



**POLSKA AKADEMIA NAUK**  
**Instytut Badań Systemowych**

# **ENERGIA, ŚRODOWISKO | EKONOMIA**

**Wiesław Ciechanowicz**

Warszawa 1995



**ENERGIA, ŚRODOWISKO**  
**I**  
**EKONOMIA**

**Wiesław Ciechanowicz**

Warszawa 1995

Opiniodawcy: Prof. dr hab. inż. Jan Łach  
Prof. dr hab. inż. Jan Madejski  
Członek rzeczywisty PAN

Wydano z wykorzystaniem dotacji  
KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH



~~Bibl. polska~~

43297

Wykonano z oryginałów tekstowych dostarczonych przez autora

© Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 1995

ISBN 83-85847-06-5

Mojemu wychowawcy

Janowi Semce – bojownikowi o polskość Ziemi  
Sztumskiej w czasie plebiscytu, Żołnierzowi Armii Krajowej,  
a następnie więźnowi politycznemu PRL.

# Wstęp

Celem niniejszej monografii jest omówienie zbioru źródeł energii i zbioru technologii jej użytkowania z punktu widzenia możliwości rozwoju sektorów konsumentów i producentów energii. Kładzie się przy tym nacisk na problematykę ochrony środowiska, a także warunki ekonomiczne wprowadzenia tych technologii i źródeł energii do gospodarki narodowej.

Energia jest podstawą rozwoju społeczeństwa. Poziom jej konsumpcji w dużym stopniu świadczy o postępie w rozwoju sił wytwórczych społeczeństwa, a także o postępie technologicznym. Okres lat 1950-70 charakteryzował się szybkim wzrostem konsumpcji energii. Jeżeli podczas całego okresu rozwoju cywilizacji, ludzkość zużytkowała energię w ilości równoważnej ponad 250 mld ton węgla, to 2/3 tej ilości przypada na lata po drugiej wojnie światowej. W 1985 roku łączne zużycie paliw kopalnych, a więc: węgla, ropy i gazu, stanowiło - w przeliczeniu na węgiel - około 11 miliardów ton. Przewiduje się, że zapotrzebowanie na energię może osiągnąć w przeliczeniu na węgiel: 13-15 mld ton w 2000 roku i 40-80 mld ton rocznie przy końcu XXI wieku. W sprostaniu przewidywanemu wzrostowi zapotrzebowania na energię w okresie następnych 30-50 lat znaczny udział będą zapewne miały paliwa kopalne. Znaczący udział może mieć także energia jądrowa, ale pod warunkiem, że będzie akceptowana przez społeczeństwo. Można oczekiwać, że będzie również wzrastał udział takich źródeł odnawialnych, jak energia: słoneczna, biomasy i wiatru.

Obok problemu energii powstaje i narasta problem środowiska naturalnego. W szerokim sensie jest on rozumiany jako związane z użytkowaniem energii, bezpośrednio lokalne oddziaływanie na zdrowie ludzkie, a to poprzez wpływ kwaśnych deszczów, oraz wpływ na biosferę i zmianę klimatu planety w wyniku narastania efektu cieplarnianego, powodowanego emisją dwutlenku węgla do atmosfery.

Z każdym rokiem stają się coraz bardziej zauważalne zagrożenia destrukcji bilansów ekologicznych tak w sensie globalnym jak i lokalnym. Przyczyna takiej sytuacji tkwi we wzrastającym zużyciu energii i strukturze zużycia jej nośników. Powstaje więc pytanie: **Co należy zrobić dziś, ażeby zachować naturę w przyszłości?** Rozwiązania problemu należy poszukiwać między innymi poprzez opracowywanie odpowiednich technologii użytkowania energii i wykorzystywania jej odnawialnych źródeł. Wymagać to jednak będzie niemałych nakładów finansowych. Powstaje więc obok problemu energii i środowiska problem ekonomii. Te trzy wzajemnie powiązane problemy mogą być rozwiązywane z punktu widzenia rozwoju gospodarki narodowej za pomocą badań systemowych, na podstawie których będzie możliwe:

1. *oszacowanie konsekwencji rozwoju sektorów konsumentów i producentów energii dla określonych scenariuszy rozwoju tych sektorów,*
2. *zweryfikowanie czy gospodarka narodowa będzie w stanie ponieść wyżej wymienione konsekwencje przy założonym scenariuszu rozwoju gospodarki,*  
a następnie
3. *w wyniku oceny regionalnego rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego zasugerowanie regionalnej lokalizacji technologii redukcji zanieczyszczeń.*

Wśród szeregu decydentów i pewnej części społeczeństwa panuje konserwatywne przekonanie, iż w warunkach krajowych najkorzystniejsze są dotychczasowe technologie wykorzystywania paliw kopalnych, które są ponadto łatwo akceptowalne. Natomiast kwestia

wykorzystywania energii słonecznej, wiatru czy biomasy jest wciąż traktowana marginesowo, co po części wynika z braku odpowiednich informacji. Jednym z celów niniejszej monografii jest próba przynajmniej częściowego naświetlenia tej tak ważnej problematyki. Rozważane są bowiem zagadnienia: energii, środowiska i ekonomii, które coraz większego znaczenia nabierają w znajdowaniu odpowiedzi na następujące pytanie:

**Jakiego rodzaju decyzje winny być podjęte dziś, ażeby zapewnić w przyszłości odpowiednie warunki rozwoju gospodarki narodowej?**

Chciałbym wyrazić wdzięczność Panom: Profesorowi Janowi Madejskiemu i Profesorowi Janowi Łachowi – recenzentom niniejszej monografii – za szczegółowe i wnikliwe uwagi.

Dziękuję również moim kolegom z Instytutu Badań Systemowych PAN: dr. Piotrowi Holnickiemu, dr. Leonowi Stomińskiemu i mgr. Zygmuntowi Uhrynowskiemu oraz Panu mgr. Wiktorowi Lisowiczowi za pomoc w redagowaniu pracy.

Wiesław Ciechanowicz

# Rozdział 5

## Technologie odnawialnych źródeł energii

*Źródła odnawialne, przy obecnej znajomości technologii ich wykorzystywania, mogą częściowo zastępować energię jądrową, względnie po odpowiednim przetworzeniu, mogą częściowo łagodzić zapotrzebowanie na ropę i gaz ziemny. W rozdziale omawia się jedynie technologie wykorzystywania energii słonecznej, energii wiatrów i biomasy. Nie omawia się technologii wykorzystywania pozostałych źródeł odnawialnych, takich jak: energia wnętrza oceanów, fal morskich, gorących źródeł energii wnętrza skorupy ziemskiej i energii rzek.*

### 5.1 Uwagi wstępne

Z punktu widzenia ochrony środowiska zbyt intensywne użytkowanie paliw kopalnych może poprzez działanie efektu cieplarnianego powodować zmiany klimatu w skali kuli ziemskiej, a także zagrażać zdrowiu ludzkiemu. Jedną z konsekwencji wykorzystywania paliw jądrowych jest i będzie konieczność magazynowania odpadów radioaktywnych przez wiele setek lat. Wykorzystywanie energii słonecznej, wiatru i biomasy nie zagrażałoby środowisku naturalnemu. Jednakże o tym, w jakim stopniu mogłyby być one wykorzystywane w przyszłości, będą decydować technologie, które będą musiały współzawodniczyć z technologiami paliw kopalnych i jądrowych. O technologiach odnawialnych źródeł energii będzie mowa w niniejszym rozdziale. Omawiając poszczególne technologie przedstawi się na podstawie dostępnych informacji zasadę, stan rozwoju, efekty ekonomiczne, wpływ na środowisko i znaczenie.

### 5.2 Technologie energii słonecznej

Światło słoneczne, jako nieograniczone źródło energii, nie zanieczyszczające środowiska, jest powszechnie dostępne pod warunkiem, że potrafimy wykorzystywać je efektywnie. Problem wykorzystywania energii słonecznej sprowadza się do pozyskiwania jej i przetwarzania w energię elektryczną lub ciepło. Stwarza to problemy techniczne i ekonomiczne, które do chwili obecnej nie są zadawalająco rozwiązane.

Istnieją dwie zasadnicze metody pozyskiwania energii słonecznej. Są to:

- metoda pasywna, i
- metoda aktywna.

Metoda pasywna może być wykorzystywana w gospodarce komunalno-bytowej i dotyczy systemów ogrzewania lub klimatyzacji budynków. Budynki mieszkaniowe mogą być zaprojektowane w taki sposób, ażeby minimalizować straty ciepła w okresie zimowym.

Metoda aktywna polega na pozyskiwanie energii słonecznej w postaci:

- promieniowania cieplnego, lub
- promieniowania świetlnego,

Ażeby pozyskiwać energię pod postacią promieniowania cieplnego, stosowane są odpowiednie kolektory słoneczne. Dla pozyskiwania energii słonecznej w postaci



promieniowania świetlnego należy stosować ogniwa fotowoltaiczne. Pierwsze wykorzystują zjawisko promieniowania ciepłego, drugie zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne.

W rozdziale zostaną omówione kolejno:

- systemy pasywne wykorzystywania energii słonecznej,
- technologie wykorzystywania energii słonecznej w postaci promieniowania ciepłego i promieniowania świetlnego,

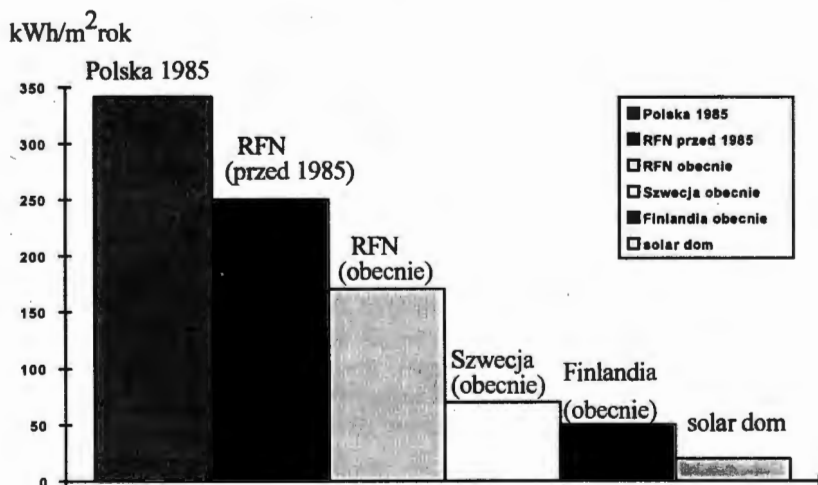
Zamieści się uwagę o rozwoju technologii sztucznej fotosyntezy.

### 5.3 Systemy pasywne wykorzystywania energii słonecznej

Systemy pasywne wykorzystywania energii słonecznej w gospodarce mieszkaniowej były opracowywane w Danii, RFN, we Włoszech, Norwegii, Szwajcarii, Wielkiej Brytanii, USA i Japonii. Głównym przedmiotem badań było opracowanie domów słonecznych - technologii budowy domów mieszkalnych z pasywnym wykorzystywaniem energii słonecznej [5.1 - 5.8].

Głównym elementem domów słonecznych są tak zwane ściany słoneczne, a także stosowanie właściwej izolacji budynków.

Ściany słoneczne mają za zadanie umożliwić absorpcję promieniowania ciepłego słonecznego, magazynowanie i rozpraszanie ciepła. W ścianach tych stosowano ruchome izolacje [5.1] lub materiały posiadające własności akumulatorów ciepło-chemicznych [5.2]. Najbardziej znaną koncepcją systemu pasywnego w RFN jest dom jednorodzinny nazywany DOMUS-solar house [5.3, 5.4]. Począwszy od 1982 roku był testowany w Lubece. Do 1976 roku w USA zbudowano 200000 "słonecznych" domów mieszkalnych i 15000 budynków komercyjnych [5.6]



Rys. 5.1 Średnie zapotrzebowanie na ciepło grzewcze w kWh/m<sup>2</sup>r w jednorodzinnych budynkach dla Polski -1985, RFN -1985, obowiązujące obecnie w Szwecji, Finlandii i dla przyszłych domów słonecznych.

Właściwa izolacja budynków pozwala znacznie zmniejszyć zapotrzebowanie na ciepło grzewcze. W 1985 roku średnie zapotrzebowanie na ciepło grzewcze jednostkowe w jednorodzinnych budynkach w Polsce wynosiło 342 kWh/m<sup>2</sup>rok [5.9]. W RFN wielkość ta w starym budownictwie oraz w nowym według norm obowiązujących 1990 roku wynosiła

średnio odpowiednio 250 i 170 kWh/m<sup>2</sup>r. W tym samym czasie w Szwecji i Finlandii obowiązujące normy jednostkowego zapotrzebowanie na ciepło stanowiły odpowiednio 70 i 50 kWh/m<sup>2</sup>r. Przewiduje się, że w przyszłych domach pasywnych średnie zapotrzebowanie na ciepło grzewcze będzie osiągać wartość 20 kWh/m<sup>2</sup>r [5.10]. Na rys. 5.1 przedstawiono średnie jednostkowe zapotrzebowanie na ciepło grzewcze w jednorodziennym budynku dla Polski-1985, RFN-1985, obowiązujące obecnie w RFN, Szwecji, Finlandii i dla przyszłych domów słonecznych.

W ramach programu Międzynarodowej Agencji Energii, IEA, "Solar Heating and Cooling Programme, Task VII", opracowano tak zwany Transparent Insulation Material, TIM. Materiałem tym okłada się ściany budynku, szczególnie ściany nasłonecznione. Działa on nie tylko jako izolacja ścian budynku, ale równocześnie jako "zawór jednokierunkowy" przepuszczający ciepło promieniowania słonecznego, nagromadzone w płycie TIM, do wnętrza budynku [5.11].

## 5.4 Technologie przetwarzania promieniowania słonecznego

### 5.4.1 Promieniowanie cieplne

Każde ciało o temperaturze wyższej od bezwzględnego zera emituje promieniowanie cieplne, które jest jednym z rodzajów promieniowania elektromagnetycznego. W niższych temperaturach wysyłane są głównie promienie czerwone, o długości fali około 860 nm (jeden nanometr, nm, jest równy 10<sup>-9</sup>m). Jednakże w głównej mierze wysyłane są niewidzialne dla oka promienie podczerwone. Na skali długości fal elektromagnetycznych obejmują one szeroki zakres od 10<sup>6</sup> do 10<sup>3</sup> nm.

Do ilościowej oceny zdolności każdego ciała do wysyłania światła o określonej częstotliwości  $\nu$  w pewnej temperaturze  $T$  służy wielkość fizyczna zwana *emisyjnością*  $\epsilon_{\nu T}$  danego ciała.

Charakterystyką zdolności ciała do pochłaniania energii padającego na nie światła jest *absorbcyjność*  $A_{\nu T}$ . Dla ciała doskonale czarnego  $A_{\nu T} = 1$ .

W 1859 roku Kirchoff ustalili prawo noszące jego imię. Prawo to głosi: *stosunek emisyjności ciała do jego absorbcyjności zależy od substancji i równa się emisyjności ciała doskonale czarnego w danej temperaturze dla danej częstotliwości*. Jeżeli emisyjność ciała doskonale czarnego oznaczymy przez  $\epsilon_{\nu Tc}$ , prawo to możemy przedstawić wzorem

$$\epsilon_{\nu Tc} = \frac{\epsilon_{\nu T}}{A_{\nu T}} \quad 5.1$$

W 1884 roku Boltzmann wykazał, że *całkowita emisyjność ciała doskonale czarnego jest proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury bezwzględnej*

$$\epsilon = \sigma * T^4 \quad 5.2$$

Prawo to nazywa się prawem Stefana-Boltzmanna. Doświadczalnie zostało ono ustalone przez Stefana w 1879 roku. Współczynnik proporcjonalności  $\sigma$  nazywa się stałą Stefana. Dla wszystkich ciał doskonale czarnych  $\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 * \text{K}^4$ .

Ciało składa się z olbrzymiej ilości atomów, każdy z nich zachowuje się jak oscylator - źródło promieniowania elektromagnetycznego. Każdy atom - źródło promieniowania drga z różną częstotliwością. Dlatego promieniowanie ogrzanego ciała zawiera wszelkie możliwe częstotliwości, a zatem i długości fali. Zadanie dotyczące rozkładu energii promieniowania ciała doskonale czarnego pomiędzy różnymi długościami fali, to znaczy zadanie dotyczące widmowego składu promieniowania, odegrało wybitną rolę w rozwoju podstawowych idei fizyki współczesnej. Rozwiązanie tego zagadnienia spowodowało stworzenie fizyki kwantowej, na gruncie której tłumaczy się również zjawisko fotoelektryczne.

Wyjście z trudności, związanych z problemami promieniowania ciepłego ciała doskonale czarnego, znalazł w 1900 roku wybitny fizyk Max Planck. Wysunął on hipotezę, według której ciało doskonale czarne emituje i absorbuje światło nie w sposób ciągły, lecz w postaci skończonych porcji energii - kwantów. Wielkość kwantu okazała się według Plancka wprost proporcjonalna do częstotliwości światła, to jest do jego najważniejszej charakterystyki falowej. Energia kwantu, jak to teoretycznie wykazał Planck, powinna wynosić

$$\epsilon_0 = h \cdot \nu \quad 5.3$$

gdzie  $\nu$  - częstotliwość światła,  $h$  - stała Plancka, stała ta jest wielkością uniwersalną równą  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ .

Promieniowanie padające na pewne ciało może zostać przez nie pochłonięte, przepuszczone lub odbite. Energia promieniowania pochłonięta przez ciało zwiększa jego energię wewnętrzną i może być z kolei znowu wypromieniowana. Energia odbita od ciała lub przepuszczona przez nie może natrafić na inne ciało i zostać przez nie pochłonięta. Jeżeli z całej energii promieniowania  $Q$ , padającej na ciało, część  $Q_a$  zostaje pochłonięta, część  $Q_r$  odbita, część  $Q_p$  zaś przepuszczona, to oczywiście słuszna jest zależność

$$Q_a + Q_r + Q_p = Q \quad 5.4$$

Każde ciało nie tylko pochłania promieniowanie padające, lecz samo je wysyła i dopiero różnica energii wysyłanej i pochłanianej decyduje o wymianie energii z otoczeniem.

### 5.4.2 Kolektory słoneczne

Rozważmy kolektor słoneczny w postaci cienkiej płaskiej płyty leżącej na doskonałym izolatorze i całkowicie cieplnie izolowany od otoczenia. Taki kolektor będzie tracił ciepło jedynie w wyniku promieniowania. Przyjmijmy, że natężenie promieniowania słonecznego wynosi  $P$ . Jeżeli kolektor będzie absorbował część tego promieniowania, określoną przez absorbcyjność  $A_T$ , wówczas będzie on podgrzewany do momentu uzyskania temperatury równowagi zgodnie z prawem Stefana-Boltzmann'a. Przy takim warunku promieniowanie odbijane będzie równoważyc promieniowe absorbowane, co można wyrazić zależnością

$$A_T \cdot P = \epsilon_T \cdot \sigma \cdot T^4 \quad 5.5$$

Stąd uzyskuje się temperaturę równowagi kolektora

$$T^4 = \frac{A_T \cdot P}{\epsilon_T \cdot \sigma} \quad 5.6$$

co oznacza, że temperatura równowagi rośnie w miarę jak maleje emisyjność kolektora.

Dla oceny wartości temperatury równowagi, założmy, że wartość natężenia promieniowania wynosi 625 watów na  $\text{m}^2$ , co jest mniejsze od wartości natężenia promieniowania jakie występuje w klimacie tropikalnym. Zakładając, że  $A_T / \epsilon_T = 1$ , wówczas temperatura równowagi przyjmuje wartość  $322,5 \text{ K} = 49,5^\circ\text{C}$ .

Nawet gdyby przedstawioną wartość uzyskano dla rzeczywistych warunków i tak ciepło przy tej temperaturze nie miałoby większego bezpośredniego (bez stosowania pompy ciepłej) zastosowania. Podwyższenia tej temperatury można dokonać zwiększając sprawność kolektora w wyniku:

- zwiększania stosunku absorbcyjności do emisyjności kolektora poprzez odpowiedni dobór powierzchni kolektora, a także

- koncentrując promieniowanie słoneczne poprzez zogniskowanie natężenia promieniowania padającego na dużą powierzchnię kolektora na małej powierzchni odbiornika ciepła.

Stosunek przekroju poprzecznego powierzchni kolektora do powierzchni przekroju ogniska, oznaczony symbolem  $C$ , stanowi współczynnik koncentracji. Współczynnik ten jest jednym z parametrów charakteryzujących poszczególne rodzaje kolektorów słonecznych. Drugim parametrem jest temperatura czynnika przejmującego ciepło absorbowane. Poniżej scharakteryzowano rodzaje kolektorów z punktu widzenia współczynnika koncentracji i temperatury czynnika roboczego (rys. 5.2).

#### 1. Kolektory niskotemperaturowe:

- płaskie, gdy absorbentem jest płyta metalowa,  $T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $C=1$ ,
- płaskie, próżniowe, z absorbentami umieszczonymi w szklanych rurkach próżniowych, ponad  $T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $C=1$ ,

#### 2. kolektory średnotemperaturowe soczewkowe:

- paraboliczne, o kształcie parabolicznych rynien,  $T=320\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $C=50$ .
- kuliste, o kształcie kulistych kielichów,  $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $C=200$ ,

#### 3. kolektory wysokotemperaturowe w formie nastawnych lusterek, heliostatów, które koncentrują promieniowanie słoneczne na zbiorniku umieszczonym na wieży, kojarzone z układem:

- turbiny parowej,  $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $C=500$ ,
- turbiny gazowej  $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $C=1500$ ,

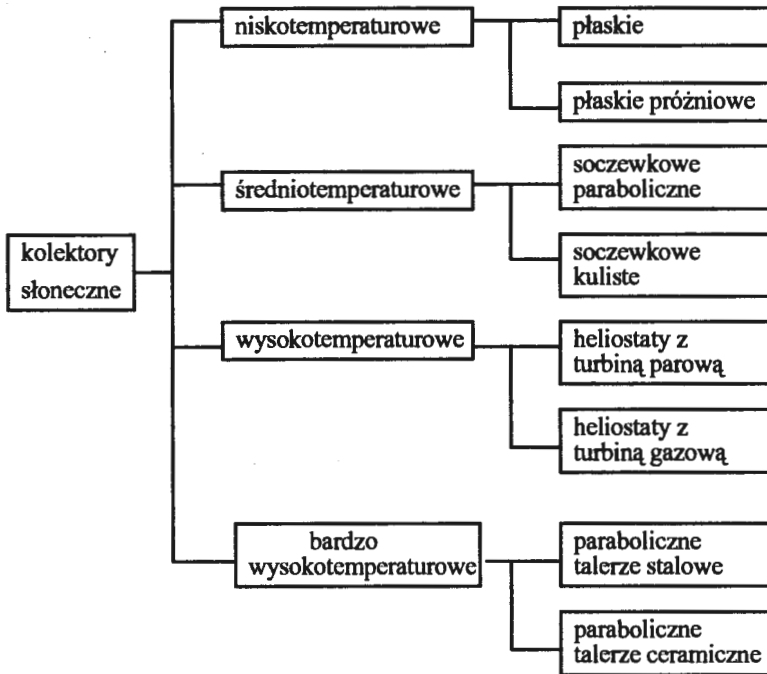
#### 4. kolektory bardzo wysokotemperaturowe, w postaci parabolicznych talerzy, koncentrujące promieniowanie słoneczne wokół swoich ognisk, gdy układ absorbujący ciepło jest wykonany z:

- specjalnej stali,  $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $C=3000$ ,
- ogniotrwałej ceramiki,  $T=1200 - 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $C=6000 - 10000$ .

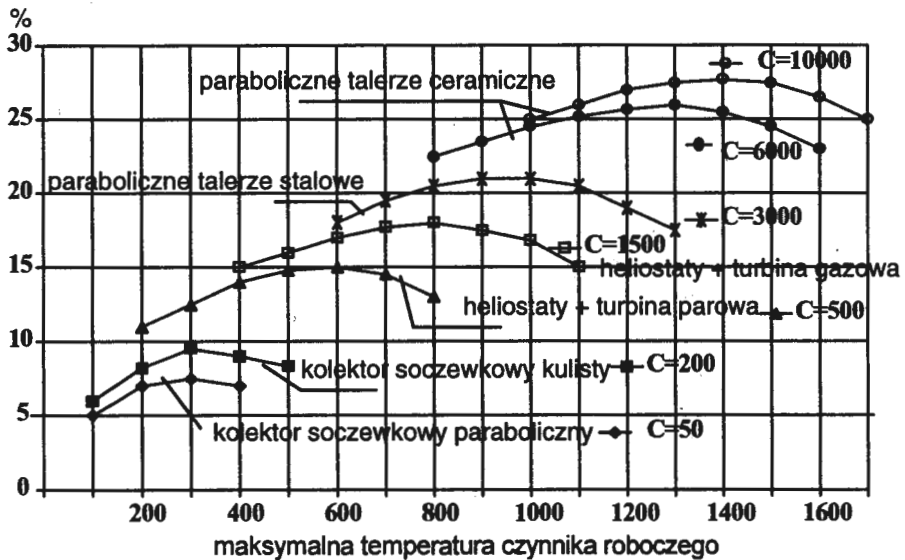
Na rys. 5.3 przedstawiono sprawność ogólną kolektorów w funkcji maksymalnej temperatury czynnika roboczego dla wyżej wyszczególnionych rodzajów kolektorów w funkcji wartości współczynnika koncentracji.

Kolektor płaski, opanowany technologicznie, stanowi płytę metalową poczerzoną, pokrytą powłoką szklaną lub plastikową. Promieniowanie słoneczne, przenikając przez przezroczystą powłokę, jest absorbowane przez płytę metalową ogrzewając ją. Ciepło z kolektora przenika do czynnika chłodzącego w postaci wody lub powietrza. W kolektorze płaskim próżniowym absorbent jest zamknięty w próżniowych rurkach szklanych. Kolektory płaskie lub płaskie próżniowe wspólnie z pompami, zbiornikiem magazynowania ciepła i urządzeniami kontrolnymi tworzą słoneczny niskotemperaturowy system ogrzewania, wykorzystywany głównie do dostarczania wody gorącej i ogrzewania.

W kolektorze soczewkowym parabolicznym czynnik chłodzący przepływa przez rurę umieszczoną w rynnie. Promienie słoneczne odbijane od lustrzanej powierzchni rynny ogrzewają czynnik znajdujący się w rurze. Na podobnej zasadzie funkcjonuje kolektor soczewkowy kulisty. Kolektory soczewkowe paraboliczne lub kuliste są stosowane w tak zwanych farmach słonecznych, obejmujących wiele indywidualnych kolektorów soczewkowych. Ciepło średnotemperaturowe może być wykorzystywane bezpośrednio względnie może być gromadzone. Około 30 % ciepła wykorzystywanego w przemyśle stanowi ciepło średnotemperaturowe.



Rys. 5.2 Rodzaje kolektorów słonecznych



Rys. 5.3. Sprawność ogólna kolektorów w funkcji maksymalnej temperatury czynnika roboczego dla wybranych wartości współczynnika koncentracji.

Kolektory wysokotemperaturowe są wykonywane jako zestawy lusterek słonecznych - heliostatów. Koncentrują one promieniowanie słoneczne na zbiorniku umieszczonym na

więzy. Temperatura pary w zbiorniku może osiągać 500 °C. Właściwe położenie luster słonecznych względem słońca zapewniają odpowiednie mechanizmy układu sterowanego maszyną cyfrową. Ciepło może być wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej w konwencjonalnej turbinie parowej.

Ciepło uzyskiwane przez kolektory bardzo wysokotemperaturowe mające kształt parabolicznych talerzy mogą być wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej lub w niektórych dziedzinach przemysłu, gdzie są wymagane wysokie temperatury, na przykład w produkcji paliw syntetycznych. Poniżej podano przykłady zastosowania wyżej wymienionych rodzajów kolektorów w systemach grzewczych lub systemach wytwarzających energię elektryczną.

### **5.4.3 Kolektory płaskie**

W ramach VII-go programu Międzynarodowej Agencji Energii zapoczątkowano w 1976 roku badania nad opanowaniem centralnych słonecznych systemów grzewczych z sezonowym gromadzeniem ciepła (central solar heating plants with seasonal storage). Uczestniczyły w nim następujące kraje: Kanada, Szwajcaria, Republika Federalna Niemiec, Włochy, Holandia, Finlandia, Szwecja i USA. W każdym z wymienionych krajów w ramach indywidualnych programów, wspólnie koordynowanych, realizowano doświadczalnie wyżej wymieniony system. Wyniki trzeciej fazy projektu przedstawiono w pracy [5.12].

Omawiany centralny system słoneczny obejmuje znaczną grupę jednostek mieszkaniowych - budynków indywidualnych. Na każdym budynku są umieszczone płaskie kolektory słoneczne o dużej efektywności. Schemat takiego systemu w zbudowanym osiedlu Lauchacker w Stuttgarcie przedstawiono na rys. 5.4. Ciepło z kolektorów jest odprowadzane do wspólnego zbiornika wodnego umieszczonego w ziemi i magazynowane. Badano doświadczalnie trzy rodzaje magazynowania w ziemi:

- magazynowanie wody lub mieszaniny wody ze żwirem w zbiorniku odizolowanym od góry i po bokach, rys. 5.5, które mogą być ogrzewane do 95°C,
- magazynowanie bezpośrednio w ziemi poprzez system rurociągów sięgający do 40 metrów, lub w przypadku skał do 150 metrów, gdzie złożę może być ogrzewane do 90°C, rys. 5.6,
- magazynowanie w kurzwawce podziemnej, rys. 5.7.

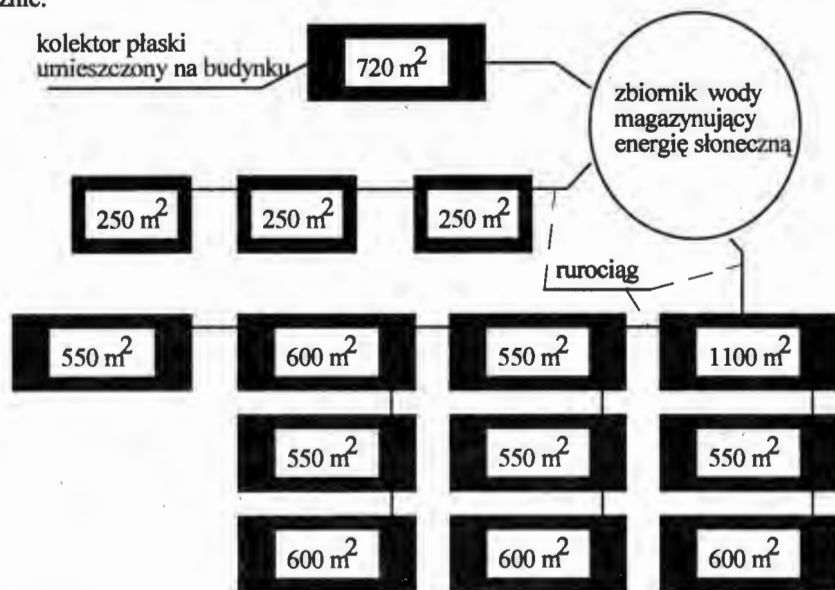
Magazynowane ciepło jest wykorzystywane do celów grzewczych i do dostarczenia gorącej wody. Wspólna centralna siłownia dostarcza ciepło grzewcze do budynków. Każdy budynek posiada własne urządzenie zaopatrywania w gorącą wodę. System grzania słonecznego może być wspomagany dodatkowym podgrzewaczem, dla którego bilans ciepła pokazano na rys. 5.8, lub wspomagany pompą ciepłą. Rozważano dwa warianty napędu pompy ciepłej przy wykorzystywaniu energii elektrycznej (rys. 5.9) i gazu (rys. 5.10). Jak wynika z przedstawionych bilansów ciepła na rys. 5.9 i 5.10, pompa ciepła napędzana silnikiem diesla zasilanym gazem zużywa mniej energii pierwotnej aniżeli zasilana bezpośrednio energią elektryczną. Źródłem zimnym pompy może być zbiornik wodny lub bezpośrednio czynnik chłodzący kolektory.

Przedstawiony centralny słoneczny system cieplny wspomagany pompą ciepłą był realizowany w następujących miejscowościach: Scarborough - Kanada; Kerava - Finlandia; Uniwersytet Stuttgart, Stuttgart Lauchacker - RFN; Treviglio - Włochy; Groningen - Holandia; Ingelstad, Kullavik, Lambohov, Lyckebo, Studsvik - Szwecja; Vaulruz - Szwajcaria. Poniżej podaje się niektóre wyniki badawcze.

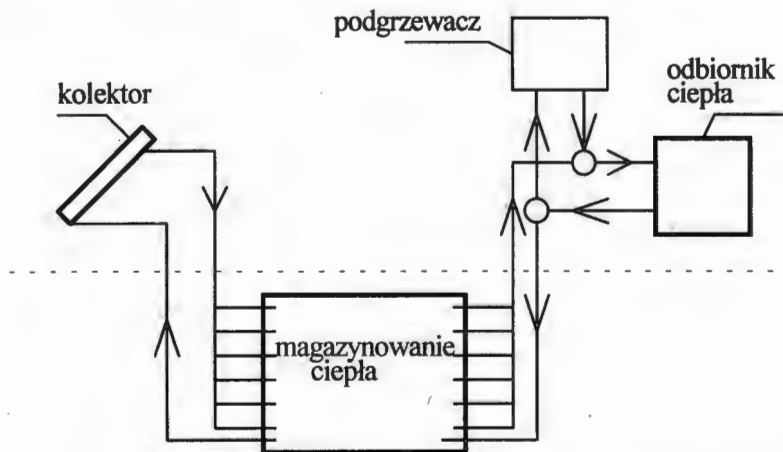
#### **Finlandia - Kerava Solar Village**

Kerava Village jest położona w odległości 30 km od Helsinek. Średnia temperatura powietrza wynosi: + 5,4°C w roku, -3,2°C w grudniu, +14,3°C w czerwcu. Centralny

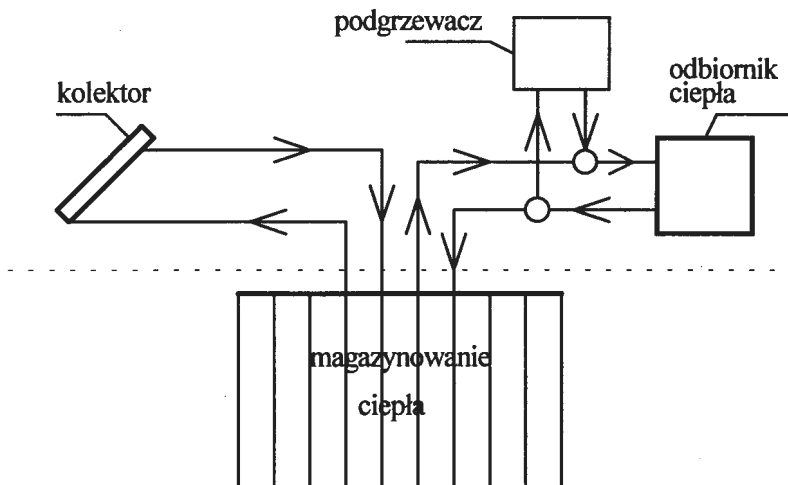
słoneczny system obejmował 44 mieszkania o zapotrzebowaniu ciepła w ilości 0,55GWh rocznie.



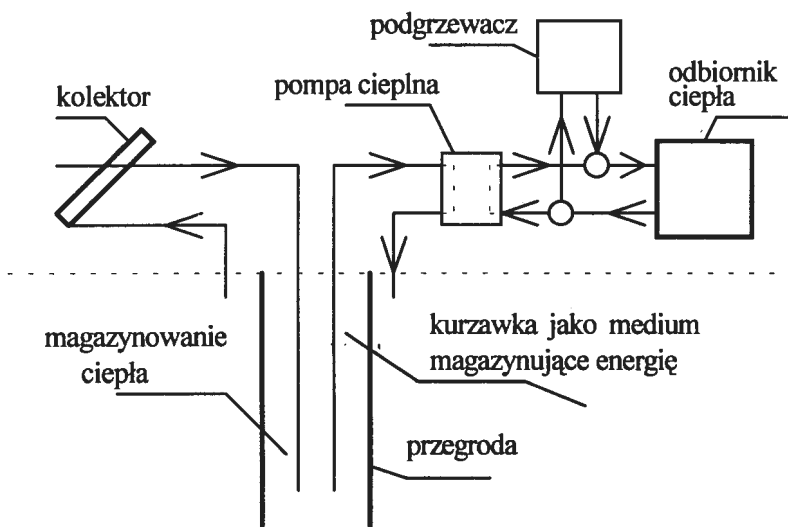
Rys. 5.4 Schemat centralnego słonecznego systemu grzewczego z sezonowym gromadzeniem ciepła w zbudowanym osiedlu Lauchacker w Stuttgarcie, RFN.



Rys. 5.5 Schemat centralnego systemu grzewczego z magazynowaniem ciepła w wodzie lub w mieszaninie wody ze żwirem w zbiorniku umieszczonym w ziemi i z izolacją od góry i po bokach.

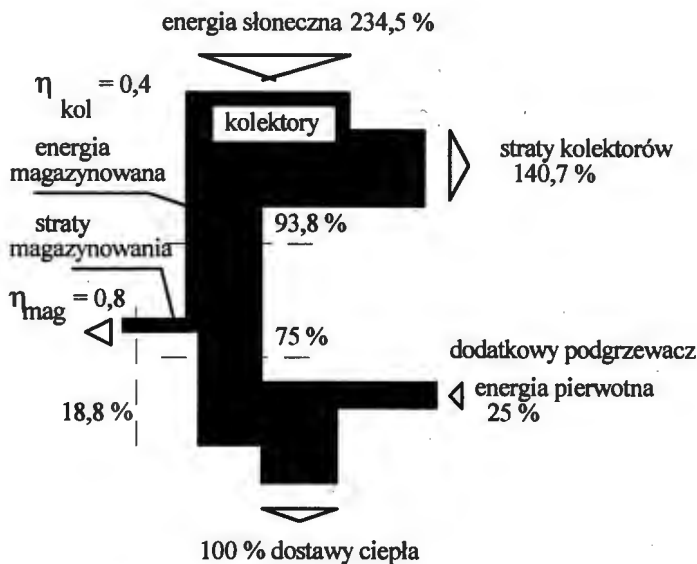


Rys. 5.6 Schemat centralnego systemu grzewczego z magazynowaniem ciepła bezpośrednio w ziemi poprzez system rurociągów sięgający do 40 metrów lub w przypadku skał do 150 metrów.

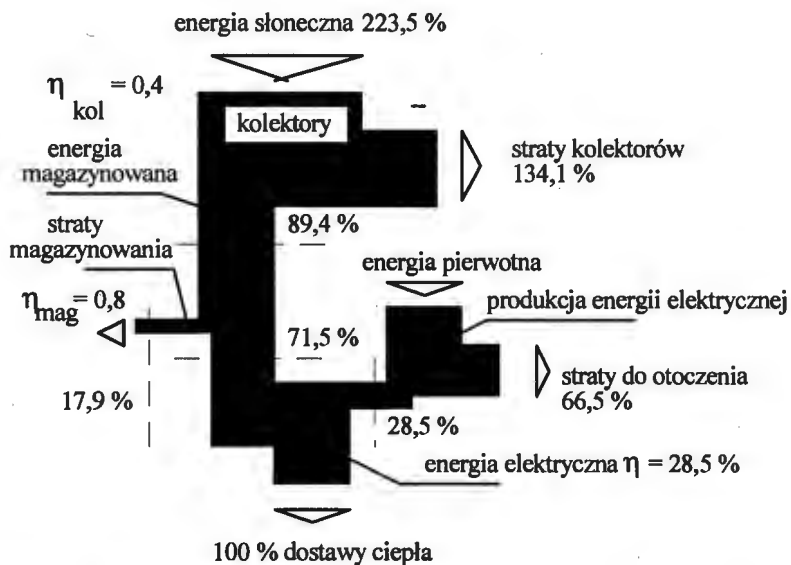


Rys. 5.7 Schemat centralnego systemu grzewczego z magazynowaniem ciepła bezpośrednio w ziemi - kurzawce poprzez system rurociągów sięgający w głąb kurzawki, ze wspomaganie pompą ciepłą.

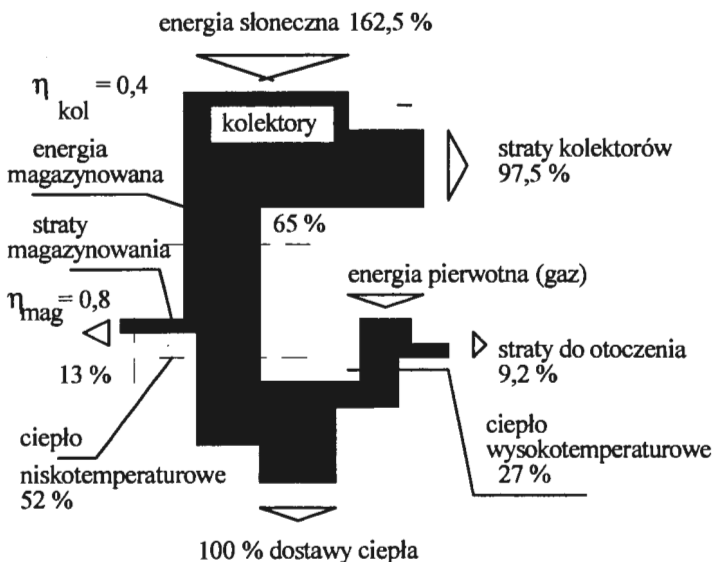




Rys. 5.8 Bilans ciepła dla centralnego słonecznego systemu grzewczego z sezonowym gromadzeniem ciepła i wspomaganiami dodatkowym podgrzewaczem wody.



Rys. 5.9 Bilans ciepła dla centralnego słonecznego systemu grzewczego z sezonowym gromadzeniem ciepła i wspomaganiami pompą ciepłą zasilaną energią elektryczną.



Rys. 5.10 Bilans ciepła dla centralnego słonecznego systemu grzewczego z sezonowym gromadzeniem ciepła i wspomaganie pompą ciepłą napędzaną silnikiem diesla zasilanym gazem.

#### Szwecja - Studsvik, Ingelstad, Lambohov, Lyckebo.

Badano następujące centralne słoneczne systemy: Studsvik, Ingelstad Ia, Ingelstad Ib, Ingelstad Ic, Lambohov, Lyckebo. W tabelicy 5.1 zestawiono niektóre dane charakteryzujące wyżej wymienione systemy.

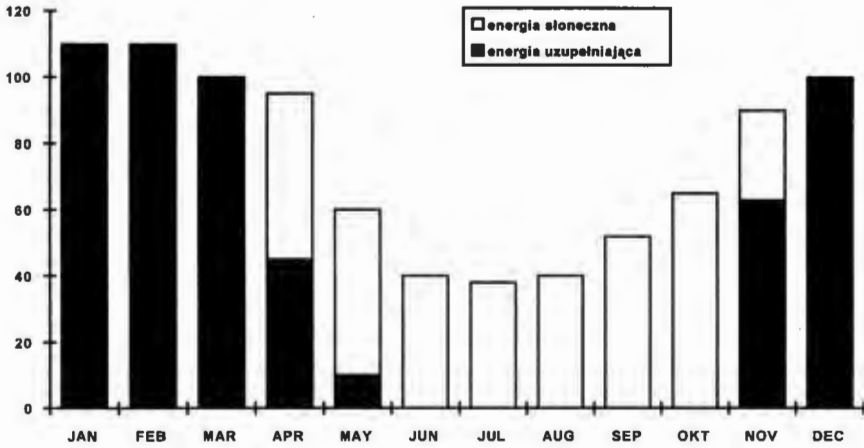
Tabela 5.1 Niektóre dane istniejących centralnych słonecznych systemów istniejących w Szwecji.

	rok startowy	powierzchnia kolektora m <sup>2</sup>	objętość zbiornika wodnego m <sup>3</sup>	roczne obciążenie MWh
Studsvik	1979	120	640	37
Ingelstad Ia	1979	1320	5000	1160
Ingelstad Ib	1984	1425	5000	920
Ingelstad Ic	1987	2425	5000	920
Lambohov	1980	2700	10000	900
Lyckebo	1983	28800	10500	8500

Na rys. 5.11, 5.12 podano miesięczne bilanse ciepła uzyskiwanego z kolektorów, przekazywanego do odbiorców i ciepła uzupełniającego dostarczanego z części konwencjonalnej, obejmującej pompę ciepłą, odpowiednio dla Ingelstad Ib i Ic. W wyniku prowadzonych doświadczeń między innymi stwierdzono.

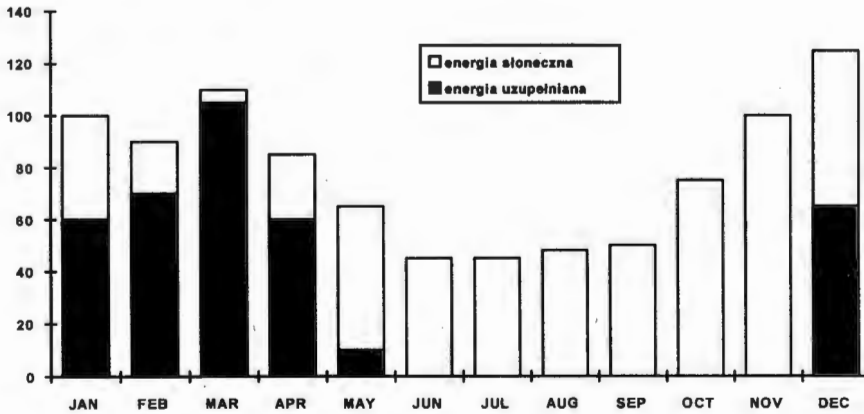
- Na podstawie zdobytej wiedzy centralny słoneczny system grzewczy z sezonowym magazynowaniem i wspomagany pompą ciepłą może zaspakajać w 75 % zapotrzebowanie na ciepło w jednostce mieszkaniowej. Pozostałe zapotrzebowanie powinno być pokryte przez uzupełniający system grzewczy.

MWh/miesiąc °C



Rys. 5.11 Miesięczne bilanse ciepła uzyskiwanego z kolektorów, przekazywanego do odbiorców i ciepła uzupełniającego dostarczanego z części konwencjonalnej obejmującej pompę ciepłą w MWh/miesiąc na °C dla Ingelstad Ib .

MWh/miesiąc °C



Rys. 5.12 Miesięczne bilanse ciepła uzyskiwanego z kolektorów, przekazywanego do odbiorców i ciepła uzupełniającego dostarczanego z części konwencjonalnej obejmującej pompę ciepłą w MWh/miesiąc na °C dla Ingelstad Ic.

- Pierwsze centralne systemy słoneczne będą wymagały subsydiów rządowych w wysokości około 20 % kosztów inwestycyjnych.

W konkluzji raportu zbiorczego, obejmującego wszystkich uczestników programu, oceniono, że centralny słoneczny system grzewczy może być technicznie realizowalny i mógłby współzawodniczyć z paliwami kopalnymi, gdy dostawa ciepła byłaby większa aniżeli 50 GJ/rok, lub gdyby system ten zasiliał około 2000 jednostek mieszkaniowych.

#### **5.4.4 Kolektory soczewkowe paraboliczne i kuliste**

W USA zbudowano elektrownię słoneczną, wykorzystującą kolektory soczewkowe paraboliczne, o mocy 30 MW<sub>e</sub>. Cykl inwestycyjny wynosił 18 miesięcy [5.13].

Kolektor soczewkowy kulisty o średnicy 65 stóp jest eksploatowany od 1980 roku w Crosbyton, Texas, USA. Badano urządzenia przejmujące ciepło w różnych warunkach natężenia promieniowania słonecznego i temperatury [5.14].

#### **5.4.5 Heliostaty**

Technologia obejmująca układ heliostatów, koncentrujący promieniowanie na zbiorniku umieszczonym na wieży, i turbiny parowej jest stosunkowo dobrze opanowana. Czynnione są wysiłki w kierunku opanowywania wyższych temperatur. Jedną z pierwszych elektrowni słonecznych, wykorzystującą heliostaty, była elektrownia "Solar one" o mocy 10 MW<sub>e</sub>, eksploatowana od 1984 roku przez firmę Southern California Edison [5.15]. W szwajcarskich Alpach zainstalowano elektrownię słoneczną o mocy 100 MW<sub>e</sub>. Zawiera ona 10000-cy heliostatów, każdy o powierzchni 50 m<sup>2</sup>.

#### **5.4.6 Kolektory paraboliczne**

Kolektor paraboliczny, w postaci talerza parabolicznego, umożliwia uzyskiwanie bardzo wysokich temperatur. Przy obecnie osiągalnych technologiach materiałów, bardzo wysokotemperaturowe ciepło może być wykorzystywane w turbinie gazowej Brytona do wytwarzania energii elektrycznej. Istnieje koncepcja umiejscowienia odbiornika ciepła i turbiny w ognisku talerza. Ażeby zwiększyć czas wykorzystywania systemu w ciągu roku, proponuje się instalować dodatkowo komorę spalania paliw kopalnych (pyłu węglowego lub gazu). Kolektory tego typu są rozwijane w USA i RFN [5.16 - 5.22].

#### **5.4.7 Efekty ekonomiczne**

Dotychczas kolektory płaskie znalazły największe zastosowanie w USA. Według przeprowadzonych analiz ekonomicznych [5.23,5.24] koszty wytwarzania wody gorącej i ogrzewania mieszkań są w wielu częściach USA zbliżone do ogrzewania prądem elektrycznym. Oczekuje się, że kolektory tego typu będą mogły konkurować z ropą lub gazem wykorzystywanym do celów grzewczych.

Całkowity koszt ciepła generowanego przez słoneczny system grzewczy z sezonowym magazynowaniem i wspomaganie pompą cieplną oceniono w Szwecji na 0,62 \$/kWh (1989). W tym czasie koszt ciepła wytwarzanego w konwencjonalnym kotle opalanym gazem wynosił 0,44 \$/kWh [ 5.12].

W tablicy 5.2 zamieszczono koszty inwestycyjne kolektorów, magazynowania i pomp ciepłych dla okresów 1983-84, 1989, 2000 wynikające z analizy ekonomicznej przeprowadzonej dla oceny centralnego słonecznego systemu grzewczego z magazynowaniem ciepła w ramach VII-go programu Międzynarodowej Agencji Energii [5.12].

Według cen z 1977 roku wymagane nakłady finansowe na rozwój elektrowni ciepłych z heliostatami kształtowały się w USA następująco:

1. koszt urządzenia badawczego o mocy 5 MW - 25 mln \$ [5.25],
2. koszt elektrowni pilotowej o mocy 10 MW 130 mln \$ [5.25],
3. koszt elektrowni demonstracyjnej o mocy 100 MW 350 - 400 mln \$ [5.26].

Łączne nakłady wynosiły więc około 550 \$ (1977). Według wstępnej oceny koszty

Tablica 5.2 koszty inwestycyjne kolektorów, magazynowania ciepła i pomp ciepłych

	1983-85	1989	2000
koszty inwestycyjne kolektora płaskiego $\$/m^2$			
50 domów	245	250	200
200 domów	245	250	170
1000 domów	245	183	133
koszty inwestycyjne magazynowania ciepła w wodzie w zbiorniku umieszczonym w ziemi $\$/m^3$			
rozmiar "mały" $m^3$	5000	3000	3000
koszt "rozmiar mały"		70	60
koszt "rozmiar duży"		50	30
koszty inwestycyjne magazynowania ciepła bezpośrednio w rozpadlinach skalnych $\$/m^3$			
rozmiar "mały" $m^3$	50000	50000	50000
koszt "rozmiar mały"	48	28	28
koszt "rozmiar duży"	10	20	20
koszty inwestycyjne magazynowania bezpośrednio w ziemi poprzez system rurociągów $\$/m^3$			
skała	30	60	60
głina	30	30	30
koszty inwestycyjne magazynowanie ciepła bezpośrednio w ziemi - kurzawce $\$$			
"rozmiar typowy"	150000	150000	150000
koszty pomp ciepłych $\$/kW$			
50 domów		370	
200 domów		240	
1000 domów		125	

Tablica 5.3 Niektóre dane prognostyczne dla elektrowni słonecznej z kolektorami parabolicznymi typu rynną lustrzana z przeznaczeniem lokalizacji w Północnej Afryce i Hiszpanii.

Lokalizacja elektrowni- Północna Afryka/Hiszpania	1990	2005	2025	2050
natężenie promieniowania słonecznego $kWh/m^2 r$	2500/1900	2500/1900	2500/1900	2500/1900
moc turbiny MW	30	80	300	300
współczynnik wykorzystania mocy w ciągu roku h/r	2066/1800	3600	3600	3600
długość cyklu inwestycyjnego r	1	1	1	1
koszty inwestycyjne DM/kW 2 DM = 1\$	222/250	182/222	129/149	97/111
koszt energii elektrycznej Dpf/kWh	28/37	15/18	12/14	10/12

inwestycyjne słonecznych elektrowni ciepłych mogą zawierać się w granicach 1200 - 2800  $\$/kW$  (1977). Możliwości obniżenia kosztów inwestycyjnych zależą od możliwości zredukowania kosztów heliostatów. Stanowią one około 60 % całkowitych kosztów. Według

[5.27] koszty inwestycyjne elektrowni słonecznej o mocy 100 MW wykorzystującej heliostaty, realizowanej w Szwajcarii, miały wynosić 2254 \$/kW (1980). W tym czasie koszty inwestycyjne konwencjonalnych elektrowni węglowych wahały się w granicach 500 - 1000 \$/kW. Według [5.23] elektrownie słoneczne z kolektorami soczewkowymi parabolicznymi mogłyby konkurować w określonych warunkach z elektrowniami konwencjonalnymi około 2000 roku.

W opracowaniu [5.28], wykonanym na wniosek specjalnej komisji Parlamentu RFN przez następujące instytucje: Ludwig-Bolkow Systemtechnik, Ottobrun, Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt, Stuttgart, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, Monachium, podano między innymi prognozy parametrów ekonomicznych dla elektrowni słonecznych z kolektorami parabolicznymi typu rynny lustrzane i heliostaty z przeznaczeniem lokalizacji w Północnej Afryce i Hiszpanii. Niektóre z tych danych zestawia się w tablicach 5.3, 5.4.

Tablica 5.4 Niektóre dane prognostyczne dla elektrowni słonecznej z kolektorami parabolicznymi typu heliostaty z przeznaczeniem lokalizacji w Północnej Afryce i Hiszpanii.

Lokalizacja elektrowni- Północna Afryka/Hiszpania	1990	2005	2025	2050
natężenie promieniowania słonecznego kWh/m <sup>2</sup> r	2500/1900	2500/1900	2500/1900	2500/1900
moc turbiny MW	30	100	200	200
współczynnik wykorzystania mocy w ciągu roku h/r	2066/1800	3600	3600	3600
długość cyklu inwestycyjnego r	2	2	2	2
koszty inwestycyjne DM/kW 2 DM = 1 \$	326/448	220/295	118/148	83/109
koszt energii elektrycznej Dpf/kWh	49/77	18/24	11/14	9/11

## 5.5 Technologie przetwarzania światła słonecznego

### 5.5.1 Podstawy fizyczne budowy fotoogniw

W 1905 roku Einstein rozwinął i pogłębił idee Plancka dotyczące promieniowania cieplnego. Einstein doszedł do wniosku, że światło powinno nie tylko być pochłaniane, ale również rozchodzić się w przestrzeni w postaci oddzielnych porcji energii - kwantów - pola elektromagnetycznego. Kwanty te nazywają się inaczej fotonami. Rozchodzenie się światła nie jest traktowane, według teorii Einsteina, jako ciągły proces falowy, lecz jako strumień oddzielnych cząstek - fotonów, poruszających się z prędkością światła  $c$ . W świetle monochromatycznym o częstotliwości  $\nu$  wszystkie fotony mają jednakową energię, równą  $h\nu$ . Absorbpcja światła polega na tym, że fotony przekazują całą swoją energię atomom i cząsteczkom substancji.

Masa fotonu w istotnym stopniu różni się od masy ciał makroskopowych i mas innych cząstek elementarnych. Różnica ta polega na tym, że foton nie ma masy spoczynkowej  $m_0$ . Brak masy spoczynkowej fotonu wskazuje na to, że stworzone przez Einsteina kwantowe pojęcia dotyczące natury światła bynajmniej nie są powrotem do korpuskularnej teorii Newtona, przyjmującej istnienie dwóch różnych rodzajów materii: substancji zbudowanej z korpuskuł - cząstek i pola elektromagnetycznego, którego fale stanowią promieniowanie elektromagnetyczne.

Masę cząstki świetlnej - fotonu - należy traktować jako "masę polową". Znaczący to, że światło ma masę związaną z polem elektromagnetycznym fali świetlnej. Jeżeli we wzorze  $E=mc^2$  przez  $E$  rozumie się energię pola elektromagnetycznego fali świetlnej, to przez  $m$  należy rozumieć masę pola elektromagnetycznego tej fali. Dochodzimy w ten sposób do bardzo ważnego wniosku. Nie tylko substancja ma energię i masę. Energię i masę ma również pole elektromagnetyczne.

Oprócz energii i masy foton ma pęd  $p_f$ . Związek energii fotonu z jego pędem wynika z ogólnego wzoru teorii względności

$$E_f = c \sqrt{p_f^2 + m_0^2 c^2} \quad 5.7$$

Dla fotonu  $m_0=0$  i

$$p_f = \frac{E_f}{c} = \frac{h\nu}{c} = m_f c \quad 5.8$$

gdzie  $m_f$  masa fotonu

Przypomnijmy, że przez liczbę falową  $k$  w optyce rozumie się liczbę długości fal układających się na długości  $2\pi$  metrów, a więc  $k=2\pi/\lambda$ . Wzór 5.8 można przepisać następująco:

$$p_f = h \frac{\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} k = \hbar k \quad 5.9$$

gdzie  $\hbar = h/2\pi$  stała Plancka.

W 1924 roku Louis de Broglie doszedł do wniosku, że dwoista natura światła powinna rozciągać się nie tylko na fale świetlne - fotony, ale i na cząstki materii - elektrony. Hipoteza de Broglie'a sprowadza się do tego, że elektron którego korpuskularne właściwości (ładunek, masa) zbadane są od dawna i stały się właściwościami powszechnymi, zachowują się w określonych warunkach jako fala. Hipoteza de Broglie'a znalazła potwierdzenie doświadczalne w 1927 roku.

W zrozumieniu istoty półprzewodników ważną rolę odgrywa znajomość niektórych elementów teorii pasmowej ciał stałych. To z kolei wymaga znajomości właściwości falowych cząsteczek.

### Fale materii

Właściwości falowe cząsteczek substancji i probabilistyczny, statystyczny sens fal de Broglie'a prowadzi do tego, że opis ruchu mikrocząsteczek w mechanice kwantowej ma swoisty charakter nieklasyczny. W mechanice klasycznej Newtona ruch ciała albo cząstki pod działaniem siły opisuje się za pomocą drugiego prawa Newtona. W mechanice kwantowej można jedynie mówić o prawdopodobieństwie znajdowania się cząstki w danej chwili czasu w danym punkcie przestrzeni, a dokładniej mówiąc w nieskończenie małej objętości  $\Delta V$ . Prawdopodobieństwo to określa się kwadratem amplitudy fal de Broglie'a. Wprowadza się pewną funkcję zwaną funkcją falową  $\Psi$ , będącą funkcją zmiennych przestrzennych i czasu. Wówczas prawdopodobieństwo tego, że cząstka znajduje się w nieskończenie małej objętości  $\Delta V$ , jest proporcjonalne do kwadratu modułu funkcji  $\Psi$ , co zapisuje się w postaci

$$\Delta w = |\Psi|^2 \Delta V \quad 5.10$$

Wielkość  $|\Psi|^2$ , nazywana również gęstością widmową, określa natężenie fal de Broglie'a.

Funkcja falowa jest podstawową charakterystyką stanu mikroobiektów badanych w mechanice kwantowej. Spełnia ona równanie Schrodingera (które należy rozwiązać, aby

znaleźć funkcję falową oraz odpowiadającą tej funkcji wartość energii). Korzystając z tego równania można przeprowadzić jeden z najbardziej fundamentalnych dowodów fizyki współczesnej na to, że energie elektronów mogą przyjmować tylko określone wartości dyskretne. W języku mechaniki kwantowej znaczy to, że elektrony znajdują się w określonych stanach energetycznych.

### Kwantowy opis półprzewodnika [5.29,5.30]

Gdybyśmy zadali pytanie w duchu fizyki klasycznej, gdzie dokładnie znajduje się jakiś konkretny elektron, to na gruncie mechaniki kwantowej nie dostalibyśmy jednoznacznej odpowiedzi. Jeśli bowiem elektron jest opisany prostą falą "sinusoidalną", a zatem ma ściśle określony pęd, to jego umiejscowienie, jako fali jest zupełnie nieokreślone. Można skonstruować taką falę, której różna od zera amplituda jest zawarta w pewnym skończonym obszarze przestrzeni, ale będzie ona wówczas złożeniem kilku fal prostych o różnych długościach. Nie będzie ona zatem opisywać elektronu o ściśle określonym pędzie. Mechanika kwantowa podaje dokładny związek pomiędzy przedziałami nieokreśloności położenia i pędu cząstki w swej słynnej zasadzie nieokreśloności Heisenberga.

Jedną z konsekwencji tej zasady jest ograniczoność miejsca dla elektronów. Dla każdego przedziału pędu istnieje w danej objętości ściśle określona liczba stanów kwantowych, w których mogą znajdować się elektrony. Ponadto, w każdym stanie mogą przebywać co najwyżej dwa elektrony. Różne stany kwantowe swobodnego elektronu możemy opisać różnymi wartościami jego energii kinetycznej.

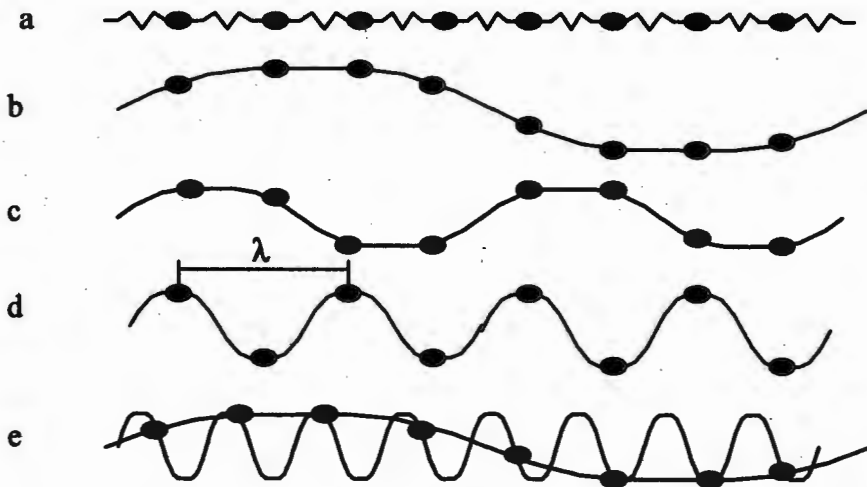
Dla uproszczenia rozpatrzmy zachowanie się elektronu w jednowymiarowym, nieskończenie długim kryształce reprezentowanym przez łańcuch równoległych do siebie atomów (rys.5.13 a). Przyjmijmy, że indeks "a" oznacza odległość pomiędzy sąsiednimi atomami. Weźmy pod uwagę fale sprężystą rozchodzącą się w łańcuchu, falę jaka powstałaby gdyby w mocno napięty sznur uderzyć z góry dłonią. W łańcuchu mogą rozchodzić się fale o najrozmaitszych długościach w dwóch różnych kierunkach. Chwilowe wychylenia poszczególnych atomów łańcucha dla prostych fal sinusoidalnych o różnych długościach są przedstawione na rys.5.13. Kolejne wykresy odpowiadają malejącym wartościom  $\lambda$ , czyli wzrastającym długościom wektora falowego. Krzywa na rys.5.13 d przedstawia falę o długości równej podwójnej odległości pomiędzy sąsiednimi atomami, a więc taką, w której para sąsiednich atomów drga przeciwobnie. Dla tej fali  $\lambda = 2a$  i  $k = \pi/a$ . Każdej fali o wektorze falowym leżącym w przedziale od 0 do  $\pi/a$  odpowiada jeden, ściśle określony rozkład chwilowych wychyleń atomów. Tu dochodzimy do osobliwej własności ruchu falowego w ośrodku nieciągłym. Jeżeli w sposób analogiczny do poprzedniego przedstawimy fale jeszcze krótsze, to okaże się, że nie tworzą one wcale nowych konfiguracji atomów, które nie byłyby już uwzględnione w przedziale  $\langle 0, \pi/a \rangle$ . Fale, których wektory falowe różnią się o całkowitą wielokrotność  $2\pi/a$ , są fizycznie nierozróżnialne, a zatem są identyczne. Ta właściwość, która odnosi się równie dobrze do fali elektronowej w kryształce, pozwala zrozumieć różnicę w zachowaniu się swobodnego elektronu i elektronów w sieci krystalicznej [5.29].

Energia kinetyczna swobodnego elektronu jest określona zależnością  $E = m v^2/2 = p^2/2m$ , co można zapisać jako

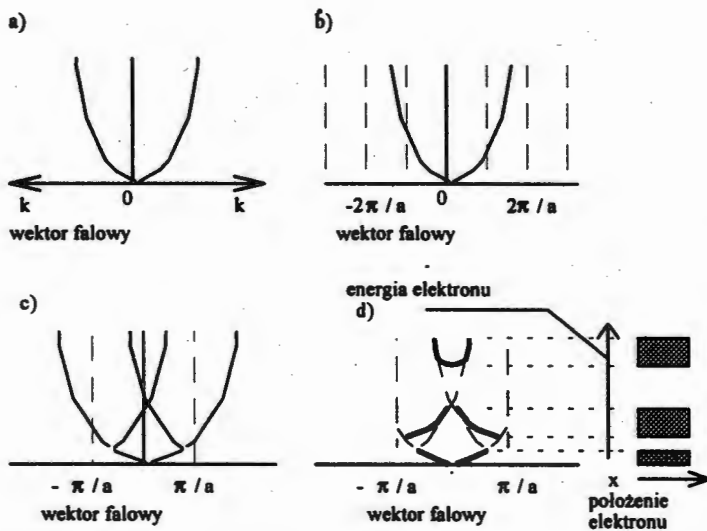
$$E = (1/2\pi)^2 (h^2 k^2/2m) = h^2 k^2/2m \quad 5.11$$

Wykres energii kinetycznej w funkcji wektora falowego (pędu) jest parabolą. Relacja pomiędzy energią elektronu a jego wektorem falowym, to jest funkcją  $E(k)$  ma w fizyce ciała stałego fundamentalne znaczenie. Można wyznaczyć z niej prędkość elektronu jako pierwszą





Rys 5.13 Poprzeczne fale sprężyste o malejącej długości  $\lambda$  w jednowymiarowym łańcuchu atomowym.



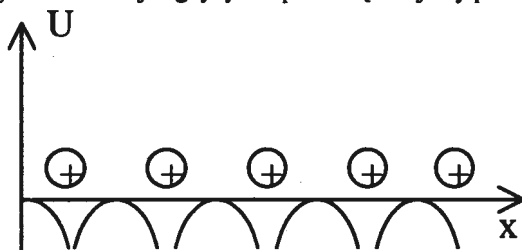
Rys 5.14 Jak tworzą się pasma energii dozwolonej i wzbronionej: a/ wykres energii kinetycznej swobodnego elektronu w funkcji wektora  $k$ , b/ ten sam wykres dla prawie swobodnego elektronu w kryształ; zaznaczone są strefy zmienności wektora  $k$ , c/ ten sam wykres sprowadzony do pierwszej strefy, d/ uwzględniono modyfikację wywołaną jonami sieci, e/ symboliczne przedstawienie pasm energetycznych.

pochodną  $E(k)$  po  $k$ , i masę elektronu jako odwrotność drugiej pochodnej, oczywiście z pewnymi współczynnikami. Jeśli założymy, że jony sieci krystalicznej w ogóle nie oddziałują na ruch elektronu, to wykres energii kinetycznej elektronu w naszym

jednowymiarowym kryształ będzie taką samą parabolą, jak dla elektronu swobodnego. Ale w sieci wszystkie wektory  $k$  różniące się o całkowitą wielokrotność  $2\pi/a$  opisują elektrony z tym samym pędem krystalicznym. Aby uwzględnić to na wykresie, należy podzielić go na strefy odpowiadające różnym przedziałom wartości  $k$  i przenieść odpowiednie odcinki krzywej  $E(k)$  do pierwszej strefy, to znaczy do  $k$  leżących w przedziale  $-\pi/a, +\pi/a$ . Taki sposób postępowania pokazany jest na rys.5.14 c. Elektron o określonym pędzie nie ma teraz jednoznacznie określonej energii, gdyż może on znajdować się na jednej z wielu gałęzi krzywej  $E(k)$ . Należy jeszcze wyjaśnić, czy i w jaki sposób samo istnienie sieci krystalicznej wpływa na kształt zależności  $E(K)$ . Rachunek kwantowy pokazuje, że wpływ ten jest najsilniejszy tam, gdzie krzywe odpowiadające różnym gałęziom  $E(k)$  najbardziej się do siebie zbliżają, a więc na krawędzi strefy bądź w jej środku. Wynik jest taki, jak gdyby krzywe w tych miejscach wzajemnie się odpychały, odkształcając się w sposób pokazany na rys.5.14 d. Mamy więc w kryształach występujące na przemian *pasma energii dozwolonej i wzbronionej* dla elektronu [5.29].

### Elementy pasmowej teorii ciał stałych

Oprócz elektronów swobodnych w metalu znajdują się jony dodatnie. Jony wytwarzają wewnątrz metalu pole elektryczne wpływające na ruch elektronów swobodnych. Jony dodatnie są rozmieszczone w węzłach sieci krystalicznej w sposób ściśle uporządkowany. Pole elektryczne utworzone przez jony zmienia się wewnątrz kryształu w regularny sposób. Dlatego energia potencjalna elektronów w metalu nie jest stała, lecz zmienia się okresowo i zależy od współrzędnych elektronów. Na rys.5.15 przedstawione są zmiany energii potencjalnej wzdłuż osi  $x$ . Oś prowadzona jest przez węzły sieci krystalicznej. W miejscach, gdzie położone są jony, występują minima energii - "lejki potencjału". Po zbliżeniu się do jonu elektron jak gdyby "zapadał się" do jamy potencjalnej - lejka [5.30].



Rys. 5.15 Zmiany energii potencjalnej elektronów wzdłuż osi  $x$ .

Regularne rozmieszczenie atomów albo cząsteczek w węzłach sieci krystalicznej jest charakterystyczne nie tylko dla metali, ale również dla innych typów ciał stałych. Odległości pomiędzy węzłami są rzędu wielkości porównywalnego z wymiarami liniowymi samych atomów i cząsteczek. W każdym krystalicznym ciele stałym istnieje okresowe pole elektryczne tworzone przez cząstki znajdujące się w węzłach sieci krystalicznej.

Kolejnym etapem rozwoju kwantowej teorii metali, i innych rodzajów ciała stałego, stała się teoria pasmowa. Podstawym zadaniem teorii pasmowej jest zbadanie zagadnienia jakie zmiany zajądą w dyskretnych poziomach energetycznych elektronów w izolowanych atomach, kiedy atomy zbliżają się i tworzą sieć krystaliczną.

Dozwolone wartości energii w atomie rozdzielone są szerokimi obszarami energii zabronionych. Przy połączeniu atomów w ciało stałe stany energetyczne elektronów zmieniają się w porównaniu ze stanami w izolowanych atomach. Okresowe pole elektryczne

sieci krystalicznej, oddziaływanie pomiędzy atomami, wywiera istotny wpływ na poziomy energetyczne w ciele stałym. Wynikiem tego wpływu jest rozszczepienie poziomów energetycznych elektronów. Zamiast jednego poziomu energetycznego, jednakowego dla wszystkich  $N$  izolowanych atomów, w ciele stałym powstaje  $N$  blisko położonych, ale nie pokrywających się poziomów, tworząc *pasmo energetyczne*.

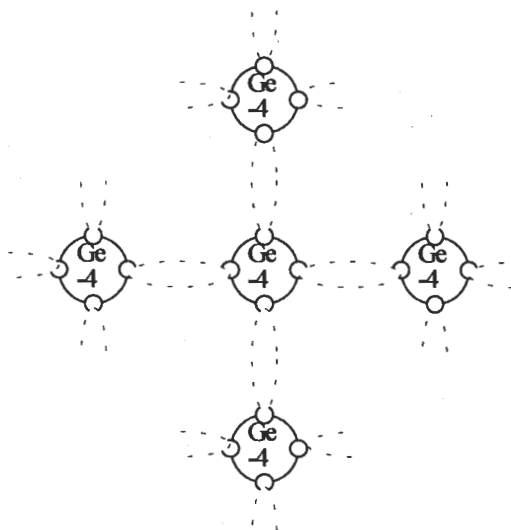
Ciało stałe można traktować jako gigantyczną cząsteczkę składającą się z mnóstwa atomów. Stany energetyczne elektronów wewnętrznych tych atomów są praktycznie takie same, jak w izolowanych atomach. Natomiast zewnętrzne elektrony, zwane elektronami *walencyjnymi*, są skolektywizowane; należą one do całej gigantycznej cząsteczki (ciała stałego), a nie do jakichkolwiek określonych atomów. Energia elektronów zewnętrznych może przybierać wartości mieszczące się w granicach obszarów, które nazywają się *dozwolonymi pasmami energetycznymi*. Elektrony walencyjne atomów są związane z jądrem znacznie słabiej niż elektrony wewnętrzne i mogą przechodzić od jednego atomu do drugiego przechodząc przez barierę potencjału oddzielającą atomy w kryształach. Prowadzi to do poszerzenia poziomów energetycznych takich elektronów, do przekształcania tych poziomów w pasma dozwolonych wartości energii. Średni czas przynależności elektronu walencyjnego do danego atomu w kryształach jest  $10^7$  razy mniejszy niż czas życia elektronu wzbudzonego w izolowanym atomie. Powoduje to znaczne poszerzenie poziomu energetycznego elektronu walencyjnego w atomie kryształu.

### **Samoistne przewodnictwo elektronowe półprzewodników**

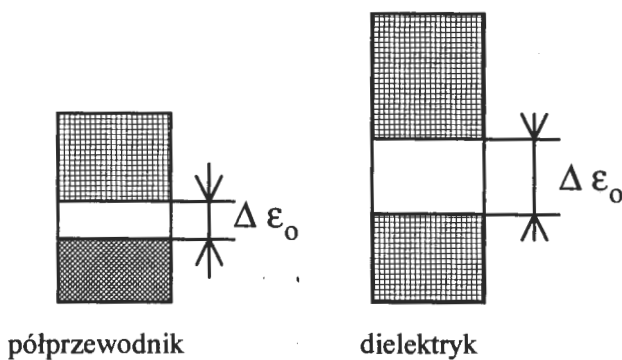
Między metalami, które mają opór właściwy rzędu  $10^{-6}$  -  $10^{-8} \Omega \cdot m$ , a izolatorami o oporze właściwym  $10^8$  -  $10^{13} \Omega \cdot m$  znajduje się ogromna liczba materiałów zaliczana do *półprzewodników*. Ich opór właściwy zmienia się w bardzo szerokich zakresach od  $10^{-5}$  do  $10^8 \Omega \cdot m$ . Prawie cała otaczająca nas przyroda składa się z substancji półprzewodnikowych. Tlenki metali, siarczki i tellurki licznych metali mają właściwości półprzewodzące. Typowymi przedstawicielami półprzewodników znajdujących szerokie zastosowanie w technice jest german, krzem i tellur.

German jest jednym z najszerszej stosowanych pierwiastków półprzewodnikowych. W izolowanym atomie germanu na zewnętrznej powłoce znajdują się cztery elektrony. 28 pozostałych elektronów rozmieszczonych jest na zapełnionych powłokach wewnętrznych. Kryształ germanu ma atomową sieć krystaliczną. Cztery elektrony walencyjne każdego atomu tworzą kowalencyjne wiązania chemiczne (jakie mogą powstać pomiędzy atomami elektrycznie obojętymi) z elektronami sąsiednich atomów w sieci w ten sposób, że w czystym germanie nie ma elektronów swobodnych, rys.5.16. Czysty kryształ germanu powinien zatem być dobrym izolatorem [5.30].

German jest w przyrodzie bardzo rozproszony i jest pierwiastkiem drogim. We współczesnej technice półprzewodnikowej powszechnie wykorzystuje się krzem. Czternaście elektronów w izolowanym atomie krzemu jest rozmieszczonych w ten sposób, że cztery spośród nich, podobnie jak w atomie germanu, znajdują się na powłoce zewnętrznej. W stałym krzemie krystalicznym zewnętrzne elektrony walencyjne, tak jak w atomie germanu, tworzą kowalencyjne wiązania chemiczne. Mogą one być stosunkowo łatwo rozrywane już w dosyć niskich temperaturach. Będą przy tym powstawać elektrony swobodne i w przypadku germanu, albo innych półprzewodników tego typu, pojawi się *samoistne przewodnictwo elektronowe czystego półprzewodnika*. Doświadczenia wykazały, że ze wzrostem temperatury przewodnictwo właściwe czystych półprzewodników zwiększa się. Jest to najważniejsza cecha różniąca półprzewodniki od zwykłych metali, w których przewodnictwo maleje ze wzrostem temperatury.



Rys. 5.16 Wiązania chemiczne w sieci krystalicznej czystego germanu.



Rys.5.17 Położenie pasm energetycznych w półprzewodniku i dielektryku.

Teoria pasmowa ciała stałego wyjaśniła powyżej przedstawioną zmianę oporności (lub przewodnictwa) czystych półprzewodników. Jeżeli górne pasmo całkowicie zajęte przez elektrony jest oddzielone od najbliższego pasma dozwolonego wąskim pasmem zabronionym, to takie ciało będzie dielektrykiem tylko w niskich temperaturach. Ze wzrostem temperatury wzbudzenie cieplne może przenieść elektrony położone przy górnej granicy pasma zapełnionego do wyższego pasma, gdzie znajdują się wolne poziomy energetyczne. W tym celu należy zużyć energię równą przynajmniej szerokości pasma zabronionego  $\Delta E_0$ . Na rys. 5.17 przedstawione jest położenie pasm energetycznych w półprzewodniku i w dielektryku. Wielkość  $\Delta E_0$  nazywa się *energiją aktywacji* przewodnictwa samoistnego. Jest ona najważniejszą charakterystyką właściwości elektrycznych półprzewodników. Ze wzrostem temperatury czystych półprzewodników

wzrasta liczba elektronów, które przechodzą do wolnego pasma energetycznego w wyniku wzbudzenia cieplnego i biorą udział w przewodnictwie elektronowym. Dlatego przewodnictwo właściwe ze wzrostem temperatury rośnie.

### **Samoistne przewodnictwo dziurowe półprzewodników**

Pojawienie się poziomów energetycznych pozbawionych elektronów w pasmie zajęтым, ma duże znaczenie dla właściwości elektrycznych półprzewodników. Elektron po uzyskaniu energii wzbudzenia cieplnego i po rozerwaniu wiązania kowalencyjnego z innym elektronem opuści swoje miejsce. Niech w substancji elektrycznie obojętnej jeden z elektronów opuści swoje miejsce i przejdzie w inne położenie, na przykład do sąsiedniego jonu. Wówczas w miejscu opuszczonym przez elektron powstaje dodatkowy ładunek dodatni, albowiem jak podkreśliliśmy substancja jest elektrycznie obojętne. Jak się przyjęło mówić, powstaje *dziura elektronowa*. Zachowuje się ona jak ładunek dodatni pod względem wielkości równy ładunkowi elektronu. Na miejsce zwolnionego przez elektron - dziury - może przejść sąsiedni elektron, a to jest równoważne temu, że przesunięciu uległa "dziura dodatnia" i pojawiła się ona w nowym miejscu, które opuścił elektron.

W zewnętrznym polu elektrycznym elektrony przemieszczają się w kierunku przeciwnym do kierunku natężenia pola elektrycznego. Dodatnie dziury przesuwały się w kierunku natężenia pola elektrycznego, to znaczy w tę stronę, w którą przesuwałby się pod działaniem pola elektrycznego ładunek dodatni. Przewodnictwo elektryczne półprzewodnika wywołane przemieszczaniem się dziur dodatnich nazywa się *samoistnym przewodnictwem dziurowym*. Proces przemieszczania się dziur w kierunku natężenia pola elektrycznego, a elektronów w kierunku przeciwnym, następuje w całej masie półprzewodnika. W ten sposób w półprzewodniku obok zwykłego przewodnictwa elektronowego obserwuje się przewodnictwo dziurowe.

Z przedstawionych informacji o przewodnictwie elektronowym i dziurowym wynika, że nośnikami prądu mogą być zarówno elektrony, jak też dziury. Wszystko to dotyczyło jednak półprzewodników czystych chemicznie. Technologie hodowania takich kryształów nastrożają znaczne trudności. W większości urządzeń półprzewodnikowych stosuje się półprzewodniki, w których przewodnictwo elektryczne zapewniają domieszki.

### **Półprzewodniki elektronowe domieszkowe (półprzewodniki typu n)**

Wprowadzanie domieszek do półprzewodnika poważnie wpływa na jego właściwości elektryczne. Do domieszek zalicza się, na przykład, atomy lub jony obcych pierwiastków chemicznych wprowadzonych do sieci krystalicznej półprzewodnika. Jeżeli do sieci krystalicznej półprzewodnika wprowadzi się atomy domieszkowe, to ich elektrony walencyjne mają poziomy energetyczne nie mieszczące się w dozwolonych pasmach energetycznych kryształu podstawowego. W wyniku tego powstają *domieszkowe poziomy energetyczne* elektronów położone w pasmie zabronionym. Domieszki mogą w różny sposób wpływać na ilość nośników prądu w półprzewodnikach. Z jednej strony, mogą służyć jako dodatkowe źródło elektronów w kryształach. Z drugiej strony, domieszki mogą być ośrodkami przechwytywania elektronów obecnych w kryształach.

Zobaczmy co nastąpi, gdy w sieci germanu jeden z atomów zostanie zastąpiony atomem domieszki, który ma pięć elektronów walencyjnych ( fosfor, arsen, antymon) rys.5.18. Cztery elektrony atomu domieszki będą związane wiązaniami kowalencyjnymi z elektronami sąsiednich atomów germanu, piąty nie może utworzyć wiązania kowalencyjnego. Ten "zbędny" elektron jest słabiej związany ze swoim atomem i można go stosunkowo łatwo przenieść do pasma przewodnictwa półprzewodnika. Energia "zbędnych" elektronów domieszkowych jest nieco niższa niż energia odpowiadająca dolnej granicy pasma przewodnictwa elektronów. Dlatego pasma energetyczne elektronów domieszkowych położone są nieco niżej od dna pasma przewodzenia. Poziomy te zajęte są przez elektrony i nazywają się *poziomymi donorowymi*, a atomy domieszek dostarczające "zbędnych"

elektronów do kryształu półprzewodnika nazywają się *atomami-donorami*. Po przeniesieniu elektronów z donorowych poziomów domieszkowych do pasma przewodnictwa, w przewodniku powstaje *elektronowe przewodnictwo domieszkowe - przewodnictwo typu n* (od słowa negative).

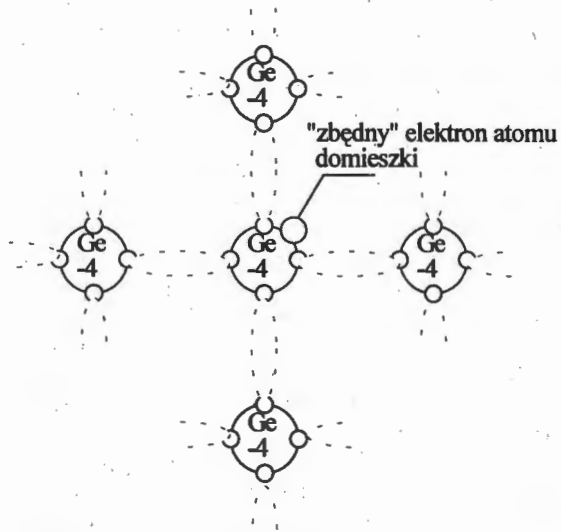
#### **Domieszkowe półprzewodniki dziurowe (półprzewodniki typu p)**

Załóżmy, że do sieci krystalicznej germanu wprowadziliśmy atom domieszkowy z trzema elektronami walencyjnymi (ber, glin, ind) rys.5.19. W takim atomie brakuje jednego elektronu do pełnego комплекtu wiązań kowalencyjnych niezbędnych do utworzenia sieci germanu (rys.5.16). Ale atom domieszkowy może utworzyć wszystkie wiązania, jeżeli odbierze elektron od najbliższego atomu germanu. Wtedy w miejscu elektronu opuszczającego atom germanu powstaje dodatnia dziura. Z kolei ta dziura może być zapełniona przez elektron z sąsiedniego atomu germanu. Proces kolejnego zapełniania elektronami dodatnich dziur jest równoważny ruchowi dziury w półprzewodniku i pojawieniu się w nim nośnika prądu. Tego typu domieszki powodują wystąpienie w pasmie zabronionym domieszkowych poziomów energetycznych, nie zajętych przez elektrony. Nazywają się one *poziomami wychwytu* albo *poziomami akceptorowymi*. Atomy takich domieszek nazywają się *akceptorami*.

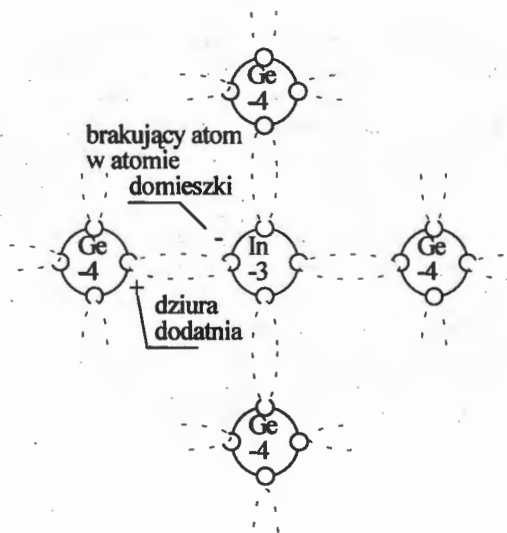
Energia poziomów energetycznych atomów akceptorów jest nieco większa od energii górnej granicy pasma zajętego. Dlatego domieszkowe, akceptorowe poziomy energetyczne elektronów zajmują położenie nieco wyższe niż górny skraj zajętego pasma energetycznego kryształu podstawowego. W takim półprzewodniku może powstawać *domieszkowe przewodnictwo dziurowe*. Przedstawiony typ przewodnictwa został nazwany *przewodnictwem typu p*, a półprzewodniki o takim przewodnictwie nazywają się *półprzewodnikami dziurowymi* albo *półprzewodnikami typu p* (od słowa positive).

### **5.5.2 Fotoogniwa**

Pojawienie się nośników prądu w półprzewodnikach może być wywołane absorpcją światła, a także napromieniowaniem szybkimi elektronami, cząstkami  $\alpha$  lub innymi cząstkami. Jeżeli energia absorbowanego fotonu jest większa niż energia aktywacji przewodnictwa samoistnego albo domieszkowego, to elektrony (albo dziury) przechodzą do pasma przewodnictwa półprzewodników i biorą udział w tworzeniu prądu. Przewodnictwo wywołane pojawieniem się tych elektronów albo dziur nazywa się fotoprzewodnictwem. W oparciu o zjawisko przewodnictwa albo wewnętrznego zjawiska fotoelektrycznego działają przyrządy zwane fotoogniwami. Tworzą je dwie stykające się ze sobą płytki, wykonane z metalu i jego tlenku (półprzewodnik), pokryte od góry cienką przezroczystą warstwą metalu. Warstwa graniczna pomiędzy metalem a jego tlenkiem wykazuje właściwości prostujące, pozwala ona elektronom na przechodzenie tylko w kierunku od tlenku metalu do metalu, na przykład od tlenku miedziowego do miedzi. Pod wpływem światła powstaje strumień elektronów przechodzących tylko od półprzewodnika do metalu. Nie jest wymagane żadne napięcie zewnętrzne do kierowania strumieniem elektronów.



Rys. 5.18 Wiązania chemiczne w sieci krystalicznej germanu z domieszką arsenu.

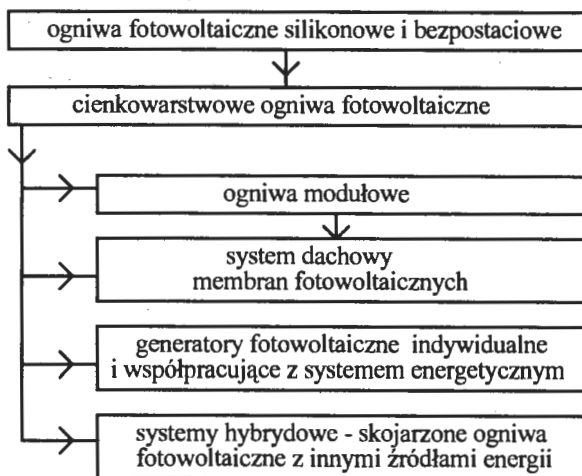


Rys. 5.19 Wiązania chemiczne w sieci krystalicznej germanu, do której wprowadzono atom indu.

### 5.5.3 Stan rozwoju generatorów fotowoltaicznych

Dotychczas główne kierunki badań i rozwoju technologii ogniw fotowoltaicznych obejmowały:

- ogniwa fotowoltaiczne silikonowe i bezpostaciowe,
- cienkowarstwowe ogniwa fotowoltaiczne,
- ogniwa modułowe,
- system dachowych membran fotowoltaicznych,
- generatory fotowoltaiczne indywidualne i współpracujące z systemem energetycznym,
- systemy hybrydowe ( skojarzone ogniwa fotowoltaiczne z innymi źródłami energii).



Rys. 5.20 Główne kierunki rozwoju technologii ogniw fotowoltaicznych

Ogniwa fotowoltaiczne stanowią źródło energii na statkach kosmicznych. Opracowano szereg odmian ogniw. Są to ogniwa krzemowe różnych typów, takie jak: monokrystaliczne, polikrystaliczne, mikrokrystaliczne, krzemowe bezpostaciowe, galenowo arsenowe - GaAs. Teoretyczna sprawność waha się w granicach 30 - 35 % [5.31,5.32].

Pojedynczy silikon krystaliczny słabo absorbuje promienie światła. W konsekwencji, ogniwa zrobione z tego materiału muszą być stosunkowo grube, około 100 do 200 mikronów ( $10^{-6}$  m). Zastosowanie materiału polikrystalicznego pozwala eliminować kosztowny proces tworzenia monokryształów. Silikon polikrystaliczny można uzyskać stosując szereg procesów. Jednym z nich jest technologia cienkowarstwowych polikrystalicznych ogniw (thin film technology). Grubość tych ogniw wynosi od 20 do 30 mikronów. W ciągu ostatnich 15 lat uczyniono znaczny postęp w technologii ogniw cienkowarstwowych. Dotyczy to zwłaszcza ogniw krzemowych bezpostaciowych [5.33,5.34,5.35].

W Sandia National Laboratory, USA, opracowano ogniwa fotowoltaiczne modułowe, mogące osiągać sprawność 20 % [5.36]. W 1984 roku sprawność ogniwa modułowego zawierała się w granicach 15 - 17 % [5.37]. Projektowano uzyskać sprawność 22 % w ogniwie modułowym o mocy 287 W [5.38, 5.39].

Od 1979 roku jest eksploatowany eksperymentalny generator fotowoltaiczny o mocy 1,8 kW, zamontowany na dachu budynku w Zurychu, Szwajcaria [5.40]. W USA eksploatowano szereg prototypowych modułów membranowych, montowanych na dachach budynków [5.41,5.42].

Następuje powolny rozwój prototypowych generatorów fotowoltaicznych. Eksploatowano następujące generatory fotowoltaiczne:



- generator o mocy 5 kW podłączony do sieci w Holman Guest House, USA,
- generator TISO o mocy 13 kW, Szwajcaria [5.43],
- generator o mocy 100 kW na Cykladach w Grecji [5.44],
- generator o mocy 1,41 MW, Norwegia, charakteryzujący się współczynnikiem wykorzystania mocy równym 12 % i ogólną sprawnością wynoszącą 15 % [5.27],

Przedmiotem badań w Sandia National Laboratory, USA, były generatory od 2 kW do 5 MW [5.45]. Inne przykłady zastosowania generatorów fotowoltaicznych podano w publikacjach [5.46,5.47,5.48,5.49,5.50,5.51].

Współczynnik wykorzystania mocy generatora fotowoltaicznego w krajach o średnim nasłonecznieniu, podobnym do nasłonecznienia w Europie, wynosi kilkanaście procent. Ażeby zwiększyć ten współczynnik kojarzy się układy fotowoltaiczne z innym źródłem energii, tworząc tak zwane układy hybrydowe. Przykładami takich układów są:

- układ składający się z generatora fotowoltaicznego o mocy 2,5 KW i silnika wiatrowego o mocy 14 kW, zbudowanego w ramach kooperacji pomiędzy RFN i Koreą Południową [5.52],
- układ fotowoltaiczny - silnik wiatrowy zainstalowany na wyspie w północnej części Holandii.

### 5.5.4 Efekty ekonomiczne

W 1978 roku cena ogniw fotowoltaicznych silikonowych wynosiła 11000 \$/kW [5.53], a w 1979 roku tylko 7600 \$/kW [5.54]. Według przewidywań Departamentu Rozwoju Energii, USA, koszt produkcji energii elektrycznej przy zastosowaniu generatorów fotowoltaicznych powinien był kształtować się na poziomie 0,12 \$/kWh we wczesnych latach 90-tych i 0,06 \$/kWh w 2000 roku [5.55].

W opracowaniu [5.28], wykonanym na wniosek specjalnej komisji Parlamentu RFN przez wiele instytucji, podano prognozy parametrów ekonomicznych dla zintegrowanych systemów dachowych membran fotowoltaicznych (polikrystalicznych i bezpostaciowych), w postaci farm fotowoltaicznych, z przeznaczeniem lokalizacji między innymi w Hiszpanii i RFN. Niektóre z tych danych zestawia się w tablicach 5.5, 5.6, 5.7.

Tablica 5.5 Niektóre dane prognostyczne dla zintegrowanych systemów dachowych membran fotowoltaicznych, w postaci farm fotowoltaicznych, z przeznaczeniem lokalizacji w Hiszpanii.

systemy ogniw fotowoltaicznych polikrystalicznych - duże serie	1990	2005	2025	2050
natężenie promieniowania słonecznego kWh/m <sup>2</sup> r	1950	1950	1950	1950
moc farmy fotowoltaicznej MW	0,3	175	175	175
współczynnik wykorzystania mocy w ciągu roku h/r	1800	1800	1800	1800
długość cyklu inwestycyjnego r	1	1	1	1
koszty inwestycyjne DM/kW 2 DM = 1 \$	25000	4250	3000	2750
koszt energii elektrycznej Dpf/kWh	122	18	12	11

Tablica 5.6 Niektóre dane prognostyczne dla zintegrowanych systemów dachowych membran fotowoltaicznych, w postaci farm fotowoltaicznych, z przeznaczeniem lokalizacji w RFN.

systemy ogniw fotowoltaicznych polikrystalicznych - duże serie	1990	2005	2025	2050
natężenie promieniowania słonecznego kWh/m <sup>2</sup> r	1100	1100	1100	1100
moc farmy fotowoltaicznej MW	1	100	100	100
współczynnik wykorzystania mocy w ciągu roku h/r	1050	1050	1050	1050
długość cyklu inwestycyjnego r	1	1	1	1
koszty inwestycyjne DM/kW 2 DM = 1 \$	20000	4150	3000	2800
koszt energii elektrycznej Dpf/kWh	167	31	22	20

Tablica 5.7 Niektóre dane prognostyczne dla zintegrowanych systemów dachowych membran fotowoltaicznych, w postaci farm fotowoltaicznych, z przeznaczeniem lokalizacji w RFN.

systemy ogniw fotowoltaicznych bezpostaciowych - duże serie	1990	2005	2025	2050
natężenie promieniowania słonecznego kWh/m <sup>2</sup> r	1100	1100	1100	1100
moc farmy fotowoltaicznej MW	1	100	100	100
współczynnik wykorzystania mocy w ciągu roku h/r	1050	1050	1050	1050
długość cyklu inwestycyjnego r	1	1	1	1
koszty inwestycyjne DM/kW 2 DM = 1 \$	20000	6000	4500	3500
koszt energii elektrycznej Dpf/kWh	292	53	39	30

### 5.5.5 Technologia sztucznej fotosyntezy

Zgodnie z informacjami podanymi w literaturze badania nad sztuczną fotosyntezą prowadzi się w USA w następujących instytucjach naukowych: Solar Energy Research Institute, Golden Solar Research Institute International, Menlo Park, Argonne National Institute i Oak Ridge National Laboratory. Badania te mają na celu opanowanie nowej generacji technologii wytwarzania paliw syntetycznych przy wykorzystaniu energii słonecznej [5.56].

### 5.5.6 Uwagi końcowe

#### Wpływ technologii wykorzystujących energię słoneczną na środowisko

Systemy pasywne wykorzystywania energii słonecznej są najbardziej akceptowalne ekologicznie. Nie istnieje problem zajmowania terenu, ponieważ są zintegrowane z budynkami. Stosowanie kolektorów płaskich nie powinno mieć wpływu na środowisko. Zajęcie terenu nie będzie stanowić problemu. W większości przypadków kolektory płaskie są także zintegrowane z budynkami.

Nie można tego powiedzieć o słonecznych systemach ciepłych, wytwarzających energię elektryczną, wymagających dużych powierzchni na umieszczenie dla przykładu dużych zestawów heliostatów. Jednakże powierzchnia zajmowana przez taką siłownię byłaby porównywalna z elektrownią węglową, gdyby uwzględniano powierzchnię wymaganą dla wydobywania i transportu węgla.

Ogniwa fotowoltaiczne posiadają wiele zalet: nie mają ruchomych części, są więc ciche i niezawodne, wymagają niewielkiej obsługi, są długożywotne, nie zakłócają ani nie zanieczyszczają środowiska, a także nie zużywają wody. Jednakże mają zasadniczą wadę: wymagają dużych nakładów finansowych na dalszy rozwój.

Sztuczna fotosynteza może stanowić technologię przyszłych generacji. Mogłaby ona symulować częściowo cykl węglowy ekosystemu. W konsekwencji byłaby szczególnie korzystna z punktu widzenia ochrony środowiska.

### **Ogólne znaczenie rozważanych technologii**

Znaczenie energii słonecznej w zaspakajaniu światowego popytu na energię będzie ciągle wzrastać ze względu na wzrastającą konieczność ochrony środowiska.

Dla klimatu środkowoeuropejskiego technologią, która w niedalekiej przyszłości może współzawodniczyć z innymi źródłami energii, wydaje się być centralny słoneczny system grzewczy z sezonowym magazynowaniem ciepła, wspomagany pompą ciepłą.

Opanowywanie technologii energii słonecznej, na przykład ogniw fotowoltaicznych, może mieć duże znaczenie dla odpowiednich firm we wchodzeniu w przyszłości na rynek afrykański. Może mieć także duże znaczenie dla produkcji wodoru, lokalizując duże zestawy odpowiednich kolektorów słonecznych na pustyniach Sachary, a następnie przesyłając produkowany wodór do Europy. Taką możliwość analizowano w RFN [5.57].

Władze rządowe Szwecji rozważały możliwość pobierania opłat za użytkowanie paliw kopalnych w wysokości 7 - 15 \$/MWh. Uzyskane fundusze miałyby być przeznaczane na rozwój technologii energii słonecznej [5.12].

## **5.6 Technologie energii kinetycznej wiatrów**

### **5.6.1 Uwagi wstępne**

Obecnie intensywnie rozwija się dwa podstawowe rodzaje silników wiatrowych. Są to silniki wiatrowe o poziomej i pionowej osi obrotu. W pierwszym przypadku oś obrotu silnika jest równoległa do strumienia wiatru i powierzchni ziemi. W drugim przypadku, silnik nazywany silnikiem wiatrowym Darieusa, posiada dwa rotory przypominające kształtem trzepaczkę do ubijania białek. Oś rotora, usytuowana pionowo do powierzchni ziemi, jest prostopadła do strumienia wiatru. Niezależnie od rodzaju rotora, silnik wiatrowy składa się z pięciu podstawowych systemów: 1. rotora, który przemienia energię kinetyczną wiatru w energię kinetyczną wału napędowego, 2. systemu napędowego obejmującego przekładnię oraz generator lub pompę, 3. wieży podtrzymującej rotor, 4. systemu sterowania i zabezpieczeń, 5. systemu równoważącego siłownię umieszczoną na wieży.

W przypadku silników o dużej mocy korzystniejsze jest rozwiązanie z osią poziomą. Prędkość rotora nie przekracza wówczas prędkości wiatru. Z drugiej strony, silniki o pionowej osi posiadają mniej skomplikowaną konstrukcję, a tym samym są tańsze. W związku z tym ich działanie nie zależy od kierunku wiatru, a więc nie wymagają systemu sterowania. W przypadku silnika o poziomej osi, system sterowania ma za zadanie ustawić rotor do kierunku wiatru.

Silniki wiatrowe mogą wytwarzać energię elektryczną, gdy wiatr wieje z odpowiednią prędkością. Przy zbyt wysokiej prędkości produkcja staje się niemożliwa. Oznacza to, że potencjalna produkcja jest zawsze funkcją prędkości wiatru. Wahania prędkości wiatrów mogą stać się mniej istotne z punktu widzenia wykorzystywania energii kinetycznej wiatrów

pod warunkiem rozwiązania problemu magazynowania energii. Możliwe jest magazynowanie:

- energii potencjalnej wody,
- energii sprężonego powietrza.

Innym możliwym rozwiązaniem byłoby wykorzystywanie energii elektrycznej do wytwarzania wodoru metodą elektrolityczną, a następnie amoniaku poprzez proces syntezy. Amoniak daje się łatwo skraplać. W tej postaci może być magazynowany i transportowany w temperaturze pokojowej. Może być wykorzystywany jako paliwo w silnikach diesla.

Sposobem pokonania zmiennych prędkości wiatrów mogą okazać się odpowiednie stabilizatory napięcia generatorów elektrowni wietrznych. W Stanach Zjednoczonych opracowywano sprzęgło hydrauliczne, łączące silnik wiatrowy z generatorem prądu elektrycznego. Sprzęgło to ma za zadanie tłumić oscylacje mocy powodowane zmianą prędkości wiatru.

Istnieje możliwość lokalizacji silników wiatrowych na sztucznych wyspach zwanych "farmami silników wiatrowych" w pobliżu brzegów morskich. Korzyści są oczywiste. Prędkość wiatrów w pobliżu wybrzeża jest na ogół dwukrotnie większa, aniżeli na lądzie. Ponieważ moc silników wiatrowych jest proporcjonalna do trzeciej potęgi prędkości wiatru, silnik umieszczony na morzu, w pobliżu brzegów może produkować 8-krotnie więcej energii w porównaniu z silnikiem wiatrowym zlokalizowanymi na lądzie. Koszty inwestycyjne w przypadku budowy farm silników wiatrowych na morzu są o około 60 % wyższe niż obiektów usytuowanych na lądzie. W Wielkiej Brytanii rozważano możliwość budowy 10 farm o mocy 1000 MW każda, zlokalizowanych w pobliżu wybrzeży. W Stanach Zjednoczonych, Szwecji, RFN, Holandii i Danii prowadzi się prace badawcze nad opanowaniem technologii farm silników wiatrowych. W 1980 roku oceniono, że w 2000 roku energia wiatrów może zaspakajać około 20 % zapotrzebowania na energię elektryczną w Stanach Zjednoczonych i w Wielkiej Brytanii [5.58]

### **5.6.2 Kategorie silników wiatrowych**

Z punktu widzenia mocy pojedynczego silnika można wyróżnić silniki wiatrowe:

- małej mocy - poniżej 100 kW,
  - dużej mocy - powyżej 100 kW,
- zarówno poziome jak i pionowe.

Silniki wiatrowe małej mocy mogą być wykorzystywane jako:

- młyny wiatrowe,
- generatory energii elektrycznej samodzielne lub w układzie hybrydowym.

Wśród silników wiatrowych dużej mocy wyróżnia się:

- silniki wiatrowe lokalizowane na lądzie lub na morzu w pobliżu brzegu,
- silniki wiatrowe występujące w układach hybrydowych.

Energia kinetyczna wiatru może być wykorzystana do pompowania wody lub produkcji energii elektrycznej. Silniki wiatrowe, będące elementem odpowiedniego układu hybrydowego, mogą uczestniczyć w produkcji węglowodorów gazowych lub ciekłych.

### **5.6.3 Stan rozwoju**

#### **Silniki wiatrowe małej mocy**

Silniki wiatrowe o mocy 55 kW są osiągalne przemysłowo [5.27]. Silniki tego typu są w zasadzie wykorzystywane bezpośrednio jako młyny lub do celów grzewczych. Jako silniki o małej mocy nie są podłączane do sieci, a więc nie wymagają odpowiednich stabilizatorów.

Silniki wiatrowe małej mocy przeznaczone do wytwarzania ciepła grzewczego były przedmiotem badań w RFN począwszy od 1979 roku [5.59]. Celem tych badań było ustalenie czy zastosowanie silników bezpośrednio do celów grzewczych w indywidualnych domach może być ekonomicznie uzasadnione.

W Finlandii rozważano możliwość wykorzystywania silników wiatrowych o pionowej osi obrotu do celów grzewczych [5.60]. Zamierzano przetwarzać energię kinetyczną wiatru w energię potencjalną sprężonego powietrza. Silniki o pionowej osi były rozwijane w RFN w ramach projektu badawczego niemiecko-argentyńskiego [5.61].

W końcu 1987 roku na wyspie Burgar, Orkney, Wielka Brytania, włączono trzy silniki wiatrowe o mocy 3 MW, wykorzystywane do celów grzewczych i oświetlenia dla około 2000 domów [5.62].

### **Silniki wiatrowe dużej mocy**

W 1982 roku były dostępne w handlu następujące silniki wiatrowe dużej mocy [5.27]:

- silnik o mocy 100 kW rozwijany w Japonii i Hiszpanii,
- silnik o mocy 630 kW, Ninbe A, Dania,
- silnik o mocy 2,5 MW wytwarzany w Szwecji,
- silnik o mocy 3 MW rozwijany w RFN, o nazwie Growian, a także w Wielkiej Brytanii,
- silnik o mocy 3 MW, określane mianem WTS-3, dostępny w handlu od 1990 roku w Norwegii.

Na drodze do opanowania przemysłowego znajdowały się następujące silniki wiatrowe:

- Holandia - DAF 500 kW [5.63],
- USA - Flowind 300 kW [5.64], Mod-2 MW, Mod-5B 5MW [5.65], WTS 4MW [5.66].

Ponadto prowadzono prace nad rozwojem następujących silników wiatrowych:

- silnik AREOMAN, projekt badawczy niemiecko-indonezyjny [5.67],
- wspólny projekt niemiecko-brazylijski budowy silnika DFVLR-25 o mocy 100 kW [5.68],
- silnik o pionowej osi VAWT opracowywany przez Centre d' Etudes Nuclearies de Grenoble, Francja [5.69],
- silnik MONOPTEROS - 5,4 MW rozwijany przez firmę Messerschmitt-Boelkow-Blohm [5.70],
- silnik FIATA o mocy 50-100 kW [5.71],
- silnik o pionowej osi obrotu ze zmienną geometrią, Wielka Brytania [5.72].

W Szwecji na życzenie Narodowego Zjednoczenia Energetycznego firmą AIB-Allmaenna Ingenjoersbyran AB prowadziła badania nad konstrukcją silników wiatrowych lokalizowanych na morzu w pobliżu brzegów [5.73]. Przyjęto, że moc silników będzie wynosić od 2,5 do 4 MW i mają one wytwarzać na wyspie Oeland 8,75 GWh/rok. Rozważano farmę silników wiatrowych obejmującą 1, 3, 10 i 100 jednostek. Oceniono, że koszt pojedynczego silnika ma wynosić 81 mln SEK, a w farmie o 100 jednostkach zmniejszy się do 51 mln SEK na pojedynczą jednostkę.

W USA moc zainstalowanych silników wiatrowych w 1984 roku wynosiła 303 MW. 98% tej mocy była zainstalowana w Kalifornii [5.74]. Według danych zawartych w [5.62] farmy silników wiatrowych, zainstalowane na morzu w pobliżu wybrzeży Kalifornii, zaopatrywały całkowicie w energię elektryczną 200000 domów mieszkalnych, zastępując spalanie ponad 2,2 mln baryłek ropy rocznie.

### **Systemy hybrydowe**

Przedmiotem badań były następujące układy hybrydowe:

- układ silnik wiatrowy - silnik diesla,
- układ silnik wiatrowy - generator fotowoltaiczny.

Pierwszy układ badano w Danii [5.75], Wielkiej Brytanii [5.76], Holandii [5.77], RFN [5.78]. Drugi układ zainstalowano na wyspie w północnej części Holandii [5.79]. Był on także przedmiotem współpracy pomiędzy Południową Koreą i RFN [5.52].

## **5.6.4 Efekty ekonomiczne**

Jednostkowe koszty inwestycyjne i koszty stałe eksploatacji w \$/kW (1980) zamieszczono w tablicy 5.8 [5.27].

Tablica 5.8 Jednostkowe koszty inwestycyjne i eksploatacji silników wiatrowych

rodzaj jednostkowych kosztów, \$/kW (1980)	100 kW Japonia	Nimbe-A Dania	2,5 MW Szwecja	Growian RFN	WTS-3 Norwegia
koszty inwestycyjne	2979	1350	1340	1802	1065
koszty eksploatacji	135	20	36	28	20

W opracowaniu [5.28], wykonanym na wniosek specjalnej komisji Parlamentu RFN przez następujące instytucje: Ludwig-Bolkow Systemtechnik, Ottobrun, Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt, Stuttgart, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, Monachium, podano między innymi prognozy parametrów ekonomicznych dla silników wiatrowych klasy X MW i X00 kW z przeznaczeniem lokalizacji w RFN i Hiszpanii. Niektóre z tych danych zestawia się w tablicach 5.9, 5.10.

Tablica 5.9 Niektóre dane prognostyczne dla silników wiatrowych klasy X MW z przeznaczeniem lokalizacji w RFN.

silniki wiatrowe X MW duże serie	1990	2005	2025	2050
moc instalowana MW	3	100	100	100
energia wytwarzana GWh/r	7,50	250	250	250
współczynnik wykorzystania mocy w ciągu roku h/r	2500	2500	2500	2500
długość cyklu inwestycyjnego r	1	1	1	1
koszty inwestycyjne DM/kW 2 DM = 1 \$	6000	4000	3000	2500
koszt energii elektrycznej Dpf/kWh	17	12	9	7

### 5.6.5 Znaczenie

Wahania pogody nie zezwalają na planowanie znacznego udziału silników wiatrowych w produkcji energii elektrycznej. Gdyby nawet istniała możliwość instalowania farm silników wiatrowych wymaganej mocy, nie mogłyby stanowić źródła, które likwidowałyby całkowicie deficyt energii elektrycznej. Mogą one natomiast częściowo go zmniejszyć i osłabić przez to deficyt energii pierwotnej w skali kraju - pod warunkiem magazynowania energii elektrycznej.

Możliwości wykorzystywania energii wiatrów w skali gospodarki narodowej to:

- wytwarzanie energii elektrycznej,
- wytwarzanie wodoru metodą elektrolizy i ewentualne wykorzystywanie wodoru do produkcji amoniaku.

Tablica 5.10 Niektóre dane prognostyczne dla silników wiatrowych klasy X00 kW z przeznaczeniem lokalizacji w RFN.

silnik wiatrowy X00 kW duże serie	1990	2005	2025	2050
moc instalowana MW	8	100	100	100
energia wytwarzana GWh/r	18,4	230	200	200
współczynnik wykorzystania mocy w ciągu roku h/r	2300	2300	2000	2000
długość cyklu inwestycyjnego r	1	1	1	1
koszty inwestycyjne DM/kW 2 DM = 1 \$	2500	2000	1800	1800
koszt energii elektrycznej Dpf/kWh	11	9	8	8

### 5.6.6 Wpływ na środowisko

Energię wiatrów uważa się jako jedno z najbardziej ekologicznych naturalnych źródeł energii elektrycznej. Nie wymaga ono wody i nie powoduje zanieczyszczenia środowiska. Umieszczenie silników wiatrowych z dala od zabudowy przyczyni się do zmniejszenia odczuwalnego hałasu. Zajęcie terenu nie będzie znaczne, ponieważ nie wyklucza możliwości innego wykorzystania jego na przykład do celów rolniczych. Problem zajęcia terenu przestanie istnieć, gdy silniki wiatrowe tworzące farmę silników wiatrowych będą lokalizowane przy brzegach morskich.

## 5.7 Technologie biomasy

### 5.7.1 Uwagi wstępne

Jednym z podstawowych problemów rozwoju sektora energii będzie produkcja syntetycznych węglowodorów. Możliwym sposobem rozwiązania tego problemu będzie przetwarzanie węgla lub materiałów bogatych w węgiel w paliwa gazowe lub ciekłe. Jednym z takich materiałów jest biomasa, a zwłaszcza biomasa drzewna. Może ona być przetwarzana chemicznie lub biologicznie. Może także być wykorzystywana do produkcji ciepła grzewczego i energii elektrycznej. W podrozdziale tym omawia się technologie przetwarzania chemicznego i biologicznego biomasy, a także wskazuje się na możliwość wykorzystywania jej do produkcji energii elektrycznej.

### 5.7.2 Technologie chemicznego przetwarzania biomasy

Produktem biomasy drzewnej może być:

- gaz średniokaloryczny, gaz syntezowy lub gaz wysokokaloryczny,
- paliwa ciekłe.

Wyżej wymienione produkty mogą być uzyskane w wyniku zgazowywania lub upłynniania biomasy drzewnej. Proces zgazowywania zachodzi w reaktorach gazyfikujących - gazyfikatorach. Istnieje wiele rozwiązań gazyfikatorów dostępnych na skalę przemysłową i będących przedmiotem opanowywania przemysłowego. Można zatem dokonać pewnego podziału charakterystyk gazyfikatorów, ze względu na:

1. metodę dostarczania ciepła bezpośrednio lub pośrednio,
2. rodzaj czynnika gazyfikującego:
  - parą z powietrzem lub tlenem,
  - powietrzem,

- metanem,
3. typ reaktora gazyfikującego z punktu widzenia działania złoża, a więc o:
- złożu fluidalnym ciśnieniowym,
  - złożu przepływowym,
4. rodzaju procesu:
- katalicznego zgazowywania parą,
  - pirolizy.

W reaktorze ze złożem fluidalnym powietrze lub tlen wspólnie z parą zasilają reaktor od dołu. Złoże fluidalne powstaje w wyniku utrzymywania w złożu granulek drewna poprzez siły wyporu spowodowane przepływem wytwarzanych gazów. W reaktorze ze złożem przepływowym tlen lub powietrze wspólnie z parą unosi rozdrobnione drewno, które jest wtryskiwane poprzez dyszę do komory spalania gazyfikatora. Gorące produkty gazowe mogą także być użyte do unoszenia drewna i w tym samym czasie gazyfikując go. W procesie katalicznego zgazowywania surowcem wejściowym jest gaz średniokaloryczny, będący produktem wyjściowym reaktora średniokalorycznego zgazowywania biomasy. W katalicznym zgazowywaniu dokonuje się podwyższenia stosunku wodoru do tlenku węgla. Piroliza stanowi dekompozycję organicznej materii ciepłem w obecności powietrza. Jest pierwszym etapem procesu produkującego syntetyczny gaz i syntetyczne paliwa ciekłe.

Zgodnie z informacjami podanymi w literaturze produkty przetwarzania chemicznego biomasy można uzyskać stosując następujące technologie:

- gaz średniokaloryczny:
  - gazyfikator o złożu fluidalnym z pośrednim dostarczaniem ciepła,
  - gazyfikator o złożu przepływowym,
  - zgazowywanie katalityczne biomasy,
- gaz syntezowy:
  - zgazowywanie katalityczne,
  - proces pirolizy,
- gaz wysokokaloryczny:
  - proces pirolizy w obecności metanu,
  - zgazowywanie katalityczne parą,
- paliwa ciekłe:
  - upłynnianie pośrednie,
  - upłynnianie bezpośrednie,
  - proces pirolizy w obecności metanu,
  - proces pirolizy w obecności powietrza,
- paliwa gazowe i ciekłe:
  - niskotemperaturowe zgazowywanie katalityczne.

Metody pośrednie i bezpośrednie upłynniania, w odniesieniu do węgla, są omówione w rozdziale 6-ym

### **Stan rozwoju**

Technologie chemicznego przetwarzania biomasy rozwija się w USA, Kanadzie, Szwecji, Finlandii, Krajach Europejskiej Wspólnoty i Austrii.

Proces gazyfikacji w złożu fluidalnym ciśnieniowym okazał się technologią zapewniającą 75% sprawności cieplnej [5.80]. W gazyfikatorach o złożu fluidalnym i małej przepustowości uzyskano 97,8% sprawności spalania i 83% sprawności cieplnej [5.81]. W procesie pirolizy w obecności metanu 90% drewna sosnowego zostało przetworzone w 30% etylenu, 25% benzenu i 45% tlenku węgla [5.82]. W Kanadzie rozwijany proces pirolizy próżniowej okazał się bardzo użyteczną technologią w produkcji paliw ciekłych z drewna [5.83]. W Szwecji rozwija się proces pirolizy [5.84]. W Finlandii technologie produkcji z biomasy drzewnej metanolu, etanolu i paliw ciekłych są bliskie komercjalizacji [5.85]. W Krajach Wspólnoty Europejskiej prowadzono badania nad procesem pirolizy i gazyfikatorami o złożu fluidalnym [5.86]. W USA w Pacific Northwest Laboratory i



Brookhaven National Laboratory rozwijano procesy pirolizy w obecności powietrza i metanu [5.87,5.88].

### **Efekty ekonomiczne**

W Szwecji koszt produkcji syntetycznych paliw z biomasy zawierał się w zakresie 0,12 - 0,09 SEK/kWh [5.89]. Według Pacific Northwest Laboratory paliwo ciekłe uzyskiwane w procesie pirolizy może współzawodniczyć z ropą przy cenie 21 \$/barykę. Koszt produkcji wyniósł 2,7 \$/GJ [5.87 ].

### **5.7.3 Technologie biologicznego przetwarzania biomasy**

W tabelicy 5.11 podano ilości w molach CO<sub>2</sub>/MJ dwutlenku węgla, powstającego podczas produkcji i spalania węgla dla wybranych produktów węgla. Najmniejsza emisja CO<sub>2</sub> powstaje podczas spalania węgla. Czym większy jest stosunek wodoru do węgla w rozpatrywanych nośnikach energii tym większa jest łączna emisja CO<sub>2</sub>. Wynika to z faktu, że produktem ubocznym produkcji wodoru przy zastosowaniu reakcji zwrotnej



jest CO<sub>2</sub>. Stąd wniosek, że technologie biologicznego przetwarzania mogą przyczynić się w pewnym stopniu do zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub>.

Tabela 5.11 Porównanie wytwarzanego CO<sub>2</sub> dla wybranych nośników energii podczas produkcji, spalania.

rodzaj nośnika energii	produkcja	spalanie	łącznie
C	-	2,54	2,54
CH <sub>2</sub>	1,36	1,61	2,97
CH <sub>4</sub>	2,17	1,25	3,42
CHOH	1,92	1,57	3,49

Jednym z powodów wzrastającego zainteresowania technologiami przetwarzania biologicznego jako źródła paliw jest to, że nie wytwarzają jako produktu ubocznego CO<sub>2</sub>. Mimo to, nie należy oczekiwać, że przetwarzanie biomasy będzie miało znaczny udział w ogólnej produkcji paliw. Jednakże istnieje zainteresowanie przetwarzaniem biologicznym odpadów komunalnych, a także węgla.

Istnieją dwa procesy biologicznego przetwarzania, mające znaczenie w produkcji syntetycznych paliw i ochrony środowiska. Są to:

1. fermentacja biomasy do paliw ciekłych,
2. beztlenowe biologiczne zgazowywanie biomasy,

### **5.7.4 Fermentacja biomasy**

#### **Własności biomasy**

Składnikami materii organicznej, które mają znaczenie przy wykorzystywaniu jej do celów energetycznych są:

- węglowodany,
- lignina.

Wszystkie węglowodany reprezentują sacharydy w postaci cukrów lub polimerów cukrów. Znanymi cukrami jest sacharoza i glukoza. Sacharoza stanowi podstawowy cukier soków roślinnych. Glukoza jako cukier występuje w wielu owocach. Podobnie jak w innych związkach organicznych, istnieje wiele izometrycznych form, w których atomy cukru mogą

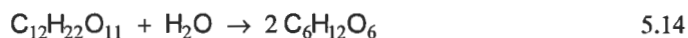
być powiązane w różny sposób. Niektóre z nich to: D-glukoza, D-mannoza i D-fruktoza. Polimery cukrów są reprezentowane przez celulozę, skrobię i hemicelulozę. Nazywa się je polisacharydami.

Z punktu widzenia produkcji paliw ciekłych bardzo istotną właściwością biomasy jest to czy ulega ona procesowi fermentacji. Temu procesowi mogą ulegać tylko następujące cukry: D-glukoza, D-mannoza, D-fruktoza, D-galaktoza i maltoza. Inne cukry mogą być przetworzone do cukrów ulegających fermentacji poprzez proces hydrolizy w obecności kwasu lub enzymu. Dla przypomnienia wyjaśnia się, że hydroliza jest reakcją podwójnej wymiany przebiegającej pomiędzy wodą i substancją w niej rozpuszczoną, prowadzącą do powstawania cząsteczek nowych związków chemicznych.

Sacharoza, skrobia i hemiceluloza poprzez proces hydrolizy mogą być przetworzone do cukrów podlegających procesowi fermentacji. Celuloza i lignina nie podlegają procesowi hydrolizy. Z tego względu, podstawowym problemem przemiany biologicznej biomasy staje się znalezienie sposobu przemiany celulozy do hemicelulozy, a następnie do etanolu.

### Proces fermentacji

Proces fermentacji przebiega zgodnie z reakcjami



Można zauważyć, że w przedstawionych reakcjach fermentacji na dwie molekuly produkowanego etanolu traci się jeden atom węgla, zawartego w  $CO_2$ , na trzy atomy węgla uczestniczącego w reakcji łącznej.

### Stan rozwoju

Jak wspomniano poprzednio, głównym przedmiotem badań jest opracowanie metody przemiany celulozy, zawartej w biomase drzewnej i odpadach komunalnych, w etanol. Badania te prowadzono głównie w USA, Szwecji, Włoszech, Republice Federalnej Niemiec i Szwajcarii. Przedmiotem badań były:

- hydroliza w obecności kwasu siarkowego [5.90-5.93].
- hydroliza celulozy w hemicelulozę w obecności enzymów [5.94-5.96],
- genetyka bakterii beztlenowych przyczyniających się do fermentacji celulozy w etanol [5.93,5.97],
- enzymy mogące uczestniczyć w nowych metodach produkcji alkoholu jako paliwa [5.98-5.100],
- beztlenowa produkcja etanolu [5.101].

Hydroliza w obecności kwasów jest technologią, która w najbliższej przyszłości może stać się handlowo dostępną. W zastosowaniu do pozostałości rolniczych była rozwijana i badana przez Muscle Shoals, Tennessee Valley Authority [5.92]. Uzyskano w skali laboratoryjnej 90 % sprawności przemiany celulozy i hemicelulozy do cukrów. Podobne rezultaty uzyskano stosując inne surowce wejściowe.

W Solar Energy Research Institute, USA, opracowano technologię, opartą na hydrolizie w obecności enzymów, pozwalającą przetwarzać jeden ze składników biomasy - celulozę w etanol, a pozostały składnik ligninę spalać jako paliwo w kotle produkując ciepło [5.102]. Badania oparte na zastosowaniu hydrolizy enzymatycznej prowadzono również w Szwecji [5.95].

### **Efekty ekonomiczne**

Dla technologii opracowanej w Solar Energy Research Institute koszt produkcji, według danych z 1991 roku, wynosił 1,27 \$/galon dla zakładu o przepustowości 1920 ton suchego drewna na dobę przy cenie drewna 42 \$/tonę. W 1980 roku koszt ten wynosił 3,60 \$/galon. Według wstępnych ocen istnieje możliwość redukcji kosztu do 0,83 \$/galon dla zakładu o przepustowości 10000 ton/dobę i cenie drewna 34 \$/tonę. Przewiduje się, że dalsze ulepszenia technologii pozwolą uzyskiwać koszt produkcji etanolu 0,6 \$/galon, który może być konkurencyjny do ropy przy cenie 25 \$/baryłkę [5.102].

### **Znaczenie**

Technologia przetwarzania biomasy w etanol poprzez proces fermentacji nie będzie mogła zastąpić takich paliw jak benzyna i nie będzie w stanie rozwiązać przyszłych problemów zaopatrywania w paliwa ciekłe. Niemniej jednak stwarza potencjalne możliwości zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery. Jednym z produktów ubocznych fermentacji biomasy jest protaina. Fakt ten może stać się jednym z czynników integrujących lokalny system energii z rolnictwem.

## **5.7.5 Beztlenowe biologiczne zgazowywanie biomasy**

### **Opis procesu**

Całkowita degradacja beztlenowa materii organicznej w CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> wymaga działania czterech głównych grup bakterii dokonujących przemianę materii. Są to:

- bakterie fermentujące, uczestniczące w procesie hydrolizy, wytwarzające lotne kwasy, CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>,
- bakterie produkujące wodór i octany degradujące kwasy na octany, CO<sub>2</sub> i azotu,
- bakterie produkujące octany,
- bakterie wytwarzające metan i dwutlenek węgla.

Łączny proces beztlenowego zgazowywania celulozy można zapisać w postaci



Można zauważyć, że na sześć atomów węgla uczestniczące w reakcji traci się dwa atomy węgla zawartego w CO<sub>2</sub>, który stanowi nieużyteczny produkt uboczny produkcji..

### **Stan rozwoju**

Proces beztlenowego zgazowywania odpadów zwierzęcych jest handlowo dostępny [5.97]. Proces biologicznego zgazowywania celulozy jest przedmiotem badań, w którym głównymi problemami badawczymi są:

- mikrobiologia beztlenowej fermentacji celulozy [5.103],
- beztlenowe zgazowywanie hemicelulozy [5.104].

Wspólnym problemem zgazowywania beztlenowego wszystkich rodzajów biomasy jest opracowanie sprawnej i taniej metody redukcji CO<sub>2</sub> w biogazie [5.105, 5.106, 5.107].

### **Efekty ekonomiczne**

W Danii opanowano technologię wytwarzania biogazu z odpadów zwierzęcych dla farm obejmujących 700 sztuk zwierząt [5.27]. Roczna produkcja gazu, o sprawności 29 %, zawierającego około 64 % metanu wynosi 2300 GJ. Jednostkowy koszt inwestycyjny i stałe jednostkowe koszty eksploatacji wynoszą odpowiednio 42 i 1,85 \$(1980)/GJ/trok.

### **Znaczenie**

Zgazowywanie beztlenowe biomasy drzewnej mogłoby współzawodniczyć z gazyfikacją chemiczną drewna tylko wówczas, gdyby sprawność zgazowywania

beztlenowego znacznie wzrosła. Z drugiej strony, przegląd informacji o technologiach wskazuje, że w ostatnich latach zaznaczył się nieznaczny postęp w podniesieniu sprawności omawianej technologii. Mając to na uwadze można stwierdzić, że zgazowywanie beztlenowe biomasy może mieć znaczenie w przypadku:

- ochrony środowiska,
- wykorzystywania lokalnych zasobów odpadów zwierzęcych.

### **5.7.6 Technologie wytwarzania energii elektrycznej i ciepła**

Najbardziej obiecującą, a także i zaawansowaną, technologią wytwarzania energii elektrycznej i ciepła jest skojarzony układ gazyfikacji wilgotnej biomasy, turbiny gazowej i turbiny parowej, opracowywany od 1986 roku przez firmę IMATRAN VOIMA OY, Finlandia. Jest to stosunkowo prosta konstrukcja elektrociepłowni [5.108].

### **5.8 Uwagi końcowe**

Pośród rozpatrywanych technologii źródeł odnawialnych największe szanse zastosowania w warunkach krajowych, w niedalekiej perspektywie, mogłyby mieć następujące technologie:

- słoneczny system grzewczy z sezonowym magazynowaniem energii wspomagany pompą ciepłą,
- produkcja biomasy drzewnej, jako surowca w produkcji energii elektrycznej i ciepła, wykorzystywana w lokalnym skojarzonym układzie gazyfikacji, turbiny gazowej i parowej.
- proces pirolizy biomasy drzewnej w obecności powietrza i metanu.

W dalszej perspektywie:

- ogniwa paliwowe.

Produkcja biomasy może odgrywać znaczącą rolę w przyszłości w wielu krajach świata. Według raportu National Renewable Energy Laboratory [5.109], USA, gospodarstwa rolne będą w przyszłości uprawiać rośliny oleiste wykorzystywane do produkcji zarówno produktów żywnościowych jak i paliw. Uprawa biomasy drzewnej będzie wykorzystywana nie tylko do produkcji papieru, ale także do celów energetycznych. Rozważa się możliwość dokonania znacznych inwestycji w niedalekiej przyszłości w celu zastąpienia węgla i mazutu, zasilających elektrownie w krajach bałtyckich (Łotwie, Estonii i Litwie), biomasa drzewną [5.110]. Studia na ten temat, finansowane przez Bank Światowy, są prowadzone w Szwecji.

Szansą na wykorzystywanie większej części produkcji rolniczej w kraju może stać się, w pierwszej kolejności uprawa biomasy w postaci rzepaku i następnie krótko okresowej uprawy wierzby. Wierzba, odpowiednio uprawiana na ziemiach słabszych, może być lokalnie wykorzystywana do produkcji energii lub też może być przetwarzana na paliwa ciekłe i gazowe. Jej uprawa może więc przyczynić się do tworzenia nowych miejsc pracy. Ponadto, dzięki tej uprawie, konieczność eksportu produkcji rolniczej byłaby osłabiona, przy równocześnie zmniejszonym zapotrzebowaniem na import paliw.

W podsumowaniu ekspertyzy Komitetu Termodynamiki i Spalania Wydziału IV Nauk Technicznych PAN, pt "Konwersja termiczna energii promieniowania słonecznego w warunkach krajowych", wykonanej przez zespół naukowców pod redakcją profesora Wiesława Gogóla, przedstawiono między innymi następujące wnioski dotyczące wykorzystywania energii źródeł odnawialnych w warunkach krajowych [5.111]:

- W krajach europejskich o klimacie zbliżonym do polskiego bardzo szybko wzrasta zastosowanie konwersji termicznej EPS (energii promieniowania słonecznego). Z porównania charakterystyki i wielkości EPS docierającej na terytorium Polski z innymi krajami, jak Szwecja, Niemcy, Dania, Holandia i Anglia, w których pracują już od dawna i

są wytwarzane na szeroką skalę urządzenia i instalacje wykorzystujące EPS oraz rozwija się badania nad nowymi technologiami i zastosowaniami wynika, że w Polsce istnieją podobne, dobre warunki wykorzystania EPS jako źródła energii. Nie tylko nie ma żadnych przeciwwskazań, ale przeciwnie, w naszym kraju o zupełnie niezłych zasobach helioenergetycznych, w których wytworzyła się wyjątkowo złą sytuacja ekologiczna, konwersja termiczna EPS powinna być możliwie szeroko stosowana.

- Istotną przyczyną ograniczającą szerokie zastosowanie konwersji termicznej EPS są względy ekonomiczne. Wydaje się jednak, że nieunikniony wzrost cen konwencjonalnych nośników energii w naszym kraju w najbliższej przyszłości oraz bardziej właściwe ujęcie ekonomiczne zagadnień ekologicznych usunie tę barierę. Uwzględnienie w rachunku ekonomicznym skutków oddziaływania na środowisko naturalne technologii konwencjonalnych może już obecnie znacznie zwiększyć atrakcyjność konwersji termicznej EPS uważanej za "czystą ekologicznie".

- Największe zastosowanie w kraju konwersja termiczna EPS znalazła dotychczas w rolnictwie (kolektory płaskie) i budownictwie (systemy pasywne). Tendencja ta prawdopodobnie utrzyma się jeszcze przez długi okres czasu, przy czym można przewidywać większą intensyfikację tych zastosowań z jednoczesnym rozszerzeniem wykorzystania EPS w innych działach gospodarki krajowej; wprowadzanie systemów zintegrowanych w rolnictwie oraz nie tylko pasywnego, ale i aktywnego wykorzystania EPS w budownictwie, może doprowadzić do istotnych zmian w bilansie energetycznym tych działów gospodarki krajowej.

- Należałoby zwrócić większą uwagę na stan edukacji w zakresie wykorzystania EPS, który jest w Polsce bardzo niski, a także na niedostateczny poziom propagowania wykorzystania EPS w środowiskach technicznych i ośrodkach decyzyjnych.

- Wydaje się, że polityka państwa powinna popierać poprzez kredyty, ulgi podatkowe i inne formy promocji (jak to ma miejsce w innych krajach) wykorzystanie proekologicznych źródeł energii, a szczególnie konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego.

## *Literatura*

- 5.1 Olsen L., Solar walls - measured and calculated, DTH-LV-MEDD-167, Dania, 1985.
- 5.2 Achard P. i inni, Passive solar component using rotating blades with latent heat storage so called "rotating wall", Juej-Spez, Julich, RFN, 1985.
- 5.3 Berndt G.W.P., DOMUS - ONE a passive solar concept goes commercial, Materiały konferencji CONF-86041, Kopenhaga, Dania, 10.06, 1986.
- 5.4 Weik H., Plagge J., Experimental solar house of the Luebeck Technikal Institute, Materiały konf. CONF-86041, Kopenhaga, Dania, 10.06, 1986.
- 5.5 Nordstrom C., Nordstrom K., Multifamily solar house in Gothenburg, Szwecja, Materiały konf. CONF-86041, Kopenhaga, Dania, 10.06, 1986.
- 5.6 Balcomb J.D., Passive solar in the United States: 1976-1986, SERI/RR-254-3059, USA 1987.
- 5.7 Alward R., i inni, How passive solar homes work in Kanada, SESC-8806, str.207-211, Kanada, 1988.

- 5.8 Yuill G.K. Gin K., Thermal performance of passive solar low-rise office building, SESC-8806, str. 183-187, Kanada, 1988.
- 5.9 Chyrczakowski S., Lis T., On the possibilities of energy savings in residential buildings in Poland, Polsko-amerykańskie seminarium "Efektywne wykorzystanie energii" Mogilany, 20-22.10, 1990.
- 5.10 Feist W., Heizen mit sehr wenig energie, Seminar "Niedrigenergiehauser" 23.06. in Alsfeld, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstat, RFN, 1988.
- 5.11 Fisch N., Evaluation of the Stuttgart University Project, prepared for the IEA-Task VII Meeting, 1988.
- 5.12 IEA Technical Report: Central solar heating plants with seasonal storage - status report, task VII, Chalmers University of Technology, Getegorg, Szwecja, 1990.
- 5.13 Roland J.R., Kearney D.W., World's largest solar electric power plant - 30 MW, Materiały konferencji CONF-860303, Washington, USA, 1986.
- 5.14 O'Hair E.A., i inni, Results from operation of the Crosbyton solar bowl, Materiały konferencji CONF-860406, Anaheim, USA, 1986.
- 5.15 Faas S.E., i inni, MWe solar thermal receiver pilot plant: thermal storage subsystem evaluation, SAND-86-8212, USA, 1986.
- 5.16 Linker K.L., Heat engine development for solar thermal dish electric power plants, SAND-86-0289, USA, 1986.
- 5.17 Bammert K., Long term experience with coal fired heaters in German closed air turbine plants, Atomkerenergie, Vol. 38 No4, 1981.
- 5.18 Bammert K. i inni, Large parabolic disk collectors with gas turbine, Atomkernenergie, Vol. 38, No 4, 1981.
- 5.19 Rozenman T., Solar reformer experiment design study, SAND-85-8184, USA, 1986.
- 5.20 Solomon A.D., Numerical study of the performance of latent heat storage for solar dynamic power systems, Materiały konferencji CONF-850808, Miami Beach, USA, 1985.
- 5.21 Fish J.D., Hawn D.C., CO<sub>2</sub> reforming of methane: closed-loop experiments in the CLEA facility, USA, 1986.
- 5.22 Muir J.F., Performance/economics comparison of sensible and termochemical energy transport systems for solar thermal applications, Materiały konferencji CONF-86010, San Diego, USA, 1986.
- 5.23 Office of Technology Assesment "Application of Solar Technology to Today's Energy Needs, Washington, USA, 1978.
- 5.24 Nadis S.I., "The Economics of Solar Heating and Cooling in Energy Efficient Buildings" Union of Concerned Scientists, Cambridge, Mass., USA, 1977.

- 5.25 Metz W.O., Solar Thermal Electricity: Power Tower Dominates Research, Science 197, 1977.
- 5.26 Herman S.W., Cannon J.S., Energy Future, Nowy York 1977.
- 5.27 Summary report on technology characterizations IEA, Energy Technology Systems Analysis Project, Kernforschungsanlage Julich, Jul-Spez-185, 1982.
- 5.28 Bedingungen und folgen von aufbaustrategien fur eine solar wasserstoffwirtschaft, Untersuchung fur die Euquete-Kommission des Deutschen Bundestages "Technikfolgen-Abschätzung und -Bewertung", Ottobrunn, RFN, Mai 1990.
- 5.29 Figielski T., Półprzewodniki, Encyklopedia fizyki współczesnej, PWN, Warszawa, 1983.
- 5.30 Jaworski B.M., Piński A.A., Elementy fizyki tom 2, PWN, Warszawa, 1976.
- 5.31 Mokashi A.R., i inni, High-efficiency silikon solar cell design and practice barriers, DOE/JPL/1012-112, USA, 1985.
- 5.32 Gee J.M., Virshup G.F., A 31 % -efficient GaAs/silikon mechanically stacked, multijunction concentrator solar cell, SAND-88-2564, USA, 1988.
- 5.33 Ferber R.R., Thin film photovoltaic technology: future application potential, Materiały konferencji CONF-840622, Anaheim, USA, 1984.
- 5.34 Shimada K., i inni, Potential of thin-film solar cell module technology, Materiały konferencji CONF-850808 Miami Beach, USA, 1985.
- 5.35 Zweibel K., Mitchell R., Polycrystalline thin film solar cells, Materiały konferencji CONF-851043 Las Vegas, USA, 1985.
- 5.36 Richards E.H., Sandia's Baseline 3 photovoltaic concentrator module, SAND-88-0552C, USA, 1988.
- 5.37 Edenburn M.W., Status of the photovoltaic concentrator technology project, Materiały konferencji CONF-841129 Kobe, Japonia, 1985.
- 5.38 Levy S.L., Stoddard L.E., High concentration photovoltaic module design, EPRI-AP-4752, USA, 1986.
- 5.39 Callagan W.T., Overview of flat plate photovoltaic technology, Materiały konferencji CONF-840622 Anaheim, USA, 1984.
- 5.40 Wyss A., Results of measurements and practical experience from two years of operation of an experimental photovoltaic plant with an output of 1,8 kW, Materiały konferencji CONF-820418, Zurich, Szwajcaria, 1982.
- 5.41 Girgis M.A., Thermal performance of three SE RES prototypes, Materiały konferencji CONF-850306, Knoxville, USA, 1985.

- 5.42 Kern E.C., Stand-off building block system for roof mounted photovoltaic arrays, SAND-85-7020, USA, 1985.
- 5.43 Camani M., Ceppi P., First experiences with the experimental photovoltaic plant TISO 15, Materiały konferencji CONF-8310418, Lusanne, Szwajcaria, 1983.
- 5.44 Mickal H., Ritter H., 100 kW solar power station, BMFT-FB-T-85-081, RFN, 1985.
- 5.45 Key T.S., Krauthamer S., Status of utility-interactive photovoltaic power conditioning technology, Materiały konferencji CONF-850808 Miami Beach, USA, 1985.
- 5.46 SOLERAS photovoltaic power system project, MRI/SOL-0102, USA, 1985.
- 5.47 Drewes P., Big trout lake photovoltaic project first year performance, SESC-8806, Kanada, 1988.
- 5.48 Norman C.E., Thomas R.E., Field trial and characterization of a low head photovoltaic pumping system, SESC-8806, Kanada, 1988.
- 5.49 Thomas R.E., i inni, Demonstration of a 4,2 kW photovoltaic system at the Baxter Interpretive Centre, Kars, Ontario, SESC-8806, Kanada, 1988.
- 5.50 Drewes P., Design of a remote residence photovoltaic DC power system, SESC-8806, Kanada, 1988.
- 5.51 Turnbull F.G., Design of a power conditioning subsystem for photovoltaic central power stations, SAND-84-7014, USA, 1986.
- 5.52 Pfeiffer H., Germano-Korean cooperation for erection and test of industrializes solar technologies, BMFT-FB-T-86-006, RFN, 1986.
- 5.53 Fan I.C.C., "Solar cells:plugging into the sun", Technology Review, No 8, 1979.
- 5.54 Mc Dowell E., "Solarville, Ariz: Down to \$ 76 Watt New York, Times, 24.6.1978.
- 5.55 Chamberlin J.L., The costs of photovoltaic concentration modules, SAND-88-0593C, USA, 1988.
- 5.56 Seibert M., Photoconversion - a future energy technology option, Materiały konferencji CONF-860665 Kobe, Japonia, 1986.
- 5.57 Centre for Solar Energy and Hydrogen Research Baden-Wurttemberg, Solar thermal engineering section, october 1990.
- 5.58 Wind energy blowing hard, the Economist 9.02.1980.
- 5.59 Witt H., Development and testing of heat generating wind energy plants for heating buildings, Materiały konferencji CONF-8202111, Julich, RFN, 1982.
- 5.60 Frantsi A. i inni, Direct heat produktion through the use of a straight bladed vertical axis wind turbine, EUR-9622, str. 620-623, 1985.



- 5.61 Fritzsche A., Lippmann G., Design concept of the 20 kW Darrieus plant in Argentina, Materiały konferencji CONF-8202111, Julich, RFN, 1982.
- 5.62 The Times, November, Wednesday November 11 1987.
- 5.63 Lasey V.P., Development, testing and commercialization of DAF Indal's series 6400 - 500 kW vertical axis wind turbine, EUR-9622, str. 119-123, 1985.
- 5.64 Waston R.A., Test result of the FloWind 300 kW prototype, Materiały konferencji CONF-850201, Dallas, USA, 17.02.1985.
- 5.65 Engle W.W., Status of the Boeing Mod-5B wind turbine project, Materiały konferencji CONF-850201, Dallas, USA, 17.02.1985.
- 5.66 Hasbrouk T., WTS-4 wind turbine test program, final report, EPRI-AP-4054, USA, 1985.
- 5.67 Thiele H.M., Construction of two AREOMAN 11/11 wind energy convertes for Indonesia, Materiały konferencji CONF-8202111, Juelich, RFN, 11.02.1982.
- 5.68 Hald H., i inni, DFVLR-25 m wind energy converter, EUR-9622, str. 102-107, 1985.
- 5.69 Development of vertical axis wind turbines, Darrieus type, 5 m diameter, at Grenoble, Francja, EUR-9622, str. 145-151, 1985.
- 5.70 Wennekens R., Transient behaviour of a one blade horizontal axis wind turbine, EUR-9622, str. 183-189, 1985.
- 5.71 Vidossich G., FIAT wind energy converters, in the power range 50-100 kW models already built, operating experience, futher developments, EUR-9622, str. 115-118.
- 5.72 Mays I.D. Rhodes H., Progress with the UK vertical axis wind turbine programme, EUR-9622, str. 130-137, 1985.
- 5.73 Hardell R., Werner R., AIB offshore wind power, study of the construction of offshore wind power units of Naesudden type, STEV-Wind-85-33, Szwecja, 1984.
- 5.74 Dickson E.M., California wind park developments, EUR-9622, str. 862-866, 1985.
- 5.75 Ludsager P., Madsen H.A., Wind/diesel development program at Risoe National Laboratory, EUR-9622, str. 663-668, 1985.
- 5.76 Freris L.L., i inni, Autonomous power system supplied from wind and diesel, EUR-9622, str. 669-673, 1985.
- 5.77 Bonte J.A.N., Duch autonomous wind diesel system, EUR-9622, str. 685-689, 1985.
- 5.78 Wurz D., Wind energy converted for electric power generation in the power range up to 5,5 kW, NP-6750901, RFN, 1986.

- 5.79 Burgel R., System design considerations on combined wind photovoltaic multi kilowatt energy converters, EUR-10113-EN, 1985.
- 5.80 Evans R.J., i inni, Gasification of wood wastes in the RENUGAS process, Materiały konferencji CONF-8604218-4, Chicago, USA, 28.04.1986.
- 5.81 Masson H.A., AVSA biomass gasification project, EUR-9748, 1985.
- 5.82 Steinberg M., Flash hydrolysis and methanolysis of biomass with hydrogen and methane, Materiały konferencji CONF-850512, Beijing, Chiny, 7.05.1985.
- 5.83 Roy C., i inni, Vacuum pyrolysis of biomass in a multiple-hearth furnace, Materiały konferencji CONF-850513, Gatlingurg, USA, 13.05.1985.
- 5.84 Sjoestroem K., Gasification of biomass and peat, STEV-RF-85-14, Szwecja, 1985.
- 5.85 Solantausta Y., Lique fraction of solid fuels, VTT-TIED-458, Finlandia, 1985.
- 5.86 Aarsen F.G., i inni, Energy recovery by gasification of agriculture and forestry wastes in fluidized bed reactors and in moving bed reactors with internal recycle of pyrolysis gas, EUR-10012-EN, 1986.
- 5.87 Kovac R.J., i inni, Research on the pyrolysis of hardwood in an entrained bed process development unit, PNL-7788, USA, 1991.
- 5.88 Steinberg M., i inni, Flash pyrolysis and methanolysis of biomass (wood) for production of ethylene, benzene and methanol, BNL-44428, USA, 1990.
- 5.89 Ekstroem C., i inni, Biofuel based coproduction of methanol and electric power: A survey study, VF-UB-82-30, Szwecja, 1992.
- 5.90 Hoagland W., Overview of engineering research on acid hydrolysis processes, SERI/CP-231-2726, USA, 1985.
- 5.91 Barrier J.W., Farina G.E., Ethanol from cellulosic agricultural feedstocka, SERI/CP-231-2726, USA, 1985.
- 5.92 Barrier J.W., i inni, Acid hydrolysis experimental facility results with corn stover, Materiały konferencji CONF-8506232-1, East Lansing, USA, 23.06.1985.
- 5.93 Canale-Parola E., Conversion of cellulose to ethanol by mesophilic bacteria, DOE/ER/10878-T3, USA, 1986.
- 5.94 Hagler R.W., Stahr J.J. Technocal and economic feasibility of enzyme hydrolysis for ethanol production from wood, NYSERDA-85-9, USA, 1985.
- 5.95 Hahn-Haegerdal B., i inni, Bioconversion of cellulose to ethanol, STEV-BF-85-12, Szwecja, 1985.
- 5.96 Wright J.D., i inni, Design and parametric evaluation of an enzymatic hydrolysis proces, SERI/TP-231-2975, USA, 1986.

- 5.97 Tilche A., Complete census of the anaerobic digesters today operating in Italy on animal waste, ENEA-RT/FARE-SIN-83-3, Włochy, 1983.
- 5.98 Production of methane, ethanol, single cell protein and fertilizer via solar distillation, DOE/R4/10340-T1, USA, 1980.
- 5.99 Di Giorgio G., i inni, Production of ethanol by immobilized living yeast cells, ENEA-RT/BIO-82-25, Włochy, 1982.
- 5.100 Di Giorgio G., i inni, Production of ethanol from municipal solid wastes (MSW) by immobilized growing yeast cells, ENEA-RT/BIO-82-26, Włochy, 1982.
- 5.101 Gonzales I.L., Aerobic ethanol production with a flocculent yeast in a biomass recycling system, NP-6770155, Szwajcaria, 1985.
- 5.102 Wyman C.E., The DOE/SERI ethanol from biomass program, SERI/TP-231-3996, pp. 3-19, Solar Energy Research Institute, Golden, USA, 1991.
- 5.103 Peck H.D., Ljunghdal L.G., Microbiology and physiology of anaerobic fermentation of cellulose, DOE/ER/10499-7, USA, 1986.
- 5.104 Rivard C., i inni, Anaerobic digestion of hemicellulosic feedstocks, ANL/CNSV-TM-167, USA, 1985.
- 5.105 Schoenheit P., Thauer R.K., Metabolism of H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> by methanobacterium, ANL/CNSV-TM-167, USA, 1985.
- 5.106 Hayes T.D., Isaacson H.R., New concept for the production of high BTU gas from anaerobic digestion, ANL/CNSV-TM-167, USA, 1985.
- 5.107 Biological production of fuels from coal derived gases, DOE/PC/80012-T3, USA, 1986.
- 5.108 Energy Innovation 1994, Imatran Voima's Research and Development Report, Finlandia.
- 5.109 The American farm: Harnessting the sun to fuel the world, National Renewable Energy Lab., Golden, St. Zjedn., NREL/SP-420-5877, USA, 1994.
- 5.110 Albertsson N., i inni, Import of biofuels and peat, VF-UB-93-19, Szwecja, 1993.
- 5.111 Ekspertyza Komitetu Termodynamiki i Spalania Wydziału IV Nauk Technicznych PAN, pt. "Konwersja termiczna energii promieniowania słonecznego w warunkach krajowych" Warszawa 1993.

**IBS**

43297

**ISBN 83-85847-06-5**

---

---

**W celu uzyskania bliższych informacji i zakupu dodatkowych egzemplarzy  
prosimy o kontakt z Instytutem Badań Systemowych PAN  
ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa  
tel. 36-19-01 w. 241 e-mail: [kotuszew@ibspan.waw.pl](mailto:kotuszew@ibspan.waw.pl)**