zjawiska dyfrakcji. Niedługo po opublikowaniu wyników Comptona dualizm korpuskularno-falowy stał się powszechnie uznaną koncepcją, a kwanty światła, nazwane wkrótce fotonami, przestały być uważane za twór czysto matematyczny, lecz zostały uznane za realne byty fizyczne [7,8].

Przykładem na falową naturę światła jest zjawisko dyfrakcji światła, czyli ugięcie fali. Jest to zjawisko fizyczne zmiany kierunku rozchodzenia się fali na krawędziach przeszkód oraz w ich pobliżu. Dyfrakcja zachodzi dla wszystkich wielkości przeszkód, ale wyraźnie jest obserwowana dla przeszkód o rozmiarach porównywalnych z długością fali.

Jeżeli wiązka fal przechodzi przez szczelinę lub omija obiekt, to zachodzi zjawisko ugięcia. Zgodnie z zasadą Huygensa fala rozchodzi się w ten sposób, że każdy punkt fali staje się nowym źródłem fali kulistej. Za przeszkodą fale nakładają się na siebie zgodnie z zasadą superpozycji (sumo-

wanie się kilku niezależnych ruchów falowych). Przy spełnieniu pewnych warunków za przeszkodą pojawiają się obszary wzmocnienia i osłabienia rozchodzących się fal (interferencja) [9].



Rys. 3. Komputerowa symulacja dyfrakcji [6]

3. Promieniowanie elektromagnetyczne – charakterystyka, źródła promieniowania

W mechanice kwantowej pole elektromagnetyczne jest postrzegane jako wirtualne fotony. Pole elektromagnetyczne jest układem dwóch pól: pola elektrycznego i pola magnetycznego. Pola te są wzajemnie związane, a postrzeganie ich zależy też od obserwatora, wzajemną relację pól opisują równania Maxwella. W próżni i jednorodnym idealnym dielektryku składowe elektryczne i magnetyczne niesionej energii są sobie równe, natomiast w ośrodku o niezerowym przewodnictwie elektrycznym są różne [10].

Jak już wspomniano, rozchodzenie fal elektromagnetycznych opisują równania Maxwella. W próżni można je przedstawić następująco:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (3)$$

gdzie: \vec{B} – wektor indukcji pola magnetycznego

\vec{E} – wektor natężenia pola elektrycznego

Równania (2) i (3) są liniowymi równaniami różniczkowymi fali rozchodzącej się z prędkością c :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (4)$$

gdzie: c – prędkość światła w próżni
 ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni
 μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni

W nieprzewodzącym bezstratnym ośrodku o względnej przenikalności ϵ_r i względnej przenikalności magnetycznej μ_r prędkość fali wyniesie:

$$c_{osr} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}} \quad (5)$$

Dla fali płaskiej rozchodzącej się w kierunku x rozwiązania powyższych równań różniczkowych mają postać:

$$E(x, t) = E_0 \sin\left(2\pi\nu t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad (6)$$

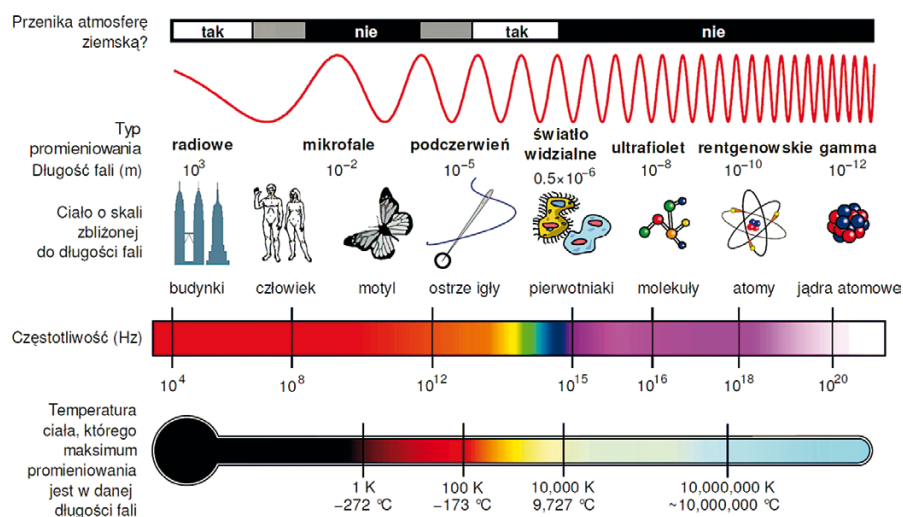
$$B(x, t) = B_0 \sin\left(2\pi\nu t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad (7)$$

gdzie: E_0 – amplituda natężenia pola elektrycznego
 B_0 – amplituda indukcji pola magnetycznego
 ν – częstotliwość fali
 λ – długość fali

Równania Maxwella i ich rozwiązanie pozwoliły połączyć pole elektryczne i magnetyczne w jedno pole elektromagnetyczne i pokazać, że ma ono taką samą naturę jak światło [11].

Analiza widma promieniowania elektromagnetycznego w całym zakresie od fal długich (radiowych) do najkrótszych promieni γ wykazała, że różnią się one jedynie częstotliwością (długością), a nie naturą [11].

Energia promieniowania słonecznego zawiera się w większości pomiędzy falami o długości 280-4000 nm i odpowiada dość dokładnie promieniowaniu ciała doskonale czarnego w temperaturze około 6000 K. W tabeli 1 podany jest podział promieniowania słonecznego w różnych pasmach. Około połowy energii całkowitego promieniowania słonecznego znajduje się w świetle widzialnym i ultrafiolecie, a druga połowa znajduje się w bliskiej i średniej podczerwieni (700-4000 nm). Światło, czyli promieniowanie elektromagnetyczne widzialne, odpowiada wąskiemu przedziałowi promieniowania w zakresie długości fal od 380 nm do 780 nm (rysunek 4).



Rys. 4. Widmo fal elektromagnetycznych [6]

Na światło widzialne reaguje siatkówka oka człowieka w procesie widzenia [11,12].

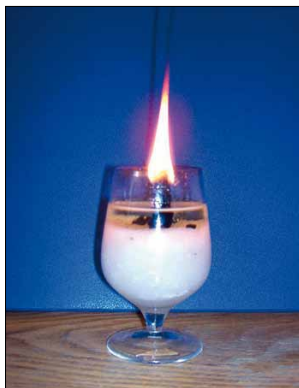
Tabela 1. Podział promieniowania słonecznego [12]

Pasmo	Długość [nm]	Irradiancja [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	[%]
ultrafiolet	<350	62	4,5
bliski ultrafiolet	350-400	57	4,2
widzialne	400-700	522	38,2
bliska podczerwień	700-1000	309	22,6
podczerwień	> 1000	417	30,5
Stała słoneczna		1367	100

Znaczna część promieniowania słonecznego jest pochłaniana lub odbijana przez ziemską atmosferę. Ultrafiolet pochłaniany jest w dużej mierze przez tlen, zwłaszcza w postaci ozonu (ozonosfera), podczerwień przez gazy cieplarniane (metan, tlenek azotu (I), ditlenek węgla, para wodna). W związku z tym atmosfera ziemska jest przezroczysta głównie dla światła widzialnego [13].

Źródła światła to ciała, przedmioty emitujące światło. Dla ludzi najważniejszym źródłem światła jest Słońce bez którego nie istniałoby życie na Ziemi. Ogólnie, źródła światła można podzielić na naturalne i sztuczne. Naturalnymi źródłami światła są m.in. gwiazdy, błyskawice, zorza polarna i czynne wulkany. Światło naturalne emitują również niektóre zwierzęta, np. ryby głębinowe czy świetliki. Sztuczne źródła światła wynalazł człowiek – początko-

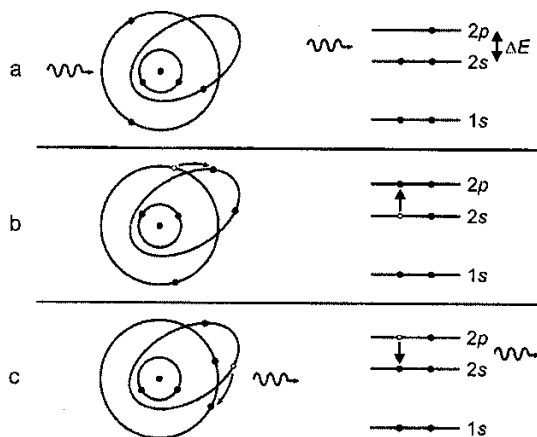
wo służyły one tylko oświetlaniu, z czasem znalazły zastosowanie w gospodarce i nauce. Są to ogniska, pochodnie, świece, kaganki (rysunek 5), lampy naftowe, żarówki, świetlówki, lasery, plazma, łuk elektryczny, itd [13].



Rys. 5. Kaganek (fot. B. Igliński)

4. Oddziaływanie światła na materię

Chcąc opisać oddziaływanie fotonu na atom, można posłużyć się modelem atomu Bohra (rysunek 6). W tym wypadku foton oddziałuje z atomem boru mającym 5 elektronów, krążących na orbitach 1s, 2s oraz 2p. Foton wzbudza elektron, przenosząc go z orbity 2s na orbitę 2p. Gdy wzbudzony elektron powróci na orbitę 2s, emitowany jest foton [2].



Rys. 6. Oddziaływanie fotonu z atomem [14]

Światło wyraźnie oddziałuje na atom tylko wtedy, gdy energia padającego fotonu jest równa różnicy energii 2 poziomów atomowych, Światło o takiej energii, a zarazem i odpowiedniej częstotliwości nazywa się światłem o częstotliwości rezonansowej ω_0 dla danego atomu:

$$\omega_0 = 2\pi\nu_0 \quad (8)$$

gdzie:

$$\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0} \quad (9)$$

ostatecznie:

$$\omega_0 = 2\pi \frac{c}{\lambda_0} \quad (10)$$

Można więc mówić o rezonansowej długości fali świetlnej λ_0 jako wielkości odwrotnie proporcjonalnej do częstotliwości rezonansowej. W obrazie falowym określonej energii fotonu odpowiada określona długość fali [2].

Na atom oddziałuje również światło o innej częstotliwości. Większość odbieranych wrażeń świetlnych jest efektem właśnie takiego nierezonansowego oddziaływania światła z atomami. Poprawny opis tych oddziaływań można otrzymać, zastępując atom modelem oscylatora. Jeżeli promieniowanie elektromagnetyczne pada na atomy i cząsteczki cieczy i gazów, to zachowują się one jak układy odpowiednich oscylatorów elektrycznych: elektronowych i atomowych, o określonych częstotliwościach drgań własnych, charakterystycznych dla danego rodzaju atomów i cząsteczek [2,10].

4.1. Rozpraszanie światła

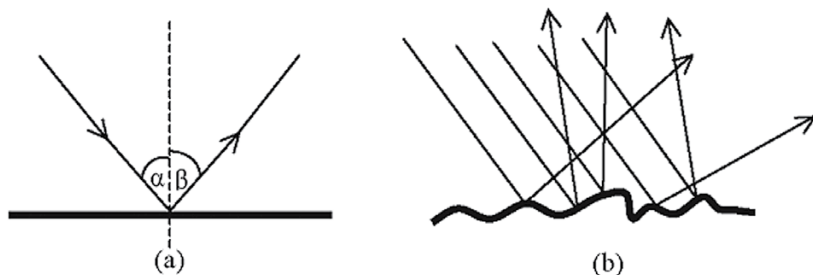
Ośrodki, przez które może przechodzić światło (np. woda), definiuje się jako ciała przezroczyste. Definicję tę można oczywiście zastosować dla promieniowania niewidzialnego: kwarc jest przezroczysty dla promieniowania nadfioletowego a pryzmat solny NaCl jest przezroczysty dla podczerwieni [15].

Promieniowanie wysyłane przez źródło do otaczającego je ośrodka, rozchodzi się w tym ośrodku po liniach prostych, jeżeli ten ośrodek jest jednorodny. W ośrodku takim światło biegnie ze stałą prędkością wzdłuż linii prostych. Jeżeli na drodze promieniowania znajdzie się jakaś przeszkoda, wówczas na jej granicy może zajść wiele zjawisk: na krawędzi występuje ugięcie (dyfrakcja opisana wcześniej), na równej powierzchni – odbicie, na chropowatej – rozpraszanie.

Odbicie definiuje się jako zmianę kierunku rozchodzenia się fali na granicy dwóch ośrodków, powodującą, że pozostaje ona w ośrodku, w którym się rozchodzi. Odbicie może dawać obraz lustrzany lub być rozmyte,

zachowując tylko właściwości fali, ale nie dokładny obraz jej źródła (rysunek 7a). Urządzenie zbudowane w celu odbijania fal to zwierciadło (lustro). Lustra odgrywają znaczącą rolę w naszym codziennym życiu. W helioenergetyce, duże zwierciadła zwane heliostatami wykorzystuje się w elektrowniach słonecznych [16].

Fizycznie zjawisko rozpraszania światła (rysunek 7b) związane jest z falową naturą światła, które oddziałując z materią powoduje jej drgania i wypromieniowanie (wtórnych) fal elektromagnetycznych. Te wtórne fale nazywane są promieniowaniem rozproszonym (rozpraszaniem). Wiele zjawisk fizycznych związane jest z rozpraszaniem światła, mimo że zazwyczaj nie używamy tej terminologii w potocznej mowie. Np. odbicie od porowatych powierzchni (odbicie dyfuzyjne), dyfrakcja, a nawet odbicie i załamanie światła można tłumaczyć jego rozpraszaniem (zasada Huygensa). Ze zjawiskiem rozpraszania światła związane są też zjawiska dyspersji, interferencji i dyfrakcji [13].



Rys. 7. Odbicie (a) i rozpraszanie światła (b) [13]

4.2. Efekt fotoelektryczny

Pod koniec XIX wieku, wkrótce po odkryciu elektronu, stwierdzono, że z powierzchni niektórych metali oświetlanych światłem są wysyłane elektrony. Zaproponowane przez Alberta Einsteina wyjaśnienie tego zjawiska i jego opis matematyczny oparte było na założeniu, że energia wiązki światła pochłaniana jest w postaci porcji (kwantów) równych $h\nu$, gdzie h jest stałą Plancka, a ν oznacza częstotliwość fali. Kwant promieniowania pochłaniany jest przy tym w całości. Einstein założył dalej, że usunięcie elektronu z powierzchni metalu (substancji) wymaga pewnej pracy zwanej pracą wyjścia, która jest wielkością charakteryzującą daną substancję (stałą materiałową). Pozostała energia unoszona jest przez emitowany elektron:

$$h\nu = W + E_k \quad (11)$$

gdzie: h – stała Plancka

ν – częstotliwość padającego fotonu

W – praca wyjścia

E_k – maksymalna energia kinetyczna emitowanych elektronów

W efekcie fotoelektrycznym wewnętrznym energia fotonu też jest całkowicie pochłaniana przez elektron. Ale elektron nie jest uwalniany, jak to ma miejsce w zjawisku fotoelektrycznym zewnętrznym; przenosi się on do pasma przewodnictwa, zmieniając tym samym właściwości elektryczne materiału (fotoprzewodnictwo). Zjawisko to zachodzi tylko wówczas, gdy energia fotonu jest większa, niż wynosi szerokość pasma wzbronionego (odległość energetyczna między pasmem walencyjnym a pasmem przewodnictwa). Przenoszenie elektronów przez fotony na wyższe poziomy energetyczne w pobliżu złącza wywołuje siłę elektromotoryczną na styku dwóch materiałów pod wpływem światła, zjawisko to zwane jest fotoelektrycznym zjawiskiem zaporowym lub zjawiskiem fotowoltaicznym. Efekt fotoelektryczny jest powszechnie wykorzystywany w fotokomórkach, bateriach słonecznych, fotopowielaczach, noktowizorach, elementach CCD w aparatach cyfrowych, fotodiodach itd. Pochłaniane przez te urządzenia światło wykorzystywane jest do wytwarzania prądu elektrycznego i generowania ładunku, którego ilość można zmierzyć [17].

5. Wpływ atmosfery ziemskiej na promieniowanie słoneczne

Zanim energia promieniowania słonecznego dotrze do Ziemi, ulega różnego rodzaju oddziaływaniom (pochłanianie i rozpraszanie), a w efekcie osłabieniu. W tabeli 2 przedstawiono pasma pochłaniania promieniowania słonecznego i długofalowego w atmosferze [18,19].

Tabela 2. Pasma pochłaniania promieniowania krótko- i długofalowego w atmosferze [20]

Substancja	Pasma pochłaniania
Tlen	0,01 ÷ 0,2 μm
Ozon	0,2 ÷ 0,3 μm ; 9,6 μm
Para wodna	0,81 μm ; 0,93 μm ; 1,13 μm ; 1,37 ÷ 2,66 μm ; 6,26 μm ; 9-34 μm
Ditlenek węgla	2,3 ÷ 3,0 μm ; 4,2 ÷ 4,4 μm ; 12,5 ÷ 16,5 μm

Proces rozpraszania polega na oddziaływaniu promieniowania z materią (O_2 , N_2 , H_2O , inne gazy, aerozole), w wyniku którego zmianie ulega

kierunek rozchodzenia się fali, ale energia i długość fali się nie zmieniają. Stopień rozproszenia promieniowania słonecznego jest zależny od ilości cząsteczek, przez które to promieniowanie musi przejść oraz od wymiarów tych cząsteczek względem danej długości fali [20].

U podstaw rozpraszania leży oddziaływanie ładunków elektrycznych (swobodnych bądź związanych) z falą elektromagnetyczną, wskutek czego wprawiane są one w ruch oscylacyjny. Przyspieszane ładunki promieniają w różnych kierunkach: natężenie światła padające z danego kierunku podlega kierunkowej redystrybucji. Rozpraszanie, podobnie jak absorpcja, sprawia więc, że natężenie wiązki światła rozchodzącej się w ośrodku w danym kierunku maleje wraz z przebytą drogą [21].

Pierwszym ogólnym sformułowaniem opisu rozpraszania płaskiej fali elektromagnetycznej na kulce z dowolnego materiału o dowolnym rozmiarze jest praca Gustawa Miego [22]. Mie rozważał rozpraszanie na aerozolach przez cząstki większe od około 1/10 długości fali promieniowania. Z kolei Rayleigh przyjął, zgodnie z założeniami fizyki klasycznej, że rozpraszanie następuje w wyniku pobudzenia do drgań w rozpraszającym ciełe cząstki obdarzonej ładunkiem elektrycznym. Drgająca cząstka (zazwyczaj elektron) zachowuje się tak jak dipol (antena dipolowa) wypromieniowując energię pobudzenia jako falę elektromagnetyczną o tej samej częstotliwości jaka ją pobudziła, zależnie od kierunku względem dipola, najwięcej w kierunku prostopadłym do dipola, a wcale w kierunku wzdłuż dipola. Dla dipola znacznie krótszego od długości fali jego promieniowanie jest proporcjonalne do czwartej potęgi jego długości. Intensywność I światła docierającego do obserwatora w wyniku rozproszenia przez jedną małą kulistą cząstkę, dla niespolaryzowanego światła o długości fali γ i intensywności światła padającego I_0 określa:

$$I = I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^6 \quad (12)$$

gdzie: R – odległość od cząstki

ϕ – kąt rozproszenia

n – współczynnik załamania światła materiału cząstki

d – średnica cząstki

Ze wzoru (12) tego wynika, że:

- rozproszenie światła zależy silnie od długości fali świetlnej
- światło jest rozpraszane we wszystkich kierunkach
- występująca zależność od kąta rozproszenia jest niewielka
- światło rozproszone w przód ma takie samo natężenie jak światło rozproszone wstecz

Intensywność rozpraszania od wielu cząstek we wszystkich kierunkach zależy od rozmiaru cząsteczek i długości fali światła. W szczególności, w przypadku rozpraszania Rayleigha, współczynnik rozpraszania i natężenie rozpraszanego światła są odwrotnie proporcjonalne do czwartej potęgi długości fali światła. Współczynnik rozpraszania Rayleigha k_s wyraża się zatem wzorem:

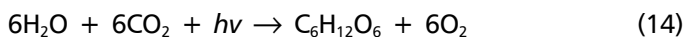
$$k_s = \frac{2\pi^5}{3} m \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \frac{d^6}{\lambda^4} \quad (13)$$

gdzie: m – liczba cząstek rozpraszających
 d – średnica cząstek
 λ – długość fali

Rayleigh pierwszy wyjaśnił (wzór 13), że natężenie rozpraszanego światła jest odwrotnie proporcjonalne do czwartej potęgi długości fali świetlnej. Jeżeli na cząsteczki ośrodka mętnego pada światło białe, to najsilniej będą rozpraszane promienie o najkrótszej fali, czyli fioletowe. Jeżeli więc wziąć pod uwagę widmo widzialne, na które reaguje oko ludzkie, to ponieważ promienie fioletowe mają 2 razy mniejszą długość fali niż promienie czerwone, będą one 2^4 , czyli 16 razy silniej rozpraszane niż czerwone. Bardzo silnie będą rozpraszane promienie niebieskie, a częściowo także i zielone; wskutek wzajemnego nałożenia się tych barw niebo przybiera barwę błękitną [2].

6. Rola Słońca i światła w życiu człowieka

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 [23]. W uproszczonej formie sumaryczny przebieg fotosyntezy z glukozą jako syntezowanym węglowodanem można zapisać następująco:



To właśnie Słońce wpływa na klimat na Ziemi. Warto chociażby wspomnieć, że wiatr powstaje wskutek nierównomiernego ogrzewania Ziemi. Obieg wielu pierwiastków, w tym bezcennej wody, jest również wymuszony przez Słońce. Należy tu zauważyć, że aeroenergetyka, hydroenergetyka, bioenergetyka i energetyka konwencjonalna są pochodną helioenergetyki.

Promienie słoneczne nagrzewają atmosferę i powierzchnię Ziemi, dzięki czemu możliwa jest wegetacja organizmów żywych. Słońce i ruch Ziemi dzieli dobę na dzień i noc, rok na pory roku, wyznaczają więc rytm naszego życia. Dzięki światłu widzimy – widzenie umożliwiają fotoreceptory zlokalizowane w oku.

W dawnych kulturach oddawano cześć boską Słońcu oraz bóstwom solarnym z nim związanym bądź system wyznaniowy uznający Słońce jako prasiłę twórczą. Słońce było centralnym punktem wielu prehistorycznych i starożytnych religii. Słońce i jego ziemski przedstawiciel ogień były wówczas jedynymi źródłami światła i ciepła, a więc życia (było uważane za dawcę, ale też za niszczyciela życia). W konsekwencji często Słońce stawało się też symbolem nieskończoności, źródła energii i mocy życiowej. W pierwszych wiekach chrześcijaństwa próbowano skierować rzymski kult solarny na osobę Chrystusa – określając go jako *sol verus* („słońce prawdziwe”), *sol salutis* („słońce zbawienia”), *sol iustitiae* („słońce sprawiedliwości”) i *lux mundi* („światłość świata”). Solarną symbolikę wykorzystywano w ikonografii, liturgii, a pierwsze promienie Słońca i ich źródło – *lux aeterna* („światłość wieczną/wiekuistą”) chwalono w pieśniach. Ostatecznie „ochrzczono” także najpopularniejsze pogańskie święto rzymskie – Dies Natalis Soli Invicti, wyznaczając w tym samym dniu Święto Bożego Narodzenia [24,25].

Światło znajduje szerokie zastosowanie w nauce i gospodarce człowieka. Przykładowo, zjawisko Comptona odgrywa istotną rolę w oddziaływaniu promieniowania gamma i rentgenowskiego z materią. W zakresie energii fotonów od kilkudziesięciu keV do kilku MeV rozpraszanie Comptona jest najbardziej prawdopodobnym rodzajem oddziaływania, jakiemu może ulec promieniowanie podczas przechodzenia przez materię. Ma więc decydujące znaczenie dla zdolności pochłaniania promieniowania w tym zakresie energii, przez co pośrednio gra zasadniczą rolę w radiobiologii, m.in. radioterapii [13].

Podczerwień stosowana jest w noktowizji, pozwala na przekaz danych w światłowodzie, przekaz danych w powietrzu (zdalne sterowanie z pilota), wykorzystywana jest w saunach na podczerwień, w spektroskopii IR (umożliwia identyfikację organicznych związków chemicznych i badanie ich struktury); podczerwień pozwala na obserwacje kosmosu w podczerwieni, jak również badanie historii obrazu malarskiego – w podczerwieni widać wcześniejsze warstwy szkiców i przemalowywań [26]. Podczerwień pozwala na przesyłanie plików w telefonii komórkowej.

Fale radiowe znajdują bardzo szerokie zastosowanie w telekomunikacji, radiofonii, telewizji, radioastronomii i wielu innych dziedzinach życia, nauki i techniki [27].

Podstawowe zastosowania mikrofal to radary i łączność satelitarna. Na co dzień mikrofałe wykorzystuje się w kuchence mikrofalowej¹ do rozmrażania, podgrzewania i gotowania żywności. Telefony komórkowe standardu GSM pracują w częstotliwościach 870–960 MHz, DCS 1710–1880 MHz oraz UMTS 2,1 GHz. Nawigacja systemu globalnego pozycjonowania (GPS) wykorzystuje fale o częstotliwości $L_1=1575,42$, $L_2=1227$, $L_3=1173$ MHz. Bezprzewodowe sieci komputerowe (WLAN) używają mikrofal w zakresie 2,4 GHz bądź 5 GHz. Na łączność pomiędzy urządzeniami bluetooth pozwalają mikrofałe w zakresie 2,4 GHz. Reaktor mikrofalowy używany jest w chemii do przeprowadzania reakcji w warunkach napromieniowania mikrofalami [28].

W technice ultrafiolet stosowany jest powszechnie. Powoduje świecenie (fluorescencję) wielu substancji chemicznych. W świetłówkach ultrafiolet wytworzony na skutek wyładowania jarzeniowego pobudza luminofor do świecenia w zakresie widzialnym. Zjawisko to wykorzystuje się również do zabezpieczania banknotów i w analizie chemicznej (Spektroskopia UV). Ultrafiolet o małej długości fali jest wykorzystywany do sterylizacji (wyjaławiania) pomieszczeń [29].

Promieniowanie rentgenowskie jest wykorzystywane do uzyskiwania zdjęć rentgenowskich, które pozwalają m.in. na diagnostykę złamań kości i chorób płuc oraz do rentgenowskiej tomografii komputerowej. Wysokoenergetyczne promieniowanie rentgenowskie (rzędu MeV) stosowane jest jako wygodna alternatywa napromieniowania za pomocą radioizotopów (brak konieczności okresowej wymiany materiału promieniotwórczego) w radioterapii niektórych nowotworów [30]. Promieniowanie takie generowane jest zwykle w wyniku bombardowania tarczy wolframowej (lub z dużym udziałem tego metalu) strumieniem elektronów pochodzących z akceleratorów liniowych [31].

Promienie gamma mogą służyć do sterylizacji sprzętu medycznego, jak również produktów spożywczych. W medycynie używa się ich w radioterapii (tzw. bomba kobaltowa) do leczenia raka, oraz w diagnostyce, np. pozytonowa emisyjna tomografia komputerowa. Ponadto, promieniowanie gamma ma zastosowanie w przemyśle oraz nauce, np. pomiar grubości gorących blach stalowych, pomiar grubości papieru, wysokości ciekłego szkła w wannach hutniczych, w geologii otworowej (poszukiwania ropy i gazu ziemnego), w badaniach procesów przemysłowych (np. przepływu mieszanin wielofazowych, przeróbki rudy miedzi). Promieniowanie γ ma zastosowanie w badaniach z dziedziny chemii radiacyjnej [32].

W następnych rozdziałach szeroko przedstawimy Państwu wykorzystanie światła do wytwarzania użytecznej energii.

¹ Zastosowanie mikrofal w kuchni zostało odkryte przypadkowo. W 1946 r. amerykański inżynier Percy Spencer podczas eksperymentów z magnetronem zauważył, że czekoladowy batonik w jego kieszeni roztopił się.

7. Literatura

1. G.H. Smith, *Camera lenses. From box camera to digital*, The International Society for Optical Engineering, Washington 2006.
2. H. Drozdowski, *Fizyczny obraz świata*, Wyd. Naukowe UAM, Poznań 2007.
3. H.J. Kimble, M. Dagenis, L. Mandel, *Photon anti-bunching in resonance fluorescence*, Physical Review Letters 11(39), 691-695, 1977.
4. W. Greiner, *Quantum mechanics. An introduction*, Springer, Berlin 2000.
5. A.H. Compton, *A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements*, Physical Reviews 21(5), 383-502, 1923.
6. Zasoby Wikimedia Commons.
7. J.W. Kierein, *Implications of the Compton effect interpretation of the red shift*, Martin Marietta Corporation, Denver Division, Denver 1973.
8. P. Christillin, *Nuclear Compton scattering*, Journal of Physics G: Nuclear Physics 12, 837-, 851, 1986.
9. M.V. Klein, T.E. Furtak, *Optics*, John Willey&Sons, New York 1986.
10. J. Orear, *Fizyka. Tom 2*, PWN, Warszawa 2004.
11. D. Halliday, *Podstawy fizyki*, PWN, Warszawa 2007.
12. M.P. Thekaekara, *Solar energy outside the earth's atmosphere*, Solar energy 2(14), 109-124, 1973.
13. E. Hecht, *Optyka*, PWN, Warszawa 2012.
14. V.F. Weisskopf, *Światło*, Biblioteka Problemów, PWN, Warszawa 1973.
15. L.M. Woliński, *Rozpraszanie światła i związane z nim badania właściwości fizykochemicznych cząstek*, Skrypty Uczelniane – Uniwersytet Gdański, Gdańsk 1972.
16. C.E. Kennedy, K. Terwilliger, *Optical durability of candidate solar reflectors*, Journal of Solar Energy Engineering 2(127), 262-268, 2005.
17. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki*, PWN, Warszawa 2012.
18. J. Zwoździak, A. Zwoździak, A. Szczurek, *Meteorologia w ochronie atmosfery*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.
19. K. Kozuchowski i in., *Meteorologia i klimatologia*, PWN, Warszawa 2005.
20. J. Ślusarek, B. Wilk-Słomka, *Procesy termiczne w przegrodach budowlanych*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
21. K. Kolwas, *Rozpraszanie światła na pojedynczej cząstce, w: Badania aerozolu miejskiego*, Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2007.
22. P. Lilienfeld, *Gustav Mie: the person*, Applied Optics 30, 4696-4698, 1991.
23. D.O. Hall, *Fotosynteza*, WNT, Warszawa 1999.
24. M. Eliade, *Historia wierzeń i idei religijnych*, Wyd. Pax, Warszawa 1988.
25. G. Leeuw, *Fenomenologia religii*, Wyd. Wiedza i Książka, Warszawa 1997.
26. T. Burakowski, J. Giziński, A. Sala, *Podczerwień i jej zastosowanie*, Wyd. Ministerstwa Obrony, Warszawa 1963.
27. A. Indulski (red.), *Fale radiowe i mikrofałe*, Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, Warszawa 1987.
28. J.A. Dobrowolski, *Mikrofałe*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1991.

29. Y. Sangen, K. Tazelaar, *Promieniowanie elektromagnetyczne: komputer, telefon komórkowy, linia wysokiego napięcia... Czy są szkodliwe dla zdrowia? Jak unikać zagrożenia z ich strony?*, Wyd. Klub dla Ciebie, Warszawa 2006.
30. B. Vukovic et al., *A neutron track etch detector for electron linear accelerators in radiotherapy*, *Radiology and Oncology* 1(44), 62-66, 2010.
31. E. Carinou et al., *An MCNP-based model for evaluation of the photoneutron dose in high energy medical electron accelerators*, *Medical Physics*, 3(21), 95-99, 2005.
32. M.F. L'Annunziata, *Radioactivity: introduction and history*, Elsevier, Oxford 2007.

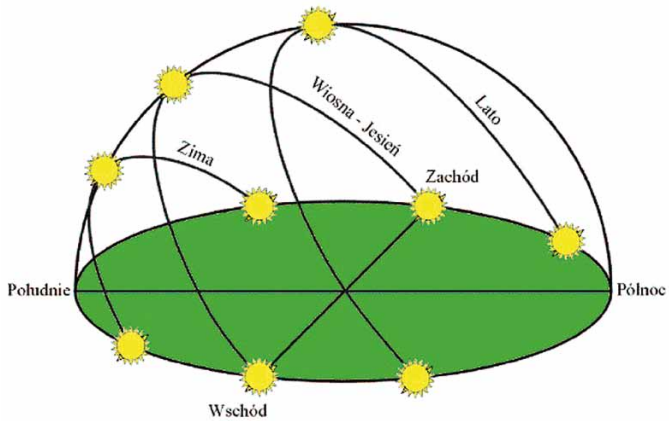
PROMIENIOWANIE SŁONECZNE PADAJĄCE NA ZIEMIĘ

1. Wpływ ruchu obrotowego i obiegowego Ziemi na promieniowanie słoneczne

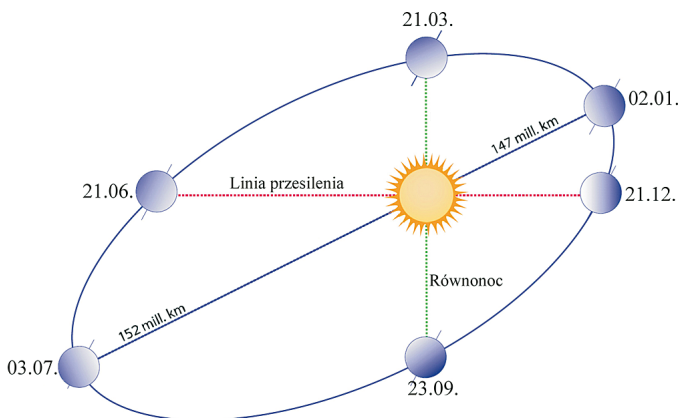
Promieniowanie słoneczne jest zmiennym źródłem energii. Wynika to z jednej strony ze zmieniających się warunków meteorologicznych, z drugiej zaś z ruchu obrotowego Ziemi wokół własnej osi i ruchu Ziemi wokół Słońca [1].

Ruch obrotowy Ziemi to obrót Ziemi wokół własnej osi z zachodu na wschód. Okres między kolejnymi górowaniami Słońca nad danym południkiem nazywa się dobą słoneczną i wynosi 24 godziny. Ruch obrotowy Ziemi jest przyczyną występowania zjawiska dnia i nocy. Oś obrotu naszej planety nie jest prostopadła do płaszczyzny ekliptyki, w jakiej Ziemia krąży wokół Słońca, lecz odchylona jest o $23^{\circ}27'$ i zachowuje niezmienny kierunek w przestrzeni. Wizualnym efektem nachylenia osi ziemskiej jest zmiana wysokości Słońca w różnych porach roku (rysunek 1). Zjawisko to nosi nazwę deklinacji [2]. Pory roku są również skutkiem pozornego ruchu rocznego Słońca po ekliptyce nachylonej pod kątem $23^{\circ}27'$ do równika. Gdyby ekliptyka leżała w tej samej płaszczyźnie co równik ziemski, następcznie nie poszczególnych rejonów byłoby ciągle takie samo i nie obserwowalibyśmy zmian pór roku.

Ruch Ziemi wokół Słońca odbywa się po orbicie eliptycznej (rysunek 2). Prędkość liniowa tego ruchu zmienia się w zależności od położenia na elipsie orbity i wynosi od $29,291 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ do $30,287 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Ziemia obiega Słońce w ciągu jednego roku gwiazdowego, czyli: 365 dni 6 godzin 9 minut 9,54 sekund 2 stycznia znajduje się najbliżej Słońca w punkcie zwanym peryhelium w odległości około 147 mln km. W aphelium, które przypada na 3 lipca, odległość Ziemi od Słońca jest największa i wynosi ok. 152 mln km [4,5].



Rys. 1. Pozorny ruch Słońca na niebie [3]



Rys. 2. Ruch obiegowy Ziemi

Oś ziemską jest nachylona do ekliptyki pod kątem $66^{\circ}33'$ i ulega powolnym zmianom, jednak są one tak niewielkie, iż położenie Ziemi określa się jako stabilne. Pochylenie to powoduje nierównomierne oświetlenie Ziemi w ciągu roku, a co za tym idzie, wydzielenie stref oświetlenia Ziemi. Gęstość strumienia promieniowania słonecznego $I_0(N_d)$ na orbicie ziemskiej opisuje wzór:

$$I_0(N_d) = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360N_d}{365}\right) \right] \quad (1)$$

gdzie: N_d – kolejny dzień roku
 G_{sc} – stała słoneczna

Stała słoneczna G_{sc} oznacza gęstość strumienia promieniowania słonecznego padającego prostopadłe na płaszczyznę oddaloną od Słońca równą średniej odległości Ziemia-Słońce. Aktualnie przyjmuje się $G_{sc}=1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ [6]. Jeśli pominąć zachmurzenie, to gęstość strumienia promieniowania słonecznego na powierzchni Ziemi ma wartość mniejszą od stałej słonecznej na skutek rozpraszania i absorpcji promieniowania w atmosferze (patrz poprzedni rozdział).

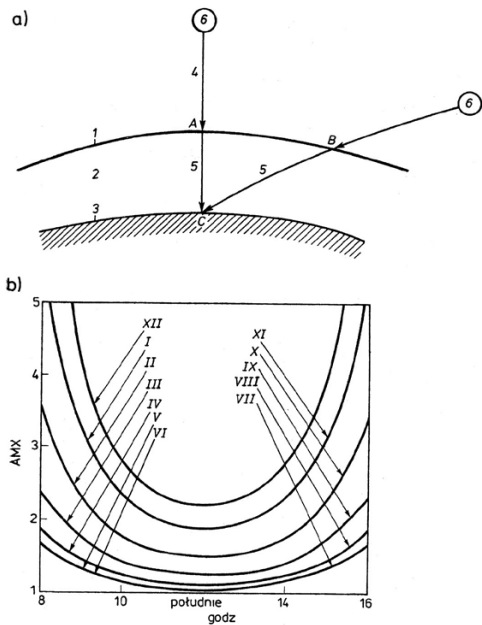
2. Wpływ atmosfery na promieniowanie słoneczne

Ilość pochłoniętego lub rozproszonego promieniowania zależy od grubości warstwy powietrza, którą przebyło. W związku z tym, zmniejszanie natężenia promieniowania słonecznego wskutek przejścia przez atmosferę zależy także od kąta pod jakim to światło pada na powierzchnię Ziemi, oraz od wysokości miejsca pomiaru (rysunek 3). Zależność natężenia napromieniowania do wspomnianego kąta uwzględnia się przez podanie tzw. liczby masy powietrznej m :

$$m = \frac{1}{\cos z} \quad (2)$$

gdzie: z oznacza kąt między dwiema prostymi przecinającymi się w punkcie pomiaru na Ziemi, z których jedna przechodzi przez zenit, a druga przez aktualne położenie Słońca na niebie [7].

Rano i wieczorem promieniowanie słoneczne przebywa dłuższą drogę w atmosferze, rozpraszanie światła jest silniejsze, stąd pomarańczowy kolor wschodzącego i zachodzącego Słońca (rysunek 4).



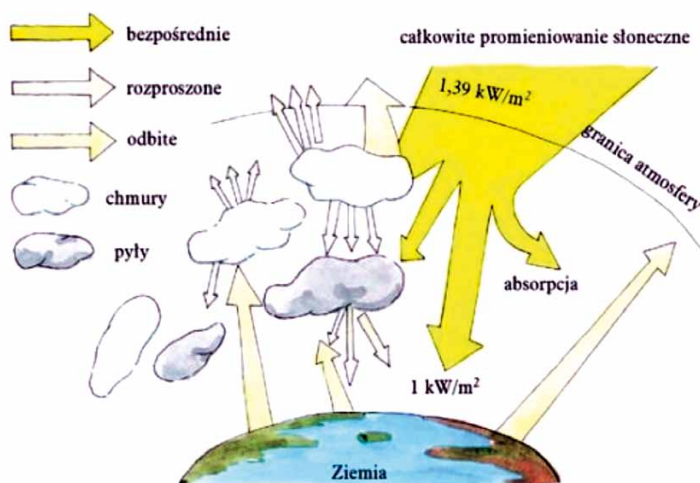
Rys. 3. Ilustracja wyjaśniająca liczbę masy powietrznej, a) droga przebyta przez promień świetlny w atmosferze przy różnych pozornych pozycjach Słońca, b) liczba masy powietrznej jako funkcja czasu dnia w poszczególnych miesiącach na 40° szerokości geograficznej, 1 – górna granica atmosfery ziemskiej, 2 – atmosfera, 3 – powierzchnia Ziemi, 4 – normalna do powierzchni Ziemi i płaskiego konwertora energii słonecznej, 5 – długość drogi promienia świetlnego w atmosferze, 6 – położenie Słońca, I-XII – miesiące [7]



Rys. 4. Pomarańczowe Słońce podczas zachodu, Bachotek (fot. B. Igliński)

Promieniowanie słoneczne padające na płaszczyznę poziomą na powierzchni Ziemi złożone jest z dwóch składowych o różnych właściwościach kierunkowych. Składa się mianowicie z promieniowania bezpośredniego i rozproszonego, nazywanego promieniowaniem nieboskłonu albo promieniowaniem dyfuzyjnym. Gęstość promieniowania słonecznego nazywana jest natężeniem promieniowania słonecznego. Natężenie I promieniowania całkowitego jest sumą natężenia I_b promieniowania bezpośredniego i natężenia I_d promieniowania rozproszonego [8]:

$$I = I_b + I_d \quad (3)$$



Rys. 5. Promieniowanie bezpośrednie, rozproszone i odbite [9]

Skład widmowy promieniowania rozproszonego zależy od stanu zachmurzenia, zamglenia i czystości atmosfery. Przy bezchmurnej pogodzie widmo tego promieniowania jest ściśle określone. Jego charakterystyczną cechą jest wyraźna dominacja światła niebieskiego nad czerwonym, co nadaje temu promieniowaniu charakterystyczny błękitny kolor (kolor nieba). Z powodu rozpraszania głównie światła niebieskiego, światło docierające bezpośrednio ma zabarwienie żółte (spowodowane niedoborem światła niebieskiego) [8].

Podstawowym przyrządem służącym do pomiaru natężenia promieniowania jest piranometr (pyranometr). Zestaw dwóch piranometrów może być użyty do pomiaru zdolności odbijania promieniowania słonecznego przez powierzchnię Ziemi, czyli tzw. albedo. Albedo jest stosunkiem strumienia promieniowania odbitego we wszystkich kierunkach Ziemi do całko-

witego strumienia docierającego od Słońca. Albedo Ziemi nie jest wielkością stałą i jednakową w każdym miejscu Ziemi. Odbijalność promieniowania słonecznego od Ziemi zależy m.in. od rodzaju podłoża, od pokrywy chmur, obecności pokrywy śnieżnej, obecności i stanu roślinności (pory roku). Ze względu na obecność lądolodów oraz pokrywy lodowej na morzach, w dużych szerokościach geograficznych albedo jest zatem znacznie większe niż w szerokości okołorównikowej [8].

3. Ilość dostępnej energii słonecznej

Ilość dostępnej energii słonecznej jest najważniejszym parametrem przy projektowaniu instalacji solarnych. Informacje te można uzyskać z danych służb meteorologicznych. Bierze się pod uwagę:

- sumy godzinne, półdziennie, dzienne, dekadowe i miesięczne promieniowania słonecznego całkowitego [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$],
- sumy godzinne, półdziennie, dzienne, dekadowe i miesięczne promieniowania słonecznego rozproszonego [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$],
- sumy godzinne, półdziennie, dzienne, dekadowe i miesięczne promieniowania słonecznego bezpośredniego [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$],
- sumy promieniowania słonecznego roczne i dla pór roku [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$],
- usłonecznienie [h] [8].

Usłonecznienie to czas podany w godzinach, podczas którego na określone miejsce na powierzchni Ziemi padają bezpośrednio promienie słoneczne. Wykorzystuje się je w energetyce słonecznej do szacowania warunków pracy instalacji np. do wyliczania godzin pracy pompy cyrkulacyjnej w instalacji kolektorów słonecznych. Warunki klimatyczne, które między innymi opisuje usłonecznienie determinują zarówno możliwości wykorzystania energii słonecznej, jak również limitują opłacalny okres eksploatacji instalacji słonecznych. W Polsce, średnia wieloletnia wartość usłonecznienia, jest największa dla Kołobrzegu i wynosi 1624 h/rok, odpowiednio dla Warszawy jest to 1579 h/rok, zaś dla Zakopanego 1467 h/rok [10].

Z kolei nasłonecznienie to suma natężenia promieniowania słonecznego w danym czasie i na danej powierzchni np. suma natężenia promieniowania słonecznego w czasie godziny, dnia, roku na powierzchni 1 m^2 . Nasłonecznienie jest wielkością opisującą zasoby energii słonecznej w danym miejscu i czasie [11].

Znajomość położenia Słońca na nieboskłonie jest niezbędna do określenia chwilowego kąta padania θ składowej bezpośredniej promieniowania słonecznego na powierzchnię czołową kolektora. Położenie Słońca opisywane jest przez współrzędne układu sferycznego: kąt azymutalny oraz kąt zenitalny (padania). Zamiast kąta padania stosuje się również kąt elewacyj-

ny liczony od płaszczyzny horyzontu. W przypadku powierzchni horyzontalnych natężenie promieniowania słonecznego zależy jedynie od kąta zenitalnego. Kąt ten w wybranym punkcie powierzchni Ziemi zależy od czasu słonecznego, szerokości geograficznej. Przy dokładnym określaniu kąta padania promieniowania słonecznego na powierzchnię Ziemi uwzględnić trzeba eliptyczność orbity oraz kształt geoidy jak również zakrzywienie promieniowania słonecznego w atmosferze związane z refrakcją [11].

W momencie górowania dziennego, 21 marca i 23 września, gdy Słońce jest w zenicie nad równikiem, kąt elewacyjny h oblicza się wg wzoru:

$$h = 90^{\circ} - \phi \quad (4)$$

gdzie: ϕ – szerokość geograficzna

22 czerwca na półkuli północnej i 22 grudnia na półkuli południowej kąt elewacyjny oblicza się wg wzoru:

$$h = 90^{\circ} - \phi + 23^{\circ}27' \quad (5)$$

22 grudnia na półkuli północnej i 22 czerwca na półkuli południowej kąt elewacyjny oblicza się wg wzoru:

$$h = 90^{\circ} - \phi - 23^{\circ}27' \quad (6)$$

3.1. Sumy dzienne promieniowania

Suma dzienna promieniowania całkowitego H_{β} na płaszczyźnie pochylonej do poziomu pod kątem β , obliczana jest na podstawie znanych sum dziennych promieniowania całkowitego H oraz rozproszonego H_d na płaszczyźnie poziomej przy założeniu izotropowości promieniowania rozproszonego:

$$H_{\beta} = (H - H_d)R_{b\beta} + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H\rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (7)$$

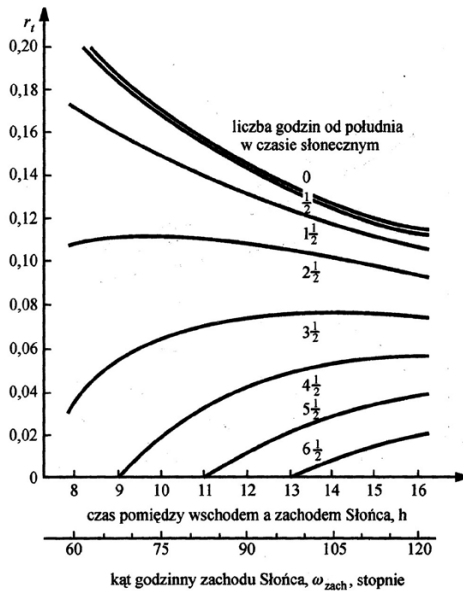
w którym $R_{b\beta}$ oznacza stosunek dziennej sumy promieniowania słonecznego bezpośredniego na płaszczyźnie pochylonej do poziomu pod kątem β do dziennej sumy promieniowania bezpośredniego na płaszczyźnie poziomej [8].

3.2. Szacowanie godzinnych sum promieniowania słonecznego

Przy projektowaniu instalacji solarnych może zająć potrzeba przeprowadzenia symulacji numerycznych ich funkcjonowania w jednogodzinnym kroku czasowym, podczas gdy dostępne są tylko dzienne sumy promieniowania słonecznego. Obliczanie sum godzinnych na podstawie sum dziennych przeprowadza się w sposób przybliżony. Analiza statystyczna dziennych rozkładów natężenia całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyźnie poziomej wykazuje, że możliwe jest przedstawienie stosunku sumy godzinnej do dziennej promieniowania całkowitego jako funkcji pory dnia i pory roku. Stosunek (r_t), zdefiniowany jest wzorem [7]:

$$r_t = \frac{I^h}{H} \quad (8)$$

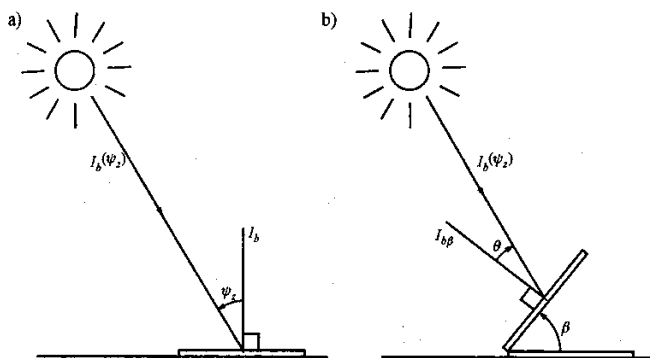
Zależność wielkości r_t od pory dnia i pory roku podana przez Liu i Jordana przedstawiona jest na rysunku 6 [12]. Przedziały godzinne, do których odnoszą się poszczególne krzywe na wykresie, opisane są przez podanie liczby godzin dzielących określony przedział od południa słonecznego. Krzywe uzyskane zostały przy założeniu symetrycznego, w stosunku do południa czasu słonecznego, rozkładu natężenia promieniowania słonecznego w ciągu dnia.



Rys. 6. Stosunek r_t sumy godzinnej promieniowania całkowitego do sumy dziennej promieniowania całkowitego na płaszczyźnie poziomej w funkcji pory dnia i pory roku [12]

3.3. Promieniowanie słoneczne padające na płaszczyznę pochyloną

Przy projektowaniu i analizie funkcjonowania słonecznych instalacji służących do podgrzewania wody użytkowej oraz instalacji grzewczych często zachodzi potrzeba obliczenia natężenia promieniowania na powierzchni pochyłej do poziomu powierzchni kolektora słonecznego, na podstawie znanych wartości natężenia składowych promieniowania całkowitego na płaszczyźnie poziomej [8] (rysunek 7).



Rys. 7. Bezpośrednie promieniowanie słoneczne padające na płaszczyznę poziomą (a) i na płaszczyznę pochyloną do poziomu pod kątem β (b)

W związku z tym, że padające na kolektor promieniowanie złożone jest ze składowych charakteryzujących się różnymi właściwościami kierunkowymi, natężenie każdej z nich obliczane jest oddzielnie. Wyznaczanie natężenia promieniowania bezpośredniego $I_{b\beta}$ padającego pod kątem θ na płaszczyznę pochyloną do poziomu pod kątem β , gdy znane jest natężenie I_b tej składowej promieniowania na tę płaszczyznę, wymaga pomnożenia natężenia przez współczynnik geometryczny (wzór 11). W celu wyznaczenia współczynnika R_b należy wyrazić natężenie promieniowania I_b oraz $I_{b\beta}$ przez natężenie promieniowania bezpośredniego $I_b(\psi_z)$ w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku z którego ono przychodzi [8]:

$$I_b = I_b(\psi_z) \cos \psi_z \quad (9)$$

$$I_{b\beta} = I_b(\psi_z) \cos \theta \quad (10)$$

$$R_b = \frac{I_{b\beta}}{I_b} = \frac{I_b(\psi_z) \cos \theta}{I_b(\psi_z) \cos \psi_z} \quad (11)$$

4. Literatura

1. W. Smolec, *Fototermiczna konwersja energii słonecznej*, PWN, Warszawa 2000.
2. T. Rodacki, A. Kandyba, *Przetwarzanie energii w elektrowniach słonecznych*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
3. Materiały dostępne na stronie: <http://ogrzewanieelektryczne.blogspot.com>
4. M. Vázquez, P.M. Rodriguez, E. Pallem, *The Earth as an object of astrophysical interest in the search for extrasolar planets*, Instituto de Astrofísica de Canarias, La Laguna 2006.
5. J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, Wiley-Interscience, New York 1991.
6. A. Rabl, *Solar energy thermal technology*, Springer-Verlag, London 1992.
7. Z.M. Jarzębski, *Energia słoneczna. Konwersja fotowoltaiczna*, PWN, Warszawa 1990.
8. W. Smolec, *Fototermiczna konwersja energii słonecznej*, PWN, Warszawa 2000.
9. Materiały dostępne na stronie: <http://www.kolektory.krakow.pl/index.php?action=energia>
10. J. Kapusiński, *Struktura bilansu cieplnego powierzchni czynnej na tle warunków klimatycznych środkowozachodniej Polski*, Wyd. AR w Poznaniu, Poznań 2000.
11. Dane World Meteorological Organisation.
12. B.Y.H. Liu, R.C. Jordan, *The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation*, Solar Energy 4, 1-20, 1960.

PASYWNE SYSTEMY OGRZEWANIA

1. Transport ciepła

Przepływ ciepła (wymiana ciepła) jest zjawiskiem występującym powszechnie w przyrodzie i zachodzącym wszędzie tam, gdzie występuje różnica temperatury. W literaturze technicznej pod pojęciem ciepła rozumie się tylko taką część energii „termicznej”, która jest przekazywana od jednego ciała do drugiego [1,2]. Z punktu widzenia mechanizmów fizycznych wyróżnia się 3 sposoby przepływu ciepła: przewodzenie, konwekcja i promieniowanie słoneczne. W praktyce spotykamy się najczęściej z równoczesnym występowaniem 2 lub 3 wymienionych zjawisk [3].

Przewodzenie ciepła to proces wymiany ciepła między ciałami o różnej temperaturze pozostającymi ze sobą w bezpośrednim kontakcie. Polega on na przekazywaniu energii kinetycznej beładnego ruchu cząsteczek, w wyniku ich zderzeń. Proces prowadzi do wyrównania temperatury między ciałami. Proces przewodzenia jest opisany prawem Fouriera. Mówi ono, że przepływ ciepła jest proporcjonalny do gradientu temperatury:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (1)$$

gdzie: q – gęstość strumienia ciepła [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

λ – współczynnik proporcjonalności nazywany przewodnością cieplną [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

T – temperatura bezwzględna [K]

Wartości współczynnika przewodzenia ciepła zależą od rodzaju materiału i temperatury, a w przypadku gazów – jeszcze od ciśnienia. Orientacyjne wartości λ przedstawiono w tabeli 1:

Metale są najlepszymi przewodnikami (tabela 1). Te spośród nich, które najlepiej przewodzą elektryczność, jednocześnie najlepiej przewodzą ciepło. Stopy metali gorzej przewodzą ciepło niż czyste metale. Materiały porowate gorzej przewodzą ciepło, proporcjonalnie do swojej porowatości, ze względu na małe przewodnictwo gazów. Z kolei wzrost wilgotności materiałów zwiększa ich przewodnictwo cieplne [1].

Tabela 1. Wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla wybranych materiałów [1]

Materiał	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
stal	17-50
aluminium	202
srebro	420
cegła	0,25-1,05
szkło	1,0
lód	2,25
olej mineralny	0,14
woda	0,6
powietrze	0,026

Konwekcja ciepła jest charakterystyczna dla płynów i gazów, przy czym przenoszenie energii odbywa się wskutek mieszania się płynu, a także w niewielkim stopniu przez przewodzenie. Zatem, niezbędnym warunkiem występowania konwekcji jest ruch ośrodka, w którym przenosi się ciepło. Jeśli ruch ten jest efektem różnicy gęstości spowodowanej różnicą temperatury w ośrodku, wówczas mówi się o konwekcji swobodnej (naturalnej). Jeśli ruch jest wywołany sztucznie przez urządzenia (wentylatory, pompy, itp.), wówczas jest to konwekcja wymuszona [2,4].

Każda konwekcja wynika z istnienia prądu konwekcyjnego. W konwekcji naturalnej w cieczach prąd ten powstaje ze względu na różnicę gęstości pomiędzy obszarami o różnej temperaturze. W stanie stacjonarnym prądy konwekcyjne tworzą zamknięte pętle – komórki konwekcyjne. Komórka konwekcyjna, w danych warunkach (różnicy temperatur, lepkości płynu) ma pewne minimalne rozmiary. Prądy konwekcyjne w atmosferze są przyczyną powstawania niektórych rodzajów chmur (gł. chmur kłębiastych: cumulus i cumulonimbus).

Najbardziej interesujący z punktu widzenia technicznego jest proces wymiany ciepła na granicy pomiędzy ciałem stałym a płynem, który oparty jest na konwekcji i przewodzeniu ciepła. Proces ten nazywa się wnikaniem i został opisany prawem Newtona [5]:

$$q = h_{i(e)} \cdot (t_{fc} - t_p) \quad (2)$$

gdzie: $h_{i(e)}$ – współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej/zewnętrznej [W·m⁻²·K⁻¹]

t_{pl} – temperatura otaczającego płynu [°C]

t_{sc} – temperatura powierzchni ścianki [°C]

Promieniowanie cieplne to promieniowanie elektromagnetyczne generowane przez cząstki naładowane elektrycznie w wyniku ich ruchu ter-

micznego w materii. Cała materia o temperaturze większej od zera bezwzględnego emituje promieniowanie cieplne. Według mechaniki klasycznej atomy lub cząsteczki ciała o temperaturze powyżej zera bezwzględnego mają energię kinetyczną, która zmienia się w wyniku wzajemnych oddziaływań atomów i cząsteczek. Zmiany tej energii wynikają z przyspieszenia lub dipolowej oscylacji ładunków. Zmiana ruchu ładunków wytwarza promieniowanie elektromagnetyczne. W wyniku wzajemnych oddziaływań cząsteczek i atomów ustala się, zależny od temperatury, rozkład ich prędkości, z którego wynika rozkład emitowanego promieniowania [6].

Promieniowanie ciepła opisane jest prawem Stefana-Boltzmana, według którego energia wypromieniowana przez ciało doskonale czarne jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej tego ciała [7]:

$$\Phi = \sigma \cdot T^4 \quad (3)$$

gdzie: Φ – strumień energii wypromieniowywany w kierunku prostopadłym do powierzchni ciała [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

σ – stała Stefana-Boltzmana wynosząca $5,67\cdot 10^{-8}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^4$]

T – temperatura bezwzględna [K]

W świecie rzeczywistym, ciała doskonale czarne nie istnieją, Materiały rzeczywiste wypromieniowują jedynie część energii, jaką wypromieniowałoby w danej temperaturze ciało idealnie czarne. Stosunek energii emitowanej przez dane ciało do energii emitowanej przez ciało czarne w tej samej temperaturze nazywa się emisyjnością, która zależy między innymi od wykończenia powierzchni materiału:

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4)$$

gdzie ε – emisyjność

W praktyce, często rozpatruje się promieniowanie między dwoma układami o temperaturze odpowiednio T_1 i T_2 , przy czym T_1 jest większa od T_2 [7]:

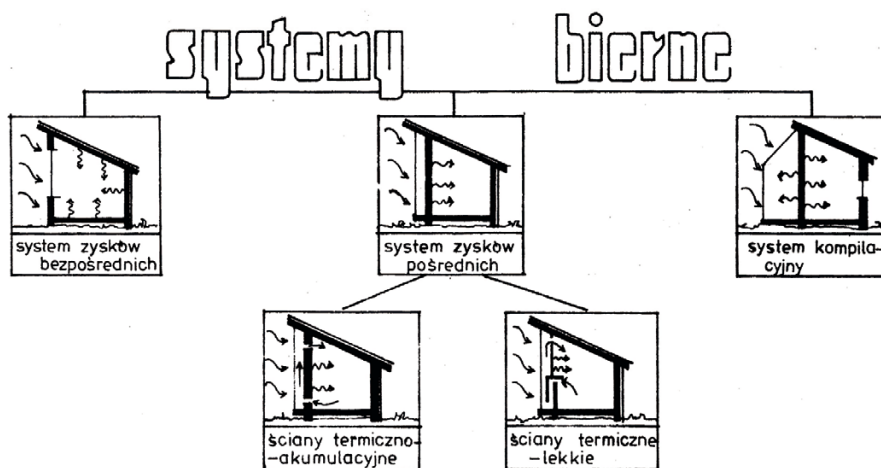
$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

gdzie: A – powierzchnia odbierająca promieniowanie cieplne [m^2]

2. Ogólna charakterystyka pasywnego pozyskiwania ciepła

Pasywne (bierne) pozyskiwanie ciepła polega na zamianie energii promieniowania słonecznego na ciepło opierając się na zjawiskach znanych w fizyce budowli (opisane wcześniej promieniowanie, przewodzenie, konwekcja). W tym celu wykorzystuje się tradycyjne lub nowe struktury budynku; przepływ uzyskanej energii zachodzi w sposób naturalny z dopuszczeniem elementów regulujących komfort cieplny [8].

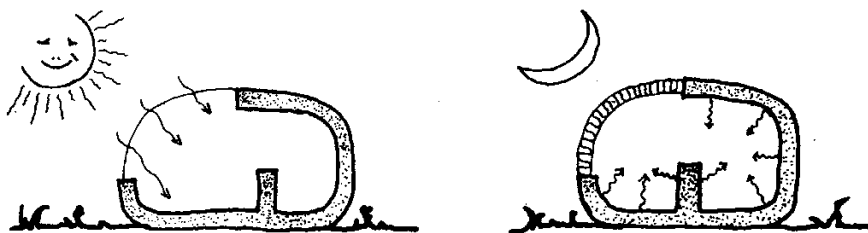
W systemach biernych rolę „kolektorów” pełnią przeszklenia, elementy bądź całe domy. Przez przeszklenia promieniowanie słoneczne wnika do wnętrza w formie fal widzialnych i podczerwonych, w znikomej ilości ultrafioletowych i napotyka na specjalnie do tego celu przystosowane elementy pochłaniające. Mogą to być ściany wewnętrzne, posadzki, stropy, itp. Elementy pochłaniające nagrzewając się emitują długofalowe promieniowanie ciepłe, które ogrzewa pomieszczenia, a samo jest zatrzymywane przez szyby. Opisane zjawisko nazywa się „efektem szklarniowym”, który razem z ruchami konwekcyjnymi powietrza, przenikaniem i przewodzeniem, jest podstawą działania biernych systemów słonecznych (rysunek 1) [8].



Rys. 1. Klasyfikacja systemów pasywnych (biernych) [8]

3. System zysków bezpośrednich

Dom wykorzystujący promieniowanie bezpośrednie powinien działać jak „łapacz” promieni słonecznych. Powinny one w maksymalnym stopniu przenikać do jego wnętrza i tam być wchłaniane przez wewnętrzne elementy struktury, tj.: stropy, posadzki i ściany (rysunek 2). Materiały do budowy przegród wewnętrznych powinny mieć dużą pojemność cieplną [8].



Rys. 2. Zasada bezpośredniego pozyskiwania ciepła [8]

Materiałem umożliwiającym przenikanie promieni słonecznych do wnętrza domu jest szkło. Szkło stosowane jest od setek lat. Produkcja szkła znana była już ponad pięć tysięcy lat temu. Surowcem do produkcji tradycyjnego szkła jest piasek kwarcowy oraz dodatki, najczęściej: węglan sodu (Na_2CO_3) i węglan wapnia (CaCO_3), topniki: tlenek boru (B_2O_3) i tlenek ołowiu(II) (PbO) oraz pigmenty, którymi są zazwyczaj tlenki metali przejściowych, kadmu, manganu i inne. Surowce są mieszane, topione w piecu w temperaturze 1200-1300°C (dzięki dodaniu węglanu sodu), po czym formowane w wyroby, przed pełnym skrzepnięciem. Szkło okienne – jest to szkło płaskie, najczęściej produkowane metodą float (szkło płynie w postaci wstęgi na powierzchni ciekłej cyny). Inną wykorzystywaną jeszcze metodą jest metoda szkła ciągnionego (metoda Furcaulta lub Pittsburgh). Jednak tą metodą szkło produkowane jest coraz rzadziej. Szkło float może być produkowane w grubościach od 2 do 19 mm. Szkło do stosowania w budownictwie dostępne jest standardowo w grubościach od 3 do 12 mm. Przepuszczalność światła zależy od grubości oraz zawartości tlenku żelaza w masie szklanej [9].

Szkło jest substancją bezpostaciową, tzn. nie ma uporządkowanej budowy wewnętrznej (rysunek 3).

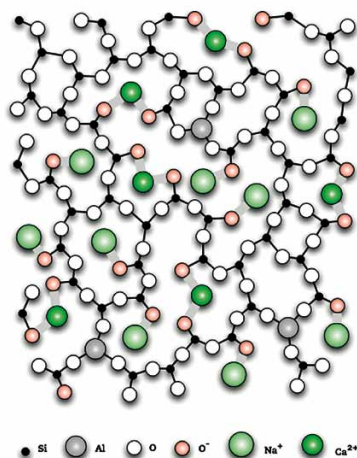
Utarło się przekonanie, że okna pod względem izolacyjności cieplnej są najsłabszym miejscem w obudowie pomieszczeń. Współczynnik przenikania ciepła k_o dla okien jest rzeczywiście dużo wyższy niż dla ścian. Należy jednakże zauważyć, że k_o charakteryzuje okno tylko pod względem strat. Dla scharakteryzowania rzeczywistego udziału okien w bilansie energetycznym

wprowadzono współczynnik efektywny k_{efr} , który ujmuje również zyski wynikające z promieniowania słonecznego [11]:

$$k_{ef} = k_o - f \cdot g \quad (6)$$

gdzie: f – współczynnik poprawkowy uwzględniający wpływ orientacji okien względem stron świata,

g – współczynnik całkowitych zysków ciepła od nasłonecznienia



Rys. 3. Struktura szkła wapienno-sodowego [10].

Przeszklenia potrójne pokryte powłoką selektywną i wypełnione gazem (CO_2 , gazy szlachetne) mają tak korzystną izolacyjność cieplną, że przy wysokiej przepuszczalności promieniowania słonecznego mają ujemną wartość k_{efr} , co oznacza oszczędność energii bez żadnych dodatkowych kosztów eksploatacyjnych.

System zysków bezpośrednich wykazuje w naszych warunkach klimatycznych najwyższą efektywność. Jest on równocześnie bardzo prosty i tani.

4. System zysków pośrednich

Wykorzystanie energii słonecznej w systemach pośrednich polega na umieszczaniu tuż za przeszkleniem elementów odbierających promieniowanie. Lekkiymi elementami pochłaniającymi są blachy różnych metali, tworzywa sztuczne, żaluzje, które umieszcza się za przeszkleniem w elewacjach południowych. Lepszym rozwiązaniem jest umieszczenie za przeszkleniem

grubego, masywnego muru betonowego, który nagrzewa się wolniej, ale ciepło oddaje dłużej i łagodniej. Rozwiązanie to spopularyzował w latach 60-tych XX wieku Francuz Félix Trombe'a. Jak wynika z tabeli 2, najlepszymi materiałami do budowy ścian Trombe'a są beton z kruszywem kamiennym, żelbet, cegła pełna klinkierowa, kamień i woda [8,12].

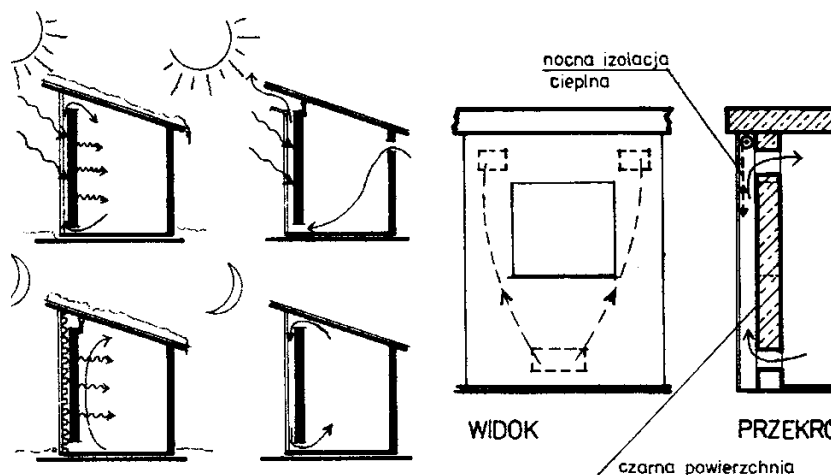
Mur (ściana) Trombe'a pełni funkcje kolektora, zasobnika i emitera (radiatora). Dzięki swej masie może zgromadzić ciepło na kilkanaście-kilkadziesiąt godzin. Jego reakcja na duże promieniowanie jest niewielka i następuje z opóźnieniem. Zasadę działania ściany Trombe'a przedstawiono na rysunku 4.

Tabela 2. Charakterystyka przegród i materiałów używanych w biernych systemach słonecznych [12]

Rodzaj materiału i rodzaj przegrody	Gęstość [kg·m ⁻³]	Ciepło właściwe [kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Współczynnik przewodności cieplnej [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Pojemność ciepła [kJ·m ⁻³ ·K ⁻¹]
Beton z kruszywem kamiennym	3400	0,84	1,45	2016
Beton komórkowy	800	0,84	0,29	672
	400		0,14	336
Trocinobeton	1200	1,46	0,47	1752
	500		0,29	1168
Żuzłobeton	1800	0,84	0,87	1512
	1000		0,40	840
Karmazytobeton	1600	0,84	0,87	1344
	800		0,29	672
Żelbet	2500	0,84	1,63	2100
Ściany murowane z cegły:				
• pełnej	1800	0,84	0,79	1512
• dziurawki	1400	0,84	0,64	1176
• silikatowej	1900	0,84	1,05	1596
• magnezowej	1920	0,84	3,80	1613
• klinkierowej	1900	0,92	1,05	1748
Drewno sosnowe i świerkowe	550	2,72	0,17	1496
Kamień zwykły	2400	0,84	2,56	2016
Żużel paleniskowy	1000	0,75	0,29	750
	900		0,16	675
Keramzyt	500	0,75	0,16	375
Woda	1000	4,18	0,58	4180
Powietrze	1,2	1,00	0,026	1,2

W celu poprawienia efektywności ściany Trombe'a należy na noc i w pochmurne dni zastosować izolację cieplną (żaluzje, wypełnienie kulkami styropianu, itp.), zabezpieczającą przed stratami z zewnątrz. W ostatnich latach coraz częściej stosuje się pokrywanie zewnętrznej części muru warstwami selektywnymi. W celu poprawienia sprawności ściany, łączy się

ją z materiałami ulegającymi przemianom fazowym, co zwiększa czas i ilość magazynowanego ciepła [8].



Rys. 4. Zasada działania ściany Trombe'a [8]

Innym sposobem na absorbowanie i magazynowanie promieniowania słonecznego jest budowa basenu wodnego, który w obudowie powinien mieć mocno przeszkloną południową ścianę. Dla zmniejszenia parowania i ochładzania się wody w prywatnych basenach bardzo skuteczne jest przykrywanie ich na noc i w pochmurne dni izolacją cieplną. Do absorpcji promieni słonecznych mogą być również użyte zbiorniki z wodą umieszczone na dachu czy na nieizolowanej termicznie konstrukcji stropu.

5. System pasywny kompilacyjny

System bierny kompilacyjny łączy w sobie bezpośredni i pośredni sposób ogrzewania za pomocą promieniowania słonecznego. Polega on na tym, że promienie słoneczne przenikają przez przeszklenie i dzięki efektowi szklarniowemu ogrzewają oszkloną przestrzeń o różnej wielkości i funkcji. Przestrzeń tę, całkowicie przeszkloną od strony południowej nazywa się przeźwaznie cieplarnią (ang. conservatory). Ciepłarnia może pełnić różne funkcje: od przestrzeni nieużytecznych, przez przestrzenie związane z komunikacją (obudowane szkłem przedsionki, korytarze, klatki schodowe, halle czy balkony) aż do zespolonych z pokojem dziennym. Pojęcie „cieplarnia” jest dość szerokie, Pinske [13] podał szczegółowy podział szklarni (tabela 3):

Tabela 3. Nazewnictwo i podział szklarni [13]

Nazwa	Opis
Szklarnia	Nazwa pochodzi od głównego rodzaju pokrycia
Szklarnia do pędzenia roślin	Szklarnia z wyposażeniem wyłącznie do przyspieszania rozwoju roślin
Planatarium	Szklarnia dla roślin
Caldarium	Szklarnia ciepła, czyli ogrzewana
Tepidarium	Szklarnia o temperaturze umiarkowanej
Frigidarium	Szklarnia zimna
Oranżeria/pomarańczarnia	Szklarnia, w której na ogół tylko ściana południowa wykonana jest ze szkła. Znana jest od XVI wieku. Niegdyś uprawiano w niej wyłącznie pomarańcze
Ogród zimowy	Obecnie coraz częściej ogrodami zimowymi określa się szklarnie przyścienne. Dawniej były to duże palmiarnie
Szklarnia-ziemianka	Ściany boczne w takiej szklarni są wykonane z cegiel lub betonu i w większości zagłębione w ziemi. Dach jest najczęściej dwuspadowy
Mała szklarnia (szklarenka)	Szklarnia o powierzchni nie większej niż 10 m ²
Szklarnia słoneczna (solarna)	Szklarnia o zróżnicowanym kącie nachylenia połaci dachowych. Połac południowa powinna być duża
Palmiarnia	Wysoka szklarnia rozpowszechniona w XIX wieku w ogrodach publicznych lub ogrodach botanicznych w celu uprawy palm jako symbolu tropików
Namiot foliowy/tunel foliowy	Nazwa pochodzi od materiału stanowiącego pokrycie

Najciekawszą ze względów użytkowych i estetycznych jest szklarnia. Umożliwia ona całoroczne uprawy warzyw i roślin ozdobnych (rysunek 5), jest źródłem bardziej wilgotnego i zjonizowanego powietrza.



Rys. 5. Szklarnia Wydziału BiOŚ UMK

Tunel foliowy składa się z prostej konstrukcji z drewna, betonu, rur metalowych, lub tworzywa sztucznego, na którą naciąga się folię pojedynczą, czasem podwójną, w Polsce najczęściej polietylenową. Zwykle ma kształt tunelu, choć czasami też szklarni pojedynczej, czy zblokowanej. Głównym celem tuneli foliowych jest podniesienie temperatury i ochrona roślin przed skutkami silnych wiatrów, gradu itp. Specyficzny mikroklimat umożliwia

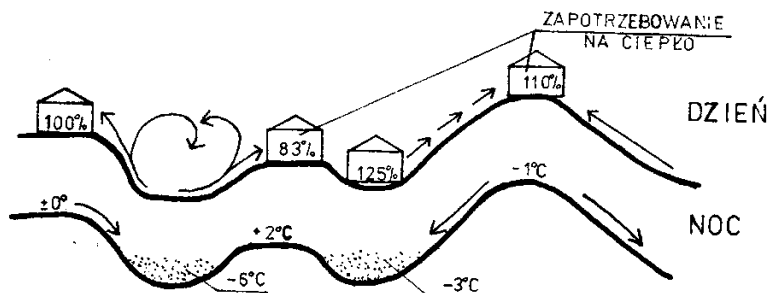
uprawę w tunelu roślin ciepłolubnych, takich jak ogórek, papryka, pomidor itp., pozwala także przyspieszyć uprawę warzyw kapustnych, liściowych, roślin ozdobnych oraz produkcję rozsady. Tunel foliowy chroni również liście i łodygi roślin przed opadami atmosferycznymi, zmniejszając w ten sposób ryzyko wystąpienia chorób grzybowych, co przekłada się na mniejsze zapotrzebowanie na środki ochrony roślin [14].

Cieplarnie będące nadbudówką lub częścią mieszkalną, czy obudowujące całą kubaturę użytkową, mogą być używane jako przestrzeń użytkowa, mogą również być użytkowane jako przestrzeń umożliwiająca całoroczne uprawy. Cieplarnia może pełnić rolę sprawnego kolektora słonecznego. W tym celu należy przeszklić ją szkłem o dużym współczynniku przewodności energii słonecznej do wewnątrz i jednocześnie o małym współczynniku przenikania ciepła. Stosuje się więc szyby klejone lub spawane z rozrzedzonym gazem wewnątrz, bądź przeszklenia podwójne z dwóch zamocowanych niezależnie szyb [8,13].

6. Architektura pasywna

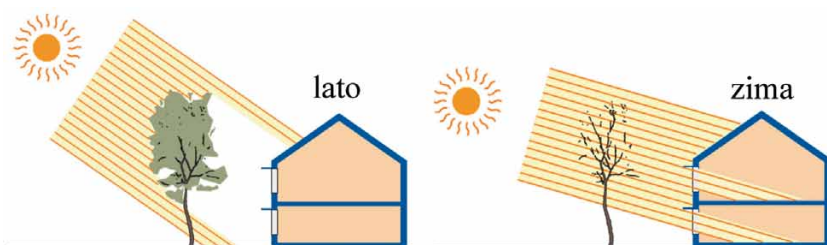
Budownictwo jednorodzinne wykorzystujące energię Słońca do celów grzewczych może być projektowane zarówno w formie zabudowy rozproszonej, jak i zwartej (szeregowej, atrialnej, tarasowej). Dla tego typu domów istotna jest możliwość zorientowania ich dłuższym bokiem w kierunku południowym i umożliwiającym docieranie promieni słonecznych w ciągu minimum 6 godzin [8].

Jeżeli teren lokalizacji jest falisty, pagórkowaty, wówczas występują konwekcyjne ruchy powietrza, a wszelkie zagłębienia terenu są najmniej korzystnymi lokalizacjami, gdyż gromadzi się w nich zimne, wilgotne i często zanieczyszczone powietrze (rysunek 6) [8,15].



Rys. 6. Ruchy konwekcyjne powietrza w terenie pagórkowatym i ich wpływ na zapotrzebowanie ciepłe budynków [8,15]

Zabezpieczenie budynku przed przeważającymi wiatrami również ogranicza straty ciepła, niekiedy nawet o 10%. Można to zrobić wieloma sposobami: roślinnością, przegrodami trwałymi, kształtem budynków. Najprostszy sposób to wkomponowanie drzew i krzewów. Zasadzenie drzew liściastych przed elewacją południową gwarantuje zacienienie w okresie letnim, kiedy istotna jest ochrona przed wysokimi temperaturami. W okresie zimowym, kiedy drzewa gubią liście, przez niezacienione okna wpada promieniowanie słoneczne (rysunek 7). Z kolei od strony północnej budynku korzystniejsza jest zieleń iglasta, która stanowi strefę buforową przed elewacją, chroniąc ją w ten sposób przed zimnymi wiatrami mogącymi wychłodzić budynek [15-17].



Rys. 7. Rola roślinności liściastej latem i zimą

W domach pasywnych wszystkie zewnętrzne elementy obudowy użytkowej kubatury nadal pełnią te same funkcje co w tradycyjnych domach, ale ich rola została poszerzona o nowe zadania wynikające z konieczności pozyskiwania ciepła. Ściany zewnętrzne, poza południową, powinny przede wszystkim charakteryzować się bardzo dobrą izolacyjnością cieplną. Otwory okienne w tych ścianach powinny charakteryzować się niską wartością współczynnika przenikania k . Ściana północna powinna mieć potrójnie szklone okna, o niewielkiej powierzchni. Ściana południowa ma za zadanie w maksymalnym stopniu pozyskiwać ciepło słoneczne (patrz punkty 3-5). Powierzchnia okien powinna wynosić około 50% elewacji. Układ pomieszczeń w budynku powinien być taki, aby pomieszczenia o dużym zapotrzebowaniu energetycznym znajdowały się wewnątrz budynku (łazienka, ubikacja), natomiast od strony północnej lepiej umieścić np. klatkę schodową, gdzie nie muszą panować wysokie temperatury.

Dla systemów biernych preferuje się „ciężkie” i „półciężkie” metody budowania, gdyż takie budynki wolniej się nagrzewają, dłużej utrzymują ciepło, bez dużych wahań temperatury i nie występuje tam przegrzewanie, dzięki czemu wymagają mniej wietrzenia przez otwieranie okien. W stropach międzykondygnacyjnych należy unikać izolacji cieplnych, które stanowią barierę w przenikaniu absorbowanego ciepła [8].

Bryła domów solarnych powinna być kształtowana tak, aby maksymalna jej powierzchnia znajdowała się po stronie południowej, na której rozmieszczone są elementy systemów solarnych. Dąży się do zminimalizowania powierzchni zewnętrznych po stronie północnej, aby zmniejszyć straty ciepła. W rezultacie powstają bryły na rzucie prostokąta, trapezu czy trójkąta, zwrócone dłuższym bokiem w kierunku południowym.

Straty ciepła na wentylację mają duży udział w bilansie energetycznym budynków. By osiągnąć standard pasywny konieczne jest ich ograniczenie. W tym celu stosuje się wentylację mechaniczną nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła, zamiast wentylacji grawitacyjnej. Wentylacja mechaniczna nie tylko pozwala na ograniczenie strat ciepła, ale i zapewnienie stałej wymiany powietrza w budynku. Sercem tego systemu jest centrala wentylacyjna wyposażona w wymiennik ciepła, potocznie zwana rekuperatorem [18].

7. Magazynowanie ciepła pozyskanego w sposób bierny

Problem magazynowania ciepła jest równie istotny, jak omawiany wcześniej problem absorpcji promieniowania słonecznego. Zasobniki magazynujące ciepło na okres do kilku dni nazywa się zasobnikami krótkoterminowymi. Zasobniki długoterminowe wyrównują różnice w podaży i zapotrzebowaniu na ciepło w cyklu rocznym [8].

Najpowszechniejsze jest magazynowanie ciepła w materiałach o dużej pojemności cieplnej. Powinny to być substancje tanie, nietoksyczne, dobrze przewodzące ciepło. Najpopularniejszą substancją jest woda, gromadzi się ją w zbiornikach o łącznej pojemności od 4 do 20 tys. dm³. Do magazynowania ciepła można również używać ciał stałych, takich jak kamienie, cegły, beton, żelazo, itp. Ich ciepło właściwe jest jednak niewielkie, a wymagana objętość złoża dwukrotnie większa od magazynów wodnych dla tych samych ilości ciepła [8].

Magazyny na ciepło utajone wykorzystują właściwości fizyczne, tj. duże ciepło topnienia i niską temperaturę topnienia niektórych substancji. Zasobniki zawierające roztwory soli, woski, parafiny lub kwasy organiczne są podgrzewane przez ciepło słoneczne do temperatury 30-50°C. Jeśli spada temperatura, substancje te zmieniając stan skupienia, oddają ciepło. W tabeli 4 przedstawiono podstawowe właściwości najczęściej stosowanych substancji (hydratów). Zasobniki z substancjami przedstawionymi w tabeli 4, ważą 3-10 Mg i są w stanie ogrzewać dom do kilkunastu dni [19].

Najlepsze parametry techniczne posiadają magazyny chemiczne. W magazynach tego typu wykorzystuje się możliwość przechowywania i odzyskiwania ciepła na drodze odwracalnych reakcji endo- i egzotermicznych.

Tabela 4. Właściwości fizyczne wybranych hydratów stosowanych do magazynowania ciepła [19,20]

Nazwa	Wzór chemiczny	Temperatura topnienia [°C]	Ciepło topnienia [kJ·kg ⁻¹]
Chlorek wapnia	CaCl ₂ ·6H ₂ O	30	191
Węglan sodu	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	33	247
Tiosiarczan sodu	Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	48-55	201
Siarczan(VI) sodu (sól Glaubera)	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32	254
Azotan(V) cynku	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	36	147
Octan sodu	CH ₃ COONa·3H ₂ O	58	226
Chlorek magnezu	MgCl ₂ ·6H ₂ O	117	169

Długoterminowe magazynowanie ciepła odbywa się na zasadzie podwyższenia temperatury wielkich mas wody czy gruntu. Mogą to być:

- płytkie zbiorniki wody z czarnym dnem, przeszklone od góry, umieszczone na dachach domów,
- stawy słoneczne – zbiorniki z solanką (naturalne lub sztuczne) o głębokości 2-5 m, zawierające chlorek sodu lub chlorek magnezu,
- warstwy wodonośne,
- zbiorniki wodne umieszczone w gruncie, skałach, wyrobiskach,
- wykorzystanie gruntu jako zasobnika ciepła [19].

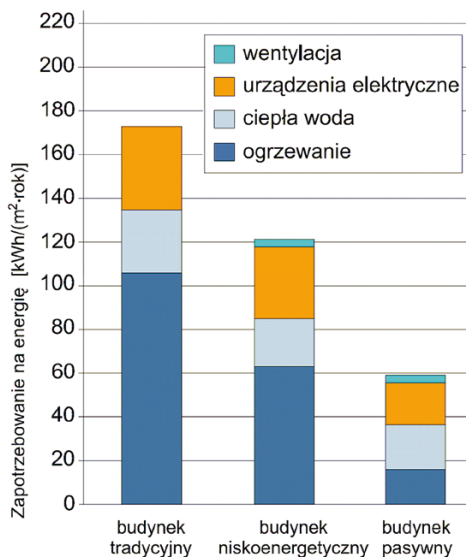
8. Aspekty ekonomiczno-ekologiczne budynków pasywnych

Budynek pasywny pozwala na znaczne oszczędności energii, dzięki czemu ulegają obniżeniu koszty ogrzewania w ciągu roku (rysunek 8). Zużycie energii jest 2 razy niższe niż budynku niskoenergetycznego, 3 razy niższe niż w budynku tradycyjnym. Żle zbudowane, nieizolowane budynki tradycyjne zużywają nawet 5-krotnie więcej energii niż domy pasywne. W budownictwie pasywnym, dzięki redukcji o 70-80% zapotrzebowania na ciepło dostrzegalną rolę w bilansie energetycznym zaczynają odgrywać źródła wewnętrzne: pracujące w domu urządzenia i ludzie [21].

Koszt wybudowania domu pasywnego jest 10-15% wyższy niż takiego samego obiektu o standardowych parametrach. Dodatkowe nakłady inwestycyjne w dużej mierze generowane są przez koszt związany z wyposażeniem budynku w wentylację mechaniczną. Do wzrostu kosztów przyczynia się również cena grubszej warstwy izolacji termicznej oraz okien – wyższa o 100-120% w porównaniu do okien standardowych. Poniesione nakłady inwestycyjne zwracają się już po kilku latach [21].

Jak już wielokrotnie wspomniano, istotą standardu budynków pasywnych jest maksymalne wykorzystanie energii Słońca i ograniczenie zużycia energii potrzebnej do bieżącej eksploatacji budynku. Przekłada się to na

znacznie mniejsze zużycie paliw kopalnych, a co za tym idzie niższą emisję dwutlenku węgla, pyłów, itp [21].



Rys. 8. Porównanie zapotrzebowania na energię dla budynku tradycyjnego, niskoenergetycznego i pasywnego [21]

Stosowana w budynkach pasywnych wentylacja mechaniczna pozwala skuteczniej, niż wentylacja grawitacyjna, eliminować szkodliwe substancje, jak amoniak, tlenek i dwutlenek węgla, dym papierosowy, itp. Fakt, że obieg powietrza jest ukierunkowany, daje gwarancję że w/w substancje zostaną odprowadzone na zewnątrz.

Dobra izolacja budynku oraz eliminacja mostków termicznych, sprawia że wszystkie wewnętrzne płaszczyzny przegród zewnętrznych mają temperaturę zbliżoną do temperatury wewnętrznej obiektu. Przykładowo, na podłogach i ścianach w pobliżu balkonów nie występuje zjawisko obniżonej temperatury powierzchni, powszechnie występujące w zimniejszych okresach roku w budownictwie tradycyjnym i wpływające bardzo negatywnie na poczucie komfortu cieplnego mieszkańców [21].

9. Literatura

1. J. Dobriański, *Wymiana ciepła w instalacjach słonecznych z płaskimi kolektorami*, Wyd. YWM, Olsztyn 2009.

2. J. Ślusarek, B. Wilk-Słomka, *Procesy termiczne w przegrodach budowlanych o złożonej strukturze*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
3. P. Klemm i in., *Budownictwo ogólne. Fizyka budowli*, Arkady, Warszawa 2005.
4. L. Theodore, *Heat transfer applications for the practicing engineer*, John Wiley&Sons, Hoboken 2011.
5. R. Zarzycki, *Wymiana ciepła i ruch masy w inżynierii środowiska*, WNT, Warszawa 2005.
6. R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *Feynmana wykłady z fizyki, tom 1*, PWN, Warszawa 2004.
7. S. Wiśniewski, T. Wiśniewski, *Wymiana ciepła*, WNT, Warszawa 2000.
8. M.A. Wołoszyn, *Wykorzystanie energii słonecznej w budownictwie jednorodzinym*, Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa 1991.
9. A. Derecka-Grzymek (red.), *Glass and glassy materials*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1989.
10. zasoby Wikimedia Commons.
11. W. Płoński, *Oszczędność energii w procesie budowlanym i ogrzewanie budynków*, Przegląd Budowlany 4, 1987.
12. J.A. Pogorzelski, *Fizyka budowli: podstawy wymiany ciepła i masy*, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok 1987.
13. J. Pinske, *Szklarnie*, Świat Książki, Warszawa 2008.
14. S. Kurpaski (red.), *Funkcjonalność zintegrowanego systemu grzewczego w ogrzewanych tunelach foliowych*, Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków 2004.
15. P. Krusche, D. Althaus, I. Gabriel, *Ökologisches Bauen*, Berlin 1982.
16. R. Piotrowski, P. Dominiak, *Budowa domu pasywnego krok po kroku*, Przewodnik Budowlany, Warszawa 2012.
17. R. Wnuk, *Budowa domu pasywnego w praktyce*, Przewodnik Budowlany, Warszawa 2012.
18. H. Mürmann, *Wentylacja mieszkań: wentylacja z odzyskiem ciepła: poradnik*, Instalator Polski, Warszawa 2001.
19. W. Smolec, *Fototermiczna konwersja energii słonecznej*, PWN, Warszawa 2000.
20. J. Schröder, K. Gawron, *Latent heat storage*, Energy Research 5, 103-109, 1981.
21. *Budynki pasywne – mistrzowie oszczędzania energii*, materiały dostępne na: http://www.multicomfort.pl/uploads/Budynki_Pasywne_KRES.pdf

AKTYWNE SYSTEMY OGRZEWANIA – KOLEKTORY SŁONECZNE

Aktywne systemy ogrzewania pozwalają wykorzystywać ciepło słoneczne do ogrzewania (kolektory niskotemperaturowe) i do produkcji ciepła bądź prądu (kolektory średnio- i wysokotemperaturowe). Kolektory słoneczne stanowią aktualnie najczęściej używaną grupę urządzeń pozwalających na wykorzystanie promieniowania słonecznego.

Wybór kolektora słonecznego i całej instalacji aktywnej w gospodarstwie domowym, to odpowiedzialna decyzja, ze względu na zakładaną 20-30-letnią eksploatację oraz spodziewany efekt ekonomiczny, mający zapewnić realny okres zwrotu kosztów inwestycji i następnie oszczędności dla budżetu domowego.

Jednym z podstawowych warunków uzyskania efektywnej pracy instalacji solarnej jest zapewnienie właściwego nasłonecznienia kolektorów słonecznych. Idealnym rozwiązaniem byłoby zapewnienie zawsze prostopadłego kąta padania promieniowania na kolektor. Wówczas przepuszczalność promieniowania słonecznego przez szybę, a także przyjmowanie promieniowania przez absorber będzie na wyższym poziomie w okresie zimowym, gdy Słońce porusza się nisko nad horyzontem, a jednocześnie najniższe w okresie letnim, gdy Słońce porusza się wysoko nad horyzontem.

1. Ogólna charakterystyka kolektorów słonecznych niskotemperaturowych

Kolektor słoneczny pozwala aktywnie pozyskiwać energię Słońca. Jest to urządzenie służące do konwersji promieniowania w ciepło, które jest przekazywane do medium w celu dalszego jego wykorzystania. Kolektory słoneczne najpowszechniej wykorzystywane są do:

- podgrzewania wody użytkowej i basenowej,
- wspomagania centralnego ogrzewania,
- podlewania bądź suszenia płodów rolnych,
- chłodzenia budynków,
- wytworzenia ciepła technologicznego [1,2].

Typowy kolektor słoneczny składa się z absorbera, osłony, izolacji i konstrukcji (obudowy, instalacji, zaworów, króćców pomiarowych i konstrukcji nośnej) [3]. Zadaniem absorbera jest pochłanianie promieniowania słonecznego i jego zamiana w ciepło. Najprostszym, ale obecnie bardzo rzadko spotykanym wariantem jest metalowa płyta absorbera pomalowana czarną farbą bądź z miedzi (rysunek 1). Rozwiązanie takie było najtańsze jednak generowało duże straty w ciepłe. Obecnie, nowoczesne absorbery wykonywane są z:

- powłoki galwanicznej z czarnego niklu,
- czarnego chromu,
- czarnej miedzi, lub
- napyłanej powłoki wysokoselektywnej z tlenku tytanu [3,4].



Rys. 1. Kolektor własnej konstrukcji (fot. B. Igliński)

Od strony tylnej i bocznej płyta absorbera jest otoczona warstwą materiału izolującego cieplnie. Od strony napromienianej, płyta absorbera jest przysunięta jedną, dwoma, rzadziej trzema przezroczystymi osłonami, głównie dla ograniczenia strat przez unoszenie.

Oslony kolektora muszą być przezroczyste, wytrzymałe na naciski, zginanie i ścieranie wywołane wiatrem, śniegiem, gradem i piaskiem. Powinny mieć też dużą twardość, być łatwe do umycia i odporne na promieniowanie nadfioletowe. Stosuje się m.in. szkło budowlane hartowane, teflon, poliwęglan (PC) czy poli(metakrylan metylu) [5]. Specjalne rolety do kolektorów słonecznych stanowią zabezpieczenie przed niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi, a także przegrzaniem instalacji. Stosuje się je głównie do kolektorów próżniowych.

Pierwsze kolektory miały prymitywną izolację polegającą na osłonie elementów metalowych drewnianą obudową z przegrodą szklaną. Rozwiązanie to przetrwało do 1973 r., kiedy wybuchł pierwszy światowy kryzys energetyczny. Dokonano wówczas modyfikacji tych urządzeń – kolektory skrzynkowe zostały spłaszczone, drewnianą obudowę zamieniono na aluminiową, a do jej wnętrza włożono grubą warstwę wełny mineralnej (10–15 cm w zależności od typu rozwiązania) jako izolację. Z biegiem czasu warstwa izolacyjna z wełny mineralnej zastępowana była pianką poliuretanową, poliestrową, styropianem lub też zestawami warstwowymi. Producenci zaczęli też przywiązywać wagę do optymalnego doboru izolacji transparentnej, czyli przegrody szklanej [6].

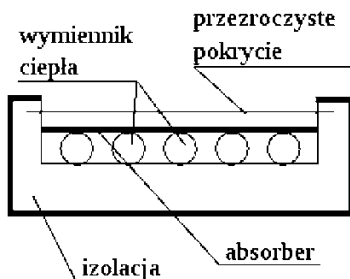
Wymiary gabarytowe kolektora słonecznego powinny odpowiadać modułom architektonicznym, zwłaszcza szerokość kolektora musi odpowiadać wielokrotności rozstawu cegieł. Każdy kolektor powinien posiadać ramę okapową, która zabezpiecza przed przeciekami wody deszczowej do przestrzeni pod tylną ścianę baterii. Kolektory można mocować do konstrukcji nośnej śrubami narożnikowymi, chwytającymi jednocześnie cztery kolektory. Można również mocować oddzielnie każdy kolektor czterema śrubami przechodzącymi przez boczną ramę kolektora i izolację. Odstęp pomiędzy kolektorami zamocowanymi w konstrukcji powinien być możliwie mały, by zminimalizować gabaryty całej instalacji. Konstrukcja nośna baterii kolektorów słonecznych może być: wolnostojąca, może stanowić równocześnie więzadła dachu bądź być zamocowana na pionowej ścianie. Wszystkie konstrukcje nośne muszą być tak projektowane, aby zapewnić odpowiednią wytrzymałość [7].

2. Kolektory słoneczne niskotemperaturowe

2.1. Płaskie cieczowe kolektory słoneczne

Kolektory cieczowe są to urządzenia zamieniające energię słoneczną na ciepło, w których czynnikiem roboczym jest ciecz. Kolektor cieczowy to najczęściej kolektor płaski zbudowany w formie prostopadłościennych skrzynek

(rysunek 2). Płaskie cieczowe kolektory słoneczne są najbardziej popularne. Typową konstrukcję kolektora przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat kolektora płaskiego [8]

Szklana szyba, umieszczona nad absorberem, praktycznie nie przeszkadza w dotarciu promieniowania słonecznego do absorbera i chroni go przed konwekcyjnym oddziaływaniem wiatru. Stanowi również ekran dla promieniowania podczerwonego, które jest emitowane przez absorber do otoczenia.

W płaskich kolektorach słonecznych absorber izolowany jest od otoczenia warstwą powietrza, która znajduje się między nim a szybą. Jeżeli warstwa powietrzna ma niewielką grubość, ciepło przekazywane jest tylko przez przewodzenie. Im grubsza warstwa powietrza, tym większy opór termiczny i tym większe straty ciepła. W przypadku grubości tej warstwy powyżej 10-20 mm zostaje przekroczona liczba Rayleigha Ra , znaczący udział w wymianie ciepła ma konwekcja [3].

Płynąca rurkami kolektora ciecz (zwykle stosuje się trudno zamarzający roztwór glikolu) ogrzewa się od rozgrzanej przez Słońce powierzchni płyty absorpcyjnej i przylegających do niej ścianek rur. Od jakości użytych materiałów i precyzji wykonania zależy sprawność kolektora, a zatem także ilość energii, jaką dostarczy do instalacji przy określonej powierzchni. Bardzo istotny ze względu na skuteczność wymiany ciepła między absorberem a elementami transportującymi ogrzewaną ciecz jest sposób ich połączenia. Producenci stosują różne rozwiązania, starając się znaleźć kompromis między ich jakością i kosztami produkcji. W absorberach są wykonywane kanały, w których zagłębia się rurki, dzięki czemu wielokrotnie zwiększa się powierzchnia styku. Rurki bywają też spłaszczane [3,4].

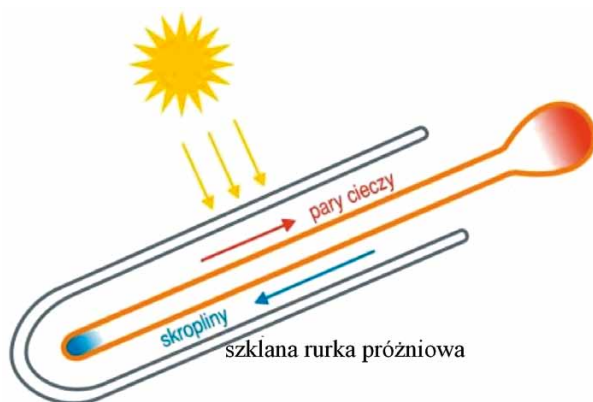
2.2. Próżniowe kolektory słoneczne

Opór termiczny między szybą a absorberem można zwiększyć, a straty ciepła do otoczenia zmniejszyć, jeśli między szybą a absorberem wytworzona

zostanie próżnia, w której przewodzenie i konwekcja nie zachodzi. Wówczas ciepło przekazywane będzie tylko przez promieniowanie.

Kolektory próżniowe zbudowane są najczęściej z pojedynczych próżniowych rur szklanych. Ze względu na trudności technologiczne (problem z zapewnieniem szczelności w dużej objętości), rzadziej stosowane są kolektory próżniowe płaskie. Próżniowe rurowe kolektory słoneczne zbudowane są z jedno- lub dwuściennych rur próżniowych. W przypadku rur jednościennej, rura szklana musi być połączona szczelnie z rurką czynnika grzewczego (szkło-metal). Z kolei w przypadku rur próżniowych 2-ściennych, próżnia jest wytworzona pomiędzy dwoma rurami szklanymi. Konstrukcja rury jest zamknięta fabrycznie (szkło-szkło) [4,5].

Kolektory próżniowe mogą działać na zasadzie bezpośredniego przepływu przez absorbery lub na zasadzie rurki cieplnej (heat pipe), gdzie czynnik grzewczy (glikol) nie kontaktuje się z absorberem. Kolektory próżniowe typu heat pipe (rysunek 3) stanowią większą część oferowanych obecnie na rynku kolektorów próżniowych, są też tańsze. Do zalet tychże kolektorów można zaliczyć możliwość wymiany rury próżniowej bez opróżniania instalacji oraz bardzo rzadkie przegrzewanie się czynnika grzewczego. Z kolei kolektory o bezpośrednim przepływie posiadają nieznacznie wyższą sprawność, co więcej, możliwa jest praca w dowolnym położeniu rur próżniowych, także w poziomie i w pionie [9].



Rys. 3. Budowa kolektora próżniowego (heat-pipe)

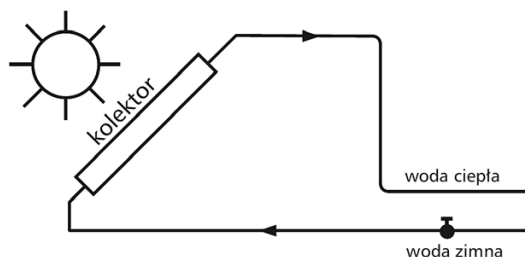
Czynnik grzewczy odbiera bezpośrednio ciepło z absorberów poprzez przepływ w podwójnej (współśrodkowej) rurce miedzianej. Rury próżniowe można obracać o 25° , co pozwala skorygować niekorzystne położenie kolektora wobec kierunku padania promieni słonecznych.

Kolektory próżniowo-rurowe mają nieco większą wydajność niż kolektory płaskie, ale technologia ich wykonania sprawia, że ich instalacja jest rozwiązaniem droższym. Kolektory tego typu są również mniej wytrzymałe np. na grad, a także zimą, gdy spadnie na nie śnieg, nie ma możliwości zastosowania tak zwanego obiegu odwróconego w celu rozmrożenia kolektora i usunięcia z nich śniegu (takie rozwiązanie możliwe jest w kolektorach płaskich) [4].

2.3. Systemy podgrzewania wody w budownictwie

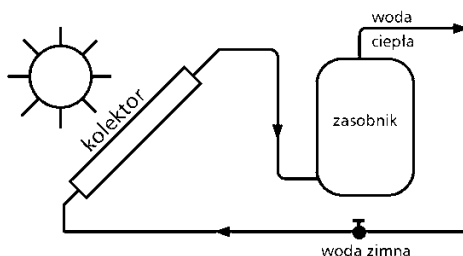
Instalacje solarne do ogrzewania wody użytkowej można podzielić, ze względu na sposób kontaktu kolektora z wodą użytkową, na systemy bezpośrednie lub pośrednie. W systemach bezpośrednich woda użytkowa przepływa wewnątrz kolektora i jest w nim bezpośrednio ogrzewana. W systemach pośrednich ciecz o niskiej temperaturze zamarzania, nagrzewająca się w obiegu zamkniętym kolektora, oddaje ciepło wodzie użytkowej poprzez powierzchnię wymiennika. Ze względu na zakres wykorzystania energii słonecznej wyróżnia się instalacje, w których jedynym źródłem ciepła jest kolektor słoneczny oraz układy skojarzone ze źródłami konwencjonalnymi [10].

Najprostsze rozwiązanie połączenia z obiegiem ogrzewanej wody bez zbiornika magazynującego przedstawia rysunek 4. Jest ono często stosowane do podgrzewania wody w basenach kąpielowych lub instalacjach do pojenia bydła. W tym systemie nie ma możliwości regulacji temperatury wody i jest ona funkcją chwilowej gęstości promieniowania słonecznego i przepływu wody [10].



Rys. 4. System bezpośredniego podgrzewania wody bez zasobnika [10]

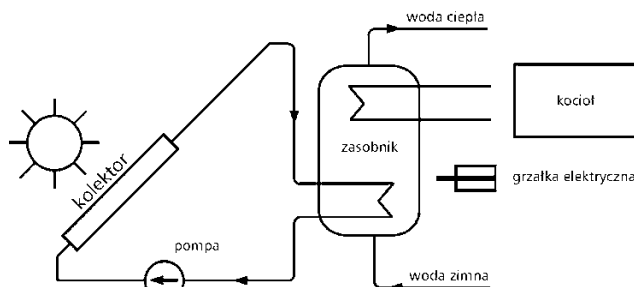
W przypadkach względnie równomiernego poboru wody, występującego głównie w godzinach największego nasłonecznienia, celowe jest zastosowanie systemu bezpośredniego z zasobnikiem, który wyrównuje zmiany temperatury wody spowodowane chwilowym poborem (rysunek 5).



Rys. 5. System bezpośredniego podgrzewania wody z zasobnikiem [10]

Wadą wszystkich systemów bezpośrednich jest to, że bieżąca woda, w zależności od jej składu chemicznego, w kontakcie z wewnętrznymi elementami kolektora może powodować wytrącanie osadów ze związków chemicznych lub korozję.

Systemy pośrednie stosowane są w urządzeniach eksploatowanych w ciągu całego roku. Pozwalają one uniknąć niebezpieczeństwa przyspieszonego zużycia kolektorów. Obieg w układzie kolektora może być grawitacyjny lub wymuszony działaniem pompy. Czynnik roboczy samoczynnie krąży w układzie kolektor-wężownica. W klimacie umiarkowanym instalacje solarne muszą być zimą wspomagane konwencjonalnymi systemami ogrzewania wody. Wykorzystuje się do tego tzw. zasobniki biwalentne z 2 wbudowanymi wężownicami. Dolna wężownica połączona jest zamkniętym obiegiem słonecznym, a górna z kotłem konwencjonalnym (rysunek 6) [10].



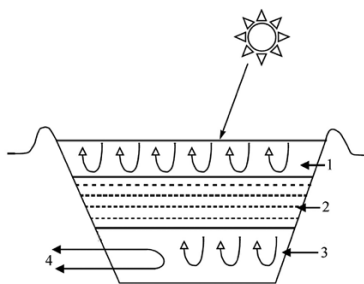
Rys. 6. System pośredni zamknięty z wymuszonym obiegiem pompowym i zasobnikiem biwalentnym [10]

2.4. Stawy słoneczne

Staw słoneczny to zbiornik wodny o dużym zasoleniu (NaCl , MgCl_2) posiadający ciemne dno, które pochłania promienie słoneczne. Dookoła sta-

wu zakłada się materiał oddzielający zbiornik od gruntu, aby wydzielająca się sól nie zanieczyściła otaczającego terenu oraz wód gruntowych. Typowy staw o głębokości 1 m ma 6–8 warstw płynu o zróżnicowanym stężeniu, gdzie rozróżnia się trzy typowe strefy w zbiorniku:

- przypowierzchniową o temperaturze około 30°C, zależnej najbardziej od temperatury powietrza (przykładowo, w południowej Australii łatwo osiągalna jest temperatura 65°C, nawet zimą),
- bezkonwekcyjną, oraz
- akumulacji, w warstwie przydennej, gdzie występuje wysoka temperatura, dochodząca nawet do 100°C oraz największe stężenie soli (rysunek 7) [11,12].



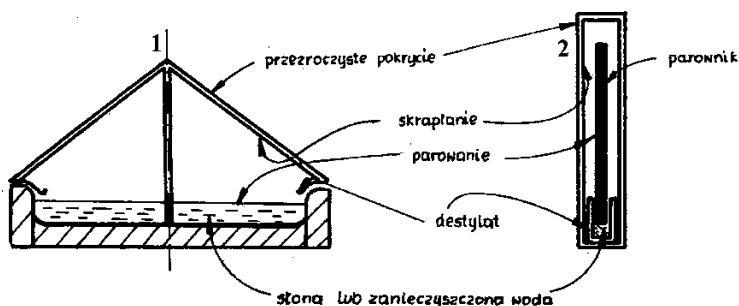
Rys. 7. Staw słoneczny; 1 – strefa przypowierzchniowa, 2 – strefa bezkonwekcyjna, 3 – strefa akumulacji, 4 – odbiór ciepła

Zalegająca w stawie woda układa się w dwie charakterystyczne warstwy, dolną silnie zasoloną, o dużej gęstości oraz górną o lekkim zasoleniu (może to być woda słodka). Dolna warstwa absorbuje energię słoneczną i nagrzewa się, jej duża gęstość blokuje przenikanie ciepła ku górze. Ciepło to zostaje oddane w wymienniku ciepła substancji odparowującej w stosunkowo niskiej temperaturze, a jej opary napędzają turbinę, ta natomiast generator. Tego typu elektrownia jest w małym stopniu wrażliwa na chwilowe braki w dostawie energii słonecznej (np. w nocy), ponieważ woda pochłania duże porcje energii, dzięki czemu wychładza się bardzo długo. Jeden hektar stawu może (uwzględniając współczynnik konwersji i potrzeby własne systemu – sprawność = 10%) dostarczyć 1,75 GWh energii rocznie [11,12].

2.5. Destylarki słoneczne

Destylarki słoneczne wykorzystuje się głównie w ciepłych krajach do odsalania wody morskiej lub oczyszczania ścieków. W destylarkach promienio-

wanie słoneczne absorbowane jest w zaczernionym dnie lub parowniku. Ciepło oddawane słońcu lub zanieczyszczonej wodzie powoduje jej odparowanie. Para skrapla się na wewnętrznej powierzchni przezroczystych pokryć destylarek a skropliny spływają po nich do kanałów, z których są odbierane na zewnątrz. Destylarka może być pozioma lub pionowa (rysunek 8) [13].



Rys. 8. Destylarka słoneczna: 1 – pozioma, 2 – pionowa [13]

3. Kolektory słoneczne średnio- i wysokotemperaturowe

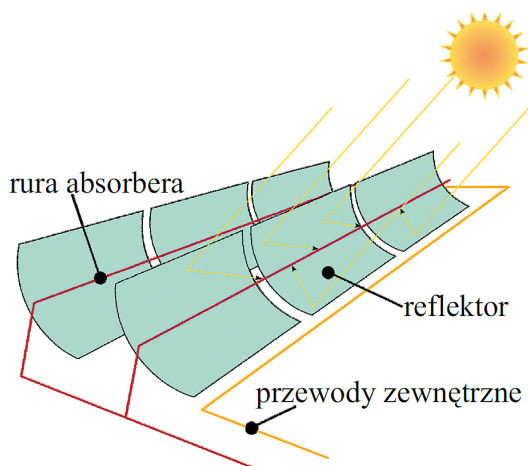
Kolektory skupiające (średnio- i wysokotemperaturowe) dzięki zastosowaniu układu lusterek skupiają energię promieniowania punktowo lub liniowo, co umożliwia większą koncentrację energii na absorberze, a co za tym idzie wyższą temperaturę czynnika roboczego (100-300°C). Stosuje się je w procesach technologicznych, w których potrzebny jest płyn o wysokiej temperaturze. Znalazły one zastosowanie w elektrowniach heliologicznych lub do przetapiania metali w wielkich piecach słonecznych, gdzie promienie słoneczne skupione w jednym miejscu osiągają temperaturę nawet 3000°C.

Dzięki koncentracji promieniowania, kolektor skupiający w porównaniu z kolektorem płytowym o takiej samej mocy wymaga znacznie mniejszej powierzchni absorbera; tym samym zmniejszeniu ulegają straty ciepłe zwłaszcza straty przez promieniowanie [13].

3.1. Kolektory paraboliczne

Kolektory z lustrem (rynną) w kształcie paraboli o szerokości do 6 m i długości do 150 m kierują promieniowanie słoneczne na rurę absorbera (rysunek 9). Olej przepływający przez rurę ogrzewa się do temperatury rzędu 400°C i kierowany jest do wymiennika ciepła, w którym jego energia wy-

korzystywana jest do wytworzenia pary. Para ta służy do produkcji energii elektrycznej w tradycyjnych turbinach parowych [14,15].

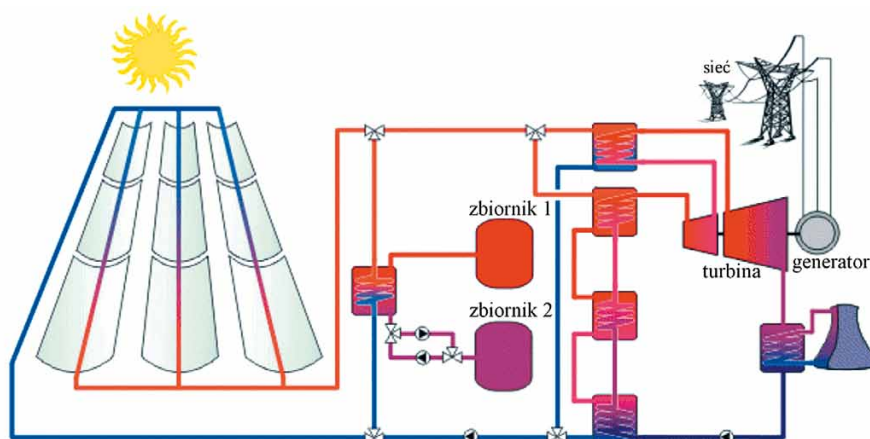


Rys. 9. Zasada działania kolektora parabolicznego

Współczesne instalacje słoneczne wykorzystujące tę technologię mają moc około 100 MW, a sprawność instalacji zamieniającej promieniowanie słoneczne w energię elektryczną sięga 30%. Kolejnym usprawnieniem w kolektorach wykorzystujących tę technologię jest skupianie promieniowania słonecznego bezpośrednio na szklanej rurze pokrytej absorberem selektywnym, przez którą przepływa woda. Dzięki temu w instalacji nie jest konieczne zastosowanie wymiennika ciepła, a jej sprawność znacznie wzrasta.

W elektrowniach słonecznych często stosuje się dwa zbiorniki ze stopioną solą (nośnik ciepła), które to pozwalają na ciągłą pracę elektrowni (rysunek 10). Nadmiar ciepła kierowany jest do ogrzewania stopionej soli, która jest pompowana ze zbiornika o niższej temperaturze (zbiornik 2) do zbiornika o wyższej temperaturze (zbiornik 1). Jeśli kolektory nie mogą produkować odpowiedniej ilości ciepła do produkcji prądu elektrycznego, stopiona sól pompowana jest ze zbiornika 1 do zbiornika 2, ogrzewając jednocześnie nośnik ciepła [14,15].

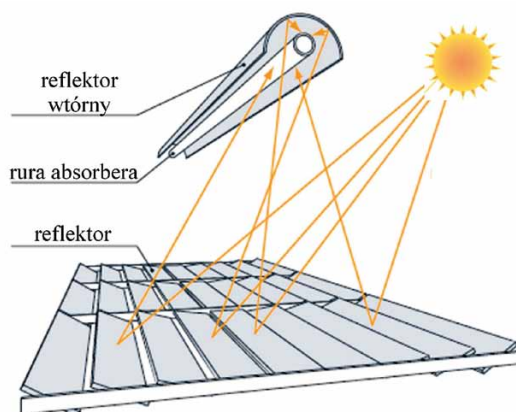
W przypadku kolektorów wykorzystujących zasadę Fresnela promieniowanie słoneczne dochodzące do baterii płaskich kolektorów kierowane jest na rurę absorbera (rysunek 11). Ponieważ strumień energii dochodzący do rury jest mniejszy niż w wypadku luster skupiających, zastosowano w nich wtórne lustro, które dodatkowo skupia strumień światła. W rurze absorbera bezpośrednio podgrzewana jest woda, a powstała para kierowana jest do turbiny [16].



Rys. 10. Schemat elektrowni słonecznej

3.2. Kolektory Fresnela

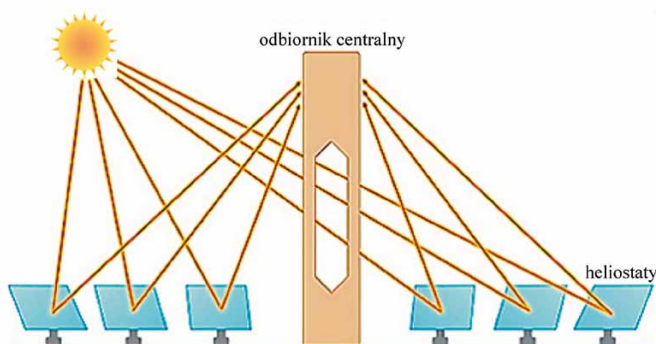
W przypadku kolektorów wykorzystujących zasadę Fresnela promieniowanie słoneczne dochodzące do baterii płaskich kolektorów kierowane jest na rurę absorbera (rysunek 11). Ponieważ strumień energii dochodzący do rury jest mniejszy niż w wypadku lustek skupiających, zastosowano w nich wtórne lustro, które dodatkowo skupia strumień światła. W rurze absorbera bezpośrednio podgrzewana jest woda, a powstała para kierowana jest do turbiny [16].



Rys. 11. Zasada działania kolektora Fresnela

3.2.1. Wieżowe elektrownie słoneczne

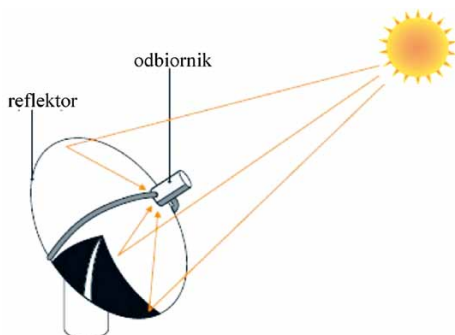
W wieżowych elektrowniach słonecznych promieniowanie słoneczne skupiane jest na szczycie specjalnie zbudowanej wieży, przez zestaw indywidualnych, podążających za słońcem lusterek (tzw. heliostatów) (rysunek 12). W tej technologii, absorber znajdujący się na szczycie wieży, osiąga temperaturę powyżej 1000°C i przekazuje ciepło nośnikowi energii, który napędza turbiny [17].



Rys. 12. Zasada działania wieżowej elektrowni słonecznej

3.3. Kolektory Dish

Kolektory słoneczne z paraboloidą Dish są indywidualnymi siłowniami o mocy do kilkudziesięciu kW, dwuosiowo naprowadzanymi na Słońce. Ze względu na kształt lustera w formie paraboloidy, urządzenia te nazywane są kolektorami Dish (ang. talerz) (rysunek 13). Lustro skupia promienie słoneczne w punkcie centralnym, gdzie znajduje się absorber (odbiornik). Umieszczony w nim gaz (hel lub powietrze), ogrzany zostaje do temperatury powyżej 900°C i służy do napędu umieszczonej bezpośrednio przy nim turbiny gazowej lub silnika Sterlinga [18].



Rys. 13. Zasada działania kolektora z paraboloidą Dish

Kolektory Dish są eksploatowane od wielu lat (zwłaszcza w USA) i osiągnęły sprawność rzędu 30%. W nowoczesnych urządzeniach lustro stanowi pojedynczy element lub budowane jest z segmentów. Pojedyncze kolektory wraz z zamontowanymi na nich turbinami są zabezpieczeniem energetycznym dużych farm, a w grupach, jako siłownie, dostarczają energię na potrzeby małych miejscowości. Oczywiście dodatkowym wyposażeniem są tu specjalne agregaty, które magazynują energię, aby umożliwić całodzienną pracę siłowni [19].

3.4. Kominy słoneczne

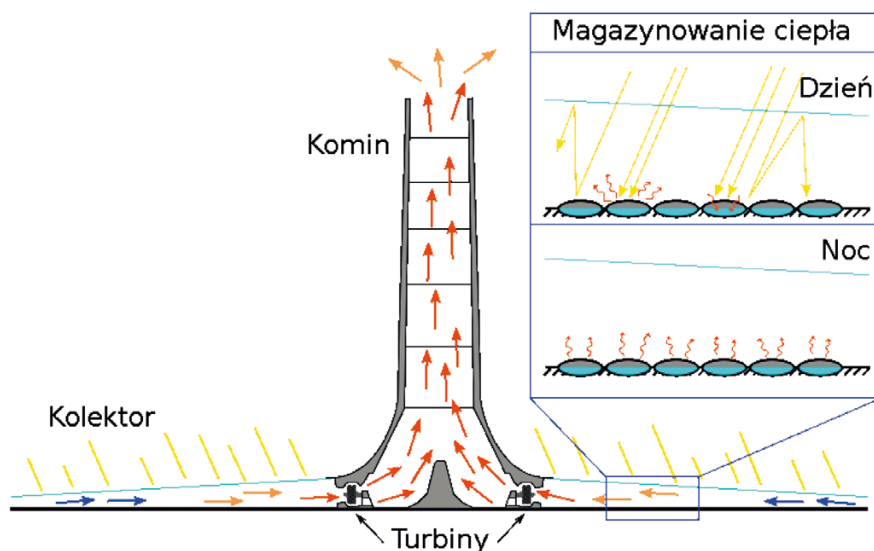
Kominy słoneczne to urządzenia wspomagające naturalną wentylację (wymianę powietrza) w budynku poprzez wykorzystanie efektu konwekcji powietrza podgrzewanego energią słoneczną. W najprostszej formie, komin słoneczny jest po prostu pomalowanym na czarno obiektem. W ciągu dnia energia słoneczna ogrzewa komin i znajdujące się wewnątrz powietrze. Podciśnienie między wlotem i wylotem z komina może być wykorzystane do wymuszenia przepływu powietrza i chłodzenia budynku, w którym jest zainstalowany. Zaawansowanym wykorzystaniem tej samej zasady jest tzw. wieża słoneczna – wysoki komin zbudowany na podstawie zbierającej energię słoneczną (krytej szkłem) [20].

3.5. Wieża słoneczna

U podstaw budowy wieży słonecznej leży zjawisko unoszenia się ogrzanego powietrza (rysunek 14). Pod olbrzymim dachem wykonanym ze szkła lub folii z tworzywa sztucznego ogrzewane jest zgromadzone tam powietrze, które następnie przemieszcza się do ulokowanego w centrum dachu komina i w trakcie wznoszenia się, napędza umieszczone w nim turbiny wytwarzające energię elektryczną. Wysokość komina może sięgać 1000 m, powierzchnia pod kolektorem może być wykorzystana do celów rolniczych [21].

Koncepcja ta umożliwia wytworzenie:

- efektu cieplarnianego zapewniającego ogrzewanie powietrza pod dachem,
- ciągu kominowego prowadzącego do wznoszenia się ogrzanego powietrza,
- energii z przemieszczającego się powietrza i jej zamiany w generatorze w energię elektryczną.



Rys. 14. Zasada działania komina słonecznego [8]

Podstawową zaletą tych siłowni jest fakt, że nie trzeba w nich stosować wody, co odgrywa niebagatelną rolę w krajach cierpiących na jej brak. Równocześnie dzięki nagraniu powietrza ogrzewa się także podłoże pod dachem, które może stanowić naturalny magazyn energii wykorzystywany do wytwarzania energii elektrycznej po zejściu Słońca [19].

Budowa komina słonecznego wymaga wysokich nakładów początkowych, które są rekompensowane przez niski koszt obsługi [22], możliwy do uzyskania poprzez brak kosztów zakupu paliwa. Komin słoneczny wymaga dużo mniejszej rezerwy energetycznej niż w przypadku elektrowni wiatrowych czy tradycyjnych elektrowni słonecznych. Związane jest to z faktem gromadzenia ciepła, które może być oddawane w nocy. Umożliwia to pracę elektrowni przez całą dobę, czego nie mogą zagwarantować elektrownie wiatrowe czy ogniwa fotowoltaiczne, dla których muszą istnieć w systemie energetycznym rezerwy energetyczne w postaci tradycyjnych elektrowni o mocy i dyspozycyjności, umożliwiającej zastąpienie tych elektrowni.

Według szacunków, wieża słoneczna o mocy 200 MW wymaga kolektora o średnicy 7 km i komina wysokości 1000 metrów. Instalacja ta może zapewnić energię dla 200 tysięcy typowych gospodarstw domowych. W przypadku tradycyjnych elektrowni, produkcja tej energii spowodowałaby wydzielanie do atmosfery 900 Gg gazów cieplarnianych w ciągu roku. Wydajność takiej elektrowni szacuje się na około 5 W/m^2 (sprawność klasycznych fotoogniw wynosi około 20-40%, średnio około 50 W/m^2) [22].

4. Literatura

1. S. Peroń, Z. Zdrojewski, M. Szurma, *Analiza możliwości wykorzystania płaskiego kolektora słonecznego do suszenia ziarna pszenicy w warunkach klimatycznych okolic Wrocławia*, Inżynieria Rolnicza 9(97), 181-187, 2007.
2. H. Latała, *Wykorzystanie wody podgrzanej w kolektorach słonecznych do podlewania pomidorów uprawianych w obiektach pod osłonami*, Inżynieria Rolnicza 1(110), 167-174, 2009.
3. J. Dobriański, *Wymiana ciepła w instalacjach słonecznych z płaskimi kolektorami*, Wyd. Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Olsztyn 2009.
4. D. Tomaszewski, *Jak działają kolektory słoneczne płaskie i próżniowe. Budowa i zasada działania kolektorów*, materiały witryny internetowej muratorodom.pl
5. W.M. Lewandowski, *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, Warszawa 2007.
6. Z.T. Grzegorzewski, *Izolacje w instalacjach słonecznych*, Izolacje 1(14), 98-99, 2010.
7. H. Kaiser, *Wykorzystanie energii słonecznej*, Wyd. AGH, Kraków 1995.
8. zasoby Wikimedia Commons.
9. E. Azad, *Assessment of three types of heat pipe solar collectors*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 2833-2838, 2012.
10. P. Sołowej, *Odnawialne źródła energii*, System informacyjny opracowany w Katedrze Elektrotechniki i Energetyki Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, 1999.
11. M.A. Al-Dabbas, *Optimum salt-gradient solar pond in Jordan*, Applied Solar Energy 1(47), 14-23, 2011.
12. H. Husain, S. Shekhawat, M. Husaun, *Meteorologically efficient commissioning of salt gradient solar pond*, Applied Solar Energy 3(48), 180-185, 2012.
13. W. Gogół, O. Skoneczny, L. Zakrzewski, *Niektóre zagadnienia wymiany ciepła w kolektorach energii promieniowania słonecznego*, Biuletyn Informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej, Nr 54, 1979.
14. M.S. Jamel, A.A. Rahman, A.H. Shamsuddin, *Advances in the integration of solar thermal energy with conventional and non-conventional power plants*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 20, 71-81, 2013.
15. informacje dostępne na stronie: <http://www.volker-quaschning.de/articles/fundamentals2/index.php>
16. W.T. Xie et al., *Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 2588-2606, 2011.
17. S. Alexopoulos, B. Hoffschmidt, *Solar tower power plant in Germany and future perspectives of the development of the technology in Greece and Cyprus*, Renewable Energy 35, 1352-1356, 2010.
18. R. Beltran, *Mathematical model for the study and design of a solar dish collector with cavity receiver for its applications in Stirling engines*, Journal of Mechanical Science and Technology 10(26), 3311-3321, 2012).
19. J. Chodura, *Kolektory słoneczne w zastosowaniach specjalnych*, Rynek Instalacyjny 4, 2012.

20. A. Trombe, L. Serres, *Air-earth exchanger study in real site experimental and simulation*, Energy and Buildings 2(21), 155-162, 1994.
21. X. Zhou et al., *Influence of atmospheric cross flow on solar updraft tower inflow*, Energy 42, 393-400, 2012.
22. J. Schlaich et al., *Design of commercial solar updraft tower systems – utilization of solar induced convective flows for power generation*, Journal of Solar Energy Engineering 127, 117-124, 2005.

FOTOWOLTAIKA

1. Właściwości półprzewodników

Do konstrukcji rozmaitych ogniw słonecznych używa się zarówno półprzewodników, metali jak i dielektryków, to jednak istota fotowoltaicznej konwersji energii Słońca związana jest wyłącznie z oddziaływaniem światła słonecznego z półprzewodnikami.

Materiały półprzewodnikowe mogą występować w trzech różnych postaciach: krystalicznej, polikrystalicznej i amorficznej. Postać krystaliczna (monokryształ) charakteryzuje się uporządkowanym rozmieszczeniem atomów. Materiał polikrystaliczny składa się z wielu krystalicznych części zwanych ziarnami lub kryształitami. Kryształy są rozmaicie zorientowane, więc na ich stykach uporządkowanie atomów jest zaburzone. Wreszcie w materiale amorficznym brak jest uporządkowania atomów w skali makroskopowej [1].

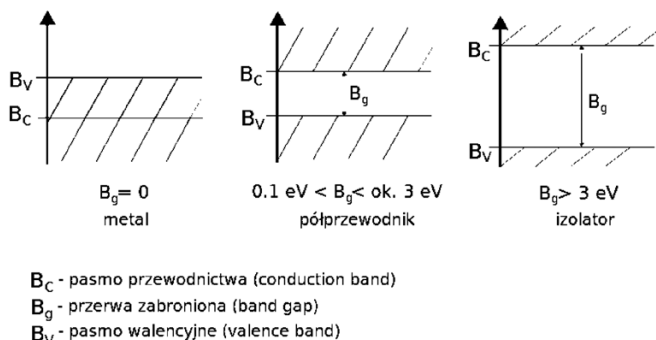
Z punktu widzenia półprzewodników najbardziej interesujący jest ruch elektronów w kryształach, gdzie energia potencjalna nie jest stała. Skoro w kryształach atomy są rozmieszczone periodycznie, więc i energia potencjalna elektronu jest funkcją periodyczną. Okazuje się, że dla elektronów w kryształach tylko pewne przedziały energii są dozwolone. Przedziały te zwane są pasmami energetycznymi. Szerokość tych pasm określona jest przez rodzaj materiału i jego strukturę krystaliczną, a nie liczbą atomów w kryształach. Szerokość ta zwiększa się ze wzrostem energii. Jeżeli kryształ jest utworzony z atomów wieloelektronowych, to pasma o małych energiach są bardzo wąskie, a nawet redukują się do jednego poziomu zlokalizowanego przy każdym atomie [1,2].

Powyżej temperatury 0 K, niektóre elektrony w półprzewodniku mogą uzyskać wystarczającą energię – wskutek ich wzajemnego oddziaływania z drgającymi atomami sieci – aby przejść z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa (rysunek 1). Mogą wtedy uczestniczyć w przewodzeniu prądu elektrycznego. Co więcej, jeśli elektron opuści swój poziom w pa-

śmiej walencyjnym, to pozostaje w nim nie zajęty całkowicie poziom energetyczny, czyli tzw. dziura o dodatnim ładunku elementarnym. Do takiej dziury może przejść elektron z sąsiedniego poziomu, co jest równoznaczne z przejściem dziury na ten poziom. W ten sposób może zachodzić przewodzenie prądu również w paśmie walencyjnym, a takie przewodnictwo nazywa się dziurowym. Tak więc w półprzewodniku nośnikami ładunku w procesie przewodzenia prądu są elektrony w paśmie przewodnictwa i dziury w paśmie walencyjnym. Prawdopodobieństwo zajęcia przez elektron danego poziomu opisuje funkcja rozkładu Fermiego-Diraca [3,4]:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{E - E_F}{k_B T}\right] + 1} \quad (1)$$

gdzie $f(E)$ oznacza prawdopodobieństwo tego, że określony dowolny poziom o energii E znajdujący się w pobliżu dna pasma przewodnictwa lub wierzchołka pasma walencyjnego jest zajęty przez elektron; E_F jest pewną energią zwaną poziomem Fermiego taką, że $f(E) = 1/2$ dla $E = E_F$, $k_B = 1,38 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ (stała Boltzmann) [3,4].



Rys. 1. Porównanie pasm dla metalu, półprzewodnika i izolatora [4]

Aby otrzymać materiał nadający się do praktycznego użytku, trzeba do niego wprowadzić nośniki ładunku w sposób sztuczny, stosując odpowiednie metody technologiczne. Proces ten polega na wbudowywaniu do sieci atomów odpowiednich domieszek, które wprowadzają do przerwy energetycznej zajęte lub puste poziomy energetyczne. Atomy takich domieszek zajmują węzły sieci zamiast atomów macierzystych, albo też zostają umieszczone w pozycjach międzywęzłowych. W pierwszym wypadku zwane są atomami podstawionymi, a w drugim – międzywęzłowymi. W obu przypadkach zaburzają one uporządkowanie struktury krystalicznej i zakłócają periodyczność energii potencjalnej w miejscach, gdzie się znajdują.

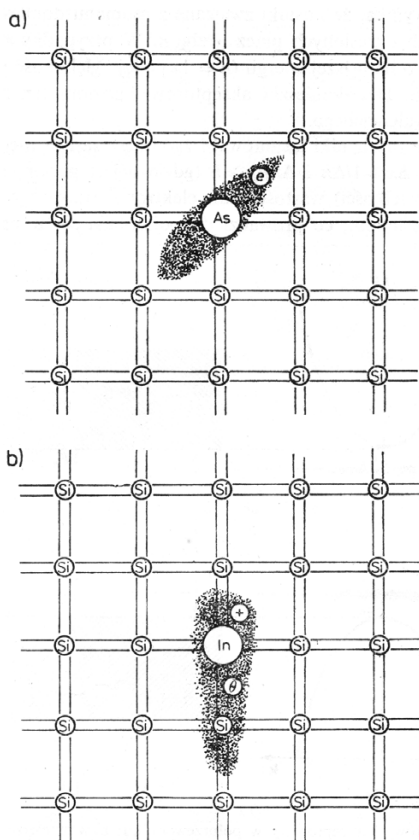
Jeśli wartościowość podstawionego atomu domieszki jest o jeden większa niż materiału macierzystego, jak w przypadku pięciowartościowego arsenu czy fosforu w czterowartościowym krzemie, wtedy jeden z elektronów walencyjnych atomu domieszki nie uczestniczy w jej wiązaniach kowalencyjnych z atomami macierzystymi. Dodatkowy elektron jest przyciągany przez dodatni rdzeń atomu domieszki siłą kulombowską jak w atomie wodoropodobnym, ale zmniejszoną przez kwadrat względnej przenikalności elektrycznej materiału macierzystego. Energia wiązania E_B może być określona wzorem:

$$E_B = \frac{m_e}{m\epsilon n^2} \cdot 13,5eV \quad (2)$$

gdzie: n – liczba naturalna,
 m – masa elektronu.

Wpływ przenikalności elektrycznej materiału macierzystego tak znacznie zmniejsza energię wiązania równoważnego dodatkowego elektronu, że w wielu przypadkach niewielka energia termiczna w temperaturze pokojowej wystarcza do jego oderwania od dodatniego jonu domieszki. Taki wyzwolony elektron może przemieszczać się w kryształ i uczestniczyć w przewodzeniu prądu. Atom domieszki, który dostarcza dodatkowy elektron do kryształu, nazywa się donorem, a półprzewodnik zawierający wiele takich atomów – materiałem typu n [1-5].

Jeśli wartościowość podstawionego atomu jest o 1 mniejsza od wartościowości materiału macierzystego, np. kiedy domieszką krzemu jest ind, to w sąsiedztwie atomu indu istnieje nienasycone wiązanie kowalencyjne i elektron walencyjny jednego z najbliższych atomów krzemu, który przebywa na przemian przy obu atomach, indukuje niewielki ładunek dodatni przy atomie domieszki. Ten ładunek działa jak pułapka dla elektronu z sąsiedniego wiązania Si-Si. Po schwytaniu takiego elektronu, atom domieszki staje się zjonizowany, tzn. obdarzony ładunkiem ujemnym. Proces jonizacji polega więc na oderwaniu się od niego dziury i na jej migracji do najbliższego wiązania Si-Si, co równoważne jest migracji elektronu z tego wiązania do atomu domieszkowego. Kiedy dziura znajduje się przy jednym z atomów macierzystych, może już wędrować po kryształ jako dodatnia cząstka swobodna o masie efektywnej m_h . Domieszka, która ma tendencję do wychwytywania elektronów w opisany sposób, nazywa się domieszką akceptorową, a półprzewodnik, wiele atomów takiej domieszki materiałem typu p (rysunek. 2) [5].



Rys. 2. Atomy arsenu (a) i indu (b)
w hipotetycznym dwuwymiarowym kryształe krzemu [5]

Jeżeli fotony padają na powierzchnię półprzewodnika, część z nich ulega odbiciu od tej powierzchni, a pozostała część zostaje zaabsorbowana wewnątrz półprzewodnika. Istota absorpcji światła w półprzewodniku polega na przekazywaniu energii fotonów elektronom związanym (znajdującym się w paśmie walencyjnym), swobodnym (w paśmie przewodnictwa), eksycytom (układ elektronu i dziury), a także atomom domieszek (fotony wywołują przejścia elektronów z poziomów domieszkowych do pasma przewodnictwa) i atomom sieci (pobudzenie drgań sieci krystalicznej) [6]. Jeżeli elektron, który otrzymał od fotonu energię, pozostaje nadal w swoim paśmie walencyjnym lub przewodnictwa (przechodzi tylko z jednego poziomu na inny pusty poziom), to traci on szybko energię wskutek zderzeń z atomami sieci. W przypadku pasma walencyjnego takie przejścia są oczywiście możliwe jedynie wówczas, gdy istnieją dziury. W ogniwach słonecznych wy-

korzystywana jest tylko absorpcja fotonów, które wywołują przejścia elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Aby wspomniane przejście było możliwe, energia fotonu musi być większa od przerwy energetycznej [5,6].

2. Układy p-n

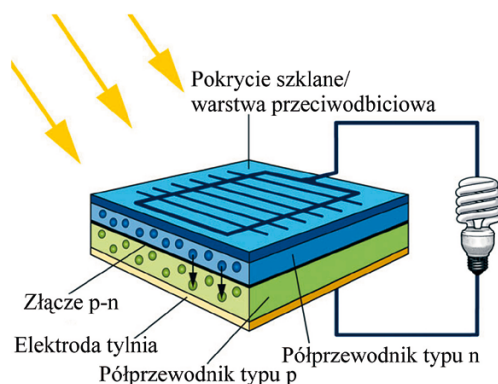
Podstawową częścią ogniwa słonecznego jest złącze *p-n*. Pojawia się ono wtedy, gdy koncentracja donorów N_d i akceptorów N_a zmienia się w ten sposób, że ma miejsce przejście od obszaru typu *n* do obszaru typu *p*. Obszary te oddzielone są od siebie bardzo cienką warstwą przejściową, zwaną złączem *p-n*. Jego typowa grubość wynosi 10^{-4} cm. Jeżeli wspomniane obszary są otrzymane z tego samego półprzewodnika przez odpowiednie jego domieszkowanie, to złącze nazywa się homozłączem *p-n*.

W równowadze termicznej quasi-swobodne elektrony pochodzące z donorów znajdują się początkowo głównie w obszarze typu *n*, gdzie zubożniają one ładunek przestrzenny zjonizowanych donorów, podczas gdy dziury pochodzące z akceptorów znajdują się głównie w obszarze typu *p*. Jeżeli początkowo w złączu nie ma pola elektrycznego, to elektrony dyfundują do obszaru typu *p*, pozostawiając w obszarze typu *n* dodatnio naładowane jony donorowe. Dziury natomiast będą dyfundowały do obszaru typu *n*, pozostawiając w obszarze typu *p* ujemnie naładowane jony akceptorowe. Ta początkowa dyfuzja nośników wywoła w złączu powstanie elektrycznej warstwy podwójnej, której pole elektryczne będzie przeciwdziało dalszej dyfuzji nośników przez złącze.

Złącze *p-n* wykonane z dwóch różnych półprzewodników nazywa się heterozłączem *p-n*. Trzeba jednak pamiętać, aby wybrane dwa materiały miały podobną strukturę krystaliczną i stałe sieciowe oraz zbliżone współczynniki rozszerzalności cieplnej [5].

3. Budowa i zasada działania ogniw słonecznych

W układzie: metal-półprzewodnik (złącze Schottky'ego) występuje lokalne pole elektryczne w złączu *p-n*. Gdy w takim złączu foton wytworzy parę elektron-dziura, wówczas pod działaniem wewnętrznego pola elektrycznego, na elektron i dziurę będą działać siły zwrócone w przeciwne strony, powodujące przemieszczanie się elektronu w stronę obszaru typu *n*, a dziury do obszaru typu *p*. To właśnie rozdzielanie generowanych światłem par elektron-dziura przez wewnętrzne pole elektryczne stanowi istotę efektu fotowoltaicznego [5,7].



Rys. 3. Budowa i zasada działania ogniwa słonecznego

Elektrodę tylną stanowi zwykle masowa warstwa metalowa mająca omowy kontakt z półprzewodnikiem. Dla zapewnienia wymaganych własności mechanicznych, chemicznych i elektrycznych, elektroda ta składa się z dwu- lub więcej warstw różnych metali. Zadaniem przezroczystej i przewodzącej warstwy przeciwo odbiciowej, wykonanej z dobrego materiału dla danego półprzewodnika, jest zmniejszenie do minimum odbicia światła przez wierzchnią półprzewodnikową powierzchnię ogniwa. Cały układ znajduje się w odpowiedniej hermetycznej szklanej kapsule chroniącej półprzewodnikowe i metalowe części ogniwa przed korozją i uszkodzeniami mechanicznymi.

Nie naświetlone ogniwo słoneczne jest z punktu widzenia elektroniki diodą o dużej powierzchni. Charakterystyka prądowo-napięciowa w tym stanie opisana jest zależnością:

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

gdzie: q – ładunek elementarny,
 k – stała Boltzmanna,
 T – temperatura bezwzględna,
 U – przyłożone napięcie, oraz
 I_0 – prąd nasycenia diody [7].

Promieniowanie słoneczne powoduje generację par elektron-dziura, a napięcie dyfuzyjne U_D rozdziela ładunki powodując wystąpienie różnicy potencjałów na zaciskach wyjściowych ogniwa. Przez podłączony odbiornik płynie w efekcie prąd fotoelektryczny I_{ph} :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

Z równania (4) otrzymuje się zależności opisujące najistotniejsze punkty dla charakterystyki napięciowo-prądowej naświetlanego ogniwa słonecznego:

$$U_{OC} = k \frac{T}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad \text{dla } I=0 \quad (R_0=\infty) \quad (5)$$

$$I_{SC} = I_{ph} = I \quad \text{dla } U=0 \quad (R_0=0) \quad (6)$$

$$U_m = U_{OC} - \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{U_m q}{kT}\right) \quad (7)$$

$$I_m = (I_{SC} + I_0) \left[\frac{qU_m}{kT + qU_m} \right] \quad (8)$$

gdzie: U_{OC} – napięcie ogniwa bez obciążenia,

I_{SC} – prąd zwarcia,

U_m – napięcie, przy którym osiągnąta jest maksymalna moc ogniwa, oraz

I_m – prąd przy maksymalnej mocy.

Sprawność ogniwa można zdefiniować jako stosunek maksymalnej mocy oddanej przez ogniwo do mocy padającego promieniowania słonecznego w temperaturze 25°C:

$$\eta = \frac{U_{OC} I_{SC} m}{P_0} \quad (9)$$

gdzie: η – sprawność ogniwa,

P_0 – moc promieniowania słonecznego, oraz

m – współczynnik wypełnienia obliczany wg wzoru (10):

$$m = \frac{U_m I_m}{U_{OC} I_{SC}} \quad (10)$$

4. Technologie produkcji ogniw fotowoltaicznych

Istnieje wiele typów ogniw słonecznych, w których stosuje się różne materiały i/lub struktury tych materiałów (monokrystaliczne, polikrystaliczne, amorficzne).

Po raz pierwszy efekt fotowoltaiczny w obwodzie dwóch oświetlonych elektrod zanurzonych w elektrolicie zaobserwował w 1839 r. A. Becquerel. 37 lat później to same zjawisko zostało zaobserwowane na granicy dwóch ciał stałych przez W. Adamsa i R. Daya. Ich pierwsze selenowe ogniwa miały sprawność 0,5%. Podstawy teoretyczne zjawiska fotoelektrycznego zostały opracowane na podstawie mechaniki kwantowej w latach 1920-30. Największy jednak wpływ na rozwój ogniw słonecznych miała metoda produkcji kryształów krzemowych o wysokiej czystości, opracowana przez polskiego chemika profesora Jana Czochralskiego w 1916 r. [8].

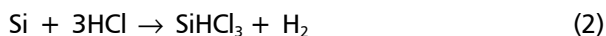
4.1. Krzem monokrystaliczny

Najpopularniejsze i powszechnie stosowane są ogniwa słoneczne wykonane z krzemu krystalicznego. Krzemowe moduły fotowoltaiczne, dostępne komercyjnie i pracujące w warunkach naturalnych, osiągają sprawność konwersji energii słonecznej na elektryczną rzędu 20% [9].

Czysty krzem otrzymuje się z ditlenku krzemu (SiO_2), jest on najbardziej rozpowszechnionym związkiem chemicznym na Ziemi. Jest głównym składnikiem piasku i krzemianów. Do produkcji krzemu wykorzystuje się krystaliczną odmianę krzemu – kwarcyt. Materiał wyjściowy redukuje się węglem w dużych piecach łukowych w temperaturze 1500–2000°C. Węgiel dostarczany jest w postaci koksu lub węgla. Ditlenek krzemu łączy się z węglem, tworząc krzem i ditlenek węgla:



Otrzymany w ten sposób krzem nazywany jest krzemem metalurgicznym, a jego czystość waha się w granicach 98–99%. Krzem, żeby znalazł zastosowanie w elektronice, musi zostać jeszcze oczyszczony. Proces oczyszczania krzemu nazywany jest procesem Simensa. Krzem zamienia się w związek lotny, który oczyszcza się w procesie wielofrakcyjnej destylacji. Odbywa się to poprzez rozpuszczenie krzemu metalurgicznego w kwasie solnym w temperaturze 300°C. W obecności miedzi jako katalizatora powstaje SiHCl_3 . W tej reakcji usuwane są żelazo, aluminium oraz bor, które w tych warunkach tworzą: FeCl_3 , AlCl_3 i BCl_3 [5,9].



Gazowe produkty reakcji kondensują, a powstałą ciecz poddaje się destylacji. Produktem jest oczyszczony SiHCl_3 , który następnie mieszany jest z gazowym wodorem w piecu reakcyjnym w temperaturze 1100°C przez 200-300 godzin. Oczyszczony krzem krystaliczny odkłada się na powierzchni elektrycznie ogrzewanego pieca tantalowego.



Krzem monokrystaliczny otrzymuje się metodą Czochralskiego. W procesie tym krzem polikrystaliczny topiony jest w kwarcowym tyglu wraz z domieszkami innych pierwiastków. Dodatkowe pierwiastki wprowadza się w celu uzyskania krzemu typu n lub p. Proces przebiega w temperaturze 1410°C i w atmosferze argonu. Do stopionego krzemu opuszcza się zarodek monokryształu. Następnie jest ona powoli wyciągana i obracana powoli wokół własnej osi. Temperatura i prędkość wyciągania monokryształu muszą być ściśle kontrolowane, ponieważ w przypadku gdy prędkość wyciągania jest większa niż prędkość krystalizacji, średnica monokryształu maleje. W przypadku gdy prędkość wyciągania jest wolniejsza niż prędkość krystalizacji, średnica rośnie. Dlatego prędkości trzeba dobrać tak, aby były sobie równe. Typowe monokryształy otrzymane tą metodą mają 300 mm średnicy i do 2 m długości [5,9].

W powyższych procesach kolejnym etapem produkcji ogniw jest cięcie bloków krzemu. Niestety jest on niekorzystny, ponieważ ponad połowa materiału jest tracona. Dlatego opracowano metodę wyciągania cienkich (nawet $100\ \mu\text{m}$) taśm krzemowych, których nie trzeba już ciąć. Można wyróżnić dwa rodzaje tego procesu różniące się sposobem wyciągania: na siatce i na podłożu. Metoda wyciągania taśm krzemowych polega na wzroście monokryształu na krawędzi sieci lub ramy. Proces jest inicjowany za pomocą dwóch zarodki, między którymi zaczyna wzrastać monokryształ. Początek procesu jest niezwykle istotny, ponieważ od niego zależy jakość całej taśmy. W tym procesie oszczędza się dużo materiału, gdyż nie ma strat przy cięciu na płytki. Niestety metoda ta nie daje na razie możliwości wyprodukowania krzemu o takiej jakości jak metoda Czochralskiego czy metoda topienia strefowego [8].

4.2. Krzem polikrystaliczny

Kiedy na początku lat siedemdziesiątych XX wieku rozpoczął się kryzys energetyczny i zaczęto poważnie myśleć o zastosowaniu ogniw słonecznych – uprzednio wykorzystywanych prawie wyłącznie w przestrzeni kosmicznej

– do konwersji energii słonecznej na Ziemi, zwrócono uwagę na możliwość użycia krzemu polikrystalicznego do produkcji ogniw, ponieważ krzem monokrystaliczny jest bardzo drogi.



Rys. 4. Krzem polikrystaliczny [4]

Właściwości krzemu polikrystalicznego różnią się od krzemu monokrystalicznego. Spowodowane jest to niedopasowaniem sieci krystalicznej na granicach ziaren. Ogniwa wykonane z krzemu multikrystalicznego uzyskują mniejszą sprawność niż z monokrystalicznego, rekompensowane jest to jednak znacznie niższą ceną takich ogniw. Wytworzenie bloku multikrystalicznego krzemu jest stosunkowo proste. Proces ten polega na kontrolowanym roztopieniu i ponownym krzepnięciu krzemu w kwarcowym tyglu pokrytym warstwą antyprzywierającą. Tygiel zostaje napełniony kwarcem wysokiej czystości i podgrzewany jest do momentu roztopienia kwarcu. Następnie tygiel jest powoli chłodzony, a krzem zastyga jako jeden blok. Wyróżniamy dwa sposoby pozyskiwania bloków multikrystalicznych. Podstawową różnicą jest użycie do krystalizacji jednego tygla w metodzie Bridgmana, a w metodzie „odlewania bloku” dwóch tygli [10,11].

Ogniwa składają się z warstw typu p i n. Krzemowi nadaje się już charakter półprzewodnika p podczas krystalizacji, stosując odpowiednie domieszki, natomiast warstwę n tworzy się metodą dyfuzji. Dyfuzja przeprowadzana jest w piecu w temperaturze 900°C z POCl_3 . W wysokiej temperaturze przy powierzchni płytki zwiększa się koncentracja donorów, atomy fosforu zaczynają dyfundować do powierzchni płytki i warstwa ta staje się w rezultacie półprzewodnikiem typu n. Dla zachowania prawidłowej izolacji złącza p-n krawędź płytki poddaje się wytrawianiu plazmowemu. Płytki układają się w stosy, dzięki czemu tylko krawędzie mają kontakt z plazmą. Gazy reakcyjne ($\text{CF}_4 + \text{O}_2$) aktywowane przez plazmę działają agresywnie na krawędź płytki, tworząc czyste połączenie między warstwami p i n. W celu

polepszenia sprawności ogniwa na płytce nanoszona jest warstwa antyrefleksyjna. Materiał użyty do wytworzenia warstwy musi być przezroczysty i charakteryzować się odpowiednim współczynnikiem załamania światła. Wymagania takie spełniają TiO_2 , SiO , SiO_2 , SiN_4 , AlO_3 . Najczęściej stosuje się ditlenek tytanu (TiO_2). Warstwę osadza się z fazy lotnej z $(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{Ti}$. Drugim często wykorzystywanym związkiem jest $\alpha\text{-SiN}_x\text{H}$. Osiada on na warstwie płytek z $\text{NH}_3 + \text{SiH}_4$ w próżni w temperaturze 400°C [10,11].

Ostatnim etapem produkcji ogniwa jest nanoszenie elektrod: górnej i dolnej. Elektrody powinny być wykonane z materiału o małym oporze elektrycznym i dobrych właściwościach mechanicznych. Jako elektrody dolnej najczęściej używa się aluminium. Nanosi się je na płytkę przez naporowanie w próżni. Podczas wygrzewania w temperaturze $1000\text{--}1300^\circ\text{C}$ aluminium dyfunduje do krzemu tworząc ciekłą warstwę. Elektroda górna najczęściej wykonana jest ze srebra. Nanosi się je metodą sitodruku. Następnie wygrzewa się płytkę w 900°C , srebrna pasta w takiej temperaturze zagłębia się w krzem. Następnie nanosi się ponownie warstwę n. Kolejnym etapem jest naporowanie całej płytki aluminium (etap ten potrzebny jest do wytworzenia dolnej elektrody), a potem poddanie galwanizacji (w rowkach tworzą się górne elektrody) [10,11].

4.3. Cienkowarstwowe, amorficzne ogniwa krzemowe

Poszukiwania nowych, tańszych materiałów do produkcji ogniwa słonecznych sprawiły, że zaczęto wykorzystywać krzem amorficzny (bezipostaciowy). Ogniwa z amorficznego krzemu znalazły zastosowanie do zasilania kalkulatorów, zegarków, radioodbiorników, telewizorów i innych urządzeń, a także do zaopatrywania domów w energię elektryczną.

Do produkcji ogniwa słonecznych używa się uwodornionego amorficznego krzemu zawierającego 8-12% atomów wodoru. Cienkie warstwy Si:H otrzymuje się następującymi technikami:

- rozkładu silanu (SiH_4) w wyładowaniu jaskrowym [12],
- rozkładu dwusilanu (Si_2H_6) w wyładowaniu jarzeniowym (w tym przypadku prędkość nakładania warstwy jest 20 razy większa),
- rozpylenia krzemu w gazie obojętnym zawierającym wodór [13],
- naporowania krzemu i dyfuzji wodoru [14].

4.4. Polikrystaliczne, cienkowarstwowe ogniwa heterozłączowe

W ostatnich latach prowadzi się intensywne badania nad polikrystalicznymi ogniwami cienkowarstwowymi powstającymi wskutek nakładania warstw

półprzewodników na odpowiednich podłożach. Grubość warstwy H pierwiastków i związków półprzewodnikowych powinna być tak dobrana, aby pochłonięta w niej została jak największa część promieniowania słonecznego. Warunek ten jest w przybliżeniu spełniony, gdy:

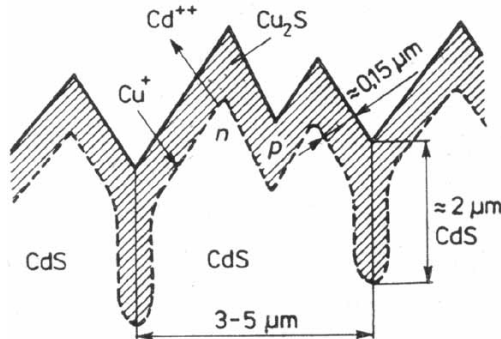
$$H \geq \frac{1}{\alpha} \quad (11)$$

gdzie: α – współczynnik absorpcji światła

Narastające na podłożu cienie warstwy mają najczęściej włóknistą kolumnową strukturę, przy czym osie włókien są prostopadłe do podłoża. Dla polikrystalicznych ogniw cienkowarstwowych, których wydajność jest ograniczona głównie przez granice ziarn, oprócz grubości warstwy istotna jest jeszcze średnica ziaren w kierunku prostopadłym do osi włókna. Jej najmniejsza dopuszczalna wartość jest różna dla poszczególnych materiałów. Dla krzemu powinna ona wynosić kilka milimetrów, aby wydajność ogniwa osiągnęła kilkanaście procent, podczas gdy dla ogniw z arsenku galu wystarczy kilkadziesiąt mikrometrów, a dla struktur CdS/Cu₂S czy CdS/CuInSe₂ tylko kilka mikrometrów [15].

Jednym z pierwszych nakładanych półprzewodników był siarczek kadmu (CdS). Można go otrzymać techniką naporowania w próżni, techniką rozpylania materiału stałego. Z kolei siarczek miedzi (Cu_xS) można nałożyć na podłoże (szklane) jedną z następujących metod:

- „mokrą”: płytkę CdS zanurza się w roztworze soli miedzi o temperaturze 360 K. Na teksturowanej powierzchni siarczku kadmu tworzy się w ciągu 5-10 s warstwa Cu_xS o grubości 100-300 nm, penetrując w głąb ziaren CdS na głębokość 1-2 μm,
- „suchą”: w próżni naporowuje się CuCl na CdS. Podczas łagodnego ogrzewania takiej próbki następuje wymiana jonów w fazie stałej i w końcu produkt uboczny CdCl₂ zmywa się alkoholem z powierzchni warstwy [5].



Rys. 5. Schematyczny przekrój Cu_xS nałożonej na polikrystaliczne podłoże z siarczku kadmu [5]

Mankamentem modułów CdTe jest zawartość pierwiastka silnie toksycznego – kadmu. Tellurek kadmu (CdTe), o przerwie energetycznej 1,5 eV, jest uważany za jeden z najbardziej odpowiednich materiałów na heterozłączone ogniwa CdS/CdTe. Ogniwa takie można otrzymać następującymi metodami:

- CVD (*Chemical Vapor Deposition*),
- CVST (*Close-spaced Vapor Transport*),
- CSS (*Close-spaced Sublimation*),
- elektrochemiczną,
- sitodruku (*screen printing*) [5].

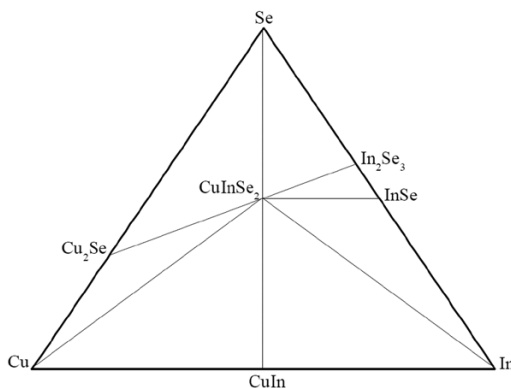
W metodzie CVST nakładany materiał jest przenoszony z płytki źródłowej na podłoże za pomocą helu lub wodoru pod ciśnieniem atmosferycznym. Metoda elektrochemiczna jest procesem izotermicznym kontrolowanym głównie za pomocą parametrów elektrycznych. Stosując odpowiednie układy elektryczne można precyzyjnie kontrolować grubość warstwy i jej morfologię.

Diselenek miedziowo-indowy CuInSe_2 (CIS) można otrzymać następującymi metodami:

- naporowania Cu, In i Se, oraz
- elektrochemiczną.

Optyczne i elektryczne właściwości CuInSe_2 zależą silnie od stosunku Cu/In oraz od struktury krystalicznej materiału. W warstwach wysokiej jakości, o składzie bliskim stechiometrycznemu, przerwa energetyczna jest prosta i wynosi 1,02 eV. Wówczas również ruchliwość dziur jest największa i osiąga $20 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Ogniwa, w których absorberem jest CuInSe_2 są obiecującym materiałem do zastosowań na dużą skalę. Ogniwa te są produkowane w prostszy i tańszy sposób niż ogniwa krzemowe, zaś wydajność jest podobna (sięga 18%). Co więcej, nie zaobserwowano degradacji krótkoczasowej ani długoczasowej ogniw [5,16].

Na rysunku 6 przedstawiono diagram fazowy układu Cu-In-Se. Literatura poświęcona układowi Cu-In-Se i jego zastosowaniom w fotowoltaice, koncentruje się głównie na linii składów $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3$ [16].



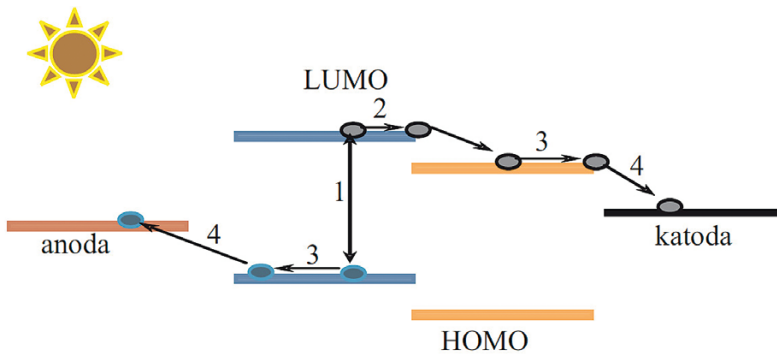
Rys. 6. Trójkąt składów dla układów Cu-In-Se [16]

Innym typem polikrystalicznych, cienkowarstwowych modułów fotowoltaicznych są moduły zawierające warstwę diselenku galowo-indowomiedziowego $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ (znane też jako CIGS), które osiągają sprawność rzędu 12-13%.

4.5. Ogniwa polimerowe

W ostatnim czasie prowadzi się badania nad wykorzystaniem polimerowych (organicznych) ogniw w fotowoltaice. Zbudowane z nich przyrządy, ze względu na swoje nietypowe właściwości, takie jak elastyczność, mała masa oraz częściowa przezroczystość, mogłyby w znacznym stopniu poszerzyć pole aplikacji fotowoltaiki [17].

Zasadę działania ogniwa polimerowego przedstawiono na rysunku 7. Obejmuje on cztery podstawowe fazy: 1 – generowanie w materiale organicznym pary elektron-dziura (ekscytonu) w wyniku absorpcji fotonu, 2 – dysocjacja ekscytonu zachodząca na styku dwóch materiałów (donorowego/akceptorowego), 3 – dyfuzja ładunków (elektronów, dziur) w materiale organicznym, 4 – gromadzenie się ładunków na elektrodach, odpowiednio, elektronów na katodzie i dziur na anodzie [17].

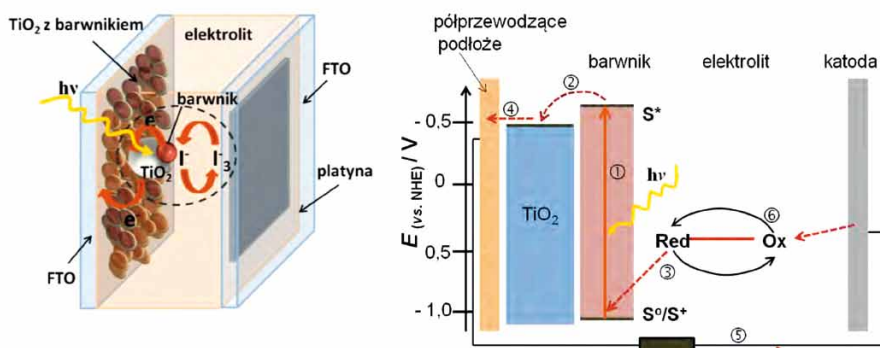


Rys. 7. Schemat działania ogniwa polimerowego (opis w tekście) [17]

Dotychczasowe wyniki badań dotyczących konstrukcji ogniw słonecznych z materiałów organicznych wskazują, że pojedyncze warstwy organiczne są niewystarczające. Przyczyną tego są małe wartości wydajności kwantowej, niewielka absorpcja w zakresie promieniowania widzialnego, ograniczona ruchliwość ładunków oraz niestabilność ogniw. W celu rozwiązania powyższych problemów prowadzi się prace nad syntezą nowych materiałów organicznych (mało- i wielkocząsteczkowych) oraz domieszkowaniem otrzymanych polimerów za pomocą fulerenów i nanorurek [18,19].

4.6. Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne

Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne, zwane też od nazwiska wynalazcy ogniwami Grätzela [20], to urządzenia, w których budowie istotną rolę odgrywa gruba, porowata (od kilku do kilkunastu μm) warstwa ditlenku tytanu bądź tlenku cynku z zaabsorbowanym na powierzchni barwnikiem tworzącym anodę (rysunek 8). Kontakt między anodą a katodą zapewnia elektrolit zawierający parę redokсовą I^-/I_3^- [21].



Rys. 8. Struktura oraz schemat energetyczny barwnikowego ogniwa fotowoltaicznego z zaznaczoną trasą elektronów [21]

W barwnikowym ogniwie fotowoltaicznym, cząsteczki barwnika absorbują foton, co prowadzi do przeniesienia elektronu ze stanu podstawowego S^0 do stanu wzbudzonego barwnika S^* (1). Następuje iniekcja elektronu do pasma przewodnictwa półprzewodnika (2). Jon I^- odpowiada za przejście molekuł barwnika ze stanu S^* do S^0 (3). Następuje transport elektronu w porowatej warstwie półprzewodnika do elektrody (4), obwodem zewnętrznym elektron dociera do katody (5). Ostatecznie, elektron jest przeniesiony z katody na I_3^- , które ulegają redukcji do I^- (6) [22].

5. Fotowoltaika wczoraj i dziś

Rozwój przemysłu fotowoltaicznego można podzielić na trzy etapy [14]. W latach 1980-2000 na świecie testowano nowe materiały i wdrażano technologie produkcji ogniw i modułów fotowoltaicznych w celu zoptymalizowania sprawności konwersji energii słonecznej na elektryczną. Etap obec-

ny, przypadający na lata 2000-2020, nazywany jest często przejściowym. Coraz więcej krajów w obawie przed problemami ekologicznymi, spowodowanymi wykorzystaniem paliw konwencjonalnych, powraca do paliw odnawialnych. Niemal z każdym dniem ceny systemów fotowoltaicznych spadają, stając się łatwodostępnymi również dla odbiorców indywidualnych. Etap 3 rozpocznie się po 2020 r., kiedy to fotowoltaika stanowić będzie jedno z głównych źródeł energii wykorzystywanej przez człowieka [23].

Fotoogniwa już od wielu lat z powodzeniem zastępują tradycyjne sieci zasilające. Takim przykładem mogą być panele słoneczne instalowane przy drogach. Koszt kilowatogodziny z panelu słonecznego jest dość wysoki, jego atutami jest autonomiczność systemu i brak konieczności układania całymi kilometrami kosztownych linii zasilających. Baterie fotowoltaiczne to znakomite źródło energii elektrycznej w krajach o dużym nasłonecznieniu. Na rysunku 9 przedstawiono zdjęcie kafejki internetowej w Afryce, której komputery zasilane są właśnie fotoogniwami.

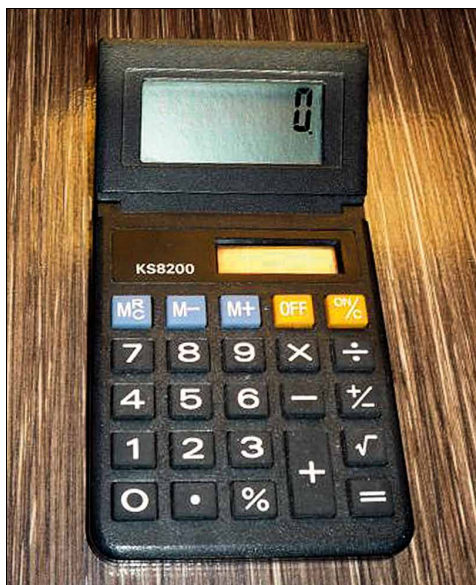


Rys. 9. Kafejka internetowa zasilana modulem fotowoltaicznym
(fot. B. Iglinski, zdjęcie wykonane podczas 14 Konferencji Klimatycznej w Poznaniu)

Kolejnym przykładem szerokiego stosowania techniki solarnej do wytwarzania energii elektrycznej są fotoogniwa stosowane w kalkulatorach i zegarkach. Do tego celu używane są tanie małe ogniwa wykonane technologią cienkowarstwowego napyłania warstwy aktywnej.

Ogniwa fotowoltaiczne miały również istotny wpływ na rozwój kosmonautyki. Urządzenia pokładowe wszystkich pojazdów kosmicznych (sputników, stacji orbitalnych, satelitów i promów kosmicznych) są zaopatrywane w energię elektryczną z ogniw fotowoltaicznych. Na przykład, radziecka sta-

cja orbitalna „Salut 6” była wyposażona w 3 baterie słoneczne o rozpiętości 17 m, łącznej powierzchni 60 m² i mocy 4 kW. Z kolei amerykański satelita „Skylab” wystrzelony w 1974 r. wyniósł na orbitę moduł o masie 86 kg, składający się z blisko 148 tys. ogniw słonecznych. O tym, jak ważne jest znaczenie ogniw i ich prawidłowa praca w kosmosie mogła przekonać się załoga stacji orbitalnej „Mir”. W wyniku błędów manewrowania nastąpiła awaria ogniw, która spowodowała przerwy w systemach zasilania [24].



Rys. 10. Kalkulator na baterie słoneczne (fot. M. Plaskacz-Dziuba)

Obecnie największym sztucznym satelitą Ziemi jest Międzynarodowa Stacja Kosmiczna. Składa się ona z 15 modułów głównych (docelowo ma być ich 16). Integrated Truss Structure P6 to jeden z fragmentów potężnej konstrukcji żebrowej, której zasadniczym elementem są panele baterii słonecznych oraz radiatory. Identykcznymi jednostkami, instalowanymi w różnych etapach budowy, są ITS S3/S4, ITS S6 oraz ITS P3/P4. Segment ITS P6, podobnie jak bliźniacze ITS P3/P4 oraz ITS S3/S4 i ITS S6 waży 7.711 kg, wyposażony jest w potężne blankiety baterii słonecznych, których długość jednego skrzydła panelu wynosi 31,5 m, natomiast długość rdzenia żebrowego samego segmentu to 9 m. Jeden blankiet składa się z 84 paneli, z czego 82 pokryte są fotoreceptorami. Każdy panel składa się z 200 takich komórek, co daje razem liczbę 262.400 komórek w ośmiu potężnych blankietach paneli. Panele baterii słonecznych mogą obracać się i dostosowywać do położenia stacji względem Słońca, dostarczając stacji prądu sta-

tego na poziomie 160 woltów. Dzięki rozbudowanemu systemowi zasilania, nawet przebywająca w danej chwili w cieniu stacja kosmiczna, nie jest narażona na utratę zasilania a nawet na jego wahania. Razem, wspomniane cztery segmenty wytwarzać będą prąd elektryczny o mocy 78 kilowatów. Panele mają dostarczać zasilanie przez okres 15 lat, ale przypuszczalnie posłużą dłużej. Na system paneli składa się także mechanizm rotujący (tzw. SARJ), pozwalający ustawiać panele pod właściwym kątem względem Słońca, z wydajnością 4° na minutę. Na wszystkich zintegrowanych strukturach nośnych zainstalowane zostaną także systemy radiatorów, mających za zadanie chłodzić układy stacji [25].

Dalsze badania ogniw fotowoltaicznych prowadzi się w 2 strategicznych kierunkach: zmniejszenie kosztów produkcji i zwiększenie sprawności ogniw. Obydwa kierunki poszukiwań bazują głównie na inżynierii materiałowej, rozwijaniu nowych technologii produkcji krzemu (kystalicznego, polikystalicznego, amorficznego, cienkowarstwowego), o coraz mniejszej ilości domieszek i o coraz większej powierzchni poprzecznej kryształu oraz na opracowaniu technologii otrzymywania innych materiałów (arsenki, itp.), a także na badaniu nowych domieszek (arsen, gal, cyna, niob i inne).

6. Literatura

1. J. Misiewicz, K. Sierański, M. Kubisa, J. Szatkowski, *Półprzewodniki i struktury półprzewodnikowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
2. I.J. Kampel, *Półprzewodniki: teoria i zastosowanie*, PWN, Warszawa 1974.
3. A. Mandelis, P. Hess (eds.), *Semiconductors and electronic materials*, SPIE Press, Bellingham 2000.
4. zasoby Wikimedia Commons.
5. Z.M. Jarzębski, *Energia słoneczna. Konwersja fotowoltaiczna*, PWN, Warszawa 1990.
6. J.I. Pankove, *Optical processes in semiconductors*, Prentice-Hall, New Jersey 1971.
7. T. Rodacki, A. Kandyba, *Przetwarzanie energii w elektrowniach słonecznych*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
8. P.E. Tomaszewski, *Powrót. Rzecz o Janie Czochońskim*, Oficyna Wydawnicza ATUT, Wrocław 2012.
9. M.G. Voronkov, *Silicon era*, Russian Journal of Applied Chemistry (12)80, 2190-2196, 2007.
10. E. Mokrzycki (red.), *Podstawy gospodarki surowcami energetycznymi*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2005.
11. G. Golubiewski, M. Duraczyński, *Technologie wytwarzania ogniw fotowoltaicznych*, GLOBEnergia 1, 2010.
12. S. Ahmed, D. Sigurd, *Electrical properties of glow discharge a-Si:H thin films prepared with a RF plasma etch unit*, Physica Status Solidi (a) 1(69), 305-314, 1982.

13. T.D. Moustakas, *Studies on thin-film growth of sputtered hydrogenated amorphous silicon*, Solar Energy Materials 1-3(8), 187-204, 1982.
14. T. Markvart, L. Castañer, *Solar cells. Materials, manufacture and operation*, Elsevier, Amsterdam 2005.
15. A.L. Fahrenbruch, R.H. Bube, *Fundamentals of solar cells*, Academic Press, New York 1983.
16. A. Wolska, *Badanie struktury elektronowej kryształów półprzewodnikowych z układu Cu-In-Se metodą absorpcji promieniowania rentgenowskiego*, rozprawa doktorska, Warszawa 2001.
17. M. Palewicz, A. Iwan, *Polimerowe ogniwa słoneczne*, Polimery 2(56), 99-107, 2011.
18. S. Günes, H. Neugebauer, N.S. Sariciftci, *Conjugated polymer-based organic solar cells*, Chemical Review 4(107), 1324-1338, 2007.
19. A. Hadipour, B. de Boer, P.W.M. Blom, *Organic tandem and multi-junction solar cells*, Advances Functional Materials 2(18), 169-181, 2008.
20. B. O'Regan, M. Grätzel, *A low-cost, high efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ film*, Nature 353, 737-740, 1991.
21. K. Siuzdak, *Synteza i właściwości domieszkowanego niemetalami ditlenku tytanu jako materiału elektrodowego aktywnego w świetle widzialnym*, rozprawa doktorska, Gdańsk 2012.
22. A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun, L. Kloo, H. Pettersson, *Dye-sensitized solar cells*, Chemical Review 110, 6595-6663, 2010.
23. B.A. Werner, *Model fizyczny cienkowarstwowych modułów fotowoltaicznych II-(III)-VI pracujących w warunkach naturalnych*, rozprawa doktorska, Wrocław 2010.
24. M. Miszczak, C. Waszkiewicz, *Energia słońca, wiatru i inne*, Biblioteka Młodego Technika, Wyd. Nasza Księgarnia, Warszawa 1988.
25. http://pl.wikipedia.org/wiki/Mi%C4%99dzynarodowa_Stacja_Kosmiczna

TECHNOLOGIE HELIOENERGETYCZNE NA ŚWIECIE

„Stawiam swoje pieniądze na energię słoneczną. Mam nadzieję, że nie będziemy z tym czekali, aż skończy się ropa i węgiel.”
T.A. Edison, 1931 [1].

1. Historia wykorzystania energii Słońca na świecie

Pokutuje opinia, że wykorzystanie energii Słońca jest domeną ostatnich czasów, kiedy to ludzie zaczęli poszukiwać alternatywnych źródeł energii. Jest to oczywiście nieprawda. Już pierwsi *homo sapiens* woleli te jaskinie, których wejście skierowane było na południowy wschód, co pozwalało na ogrzewanie ich wnętrza przez poranne Słońce, bez przegrzewania w trakcie miesięcy letnich. Pierwsi budowniczy, w sposób pasywny wykorzystywali ciepło, jakie daje Słońce. Budowali swoje domy w miejscach nasłonecznionych, ponieważ wiedzieli, że nagrzane za dnia budynki, oddadzą ciepło w nocy. Przewietrzanie domostw ciepłym powietrzem, zapobiegało rozwojowi pleśni i grzybów na ścianach budynków.

Indianie zamieszkujący obszary obecnego Meksyku tak ustawiali swoje pueblo, by zimą były ogrzewane przez promienie słoneczne, a latem były od nich osłonięte. Cień rzucany przez skalne ściany i nawisy skutecznie zasłaniały latem wysoko stojące na niebie Słońce, dzięki czemu w domach było po prostu chłodniej [2].

Również starożytni Grecy korzystali z energii Słońca. Współczesne wykopaliska prowadzone na terenie wielu antycznych greckich miast wskazują, że w kierunku południowym orientowano nie tylko pojedyncze domy, ale całe miasta. Warto zaznaczyć, że około 500 r. p.n.e., gdy prawie cały

obszar Grecji został wylesiony, to właśnie energia słoneczna zastąpiła Grekom ciepło ze spalania drewna.

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. Budowano przestronne obiekty użyteczności publicznej, zasilane ciepłem słonecznym, takie jak łaźnie (termy) czy szklarnie [2,3].



Rys. 1. Termy Djoklecjana (widok współczesny)
(fot. A. Majanlahti, zasoby Wikimedia Commons)

Skuteczne wykorzystanie przeszkleń do zwiększenia słonecznych zysków cieplnych zostało w późniejszym czasie prawie zupełnie zapomniane. Powrót do ogrzewania pasywnego nastąpił w okresie oświecenia. Wraz z postępem nauki i technologii, produkcja szkła znacznie się zwiększyła, co przyczyniło się do częstszego stosowania szklanych okien. Umożliwiło to budowanie dużych szklarni, wykorzystywanych do hodowli roślin, ale również w celach wypoczynkowych czy rekreacyjnych [2,3].

W drugiej połowie XVIII wieku 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 te kolektory były wówczas bardzo często wykorzystywane [3].

W 1881 r. opatentowano ścianę Trombe'a, zaś 10 lat później opatentowano pierwsze komercyjne urządzenie do podgrzewania wody energią

Słońca, zbudowane przez Clarenca Kempa. Kemp połączył w swoim wynalazku pomysł podgrzewania zbiornika z wodą przez Słońce, z możliwościami, jakie dawał kolektor Saussure'a. Swojemu podgrzewaczowi nadał nazwę handlową „The Climax” i sprzedawał za 25 USD. W odróżnieniu od innych ówczesnie stosowanych podgrzewaczy, w „The Climax” cztery pomalowane na czarno cylindry z wodą zostały umieszczone we wnętrzu skrzyni z drewna sosnowego, zaizolowanego z jednej strony szybą. Pojemność kolektora wynosiła trochę ponad 120 litrów, co według konstruktora miało wystarczyć na 3-8 kąpiel. W „The Climax” woda osiągała odpowiednią temperaturę po południu, a przez noc szybko się wyziębiała; dodatkowo w chłodniejszym klimacie zimą po prostu zamarzała. Rozwiązanie obydwu problemów pojawiło się w 1909 r., gdy swoje kolektory o nazwie „Day and Night” zaczął sprzedawać William Bailey. W układzie tym, sam kolektor składał się z węzownicy umieszczonej w zamkniętej obudowie. Oprócz tego w domu instalowano ocieplony zbiornik do magazynowania ciepłej wody. Kolektor ustawiany był na ziemi i skierowywany na południe. Był to prawdopodobnie pierwszy komercyjny układ termosyfonowy, zdolny do pracy samoczynnej [2-4].

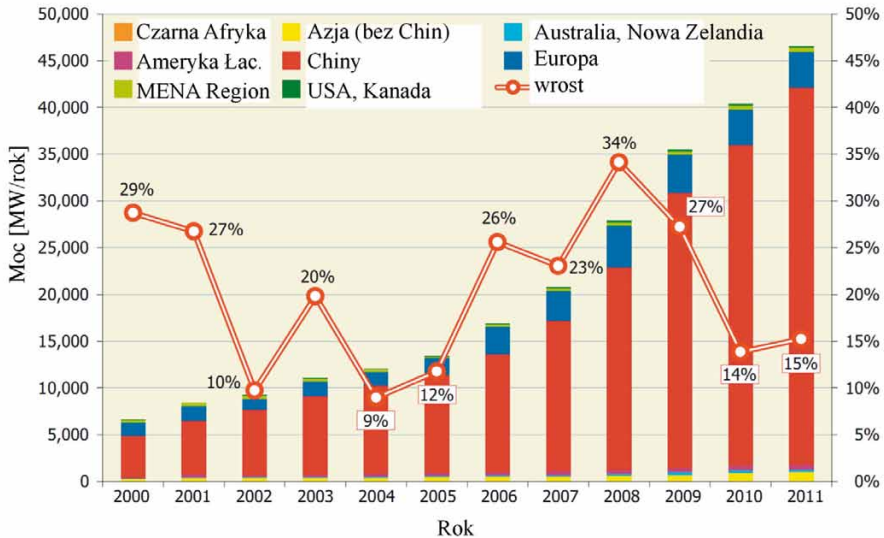
W dobrze usłonecznionych stanach USA, solarne urządzenia do podgrzewania wody rozpowszechniły się na początku XX wieku. Przykładowo, do końca I Wojny Światowej, sprzedano ponad 4 tysiące kolektorów „Day and Night”. W latach 40-tych w USA było zainstalowanych już 60 tysięcy instalacji solarnych [2-4].

2. Kolektory słoneczne na świecie

Na całym świecie kolektory słoneczne są bardzo popularne jako główne lub uzupełniające źródło ciepła. Pod koniec 2011 r., w 56 krajach świata, sumaryczna moc kolektorów słonecznych osiągnęła moc 235 GW. Zdecydowana większość kolektorów pracuje w Chinach: 152 GW i w Europie: 39 GW. Na rysunku 2 przedstawiono moc kolektorów, które zostały zainstalowane w latach 2000-2011. Rokrocznie obserwuje się wzrost mocy o 9-34% mocy względem roku poprzedniego. Coraz niższa cena, a zarazem wyższa sprawność kolektorów powoduje, że w wielu krajach ogrzewanie słoneczne stopniowo wypiera ciepłownictwo oparte na spalaniu węgla czy gazu. Na świecie najpopularniejsze są kolektory próżniowe (62,3%) oraz kolektory płaskie oszklone (27,9%) [5].

Po kryzysie paliwowym lat 70-tych XX wieku, izraelski parlament przegłosował ustawę, która wymaga instalowania kolektorów słonecznych w nowo budowanych budynkach mieszkalnych. W 2005 r. w Hiszpanii

wprowadzono wymóg instalowania w nowych budynkach mieszkalnych, ogniw fotowoltaicznych i kolektorów słonecznych, do zasilania w energię elektryczną i ciepło. Od wielu lat kolektory są bardzo rozpowszechnione w wielu krajach: Australia, Cypr, Grecja, Izrael, Niemcy czy Japonia. Jak już wspomniano, w ostatnich latach prawdziwy boom solarny przeżywają Chiny. Ponad 40 milionów gospodarstw domowych korzysta z darmowej energii słonecznej [6].

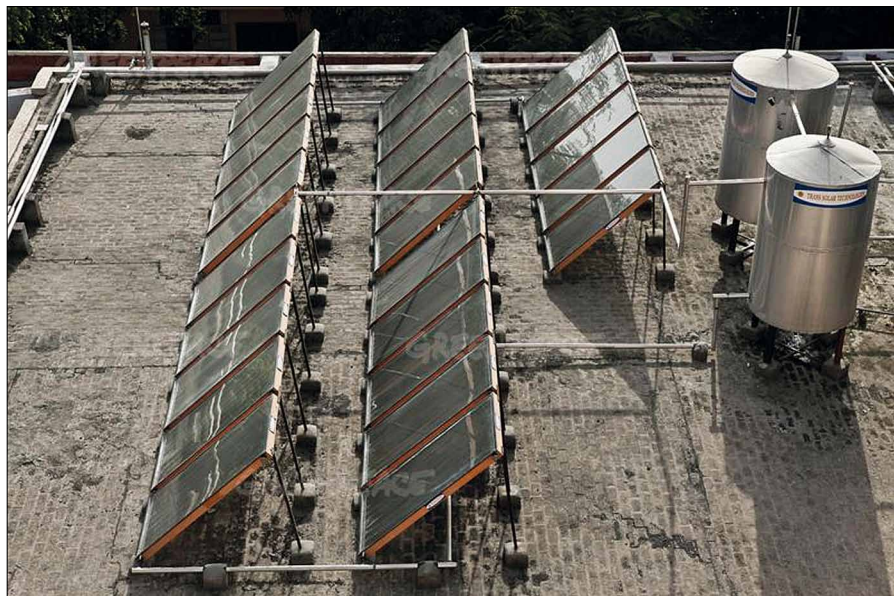


Rys. 2. Moc instalowanych nowych kolektorów słonecznych na świecie i jej wzrost względem roku poprzedniego w latach 2000-11 [5]

Na koniec 2012 r. łączna moc kolektorów słonecznych na świecie wyniosła blisko 270 GW. Szacuje się, że dzięki kolektorom uniknięto emisji 73,7 milionów Mg CO₂. Na podstawie szczegółowych raportów krajowych szacuje się, że na świecie w 2012 r. liczba zatrudnionych przy produkcji, montażu i konserwacji instalacji solarnych wyniosła 420 tysięcy. Szacuje się, że w roku 2013 łączna moc kolektorów słonecznych na świecie przekroczy 300 GW [5].

Energia Słońca wykorzystywana jest w budynkach indywidualnych i budynkach użyteczności publicznej. Przykładem może być Szpital Świętej Rodziny w Nowe Delhi, Indie (rysunek 3). Codziennie kolektory słoneczne dostarczają szpitalowi 22 m³ gorącej wody na jego różne potrzeby.

Jako, że również w Polsce bardzo dobrze rozwija się rynek kolektorów słonecznych, więcej informacji na temat praktycznych ich zastosowań, znajdą Państwo w rozdziale „Technologie helioenergetyczne w Polsce”.



Rys. 3. Kolektory słoneczne na dachu Szpitala Świętej Rodziny w Nowe Delhi, Indie (fot. Sudhansu Malhotra, Greenpeace)²

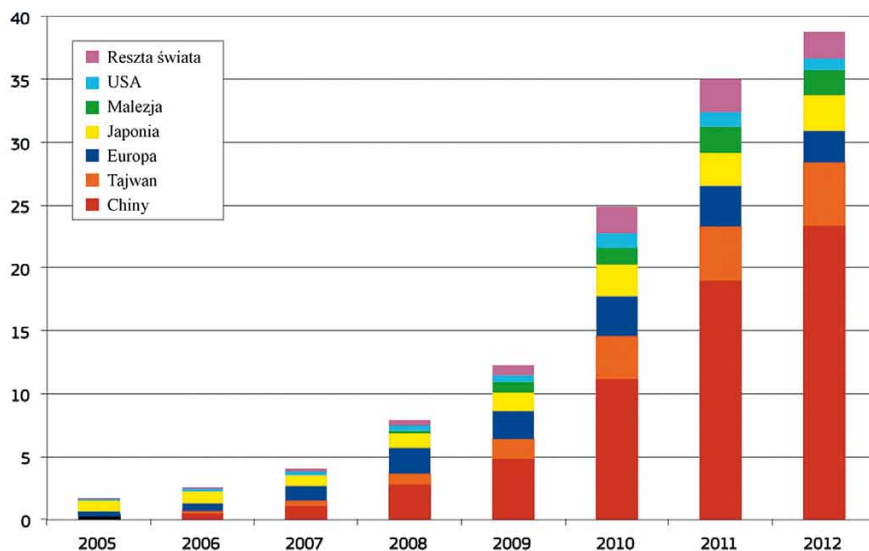
3. Współczesne wykorzystanie fotowoltaiki na świecie

Energetyka słoneczna, przede wszystkim fotowoltaika jest najszybciej rozwijającą się gałęzią przemysłu na świecie, niezależnie od kryzysu światowego. W ciągu 7 lat, moc wyprodukowanych ogniw fotowoltaicznych wzrosła 15-krotnie (rysunek 4). Przewiduje się, że w 2013 r. będzie to znaczący wzrost, podobny jak w 2010 roku [7].

Globalne inwestycje w energię słoneczną w 2012 wyniosły 140 mld dolarów. Największym producentem ogniw są Chiny i Tajwan. W Europie, znaczącym producentem (i odbiorcą) są Niemcy. Na rysunku 6 przedstawiono zdjęcie linii produkcyjnej w Odersun w Niemczech. W fabryce, opa-

² Podziękowania dla Fundacji Greenpeace za użyczone zdjęcia

tentowaną metodą, pokrywa się folią miedzianą disiarczkiem indowo-miedziowym [8].



Rys. 4. Moc [GW] wyprodukowanych ogniw słonecznych na świecie w latach 2005-12 [7]



Rys. 5. Linia produkcyjna ogniw fotowoltaicznych w Odersun, Niemcy
(fot. Paul Langrock, Greenpeace)

Liczba zainstalowanych ogniw fotowoltaicznych podwaja się co 2 lata (rysunek 6). Najwięcej instalacji pracuje w Niemczech³, Włoszech, Chi-

³ Niemcy mają porównywalne warunki słoneczne jak Polska.

nach, Japonii i Hiszpanii. Rok 2008 był krytycznym momentem dla sektora hiszpańskiej helioenergetyki, ponieważ rząd wprowadził nowe regulacje prawne. Miały one ustabilizować wcześniejszy, niezwykle wzrost na rynku systemów fotowoltaicznych, wywołany poprzednimi, bardzo korzystnymi przepisami, ze względu na sprzyjający FIT (Feed In Tariffs) [9]. Od września 2008 roku wprowadzono nowe przepisy dotyczące odnawialnych źródeł energii Real Decreto (Dekret Królewski) 436/2004. Ten system wsparcia opierał się na przekazaniu producentowi energii możliwości wyboru odbiorcy, z którym indywidualnie określano taryfy. Producent miał również możliwość sprzedaży energii na wolny rynek po obowiązujących cenach. Wsparcie było udzielane na nieokreśloną liczbę lat, jedynie nieco obniżane po 25-ciu latach [10]. FITs dla energii elektrycznej generowanej z instalacji fotowoltaicznych w nawiązaniu do Real Decreto 436/2004 zaprezentowane są w tabeli 1 [10].

Tabela 1. FITs dla energii elektrycznej generowanej z instalacji fotowoltaicznych w nawiązaniu do Real Decreto 436/2004 w Hiszpanii (opracowanie własne)

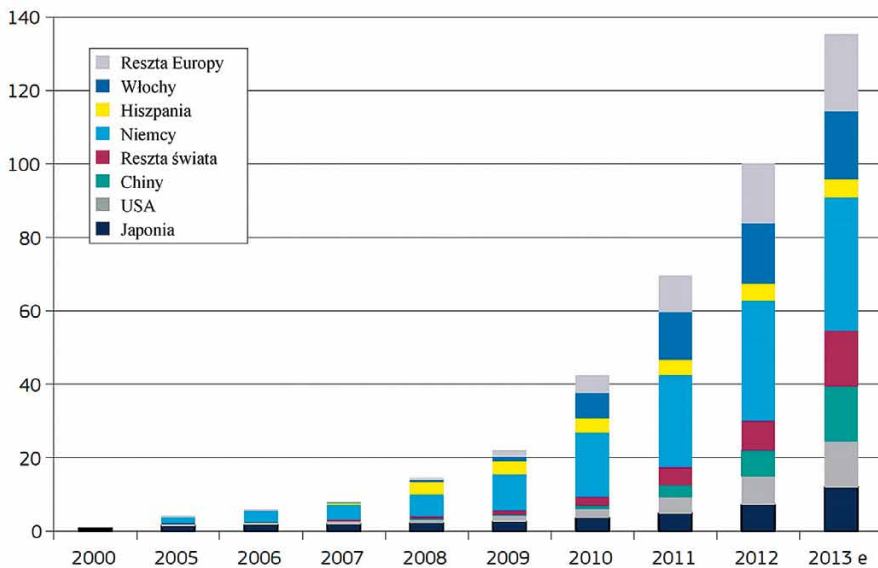
Rodzaj instalacji	FIT (EUR /kWh)
Moc ≤ 100 kWp – pierwsze 25 lat	575% of RAT
Moc > 100 kWp – pierwsze 25 lat	460% of RAT
Moc ≤ 100 kWp – kolejne lata	300% of RAT
Moc ponad 100 kWp – kolejne lata	240% of RAT

RAT – Średnia Taryfa Referencyjna.

W Hiszpanii, ogniwa fotowoltaiczne zostały wdrożone głównie na farmach słonecznych. Oznacza to, iż powstały instalacje na dużą skalę, o mocy większej niż 10 MW. Wprowadzenie nowych regulacji prawnych na mocy Royal Decree 1578/2008, poskutkowało znaczącymi zmianami w polityce państwa dotyczącymi helioenergetyki. Zaczęto dofinansowywać głównie mniejsze instalacje, np. solary na dachach budynków [11,12].

Helioenergetyka znakomicie rozwija się u naszych zachodnich sąsiadów. Na koniec 2012 r. łączna zainstalowana moc sięgnęła 32,7 GW. Jest to na tyle duża moc, że może w znacznym stopniu pokryć potrzeby energetyczne Niemiec. Przykładowo, jak poinformował Reuters, powołując się na Renewable Energy Industry, w godzinach południowych 26 maja b.r. przy bezchmurnym niebie i temperaturze 23°C systemy fotowoltaiczne na terenie Niemiec produkowały w sumie 22 GWh energii – pokrywając około połowy zapotrzebowania na energię elektryczną notowanego w godzinach południowych [7,13]. W Niemczech powstały trzy wolnostojące elektrownie fotowoltaiczne, które będą wysyłać wyprodukowaną energię bezpośrednio do odbiorców końcowych, a nie do sieci. Niemcy coraz przychylniej pod-

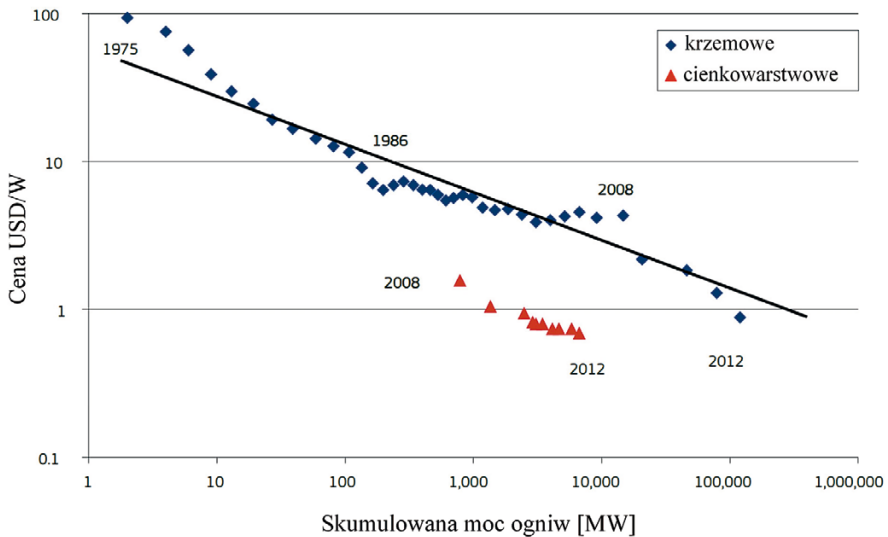
chodzą do produkowania energii na własne potrzeby. Zdaniem niemieckiej firmy IBC Solar, koszt wyprodukowania energii z fotowoltaiki jest niższy niż 0,11 €/kWh, podczas gdy odbiorcy końcowi płacą za energię nawet 0,29 €/kWh. W konsekwencji tego typu instalacje, w szczególności w dużej skali, nie potrzebują już systemu wsparcia [14].



Rys. 6. Skumulowana moc zainstalowana ogniw fotowoltaicznych na świecie w latach 2000-13 [7]

Rozwój rynku ogniw fotowoltaicznych na świecie jest możliwy nie tylko dzięki trosce o środowisko, ale również dzięki ciągłemu spadkowi ich cen (rysunek 7), przy jednoczesnym wzroście wydajności. Od 1975 cena fotookniwa obniżyła się ponad stukrotnie. Jeśli trend zostanie utrzymany, energia elektryczna z modułów fotowoltaicznych będzie znacząco tańsza od energii elektrycznej z paliw kopalnych.

W 2010 r. rynek fotowoltaiki był wart ponad 25 mld Euro. Już obecnie, w wielu krajach fotowoltaika jest dobrze rozwinięta i ma pozytywny wpływ na gospodarkę. W 2012 r. przemysł fotowoltaiczny w Europie zatrudniał ponad 140 tys. osób (najwięcej w Niemczech, około 100 tys.). Szacuje się, że przemysł fotowoltaiczny stworzy do 2020 r. ponad 2 miliony miejsc pracy na całym świecie (około 200 tys. w Unii Europejskiej) dla pracowników o różnych kwalifikacjach, poczynając od monterów systemów aż po wysoko wykwalifikowanych specjalistów w tej dziedzinie [15].



Rys. 7. Łączna, zainstalowana moc [GW] i cena [USAD/W] ogniw fotowoltaicznych [7]

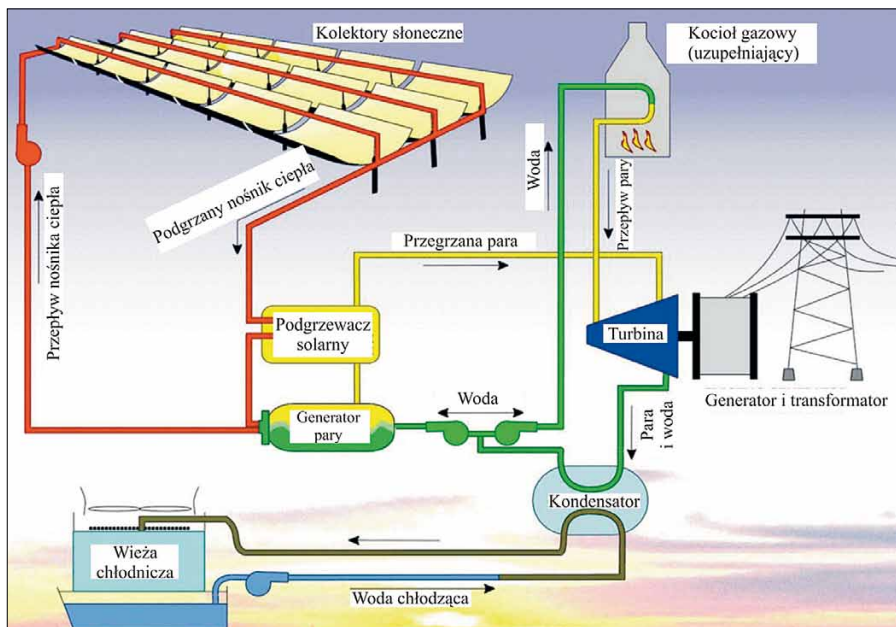
Rozwój technologii fotowoltaicznych pociąga za sobą rozwój innych technologii (np. nanotechnologii). Obecnie ponad 90% rynku fotowoltaiki należy do technologii krzemowych, jednakże w nadchodzących latach coraz większą rolę odgrywać będą ogniwa cienkowarstwowe (CdTe, CIGS), osadzone na giętkich i lekkich podłożach [7].

Korzyści ze stosowania fotowoltaiki są szczególnie widoczne w przypadku zastosowania systemów fotowoltaicznych zintegrowanych z budynkami (BIPV – Building-Integrated Photovoltaics) i podłączonych do sieci energetycznej. Zaplanowanie instalacji systemu fotowoltaicznego zintegrowanego z budynkiem już na etapie projektowania budynku daje wiele korzyści. Dzięki zastosowaniu modułów fotowoltaicznych zamiast np. fragmentu dachu można obniżyć koszty systemu fotowoltaicznego dzięki oszczędności materiałów budowlanych. Wiele krajów europejskich już teraz wprowadziło swoje odrębne przepisy w dziedzinie zero-emisyjnych budynków. Komisja Europejska popiera wzmocnienie istniejących oraz wprowadzenie nowych instrumentów wspierających odnawialne źródła energii takich jak: zredukowanie stawki VAT, dofinansowania przez Fundusze Rozwoju Regionalnego czy powołanie Funduszu Efektywności Energetycznej [7,16].

4. Największe termiczne elektrownie słoneczne na świecie

Jesteśmy naocznymi świadkami niesamowitego boomu, jeśli chodzi o energetykę słoneczną. Oprócz urządzeń małej mocy, szybko rozwijają się elektrownie słoneczne, których moc zaczyna dorównywać blokom energetycznym na paliwa konwencjonalne, a za 5-10 lat będzie znacznie je przewyższać. Przykładem intensywnego rozwoju helioenergetyki na świecie może być elektrownia Xitieshan Solar Park o mocy 100 MW, która w 2011 r. była największą elektrownią słoneczną na świecie. Obecnie (2013 r.), zajmuje ona (dopiero) 21 miejsce pod względem mocy i to *ex aequo* z 11 innymi elektrowniami.

Obecnie (październik 2013), największą termiczną elektrownią słoneczną na świecie jest Solar Energy Generating Systems w USA o mocy 354 MW (rysunek 8). Wyprodukowana energia elektryczna pokrywa potrzeby energetyczne 232500 domów. W skład elektrowni wchodzi 936384 lustra zajmujące łączną powierzchnię 647 ha. Elektrownia przystosowana jest do wytwarzania prądu elektrycznego z gazu ziemnego (gdyby zaszła taka konieczność) [17,18].



Rys. 8. Schemat działania elektrowni Solar Energy Generating Systems w USA [18]

W tabeli 2 przedstawiono listę pracujących termicznych elektrowni słonecznych o mocy co najmniej 100 MW, w których prąd elektryczny pozyskuje się z ciepła słonecznego.

Tabela 2. Lista pracujących termicznych elektrowni słonecznych o mocy co najmniej 100 MW [19]

Moc [MW]	Nazwa	Położenie	Uwagi
354	Solar Energy Generating Systems	Pustynia Mojave, Kalifornia, USA	9-częściowa
280	Solana Generating Station	Gila Bend, Arizona, USA	Ukończono w październiku 2013, elektrownia magazynuje ciepło przez 6 godzin
200	Solaben Solar Power Station	Logrosán, Hiszpania	Budowę Solaben 3 ukończono w czerwcu 2012, Solaben 2 w październiku 2012, Solaben 1 i 6 we wrześniu 2013
150	Solnova Solar Power Station	Sanlúcar la Mayor, Hiszpania	Budowę Solnova 1 i 3 ukończono w maju 2010, Solnova 4 w sierpniu 2010
150	Andasol Solar Power Station	Guadix, Hiszpania	Androsol 1 zbudowano w 2008 r., Androsol 2 w 2009 r., Androsol 3 w 2011 r., elektrownia magazynuje ciepło przez 7,5 godziny
150	Extresol Solar Power Station	Torre de Miguel Sesmero, Hiszpania	Extresol 1 i 2 zbudowano w 2010 r., Extresol 3 w 2012 r., elektrownia magazynuje ciepło przez 7,5 godziny
100	Palma del Rio Solar Power Station	Palma del Río, Hiszpania	Palma del Rio 2 zbudowano w grudniu 2010, Palma del Rio 1 w czerwcu 2011
100	Manchasol Power Station	Alcázar de San Juan, Hiszpania	Elektrownię zbudowano w 2011 r., magazynuje ciepło przez 7,5 godziny
100	Valle Solar Power Station	San José del Valle, Hiszpania	Budowę ukończono w grudniu 2011, elektrownia magazynuje ciepło przez 7,5 godziny
100	Helioenergy Solar Power Station	Écija, Hiszpania	Helioenergy 1 we wrześniu 2011, Helioenergy 2 w styczniu 2012
100	Aste Solar Power Station	Alcázar de San Juan, Hiszpania	Budowę ukończono w styczniu 2012, elektrownia magazynuje ciepło przez 8 godzin
100	Solacor Solar Power Station	El Carpio, Hiszpania	Budowę ukończono na początku 2012 r.
100	Helios Solar Power Station	Puerto Lápice, Hiszpania	Budowę ukończono w 2012 r.
100	Shams	Abu Dhabi Madinat Zayed, Zjednoczone Emiraty Arabskie	Budowę ukończono w marcu 2013 r.
100	Termosol Solar Power Station	Navalvillar de Pela, Hiszpania	Budowę ukończono w 2013 r.

Obecnie (październik 2013), na całym świecie pracuje ponad 40 termicznych elektrowni słonecznych o mocy 1-50 MW. Elektrownie te znajdują się w USA, Hiszpanii, Indiach, Algierii, Egipcie, Maroku, Chinach, Włoszech, Tajlandii, Niemczech, Iranie i Francji [19].

Przykładowo, w San Luis Valley (Alamosa, USA) od 2012 r. pracuje elektrownia słoneczna o mocy 30 MW (rysunek 9). Elektrownia składa się z 492 podwójnych płyt Amonix 7700, z których każda posiada 7560 soczewek Fresnela. Układ pozwala na 500-krotne skupienie światła, dzięki czemu elektrownia w San Luis Valley jest wydajniejsza od innych elektrowni słonecznych [20].



Rys. 9. Alamosa Solar Generating Plant, USA (Fot. Robert Meyers, Greenpeace)

Maroko jest na etapie wdrażania technologii solarnej na dużą skalę. Zbudowano 5 elektrowni słonecznych: Al-Ujun, Boujdour, Tarfaya, Ain Beni (rysunek 10) i Ouarzazate. Planowane jest osiągnięcie mocy na poziomie 2 GW, co pozwoli Maroku znacząco obniżyć koszty (importowanej) energii elektrycznej [21].



Rys. 10. Solar Thermal Parabolic Trough Power Plant Ain Beni Mathar, Maroko (fot. Paul Langrock, Greenpeace)

W Sanlucar la Mayor, niedaleko Sewilli w Hiszpanii, od 2009 r. pracuje elektrownia Planta Solar 20 (PS20). Elektrownia składa się z 1255 heliostatów (rysunek 11). Każdy heliostat o powierzchni 120 m² odbija promieniowanie słoneczne, które trafia do wieży o wysokości 165 m, gdzie wytwarzana jest energia elektryczna [22].



Rys. 11. Planta Solar 20, Hiszpania (fot. Markel Redondo, Greenpeace)

Tabela. 3. Budowane termiczne elektrownie słoneczne o mocy co najmniej 100 MW [23]

Moc [MW]	Nazwa	Rok zakończenia budowy	Położenie	Uwagi
392	Ivanpah Solar Power Facility	2013	Hrabstwo San Bernardino, Kalifornia, USA	Elektrownia wieżowa, ukończono budowę pierwszej wieży
280	Mojave Solar Project	2014	Barstow, Kalifornia, USA	—
250	Genesis Solar	2014	Blythe, Kalifornia, USA	—
160	Ouarzazate Solar Power Station	2015	Warzazat, Maroko	Elektrownia będzie magazynować ciepło przez 3 godziny
121	Ashalim Power Station 1	2017	Pustynia Negev, Izrael	Elektrownia o łącznej mocy 250 MW będzie pozyskiwać energię z energii Słońca i gazu
110	Crescent Dunes Solar Energy Project	2013/14	Hrabstwo Nye, Nevada, USA	Elektrownia będzie magazynować ciepło przez 10 godzin
100	El Reboso 2+3	2015	El Puebla del Rio, Hiszpania	—
100	KaXu Solar One	2014	Pofadder, RPA	Elektrownia będzie magazynować ciepło przez 2,5 godziny
100	Dhursar	2014	Dhursar, Indie	—
100	KVK Energy Solar Project	2013	Askandra, Indie	Elektrownia będzie magazynować ciepło przez 4 godziny
100	Diwakar	2014	Askandra, Indie	Elektrownia będzie magazynować ciepło przez 3 godziny

Warto zauważyć, że obecnie wiele elektrowni słonecznych jest w budowie (tabela 3), a kilkaset jest planowanych, w tym największa elektrownia na Pustyni Mongolskiej o mocy 2 GW.

5. Największe fotowoltaiczne elektrownie słoneczne na świecie

Obecnie (październik 2013), największą fotowoltaiczną elektrownią słoneczną jest Agua Caliente Solar Project znajdująca się w hrabstwie Yuma w Arizonie, USA. Elektrownia rozpoczęła pracę w grudniu 2011 r., docelową moc 397 MW ma osiągnąć w 2014 r. [24]. Elektrownia, pracująca na ogniwach CdS/CdTe, zasila w prąd elektryczny ponad 100 tysięcy domów.

Obecnie na świecie pracują 42 elektrownie fotowoltaiczne o mocy 50-100 MW w USA, Chinach, Tajlandii, Niemczech, Ukrainie, RPA, Indiach, Francji, Bułgarii, Hiszpanii.

Przykładowo, w miejscowości Mosca (Kolorado, USA) zbudowano elektrownię słoneczną Xcel Energy Greater Sandhill Solar Projekt. Elektrownię posadowiono na dwustu akrach. 50 tysięcy modułów fotowoltaicznych generuje 19 MW. Elektrownię budowano przez 9 miesięcy, przy jej budowie zatrudniono 100 pracowników. Elektrownia zapewnia energię elektryczną dla 5000 gospodarstw [35].



Rys. 12. Greater Sandhill Solar Project in Colorado (Fot. Robert Meyers, Greenpeace)

Można użyć stwierdzenia, że duże elektrownie słoneczne powstają jak „grzyby po deszczu”. Jeszcze w 2010 r. pracowało zaledwie kilkanaście elektrowni słonecznych. Jest to najdynamiczniej rozwijająca się gałąź energetyki. W tabeli 5 przedstawiono elektrownie fotowoltaiczne o mocy powyżej co najmniej 400 MW, których budowa zaczęła się w tym roku, bądź

budowa jest na zaawansowanym etapie inwestycyjnym. Największa elektrownia fotowoltaiczna i jedna z największych na świecie, ma powstać w Grecji. Greckie Ministerstwo Środowiska, Energii i Zmian Klimatu ogłosiło, że wybrano 354 miejsc spełniających wymagania tak dużej inwestycji. Łączny obszar zajmowany przez elektrownię i infrastrukturę elektroenergetyczną to 200 km². Mimo kryzysu i kosztów na poziomie 20 miliardów Euro, rząd grecki uważa, że będzie to bardzo dochodowa inwestycja. Część prądu zostanie spożytkowana na terenie Grecji, większość ma zostać sprzedana innym krajom, głównie Niemcom. Grecy uważają, że dochody ze sprzedaży prądu pozwolą zmniejszyć dług publiczny [36].

Tabela. 4. Lista pracujących fotowoltaicznych elektrowni słonecznych o mocy co najmniej 100 MW [24-34]

Moc [MW]	Nazwa	Położenie	Uwagi
290 (397)	Agua Caliente Solar Project	Arizona, USA	W 2014 r. ma osiągnąć moc 397 MW
250	California Valley Solar Ranch	Równina Carizzano, USA	Jesienią 2013 osiągnęła pełną moc
221 (500)	Charanka Solar Park	Gudźarat, Indie	Na koniec 2014 r. ma osiągnąć moc 500 MW
200	Huanghe Hydropower Golmud Solar Park	Golmud, Prowincja Qinghai, Chiny	Ukończona w październiku 2011
200	Imperial Solar Energy Center South	USA	W 2013 r. elektrownia osiągnęła pełną moc
150 (258)	Copper Mountain Solar Facility	Boulder City, Nevada, USA	Aktualnie przeprowadzana rozbudowa pozwoli osiągnąć 258 MW w 2015 r.
150 (700)	Mesquite Solar Project	Arlington, Arizona, USA	Docelowa moc elektrowni wyniesie 700 MW
145	Neuhardenberg Solar Park	Neuhardenberg, Niemcy	Działa od września 2012 r. Największa elektrownia słoneczna w Europie, zaledwie 15 km od granicy z Polską
143	Catalina Solar Project	Bakersfield, Kalifornia, USA	Budowę ukończono we wrześniu 2013 r.
139	Campo Verde Solar Project	Hrabstwo Imperial, Kalifornia, USA	Budowę ukończono w 2013 r.
128,5	Templin Solar Park	Tempin, Niemcy	Działa od września 2012 r., około 60 km od granicy z Polską
125 (275)	Centinela Solar Energy Project	El Centro, Kalifornia, USA	Docelowa moc ma wynieść 275 MW
115	Toul-Rosières Solar Park	Baza lotnicza Toul-Rosières, Francja	Budowę ukończono w lipcu 2012 r.
105,6	Perovo Solar Park	Perovo, Krym, Ukraina	Budowę ukończono w 2011 r.
100 (230)	Antelope Valley Solar Ranch	Pustynia Mohave, Kalifornia, USA	Docelowa moc ma wynieść 230 MW
100	Xitianshan Solar Park	Prowincja Qinghai, Chiny	Budowę ukończono w 2011 r., była to wówczas największa elektrownia słoneczna na świecie
100 (550)	Gansu Jiayuguan Solar Park	Chiny	Docelowa moc ma wynieść 550 MW

Tabela. 5. Budowane bądź planowane elektrownie fotowoltaiczne o mocy powyżej 400 MW [37-44]

Moc [MW]	Nazwa	Rok zakończenia budowy	Położenie	Uwagi
10000	Project Helios	2020	Grecja	Największa elektrownia słoneczna na świecie
2700	Westlands Solar Park	2015, dalsza rozbudowa do 2025	Kalifornia, USA	Elektrownia ma powstać na nieużytku porolniczym powstałym wskutek zbyt dużego zasolenia gleby
2000	Ordos Solar Project	2019	Chiny	Budowa i rozbudowa modułów: 30MW+100MW+870MW+1000MW
1200	Stirling Solar Generating Facility	2015	USA	—
1000	Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park	2030	Zjednoczone Emiraty Arabskie	—
1000	Neper Solar Park	2016	Serbia	Elektrownia będzie się składać ze 100 modułów o mocy 10 MW
750	McCoy Solar Energy Project	2016	Kalifornia, USA	—
660	Topaz Solar Farm	2015	Kalifornia, USA	Elektrownia pracuje od lutego 2013, sukcesywnie zwiększając swoją moc
660	Desert Sunlight Solar Farm	2015	Kalifornia, USA	Budowę rozpoczęto we wrześniu 2011 r.
600	Blythe Solar Power Project	?	Kalifornia, USA	—
600	Amargosa Farm Road Solar Project	2014	USA	—
400	Calzadilla de los Barros	2015	Estremadura, Hiszpania	Elektrownia będzie zatrudniać 1720 pracowników. Żywotność elektrowni szacuje się na minimum 30 lat
400	Silver State South	?	Nevada, USA	—
400	Gadsden County	?	Floryda, USA	Koszt 1,5 miliarda USD
400	Alamo Solar Farm	2016	Teksas, USA	Budowa ruszyła w styczniu 2013
400	Ukujima Solarpark	2015	Japonia	—
400	Cholistan	2015	Pakistan	Rozważa się zwiększenie mocy do 1000 MW

6. Inne zastosowania energii Słońca w gospodarce człowieka

Energię Słońca wykorzystuje się również do gotowania, pieczenia czy pasteryzacji żywności. Działanie kuchenki solarnej (pieca solarne) polega na transformacji energii promieniowania słonecznego w ciepło podczas jego absorpcji na powierzchni ciała czarnego. W celu uzyskania wyższych temperatur i większej mocy urządzenia stosuje się koncentrację promieniowania słonecznego za pomocą różnego rodzaju powierzchni odbłaskowych,

płaskich lub parabolicznych. W tym samym celu wykorzystuje się też często efekt szklarniowy umieszczając ciało absorbujące (garnek) w oszklonym „pudełku” lub pod przezroczystym kloszem albo stosując garnek z pokrywą przezroczystą [45].

W kuchenkach typu skrzynkowego używa się jednej lub kilku płyt odblaskowych, które skupiają promieniowanie słoneczne na wnętrzu izolowanego ciepłnie i oszklonego (efekt szklarniowy) pudełka. Ten typ kuchenki zapewnia powolne, ale równomierne gotowanie lub pieczenie dużej ilości pożywienia. W kuchenkach typu panelowego różnie ukształtowane płaskie płyty odblaskowe skupiają promieniowanie słoneczne bezpośrednio na garnku, a w wersji ulepszonej na garnku przykrytym przezroczystym kloszem lub na patelni z pokrywą przezroczystą. W kuchenkach typu parabolicznego (rysunek 13) reflektor paraboliczny lub reflektor o profilu zbliżonym do parabolicznego skupia promieniowanie słoneczne na garnku (od spodu). Są to zazwyczaj kuchenki dużej mocy. Umożliwiają one szybkie przygotowanie dużej ilości pożywienia, podobnie jak na zwykłej kuchence gazowej lub elektrycznej. W dobrych kuchenkach parabolicznych osiąga się temperaturę 200-300°C [45].

W Polsce, kuchenki solarne mogłyby być sporą konkurencją dla grillów. Czas przygotowania potraw jest porównywalny, a nie potrzeba węgla drzewnego. Są to bardzo proste konstrukcje, każdy z nas może zbudować sobie kuchenkę solarną. Do budowy kuchenki solarnej wystarczy parasol i folia aluminiowa [46], jest to koszt około 30-40 zł.



Rys. 13. Kuchenka słoneczna (fot. Latife Tunc, Greenpeace)

Energia Słońca wykorzystywana jest do oczyszczania wody, aby ta była zdatna na cele pitne dla ludzi i zwierząt gospodarskich. Z każdym rokiem przybywa tych instalacji w Afryce czy Ameryce Południowej. Energia sło-

neczna wykorzystywana jest również do odsalania wody. Przykładowo, we wsi Kotri (Indie), stosuje się proces odwróconej osmozy. Dzienna produkcja czystej wody wynosi 3000 litrów, co pozwala pokryć potrzeby mieszkańców (rysunek 14).



Rys. 14. Solar-powered Reverse Osmosis Plant
(fot. Prashanth Vishwanathan, Greenpeace)

Autonomiczny system fotowoltaiczny pozwala na całkowite uniezależnienie się od zewnętrznych dostawców energii elektrycznej. Głównym założeniem autonomicznego systemu jest wytworzenie energii elektrycznej wyłącznie ze Słońca i wykorzystanie jej do pokrycia całkowitego zapotrzebowania na energię elektryczną. Energia elektryczna z systemu autonomicznego może być wykorzystywana zarówno w dzień, jak też i w nocy. Systemy autonomiczne stosuje się przede wszystkim tam, gdzie nieopłacalna staje się budowa linii energetycznej oraz przyłączy do zasilania poszczególnych obiektów, np. takich jak:

- schroniska górskie,
- przepompownie wody, przekaźniki telekomunikacyjne,
- sygnalizacja drogowa, tablice ogłoszeniowe,
- systemy zasilania awaryjnego,
- automaty z napojami, parkomaty, oraz
- zasilanie jachtów i przyczep kempingowych.

7. Elektrownia orbitalna

W 1941 roku profesor i pisarz science fiction Isaac Asimov opublikował opowiadanie „Rozum”, w którym stacja kosmiczna przekazuje energię pobraną od Słońca do różnych planet wykorzystujących promienie mikrofalowe [47].

Podbój kosmosu sprawił, że pierwsze projekty elektrowni orbitalnej pochodzą już z lat sześćdziesiątych XX wieku [48]. Początkowo uznawane były za niewykonalne, z powodu braku technologii do efektywnego przesyłania energii z orbity na Ziemię. W 1973 roku Peter Glaser z Arthur D. Little, Inc. rozwiązał ten problem, patentując metodę przesyłania energii za pomocą mikrofal [49]. Wzbudziło to zainteresowanie NASA, która zleciła jego firmie przeprowadzenie analizy możliwości budowy takich elektrowni. Raport opublikowany w 1974 roku stwierdzał, że choć wymaga to przezwyciężenia szeregu problemów, projekt jest obiecujący w dłuższej skali czasowej [50].

Główne elementy elektrowni orbitalnej to:

- kolektor, zwykle zbudowany z baterii słonecznych,
- antena mikrofalowa, skierowana na Ziemię, oraz
- duża antena odbiorcza, umieszczona na powierzchni Ziemi.

Kolektor słoneczny może mieć konstrukcję podobną jak jego naziemne odpowiedniki. Nieważkość i brak czynników pogodowych pozwala zrezygnować z wielu elementów konstrukcyjnych, co może znacznie obniżyć jego masę i cenę. Wymagane jest jedynie utrzymywanie go w całości i możliwość obracania, tak aby był skierowany przez cały czas w stronę Słońca [48].

Uzyskanie skupionej wiązki mikrofal z odległości sięgającej orbity geostacjonarnej wymaga anteny nadawczej o średnicy około kilometra. Antena odbiorcza powinna mieć wtedy około 10 km średnicy. Przy natężeniu mikrofal przy powierzchni Ziemi 230 W/m^2 , umożliwi to przesyłanie 5-10 gigawatów mocy. Uzyskanie takiej mocy ze światła słonecznego wymaga kolektora 5- do 10-kilometrowej średnicy (w zależności od typu użytych ogniw). Kolektor i antena nadawcza stanowią więc najbardziej kosztowną część konstrukcji. Antena odbiorcza na powierzchni Ziemi może być zbudowana z prostych i tanich dipolowych anten, uzyskując i tak do 85% sprawności [48].

Wykorzystanie mikrofal do przesyłania energii jest najbardziej kontrowersyjnym elementem projektu. Kontrowersje te są jednak głównie efektem nieporozumienia, gdyż używana wiązka mikrofal nie będzie w stanie wyrządzić żadnych szkód. Na powierzchni Ziemi, intensywność wiązki w jej centrum ma wynosić około 230 W/m^2 . Stanowi to mniej niż $1/5$ stałej słonecznej. Nie jest zatem możliwe spalanie, ani nawet istotne podgrzanie niczego taką wiązką. Badania pokazują, że takie natężenie nie wyrządza szkód żywym istotom nawet przy ciągłej ekspozycji. Poza obszarem anteny odbiorczej natężenie mikrofal będzie wynosiło poniżej 10 W/m^2 i będzie szybko malało z odległością od anteny. Zagrożenie z nim związane nie jest większe od powodowanego przez używanie telefonów komórkowych [48].

Konkurencyjność elektrowni orbitalnej zależy od cen energii i jest powiązana z dostępnością alternatywnych jej źródeł. Możliwość umieszczenia taniej anteny odbiorczej na dowolnym obszarze, pozwala traktować taką

elektrownię jako elastyczne źródło energii dla obszarów gdzie jest ona najdroższa. Przykładowo, elektrownia o mocy 4 GW, działająca nieprzerwanie przez 99% czasu wytwarzałaby około 35 TWh energii w ciągu roku. Przy obecnych cenach energii w USA (około 5 centów za kWh), oznacza to 1,75 mld USD rocznie, czyli 35 mld USD w ciągu 20 lat działania. Jest to mniej niż wyniósłby koszt całej inwestycji. Z drugiej strony, cena energii w Wielkiej Brytanii sięga 22 centów za kWh, co oznacza około 150 mld USD zysku w ciągu 20 lat [48].

W kwietniu 2009 roku kalifornijskie przedsiębiorstwo energetyczne Pacific Gas and Electric Company oświadczyło, że oczekuje na zatwierdzenie przez stanowego regulatora umowy zawartej z Solaren Corp. przewidującej dostarczenie 200 MW mocy przez ponad 15 lat z elektrowni słonecznej znajdującej się na orbicie. Transmisja ma odbywać się za pomocą fal radiowych, a odbiornik znajdować się w hrabstwie Fresno. Stanowy regulator, California Public Utilities Commission, zatwierdził umowę 3 grudnia 2009 roku. Umowa przewiduje dostarczenie 1700 GWh rocznie począwszy od czerwca 2016 roku. Elektrownia znajdować ma się na orbicie geosynchronicznej. Firma Solaren Corp. nie podaje informacji na temat swojej technologii do publicznej wiadomości, jednak uzyskane przez firmę patenty dotyczą użycia pary składanych, nadmuchiwanymi zwierciadła o średnicy około 2 km, skupiających światło na module słonecznym wytwarzającym energię elektryczną. Do wyniesienia układu na orbitę konieczne mają być cztery ciężkie rakiety nośne. Cena energii z elektrowni ma wynosić „nieco więcej” niż przewidywana na 2016 rok cena energii elektrycznej w Kalifornii, na poziomie 12,9 centa za kWh [48].

W listopadzie 2009 swoje plany ogłosiła również Japonia. Celem jest budowa do 2030 roku elektrowni orbitalnej przesyłającą energię na Ziemię za pomocą mikrofal lub promieniowania laserowego. Stacja odbiorcza ma znajdować się na morzu lub sztucznym zbiorniku wodnym. Elektrownia ma posiadać moc 1 GW i dostarczać energię po cenie 8 jenów za kWh, czyli sześciokrotnie mniejszej od obecnych cen energii w Japonii. W 2012 r. Chiny nawiązały współpracę z Indiami, której celem ma być pozyskanie energii Słońca z kosmosu [48].

8. Literatura

1. http://en.wikiquote.org/wiki/Thomas_Edison
2. K. Lis, *Jak tanio zbudować kolektor słoneczny?*, Wyd. EscapeMagazine.pl, Toruń 2010.
3. K. Butti, J. Perlin, *A golden thread: 2500 years of solar architecture and technology*, Marion Boyars Publishers Ltd, New York 1981.

4. Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska w Gdańsku, *Zastosowanie odnawialnych źródeł energii (OZE) w gospodarstwach domowych*, Gdańsk 2012.
5. F. Mauthner, W. Weiss, *Solar heat worldwide. Markets and contribution to the energy supply 2011. Edition 2013*, IEA Solar Heating&Cooling Programme, may 2013.
6. D.J.C. MacKay, *Zrównoważona energia – bez pary w gwizdek*, „I-BiS”, Wrocław 2011.
7. European Commission, *PV Status Report 2013*, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2013.
8. <http://en.wikipedia.org/wiki/Odersun>
9. D. Luigi, T. Enrico, *Economic analysis of different supporting policies for the production of electrical energy by solar photovoltaics in western European Union countries*, Energy Policy 7(38), 3297–3308, 2010.
10. K.H. Solangi, M.R. Islam, R. Saidur, N.A. Rahim, H. Fayaz, *A review on global solar energy policy*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 2149-2163, 2011.
11. N. Caldes, M. Varela, M. Santamaría, R. Sáez, *Economic impact of solar thermal electricity deployment in Spain*, Energy Policy 5(37), 1628-1636, 2009.
12. A. Gómez, J. Zubizarreta, C. Dopazo, N. Fueyo, *Spanish energy roadmap to 2020: Socioeconomic implications of renewable targets*, Energy 36, 1973-1985, 2011.
13. <http://grupaenergiasloneczna.pl/index.php?go=menu-start&go2=sit-start-aktualnosci-ze-swiatea>
14. <http://inzynierpv.pl/10/03/produkowanie-energii-z-pv-wylacznie-na-wlasne-potrzeby-juz-oplaczalne-w-niemczech>
15. P. Kościelniak, *Czysta energia ze światła*, Fotowoltaika, Dodatek specjalny, 26 września 2011.
16. H. Foit, *Zastosowanie odnawialnych źródeł ciepła w ogrzewnictwie i wentylacji*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
17. http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Energy_Generating_Systems
18. www.NextEraEnergyResources.com
19. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations
20. http://en.wikipedia.org/wiki/Alamosa_Solar_Generating_Project
21. <http://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Project-and-Operations/Ain%20Beni%20Mathar%20anglais.pdf>
22. http://en.wikipedia.org/wiki/PS20_solar_power_plant
23. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations
24. <http://www.firstsolar.com/Projects/Agua-Caliente-Solar-Project>
25. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_photovoltaic_power_stations
26. http://en.wikipedia.org/wiki/Agua_Caliente_Solar_Project
27. http://en.wikipedia.org/wiki/California_Valley_Solar_Ranch
28. http://en.wikipedia.org/wiki/Charanka_Solar_Park#Charanka_Solar_Park
29. http://en.wikipedia.org/wiki/Huanghe_Hydropower_Golmud_Solar_Park
30. http://en.wikipedia.org/wiki/Copper_Mountain_Solar_Facility
31. http://en.wikipedia.org/wiki/Mesquite_Solar_project
32. http://en.wikipedia.org/wiki/Catalina_Solar_Project
33. http://en.wikipedia.org/wiki/Toul-Rosi%C3%A8res_Solar_Park
34. http://en.wikipedia.org/wiki/Xitieshan_Solar_Park

35. http://www.energyinsight.info/greater_sandhill_solar_colorado.html
36. <http://www.project-helios.gr>
37. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_photovoltaic_power_stations
38. <http://www.project-helios.gr>
39. <http://www.westlandssolarpark.com>
40. http://en.wikipedia.org/wiki/Topaz_Solar_Farm
41. http://en.wikipedia.org/wiki/Topaz_Solar_Farm
42. http://en.wikipedia.org/wiki/Desert_Sunlight_Solar_Farm
43. <http://extremaduratrabajo.gobex.es/node/1021>
44. <http://www.permits.performance.gov/projects/silver-state-solar-south-project-first-solar>
45. http://fr.solarcooking.wikia.com/wiki/Kuchenki,_piekarniki_i_grille_solarne
46. <http://solarcooking.org/plans/paracuina.pdf>
47. http://addsdonna.com/ADDS_DONNA/Science_Fiction_files/2_Asimov_Reason.pdf
48. http://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownia_orbitalna
49. P.E. Glaser, A.D. Little, *Method and apparatus for converting solar radiation to electrical power*, USA patent nr 3,781,647, 1973.
50. http://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownia_orbitalna

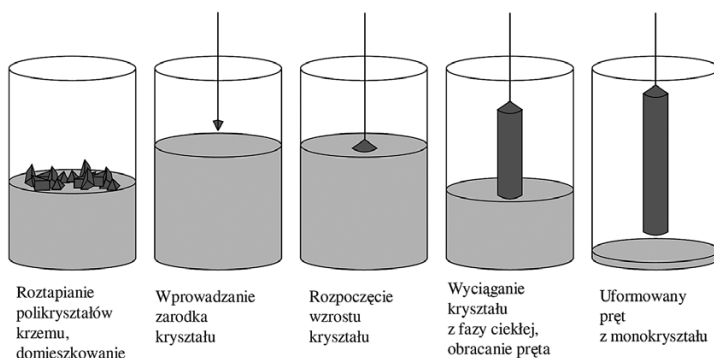
TECHNOLOGIE HELIOENERGETYCZNE W POLSCE

1. Historia wykorzystania energii Słońca w Polsce

Rozdział zaczynamy od opisu dokonań profesora Jana Czochralskiego, znanego na świecie jako „father of the Czochralski method”. Jego badania miały ogromne znaczenie dla rozwoju technologii monokryształów i fotowoltaiki [1]. W 1916 r. Jan Czochralski pracował w laboratorium metalowym AEG (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft) w Berlinie. Pewnego razu, spisując wyniki swoich badań nad stopami metali, przez pomyłkę zanurzył swoje pióro w tyglu ze stygnącą cyną. Profesor zauważył, że z pióra zwisa cienka nić metalu. Zaaferowany zmienił stalówkę na nową i ostrożnie zanurzył pióro w tyglu. Powoli wyciągnął – znowu na końcu stalówki zobaczył zwisającą nić. Oderwanie nici metalowej i zanurzenie pióra w stopionej cynie nie skutkowało powstaniem nowej nici metalowej. Profesor zrozumiał, że nacięcie stalówki jego pióra było jakby otwartą kapilarą. Dalsze badania prowadził z wykorzystaniem szklanej kapilary. Do jej wyciągania służył mu najpierw mechanizm zegarka z odpowiednimi przekładniami, a potem mały silniczek. Pierwsze opublikowane wyniki dotyczyły monokryształów cyny, ołowiu i cynku [1].

Idea powstawania kryształu metodą Czochralskiego jest bardzo prosta. Materiał podlegający krystalizacji, po roztopieniu w tyglu, ochładzany jest przy powierzchni stopu do temperatury krzepnięcia. Do powierzchniowej warstwy stopu wprowadzana jest końcówka kapilary. Po zassaniu niewielkiej ilości stopionego metalu do jej wnętrza rozpoczyna się krystalizacja stopionego materiału, tworzy się zarodek krystalizacji. Aby otrzymać monokryształ o zadanej orientacji stosuje się przygotowany wcześniej zarodek, na którym zaczynają narastać w sposób uporządkowany kolejne warstwy kryształu. Zarodek zaczyna być wyciągany z cieczy z określoną szybkością, tak by nie został zerwany kontakt wyciąganego kryształu ze stopem. Napięcie

powierzchniowe utrzymuje krótki słupek ciekłego materiału u wylotu kapilary. Zetknięcie się słupka cienkiego materiału z chłodniejszym powietrzem powoduje powolne jego krzepnięcie nad powierzchnią cieczy (rysunek 1). Odpowiedni dobór szybkości wyciągania, wzajemny obrót monokryształu i tygla, rozkład temperatury w tyglu i wiele innych parametrów wpływają na rozmiary i jakość otrzymanego monokryształu [1,2].



Rys. 1. Schemat otrzymania monokryształu metodą Czochralskiego [3]

Z czasem pojawiały się kolejne modyfikacje metody Czochralskiego. Zastosowanie tej właśnie metody przez G.K. Teala i J.B. Little'a w 1950 r. do otrzymywania monokryształów germanu, a później i krzemu, umożliwiło przemysłową produkcję tranzystorów i w efekcie doprowadziło do rewolucji elektronicznej. Do dziś żadna z innych, nowszych metod hodowli kryształów nie może konkurować wielością zastosowań i modyfikacji z metodą Czochralskiego. Metoda Czochralskiego ma kilka istotnych zalet:

- kierunkowość wzrostu kryształu jest określona przez orientację zarodka,
- wzrost beznapężeniowy wobec kontaktu z tygłem,
- łatwość kontroli jakości i składu chemicznego (możliwość domieszkowania) już podczas hodowli,
- możliwość ponownego przetopienia złego kryształu w całości lub częściowo (co obniża straty materiału i koszty produkcji), oraz
- możliwość otrzymywania dużych kryształów.

Jan Czochralski, mimo że był obok Marii Curie-Skłodowskiej, najbardziej znanym polskim chemikiem na świecie początku XX wieku, jest postacią tragiczną, a w Polsce nadal prawie nieznaną. Po II wojnie światowej został aresztowany pod zarzutem „współpracy z niemieckimi władzami okupacyjnymi na szkodę osób spośród ludności cywilnej, względnie Państwa Polskiego”. Pomimo zwolnienia po 4 miesiącach z więzienia i oczyszczenia z zarzutów, Senat Politechniki Warszawskiej odmówił przyjęcia go do pra-

cy uchwałą z 19 grudnia 1945 roku. W ten sposób wykluczono go ze środowiska naukowego i skazano na zapomnienie. Czochralski nie mógł się bronić, nie mógł też ujawnić współpracy z AK, za którą groziło kilkuletnie więzienie UB. Zmarł w 1953 r. na atak serca podczas rewizji jego domu przez służby UB [1]. 29 czerwca 2011 roku Senat Politechniki Warszawskiej ogłosił rehabilitację Jana Czochralskiego. Sejm RP, na posiedzeniu z dnia 7 grudnia 2012 r., przyjął uchwałą w sprawie ustanowienia roku 2013 Rokiem Jana Czochralskiego [4].

W Polsce, w latach 1958-60 w Instytucie Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa a obecnie Instytucie Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa w Warszawie rozpoczęto pierwsze 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. Kolektor ten spotkał się z dużym uznaniem jego pierwszych użytkowników. Tradycja suszenia płodów rolnych z wykorzystaniem kolektorów słonecznych budowanych sposobem gospodarczym przetrwała przez dziesięciolecia i zaowocowała stosunkowo najszybszym rozwojem tej dziedziny zastosowań. W Polsce w 1993 r. zinventaryzowano około 6 tys. m² kolektorów słonecznych do podgrzewania powietrza [5].

Pierwsze kolektory do podgrzewania wody użytkowej zaczęła produkować w Polsce firma Metaloplast z Bielska Białej w 1970 r. W latach 1970-78 nastąpiło zahamowanie dalszego rozwoju prac związanych z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. Niskie ceny nośników energii sprawiły, że dopiero w latach 1979/80 wznowiono prace badawcze i konstrukcyjne. W latach 1980-1990 wykonano w IBMER i innych polskich placówkach badawczych kilkanaście konstrukcji kolektorów słonecznych, siłowni wiatrowych, instalacji biogazowych, pomp ciepła i ogniw fotowoltaicznych, z których większość została wdrożona do praktyki. W ramach programu regionalnego UNDP/FAO w Europie do 1990 r. kolektory słoneczne opracowane w IBMER zostały wdrożone w 32 gospodarstwach rolnych indywidualnych, państwowych i spółdzielczych o łącznej powierzchni 8000 m² kolektorów powietrznych i 350 m² kolektorów do podgrzewania wody użytkowej [5].

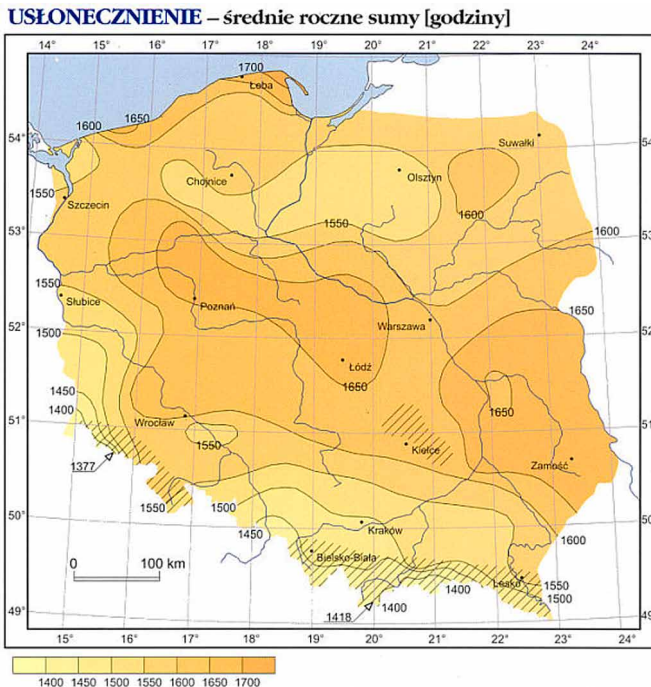
Obecnie, w Polsce działa około 200 firm, 15 producentów modułów PV, blisko 150 firm instalatorskich.

2. Warunki słoneczne w Polsce

Polska leży pomiędzy 49° a 54,5° szerokości geograficznej, w klimacie umiarkowanym. W okresie letnim, północne krańce Polski mają dzień dłuż-

szy o prawie godzinę w porównaniu do krańców południowych, w okresie zimowym jest odwrotnie [6].

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 godz./dzień, natomiast w zimie skraca się do 8 godzin dziennie. Na rysunku 2 przedstawiono średnie roczne sumy usłonecznienia. Średnia liczba godzin słonecznych waha się od 1400 w górach po 1700 nad morzem. Usłonecznienie powyżej 1650 h obserwuje się w Polsce centralnej oraz na Lubelszczyźnie [6,7].

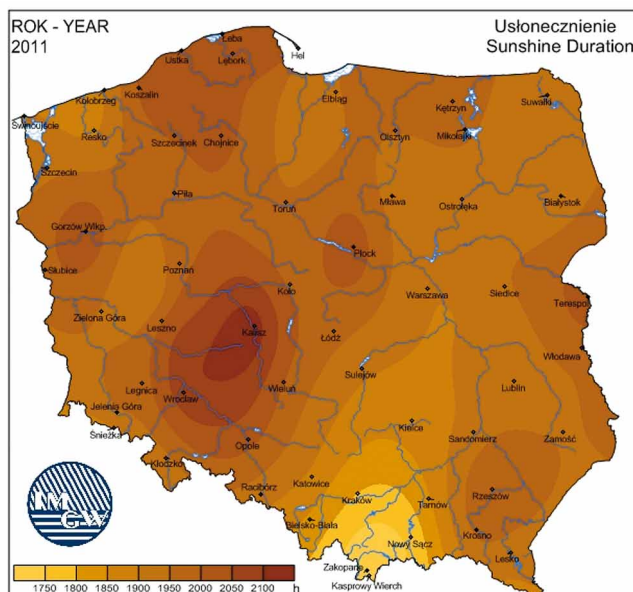


Rys. 2. Średnie usłonecznienie w Polsce [godziny] [7]

Z danych IMGW [8] wynika, że w ostatnich latach usłonecznienie było większe. W 2010 r. 1400-1850 h, w 2011 r. 1750-2100 h (rysunek 3), w 2012 r. 1650-2000 h., zaś do września 2013 r. 1040-1600 h.

Napromieniowanie całkowite to suma energii promieniowania słonecznego wyrażona w MJ na metr kwadratowy (MJ/m²). Dla Polski przyjmuje się wartość 3600 MJ/m² w ciągu roku. W promieniowaniu całkowitym udział promieniowania rozproszonego waha się od około 47% w lecie do

70% w zimie. Natężenie promieniowania słonecznego wyrażone w watach na metr kwadratowy (W/m^2) jest to gęstość mocy promieniowania padającego w ciągu jednej sekundy na powierzchnię prostopadłą do kierunku promieniowania. Najwyższe natężenie promieniowania odnotowano na Kasprowym Wierchu – około $1200 W/m^2$ i w pasie nadmorskim – około $1050 W/m^2$. Najczęściej wartości promieniowania słonecznego wahają się od $600-800 W/m^2$ [8,9].



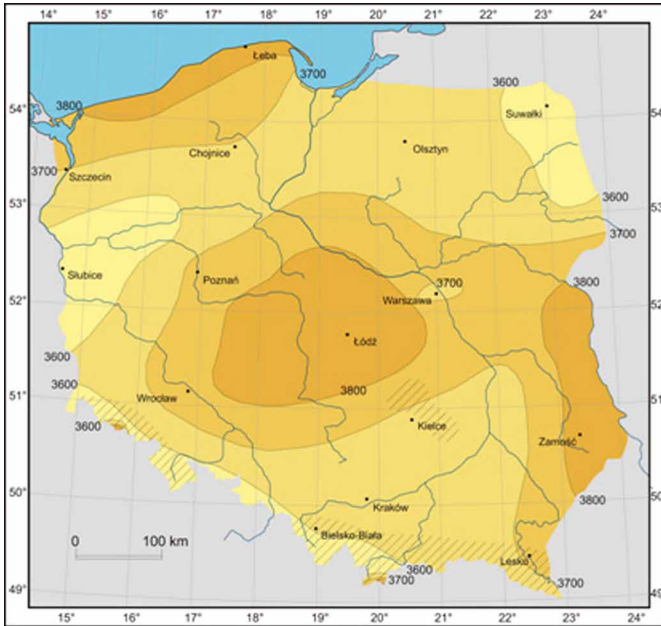
Rys. 3. Usłonecznienie w Polsce w 2011 r. [godziny] [8]

W warunkach klimatu śródkowoeuropejskiego, znaczącą część (ok. 50%) energii stanowi energia zawarta w promieniowaniu rozproszonym. W związku z tym sens techniczny zastosowania znajdują w naszych warunkach kolektory słoneczne typu absorbującego, a nie skupiającego [10]⁴.

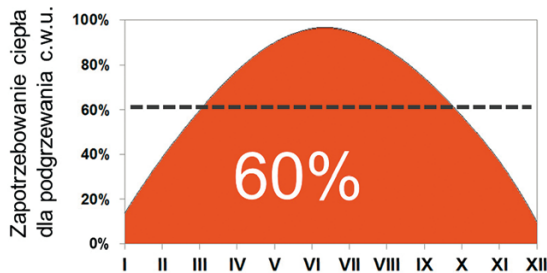
Efekty pracy instalacji solarnej opisywane są dwoma podstawowymi wskaźnikami: stopniem pokrycia potrzeb ciepła (%/rok) oraz jednostkowym uzyskiem ciepła (kWh/m^2rok). Z punktu widzenia użytkownika małej instalacji solarnej, istotna jest oszczędność w zużyciu energii lub paliwa, wobec czego interesująca jest wtedy wartość stopnia pokrycia potrzeb. Mała instalacja solarna może być dobierana tak, aby w miesiącach letnich pokrywać

⁴ Gorące podziękowania dla firmy Hewalex za przekazane materiały.

do $90 \div 100\%$ potrzeb ciepła dla podgrzewania wody użytkowej. Wówczas w skali całego roku, stopień pokrycia potrzeb powinien wynieść $50 \div 60\%$. W miesiącach letnich podstawowe źródło ciepła będzie mogło być często całkowicie wyłączane z pracy, co ma szczególne znaczenie przy eksploatacji kotłów na paliwo stałe o wysokich stratach rozruchowych i postojoych [10].



Rys. 4. Promieniowanie całkowite w Polsce [MJ/m^2] [7]

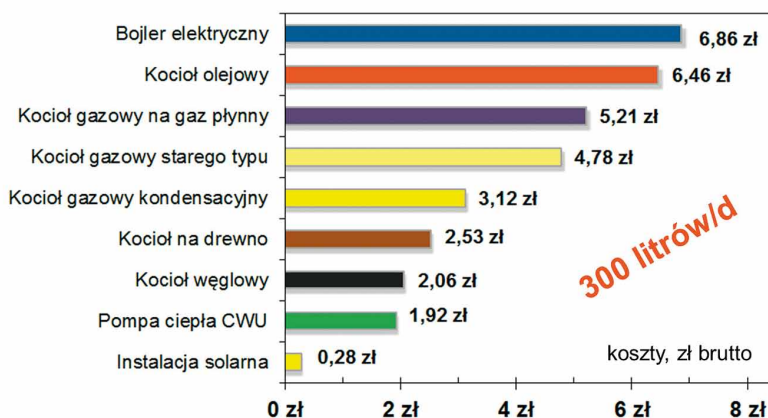


Rys. 5. Przykładowy wykres stopnia pokrycia potrzeb ciepła dla małej instalacji solarnej pracującej na potrzeby podgrzewania ciepłej wody użytkowej [8]

Drugim i w zasadzie najważniejszym wskaźnikiem efektów pracy instalacji solarnej jest jednostkowy roczny uzysk ciepła ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{rok}$). Wyraża on ilość ciepła pozyskanego z instalacji solarnej w odniesieniu do zainstalowanej powierzchni kolektorów słonecznych. Na podstawie znajomości tego wskaźnika można ocenić efektywność pracy instalacji solarnej i prawidłowość jej doboru. Uzysk ciepła jest wielkością odwrotnie proporcjonalną do stopnia pokrycia potrzeb ciepła. A więc im wyższe względne oszczędności ($\%/rok$) ma przynieść instalacja, tym niższą wartość uzysku ciepła ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{rok}$) będzie mogła uzyskiwać. Wynika to z prostego faktu – wzrostu temperatury roboczej układu i wskutek tego zwiększenia systemowych strat ciepła. Stąd też wyższą efektywnością pracy cechują się zwykle duże instalacje solarne dobierane na niższe stopnie pokrycia potrzeb ciepła (rzędu $20 \div 40\%/rok$) [10,11].

3. Celowość stosowania instalacji solarnych w Polsce

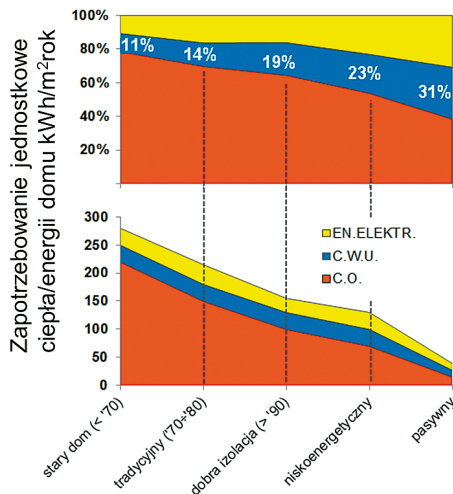
Koszty eksploatacji instalacji solarnej należą do najniższych wśród urządzeń grzewczych. System wykorzystujący darmową energię słoneczną wymaga do pracy minimalnej ilości energii elektrycznej. Pobór energii elektrycznej zasilającej pompę obiegową w małej instalacji solarnej wynosi zazwyczaj od 20 do 50 W. Koszty związane z przeglądami serwisowymi również należą do najniższych – w prawidłowo dobranych i eksploatowanych instalacjach solarnych, wymiana glikolu może następować znacznie rzadziej niż w przyjętych ogólnie 5-letnich okresach [10].



Rys. 6. Porównanie kosztów podgrzania ciepłej wody użytkowej: 300 litrów/dzień, od 10 do 45°C [10,11]

Instalacje solarne są także systemami przewidzianymi do wieloletniej eksploatacji, zakłada się przynajmniej 20÷25 lat ich użytkowania. Opłacalność zastosowania instalacji solarnej jest tym wyższa im droższe paliwo lub energię wykorzystuje konwencjonalne źródło ciepła. W porównaniu do podgrzewania wody użytkowej energią elektryczną (np. bojler lub grzałka elektryczna), olejem opałowym, czy też gazem płynnym, uzyskuje się krótkie kilkuletnie okresy zwrotu kosztów inwestycji. Dodatkowo, każde wsparcie finansowe udzielone inwestorowi, poprawia efekt ekonomiczny i skracza czas zwrotu kosztów inwestycyjnych [10].

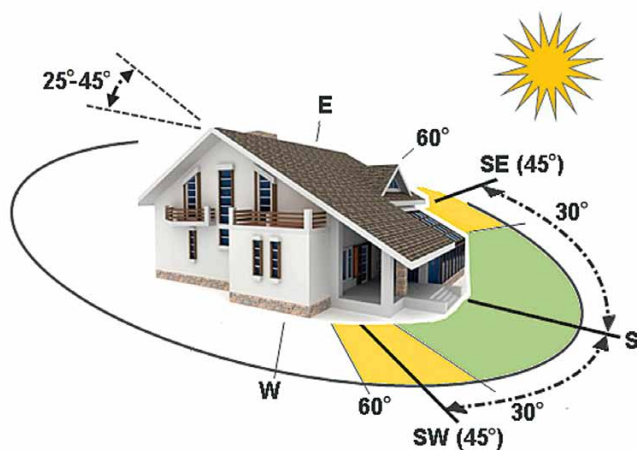
Instalacje solarne należą do najbardziej efektywnych systemów przetwarzających bezpośrednio energię promieniowania słonecznego na ciepło użytkowe. Stosowanie ich, szczególnie dla podgrzewania ciepłej wody użytkowej powinno stać się standardem także ze względu na zmiany zachodzące w technologiach budowlanych. Poprawa izolacyjności cieplnej nowych budynków spowodowała wzrost znaczenia ciepła potrzebnego do podgrzewania wody użytkowej [10].



Rys. 7. Trendy w budowie domów – zmniejszanie się rocznego zapotrzebowania ciepła [10]

W rocznym bilansie zużycia energii, podgrzewanie wody użytkowej stanowi tym większy udział im bardziej energooszczędny jest budynek. Szukanie oszczędności w zużyciu energii jedynie na drodze stosowania źródeł ciepła o większej sprawności staje się niewystarczające. Stosunkowo łatwym sposobem obniżenia kosztów eksploatacji domu jest zastosowanie instalacji solarnej nawet w podstawowym wariantcie podgrzewania ciepłej wody użytkowej [10].

Ustawienie kolektorów słonecznych powinno zapewniać ich korzystną pracę w tym okresie. Zakres możliwego ustawienia kolektorów słonecznych jest szeroki, a zmniejszenie przenikania promieniowania słonecznego przez jego szybę będzie niewielkie – zazwyczaj maksymalnie do 5%. Zalecany w praktyce ustawieniem kolektorów słonecznych jest skierowanie ich w kierunku południowym (S). W granicach odchylenia $\pm 30^\circ$ od południa, nie jest zauważalne zmniejszenie rocznych uzysków ciepła. Nieznacznie niższe (do 5%) powinny być uzyski ciepła przy odchyleniu $\pm 45^\circ$ od kierunku południowego i można uznać, że w granicach kąta SE-SW, możliwe jest zastosowanie kolektorów słonecznych bez korekty doboru ich powierzchni. Jeśli budynek posiada połacie dachu skierowane w osi wschód-zachód, to rozwiązaniem może być zastosowanie dwóch baterii kolektorów słonecznych pracujących zamiennie w ciągu dnia. Prostszy i częściej zalecany jest w takiej sytuacji jednak zastosowanie jednej baterii kolektorów o zwiększonej powierzchni. Przykładowo, 4 kolektory płaskie (każdy o powierzchni $1,8 \text{ m}^2$ absorbera) skierowane na południowy-wschód (SE) powinny zapewniać rocznie tyle samo ciepła, ile 3 takie same kolektory skierowane na południe (S) [10].

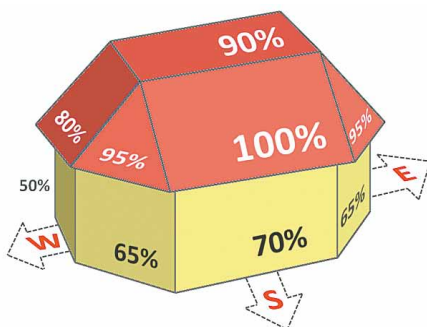


Rys. 8. Optymalne warunki zabudowy kolektorów słonecznych – skierowanie na południe z możliwością odchylenia $\pm 45^\circ$ oraz nachylenie połaci dachu $25^\circ \div 45^\circ$ [10]

Drugim parametrem określającym położenie kolektora słonecznego, jest jego nachylenie do poziomu. Dla większości dachów pochyłych kąt mieści się w zakresie $25^\circ \div 45^\circ$, przy którym efektywność pracy kolektora jest najwyższa w skali całego roku. Mając na względzie szeroki zakres możliwych wariantów ich zabudowy bez zauważalnego w praktyce zmniejszenia uzy-

sków ciepła, należy stwierdzić, że jego zmienne w czasie położenie nie jest zasadne. Tym bardziej, że najczęstszym miejscem zabudowy jest połać dachu, a zabudowa na ewentualnej obrotowej platformie wiązałaby się z podwyższeniem kosztów i skomplikowaniem technicznym inwestycji. Dodatkowe zwiększenie kosztów nie byłoby zrekompensowane na tyle wyższymi uzyskami ciepła, aby tego typu inwestycja była opłacalna. W przypadku budynku z dachem płaskim, zalecane jest instalowanie kolektorów słonecznych nachylonych do poziomu, w czym pomocne będą stelaże – specjalne zestawy montażowe. Ich użycie jest także możliwe dla zabudowy kolektorów na terenie przyległym do budynku, gdy dach nie pozwala na ich zastosowanie. Niektóre typy kolektorów próżniowych pozwalają na montaż w dowolnej pozycji – bez wymaganego minimalnego i maksymalnego nachylenia, jak w przypadku kolektorów płaskich. Może być to przydatne dla montażu na dachu płaskim, przy czym jest to zalecane tylko wyjątkowo, przede wszystkim w budynkach wysokich, w celu zmniejszenia sił oddziaływania wiatru. Mankamentem takiego położenia kolektora jest możliwość długotrwałego zalegania śniegu, wyłączającego instalację z pracy w sezonie zimowym [10].

Specyficzną cechą dowolnego położenia niektórych próżniowych kolektorów słonecznych częściej wykorzystuje się dla ich zabudowy w pozycji pionowej. W ten sposób można zastosować instalację solarną w budynkach z utrudnionymi warunkami zabudowy. Zastosowanie kolektorów próżniowych na elewacji budynku niestety pociąga za sobą znaczące zmniejszenie rocznych uzysków ciepła – do 40÷50%, w stosunku do standardowej zabudowy z nachyleniem [10].



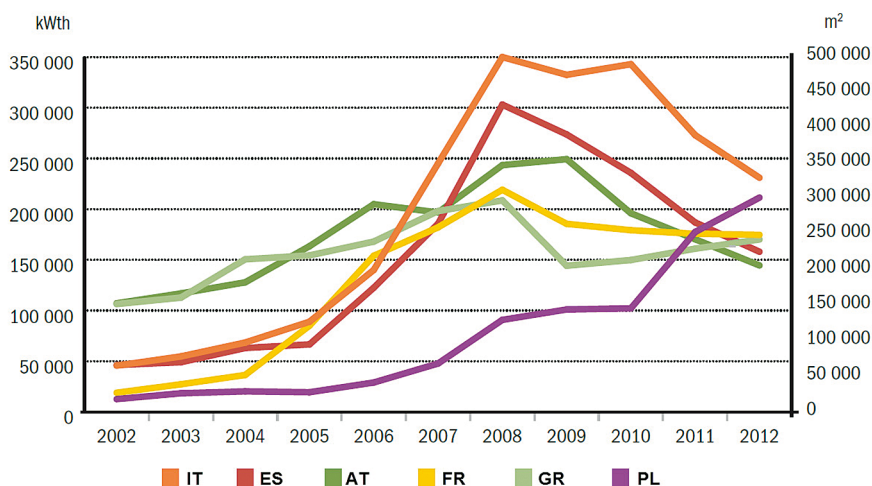
Rys. 9. Względne zmniejszenie ilości energii promieniowania słonecznego w okresie roku dla warunków innych niż optymalne [10]

Planując zastosowanie kolektorów słonecznych na budynku, należy wziąć pod uwagę szereg aspektów, w pierwszym rzędzie możliwości zastosowania określonej ich powierzchni w dostępnym miejscu na dachu lub

posesji. Miejsce to powinno pozostawać niezacienione lub zacienienie to powinno ograniczać się do jak najkrótszych okresów dnia i roku. Należy wziąć także pod uwagę wzrost drzew wokół domu, które mogą dopiero po kilku latach powodować zacienianie kolektorów słonecznych. Jest to istotne i na etapie projektowania ogrodu i wyboru samego miejsca zabudowy kolektorów [10].

4. Rynek kolektorów słonecznych w Polsce

Rynek polski w ostatnich latach był szczególnie rozwijającym się na tle krajów europejskich, w znacznej mierze dzięki wprowadzonym programom finansowym wspierającym inwestycje związane z instalacjami solarnymi. Jednocześnie, nasycenie rynku polskiego systemami energetyki solarnej jest nadal znacznie niższe niż w krajach o dłuższym doświadczeniu. Wskaźnik zainstalowanej łącznej powierzchni kolektorów słonecznych w przeliczeniu na liczbę mieszkańców, wynosił do końca 2012 roku w Polsce 31,4 m²/1000 osób. Dla porównania, w krajach o dłuższym doświadczeniu w segmencie energetyki słonecznej i o podobnych warunkach klimatycznych znacznie więcej: Niemcy 196 m²/1000 os., Austria 485 m²/1000 os. Stwarza to dalsze warunki do rozwoju rynku kolektorów słonecznych w Polsce, tym bardziej w świetle rosnących systematycznie cen paliw i energii, przy jednocześnie obniżających się kosztach inwestycyjnych ze względu na popularyzację technologii, większą produkcję urządzeń i wzrost liczby producentów oraz dostawców [10,12].



Rys. 10. Dynamika sprzedaży kolektorów słonecznych w wybranych krajach [10,12]

5. Przykłady instalacji kolektorów słonecznych w Polsce

Dzisiaj, praktycznie na każdym kroku spotykamy kolektory słoneczne. Instalowane są najczęściej na dachach domów indywidualnych (rysunek 11), na basenach, na szpitalach, urzędach, kościołach, itp.



Rys. 11. Dom z kolektorami słonecznymi w Golubiu-Dobrzyniu (fot. S. Szymański)⁵

W Polsce, jedno z pierwszych kolektorów słonecznych (pracujące do dzisiaj) założono w 1995 r., w nowobudowanym Ośrodku Edukacji Ekologicznej WILGA w Górznie. Ich zakup i montaż sfinansowany został ze środków Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Toruniu. Urządzenia, pochłaniając energię słoneczną, przetwarzają ją na ciepło, które jest wykorzystywane do ogrzewania wody na potrzeby hotelu OEE WILGA, w szczególności w okresie letnim. Kolektory w Ośrodku Edukacji Ekologicznej zostały zainstalowane nie tylko ze względów ekonomicznych, ale i dydaktycznych. Należy pamiętać, że Ośrodek w ramach prowadzonej edukacji ekologicznej, odwiedzany jest corocznie przez tysiące dzieci i młodzieży [13].

⁵ Podziękowania dla Szymona Szamańskiego za użyczenie zdjęć.



Rys. 12. Kolektory rurowe na Ośrodku Edukacji Ekologicznej „Wilga” w Górznie (fot. R. Koję)

W celu obniżenia kosztów związanych z przygotowaniem ciepłej wody użytkowej w Wojewódzkim Szpitalu im. L. Rydygiera w Toruniu zamontowano kolektory słoneczne. Zadanie zostało zrealizowane w dwóch etapach. W I etapie wykonano kolektory o łącznej powierzchni 20 m² wraz z wybudowaniem nowego węzła cieplnego. W II etapie zadania zainstalowano kolektory słoneczne o łącznej powierzchni 60 m². Kolektory słoneczne zostały zainstalowane na dachu kotłowni głównej szpitala (rysunek 13) [14].



Rys. 13. Kolektory słoneczne w Wojewódzkim Szpitalu im. L. Rydygiera w Toruniu [14]

Do przygotowania ciepłej wody użytkowej zaprojektowano osiem układów po pięć kolektorów zasilających wymienniki pojemnościowe ciepłej wody użytkowej. Wdrożona instalacja pozwala na przygotowanie w ciągu jednej doby do 30 m³ ciepłej wody, co odpowiada energii cieplnej w ilości 8 GJ i w pełni pokrywa zapotrzebowanie szpitala. Oszczędności, jakie szpital uzyskał po zrealizowaniu zadania dotyczą zmniejszenia kosztów zakupu ciepła od dostawcy zewnętrznego o kilkaset tysięcy zł rocznie [14].

Z kolei, inwestycja polegająca na montażu instalacji solarnej na budynku Zespołu Szkół nr 2 w Turznie, była zrealizowana w ramach projektu pod nazwą: „Wykorzystanie energii słonecznej szansą na poprawę jakości środowiska w gminie Łysomice” współfinansowanego ze środków Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2014, Oś priorytetowa 2: zachowanie i racjonalne użytkowanie środowiska, Działanie 2.4 infrastruktura energetyczna przyjazna środowisku. Projekt polegał na dostawie wraz z montażem indywidualnych zestawów płaskich kolektorów słonecznych dla budynków prywatnych oraz budynków użyteczności publicznej administrowanych przez gminę Łysomice. W projekcie wykonano łącznie 609 zestawów solarnych o łącznej powierzchni kolektorów 3922 m², z których 588 zestawów zamontowano na budynkach prywatnych mieszkańców niemal we wszystkich miejscowościach gminy Łysomice, oraz na 21 budynkach użyteczności publicznej w tym przedszkola, świetlice, ośrodki zdrowia i szkoły [15]⁷.

Największą instalacją solarną do podgrzewania ciepłej wody użytkowej w gminie Łysomice może poszczycić się Zespół Szkół nr 2 w Turznie, gdzie zamontowano 22 kolektory słoneczne do dwóch zasobników o pojemności 1000 dm³ każdy. Zamontowane są na aluminiowych zestawach montażowych zgodnie z wytycznymi producenta w kierunku południowym o kącie nachylenia +/- 45°. Kolektory tworzące pojedyncze baterie połączone są ze sobą mosiężnymi złączkami zaciskowym, a graniczne króćce zakończone są separatorami powietrza, umożliwiającymi odpowietrzanie każdej baterii z osobna. Połączenie baterii wykonano z rury miedzianej o średnicy 22 mm, natomiast rurę zbiorczą, łączącą wszystkie baterie wykonano z rury miedzianej o średnicy 35 mm. Instalacja izolowana jest otuliną kauczukową o średnicy 20 mm. Rury znajdujące się na zewnątrz budynku szkoły, oprócz izolacji kauczukowej, osłonięto również taśmą aluminiową samoprzylepną, chroniącą samą izolację przez działaniem promieniowania UV i niszczeniem przez ptaki. Na rurze zasilającej od każdej z baterii, zamontowano regulator przepływów z rotametrem, który służy do kryzowania przepływu glikolu i ustawienia właściwego przepływu dla wszystkich baterii. Różne przepływy powodowałyby nierównomierne pozyskiwanie ciepła z poszczególnych

⁷ Gorące podziękowania dla władz gminy Łysomice, a w szczególności dla pana Karola Adamka za przekazane materiały.

baterii, a co za tym idzie, w niektórych kolektorach dochodziłoby do przegrzania. W celu hydraulicznego zrównoważenia przepływów poprzez poszczególne baterie zaprojektowano układ Tichelmana wspomagany przez zastosowanie zaworów regulacyjno pomiarowych typu AV 23 [15].



Rys. 14. Kolektory na dachu szkoły w Turznie [15]

W obudowie kolektorów zainstalowanych w Turznie umieszczone są otwory (po kilka na górnym i dolnym boku) w celu umożliwienia swobodnej konwekcji powietrza, co pozwala na odparowywanie wilgoci z wnętrza kolektorów. Miedziany absorber o konstrukcji podwójnej harfy z napyłoną wysoko-selektywną powłoką stanowi element główny, pozyskujący ciepło słoneczne przekazywane czynnikowi grzewczemu – glikolowi propylenowemu. Powierzchnia całego absorbera pokryta jest wysokoselektywną powłoką, cienką warstwą galwaniczną czarnego chromu na podłożu niklowym. Kolektor słoneczny posiada na wierzchniej stronie hartowaną szybę solarną o grubości 4 mm, o dużej transmisyjności, co zapewnia sprawność urządzenia jak również, dzięki zastosowaniu materiałów najwyższej jakości, trwałość przez długie lata. Ażeby zapewnić odpowiednią izolację termiczną wewnątrz płyt, między obudową, a absorberem umieszczona jest wata mineralna i folia aluminiowa. Pojemność pojedynczego kolektora to około $1,5 \text{ dm}^3$, a masa około 40 kg [15].

Grupa pompowa wymusza główny obieg w systemie solarnym. Za pośrednictwem układu hydraulicznego grupa ta wprawia w obieg glikol, który ciepło zaabsorbowane w kolektorach oddaje w zasobnikach c.w.u.

Cykl pracy instalacji solarnej rozpoczyna się po osiągnięciu właściwej temperatury czynnika grzewczego (glikolu) mierzone na jednym z dwudziestu dwu kolektorów przy pomocy umieszczonego czujnika PT1000 w kapilarze czwórnika z odpowietrznikiem na granicznym kolektorze w jednej

z baterii. Gdy temperatura na kolektorze (T1) słonecznym jest wyższa niż temperatura wody w zasobnikach dwuwężownicowych (T2) o ustawioną różnicą temperatur (ΔT) 10°C, uruchomiona zostaje pompa obiegu solarnego. Sterownik dzięki płynnej modulacji pracy pompy, załącza i wyłącza pompę gdy różnica pomiędzy temperaturą glikolu mierzona na kolektorze słonecznym a temperaturą wody w zasobniku spadnie do 2°C. Normalna praca układu trwa do momentu uzyskania zadanej temperatury wody w zasobniku (ZTZ) ustawioną dla układu w szkole na wartość 70°C. Kiedy woda osiągnie ZTZ, regulator załącza pompę obiegu solarnego dopiero w momencie kiedy na kolektorach dochodzi temperatura 110°C. W bardzo słoneczne dni, często woda w wymiennikach solarnych osiąga temperaturę blisko 85°C, jest to już maksymalna temperatura jaką może osiągnąć woda w zasobniku, ponieważ sterownik posiada system zabezpieczający, uniemożliwiający osiągnięcie temperatury wrzenia [15].

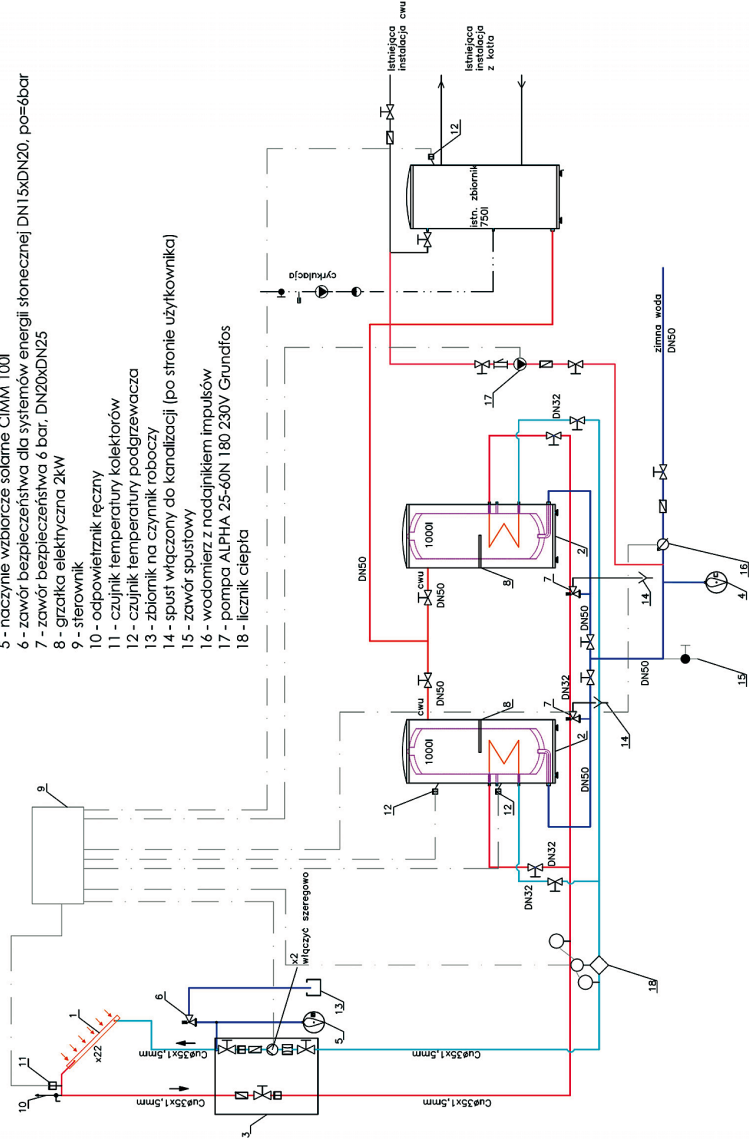
Zasobniki solarne „na wejściu” zasilane są wodą zimną z sieci wodociągowej z dołu na połączeniach gwintowanych, a jako uszczelniacz zastosowano materiały odporne na wysoką temperaturę. Na rurach zasilających zainstalowano zawór zwrotny, który umożliwia przepływ wody tylko w jedną stronę, a w dalszej kolejności naczynie przeponowe, zawór spustowy (umożliwia spuszczenie wody z zasobnika), zawór bezpieczeństwa, zawór odcinający oraz śrubki rozłączne. Na rurze wody zimnej zastosowano również izolację termiczną, co zapobiega powstawaniu i skraplaniu się rosy [15].

Sterownik solarny steruje układem rozszerzonym o istniejący zasobnik 750 l CWU, który podłączony jest do kotłów olejowych. Dzięki zastosowaniu czujnika T3 umieszczonego w górnej części zasobników solarnych odczytujący wartość temperatury wody „na wyjściu” oraz czujnika T4 umieszczonego w istniejącym zasobniku, sterownik analogicznie do sterowania układem glikolowym, steruje załączaniem dodatkową pompką cyrkulacyjną połączoną między zasobnikami solarnymi a istniejącym zasobnikiem. Sterownik załącza pompę w momencie kiedy czujnik T3 wskazuje temperaturę wyższą o minimum 5°C niż czujnik T4, a woda cyrkulując między wymiennikami miesza się do czasu kiedy uzyska przybliżoną temperaturę. Przykładowo, w momencie kiedy woda w zasobnikach solarnych dzięki pracy solarów osiągnęła temperaturę 50°C (T3), a w zasobniku istniejącym jest temperatura wody 40°C (T4), czyli różnica wynosi 10°C, sterownik załącza pompkę cyrkulacyjną, do momentu kiedy temperatura wody w zasobnikach się wyrówna. W takim układzie instalacja solarna podgrzewa w sumie 2750 dm³ wody. Natomiast w okresach roku kiedy uzyski energetyczne z promieniowania słonecznego są niewystarczające do uzyskania temperatury CWU około 45°C, załączany jest kocioł olejowy, który dogrzewa już tylko objętość 750 dm³ istniejącego zasobnika [15].

Schemat technologiczny instalacji kolektorów słonecznych

Zespół Szkół Nr 2 Turzno

- 1 - kolektor GAK 2.0 22złt.
- 2 - wymiennik solarny GALMET 1000l
- 3 - grupa pompowa podwójna ICMA S001
- 4 - naczynie wzbiorcze wodne CIMM 100l
- 5 - naczynie wzbiorcze solarne CIMM 100l
- 6 - zawór bezpieczeństwa dla systemów energii słonecznej DN15xDN20, po=6bar
- 7 - zawór bezpieczeństwa 6 bar, DN20xDN25
- 8 - grzałka elektryczna 2kW
- 9 - sterownik
- 10 - odpowiednik ręczny
- 11 - czujnik temperatury kolektorów
- 12 - czujnik temperatury podgrzewacza
- 13 - zbiornik na czynniki robocze
- 14 - spust włączony do kanalizacji (po stronie użytkownika)
- 15 - zawór spustowy
- 16 - wodomierz z nadajnikiem impulsów
- 17 - pompa ALPHA 25-60N 180 230V Grundfos
- 18 - licznik ciepła



Rys. 15. Schemat technologiczny instalacji solarnej w Turznie [15]

Najbardziej okazałe elementy instalacji solarnej w Turznie to dwa wymienniki solarne o pojemności 1000 dm³ każdy. Wewnątrz znajdują się dwie węzownice, które służą do podgrzewania ciepłej wody poprzez instalację solarną (podłączoną do dolnej węzownicy). Górne węzownice w wymiennikach są przewidziane dla drugiego źródła ciepła, tj. kotłów. Oprócz wymienników węzownicowych ciepła, zasobniki te wyposażone są w trzecie źródło ciepła jakim są grzałki elektryczne o mocy 2 kW. Wnętrze zasobników jest zabezpieczone przed korozją przez emalię ceramiczną oraz poprzez zamontowane we wnętrzu anody magnezowe. Wymiary pojedynczego zasobnika to wysokość: 2050 mm oraz szerokość: 1055 mm. W celu zwiększeniu izolacji termicznej zasobniki pokryte są od zewnątrz twardą pianką poliuretanową oraz okryte tkaniną typu skay. Każdy zasobnik wyposażony jest również w termometr tarczowy wskazujący przybliżoną temperaturę wody w zasobniku w górnej jego części. Urządzeniami zabezpieczającymi układ są naczynia przeponowe, wodne i solarne, ale również zawory bezpieczeństwa. Oba naczynia zastosowane na instalacji w Turznie są pojemności 100 dm³ każde i zabezpieczają układ przed przyrostem objętości cieczy w układzie zamkniętym glikolowym, jak i układzie wodnym [15].

Sterowanie pracą instalacji kolektorów słonecznych prowadzone jest przez sterownik solarny, za pomocą rozmieszczonych zgodnie ze schematem (rysunek 15) czterech czujników temperatur PT1000. Pierwszy z nich (T1) wskazuje temperaturę na kolektorze, drugi (T2) wskazuje temperaturę wody w dolnej części zasobników, trzeci (T3) wskazuje wartość na górnej części zasobników, czwarty umieszczony jest w dodatkowym, istniejącym zasobniku CWU o pojemności 750 dm³, który podłączony jest szeregowo za pomocą pompy przeładowniczej z zasobnikami solarnymi, a docelowo dogrzewany jest również piecami olejowymi. Sterownik wyposażony jest w wyświetlacz LCD, który wskazuje aktualne odczyty temperatury punktów pomiarowych i stan pracy urządzeń. Sterownik reguluje pracę pomp, poprzez płynną modulację napięcia (trymer), aby dostosować prędkość przepływu. Regulator steruje pracą układu w taki sposób aby optymalnie użytkować zadaną temperaturę wody w zasobniku, ale również nie dopuścić do temperatury wrzenia wody. Dodatkowo, sterownik rejestruje ilość uzyskanej energii z promieniowania słonecznego. Posiada również funkcję obrazowania graficznego na wykresach, uzysków energetycznych. Co istotne, sterownik posiada funkcję „urlopową”, funkcja ta zabezpieczająca układ przed przegrzaniem. W czasie niewielkiego użytkowania wody (np. w czasie wakacji), funkcja ta ogranicza ładowanie w dzień, nocą zaś rewersyjnie cyrkulując czynnik grzewczy schładza zasobnik wodny i emituje ciepło poprzez kolektory do atmosfery [15].

Opisane wyżej kolektory w szkole w Turznie, stanowią około 1% wszystkich kolektorów zainstalowanych w projekcie realizowanym na terenie całej

gminy Łysomice. Przewiduje się, że w wyniku realizacji projektu zaspokojone zostanie zapotrzebowanie na energię potrzebną do ogrzania wody użytkowej w 48,6%. Wszystkie 2033 kolektory zamontowane w ramach przedsięwzięcia gminy Łysomice generują ponad 1900 MWh/rok energii z promieniowania słonecznego, co zmniejszy emisję CO₂ o 796,05 Mg/rok [15].

6. Fotowoltaika w Polsce

W przeciwieństwie do kolektorów słonecznych, fotowoltaika praktycznie nie rozwija się w Polsce. Na dzień 30 września 2013 [16] mamy zaledwie 14 małych instalacji fotowoltaicznych o łącznej mocy 1,75 MW. Nasi zachodni sąsiedzi, posiadający minimalnie gorsze warunki słoneczne, mają 35 GW (w 2007 r. „zaledwie” 3,8 GW). Czesi, posiadający 4-krotnie mniejszą powierzchnię mają elektrownie fotowoltaiczne o łącznej mocy 2,5 GW. Maleńka Słowacja ma elektrownie fotowoltaiczne o łącznej mocy 517 MW [17]. Energetyka zawodowa oraz obecny rząd nie są po prostu zainteresowane czystą i tanią energią ze Słońca. Dodatkowe bariery to:

- brak odpowiedniego wsparcia dla fotowoltaiki,
- zawiłe procedury prawno-administracyjne,
- obarczanie inwestora kosztami przyłączenia instalacji do sieci elektroenergetycznej,
- uzyskanie koncesji na wytwarzanie energii elektrycznej jest niezbędnym warunkiem możliwości otrzymania świadectw pochodzenia oraz produkcji energii elektrycznej z OZE. Wydanie koncesji jest bardzo czasochłonne; dodatkowo jest ona wydawana na rzecz przedsiębiorców, co wymusza na osobach fizycznych konieczność zarejestrowania działalności gospodarczej.

Skomplikowany system uzyskiwania pozwolenia na budowę, niejasne przepisy, czy instalacja wymaga takiego pozwolenia, problemy wynikające z nieadekwatnej treści miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego powoduje wydłużenie całego procesu inwestycyjnego, a procedury biurokratyczne zniechęcają do inwestycji w fotowoltaikę. W czasie budowy należy przestrzegać wszelkich procedur, norm budowlanych i BHP przewidzianych przez Prawo budowlane [18]. W przypadku systemów wymagających pozwolenia na budowę trzeba też prowadzić dziennik budowy oraz zatrudnić kierownika budowy. Skutkiem może być poddanie wykonania instalacji PV takim samym rygorom jak realizacja budowy dużego obiektu architektonicznego, co w rezultacie podnosi koszty i wydłuża czas realizacji inwestycji [19].

Należy wyrazić zaniepokojenie praktycznie nie uwzględnieniem fotowoltaiki w „Polityce energetycznej Polski do 2030 r.” oraz w Krajowym Pla-

nie Działań na rzecz OZE. Przewidywania dotyczące mocy zainstalowanej w systemach fotowoltaicznych w Polsce świadczą o ignorancji wobec tego co się dzieje, chociażby u naszych sąsiadów, posiadających porównywalne warunki słoneczne. Nieporozumieniem jest szacowanie mocy nominalnej w Polsce na zaledwie 3 MW w 2020 r. [19].

Prognozy przyznające fotowoltaice całkowicie marginalną rolę, brak możliwości inwestycji w systemy fotowoltaiczne ze środków programu operacyjnego „Infrastruktura i Środowisko” i programu NFOŚiGW dla przedsięwzięć w zakresie odnawialnych źródeł energii świadczy o nieuzasadnionym nieprzychylnym stosunku obecnego rządu do fotowoltaiki [19]. Polskie prawo jest niejasne, nie ma odpowiednich rozporządzeń dotyczących kolektorów słonecznych czy systemów fotowoltaicznych.

Inwestorzy zainteresowani budową farm fotowoltaicznych w Polsce, są blokowani przez zrażone brakiem Ustawy o OZE urzędy. Z każdym dniem opóźnienia uchwalenia ustawy rośnie ryzyko kary finansowej dla Polski za brak wdrożenia dyrektywy o promocji OZE i przekłada się to na coraz większe ryzyko nie uzyskania na czas (lub w ogóle) środków UE na wsparcie OZE w perspektywie finansowej 2014-2020.

Widmo kar przestało być wirtualne – Komisja Europejska pozwała Polskę przed Trybunał Sprawiedliwości UE za niewdrożenie w terminie tzw. dyrektywy energetycznej z 2009 r. Żądana przez Komisję kara przekracza obecnie 51 mln euro. Jeszcze dłużej Polska zwleka z pełną implementacją dyrektywy w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych. W tym wypadku wymiar kary może być jeszcze dotkliwszy – termin transpozycji minął 5 grudnia 2010 r...

7. Przykłady instalacji fotowoltaicznych w Polsce

Nasz przegląd instalacji fotowoltaicznych rozpoczniemy od pierwszej w Polsce elektrowni fotowoltaicznej o mocy 1 MW zlokalizowanej na terenie gminy Wierzchosławice pod Tarnowem. Budowa farmy rozpoczęła się 15 lipca 2011 roku i zakończyła 30 września 2011 roku. Energia produkowana w farmie jest sprzedawana bezpośrednio do sieci energetycznej. Farma składa się z 4445 baterii słonecznych (każda o mocy 225 W), na działce o powierzchni 2 ha. Poszczególne panele zamontowane są na konstrukcji stalowej wbijanej kafarem do ziemi. Energia „spływa” z paneli do przetwornic, które zamieniają prąd stały na prąd zmienny, a następnie przez transformator przesyłany jest do sieci energetycznej [20,21].

W ciągu pierwszego roku pracy farma słoneczna w Wierzchosławicach wyprodukowała około 1000 megawatogodzin prądu. Wcześniej, na podstawie doświadczeń podobnych instalacji w Niemczech prognozo-

wano, że elektrownia wytworzy między 850 a 950 MWh energii. Dzięki temu gmina Wierzchosławice zarobiła w pierwszym roku funkcjonowania farmy około 500 tys. zł na sprzedaży energii elektrycznej i zielonych certyfikatów [20,21].

Jak informują władze gminy, elektrownia cieszy się wielkim zainteresowaniem chcących zaistnieć na rynku fotowoltaiki. Farmę ciągle wizytują potencjalni inwestorzy, którzy pragną na własne oczy zobaczyć jak pracuje elektrownia. Ze względu na dobre wyniki gmina planuje rozbudowę inwestycji. Niedługo, dzięki dodatkowym 3 tys. paneli moc elektrowni zostanie powiększona z obecnego 1 MW do 1,8 MW. Warto dodać, że Energia Wierzchosławice Sp. z o.o. ma plany związane także z energią geotermalną. W tym celu spółka już ogłosiła konkurs ofert na wybór partnera do poszukiwań zasobów wód geotermalnych w gminie [21].

Druga największa elektrownia słoneczna w Polsce o mocy 311 kW i zarazem największa na Śląsku została uruchomiona 19 października 2012 r. w Rudzie Śląskiej, najbardziej górniczym mieście w kraju. Na dachu zbiornika wody należącego do Górnośląskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów zamontowano instalację fotowoltaiczną, która uzyskuje prąd bezpośrednio ze Słońca. Panele o łącznej powierzchni ponad 2100 m² w optymalnych warunkach mogą wyprodukować 300 megawatogodzin energii rocznie, co jest wystarczające do zasilania w energię około 100 rodzin przez cały rok. Pomimo pochmurnej pogody rudzka elektrownia słoneczna bez przeszkód zasilala uroczystość jej otwarcia 19 października 2012 r. [22].

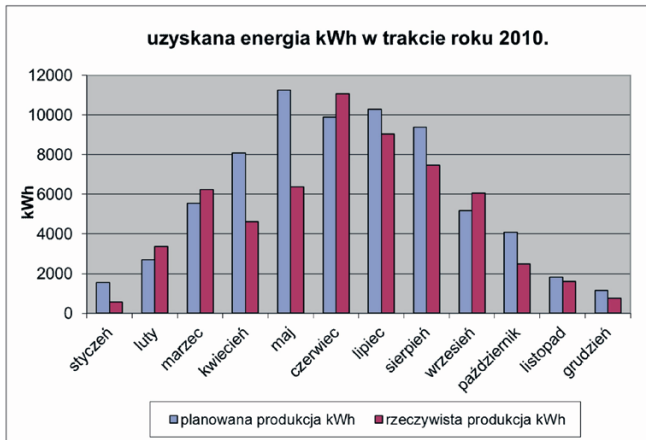
Firma FRoSTA, producent mrożonek, już od ponad 4 lat stosuje własną instalację solarną (rysunek 16). Redukcja rachunków za prąd elektryczny oraz dbałość o środowisko atmosfery były głównym powodem inwestycji. Elektrownia słoneczna o mocy 80,5 kW, zainstalowana na dachu zajmuje powierzchnię blisko 600 m². Energia, pochodząca z instalacji w całości jest wykorzystywana na potrzeby Zakładu. Inwestycja pozwala zaoszczędzić nawet do 30% energii potrzebnej do zapewnienia warunków chłodniczych. Moduły słoneczne firmy Conergy są w całości produkowane oraz dokładnie sprawdzane w odniesieniu do nowego niemieckiego standardu bezpieczeństwa IEC 61730. Szyba solarna o grubości 4 mm oraz solidna aluminiowa rama zapewniają wytrzymałość na poziomie 5400 Pa. Pozwala to na wykorzystanie modułów w bardzo trudnych warunkach [23]⁸.

Na rysunku 17 przedstawiono ilość wyprodukowanej energii elektrycznej w poszczególnych miesiącach w 2010 r. Instalacja w Bydgoszczy jest obiektem zainteresowania wielu inwestorów, chcących stawiać podobne instalacje w Polsce.

⁸ Podziękowania dla firmy FRoStA za przekazane materiały.



Rys. 16. Instalacja fotowoltaiczna, firma FRoStA, Bydgoszcz [23]



Rys. 17. Ilość uzyskanej energii z ogniw fotowoltaicznych, firma FRoStA, Bydgoszcz [23]

Systemy fotowoltaiczne wykorzystuje się coraz częściej do zasilania sygnalizacji świetlnej. W kraju, jeden z pierwszych projektów takiej instalacji zrealizowano w Halinowie pod Warszawą w 1999 r., który działa do dziś. System fotowoltaiczny zasilą oświetlenie znaku D6 „uwaga przejście dla pieszych”. Sygnalizator składa się z podświetlanej od wewnątrz kasey znaku D6, 2 pulsujących świateł ostrzegawczych i lampy doświetlającej przejście dla pieszych. Generator słoneczny składa się z 4 modułów PV o mocy 55 W każdy i sumarycznej powierzchni 1,68 m². Do magazynowania energii wykorzystuje się trzy 12 voltowe, żelowe akumulatory

o pojemności 130 Ah każdy. Akumulatory powalają na pracę całej instalacji przez 10 pochmurnych dni z rzędu. Cały system został ponadto wyposażony w system monitorujący warunki meteorologiczne: całkowite promieniowanie słoneczne w płaszczyźnie horizontalnej oraz temperaturę modułów i otoczenia [24].

W Polsce, pionierem w instalowaniu autonomicznych hybrydowych lamp solarnych (rysunek 18) jest gmina Kowalewo Pomorskie. Na przełomie 2010/11 r. postawiono 83 lampy, w 2013 r. kolejne 97. Lampy pozwalają na znaczne oszczędności, gdyż nie płaci się za prąd elektryczny. Projekt pod nazwą „Montaż systemu oświetlenia zewnętrznego typu solarnego wzdłuż ciągów pieszo-jezdnich na terenie gminy Kowalewo Pomorskie” został dofinansowany ze środków Unii Europejskiej. Jak wspominają władze gminy, na początku było wielu sceptyków, zdarzały się drobne awarie. Obecnie, cały system pracuje bardzo dobrze. Wiele gmin w Polsce jest zainteresowanych wdrożeniem lamp hybrydowych [25,26].



Rys. 18. Latarnia hybrydowa w Kowalewie Pomorskim
(fot. S. Szymański)

Od 2008 roku po Brdzie w Bydgoszczy kursuje solarny statek spacerowy „Słonecznik” (rysunek 19). Pełni on podwójną funkcję: jest środkiem komunikacji miejskiej oraz atrakcją turystyczną Bydgoszczy. Elektryczny napęd „Słonecznika” zasilany jest energią pobieraną tylko i wyłącznie przez baterie słoneczne, dzięki czemu statek jest jednostką w 100% ekologiczną. Na pokładzie mieści się 28 pasażerów oraz dwóch członków załogi, a maksymalna prędkość tej jednostki wynosi 12 km/h. Od 2010 r. po Brdzie pływa „Słonecznik II”, również zasilany energią promieniowania słonecznego, również w dni pochmurne [27].



Rys. 19. Bydgoski Tramwaj Wodny „Słonecznik” [3]

W Polsce, parkometry coraz częściej zasilane są energią Słońca. Przykładowo, w Brodnicy, ogniwa niewielkiej mocy mieszczą się na wysokości około 2 m, na górnej pokrywie parkometru (rysunek 20). Pomimo niewielkiej objętości, ogniwa fotowoltaiczne stanowią alternatywne źródło pozyskania energii potrzebnej do obsługi urządzeń [13].

Na terenie gminy Złotów w woj. wielkopolskim ma powstać jedna z największych elektrowni fotowoltaicznych w Europie. Jeśli wszystko zostanie zrealizowane zgodnie z planem, ogniwa fotowoltaiczne pojawią się w krajobrazie gminy już w przyszłym roku. Inwestycja, która planowana jest na gruntach położonych w obrębie Nowego Dworu oraz Dzierżazna, ma zająć powierzchnię prawie 200 ha. Planowana instalacja będzie wytwarzać energię o mocy 70 MW. Zainteresowany gminnymi terenami inwestor, firma Smart Eco-Wind, powierzył wykonanie konstrukcji jednemu z podwykonawców – złotowskiej firmie Unam, funkcjonującej w branży narzędziowej i metalowej. Panele fotowoltaiczne dostarczy i zamontuje firma Solet [28].



Rys. 20. Parkometry fotowoltaiczne w Brodnicy (fot. R. Koj)

Amber Energia Wytwarzanie Sp. z o.o. otrzymała niedawno 13,9 mln zł dotacji z Regionalnego Programu Operacyjnego na budowę 4 farm fotowoltaicznych w województwie podlaskim o łącznej mocy 4 MW. Realizacja rozpocznie się jeszcze w 2013 r., a jej zakończenie planowane jest w roku 2014. Farmy słoneczne powstaną w miejscowościach: Kolno, Lipsk i Jedwabne. Inwestycja zajmie ponad 9 hektarów powierzchni i rocznie wyprodukuje prąd zapewniający energię elektryczną dla dwóch tysięcy gospodarstw domowych. Firma czeka na decyzję w sprawie przyznania nowych dotacji o wartości ok. 13 mln zł. Środki te zostaną przeznaczone na budowę kolejnych trzech farm słonecznych [29].

8. Ankiety „helioenergetyka w Polsce”

W celu spenetrowania rynku helioenergetyki w Polsce, przygotowano i wysłano w 2013 r. ankiety (głównie w wersji elektronicznej) zarówno do firm jak i odbiorców instalacji solarnych (Załącznik 1 i 2).

W tabeli 1 przedstawiono informacje uzyskane od firm zajmujących się montażem kolektorów słonecznych, zaś w tabeli 2 informacje uzyskane od firm zajmujących się montażem modułów fotowoltaicznych [30]⁹.

⁹ Gorące podziękowania dla Symona Symańskiego za pomoc w opracowywaniu ankiet.

Tabela 1. Wyniki ankiet uzyskane od firm zajmujących się montażem kolektorów słonecznych (1 – stara instalacja C.W.U., 2 – zbyt stary dach, 3 – inny projekt, 4 – zabezpieczenie szczelności dachu, 5 – źle odpowietrzona instalacja, 6 – wyciek ze złączy zaciskowych, 7 – praca na wysokości)

Nr	Rok powstania firmy	Rodzaj montowanych kolektorów słonecznych	Problemy występujące podczas montażu	Zadowolenie z obrotów	Ilość sprzedanych kolektorów (poprzedni rok)	Parametry najczęściej sprzedawanego kolektora
1	2009	płaskie, próżniowe	1	Tak	poufne	2,44 m ² , $n_0=82\%$
2	2010	płaskie, próżniowe	2,3,4	Tak	400 (+100%)	2,44 m ² , $n_0=82\%$
3	2008	płaskie, próżniowe	1	Tak	300 (+60%)	2,44 m ² , $n_0=82\%$
4	2005	płaskie, próżniowe	2,3	Tak	400 (+80%)	1,894 m ² , $n_0=81\%$
5	2006	płaskie	1,4	Tak	(-50%)	2,054 m ² , $n_0=78\%$
6	2004	płaskie	1	Tak	2000 (+100%)	2,054 m ² , $n_0=78\%$
7	2010	płaskie	2,3	Tak	poufne	2,054 m ² , $n_0=78\%$
8	2009	płaskie, próżniowe	5	Tak	(+70%)	1,894 m ² , $n_0=81\%$
9	1998	płaskie, próżniowe	-	Tak	poufne	2,054 m ² , $n_0=78\%$
10	2007	płaskie, próżniowe	1	Tak	150 (-50%)	-
11	2002	płaskie, próżniowe	5	Tak/nie	4933 (+15%)	-
12	2010	płaskie	2,6,7	Tak	64 (+100%)	1,894 m ² , $n_0=81\%$

Tabela 2. Wyniki ankiet uzyskane od firm zajmujących się montażem ogniw fotowoltaicznych (mono – monokrystaliczne, poli – polikrystaliczne; 1 – inny projekt, 2 – zbyt stary dach, 3 – praca na wysokości, 4 – konieczność zabezpieczenia szczelności dachu)

Nr	Rok powstania firmy	Rodzaj montowanych modułów fotowoltaicznych	Problemy występujące podczas montażu	Zadowolenie z obrotów	Ilość sprzedanych modułów (poprzedni rok)	Parametry najczęściej sprzedawanego modułu
1	2008	mono	-	Nie	50 kW	250 W
2	2005	mono, poli	1	Nie	kilkaset kW	12-14%, 120-240 W
3	2007	mono, poli	2,3,4	Nie	250 kW (+500%)	14%, do 250W
4	2006	mono	2	Nie	100 kW	11-15%, 120-200 W
5	2008	mono, poli	1	Nie	150 kW	12%, 250 W
6	2008	mono, poli	1,2	Nie	300 kW	12%, 250 W
7	2007	mono, poli	2,3,4	Nie	kilkaset kW (+100%)	14%, do 250 W
8	2010	mono, poli	2,3,4	Nie	400 kW (+100%)	14%, do 250 W
9	2009	mono poli	1,2	Nie	100 kW	do 250 W
10	2007	mono	1	Tak	100 kW (+300%)	120-200 W
11	2009	mono	1,2	Nie	200 kW	12%, 250 W
12	2007	mono poli	1	Nie	poufne	12%, 250 W

Z przeprowadzonej ankiety wynika, że właściciele firm zajmujących się montażem kolektorów słonecznych płaskich bądź płaskich i próżniowych, są zadowoleni ze swoich przychodów. W 2012 roku większość firm zanotowa-

ła wzrost sprzedaży w porównaniu z poprzednimi latami. Natomiast właściciele firm, które zajmują się instalacjami fotowoltaicznymi, nie są zadowoleni. Argumentują, że jest to związane z brakiem ustawy o OZE. Mimo to, firmy w 2012 roku również odnotowały wzrost sprzedaży. Najczęściej sprzedawane są kolektory słoneczne o sprawności około 80% oraz powierzchni 1,9-2,44 m². W Polsce, najczęściej sprzedawanymi modułami fotowoltaicznymi są moduły o sprawności 12-14% i mocy około 250 W.

Problemy, które występują podczas montażu kolektorów słonecznych oraz modułów fotowoltaicznych to:

- zbyt stary dach, na którym ciężko umieścić konstrukcję wsporczą,
- konieczność zabezpieczenia szczelności dachu,
- błędy w projektach wykonawczych lub budowlanych,
- zły stan instalacji C.W.U.,
- praca na wysokości, oraz
- duży ciężar kolektorów lub modułów.

Reklamacje, które są zgłaszane do firm, dotyczą najczęściej spadku ciśnienia w instalacji, które występują na złączkach przy instalacji C.W.U. Reklamacje zgłaszane są bardzo rzadko – około 4% użytkowników zgłasza reklamacje.

W tabeli 3 przedstawiono informacje uzyskane od użytkowników instalacji solarnych w Polsce.

Tabela 3. Wyniki ankiet uzyskane od osób posiadających instalacje solarne (1 – ochrona środowiska, 2 – dofinansowanie, 3 – oszczędności, 4 – położenie geograficzne, 5 – modernizacja źródła energii)

Nr	Rok założenia instalacji	Koszt instalacji [tys. zł]	Współpraca instalacji z dodatkowym źródłem energii	Zadowolenie z instalacji	Powód zakupu	Czas zwrotu kosztów instalacji [lata]
1	2012	2009	Tak	Tak	1,2	2,5
2	2009	747	Piec CO	Tak	3	10
3	2011	200	Ogrzewanie gazowe	Tak	2,3	15
4	2012	800	Ogrzewanie gazowe	Tak	1,2,4	6
5	2006	263	Piec CO	Tak	-	20
6	2010	521	Piec CO	Tak	2,3	13
7	2010	710	Piec CO	Tak	2,3	8
8	2008	675	Piec CO	Tak	2	15
9	2012	767	Tak	Tak	5	5
10	2012	2127	Piec CO	Tak	2,3	15
11	2011	121	Ogrzewanie gazowe	Tak	2	5
12	2010	50	Piec CO	Tak	1,3	3,5
13	2008	500	Piec CO	Tak	2	5
14	2010	621	Piec CO	Tak	2,3	7
15	2009	470	Ogrzewanie gazowe	Tak	1,3	10
16	2011	534	Ogrzewanie gazowe	Tak	3	7
17	2010	395	Piec CO	Tak	2,3	6
18	2011	279	Nie	Tak	3	12
19	2008	365	Piec CO	Tak	1,3	9

Z otrzymanych ankiet wynika, że użytkownicy są zadowoleni z instalacji oraz użytkowania kolektorów słonecznych i paneli fotowoltaicznych. Instalacja solarna najczęściej współpracuje z kotłem CO. Główne powody, dla których montowano instalacje solarne były następujące:

- oszczędności wynikające z użytkowania instalacji,
- dofinansowanie z różnych instytucji, oraz
- ochrona środowiska.

W Polsce większość instalacji solarnych to instalacje niewielkie, których koszt mieści się w zakresie 20-80 tys. zł. Na naszą ankietę odpowiedzieli właściciele większych instalacji (szkoły, szpitale, urzędy), blisko połowa zamontowanych instalacji solarnych kosztowała w granicach 200-500 tys. zł, 2 instalacje przekroczyły koszt 1 mln zł. Warto podkreślić, że wszyscy użytkownicy są zadowoleni z posiadanych instalacji solarnych, część z nich zamierza dalej inwestować w odnawialne źródła energii.

9. Literatura

1. P.E. Tomaszewski, *Powrót. Rzecz o Janie Czochralskim*, Oficyna Wydawnicza ATUT, Wrocław 2012.
2. P.E. Tomaszewski, *Jan Czochralski – father of the Czochralski method*, Journal of Crystal Growth 236, 1-4, 2002.
3. zasoby Wikipedia Commons.
4. Uchwała Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 7 grudnia 2012 w sprawie ustanowienia roku 2013 Rokiem Jana Czochralskiego.
5. J. Pabis, *Odnawialne źródła energii uzupełnieniem energetyki w rolnictwie*, Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Oddział w Warszawie, Warszawa 2011.
6. E. Majerczak, *Geografia Polski*, Przedsiębiorstwo Handlowo-Wydawnicze Arystoteles Marek Matusiak, Warszawa 2013.
7. H. Lorenc, *Atlas klimatu Polski*, IMiGW, Warszawa 2005.
8. <http://www.imgw.pl/klimat>.
9. <http://energiaodnawialna.net>.
10. I. Jeleń, materiały dostarczone przez firmę Hewalex.
11. www.Solarblog.pl.
12. European Solar Thermal Industry Federation, *Solar thermal markets in Europe*, June 2013.
13. <http://www.eo.org.pl>.
14. M. Szymczak, *Modernizacja gospodarki energetycznej Wojewódzkiego Szpitala Zespołowego w Toruniu na bazie nowoczesnych technologii proekologicznych*, materiały konferencyjne: R. Buczkowski [red.], Osiągnięcia Proekologiczne w Przemśle i Energetyce, VII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna, Toruń 2005.
15. K. Adamek, materiały dostarczone przez gminę Łysomice.
16. URE, *Mapa Odnawialnych Źródeł Energii*, <http://www.ure.gov.pl/uremapoze/mapa.html>.

17. http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy_in_the_European_Union.
18. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r., *Prawo budowlane*, Dz.U. 1994, nr 89, poz. 414.
19. S.M. Pietruszko, *Bariera prawno-administracyjna w procesie inwestycyjnym systemów fotowoltaicznych w Polsce*, Warszawa 2011.
20. M. Wasa, *Pierwsza w Polsce farma PV o mocy 1 MW*, *Magazyn Fotowoltaika* 3, 1, 2011.
21. <http://www.ekonomia.rp.pl/artukul/958542.html>.
22. <http://rudaslaska.com.pl/i,uruchomiono-elektrownie-sloneczna,100,880463.html#ixzz2jxSalQhR>.
23. materiały przekazane przez firmę FROStA.
24. <http://www.pnec.org.pl/smart/pdf/halinow.pdf>.
25. http://torun.gazeta.pl/torun/1,35576,8319479,Unia_dala_pieniadze_gmina_wiatr_i_slonce.html#ixzz2jsKLOSe6.
26. Goniec Kowalewski, Kowalewo Pomorskie, wrzesień 2013.
27. P. Rzymyszkiewicz, B. Igliński, R. Buczkowski, G. Piechota, *Przyszłość energetyczna województwa kujawsko-pomorskiego*, Wyd. UMK, Toruń 2012.
28. <http://www.magazynfotowoltaika.pl>.
29. http://bialystok.gazeta.pl/bialystok/1,35241,13461453,Podlasie_Solar_Park___najwieksza_farma_sloneczna_w.html#ixzz2jg66oCrj.
30. S. Szymański, *Helioenergetyka w Polsce*, praca magisterska, Toruń 2013.

PODSUMOWANIE

Jak już wielokrotnie podkreślano, w ostatnim czasie mamy do czynienia prawdziwym „boomem”, jeśli chodzi o energetykę słoneczną. W Polsce nadal pokutuje przekonanie, że jest to rynek marginalny, nie mający szans na rozwój w naszych szerokościach geograficznych. Tymczasem prawda jest taka, że w ciągu roku dociera do ziemi na terytorium naszego kraju około połowa tej energii, która dociera na równiku. Że nie jest to mało najlepiej świadczy przykład Niemiec. Warto podkreślić, że funkcjonujące w Niemczech instalacje solarne są to niewielkie obiekty, pracujące w rozproszeniu, energia i ciepło zużywane są najczęściej na miejscu, bez strat przesyłowych. W Niemczech w branży związanej tylko z fotowoltaiką zatrudnionych jest około 110 tysięcy osób w około 10 tysiącach firm, które są rozproszone po całym kraju. Dla porównania, w Polsce pracuje około 100 tysięcy górników. W ostatnich latach straszy się Polaków, że odejście od węgla spowoduje ogromne bezrobocie wskutek utraty miejsc pracy przez górników. Rozwój technologii energetyki odnawialnej na pewno pokryje tę lukę, a praca chociażby przy montowaniu i konserwacji ogniw fotowoltaicznych jest dużo łatwiejsza i bezpieczniejsza niż górnika pod ziemią.

Praktycznie wszystkie kraje rozwijają u siebie technologie helioenergetyczne. Szczególnie jest to widoczne w Niemczech, USA i Chinach. Warto tu podkreślić, że najwięcej kolektorów słonecznych montowanych jest w Chinach, a największe elektrownie słoneczne powstają w USA. W Chinach zlokalizowanych jest najwięcej minbiogazowni, a w USA świetnie rozwija się energetyka wiatrowa. Energetyka wiatrowa to obecnie najszybciej się rozwijające źródło pozyskiwania energii w Stanach Zjednoczonych. Przez pierwsze cztery lata administracji prezydenta Obamy produkcja energii pozyskiwanej z wiatru i energetyki słonecznej zwiększyła się ponad dwukrotnie. Ogłoszony przez prezydenta Obamę *Climate Action Plan* zakłada, że rozwijanie czystej, odnawialnej energii z technologii wiatrowej stanowi strategiczny element polityki energetycznej, której zadaniem jest redukcja emisji dwutlenku węgla, dywersyfikacja rodzimej gospodarki energetycznej

i wprowadzenie na rynek nowej kolejnej generacji amerykańskich technologii czystych źródeł energii. Administracja USA po raz kolejny wyznaczyła sobie jako cel podwojenie produkcji energii z odnawialnych źródeł takich jak energia wiatrowa.

W Polsce wobec fotowoltaiki na wzór innych państw europejskich wskazane jest wprowadzenie systemu *feed-in tariff* (bezpośredniego wsparcia). Jednocześnie, konieczne są zmiany legislacyjne związane z istnieniem źródeł niez sieciowanych, które w ogóle nie występują w polskim prawodawstwie. Źródłami tymi są urządzenia/instalacje lub element/y struktury budynku wytwarzające energię, wykorzystywaną jedynie dla potrzeb własnych wytwórców energii. Źródła takie są autonomiczne i pracują na sieć własną wytwórcy. Wsparcie dla źródeł autonomicznych powinno bazować na swobodnym uproszczonym audycie energetyczno-środowiskowym, który określałby najbardziej opłacalne rozwiązania ze względu na redukcję paliwa pierwotnego i redukcję emisji CO₂ z uwzględnieniem efektu ekonomicznego.

Energetyka słoneczna, podobnie jak inne rodzaje energetyki odnawialnej czy konwencjonalnej należy wspierać finansowo, przede wszystkim w formie subsydiów udzielanych z funduszu NFOŚ, funduszy strukturalnych UE, stałej linii kredytowej BOŚ (linia preferencyjnych pożyczek jest uruchamiana obecnie tylko okresowo, co stwarza dużą niepewność wśród inwestorów), wprowadzenie wyraźnej ścieżki w Ustawie Termomodernizacyjnej finansowania energetyki słonecznej i innych OZE przy termomodernizacji budynków, źródeł ciepła i sieci.

Kolejny krok to wsparcie fiskalne w formie ulg podatkowych dla producentów, inwestorów i użytkowników systemów energetyki słonecznej jako mechanizm wynagradzania za wprowadzanie technologii przyjaznej dla środowiska (ulgi podatkowe byłyby równoważone w budżecie przez odpowiednio wprowadzaną formę opodatkowania konwencjonalnych źródeł energii). Szczególnie celowe wydaje się wprowadzenie ulgi budowlanej dla inwestycji związanych z wykorzystaniem dowolnej technologii energetyki słonecznej, a także dostosowanie stawki VAT do stawek promocyjnych stosowanych w UE na elementy struktury budynku stanowiące rozwiązania pasywne, aktywne i urządzenia wykorzystujące energię środowiska, a więc także na pompy ciepła i ich oprzyrządowanie. Powinna zostać wprowadzona dopuszczalną pomoc do 75% kosztów inwestycyjnych na realizację zadań budowlanych związanych z wykorzystaniem słonecznych systemów aktywnych, pasywnych i systemów grzewczych z pompami ciepła, pochodzących z krajowych i zagranicznych funduszy ekologicznych.

Wsparcie administracyjne energetyki słonecznej w Polsce powinno odbywać się na szczeblu regionalnym i lokalnym poprzez wyznaczenie celów ilościowych wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych, tworzenie planów możliwej lokalizacji instalacji, a także zapewnienie wsparcia finansowe-

go dla lokalnych projektów. Większość dotychczasowych inwestycji w energetykę słoneczną wynikało z aktywnego wsparcia władz lokalnych, które chciały promować nowoczesne przyjazne środowisku technologie, a jednocześnie chciały wpływać na dynamikę lokalnego rozwoju. Lokalna pomoc administracyjna powinna wynikać ze wsparcia na szczeblu państwowym, np. w formie przeprowadzania ramowych analiz pozwalających wskazać na najbardziej efektywne energetycznie i ekonomicznie technologie dla całego kraju, jak i dla poszczególnych jego regionów.

Wsparcie badań nad zaawansowanymi technologiami energetyki słonecznej co powinno mieć charakter długookresowy i uwzględniać istniejące trendy europejskie (programy badawcze UE). Konieczne jest zwiększenie poparcia dla badań naukowych w obszarach energetyki słonecznej połączone z zainteresowaniem i współfinansowaniem tych badań przez przemysł, który powinien być bezpośrednio zainteresowany wdrażaniem nowych technologii.

Nie można zapominać o wsparciu informacyjno-edukacyjnym polegającym na szerokiej kampanii edukacyjnej społeczeństwa w zakresie energetyki słonecznej, ukierunkowane na różne grupy społeczne, w tym szczególnie inwestorów, decydentów i zwykłego użytkownika, informujące o zmianach technologicznych i alternatywach dla tradycyjnej energii oraz edukacja mająca za zadanie podnoszenie świadomości społecznej.

Chcielibyśmy podzielić się z Państwem naszymi spostrzeżeniami, dotyczącymi zarówno poprzednich jak i obecnej monografii. Rozpoczynając pisanie serii „Technologie...” sami dosyć sceptycznie podchodziliśmy do zagadnień związanych z energetyką odnawialną, uważając że ma ona znaczenie marginalne. Za każdym razem okazywało się jak bardzo byliśmy w błędzie. Stwierdzaliśmy bowiem, że odgrywa ona ogromną rolę w światowej energetyce, stanowi często jedną z podstawowych gałęzi gospodarki. Są kraje takie jak Norwegia, Litwa, Łotwa, Austria czy Szwecja, które korzystają tylko/głównie z energetyki odnawialnej.

Dla przykładu, na początku lat 70-tych produkcja energii w Szwecji w całości oparta była na paliwach kopalnych. Kryzys naftowy w październiku 1973 r. był dla wszystkich szokiem, również w Szwecji. Wprowadzono wówczas regramentację surowców napędowych, paliw ciekłych i stałych, energii cieplnej z elektrociepłowni oraz strumienia ciepłej wody. Wysoka koniunktura przekształciła się w głęboką i długotrwałą dekoniunkturę. Aby Szwecja mogła pomyślnie kontynuować swój rozwój jako państwo przemysłowe o wysokim standardzie życia, należało wprowadzić nową politykę energetyczną oraz całkowicie nowe myślenie odnośnie pojęcia „paliwo”. Uświadomiono ludziom, że trzeba szanować i oszczędzać energię. Koniecznym było znalezienie nowych alternatywnych źródeł energii.

Dzisiaj, 35 lat później, 43,9% zużywanej energii w Szwecji pochodzi ze źródeł alternatywnych, a nie z paliw kopalnych. Szczególnie dotyczy to ciepła. Ciepło jest zwykle produkowane w kogeneracji z prądem. Ponad 80% ciepła pochodzi ze źródeł odnawialnych [materiały Ambasady Szwecji].

Na zakończenie chcemy Państwu podziękować za przeczytanie naszej monografii. Z radością informujemy, że jesteśmy trakcie przygotowywania kolejnego opracowania „Technologie aeroenergetyczne”. Książka powinna ukazać się w 2014 r.

Załącznik 1

Ankieta dotycząca kolektorów słonecznych / paneli fotowoltaicznych

1. Rok rozpoczęcia działalności na polskim rynku.
2. Rodzaj kolektorów słonecznych / paneli fotowoltaicznych sprzedawanych/montowanych przez Państwa firmę.
3. Problemy występujące podczas montażu.
4. Czy są Państwo zadowoleni z obrotów firmy.
5. Jaką ilość kolektorów / paneli sprzedała/zamontowała Państwa firma w roku 2012, jak to się odnosi do poprzednich lat.
6. Proszę podać parametry najczęściej sprzedawanego kolektora słonecznego / panelu fotowoltaicznego.
7. Czy często są zgłaszane reklamacje na instalowane przez Państwa firmę kolektory / panele i czego dane reklamacje dotyczą.
8. Własne uwagi / spostrzeżenia.

Dziękujemy za wypełnienie ankiety

Załącznik 2

Ankieta dotycząca kolektorów słonecznych / paneli fotowoltaicznych

1. Rok założenia kolektorów słonecznych / paneli fotowoltaicznych i ich powierzchnia.
2. Całkowity koszt instalacji.
3. Czy kolektory / panele współpracują z innymi źródłami ciepła / energii ?
4. Czy są Państwo zadowoleni z instalacji ?
5. Co skłoniło Państwa do zakupu i instalacji kolektorów / paneli ?
6. Po jakim czasie szacują Państwo zwrot kosztów instalacji kolektorów / paneli ?
7. Problemy występujące podczas instalacji i użytkowania.
8. Własne uwagi / spostrzeżenia.

Dziękujemy za wypełnienie ankiety



HERZ PROGRAM DOSTAW



armatura i systemy grzewcze

- zawory termostaticzne
- zawory powrotne
- regulacyjne zawory grzejnikowe
- zawory podpionowe
- regulatory różnicy ciśnienia i przepływu
- systemy przyłączone
- rozdzielacze
- zawory kulowe do wody i gazu
- armatura do wody pitnej
- zawory do klimatyzacji
- złącza zaciskowe i śrubunki
- rury PEX-AL.-PEX
- systemy ogrzewania powierzchniowego



odnawialne źródła energii

- kotły na biomasę
- kotłownie kontenerowe
- pompy ciepła
- systemy solarne

- kotły na biomasę
- kotłownie kontenerowe
- pompy ciepła
- systemy solarne



www.herz.com.pl

HERZ Armatura i Systemy Grzewcze Sp. z o.o.
32-020 Wieliczka, ul. A. Grottgera 58
tel.: 0-12 289 02 20; fax: 0-12 289 02 21
www.herz.com.pl, centrala@herz.com.pl