

# SPIS RZECZY

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Przedmowa do wydania czwartego .....                                              | 9         |
| Spis ważniejszych oznaczeń .....                                                  | 10        |
| <b>1. Chemia spalania: mechanizmy i kinetyka.....</b>                             | <b>13</b> |
| 1.1. Pojęcia podstawowe .....                                                     | 13        |
| 1.1.1. Atom, cząsteczka, wolne rodniki .....                                      | 13        |
| 1.1.2. Przemiany chemiczne, równania chemiczne .....                              | 15        |
| 1.1.3. Równowaga chemiczna .....                                                  | 16        |
| 1.1.4. Szybkość procesów chemicznych, rząd reakcji .....                          | 16        |
| 1.2. Reakcje elementarne.....                                                     | 17        |
| 1.2.1. Cząsteczkowość reakcji elementarnych .....                                 | 17        |
| 1.2.2. Kompleks przejściowy, energia aktywacji.....                               | 17        |
| 1.2.3. Szybkość reakcji elementarnych, równanie Arrheniusa .....                  | 18        |
| 1.2.4. Typy reakcji elementarnych w fazie gazowej .....                           | 19        |
| 1.3. Procesy złożone.....                                                         | 20        |
| 1.3.1. Reakcja globalna, mechanizm reakcji.....                                   | 20        |
| 1.3.2. Stan stacjonarny.....                                                      | 21        |
| 1.3.3. Reakcje łańcuchowe .....                                                   | 22        |
| 1.3.4. Kataliza, inhibicja.....                                                   | 22        |
| 1.3.5. Reakcje z udziałem ciała stałego .....                                     | 24        |
| 1.4. Wybuchy .....                                                                | 24        |
| 1.4.1. Wybuchy termiczne i łańcuchowe .....                                       | 24        |
| 1.4.2. Granice wybuchu dla reakcji łańcuchowych; zapłon izotermiczny.....         | 25        |
| 1.5. Mechanizmy spalania paliw w fazie gazowej.....                               | 27        |
| 1.5.1. Układ $H_2 + O_2$ .....                                                    | 28        |
| 1.5.2. Utlenianie tlenku węgla .....                                              | 31        |
| 1.5.3. Spalanie węglowodorów .....                                                | 32        |
| 1.6. Zjawiska towarzyszące procesom spalania .....                                | 33        |
| 1.6.1. Chemiluminescencja .....                                                   | 34        |
| 1.6.2. Chemijonizacja .....                                                       | 37        |
| Literatura .....                                                                  | 38        |
| <b>2. Aerodynamika spalania.....</b>                                              | <b>39</b> |
| 2.1. Strugi .....                                                                 | 40        |
| 2.1.1. Strugi proste.....                                                         | 40        |
| 2.1.2. Strugi w przepływie .....                                                  | 42        |
| 2.1.3. Strugi zawirowane .....                                                    | 43        |
| 2.2. Niektóre cechy przepływów turbulentnych .....                                | 47        |
| 2.2.1. Struktura przepływów turbulentnych .....                                   | 48        |
| 2.2.2. Turbulentne skale długości, czasu i prędkości .....                        | 49        |
| 2.3. Modele turbulentnego spalania.....                                           | 50        |
| 2.3.1. Dyfuzja turbulentna .....                                                  | 50        |
| 2.3.2. Gaszenie płomienia przez rozciąganie w polu przepływu .....                | 52        |
| 2.3.3. Model spalania turbulentnego z <i>płomikami</i> ( <i>flamelets</i> ) ..... | 53        |

|                                                                                           |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.3.4. Formy turbulentnego spalania.....                                                  | 55         |
| 2.3.5. Modele rozprzestrzeniania się płomienia turbulentnego.....                         | 58         |
| 2.3.6. Modele szybkości spalania turbulentnego stosowane w obliczeniach numerycznych..... | 60         |
| 2.4. Aerodynamika swobodnych płomieni .....                                               | 65         |
| 2.4.1. Przejście od płomienia laminarnego do turbulentnego .....                          | 65         |
| 2.4.2. Wpływ prędkości wypływu na strukturę dyfuzyjnego płomienia .....                   | 66         |
| 2.4.3. Długość laminarnych płomieni dyfuzyjnych.....                                      | 68         |
| 2.4.4. Długość turbulentnego płomienia dyfuzyjnego .....                                  | 68         |
| 2.4.5. Rozkład koncentracji składników w płomieniach swobodnych .....                     | 69         |
| 2.4.6. Płomienie w przepływach zawirowanych .....                                         | 70         |
| 2.5. Aerodynamika spalania w obszarze ograniczonym .....                                  | 72         |
| 2.6. Stabilizacja płomieni .....                                                          | 74         |
| Literatura .....                                                                          | 77         |
| <b>3. Spalanie paliw gazowych.....</b>                                                    | <b>79</b>  |
| 3.1. Zapłon mieszaniny gazowej .....                                                      | 79         |
| 3.1.1. Zapłon wymuszony .....                                                             | 80         |
| 3.1.2. Stężeniowe granice zapłonu.....                                                    | 83         |
| 3.2. Płomień laminarny.....                                                               | 86         |
| 3.2.1. Wstępne wiadomości o płomieniach laminarnych .....                                 | 86         |
| 3.2.2. Prawo Michelsona .....                                                             | 87         |
| 3.2.3. Uproszczona teoria propagacji laminarnego płomienia .....                          | 90         |
| 3.2.4. Prędkość spalania laminarnego – wyniki doświadczalne.....                          | 94         |
| 3.3. Płomień kinetyczny .....                                                             | 99         |
| 3.4. Struktura płomieni dyfuzyjnych .....                                                 | 101        |
| 3.5. Stabilność płomieni .....                                                            | 105        |
| 3.5.1. Stabilność płomienia laminarnego .....                                             | 107        |
| 3.6. Kinetyka chemiczna utleniania metanu .....                                           | 109        |
| 3.7. Nowe technologie spalania, bezpłomieniowe spalanie .....                             | 114        |
| 3.8. Palniki gazowe .....                                                                 | 117        |
| Literatura .....                                                                          | 120        |
| <b>4. Spalanie paliw ciekłych .....</b>                                                   | <b>121</b> |
| 4.1. Ważniejsze czynniki kontrolujące spalanie paliw ciekłych .....                       | 121        |
| 4.2. Spalanie pojedynczej kropli paliwa ciekłego .....                                    | 122        |
| 4.2.1. Sferyczno-symetryczny model spalania kropli .....                                  | 122        |
| 4.2.2. Wpływ niektórych czynników na spalanie kropli paliwa.....                          | 123        |
| 4.3. Płomień rozpylonego paliwa ciekłego.....                                             | 126        |
| 4.3.1. Struktura płomienia .....                                                          | 126        |
| 4.3.2. Zawirowany płomień rozpylonego paliwa ciekłego.....                                | 127        |
| 4.3.3. Przekazywanie ciepła od płomienia olejowego .....                                  | 128        |
| 4.4. Rozpylanie paliw ciekłych.....                                                       | 129        |
| 4.4.1. Mechanizmy rozpylania strugi cieczy.....                                           | 129        |
| 4.4.2. Przykłady rozpylaczy olejowych .....                                               | 132        |
| 4.4.3. Charakterystyki rozpylaczy.....                                                    | 135        |

|                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5. Palniki olejowe.....                                                           | 137        |
| Literatura .....                                                                    | 140        |
| <b>5. Spalanie paliw stałych .....</b>                                              | <b>141</b> |
| 5.1. Spalanie węgla.....                                                            | 141        |
| 5.1.1. Spalanie pojedynczej cząstki węgla.....                                      | 142        |
| 5.1.2. Spalanie pyłu węglowego .....                                                | 159        |
| 5.1.3. Spalanie w warstwie fluidalnej .....                                         | 168        |
| 5.2. Spalanie biomasy.....                                                          | 171        |
| 5.2.1. Spalanie drewna.....                                                         | 171        |
| 5.2.2. Spalanie słomy.....                                                          | 179        |
| 5.2.3. Współspalanie biomasy z węglem .....                                         | 181        |
| 5.2.4. Zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych w kotłach opalanych biomasą...     | 184        |
| 5.3. Korozja wysokotemperaturowa .....                                              | 186        |
| 5.3.1. Korozyjne działanie składników spalin .....                                  | 187        |
| 5.3.2. Wpływ warunków spalania .....                                                | 187        |
| 5.3.3. Znaczenie materiału rur parownika.....                                       | 188        |
| 5.3.4. Mechanizmy korozji wysokotemperaturowej .....                                | 188        |
| Literatura .....                                                                    | 192        |
| Dodatek 5.1 .....                                                                   | 194        |
| <b>6. Środowiskowe aspekty procesów spalania .....</b>                              | <b>195</b> |
| 6.1. Spalanie a środowisko naturalne .....                                          | 195        |
| 6.2. Ważniejsze zanieczyszczenia powstające podczas spalania.....                   | 197        |
| 6.2.1. Dytlenek węgla .....                                                         | 198        |
| 6.2.2. Tlenki azotu .....                                                           | 200        |
| 6.2.3. Dytlenek siarki.....                                                         | 215        |
| 6.2.4. Tlenek węgla (czad).....                                                     | 219        |
| 6.2.5. Węglowodory .....                                                            | 221        |
| 6.2.6. Dioksyny i furany .....                                                      | 224        |
| 6.2.7. Cząstki węglowe .....                                                        | 225        |
| 6.2.8. Popioły lotne.....                                                           | 230        |
| 6.2.9. Aerozole i niektóre metale.....                                              | 232        |
| 6.3. Emisja zanieczyszczeń z niektórych urządzeń .....                              | 233        |
| 6.3.1. Elektrownie węglowe.....                                                     | 233        |
| 6.3.2. Tłokowe silniki spalinowe .....                                              | 234        |
| 6.3.3. Zanieczyszczenia powstające podczas spalania oleju.....                      | 236        |
| 6.3.4. Koksowanie i zgazowanie węgla .....                                          | 237        |
| 6.3.5. Turbiny gazowe .....                                                         | 238        |
| 6.3.6. Spalarnie odpadów .....                                                      | 239        |
| 6.4. Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce.....                              | 240        |
| 6.4.1. Niskoemisyjne palniki pyłowe.....                                            | 241        |
| 6.4.2. Ograniczanie emisji NO <sub>x</sub> przez zmianę organizacji paleniska ..... | 246        |
| 6.4.3. Negatywne skutki stosowania niskoemisyjnych technik spalania .....           | 250        |
| 6.5. Katalizatory w technice spalania i w oczyszczaniu spalin .....                 | 252        |
| 6.5.1. Kataliza heterogeniczna i katalizatory .....                                 | 253        |

|                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.5.2. Nośniki i reaktory .....                                                    | 254        |
| 6.5.3. Zastosowania katalizatorów.....                                             | 255        |
| Dodatek A. Jednostki używane do wyrażania udziałów $\text{NO}_x$ w spalinach ..... | 264        |
| Literatura .....                                                                   | 261        |
| <b>7. Właściwości wybuchowe gazów i pyłów .....</b>                                | <b>265</b> |
| 7.1. Podstawowe określenia .....                                                   | 265        |
| 7.2. Inicjacja wybuchu.....                                                        | 266        |
| 7.2.1. Teoria wybuchu cieplnego.....                                               | 266        |
| 7.2.2. Teoria wybuchu łańcuchowego .....                                           | 269        |
| 7.2.3. Zapłon wymuszony .....                                                      | 271        |
| 7.3. Stężeniowe granice wybuchu.....                                               | 272        |
| 7.4. Gazodynamika wybuchów.....                                                    | 273        |
| 7.4.1. Rozwój wybuchu gazowego w małym, zamkniętym zbiorniku .....                 | 274        |
| 7.4.2. Wpływ turbulencji na rozwój wybuchu .....                                   | 275        |
| 7.4.3. Mechanizmy utraty stabilności płomienia.....                                | 277        |
| 7.4.4. Wybuchy pyłowe .....                                                        | 279        |
| 7.4.5. Przejście od deflagracji do detonacji .....                                 | 280        |
| 7.5. Charakterystyki wybuchowości gazów i pyłów .....                              | 283        |
| 7.5.1. Charakterystyki wybuchowości gazów i par .....                              | 283        |
| 7.5.2. Charakterystyki wybuchowości pyłów.....                                     | 286        |
| 7.6. Ochrona przeciwwybuchowa.....                                                 | 288        |
| 7.6.1. Zapobieganie wybuchom.....                                                  | 288        |
| 7.6.2. Zabezpieczenia przeciwwybuchowe .....                                       | 289        |
| 7.7. Samozapłon węgla.....                                                         | 295        |
| 7.7.1. Mechanizmy samonagrzewania się węgla w składowiskach.....                   | 297        |
| 7.7.2. Zapobieganie samozapaleniu węgla.....                                       | 299        |
| Literatura .....                                                                   | 300        |
| <b>8. Spalanie w niektórych urządzeniach technicznych .....</b>                    | <b>303</b> |
| 8.1. Kotły parowe .....                                                            | 303        |
| 8.1.1. Kotły rusztowe.....                                                         | 303        |
| 8.1.2. Kotły pyłowe .....                                                          | 304        |
| 8.1.3. Kotły fluidalne .....                                                       | 309        |
| 8.2. Silniki spalinowe .....                                                       | 314        |
| 8.2.1. Tłokowe silniki spalinowe .....                                             | 314        |
| 8.2.2. Turbiny gazowe .....                                                        | 320        |
| 8.3. Zgazowanie paliw stałych.....                                                 | 326        |
| 8.3.1. Zgazowanie węgla .....                                                      | 327        |
| 8.3.2. Zgazowanie biomasy .....                                                    | 330        |
| Literatura .....                                                                   | 333        |
| <b>9. Odpady i ich spalanie .....</b>                                              | <b>334</b> |
| 9.1. Odpady .....                                                                  | 334        |
| 9.1.1. Odpady komunalne .....                                                      | 334        |
| 9.1.2. Odpady szpitalne (medyczne).....                                            | 336        |

|                                                                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.1.3. Komunalne osady ściekowe .....                                                                                          | 336        |
| 9.1.4. Drewno użytkowe .....                                                                                                   | 338        |
| 9.1.5. Odpady niebezpieczne .....                                                                                              | 339        |
| 9.1.6. Paliwa z odpadów .....                                                                                                  | 340        |
| 9.2. Spalanie odpadów .....                                                                                                    | 343        |
| 9.2.1. Mechanizmy spalania odpadów .....                                                                                       | 343        |
| 9.2.2. Warunki bezpiecznego spalania odpadów .....                                                                             | 347        |
| 9.2.3. Piroliza odpadów .....                                                                                                  | 350        |
| 9.2.4. Współspalanie odpadów z innymi paliwami .....                                                                           | 353        |
| 9.3. Spalarnie odpadów .....                                                                                                   | 356        |
| 9.3.1. Charakterystyka instalacji do termicznego przekształcania odpadów .....                                                 | 356        |
| 9.3.2. Węzły termicznej obróbki odpadów (paleniska) .....                                                                      | 358        |
| 9.3.3. Spalarnie odpadów komunalnych .....                                                                                     | 365        |
| 9.3.4. Spalarnie odpadów niebezpiecznych .....                                                                                 | 368        |
| 9.3.5. Rodzaje instalacji i urządzeń, w których dopuszcza się termiczne przekształcanie odpadów innych niż niebezpieczne ..... | 372        |
| 9.4. Emisja zanieczyszczeń podczas spalania odpadów .....                                                                      | 372        |
| Literatura .....                                                                                                               | 374        |
| <b>10. Diagnostyka procesów spalania .....</b>                                                                                 | <b>377</b> |
| 10.1. Wstęp .....                                                                                                              | 377        |
| 10.2. Pomiar stężeń składników w płomieniu .....                                                                               | 377        |
| 10.2.1. Sonda .....                                                                                                            | 378        |
| 10.2.2. Chromatografia gazowa .....                                                                                            | 379        |
| 10.2.3. Spektrometria masowa .....                                                                                             | 384        |
| 10.2.4. Połączenie chromatografu gazowego z spektrometrem masowym .....                                                        | 385        |
| 10.2.5. Metody spektroskopowe .....                                                                                            | 386        |
| 10.2.6. Pomiar stężeń jonów i elektronów w płomieniu .....                                                                     | 390        |
| 10.3. Pomiar temperatury w płomieniu .....                                                                                     | 391        |
| 10.3.1. Pomiar temperatury w płomieniu termoelementami .....                                                                   | 392        |
| 10.3.2. Termometry oporowe .....                                                                                               | 394        |
| 10.3.3. Gazodynamiczna metoda pomiaru temperatury .....                                                                        | 395        |
| 10.3.4. Metody optyczne pomiaru temperatury .....                                                                              | 395        |
| Literatura .....                                                                                                               | 398        |
| <b>11. Paliwa .....</b>                                                                                                        | <b>399</b> |
| 11.1. Paliwa gazowe .....                                                                                                      | 399        |
| 11.1.1. Klasyfikacja paliw gazowych .....                                                                                      | 399        |
| 11.1.2. Gaz ziemny .....                                                                                                       | 401        |
| 11.1.3. Sztuczne gazy palne .....                                                                                              | 402        |
| 11.1.4. Ważniejsze parametry gazu palnego .....                                                                                | 403        |
| 11.1.5. Zalety gazu jako paliwa .....                                                                                          | 404        |
| 11.1.6. Zastosowanie gazu ziemnego .....                                                                                       | 404        |
| 11.1.7. Zużycie oraz zasoby i rezerwy gazu ziemnego .....                                                                      | 405        |
| 11.2. Paliwa ciekłe .....                                                                                                      | 407        |
| 11.2.1. Ropa naftowa .....                                                                                                     | 407        |

---

|                                                        |            |
|--------------------------------------------------------|------------|
| 11.2.2. Sztuczne paliwa ciekłe .....                   | 413        |
| 11.2.3. Ważniejsze parametry paliw ciekłych .....      | 416        |
| 11.2.4. Zużycie oraz zasoby ropy naftowej .....        | 416        |
| 11.3. Węgiel .....                                     | 417        |
| 11.3.1. Pochodzenie węgla .....                        | 417        |
| 11.3.2. Petrografia węgla .....                        | 418        |
| 11.3.3. Chemiczna struktura węgla .....                | 420        |
| 11.3.4. Klasyfikacja węgla .....                       | 420        |
| 11.3.5. Składniki węgla .....                          | 426        |
| 11.3.6. Torf .....                                     | 427        |
| 11.3.7. Łupki bitumiczne .....                         | 428        |
| 11.3.8. Węgłe energetyczne .....                       | 428        |
| 11.3.9. Występowanie węgla w Polsce .....              | 430        |
| 11.3.10. Zasoby i zużycie węgla .....                  | 432        |
| 11.4. Biomasa .....                                    | 433        |
| 11.4.1. Pochodzenie biomasy .....                      | 434        |
| 11.4.2. Zasoby biomasy .....                           | 435        |
| 11.4.3. Niektóre właściwości biomasy jako paliwa ..... | 438        |
| 11.4.4. Biopaliwa .....                                | 441        |
| Literatura .....                                       | 443        |
| <b>Dodatek I.</b>                                      |            |
| Stechiometria spalania .....                           | 445        |
| <b>Dodatek II.</b>                                     |            |
| Kaloryczność paliw .....                               | 450        |
| <b>Skorowidz .....</b>                                 | <b>455</b> |