

# Spis treści

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Wprowadzenie .....                                                                                                    | XI |
| 1. Czym są współczesne pompy ciepła .....                                                                             | 1  |
| 2. Efektywność energetyczna a pompy ciepła .....                                                                      | 9  |
| 2.1. Czym jest efektywność energetyczna .....                                                                         | 9  |
| 2.2. Rola pomp ciepła w poprawie efektywności energetycznej .....                                                     | 12 |
| 2.3. Pompy ciepła w polityce energetycznej Polski .....                                                               | 19 |
| 3. Rys historyczny powstania i rozwoju pomp ciepła .....                                                              | 25 |
| 3.1. Wprowadzenie .....                                                                                               | 25 |
| 3.2. Chronologia ważniejszych wydarzeń, które wpłynęły na rozwój pomp ciepła .....                                    | 26 |
| 3.3. Podsumowanie .....                                                                                               | 34 |
| 4. Podstawy termodynamiczne działania pomp ciepła .....                                                               | 37 |
| 4.1. Idealny obieg Carnota. Silnik cieplny .....                                                                      | 38 |
| 4.2. Idealny obieg Carnota wstecz. Pompa ciepła, chłodziarka .....                                                    | 41 |
| 4.3. Działanie pompy ciepła. Obieg idealny i teoretyczny .....                                                        | 44 |
| 4.4. Straty w rzeczywistych obiegach parowych .....                                                                   | 48 |
| 4.5. Obiegi termodynamiczne parowych pomp ciepła w układzie ciśnienie–entalpia .....                                  | 53 |
| 5. Dolne i górne źródła pomp ciepła sprężarkowych .....                                                               | 57 |
| 5.1. Podstawy wyboru i podział źródeł ciepła pompy ciepła .....                                                       | 58 |
| 5.2. Powietrze atmosferyczne .....                                                                                    | 62 |
| 5.3. Grunt .....                                                                                                      | 67 |
| 5.3.1. Podstawowe cechy gruntu jako dolnego źródła pompy ciepła .....                                                 | 67 |
| 5.3.2. Powstanie idei wykorzystania gruntu jako źródła ciepła .....                                                   | 71 |
| 5.3.3. Wymienniki gruntowe .....                                                                                      | 74 |
| 5.4. Wody gruntowe .....                                                                                              | 81 |
| 5.5. Wody powierzchniowe .....                                                                                        | 83 |
| 5.6. Źródła ciepła odpadowego .....                                                                                   | 86 |
| 6. Zapotrzebowanie na energię użytkową, końcową i pierwotną.<br>Rola pomp ciepła w zmniejszaniu zużycia energii ..... | 89 |

|                                                                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.1. Konieczność ograniczenia zużycia energii .....                                                                                      | 90         |
| 6.2. Zapotrzebowanie na energię użytkową .....                                                                                           | 93         |
| 6.3. Zapotrzebowanie na energię końcową .....                                                                                            | 96         |
| 6.4. Zapotrzebowanie na energię pierwotną .....                                                                                          | 100        |
| 6.5. Wyznaczanie zużycia energii końcowej i pierwotnej w hipotetycznym budynku z pompą ciepła .....                                      | 103        |
| <b>7. Systemy sprężarkowych pomp ciepła .....</b>                                                                                        | <b>111</b> |
| 7.1. Różne systemy pomp ciepła i systemy z pompami ciepła .....                                                                          | 112        |
| 7.2. Sprężarkowa parowa pompa ciepła jako system energetyczny .....                                                                      | 113        |
| 7.2.1. Rewersyjna pompa ciepła .....                                                                                                     | 113        |
| 7.2.2. Kaskadowa pompa ciepła .....                                                                                                      | 116        |
| 7.2.3. Pompy ciepła z wielostopniowym sprężaniem .....                                                                                   | 119        |
| 7.3. Sprężarkowe pompy ciepła realizujące gazowe obiegi chłodnicze .....                                                                 | 121        |
| <b>8. Współczynniki wydajności cieplnej pomp ciepła .....</b>                                                                            | <b>127</b> |
| 8.1. Ocena efektywności energetycznej pomp ciepła .....                                                                                  | 128        |
| 8.2. Współczynnik wydajności cieplnej COP .....                                                                                          | 128        |
| 8.3. Sezonowy współczynnik wydajności cieplnej SCOP .....                                                                                | 132        |
| 8.4. Sezonowy współczynnik efektywności energetycznej SPF .....                                                                          | 135        |
| 8.5. Współczynniki opisujące współpracę pompy ciepła ze słoneczną instalacją grzewczą ....                                               | 136        |
| 8.6. Współczynniki efektywności energetycznej urządzeń chłodniczych .....                                                                | 138        |
| <b>9. Integracja pomp ciepła z niskotemperaturowymi sieciami ciepłowniczymi małej skali .....</b>                                        | <b>141</b> |
| 9.1. Wprowadzenie .....                                                                                                                  | 142        |
| 9.2. Perspektywiczne rozwiązania technologiczne w sieciach ciepłowniczych .....                                                          | 143        |
| 9.3. Pilotażowe instalacje sieci niskotemperaturowych .....                                                                              | 144        |
| 9.3.1. Pierwsze niskotemperaturowe sieci ciepłownicze .....                                                                              | 144        |
| 9.3.2. Instalacja pilotażowa w Lystrup – Dania .....                                                                                     | 145        |
| 9.3.3. Instalacja pilotażowa w Kassel Feldlager – Niemcy. ....                                                                           | 146        |
| 9.4. Analiza hipotetycznej niskotemperaturowej sieci ciepłowniczej zasilającej osiedle domów jednorodzinnych w warunkach krajowych ..... | 147        |
| 9.4.1. Hipotetyczne osiedle .....                                                                                                        | 147        |
| 9.4.2. Niskotemperaturowy system grzewczy osiedla .....                                                                                  | 149        |
| 9.4.3. Zapotrzebowanie na ciepło w budynkach .....                                                                                       | 150        |
| 9.4.4. Działanie systemu grzewczego osiedla .....                                                                                        | 151        |
| <b>10. Pompy ciepła w systemach energetycznych nowoczesnych zeroemisyjnych miast .....</b>                                               | <b>157</b> |
| 10.1. Formalne wsparcie do wykorzystania pomp ciepła w miastach .....                                                                    | 158        |
| 10.2. Metoda LCA – Ocena cyklu życia .....                                                                                               | 160        |
| 10.3. Pompy ciepła w inteligentnych miastach .....                                                                                       | 163        |
| 10.4. Osiedla dodatnie energetycznie .....                                                                                               | 168        |
| <b>11. Czynniki robocze stosowane w pompach ciepła .....</b>                                                                             | <b>175</b> |
| 11.1. Czynniki robocze obiegów podstawowych .....                                                                                        | 176        |
| 11.1.1. Charakterystyka czynników roboczych w sprężarkowych pompach ciepła .....                                                         | 177        |
| 11.1.2. Nazewnictwo .....                                                                                                                | 179        |
| 11.2. Wymagania prawne dotyczące stosowania czynników roboczych .....                                                                    | 181        |
| 11.3. Podział czynników ze względu na skład i budowę cząsteczkową .....                                                                  | 186        |
| 11.4. Właściwości najpopularniejszych obecnie i perspektywicznych czynników roboczych .....                                              | 190        |

|            |                                                                                                                                     |            |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.5.      | Czynniki robocze w układach sorpcyjnych .....                                                                                       | 204        |
| 11.5.1.    | Woda-wodny roztwór bromku litu .....                                                                                                | 204        |
| 11.5.2.    | Amoniak-woda .....                                                                                                                  | 204        |
| 11.6.      | Czynniki robocze obiegów pośredniczących .....                                                                                      | 205        |
| 11.6.1.    | Wodne roztwory soli .....                                                                                                           | 206        |
| 11.6.2.    | Wodne roztwory glikolu .....                                                                                                        | 207        |
| 11.6.3.    | Roztwory alkoholi jednowodorotlenowych .....                                                                                        | 208        |
| 11.7.      | Podsumowanie .....                                                                                                                  | 209        |
| <b>12.</b> | <b>Przykłady obliczeniowe funkcjonowania sprężarkowych pomp ciepła .....</b>                                                        | <b>213</b> |
| 12.1.      | Wprowadzenie do obliczeń energetycznych sprężarkowych pomp ciepła .....                                                             | 214        |
| 12.2.      | Przykłady obliczeniowe .....                                                                                                        | 221        |
| <b>13.</b> | <b>Absorpcyjne pompy ciepła .....</b>                                                                                               | <b>241</b> |
| 13.1.      | Wprowadzenie do obiegów absorpcyjnych .....                                                                                         | 242        |
| 13.2.      | Zasada działania absorpcyjnej pompy ciepła .....                                                                                    | 243        |
| 13.3.      | Absorpcyjna pompa ciepła pracująca wg obiegu idealnego –<br>obieg Carnota .....                                                     | 246        |
| 13.4.      | Właściwości roztworów .....                                                                                                         | 249        |
| 13.5.      | Czynniki stosowane w absorpcyjnych pompach ciepła .....                                                                             | 252        |
| 13.6.      | Model obliczeniowy absorpcyjnego urządzenia (pompy ciepła/<br>urządzenia chłodniczego) z zespołem sorpcyjnym $H_2O-LiBr$ .....      | 254        |
| 13.7.      | Model obliczeniowy absorpcyjnego urządzenia (pompy ciepła/<br>urządzenia chłodniczego) z zespołem sorpcyjnym $NH_3-H_2O$ .....      | 259        |
| 13.8.      | Przykład obliczeniowy z wyznaczeniem bilansu energetycznego<br>dla absorpcyjnego urządzenia z zespołem sorpcyjnym $H_2O-LiBr$ ..... | 265        |
|            | Załącznik 1 .....                                                                                                                   | 269        |
|            | Załącznik 2 .....                                                                                                                   | 270        |
| <b>14.</b> | <b>Adsorpcyjne pompy ciepła .....</b>                                                                                               | <b>271</b> |
| 14.1.      | Wprowadzenie .....                                                                                                                  | 272        |
| 14.2.      | Zasada działania adsorpcyjnych pomp ciepła/urządzeń adsorpcyjnych .....                                                             | 273        |
| 14.3.      | Obieg termodynamiczny złoża adsorpcyjnego .....                                                                                     | 276        |
| 14.4.      | Zaawansowane obiegi adsorpcyjne .....                                                                                               | 280        |
| 14.5.      | Zespoły sorpcyjne do adsorpcyjnych pomp ciepła .....                                                                                | 283        |
| 14.6.      | Podsumowanie .....                                                                                                                  | 285        |
| <b>15.</b> | <b>Wysokotemperaturowe pompy ciepła w zastosowaniach ciepłowniczych .....</b>                                                       | <b>287</b> |
| 15.1.      | Przesłanki do wykorzystania pomp ciepła w systemach ciepłowniczych .....                                                            | 288        |
| 15.1.1.    | Przesłanki natury prawnej .....                                                                                                     | 288        |
| 15.1.2.    | Przesłanki natury technicznej .....                                                                                                 | 290        |
| 15.2.      | Warunki techniczne .....                                                                                                            | 292        |
| 15.2.1.    | Uwarunkowania po stronie sieci ciepłowniczej .....                                                                                  | 292        |
| 15.2.2.    | Dostępne źródła ciepła .....                                                                                                        | 293        |
| 15.2.3.    | Konfiguracja układów .....                                                                                                          | 295        |
| 15.2.4.    | Czynniki robocze .....                                                                                                              | 299        |
| 15.3.      | Strategie doboru i sterowania pomp ciepła .....                                                                                     | 301        |
| 15.4.      | Uwarunkowania ekonomiczne .....                                                                                                     | 303        |
| <b>16.</b> | <b>Zastosowania pomp ciepła. Budownictwo jednorodzinne – mikroskala .....</b>                                                       | <b>307</b> |
| 16.1.      | Ogólna charakterystyka i wymagania stawiane układom z pompami ciepła<br>stosowanym w budownictwie jednorodzinnym .....              | 307        |

|                                                                                                                                                                                                                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 16.2. Podział rozwiązań z pompami ciepła w zależności od sposobu przygotowania ciepłej wody .....                                                                                                                                                              | 309        |
| 16.2.1. Pompa ciepła z kompaktowym modułem wewnętrznym .....                                                                                                                                                                                                   | 309        |
| 16.2.2. Pompa ciepła z naściennym modułem wewnętrznym oraz podgrzewaczem wody o dużej pojemności .....                                                                                                                                                         | 311        |
| 16.2.3. Pompa ciepła z naściennym modułem wewnętrznym oraz podgrzewaczem wody do współpracy z kolektorami słonecznymi na potrzeby wspomagania przygotowania ciepłej wody użytkowej .....                                                                       | 312        |
| 16.2.4. Pompa ciepła z naściennym modułem wewnętrznym i kolektorami słonecznymi na potrzeby wspomagania ogrzewania budynku i przygotowania ciepłej wody. System z warstwowym zbiornikiem wielofunkcyjnym i przepływowym podgrzewaczem wody .....               | 315        |
| 16.2.5. Pompa ciepła z naściennym modułem wewnętrznym i kolektorami słonecznymi na potrzeby wspomagania ogrzewania budynku i przygotowania ciepłej wody. System ze zbiornikiem buforowym z wbudowanym dodatkowym zbiornikiem ciepłej wody .....                | 317        |
| 16.2.6. Pompa ciepła z naściennym modułem wewnętrznym i kolektorami słonecznymi na potrzeby wspomagania ogrzewania budynku i przygotowania ciepłej wody. System ze zbiornikiem buforowym wbudowaną wężownicą pełniącą rolę przepływowego podgrzewacza wody ... | 319        |
| 16.2.7. Projektowanie instalacji ze zbiornikiem wielofunkcyjnym .....                                                                                                                                                                                          | 321        |
| 16.3. Rozwiązania z pompami ciepła typu powietrze–woda. Podział w zależności od budowy pompy ciepła .....                                                                                                                                                      | 322        |
| 16.3.1. Pompy ciepła powietrze–woda typu split .....                                                                                                                                                                                                           | 322        |
| 16.3.2. Pompy ciepła powietrze–woda typu monoblok do montażu na zewnątrz budynku .....                                                                                                                                                                         | 323        |
| 16.3.3. Monoblokowe pompy ciepła powietrze–woda do montażu wewnątrz budynku .....                                                                                                                                                                              | 326        |
| 16.4. Typowe schematy hydrauliczne z pompami ciepła powietrze–woda typu split .....                                                                                                                                                                            | 328        |
| 16.4.1. Układ z bezpośrednim zasilaniem instalacji grzewczej .....                                                                                                                                                                                             | 328        |
| 16.4.2. Układ ze zbiornikiem buforowym z funkcją sprzęgła hydraulicznego .....                                                                                                                                                                                 | 329        |
| 16.4.3. Układ ze zbiornikiem buforowym w układzie szeregowo–równoległym .....                                                                                                                                                                                  | 331        |
| 16.5. Typowe schematy hydrauliczne z pompami ciepła monoblok do montażu na zewnątrz budynku .....                                                                                                                                                              | 332        |
| 16.5.1. Układ z bezpośrednim zasilaniem instalacji grzewczej .....                                                                                                                                                                                             | 332        |
| 16.5.2. Układ ze zbiornikiem buforowym z funkcją sprzęgła hydraulicznego .....                                                                                                                                                                                 | 334        |
| 16.6. Schematy hydrauliczne z pompami ciepła współpracującymi z dolnym źródłem w postaci sond gruntowych, z wykorzystaniem funkcji chłodzenia pasywnego .....                                                                                                  | 335        |
| 16.6.1. Układ z bezpośrednim zasilaniem instalacji grzewczej .....                                                                                                                                                                                             | 335        |
| 16.6.2. Układ z wielofunkcyjnym zbiornikiem buforowym, kolektorami słonecznymi i chłodzeniem pasywnym .....                                                                                                                                                    | 337        |
| <b>17. Zastosowania pomp ciepła. Budownictwo wielorodzinne, budynki użyteczności publicznej – mała i średnia skala .....</b>                                                                                                                                   | <b>339</b> |
| 17.1. Ogólna charakterystyka i wymagania stawiane układom z pompami ciepła stosowanym w budownictwie wielorodzinnym i budynkach użyteczności publicznej .....                                                                                                  | 340        |
| 17.2. Rozwiązania z pompami ciepła powietrze–woda. Zastosowanie indywidualnych pomp ciepła dla poszczególnych mieszkań .....                                                                                                                                   | 341        |
| 17.3. Rozwiązania z zastosowaniem zbiorczego układu pomp ciepła zasilającego instalację w budynku wielorodzinnym .....                                                                                                                                         | 343        |

|                                                                                                                                                                                                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 17.4. Rozwiązania mieszane z centralną instalacją niskotemperaturowych pomp ciepła oraz mieszkaniowymi pompami ciepła niskiej mocy podnoszącymi temperaturę czynnika .....                                                                                            | 350        |
| 17.4.1. Przykłady rozwiązań mieszanych – połączenie centralnej instalacji pomp ciepła z mieszkaniowymi pompami ciepła na potrzeby ogrzewania oraz przygotowania ciepłej wody .....                                                                                    | 350        |
| 17.4.2. Przykłady rozwiązań mieszanych – mieszkaniowe pompy ciepła współpracujące z sondami gruntowymi .....                                                                                                                                                          | 352        |
| 17.4.3. Przykłady rozwiązań mieszanych – połączenie centralnej instalacji pomp ciepła z ogrzewaniem podłogowym i mieszkaniowymi pompami ciepła woda–woda na potrzeby przygotowania ciepłej wody .....                                                                 | 353        |
| 17.4.4. Przykłady rozwiązań mieszanych w budynkach użyteczności publicznej, w szczególności budynkach biurowych – połączenie centralnej instalacji z pompą ciepła oraz pętlą wodną, miejscowymi pompami ciepła powietrze–woda/woda–powietrze i wieżą chłodniczą ..... | 355        |
| 17.4.5. Przykłady rozwiązań z pompami ciepła w budynkach użyteczności publicznej, obiekt hotelowy z instalacją pomp ciepła na potrzeby ogrzewania i chłodzenia budynku .....                                                                                          | 356        |
| 17.4.6. Przykłady rozwiązań z pompami ciepła w budynkach użyteczności publicznej, wykorzystanie magistrali wodociągowej w funkcji dolnego źródła pomp ciepła .....                                                                                                    | 358        |
| 17.4.7. Przykład rozwiązania z pompami ciepła z wykorzystaniem ciepła odpadowego w małej i średniej skali .....                                                                                                                                                       | 359        |
| <b>18. Zastosowania pomp ciepła. Skala makro .....</b>                                                                                                                                                                                                                | <b>363</b> |
| 18.1. Obiekty wielkokubaturowe – ogrzewanie i chłodzenie budynków, przygotowanie ciepłej wody .....                                                                                                                                                                   | 363        |
| 18.2. Pompy ciepła w sieciach ciepłowniczych .....                                                                                                                                                                                                                    | 364        |
| 18.3. Pompy ciepła w zakładach produkcyjnych, gospodarka obiegu zamkniętego w procesach o temperaturze poniżej 100°C .....                                                                                                                                            | 365        |
| 18.4. Pompy ciepła w zakładach produkcyjnych, gospodarka obiegu zamkniętego. Pilotażowe instalacje z pompami ciepła w procesach o temperaturze powyżej 100°C ...                                                                                                      | 370        |