

Tadeusz **CHMIELNIAK** • Tomasz **CHMIELNIAK**

ENERGETYKA WODOROWA

WYDANIE DRUGIE



 PWN

Projekt okładki i stron tytułowych **Przemysław Spiechowski**

Ilustracja na okładce **Grispb/Adobe Stock, Scharfsinn86, Audioundwerbung,
Shawn Hempel/Dreamstime**

Wydawca **Adam Filutowski**

Koordinator ds. redakcji **Adam Kowalski**

Redaktor **Joanna Forysiak**

Produkcja **Mariola Grzywacka**

Dział reklamy **Magdalena Bystrzycka** (magdalena.lewocka@pwn.pl)
Urszula Obrycka (urszula.obrycka@pwn.pl)

Skład: **AnnGraf Anna Szelağ**

Recenzent 1. wydania **prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak**
Dyrektor Centrum Energetyki AGH w Krakowie

Recenzja obecnego wydania **prof. dr hab. inż. Jakub Kupecki**
**Dyrektor Centrum Technologii Wodorowych (CTH2),
Instytut Energetyki – PIB**

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty. Szanujmy cudzą własność i prawo.

Szanujmy cudzą własność i prawo.
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2025

ISBN: 978-83-01-24204-6

DOI <https://doi.org/10.53271/2025.031>

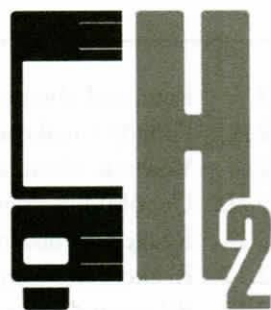
Wydanie II [rozszerzone, zaktualizowane]

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321; faks 22 69 54 288;
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; reklama@pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o.



15.836



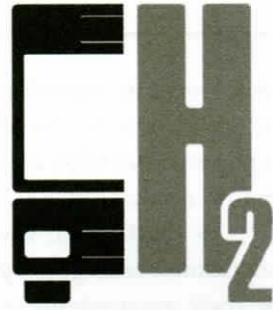
Spis treści

Przedmowa	9
Podziękowania	10
Wykaz używanych skrótów	11
Rozdział 1	
Wprowadzenie	13
1.1. Ogólna charakterystyka scenariuszy zwiększenia roli wodoru w gospodarce	13
1.2. Produkcja i wykorzystanie wodoru. Główne zadania i możliwości rozwoju	17
1.3. Zakres opracowania	26
Bibliografia do rozdziału pierwszego	28
Rozdział 2	
Podstawy termodynamiczne	29
2.1. Funkcje stanu	29
2.2. Prawo zachowania energii. Pierwsza zasada termodynamiki	30
2.3. Druga zasada termodynamiki. Generacja entropii	35
2.4. Połączenie pierwszej i drugiej zasady termodynamiki	38
2.5. Praca maksymalna	39
2.6. Metoda entropowa analizy technologii energetycznych	41

2.7.	Potencjał chemiczny	48
2.8.	Układy z reakcjami chemicznymi	52
2.9.	Warunki równowagi	53
2.10.	Uogólnione równanie fundamentalne	54
2.11.	Reakcja standardowa	55
2.12.	Reakcja tworzenia	57
2.13.	Bilansowanie procesów spalania	58
2.14.	Reakcje jonowe	63
	Bibliografia do rozdziału drugiego	65
Rozdział 3		
	Wodór. Podstawowe właściwości	67
3.1.	Izotopy i molekuly wodoru	67
3.2.	Równanie stanu	69
3.3.	Temperatura adiabatycznego spalania	73
3.4.	Efekt Joule'a-Thomsona (J-T)	74
	Bibliografia do rozdziału 3	74
Rozdział 4		
	Wytwarzanie wodoru z paliw węglowodorowych	75
4.1.	Technologie produkcji wodoru z paliw gazowych i ciekłych	76
4.1.1.	Reforming parowy gazu ziemnego	78
4.1.2.	Reforming parowy alkanów C ₂ -C ₄ [4.1]	84
4.1.3.	Reforming parowy ciekłych węglowodorów [4.1]	85
4.1.4.	Częściowe utlenianie węglowodorów	89
4.1.5.	Reforming autotermiczny metanu	90
4.1.6.	Piroliza metanu	90
4.2.	Technologie produkcji wodoru z węgla	96
4.2.1.	Zgazowanie węgla	97
4.2.2.	Piroliza węgla	120
4.2.3.	Opcje technologiczne instalacji wytwarzania wodoru na drodze zgazowania i pirolizy węgla	130
4.2.4.	Obciążenie emisją CO ₂ procesów produkcji wodoru z węgla	130
4.2.5.	Koszty produkcji wodoru z węgla	137
4.3.	Zgazowanie biomasy	144
4.3.1.	Technologie zgazowania biomasy	144
4.3.2.	Produkcja wodoru	146
4.3.3.	Koszty produkcji wodoru z biomasy	159
	Bibliografia do rozdziału czwartego	163

Rozdział 5	
Metody rozkładu wody na wodór i tlen	169
5.1. Wprowadzenie	169
5.2. Istota działania podstawowego modułu elektrolizera	171
5.3. Napięcie standardowe procesu	175
5.4. Ogólna charakterystyka napięcia w rzeczywistym module elektrolizera	182
5.4.1. Nadnapięcie aktywacyjne. Równanie Butlera-Volmera	183
5.4.2. Straty koncentracji	185
5.4.3. Straty omowe	186
5.5. Bilansowanie substancji i energii w elektrolizerach.	
Ogólne założenia	188
5.5.1. Bilans substancji w elektrolizerze (polimerowym)	190
5.6. Bilans energii	201
5.7. Sprawność procesu elektrolizy	205
5.8. Elektrolizery alkaliczne	207
5.9. Elektrolizery fosforowe (z elektrolitem H_3PO_4)	211
5.10. Elektrolizery tlenkowe	212
5.10.1. Modele dyfuzji	212
5.10.2. Charakterystyka napięciowo-prądowa	219
5.10.3. Bilans energii i entropii	224
5.11. Koelektroliza	231
5.11.1. Charakterystyka napięciowo-prądowa	231
5.11.2. Bilans energii	238
5.11.3. Sprawność koelektrolizy	240
5.12. Generatory wodoru	241
Bibliografia do rozdziału piątego	248
Rozdział 6	
Wybrane zagadnienia transportu i magazynowania wodoru	251
6.1. Transport rurociągowy	251
6.2. Magazynowanie	253
6.3. Termodynamiczne aspekty ładowania i wyładowania magazynów (zasobników) wodoru	261
6.4. Bezpieczeństwo	269
Bibliografia do rozdziału szóstego	270
Rozdział 7	
Energetyczne wykorzystanie wodoru	273
7.1. Ogólna charakterystyka struktur technologicznych	273

7.2.	Ogniwa paliwowe i ich charakterystyki	280
7.2.1.	Ogólna charakterystyka ogniw paliwowych	280
7.2.2.	Istota działania ogniwa paliwowego	281
7.2.3.	Bilans energii dla ogniwa	283
7.2.4.	Siła elektromotoryczna ogniwa	285
7.2.5.	Ogólna charakterystyka strat potencjału w rzeczywistym ogniwie	290
7.2.6.	Ogólna charakterystyka technologiczna stosowanych ogniw (instalacji) paliwowych	305
7.3.	Instalacje energetyczne z ogniwami paliwowymi	322
7.3.1.	Skojarzona produkcja elektryczności i ciepła	323
7.3.2.	Integracja ogniwa paliwowego z turbiną gazową	332
7.4.	Charakterystyki modułów pracujących w instalacjach wytwarzania i wykorzystania wodoru zintegrowanych z OZE	338
7.4.1.	Analityczny opis promieniowania słonecznego	338
7.4.2.	Charakterystyki ogniw fotowoltaicznych	349
7.4.3.	Turbiny wiatrowe	363
7.4.4.	Model baterii	366
7.4.5.	Model zbiornika wodoru	368
7.4.6.	Model sprężarki	369
7.5.	Integracja układów elektrolitycznego wytwarzania wodoru z układami energii napędowej różnej postaci	370
7.5.1.	Bezpośrednie połączenie paneli ogniw fotowoltaicznych i elektrolizerów	370
7.5.2.	Układy zawierające wiele modułów	372
7.6.	Spalanie wodoru w turbinach gazowych	373
7.6.1.	Wprowadzenie	373
7.6.2.	Analiza prostej wodorowej instalacji turbiny gazowej	374
7.6.3.	Obiegi złożone	377
	Bibliografia do rozdziału siódmego	378
Rozdział 8		
	Wybrane zagadnienia transportu	385
	Bibliografia do rozdziału ósmego	390



Przedmowa

Cały system energetyczny doznaje obecnie istotnych zmian technologicznych. Dotyczy to wszystkich jego podstawowych modułów (podsystemów). Od struktury wykorzystywanej energii pierwotnej poprzez technologie jej konwersji do końcowych użytkowych postaci energii (elektryczności, ciepła, nowych paliw, chłodu, energii mechanicznej), technologii jej przesyłu, rozdziału i użytkowania u odbiorców końcowych. Kryteria optymalizacyjne procesu transformacji obok podstawowych techniczno-ekonomicznych (sprawności, kosztów wytwarzania) powinny ujmować funkcje celu i ograniczenia wynikające z wyzwań ekologicznych (ochronę klimatu, zmniejszenie zanieczyszczeń atmosfery, ochronę zasobów paliwowych i innych).

W poszukiwaniach racjonalnych rozwiązań intensywnie wskazuje się na rolę wodoru jako ważnego nośnika energii w wspomagającego proces dekarbonizacji gospodarki i transportu. Temu zagadnieniu poświęca się wiele studiów i opracowań scenariuszowych przygotowywanych przez międzynarodowe i krajowe agencje oraz instytucje zajmujące się przyszłością energetyczną. Można także zauważyć dużą dynamikę wzrostu liczby opracowań naukowych i publikacji z tej tematyki, dotyczących zarówno rozwoju technologicznego, jak i doskonalenia metod analizy i syntezy wszystkich modułów gospodarki wodorowej. Uruchamiane są nowe instalacje demonstracyjne i wdrożeniowe.

Przekazywana w ręce Czytelnika książka zawiera wykład obejmujący główne technologie wytwarzania wodoru, jego transportu i składowania oraz energetycznego wykorzystania. W wyborze tematyki kierowano się stanem zaawansowania rozwoju poszczególnych technologii, gwarantującym praktyczne

zastosowanie danych rozwiązań. Starano się także wskazać na możliwe kierunki rozwoju w 20–30-letniej perspektywie. W niniejszym wydaniu uaktualniono i poprawiono tekst niemal wszystkich rozdziałów. Większe zmiany wprowadzono do rozdziałów 5 i 7.

W rozdziałach zawierających omówienie poszczególnych technologii wiele zagadnień szczegółowych ilustrowano przykładami obliczeniowymi, co powinno ułatwić zrozumienie istoty danego zagadnienia oraz być źródłem wiedzy praktycznej.

Książka może być pomocna pracownikom nauki pracującym w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz w innych dyscyplinach naukowych (np. automatyka, elektronika i elektrotechnika, inżynieria chemiczna, inżynieria mechaniczna, transport), studentom wszystkich kierunków związanych z energetyką i transportem. Może być także interesująca dla studentów studiów podyplomowych oraz pracowników instytucji przemysłowych i projektowych.

Podziękowania

Przy opracowaniu książki autorzy korzystali z pomocy wielu współpracowników z Katedry Maszyn i Urządzeń Energetycznych oraz Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla. Pragniemy podziękować współautorom opracowań (artykułów naukowych, referatów konferencyjnych, raportów z realizacji projektów badawczych), których wyniki wykorzystano w trakcie opracowania tego tomu oraz którzy pomogli nam przygotować przykłady obliczeniowe i rysunki. Przede wszystkim dziękujemy inż. Grażynie Roskosz oraz prof. dr. hab. inż. Andrzejowi Rusinowi, prof. dr. hab. inż. Januszowi Kotowiczowi, dr. hab. Leszkowi Remiorzowi, prof. PŚ, dr. hab. inż. Łukaszowi Barteli, prof. PŚ, dr. inż. Katarzynie Stoleckiej, dr. inż. Sebastianowi Lepszemu, dr. inż. Danielowi Węclowi.

Gorące podziękowanie pragniemy przekazać redaktorowi Adamowi Filutowskiemu oraz innym osobom zaangażowanym w wydanie tej książki.

Jesteśmy wdzięczni recenzentowi prof. dr. hab. inż. Wojciechowi Nowakowi za cenne uwagi, które pomogły nam w pracy nad książką.

Autorzy

Energetyka wodorowa jest ważnym kompendium wiedzy, które stanowi syntetyczne podsumowanie informacji teoretycznych oraz praktyczne spojrzenie na wodór. Książka bez wątpienia będzie istotną pozycją dla wszystkich, którzy poszukują informacji o elementach tańcu wartości gospodarki wodorowej, zarówno w zakresie informacji teoretycznych i podstaw działania, jak i potencjału gospodarczego. Fakt, iż technologie wodorowe są tematem kolejnego opracowania książkowego autorstwa profesora Tadeusza Chmielniaka, nestora polskiej energetyki, dowodzi, że technologie te pozostają ważne dla energetyki i pokrewnych gałęzi gospodarki.

Fragment recenzji prof. dr. hab. inż. Jakuba Kupeckiego, dyrektora Centrum Technologii Wodorowych (CTH₂) Instytutu Energetyki – Państwowego Instytutu Badawczego

W nowym wydaniu cenionego kompendium poświęconego technologiom wodorowym Autorzy – **profesorowie Tadeusz i Tomasz Chmielniak** skupiają się przede wszystkim na:

- metodach wytwarzania wodoru przy wykorzystaniu paliw kopalnych i odnawialnych, w tym na drodze elektrolizy wody,
- zagadnieniach związanych z transportem i magazynowaniem wodoru,
- energetycznym wykorzystaniu wodoru (ogniwa paliwowe, turbiny gazowe, technologie zintegrowane z OZE – np. turbiny wiatrowe czy panele fotowoltaiczne).

Książka wskazuje na RÓŻNE TECHNOLOGIE PRODUKCJI WODORU, z podkreśleniem roli OZE.

Publikację tę polecamy studentom kierunków: ENERGETYKA, ELEKTROTECHNIKA, INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, TRANSPORT. Polecamy ją także profesjonalistom i przedstawicielom branż energetycznej, transportowej i pokrewnych, specjalistom ds. OZE, biurom projektowym i wszystkim zainteresowanym wykorzystaniem wodoru w gospodarce.

Partner wydania

MESCO

Patroni medialni

PolskiPrzemysł

LOBENERGIA

Energetyka 24

Energetyka

elektryka.org
Portal wiedzy elektrotechnicznej

nowa
Energia

Nowoczesne
Inżynierstwo
Inżynieryjne

NI.COM.PL
PORTAL INŻYNIERYJNY

Dostępne formaty: e-book • książka online
Szukaj w: ksiegarnia.pwn.pl • libra.ibuk.pl • ibuk.pl

PWN

Wydawnictwo
Naukowe PWN SA
pwn.pl

ISBN 978-83-01-24204-6



9 788301 242046