



---

## *Spis treści*

---

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Przedmowa .....                                                                       | 9  |
| Podziękowania .....                                                                   | 10 |
| Wykaz używanych skrótów .....                                                         | 11 |
| Rozdział 1                                                                            |    |
| Wprowadzenie .....                                                                    | 13 |
| 1.1. Ogólna charakterystyka scenariuszy zwiększenia roli wodoru<br>w gospodarce ..... | 13 |
| 1.2. Produkcja i wykorzystanie wodoru. Główne zadania i możliwości<br>rozwoju .....   | 17 |
| 1.3. Zakres opracowania .....                                                         | 23 |
| 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

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| <b>Wodór. Podstawowe właściwości .....</b>     | <b>67</b> |
| 3.1. Izotopy i molekuły 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 trzeciego .....      | 74        |

### Rozdział 4

|                                                                                                          |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Wytwarzanie wodoru z paliw węglowodorowych .....</b>                                                  | <b>75</b> |
| 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 .....                                                          | 91        |
| 4.2.1. Zgazowanie węgla .....                                                                            | 92        |
| 4.2.2. Piroliza węgla .....                                                                              | 115       |
| 4.2.3. Opcje technologiczne instalacji wytwarzania wodoru<br>na drodze zgazowania i pirolizy węgla ..... | 125       |
| 4.2.4. Obciążenie emisją $CO_2$ procesów produkcji wodoru<br>z węgla .....                               | 125       |
| 4.2.5. Koszty produkcji wodoru z węgla .....                                                             | 132       |
| 4.3.1. Technologie zgazowania biomasy .....                                                              | 137       |
| 4.3.2. Produkcja wodoru .....                                                                            | 141       |
| 4.3.3. Koszty produkcji wodoru z biomasy .....                                                           | 155       |
| Bibliografia do rozdziału czwartego .....                                                                | 157       |

## Rozdział 5

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Metody rozkładu wody na wodór i tlen</b>                              | 163 |
| 5.1. Wprowadzenie                                                        | 163 |
| 5.2. Istota działania podstawowego modułu elektrolizera                  | 165 |
| 5.3. Napięcie standardowe procesu                                        | 169 |
| 5.4. Ogólna charakterystyka napięcia w rzeczywistym module elektrolizera | 176 |
| 5.4.1. Nadnapięcie aktywacyjne. Równanie Butlera-Volmera                 | 177 |
| 5.4.2. Straty koncentracji                                               | 179 |
| 5.4.3. Straty omowe                                                      | 180 |
| 5.5. Bilans substancji w elektrolizerze (polimerowym)                    | 182 |
| 5.6. Bilans energii                                                      | 193 |
| 5.7. Sprawność procesu elektrolizy                                       | 198 |
| 5.8. Elektrolizery alkaliczne                                            | 199 |
| 5.9. Elektrolizery fosforowe (z elektrolitem $H_3PO_4$ )                 | 203 |
| 5.10. Elektrolizery tlenkowe                                             | 204 |
| 5.10.1. Modele dyfuzji                                                   | 204 |
| 5.10.2. Charakterystyka napięciowo-prądowa                               | 211 |
| 5.10.3. Bilans energii i entropii                                        | 216 |
| 5.11. Koelektroliza                                                      | 224 |
| 5.11.1. Charakterystyka napięciowo-prądowa                               | 224 |
| 5.11.2. Bilans energii                                                   | 230 |
| 5.11.3. Sprawność koelektrolizy                                          | 233 |
| 5.12. Generatory wodoru                                                  | 233 |
| Bibliografia do rozdziału piątego                                        | 241 |

## Rozdział 6

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Wybrane zagadnienia transportu i magazynowania wodoru</b>                       | 245 |
| 6.1. Transport rurociągowy                                                         | 245 |
| 6.2. Magazynowanie                                                                 | 247 |
| 6.3. Termodynamiczne aspekty ładowania i wyładowania magazynów (zasobników) wodoru | 255 |
| 6.4. Bezpieczeństwo                                                                | 263 |
| Bibliografia do rozdziału szóstego                                                 | 264 |

## Rozdział 7

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| <b>Energetyczne wykorzystanie wodoru</b>              | 267 |
| 7.1. Ogólna charakterystyka struktur technologicznych | 267 |
| 7.2. Ogniw paliwowe i ich charakterystyki             | 272 |

|                                                                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.2.1. Ogólna charakterystyka ogniw paliwowych .....                                                                    | 272        |
| 7.2.2. Istota działania ogniwa paliwowego .....                                                                         | 274        |
| 7.2.3. Bilans energii dla ogniwa .....                                                                                  | 276        |
| 7.2.4. Siła elektromotoryczna ogniwa .....                                                                              | 278        |
| 7.2.5. Ogólna charakterystyka strat potencjału w rzeczywistym<br>ogniwie .....                                          | 283        |
| 7.2.6. Ogólna charakterystyka technologiczna stosowanych<br>ogniw (instalacji) paliwowych .....                         | 292        |
| 7.3. Instalacje energetyczne z ogniwami paliwowymi .....                                                                | 309        |
| 7.3.1. Skojarzona produkcja elektryczności i ciepła .....                                                               | 310        |
| 7.3.2. Integracja ogniwa paliwowego z turbiną gazową .....                                                              | 318        |
| 7.4. Charakterystyki modułów pracujących w instalacjach<br>wytwarzania i wykorzystania wodoru zintegrowanych z OZE .... | 325        |
| 7.4.1. Analityczny opis promieniowania słonecznego .....                                                                | 325        |
| 7.4.2. Charakterystyki ogniw fotowoltaicznych .....                                                                     | 336        |
| 7.4.3. Turbiny wiatrowe .....                                                                                           | 350        |
| 7.4.4. Model baterii .....                                                                                              | 353        |
| 7.4.5. Model zbiornika wodoru .....                                                                                     | 355        |
| 7.4.6. Model sprężarki .....                                                                                            | 356        |
| 7.5. Integracja układów elektrolitycznego wytwarzania wodoru<br>z układami energii napędowej różnej postaci .....       | 357        |
| 7.5.1. Bezpośrednie połączenie paneli ogniw fotowoltaicznych<br>i elektrolizerów .....                                  | 357        |
| 7.5.2. Układy zawierające wiele modułów .....                                                                           | 359        |
| 7.6. Spalanie wodoru w turbinach gazowych .....                                                                         | 360        |
| 7.6.1. Wprowadzenie .....                                                                                               | 360        |
| 7.6.2. Analiza prostej wodorowej instalacji turbiny gazowej .....                                                       | 361        |
| 7.6.3. Obiegi złożone .....                                                                                             | 364        |
| Bibliografia do rozdziału siódmego .....                                                                                | 365        |
| <b>Rozdział 8</b>                                                                                                       |            |
| <b>Wybrane zagadnienia transportu .....</b>                                                                             | <b>373</b> |