



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 – bojującemu 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 znajdywaniu 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 7

Wodór

Z punktu widzenia możliwości znacznej redukcji emisji dwutlenku węgla w atmosferze wykorzystywanie w coraz większym stopniu odnawialnych źródeł energii będzie nieuniknione. Wytwarzanym nośnikiem energii mogłaby być energia elektryczna lub wodór. W rozdziale niniejszym zostaną omówione technologie produkcji wodoru, a także możliwy udział wodoru w wykorzystywaniu odnawialnych źródeł energii.

7.1 Uwagi wstępne

Wzrost cen paliw kopalnych, szkodliwy wpływ na środowisko spalania węgla i wykorzystywania energii jądrowej, skłania świat do poszukiwania alternatywnych źródeł energii, w tym odnawialnych źródeł energii. Istnieje szeroko rozumiany pogląd, że wcześniej czy później źródła te w sposób znaczny będą zastępować paliwa kopalne i energię jądrową. Ponadto, odnawialne źródła energii są bardziej równomiernie rozmieszczone na kuli ziemskiej, aniżeli paliwa kopalne.

Czyste źródła energii, takie jak energia słoneczna, energia wiatru, są prawie nieograniczone. Jednakże technologie ich wykorzystywania są ciągle na etapie eksperymentalnym. Powstaje więc konieczność przyspieszania programów badawczych, zanim ropa i gaz ziemny zaczną się wyczerpywać.

Energia elektryczna, wytwarzana w elektrowniach wodnych, i wodór, uzyskiwany poprzez bezpośrednie lub pośrednie wykorzystywanie energii słonecznej, są obecnie jedynymi możliwymi "czystymi" nośnikami energii. Są one bardzo atrakcyjne. Nie powodują efektu cieplarnianego, ani też żadnych odpadów, i są niewyczerpalne.

Wzrastające zaniepokojenie efektem kwaśnych deszczy, wypalaniem się dziur ozonowych i efektem cieplarnianym, może wzmacniać działania prowadzące do większego stosowania wodoru jako nośnika energii. Bezpośrednia substytucja paliw kopalnych wodorem w gospodarce komunalno-bytowej i przemyśle przyczyniać się będzie do znacznego zmniejszania zanieczyszczeń środowiska. Wodór nie jest pierwotnym nośnikiem energii, ponieważ do jego uzyskania wymagana jest energia. Wodór, jako wtórny nośnik energii, uzyskuje się w wyniku rozkładu wody, a produktem spalania jego jest para wodna. Oznacza to, że użytkowanie wodoru dokonuje się w ekologicznym zamkniętym odnawialnym cyklu, w którym surowcem jest ogólnie dostępne niewyczerpywalne źródło wody. Wymagana jest również energia. Może być dostarczana przy wykorzystywaniu różnych źródeł energii, a także wielu technologii. Tematem niniejszego rozdziału będzie omówienie możliwych technologii produkcji wodoru i możliwego udziału wodoru w wykorzystywaniu odnawialnych źródeł energii.

7.2 Technologie produkcji wodoru

Źródłem wodoru może być dekompozycja wody. Energia może być doprowadzana do procesu rozkładu wody w postaci:

- pracy,
- ciepła,
- energii neutronów,
lub równocześnie
- ciepła i pracy,
- ciepła i energii neutronów.

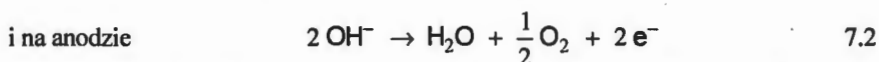
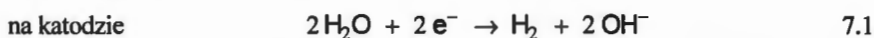
Wyżej wymienionym sposobom przekazywania energii odpowiadają następujące metody rozkładu wody, a mianowicie rozkład:

- elektrolityczny,
- termochemiczny,
- radiolityczny,
- termochemiczno-elektrolityczny,
- termochemiczno-radiolityczny.

Realizacja wyżej wymienionych metod rozkładu wody jest możliwa przy wykorzystywaniu odpowiednich źródeł energii, co zostało zobrazowane na rys. 7.1

7.2.1 Rozkład elektrolityczny

Po raz pierwszy elektrolizy wody dokonali w 1800 roku Nicholson i Garlisle. Rozkład elektrolityczny wody - elektroliza wody - jest procesem polegającym na wymuszeniu rozkładu wody na wodór i tlen w wyniku przepływu prądu elektrycznego pomiędzy anodą i katodą. W przypadku elektrolitu w postaci roztworu wodorotlenku potasu, najczęściej stosowanego, zachodzą następujące reakcje na elektrodach:



Podstawą produkcji wodoru metodą elektrolizy lub rozkładu termochemicznego jest następująca reakcja rozkładu



Na podstawie zasad termodynamiki można wykazać, że energia wymagana dla zajścia reakcji rozkładu (rów.7.3) może być dostarczana częściowo jako praca użyteczna L' i ciepło Q zgodnie z zależnościami

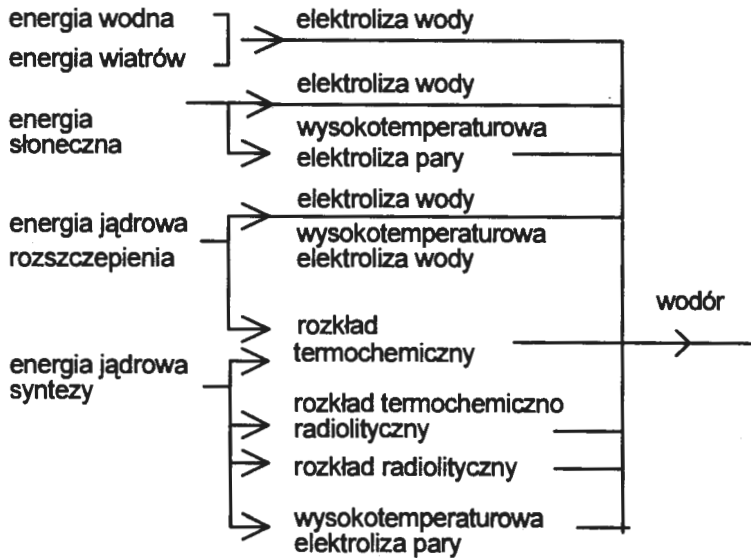
$$L' = \Delta G \quad 7.4$$

$$Q = T \cdot \Delta S \quad 7.5$$

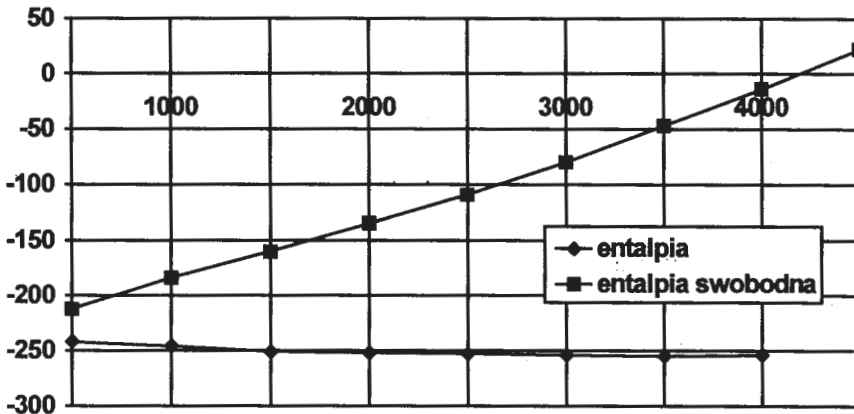
gdzie: G - entalpia swobodna; T - temperatura; ΔS - zmiana entropii procesu przy temperaturze T .

Suma L' i Q stanowi zmianę entalpii ΔI zachodzącego procesu rozkładu. Zmianę entalpii ΔI i zmianę entalpii swobodnej ΔG dla procesu rozkładu wody jako funkcję temperatury w stopniach Kelvina uwidoczono na rys. 7.2 [7.1, 7.2]. Ponieważ w procesie produkcji wodoru wykorzystuje się wodę, i ponieważ ΔI wody przy standartowej

temperaturze (298 K - 24,85 °C) wynosi 285,6 kJ/mol, wobec tego, ażeby wytworzyć jeden mol wodoru w wyniku dekompozycji wody minimum energii wymaganej jako energii wejściowej wynosi 285,6 kJ/mol. Przy tej temperaturze 237,2 kJ energii wejściowej musi być dostarczone w postaci pracy, ponieważ $\Delta G = 237,2$ kJ/mol przy 298 K.



Rys. 7.1 Metody wytwarzania wodoru.



Rys. 7.2 Zmiana entalpii ΔH i zmiana entalpii swobodnej w kJ/mol ΔG dla procesu rozkładu wody jako funkcja temperatury w stopniach Kelvina.

Sprawność wykorzystywania ciepła w produkcji jednego mola wodoru w procesie dekompozycji definiuje się jako stosunek teoretycznie wymaganej energii przy temperaturze 298 K (285,6 kJ dla wodoru) do całkowitego ciepła dostarczanego Q_t w procesie rozkładu, a więc

$$\eta = \frac{285,6}{Q_t}$$

7.6.

Jak pokazano na rys. 7.2, większość energii w procesie rozkładu dokonywanego w temperaturze pokojowej stanowi praca (gdzie w przedstawionym przypadku [7.1] obowiązuje konwencja, że praca przyjmuje znak ujemny, gdy układ wykonuje pracę na rzecz otoczenia). W miarę jak rośnie temperatura udział energii dostarczanej w postaci pracy maleje, aż do temperatury 4380 K (przy której krzywa entalpii swobodnej przyjmuje wartość zerową). Począwszy od tej temperatury energia jest dostarczana jedynie w postaci ciepła. Ważną obserwacją tego zjawiska jest to, że w takim przypadku ogólna sprawność znacznie wzrasta.

Stosując wysokotemperaturową elektrolizę uzyskuje się szereg korzyści, oprócz korzyści wynikających dzięki redukcji ΔG . Wzrasta ze wzrostem temperatury ilość reakcji zachodzących na elektrodach, w wyniku czego maleją straty polaryzacji. Gęstość prądu może być wyższa, aniżeli przy temperaturze otoczenia. Całkowite zapotrzebowanie na energię dostarczaną do procesu rozkładu pary jest niższe o ciepło parowania w stosunku do rozkładu wody jako cieczy.

Elektrolizery (aparaty do prowadzenia elektrolizy) mogą być w kształcie zbiornika lub filtru sprasowanego.

W elektrolizerze w postaci zbiornika, wyłożonego materiałem izolacyjnym, w roztworze wodnym 20-30 %-wym wodorotlenku potasu, są zanurzone anody i katody. Elektrody te są rozdzielone błoną, która zapobiega przemieszczaniu się gazu pomiędzy oddzielnymi przestrzeniami elektrod. Wszystkie elektrody tych samych biegunów są połączone równolegle, działają przy napięciu 1,9-2,5 V zasilanego prądu stałego.

W elektrolizerze typu filtr sprasowany zestawy elektrod są oddzielone przeponami. Jedna strona elektrody służy jako anoda ogniwa, a druga jej strona stanowi katodę w sąsiadującym ogniwie. Ogniwa są połączone szeregowo, w wyniku czego napięcie elektrolizera jest sumą poszczególnych ogniw. Rozważany typ elektrolizera działa przy większej gęstości prądu, a więc posiada mniejsze wymiary. Z punktu widzenia rodzaju elektrolitu rozróżnia się elektrolizery typu filtr sprasowany o elektrolicie w postaci polimerów w stanie stałym i tlenków w stanie stałym. W elektrolizerach o elektrodach w postaci tlenków stałych dokonuje się wysokotemperaturowej elektrolizy pary.

Zwiększenie sprawności elektrolizera można uzyskać zwiększając ciśnienie. Badania nad taką koncepcją prowadzi się od szeregu lat.

Stan rozwoju, efekty ekonomiczne

Omawiany jest stan rozwoju następujących typów elektrolizerów, rozwijanych między innymi w RFN:

1. elektrolizer alkaliczny ciśnieniowy, typu zbiornik, zawierający elektrolit w postaci roztworu wodnego wodorotlenku potasu,
2. elektrolizer polimerowy, typu filtr sprasowany, zawierający elektrolit w postaci polimeru przewodzącego jony nafionu,
3. elektrolizer wysokotemperaturowy, typu filtr sprasowany, zawierający elektrolit w postaci tlenków cyrkonu i itru, ZrO_2 , Y_2O_3 ,

W tablicach 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6 podano odpowiednio dane techniczne i ekonomiczne dla elektrolizera alkalicznego ciśnieniowego, polimerowego i wysokotemperaturowego dla następujących okresów czasowych: 1990, 2005, 2025, 2050 rok. Dane te zaczerpnięto z opracowania wykonanego na zlecenie komisji Bundestagu, RFN, które było realizowane przez Ludwig-Bolkow Systemtechnik - Ottobrun, Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt - Stuttgart, Forschungsstelle für Energiewirtschaft - Monachium [7.3].

Tablica 7.1 Elektrolizer alkaliczny ciśnieniowy - dane techniczne.

rok		1990	2005	2025	2050
moc	MW	100	100	100	100
produkcja wodoru	GWh/r	216	243	266	266
współczynnik wykorzystania mocy	%	73	82	90	90
sprawność	%	95	97	98	98
rodzaj przepony		azbest	CaTiO ₃		
rodzaj elektrolitu		KOH	KOH		
temperatura	°C	90	160		
powierzchnia ogniwa	m ²	3,3	1,5	2,0	2,5
liczba ogniw		287	150	80	64

Tablica 7.2 Elektrolizer alkaliczny ciśnieniowy - dane ekonomiczne (stopa procentowa 4 %, 1\$ = 2 DM -1990).

rok		1990	2005	2025	2050
jednostk. koszty inwestycyjne	DM/kW	1300	900	700	600
koszty energii wejściowej	DM/kWh	0,1	0,1	0,1	0,1
koszty produkcji wodoru	DM/kWh	0,25	0,20	0,17	0,16
cykl budowy	lata	2	1,5	1,3	1,0
ekonomiczny czas życia	lata	30	30	30	30

Tablica 7.3 Elektrolizer polimerowy - dane techniczne.

rok		1990	2005	2025	2050
moc	MW	100	100	100	100
produkcja wodoru	GWh/r	245	251	266	266
współczynnik wykorzystania mocy	%	83	85	90	90
sprawność	%	95	97	98	98
temperatura	°C	120			
powierzchnia ogniwa	m ²	0,7	1,0	1,2	1,5
liczba ogniw		257	141	118	94

Tablica 7.4 Elektrolizer polimerowy - dane ekonomiczne (stopa procentowa 4 %, 1\$ = 2 DM -1990).

rok		1990	2005	2025	2050
jednostk. koszty inwestycyjne	DM/kW	6100	3100	2100	1600
koszty energii wejściowej	DM/kWh	0,1	0,1	0,1	0,1
koszty produkcji wodoru	DM/kWh	0,48	0,35	0,24	0,21
cykl budowy	lata	2	1,5	1,3	1,0
ekonomiczny czas życia	lata	30	30	30	30

Obecnie opanowana technologia elektrolizera wymaga 4,5 kWh/m³H₂ (50,07 kWh/kg H₂). Dla bardziej zaawansowanej technologii lub elektrolizera wysokotemperaturowego jednostkowe zużycie energii elektrycznej ma wynosić odpowiednio 3,95 kWh/m³H₂ (43,95 kWh/kg H₂) i 3,2 kWh/m³H₂ (35,60 kWh/kg H₂).

Tablica 7.5 Elektrolizer wysokotemperaturowy - dane techniczne.

rok		1990	2005	2025	2050
moc	MW		1	100	100
produkcja wodoru	GWh/r		3	281	281
współczynnik wykorzystania mocy	%		90	95	95
sprawność	%		97	98	98
temperatura	°C		1000		
powierzchnia ogniwa	m ²		1,0	1,5	2,5
liczba ogniw			910	361	271

Tablica 7.6 Elektrolizer wysokotemperaturowy - dane ekonomiczne (stopa procentowa 4 %, 1\$ = 2 DM -1990).

rok		1990	2005	2025	2050
jednostk. koszty inwestycyjne	DM/kW		3100	1600	1100
koszty energii wejściowej	DM/kWh		0,1	0,1	0,1
koszty produkcji wodoru	DM/kWh		0,29	0,20	0,18
cykl budowy	lata		1,5	1,3	1,0
ekonomiczny czas życia	lata	30	30	30	30

7.2.2 Rozkład termochemiczny

Bezpośredni rozkład wody

Bezpośredni rozkład wody, w którym energia jest przekazywana wyłącznie w postaci ciepła, zgodnie z reakcją

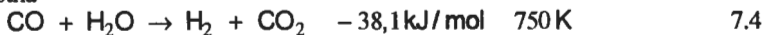


wymaga temperatury 5450 K. Tak wysokie temperatury nie są osiągalne praktycznie.

Termochemiczne cykle

Obniżenie temperatury jest możliwe stosując dwa cykle termochemiczne, endotermiczny i egzotermiczny, w których uczestniczą odpowiednie substancje reagujące z wodą. Przykładem może być:

reakcja zwrotna



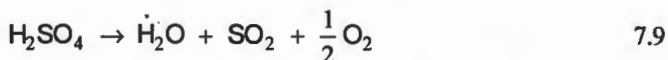
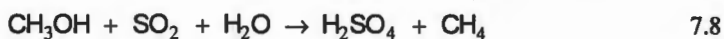
i rozkład CO₂



Cykl ten jest w praktyce niemożliwy do zrealizowania w przypadku, gdy do procesu rozkładu CO₂ dostarcza się energię w postaci ciepła, a to ze względu na wymaganą wysoką temperaturę.

Innym przykładem jest cykl metanolowy Schultena [7.4]. Składa się on z następujących czterech reakcji:





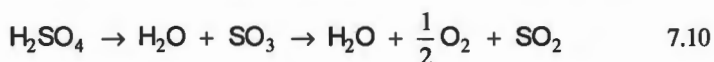
Graniczną najwyższą temperaturą jest 927 °C. Oceniona wstępnie sprawność cyklu ma wynosić 40 - 45 %. Zakres sprawności zależy od sprawności przekazywania ciepła do procesu. Dwie reakcje, reakcja reformingu parowego metanu (rów. 7.6) i syntezy metanolu (rów. 7.7), są dobrze znane i opanowane przemysłowo. Pozostałe dwie, synteza metanu - kwas siarkowy i dekompozycja kwasu siarkowego, były przedmiotem badań w RFN.

Istnieje koncepcja wykorzystywania wysokotemperaturowego ciepła jądrowego w cyklu Schultena [7.4]. Oceniono, że w przypadku stosowania ciepła jądrowego sprawność będzie wynosić około 37 %.

Odkryto szereg cykli, dla których graniczną temperaturą jest 1000 °C. Potencjalnym źródłem wysokotemperaturowego ciepła mogłyby być w przyszłości reaktory wysokotemperaturowe, jeżeli energia jądrowa będzie akceptowalna przez społeczeństwo.

7.2.3 Rozkład termochemiczno-elektrolityczny

Jednym z programów badawczych firmy Westinghouse, USA, było opracowanie systemu produkcji wodoru wykorzystując ciepło wytwarzane przez reaktory wysokotemperaturowe. Rozważano cykl obejmujący dwie reakcje chemiczne produkcji tlenu i wodoru, w którym uczestniczy kwas siarkowy. Tlen uzyskuje się na drodze termicznej redukcji trójtlenku siarki otrzymywanego z kwasu siarkowego, a mianowicie



przy temperaturze 1000 °C.

SO₂ wykorzystuje się w procesie elektrolizy wody z godnie z reakcją



która zamyka cykl. Cykl ten badano w skali laboratoryjnej. Opracowanie przemysłowe wymagałoby opracowania materiałów odpornych na korozję przy wysokich temperaturach. Sprawność ma wynosić w granicach 35 - 45 %. Koszt produkcji wodoru oceniono na około 7 \$/GJ (\$ 1979) [7.2].

7.2.4 Rozkład radiolityczny

Energia syntezy manifestuje się w postaci energii:

- promieni X,
- wysokotemperaturowej plazmy,
- neutronów o bardzo wysokich energiach, 14 MeV.

Udział energii neutronów w energii syntezy wynosi 80 %. Wykorzystanie bezpośrednie energii neutronów jest więc równoznaczne z bezpośrednim wykorzystaniem energii syntezy.

Energia neutronów może być przekazywana w postaci:

- ciepła w wyniku sprężystego rozpraszania względnie wychwytu neutronów, lub
- promieniowania jonizującego.

Promieniowanie jonizujące inicjuje proces chemiczny zwany radiolizą. Mianem rozkładu radiolitycznego określa się proces chemiczny rozkładu danej substancji na czynniki proste pod wpływem promieniowania jonizującego.

Sprawność rozkładu radiolitycznego CO₂ jest wyższa, aniżeli wody. Wobec tego można sądzić, że energię neutronów należy przede wszystkim bezpośrednio wykorzystywać do rozkładu CO₂ zgodnie z reakcją

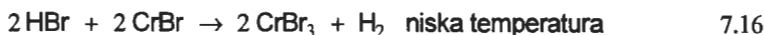
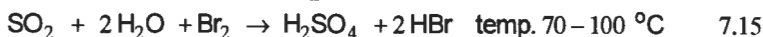
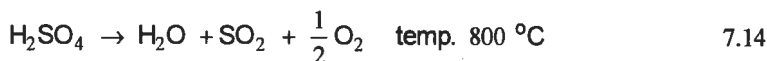


Uniknęłyby się w ten sposób problemu wysokich temperatur, jaki występowałby w przypadku rozkładu CO₂ za pomocą ciepła. Tlenek węgla CO, będący produktem wyjściowym reakcji (7.12), można wykorzystywać do produkcji wodoru zgodnie z reakcją zwrótną

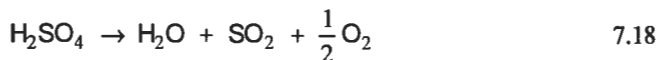


7.2.5 Rozkład termochemiczno-radiolityczny

Istnieje możliwość wykorzystania rozkładu radiolitycznego jako jednego z etapów cyklu termochemicznego. Przykładem jest następujący cykl termochemiczny



Realizacja praktyczna tego cyklu jest problematyczna, ponieważ dotychczas nie udało się uzyskać odpowiedniej szybkości reakcji trzeciej. Rozwiązaniem problemu okazał się rozkład radiolityczny HBr, co zapoczątkowano w cyklu MARK I opracowywanym w ISPRA, Włochy, w wyniku czego uzyskuje się



Jest to przykład rozkładu termochemiczno-radiolitycznego.

Opublikowany raport Electric Power Research Institute, USA [7.4], zawiera następujące stwierdzenie: "Produkcja syntetycznego paliwa, jako wodoru lub metanolu przy wykorzystaniu neutronowej radiolizy identyfikuje się jako najbardziej ważne krótkoterminowe wykorzystywanie energii syntezy. Wykorzystanie energii neutronów w dwuetapowym cyklu rozkładu termochemiczno-radiolitycznego wody jest jednym z najbardziej obiecujących nowych rozwiązań".

7.2.6 Rozkład radiolityczno-elektrolityczny

Najprostszą reakcją syntezy metanolu jest



która daje w wyniku metanol. Wymagany jest gaz o stosunku H₂/CO równy 2. Taki gaz można uzyskać stosując:

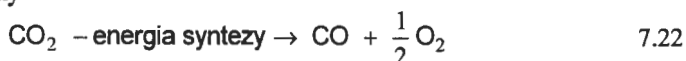
- katalityczne zgazowywanie węgla, co było przedmiotem rozważań w rozdziale 6-tym,
- rozkład radiolityczno-elektrolityczny, w którym stosuje się rozkład:
 - radiolityczny CO₂,
 - elektrolityczny H₂O.

Energia syntezy wykorzystywana w procesie rozkładu radiolityczno-elektrolitycznego może stanowić odnawialne źródło paliw węglowodorowych. Bardzo atrakcyjną jest proponowana metoda wykorzystywania jako surowca powietrza i wody. Dwutlenek węgla zawarty w powietrzu byłby źródłem węgla. Pozwoliłoby to eliminować:

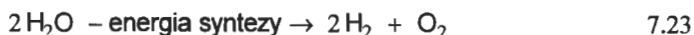
- zatrudnienie pod ziemią,
- problem ekologiczny kopalń odkrywkowych,
- zanieczyszczenie siarką i pyłem w wyniku spalania paliw kopalnych,
- utrzymywanie równowagę CO₂ w atmosferze, jak również
- uniezależnić budowę zakładów od miejsca występowania zasobów paliw kopalnych.

Przez analogię do cyklu fotosyntezy - paliwo może utworzyć cykl energia syntezy - metanol. Pierwszy cykl przetwarza energię słoneczną w celulozę w wyniku reakcji CO₂ i H₂O. Cykl energia syntezy-metanol obejmuje [7.5]:

1. rozkład radiolityczny



2. rozkład elektrolityczny



3. syntezę metanolu



z którego można wytwarzać węglowodory.

Poszczególne typy reaktorów syntezy faworyzują względnie ograniczają z punktu widzenia:

- konstrukcji reaktora,
- parametrów plazmy,
- sprawności przetwarzania energii syntezy

sposób wykorzystywania energii syntezy dotyczący zastosowania, wyboru rodzaju technologii, a także stanu czynnika uczestniczącego w reakcji.

W tablicy 7.7 podano sprawność wykorzystywania energii syntezy w procesach produkcji wodoru. Dane te sugerują, że z punktu widzenia efektywności wykorzystywania energii syntezy winno się stosować proces elektrolizy, radiolityczno-elektrolityczny lub proces rozkładu termicznego-radiolityczny.

Cykl fotosyntezy zachodzi w sposób naturalny przy niskim stężeniu CO₂. Cykl energia syntezy - metanol wymaga źródła energii i większego stężenia CO₂. Temodynamiczne minimum energii wymaganej dla wydzielania CO₂ z powietrza przy ciśnieniu 1 at wynosi 113 kWh/tonę CO₂. Ta sama wielkość dla tlenu jest równa 30,5 kWh. CO₂ można wydzielić z powietrza poprzez proces skraplania lub proces posługujący się substancjami absorbująco-desorbującymi. 1 tona tlenu uzyskiwanego metodą skraplania powietrza wymaga 300 kWh energii elektrycznej. Oznacza to, że proces ten przebiega ze sprawnością

10 %. Przyjmując tę samą sprawność do procesu wydzielania CO₂ z powietrza, zużycie energii dla uzyskania 1 tony CO₂ może wynosić 1130 kWh.

Tablica 7.7 Sprawność wykorzystywania energii syntezy w produkcji wodoru.

proces	sprawność ogólna %	sprawność cieplna, %	zużycie kWh/kg H ₂
elektrolizy (płyn)	34		90,2
radiolizy (gaz)	6		555,5
fotolizy (gaz)	1,2		2777,7
rozkładu termicznego	7,5		455,3
radiolityczno-elektrolityczny		38	87,5
termochemiczno-radiolityczny		39	85,5

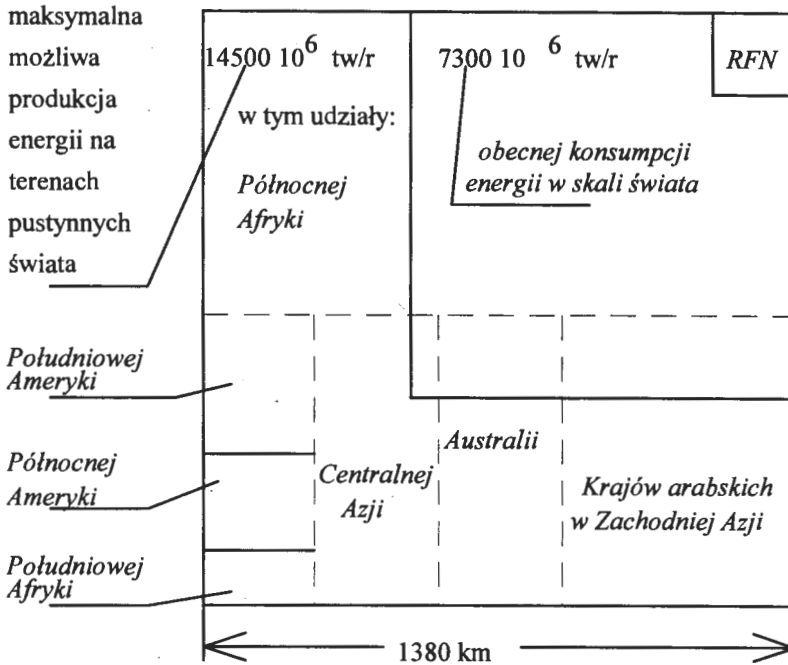
Jak wspomniano, najwyższą sprawność wykorzystania energii syntezy w procesie produkcji metanolu można uzyskać stosując metodę rozkładu radiolityczno-elektrolitycznego lub elektrolitycznego. W pierwszym rozwiązaniu wykorzystuje się ciepło unoszone przez CO₂ w układzie turbina-generator do wytwarzania energii elektrycznej. Dzięki temu zużycie energii cieplnej wynosi 20,5 kWh/kg CH₃OH. Z tego 4,4 kWh/kg CH₃OH wykorzystuje się w procesie wydzielania CO₂.

7.2.7 Uwagi końcowe do punktu 7.2

Z przedstawionych metod wytwarzania wodoru najkorzystniejszą z punktu widzenia sprawności wytwarzania okazuje się rozkład elektrolityczny wody lub pary i rozkład termochemiczno-radiolityczny. W przypadku rozkładu elektrolitycznego wielkością wejściową jest energia elektryczna. Realizacja rozkładu termochemiczno-radiolitycznego wymaga wykorzystywania między innymi energii syntezy. Jednakże należy mieć na uwadze, że rozkład termochemiczno-radiolityczny jest na etapie badań naukowych. Reaktory syntezy nie stanowią najlepszego rozwiązania z punktu widzenia ochrony środowiska. Ponadto trudno przewidzieć w jakim czasie mogą być opanowane przemysłowo. W tej sytuacji najbardziej obiecującą metodą z punktu widzenia sprawności wytwarzania wodoru i osiągalności technologii staje się metoda elektrolizy, w której energia elektryczna jest wielkością wejściową.

Mówiąc o wodrze jako przyszłym nośniku energii, stosowanym na szeroką skalę, ma się na myśli możliwość redukcji emisji zanieczyszczeń środowiska. W tej sytuacji produkcja energii elektrycznej, wykorzystywanej w procesie elektrolizy, może dokonywać się przy wykorzystywaniu odnawialnych źródeł energii takich jak energia rzek lub energia słoneczna. Obecne zużycie energii w skali świata w przeliczeniu na węgiel wynosi 7300 mln ton, co jest równoważne 59414 TWh/r (1 tona węgla = 29,3 GJ, 1 TWh = 3,6*10⁶ GJ). Światowe potencjalne zasoby energii rzek wynoszą 25027 TWh/r, światowe potencjalne zasoby technicznie możliwe do eksploatacji stanowią 20000 TWh/r, a obecnie wykorzystywane są równe 1331 TWh/r [7.6]. Jeżeli weźmie się pod uwagę, że w połowie następnego stulecia zużycie energii ma podwoić się, a więc mogłoby stanowić około 120000 TWh/r, to pomijając wysokie koszty inwestycyjne elektrowni wodnych, energia rzek nie mogłaby stanowić wystarczającego potencjału produkcji energii elektrycznej dla zapewnienie znacznego udziału produkowanego wodoru w ogólnym zużyciu energii w skali świata. W tej sytuacji pozostaje możliwość wykorzystywania energii słonecznej poprzez stosowanie dużych słonecznych siłowni lokalizowanych na terenach pustynnych o dużym nasłonecznieniu jak dla przykładu tereny pustynne w Północnej Afryce. Potencjalne zasoby takich terenów o dużym nasłonecznieniu, uwidoczniono na rys. 7.3 w postaci odpowiednich równoważnych tym zasobom powierzchni terenów pustynnych [7.7]. Powierzchnia około 2

mln km² jest możliwa do wykorzystania w skali świata dla celów produkcji wodoru. Stanowi to 1,3 % ogólnej powierzchni kuli ziemskiej. Przy czym 40 % tej powierzchni jest zlokalizowana w Północnej Afryce, co czyni bardzo interesujące rozwiązanie dla Europy. Rozwiązanie takie było analizowane na zlecenie specjalnej komisji Parlamentu Republiki Federalnej Niemiec przez szereg instytucji naukowych [7.3]. Niektóre wyniki tych badań przedstawiono poniżej.



Rys. 7.3 Potencjalne zasoby terenów pustynnych w skali świata o dużym nasłonecznieniu.

7.3 Wybrane scenariusze wykorzystywania energii słonecznej do produkcji wodoru na dużą skalę

7.3.1 Wodór jako nośnik energii

Wodór jest bardzo uniwersalnym medium. Może być stosowany jak gaz ziemny do wytwarzania ciepła, podobnie jak benzyna jako paliwo w transporcie lądowym i powietrznym, a także do bezpośredniej produkcji energii elektrycznej w ogniach paliwowych. Ponadto może być stosowany do produkcji gazowych i ciekłych węglowodorów w wyniku odpowiedniego przetwarzania paliw kopalnych. Również jest surowcem w wytwarzaniu wielu produktów chemicznych. Obecnie produkcja wodoru w skali światowej pochodzi w 50 % z ropy, 30 % z gazu ziemnego, 15 % z węgla, 5 % z innych źródeł w tym 0,5 % z elektrolizy wody. Konsumpcja światowa wodoru wynosi 350 mld m³/r, w tym przeznaczają się na produkcję: 47 % - amoniaku, 41 % - petrochemii, 5 % - metanolu, 4 % - metalurgii i 3 % pozostała.

Wodór można magazynować:

- w zbiornikach ciśnieniowych,
- systemach kriogenicznych,

- metalowych hybrydach (magazynowanie wodoru jako gazu w postaci wodorków takich metali jak lantan, tytan, cyrkon i magnez).

7.3.2 Projekty badawcze prowadzone w RFN

Przemysł energetyczny zaspokajający popyt na nośniki energii przez gospodarkę narodową winien spełniać trzy podstawowe zadania:

- czynić, aby energia była osiągalna w każdej chwili w wystarczającej ilości i możliwie po najniższych cenach,
- patrzeć w daleką przyszłość, ażeby spełniać swoją funkcję możliwie najkorzystniej z punktu widzenia zaspokajania popytu na energię i ochrony środowiska,
- pamiętać, że urządzenia i produkty przemysłu energetycznego mogą być przedmiotem eksportu.

Sledząc informacje zawarte w materiałach czasopism naukowych nietrudno zauważyć, że przemysł energetyczny RFN spełnia wyżej wymienione zadania.

W 1985 roku zakłady Bayern, Monachium, jedne z największych zakładów w RFN, postanowiły inwestować w technologie przyszłości w ramach demonstracyjnego projektu, mającego za cel opanować technologie produkcji wodoru wykorzystując energię słoneczną. Przeznaczono 62 mln DM na realizację pierwszego etapu projektu. W tym celu stworzono prywatną firmę, pod nazwą Solar-Wasserstoff-Bayern. Partnerami tej firmy, każda z udziałem 10 %-ym, są: BMW, Linde, Messerschmitt-Bolkow-Blohm i Siemens. 50 % kosztów projektu ma ponosić Ministerstwo Badań i Technologii, RFN, i Bawarskie Ministerstwo Ekonomii i Transportu [7.7].

Na wniosek specjalnej komisji Parlamentu RFN zlecono zadanie określenia uwarunkowań i konsekwencji możliwej realizacji określonych scenariuszy wykorzystywania energii słonecznej do produkcji wodoru na dużą skalę w RFN, południowej Hiszpanii lub w Północnej Afryce. Zadanie to wykonywały następujące instytucje: Ludwig-Bolkow Systemtechnik - Ottobrun, Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt - Stuttgart, Forschungsstelle für Energiewirtschaft - Monachium [7.3].

W 1986 roku podpisano umowę pomiędzy Ministerstwem Badań i Technologii, RFN, i odpowiednimi władzami Arabii Saudyjskiej o wspólnej realizacji projektu HYSOLAR (HYdrogen from SOLAR energy). Obydwa kraje uzgodniły, że będą wspólnie inwestować w badania naukowe i technologie produkcji wodoru z wody wykorzystując energię słoneczną początkowo na okres 4-rech lat [7.7]. Koszty projektu miały pokryć: Rząd RFN - 16 mln DM, region Badenii-Wurtembergii - 8 mln DM, Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) wspólnie z Uniwersytetem Stuttgart - 7,2 mln DM.

7.3.3 Wybrane scenariusze wykorzystywania energii słonecznej na dużą skalę

Poniżej zamieszczono niektóre dane dotyczące analizy scenariuszy wykorzystywania energii słonecznej, prowadzonej w odniesieniu do Republiki Federalnej Niemiec [7.8].

Scenariusze możliwego wykorzystywania energii słonecznej w Republice Federalnej Niemiec.

Rozważano trzy możliwe ścieżki wykorzystywania energii słonecznej, a mianowicie:

1. Bezpośrednie zasilanie sieci wysokiego napięcia energią elektryczną uzyskiwaną z kolektorów słonecznych instalowanych w kraju i za granicą (Afryka Północna lub Południowa Hiszpania) wykorzystując linie transmisji wysokiego napięcia.
2. Wytwarzanie wodoru gazowego poprzez elektrolizę wody, transport rurociągowy, a następnie przetwarzanie w ogniwach paliwowych w energię elektryczną lub wykorzystywanie bezpośrednie.

3. Wytwarzanie wodoru w postaci ciekłej, wykorzystywanego bezpośrednio jako paliwo, transport morski w przypadku wytwarzania za granicą wykorzystując energię słoneczną lub energię rzek (Kanada).

Przez słoneczną instalację o dużej skali rozumie się taką, która umożliwia wykorzystywanie odnawialnych źródeł energii w sposób ekstensywny. Zakłada się, że instalacja posiada strukturę modułową.

Były rozważane następujące systemy:

- wytwarzanie energii elektrycznej na terenie RFN stosując systemy słoneczne fotowoltaiczne,
- import (z południowej Hiszpanii lub Północnej Afryki) energii elektrycznej, wytwarzanej przez systemy z możliwością lub bez możliwości magazynowania w bateriach stosując słoneczne elektrownie ciepłone z heliostatami,
- wytwarzanie wodoru na terenie RFN, wykorzystując energię elektryczną wytwarzaną przez systemy słoneczne fotowoltaiczne,
- import wodoru w stanie gazowym uzyskiwanym poprzez wykorzystywanie energii elektrycznej wytwarzanej przez systemy słoneczne fotowoltaiczne lub słoneczne elektrownie ciepłone z heliostatami,
- import ciekłego wodoru uzyskiwanego, wykorzystując energię elektryczną wytwarzaną w elektrowniach wodnych lub przez systemy słoneczne fotowoltaiczne.

Przyjęto, że moc modułu systemu fotowoltaicznego lub słonecznej elektrowni ciepłnej zawiera się w granicach 100 - 200 MWe. Energia wytwarzana w każdym badanym przypadku wynosi 102 TWh/r, co stanowi 25 % energii elektrycznej wytwarzanej w 1989 roku w RFN. W zależności od lokalizacji, konfiguracji systemu i rodzaju źródła energii, wykorzystanie instalacji w ciągu roku zawiera się w granicach 1150 - 6500 godzin przy pełnym obciążeniu.

Oczekuje się, że znaczny efekt ekonomiczny, będący konsekwencją instalacji słonecznych dużej skali, będzie mógł nastąpić na początku przyszłego stulecia. Rozważano dwa punkty czasowe z punktu widzenia stanu zaawansowania technologii:

- 2005 rok, w którym obecne oceny ilościowe są całkiem prawdopodobnie osiągalne, pod warunkiem, że będzie następował dalszy rozwój technologii na skalę przemysłową,
- 2025 rok, w którym oceny ilościowe będą możliwe do osiągnięcia przy założeniu, że opanowane technologie będą stosowane na dużą skalę.

Określając stan technologii dla 2005 i 2025 roku nie oznacza to, że rozwój ich zostanie zakończony. Szereg studiów sugeruje potencjalne możliwości dalszego zaawansowania rozważanych technologii [7.8, 7.3].

W zależności od wyboru określonego systemu energii, rodzaj i ilość energii, zasilająca krajową sieć RFN, będzie ulegać zmianom. Rozważano następujące scenariusze rozwoju energii słonecznej pozyskiwanej za granicą, a wykorzystywanej w Republice Federalnej Niemiec, których odpowiednie charakterystyki zamieszczono w tablicach 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12, a mianowicie:

- Zlokalizowane w południowej Hiszpanii słoneczne systemy fotowoltaiczne dużej skali produkujące energię elektryczną:
- H1 scenariusz** - bezpośrednie zasilanie sieci wysokiego napięcia energią elektryczną prądu stałego wykorzystując linie transmisji wysokiego napięcia (oznaczenie HVDC),
- H2 scenariusz** - bezpośrednie zasilanie sieci wysokiego napięcia energią elektryczną prądu stałego wykorzystując linie transmisji wysokiego napięcia (oznaczenie HVDC), duży system baterii jest wykorzystywany przed zasilaniem linii przesyłowej wysokiego napięcia,
- H3 scenariusz** - wytwarzanie wodoru gazowego poprzez elektrolizę wody, transport rurociągowy, a następnie przetwarzanie w ogniwach paliwowych w energię elektryczną lub wykorzystywanie bezpośrednie,

- Zlokalizowane w południowej **Hiszpanii** słoneczne elektrownie ciepłe dużej skali produkujące energię elektryczną:
- H4 scenariusz** - wytwarzanie wodoru gazowego poprzez elektrolizę wody, transport rurociągowy, a następnie przetwarzanie w ogniwach paliwowych w energię elektryczną lub wykorzystywanie bezpośrednie,
- H5 scenariusz** - bezpośrednie zasilanie sieci wysokiego napięcia energią elektryczną prądu stałego wykorzystując linie transmisji wysokiego napięcia (oznaczenie HVDC), duży system baterii jest wykorzystywany przed zasilaniem linii przesyłowej wysokiego napięcia,
- H6 scenariusz** - bezpośrednie zasilanie sieci wysokiego napięcia energią elektryczną prądu stałego wykorzystując linie transmisji wysokiego napięcia (oznaczenie HVDC),

Tablica 7.8 Główne techniczne i ekonomiczne dane dla wariantów słonecznych systemów fotowoltaicznych dużej skali, produkujących energię elektryczną lub wodór gazowy, zlokalizowanych w południowej **Hiszpanii** - dane technologii dla roku **2005** i **2025**.

rok	2005			2025		
	H1	H2	H3	H1	H2	H3
indeks scenariusza						
produkcja:						
elektryczności GW	PV 60,0	PV 60,0	PV 60,0	PV 60,0	PV 60,0	PV 60,0
wodoru GW	0,0	0,0	elektroliza 32,0	0,0	0,0	elektroliza 33,8
magazynowanie GWh	0,0	baterie 200	podziemne 150	0,0	baterie 200	podziemne
transport GW	HVDC 60,0	HVDC 15,4	rurociagowy 11,8	HVDC 60,0	HVDC 15,4	rurociagowy 11,8
sprawność produkcji:						
elektryczności	11,5	11,5	11,5	13,6	13,6	13,6
wodoru	-	91,0	70,0	-	92,0	73,9
całkowita	10,5	9,5	7,4	7,9	10,6	11,1
inwestycje - mld DM (1989)						
siłowni	301	301	301	170	170	170
elektrolizy	-	-	36	-	-	27
transportu	56	14	6	56	14	6
całkowite	357	455	344	226	319	204
DM/kWh/r	3,84	5,39	5,24	2,43	3,72	2,94
koszt jednostkowy na granicy RFN - Dpf/kWh (1989)						
	24,6	55,5	34,7	15,9	29,6	20,0

- Zlokalizowane w **Północnej Afryce** słoneczne systemy fotowoltaiczne dużej skali produkujące energię elektryczną:
- A1 scenariusz** - bezpośrednie zasilanie sieci wysokiego napięcia energią elektryczną prądu stałego wykorzystując linie transmisji wysokiego napięcia (oznaczenie HVDC),
- A2 scenariusz** - bezpośrednie zasilanie sieci wysokiego napięcia energią elektryczną prądu stałego wykorzystując linie transmisji wysokiego napięcia (oznaczenie HVDC), duży system baterii jest wykorzystywany przed zasilaniem linii przesyłowej wysokiego napięcia,

A3 scenariusz - wytwarzanie wodoru gazowego poprzez elektrolizę wody, transport rurociągowy, a następnie przetwarzanie w ogniwach paliwowych w energię elektryczną lub wykorzystywanie bezpośrednie,

Tablica 7.9 Główne techniczne i ekonomiczne dane dla wariantów słonecznej elektrowni ciepłej dużej skali, produkującej energię elektryczną lub wodór gazowy, zlokalizowanej w południowej **Hiszpanii** - dane technologii dla roku **2005** i **2025**.

indeks scenariusza	2005			2025		
	H4	H5	H6	H4	H5	H6
produkcja:						
elektryczności GW	ST 28,4	ST 28,4	ST 28,4	ST 28,4	ST 28,4	ST 28,4
wodoru GW	elektroliza 20,2	0,0	0,0	elektroliza 21,3	0,0	0,0
magazynowanie GWh	podziemne 75	baterie 100	0,0	podziemne 75	baterie 100	0,0
transport GW	rurociągowy 11,9	HVDC 16,1	HDVC 28,4	rurociągowy 12,6	HVDC 16,2	HVDC 28,4
sprawność produkcji:						
elektryczności	12,2	12,2	12,2	16,1	16,1	16,1
wodoru	70,5	95,5	-	74,4	96,0	-
całkowita	7,9	10,6	11,1	11,0	14,1	14,7
inwestycje - mld DM (1989)						
siłowni	280	280	280	168	168	168
elektrolizy	23	-	-	17	-	-
transportu	6	15	27	6	15	27
całkowite	310	365	307	192	250	195
DM/kWh/r	4,69	4,07	3,30	2,75	2,78	2,10
koszt jednostkowy na granicy RFN - Dpf/kWh (1989)						
	41,1	44,1	28,4	23,0	24,4	17,0

- Zlokalizowane w **Północnej Afryce słoneczne elektrownie ciepłe** dużej skali produkujące energię elektryczną;

A4 scenariusz - wytwarzanie wodoru gazowego poprzez elektrolizę wody, transport rurociągowy, a następnie przetwarzanie w ogniwach paliwowych do energii elektrycznej lub wykorzystywanie bezpośrednie,

A5 scenariusz - bezpośrednie zasilanie sieci wysokiego napięcia energią elektryczną prądu stałego wykorzystując linie transmisji wysokiego napięcia (oznaczenie HVDC), duży system baterii jest wykorzystywany przed zasilaniem linii przesyłowej wysokiego napięcia,

A6 scenariusz - bezpośrednie zasilanie sieci wysokiego napięcia energią elektryczną prądu stałego wykorzystując linie transmisji wysokiego napięcia (oznaczenie HVDC),

A7 scenariusz - zlokalizowany w **Północnej Afryce** dużej skali słoneczny system fotowoltaiczny skojarzony z systemem elektrolizerów produkujących wodór ciekły, poprzez transport morski dostarczany do RFN,

K1 scenariusz -zlokalizowany w **Kanadzie** system elektrowni wodnych skojarzonych z systemem elektrolizerów produkujących wodór ciekły, poprzez transport morski dostarczany do RFN.

Tablica 7.10 Główne techniczne i ekonomiczne dane dla wariantów dużej skali słonecznych systemów fotowoltaicznych produkujących energię elektryczną lub wodór gazowy zlokalizowanych w **Północnej Afryce** - dane technologii dla roku **2005 i 2025**.

rok	2005			2025		
indeks scenariusza	A1	A2	A3	A1	A2	A3
produkcja:						
elektryczności GW	PV 48,6	PV 48,6	PV 48,6	PV 48,6	PV 48,6	PV 48,6
wodoru GW	0,0	0,0	elektroliza 25,9	0,0	0,0	elektroliza 27,3
magazynowanie GWh	0,0	baterie 200	podziemne 150	0,0	baterie 200	podziemne 150
transport GW	HVDC 48,6	HVDC 15,4	rurociągowy 11,8	HVDC 48,6	HVDC 15,5	rurociągowy 12,5
sprawność produkcji:						
elektryczności	11,0	11,0	11,0	13,0	13,0	13,0
wodoru	-	91,0	70,0	-	92,0	73,9
całkowita	9,55	8,6	6,8	11,2	10,3	8,5
inwestycje - mld DM (1989)						
siłowni	250	250	250	141	141	141
elektrolizy	-	-	30	-	-	22
transportu	78	25	11	78	25	11
całkowite	328	415	393	219	300	175
DM/kWh/r	3,74	5,20	4,81	2,71	3,72	2,61
koszt jednostkowy na granicy RFN - Dpf/kWh (1989)						
	24,4	56,0	30,6	16,6	30,1	17,7

Podstawowe wnioski wynikające z porównania scenariuszy.

1. Ocenione straty energii są następujące:

- bezpośredni transport energii elektrycznej do granicy RFN - 9 i 14 % odpowiednio dla 2005 i 2025 roku,
- magazynowanie i bezpośredni transport energii elektrycznej do granicy RFN - 12 i 18 % odpowiednio dla 2005 i 2025 roku i w zależności od rodzaju źródła energii,
- transport wodoru gazowego do granicy RFN - 32 - 34 %,
- transport wodoru płynnego do granicy RFN - 44 %,

2. Udział dostarczanej energii w ogólnej konsumpcji energii w RFN w 1987 roku byłby następujący:

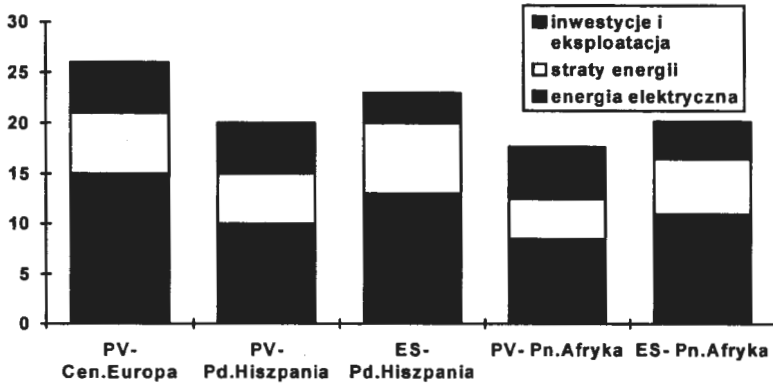
- 18 - 22 % użytkowanej energii elektrycznej,
- 6 % użytkowanej energii dla celów grzewczych,
- 9 - 10 % użytkowanej energii dla celów transportu w przypadku dostawy wodoru ciekłego,

Tablica 7.11 Główne techniczne i ekonomiczne dane dla wariantów dużej skali słonecznej elektrowni ciepłej produkującej energię elektryczną lub wodór gazowy zlokalizowanej w **Północnej Afryce** - dane technologii dla roku **2005 i 2025**

indeks scenariusza	2005			2025		
	A4	A5	A6	A4	A5	A6
produkcja:						
elektryczności GW	ST 28,4	ST 28,4	ST 28,4	ST 28,4	ST 28,4	ST 28,4
wodoru GW	elektroliza 20,2	0,0	0,0	elektroliza 28,4	0,0	0,0
magazynowanie GWh	podziemne 75	baterie 100	0,0	podziemne 75	baterie 100	0,0
transport GW	rurociagowy 11,9	HVDC 16,1	HDVC 28,4	rurociagowy 12,6	HVDC 16,2	HVDC 28,4
sprawność produkcji:						
elektryczności	15,1	15,1	15,1	18,0	18,0	18,0
wodoru	70,5	95,5	-	74,4	96,0	-
całkowita	9,5	12,4	13,0	11,9	14,9	15,5
inwestycje - mld DM (1989)						
siłowni	208	208	208	134	134	134
elektrolizy	29	-	-	17	-	-
transportu	11	26	45	11	26	45
całkowite	243	304	253	163	227	179
DM/kWh/r	3,66	3,60	2,88	2,41	2,07	2,04
koszt jednostkowy na granicy RFN - Dpf/kWh (1989)						
	33,4	40,5	24,6	20,2	23,5	16,5

- W całkowitach nakładach inwestycyjnych, wynoszących dla 2025 roku około 200 mld DM, dominują systemy wytwarzania energii elektrycznej. Zakładając 20-ty roczny rozwój omawianych systemów, zaczynając od 2005 roku, roczne nakłady inwestycyjne wynosiłyby 10 mld DM. Przyjmując czas życia technologii 30-to letni, według autorów przedstawianej analizy, nakłady na utrzymanie tych inwestycji wynosiłyby około 6 - 7 mld DM/r. Te liczby porównuje się z obecnymi ponoszonymi w RFN nakładami na rozwój systemów energetycznych wynoszących około 20 mld DM/r, biorąc również pod uwagę możliwość uniknięcia nakładów na import paliw kopalnych przy obecnie nie znanych cenach.
- Najbardziej atrakcyjną z punktu widzenia ekonomicznego metodą wykorzystywania energii słonecznej stosując duże instalacje jest niewątpliwie scenariusz obejmujący bezpośredni transport energii elektrycznej. Dla różnych rozważanych scenariuszy koszt energii elektrycznej wynosiłby w 2025 roku około 0,16 DM/kWh. Jednakże, w kosztach tych nie uwzględnia się kosztów zajmowanego terenu, co w przypadku Centralnej Europy stanowiłyby znaczne dodatkowe obciążenie kosztów energii.
- Magazynowanie energii elektrycznej, stosując baterie sodowo-siarkowe znacznie zwiększa koszty energii elektrycznej, co uwidaczniają dane zawarte w zamieszczonych tablicach.
- Importowanie wodoru gazowego okazuje się korzystniejszym rozwiązaniem w porównaniu z produkowanym w RFN, co obrazuje rys. 7.4.

7. W kosztach wodoru ciekłego, uzyskiwanego wykorzystując energię wodną, znaczny udział mają koszty upłynniania i transportu. W związku z tym należałoby wykorzystywać go lokalnie w formie ciekłej do celów transportowych.



Rys. 7.4 Składowe kosztów wodoru gazowego, w Dpf/kWh, (koszty inwestycyjne i eksploatacji, koszt traconej energii, koszt energii elektrycznej), gdy energia elektryczna wykorzystywana w procesie elektrolizy jest wytwarzana przez słoneczny system fotowoltaiczny (indeks PV) lub przez słoneczną elektrownię ciepłą (indeks ES) zlokalizowanych odpowiednio w Centralnej Europie, Południowej Hiszpanii i Północnej Afryce w Dpf/kWh (1989).

Tablica 7.12 Główne techniczne i ekonomiczne dane dla dużej skali słonecznego systemu fotowoltaicznego, zlokalizowanego w **Północnej Afryce**, i systemu elektrowni wodnych, zlokalizowanych w **Kanadzie**, skojarzonych z systemem elektrolizerów produkujących wodor ciekły - dane technologiczne dla roku **2005** i **2025**.

rok	2005		2025	
indeks scenariusza	A7	A7	K1	K1
produkcja:				
elektryczności GW	PV 48,6	PV 48,6	15,7	15,7
wodoru GW	elektroliza 21,0	elektroliza 22,7	elektroliza 9	elektroliza 9,8
magazynowanie i transport GWh	morski 3450	morski 3740	morski 3450	morski 3740
sprawność produkcji:				
elektryczności	11,0	13,0	80,0	80,0
wodoru	57,5	62,4	57,5	62,4
całkowita	5,5	7,4	40,3	45,2
inwestycje - mld DM (1989)				
siłowni	250	141	60	60
elektrolizy	24	18	10	8
upłynniania	26	25	11	11
transportu	29	27	29	27
całkowite	329	211	110	106
DM/kWh/r	6,40	3,74	2,03	1,88
koszt jednostkowy na granicy RFN - Dpf/kWh (1989)				
	47,1	29,4	18,8	16,3

Konkluzje i rekomendacje (podane w [7.8])

W ramach badań przeprowadzonych na zlecenie komisji Parlamentu Niemieckiego wyciągnięto następujące konkluzje i rekomendacje co do dalszego rozwoju systemów energii wykorzystujących energię słoneczną. Oto one.

- Duże instalacje słoneczne mogą uczestniczyć w dostawie energii w dalszej perspektywie. Znaczenie ich określają duże potencjalne możliwości ochrony środowiska, a także niewyczerpalność energii słonecznej. Znaczenie to szczególnie wzrasta ze względu na fakt, że drastyczna redukcja emisji dwutlenku węgla nie będzie mogła nastąpić w wyniku bardziej sprawnego użytkowania energii lub zwiększonego wykorzystywania energii jądrowej.
- Najbardziej istotnymi technologiami dla rozwoju dużych słonecznych instalacji są te, które wytwarzają bezpośrednio energię elektryczną. Dotyczy to w szczególności:
 - układów fotowoltaicznych,
 - słonecznych elektrowni ciepłych.

Kluczowymi elementami instalacji słonecznych są także:

- elektrolizery,
- baterie.
- Rozwój dużych instalacji słonecznych wymaga korelacji szeregu przedsięwzięć na poziomie międzynarodowym. Mając to na uwadze, DFVLR (Deutsche Forschungs- und Versuchsansalt für Luft- und Raumfahrt) rekomenduje, ażeby rozwój dużych instalacji słonecznych był szczególnym elementem europejskiej polityki energetycznej. Oznacza to, że w ramach Wspólnoty Europejskiej należy popierać przyspieszony rozwój technologii energii słonecznej w krajach południowej Europy. Wobec wzrastających zagrożeń środowiska programy badawcze obejmujące wykorzystywanie energii słonecznej powinny posiadać to samo polityczne znaczenie i wsparcie finansowe jak inne programy technologiczne rozwijane przez Wspólnotę.
- W krajach Północnej Afryki, o dużym nasłotleniu słonecznym, istnieją bardzo znaczne możliwości lokalizowania energetycznych instalacji słonecznych. Dlatego DFVLR rekomenduje, ażeby Wspólnota Europejska podjęła negocjacje z Związkiem Krajów Arabskich (obejmujących Marokko, Algierię, Tunis i Libię) w sprawie zapoczątkowania możliwie najszybciej przyspieszonego i koordynowanego wykorzystywania energii słonecznej przez oba Związki. Republika Federalna Niemiec powinna zainicjować i przygotować takie negocjacje [7.8].

7.4 Uwagi

Z przedstawionych informacji w niniejszym rozdziale wynika, że w perspektywie 20 - 30 lat istnieje możliwość znacznego udziału wodoru w strukturze użytkowanych nośników energii. W związku z tym można oczekiwać szeregu zmian obejmujących system dystrybucji energii, a także potrzebę integracji kontynentalnych systemów energetycznych.

Wodór, zasilający istniejący system rurociągowy i wykorzystywany w gospodarce komunalno-bytowej do produkcji energii elektrycznej poprzez ogniwa paliwowe o mocy rzędu 200 kW, mógłby zmienić znacznie strukturę dostawy energii do poszczególnych odbiorców.

Jednakże głównym "surowcem" w produkcji wodoru na dużą skalę może być energia elektryczna wytwarzana w dużych energetycznych instalacjach słonecznych. Sprawność tych urządzeń, a z nią związane efekty ekonomiczne, zależą w dużym stopniu od stopnia nasłonecznienia powierzchni. Dużym nasłonecznieniem charakteryzują się między innymi tereny pustynne w Afryce. Odpowiednia polityka energetyczna prowadzona przez ugrupowania państwowe, a następnie odpowiednia integracja systemów energetycznych,

może uczynić te tereny jako bardzo pożyteczne równocześnie z punktu widzenia zaspakajania wzrastającego popytu na energię i ochrony środowiska.

Literatura

- 7.1 Fusion energy applied to synthetic fuel production, prepared by L.A. Booth Panel Chariman Los Alamos Scientific Laboratory, CONF-770593, 1977.
- 7.2 Anderson C.A., i inni, Production of synthetic gas from nuclear energy sources, LA-7592- MS, 1979.
- 7.3 Bedingungen und folgen von aufbaustrategien fur eine solar wasserstoffwirtschaft, Untersuchung fur die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages "Technikfolgen- Abschätzung und - Bewertung", Ottobrunn, RFN, 1990.
- 7.4 Funk J.E., A technoeconomic analysis of large scale termochemical production of hydrogen, EPRI EM-287, 1976.
- 7.5 Steinberg M., i inni, BNL 18866, 1974.
- 7.6 King Hubert M., Resources and Man, National Academy of Science - National Research Council, Freeman W.H. i inni, San Francisko, 1969.
- 7.7 Contributions to Hydrogen Energy Technology on the Occasion of the ISES Solar World Congress 1087, Hamburg, wrzesień 13-18, 1987.
- 7.8 Nitsch J., i inni, The contribution of hydrogen in the development of renewable energy sources, 8-th World Hydrogen Energy Conference, Honolulu, Waikoloa, lipiec 22-27, 1990.

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**