

---

# Spis treści

---

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1. Magazynowanie energii podstawą rozwoju energetyki odnawialnej</b>                       |    |
| – Dorota Chwieduk . . . . .                                                                   | 13 |
| 1.1. Rola magazynowania energii . . . . .                                                     | 13 |
| 1.2. Oddziaływanie promieniowania słonecznego na Ziemię . . . . .                             | 15 |
| 1.3. Magazynowanie ciepła w systemach energetyki odnawialnej . . . . .                        | 16 |
| 1.4. Magazynowanie energii elektrycznej . . . . .                                             | 20 |
| Literatura . . . . .                                                                          | 22 |
| <b>2. Podstawowe metody magazynowania ciepła</b>                                              |    |
| – Maciej Jaworski . . . . .                                                                   | 24 |
| 2.1. Wprowadzenie . . . . .                                                                   | 24 |
| 2.2. Klasyfikacja technologii magazynowania ciepła . . . . .                                  | 25 |
| 2.3. Akumulacja ciepła z wykorzystaniem ciepła właściwego czynników roboczych . . . . .       | 27 |
| 2.3.1. Krótkoterminowa akumulacja ciepła z wykorzystaniem ciepła właściwego . . . . .         | 27 |
| 2.3.2. Długoterminowa sezonowa akumulacja ciepła z wykorzystaniem ciepła właściwego . . . . . | 30 |
| 2.4. Akumulacja ciepła z wykorzystaniem ciepła przemian fazowych . . . . .                    | 34 |
| 2.5. Akumulacja ciepła z wykorzystaniem reakcji chemicznych i procesów sorpcyjnych . . . . .  | 38 |
| Literatura . . . . .                                                                          | 43 |
| <b>3. Długoterminowe magazynowanie ciepła</b>                                                 |    |
| – Dorota Chwieduk . . . . .                                                                   | 45 |
| 3.1. Idea długoterminowego magazynowania ciepła . . . . .                                     | 45 |

|           |                                                                                                          |     |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.      | Podstawowe cechy długoterminowych magazynów ciepła . . . . .                                             | 48  |
| 3.3.      | Gruntowe magazyny ciepła . . . . .                                                                       | 54  |
|           | Literatura . . . . .                                                                                     | 59  |
| <b>4.</b> | <b>Magazynowanie ciepła przy wykorzystaniu materiałów zmiennofazowych (PCM)</b>                          |     |
|           | – <i>Maciej Jaworski</i> . . . . .                                                                       | 61  |
| 4.1.      | Wprowadzenie . . . . .                                                                                   | 61  |
| 4.2.      | Materiały zmiennofazowe . . . . .                                                                        | 64  |
| 4.3.      | Właściwości materiałów zmiennofazowych . . . . .                                                         | 69  |
| 4.4.      | Konstrukcje zasobników ciepła z materiałami PCM . . . . .                                                | 73  |
| 4.5.      | Akumulacja ciepła w materiałach PCM zintegrowanych ze strukturą<br>budynku . . . . .                     | 76  |
|           | 4.5.1. Materiały budowlane z PCM . . . . .                                                               | 77  |
|           | 4.5.2. Podłogi ogrzewane materiałami PCM . . . . .                                                       | 81  |
|           | 4.5.3. Inne zastosowania materiałów zmiennofazowych w budownictwie . . . . .                             | 82  |
|           | Literatura . . . . .                                                                                     | 83  |
| <b>5.</b> | <b>Magazynowanie chłodu</b>                                                                              |     |
|           | – <i>Andrzej Grzebielec, Adam Szelągowski</i> . . . . .                                                  | 86  |
| 5.1.      | Wprowadzenie . . . . .                                                                                   | 86  |
| 5.2.      | Ogólna idea magazynowania chłodu . . . . .                                                               | 88  |
| 5.3.      | Magazynowanie chłodu w instalacjach wodnych bez przemiany fazowej . . . . .                              | 90  |
| 5.4.      | Magazynowanie chłodu z wykorzystaniem przemiany fazowej czynnika<br>roboczego . . . . .                  | 92  |
|           | 5.4.1. Magazynowanie lodu w zbiorniku . . . . .                                                          | 92  |
|           | 5.4.2. Układy lodu binarnego . . . . .                                                                   | 94  |
|           | 5.4.3. Instalacje wykorzystujące suchy lód . . . . .                                                     | 95  |
|           | 5.4.4. Pozostałe materiały PCM . . . . .                                                                 | 95  |
| 5.5.      | Magazynowanie z wykorzystaniem układów sorpcyjnych . . . . .                                             | 98  |
|           | Literatura . . . . .                                                                                     | 99  |
| <b>6.</b> | <b>Podstawy pozyskiwania energii słonecznej</b>                                                          |     |
|           | – <i>Dorota Chwieduk</i> . . . . .                                                                       | 101 |
| 6.1.      | Widmo promieniowania słonecznego . . . . .                                                               | 101 |
| 6.2.      | Dostępność energii promieniowania słonecznego . . . . .                                                  | 102 |
| 6.3.      | Podstawowe modele promieniowania słonecznego padającego na dowolnie<br>usytuowaną powierzchnię . . . . . | 106 |
|           | Literatura . . . . .                                                                                     | 112 |

**7. Bilans cieplny budynku. Pasywne systemy słoneczne**

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| – Dorota Chwieduk .....                                                                 | 113 |
| 7.1. Bilans cieplny powietrza w budynku .....                                           | 113 |
| 7.2. Przepływ ciepła przez ściany zewnętrzne i magazynowanie ciepła w budynku .....     | 116 |
| 7.3. Rola pojemności cieplnej przegród w kształtowaniu stanów termicznych budynku ..... | 120 |
| 7.4. Słoneczne systemy pasywne .....                                                    | 122 |
| 7.4.1. Klasyfikacja systemów pasywnych .....                                            | 122 |
| 7.4.2. Magazynowanie energii w słonecznych systemach pasywnych .....                    | 125 |
| Literatura .....                                                                        | 132 |

**8. Słoneczne aktywne systemy grzewcze**

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| – Dorota Chwieduk .....                                       | 134 |
| 8.1. Zasada funkcjonowania. Podstawowa klasyfikacja .....     | 134 |
| 8.2. Podstawowe elementy aktywnych systemów słonecznych ..... | 143 |
| Literatura .....                                              | 147 |

**9. Magazynowanie ciepła w słonecznych instalacjach grzewczych**

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| – Jarosław Bigorajski, Michał Chwieduk .....                                          | 148 |
| 9.1. Magazynowanie krótkoterminowe .....                                              | 148 |
| 9.1.1. Magazynowanie z wykorzystaniem ciepła właściwego medium magazynującego .....   | 150 |
| 9.1.2. Magazynowanie ciepła z wykorzystaniem ciepła przemiany fazowej .....           | 154 |
| 9.1.3. Magazynowanie z wykorzystaniem ciepła odwracalnych reakcji chemicznych .....   | 155 |
| 9.2. Praktyczna realizacja magazynów krótkoterminowych i ocena ich efektywności ..... | 156 |
| Literatura .....                                                                      | 160 |

**10. Systemy fotowoltaiczne**

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| – Bartosz Chwieduk .....                               | 162 |
| 10.1. Podział systemów ze względu na ich moc .....     | 162 |
| 10.2. Systemy autonomiczne i podłączone do sieci ..... | 163 |
| 10.3. Moduły fotowoltaiczne .....                      | 167 |
| 10.4. Akumulatory fotowoltaiczne .....                 | 170 |
| 10.5. Inwertery fotowoltaiczne .....                   | 173 |
| 10.6. Wymiarowanie instalacji .....                    | 177 |
| Literatura .....                                       | 181 |

## 11. Systemy PV/T fotowoltaiczno-ciepłne

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| – Jarosław Bigorajski                                                     | 183 |
| 11.1. Wprowadzenie                                                        | 183 |
| 11.2. Podstawy teoretyczne działania modułów PV/T fotowoltaiczno-ciepłych | 186 |
| 11.3. Rodzaje modułów PV/T                                                | 191 |
| 11.4. Magazynowanie energii                                               | 193 |
| 11.5. Zastosowania modułów PV/T                                           | 195 |
| Literatura                                                                | 198 |

## 12. Słoneczne chłodzenie

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| – Adam Szelągowski                                               | 200 |
| 12.1. Wprowadzenie                                               | 200 |
| 12.2. Technologie stosowane w chłodzeniu słonecznym              | 202 |
| 12.3. Elementy systemów chłodzenia słonecznego                   | 203 |
| 12.4. Układ chłodniczy i jego systemy napędowe                   | 205 |
| 12.4.1. Napędy energią elektryczną z instalacji fotowoltaicznych | 205 |
| 12.4.2. Systemy termomechaniczne                                 | 209 |
| 12.4.3. Systemy sorpcyjne                                        | 213 |
| 12.5. Systemy dystrybucji chłodu                                 | 223 |
| 12.6. Systemy odprowadzenia ciepła odpadowego                    | 224 |
| 12.7. Podstawowe obliczenia/ocena systemu                        | 225 |
| 12.8. Podsumowanie                                               | 226 |
| Literatura                                                       | 226 |

## 13. Sprężarkowe pompy ciepła

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| – Adam Szelągowski                               | 229 |
| 13.1. Wprowadzenie                               | 229 |
| 13.2. Historia sprężarkowych pomp ciepła         | 230 |
| 13.3. Zasada działania sprężarkowych pomp ciepła | 232 |
| 13.3.1. Obieg Carnota                            | 233 |
| 13.3.2. Obieg Lindego                            | 235 |
| 13.3.3. Zamknięty obieg Braytona                 | 237 |
| 13.3.4. Otwarty obieg Braytona                   | 238 |
| 13.3.5. Obieg rzeczywisty                        | 239 |
| 13.4. Podział sprężarkowych pomp ciepła          | 240 |
| 13.5. Dolne źródła ciepła                        | 241 |
| 13.5.1. Powietrze atmosferyczne                  | 242 |
| 13.5.2. Grunt                                    | 242 |

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 13.5.3. Wody gruntowe .....                                                                            | 243 |
| 13.5.4. Ciepło odpadowe .....                                                                          | 243 |
| 13.6. Opłacalność stosowania pomp ciepła .....                                                         | 244 |
| 13.7. Podsumowanie .....                                                                               | 244 |
| Literatura .....                                                                                       | 245 |
| <b>14. Sorpcyjne pompy ciepła</b>                                                                      |     |
| – <i>Andrzej Grzebielec</i> .....                                                                      | 246 |
| 14.1. Wprowadzenie .....                                                                               | 246 |
| 14.2. Absorpcyjne pompy ciepła .....                                                                   | 248 |
| 14.3. Adsorpcyjne pompy ciepła .....                                                                   | 253 |
| 14.4. Magazynowanie ciepła z wykorzystaniem układów sorpcyjnych .....                                  | 258 |
| Literatura .....                                                                                       | 261 |
| <b>15. Słoneczne systemy hybrydowe</b>                                                                 |     |
| – <i>Bartosz Chwieduk</i> .....                                                                        | 263 |
| 15.1. Wprowadzenie .....                                                                               | 263 |
| 15.2. Wykorzystanie instalacji fotowoltaicznej do celów grzewczych .....                               | 264 |
| 15.3. Współpraca systemu fotowoltaicznego i pompy ciepła .....                                         | 265 |
| 15.4. Współpraca systemu fotowoltaicznego i siłowni wiatrowych .....                                   | 268 |
| 15.5. Współpraca systemu fotowoltaicznego z urządzeniami klimatyzacyjnymi .....                        | 269 |
| 15.6. Współpraca systemu fotowoltaicznego z urządzeniami grzewczymi i klimatyzacyjnymi .....           | 272 |
| Literatura .....                                                                                       | 275 |
| <b>16. Magazynowanie ciepła w elementach budynku i systemu ogrzewania</b>                              |     |
| – <i>Hanna Jędrzejuk</i> .....                                                                         | 276 |
| 16.1. Wprowadzenie .....                                                                               | 276 |
| 16.2. Struktura systemów ogrzewania w Polsce .....                                                     | 279 |
| 16.3. Sposoby akumulacji ciepła w systemach ogrzewania .....                                           | 281 |
| 16.3.1. Wybór sposobu akumulacji ciepła w systemach ogrzewania .....                                   | 281 |
| 16.3.2. Właściwości fizyczne wybranych substancji, materiałów, wyrobów i komponentów budowlanych ..... | 283 |
| 16.3.3. Podstawowe sposoby działania instalacji grzewczych z wydzielonymi zasobnikami ciepła .....     | 283 |
| 16.3.4. System ogrzewania jako zasobnik ciepła .....                                                   | 287 |
| 16.3.5. Konstrukcja budynku jako zasobnik ciepła .....                                                 | 290 |

|                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 16.3.6. Uproszczona analiza możliwości akumulacji ciepła w systemie ogrzewania budynku .....                                                                              | 296 |
| Literatura .....                                                                                                                                                          | 303 |
| <b>17. Niekonwencjonalne zintegrowane systemy HVAC</b>                                                                                                                    |     |
| – <i>Stefan Żuchowski</i> .....                                                                                                                                           | 305 |
| 17.1. Definicja HVAC .....                                                                                                                                                | 305 |
| 17.2. Rozwiązania HVAC – stan obecny .....                                                                                                                                | 305 |
| 17.3. Systemy zintegrowane .....                                                                                                                                          | 309 |
| 17.4. Niekonwencjonalne zintegrowane systemy HVAC (OWK) .....                                                                                                             | 313 |
| 17.4.1. System HVAC (OWK) w hotelu z odzyskiem ciepła z agregatu wody lodowej. Magazynowanie energii we wstępnym podgrzewaczu wody .....                                  | 313 |
| 17.4.2. Zintegrowany system HVAC (OWK) z ogrzewaniem i chłodzeniem płaszczyznowym. Magazynowanie energii odpadowej w gruncie .....                                        | 316 |
| 17.4.3. Zintegrowany system HVAC (OWK) z pompą ciepła w Centrum Jana Pawła II w Krakowie. Magazynowanie energii odpadowej w gruncie .....                                 | 320 |
| 17.4.4. Zintegrowany system HVAC z w budynku SPA w Puławach. Magazynowanie energii w zbiornikach buforowych i gruncie .....                                               | 321 |
| 17.4.5. Zintegrowany system HVAC z pompą ciepła w budynku jednorodzinnym. Akumulacja energii w zbiorniku buforowym i warstwie gruntu pod płytą fundamentową budynku ..... | 324 |
| 17.5. Podsumowanie .....                                                                                                                                                  | 325 |
| Literatura .....                                                                                                                                                          | 326 |
| <b>18. Systemy wieloźródłowe</b>                                                                                                                                          |     |
| – <i>Stefan Żuchowski, Kamil Różycki</i> .....                                                                                                                            | 327 |
| 18.1. Wprowadzenie .....                                                                                                                                                  | 327 |
| 18.2. Definicja głównych pojęć .....                                                                                                                                      | 328 |
| 18.3. Podział systemów wieloźródłowych .....                                                                                                                              | 329 |
| 18.4. Magazyny energii stosowane w systemach wieloźródłowych .....                                                                                                        | 330 |
| 18.5. Zbiorniki buforowe czynnika grzewczego .....                                                                                                                        | 333 |
| 18.6. Zbiornik buforowy pełniący funkcję sprzęgła hydraulicznego .....                                                                                                    | 334 |
| 18.7. Zbiornik buforowy na powrocie z instalacji .....                                                                                                                    | 337 |
| 18.8. Zbiornik buforowy z okresowym przepływem czynnika .....                                                                                                             | 338 |
| 18.9. Dobór pojemności zbiorników buforowych czynnika grzewczego .....                                                                                                    | 340 |
| 18.10. Pojemnościowe podgrzewacze ciepłej wody użytkowej .....                                                                                                            | 340 |
| 18.11. Układy szeregowo podgrzewacze wody .....                                                                                                                           | 344 |
| 18.12. Określenie wymaganej pojemności dla podgrzewacze wody .....                                                                                                        | 349 |
| 18.13. Zbiorniki buforowe wielofunkcyjne .....                                                                                                                            | 350 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 18.14. Zbiornik buforowy typu „zbiornik w zbiorniku” . . . . .                                                                                        | 351 |
| 18.15. Zbiornik buforowy z wbudowanym przepływowym podgrzewaczem wody<br>w postaci węzownicy . . . . .                                                | 352 |
| 18.16. Zbiornik buforowy z przepływowym podgrzewaczem wody wyposażonym<br>w wymiennik ciepła o dużej powierzchni, tzw. modulem świeżej wody . . . . . | 354 |
| 18.17. Podsumowanie . . . . .                                                                                                                         | 355 |
| Literatura . . . . .                                                                                                                                  | 355 |
| <b>19. Wykorzystanie energii słonecznej przy termomodernizacji budynków</b>                                                                           |     |
| – <i>Kamil Różycki</i> . . . . .                                                                                                                      | 357 |
| 19.1. Wprowadzenie . . . . .                                                                                                                          | 357 |
| 19.2. Definicja głównych pojęć . . . . .                                                                                                              | 357 |
| 19.3. Działania termomodernizacyjne . . . . .                                                                                                         | 358 |
| 19.4. Zastosowanie energii słonecznej podczas termomodernizacji budynku . . . . .                                                                     | 359 |
| 19.4.1. Słoneczne systemy bierne a termomodernizacja budynku . . . . .                                                                                | 360 |
| 19.4.2. Znaczenie oszklenia przy termomodernizacji budynku . . . . .                                                                                  | 361 |
| 19.4.3. Słoneczne systemy aktywne a termomodernizacja budynku . . . . .                                                                               | 363 |
| 19.5. Wykorzystanie energii słonecznej przy termomodernizacji budynków<br>w praktyce . . . . .                                                        | 365 |
| 19.5.1. Termomodernizacja domku jednorodzinnego . . . . .                                                                                             | 365 |
| 19.5.2. Termomodernizacja budynku wielorodzinnego . . . . .                                                                                           | 369 |
| 19.5.3. Termomodernizacja budynku użyteczności publicznej . . . . .                                                                                   | 372 |
| 19.6. Podsumowanie . . . . .                                                                                                                          | 376 |
| Literatura . . . . .                                                                                                                                  | 377 |
| <b>20. Gruntowe magazyny ciepła</b>                                                                                                                   |     |
| – <i>Michał Chwieduk</i> . . . . .                                                                                                                    | 378 |
| 20.1. Właściwości fizyczne czynnika magazynującego . . . . .                                                                                          | 379 |
| 20.2. Wymiarowanie gruntowego/skalnego magazynu ciepła . . . . .                                                                                      | 383 |
| 20.3. Gruntowe wymienniki ciepła . . . . .                                                                                                            | 384 |
| 20.4. Proces wymiany ciepła w gruncie . . . . .                                                                                                       | 386 |
| 20.5. Osiągane efektywności magazynów gruntowych . . . . .                                                                                            | 388 |
| Literatura . . . . .                                                                                                                                  | 389 |
| <b>21. Magazynowanie wodoru, ogniwa paliwowe</b>                                                                                                      |     |
| – <i>Wojciech Bujalski, Marcin Wołowicz</i> . . . . .                                                                                                 | 391 |
| 21.1. Wprowadzenie . . . . .                                                                                                                          | 391 |
| 21.2. Zasada działania . . . . .                                                                                                                      | 392 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 21.3. Podział ogniw paliwowych . . . . . | 394 |
| 21.4. Ogniw SOFC . . . . .               | 394 |
| 21.5. Ogniw PEMFC . . . . .              | 397 |
| 21.6. Magazynowanie wodoru . . . . .     | 404 |
| 21.7. Podsumowanie . . . . .             | 405 |
| Literatura . . . . .                     | 406 |

## 22. Energetyczne wykorzystanie biomasy

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| – Piotr Krawczyk . . . . .                                                                                | 407 |
| 22.1. Definicje biomasy . . . . .                                                                         | 407 |
| 22.2. Charakterystyka drzewnych paliw biomasowych . . . . .                                               | 409 |
| 22.2.1. Skład chemiczny biomasy drzewnej . . . . .                                                        | 409 |
| 22.2.2. Wartość opałowa drewna . . . . .                                                                  | 410 |
| 22.3. Wykorzystanie biomasy do produkcji ciepła w systemach lokalnych . . . . .                           | 411 |
| 22.4. Wykorzystanie biomasy do produkcji ciepła i energii elektrycznej<br>w systemach lokalnych . . . . . | 413 |
| 22.4.1. Układy Organic Rankine Cycle (ORC) . . . . .                                                      | 414 |
| 22.4.2. Układy z kotłem biomasowym i silnikiem parowym . . . . .                                          | 417 |
| 22.4.3. Układy z kotłem biomasowym i turbiną parową małej mocy . . . . .                                  | 418 |
| 22.4.4. Układy kogeneracyjne ze zgazówką biomasy i silnikiem spalinowym . . . . .                         | 419 |
| 22.4.5. Układy z silnikiem Stirlinga . . . . .                                                            | 420 |
| 22.5. Podsumowanie . . . . .                                                                              | 420 |
| Literatura . . . . .                                                                                      | 421 |