



## Spis treści

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Wykaz ważniejszych oznaczeń</b> .....                                                  | 9  |
| <b>1. Wprowadzenie do dyfuzyjnego ruchu masy</b> .....                                    | 13 |
| <b>2. Współczynnik dyfuzji. Dyfuzja ustalona</b> .....                                    | 17 |
| 2.1. Średnia molowa i masowa prędkość płynu .....                                         | 17 |
| 2.2. Dyfuzja ustalona. Prawo Ficka .....                                                  | 19 |
| 2.3. Szczególne przypadki dyfuzji ustalonej .....                                         | 21 |
| 2.3.1. Dyfuzja równomolowa, przeciwkierunkowa .....                                       | 21 |
| 2.3.2. Dyfuzja przeciwkierunkowa, nierównomolowa .....                                    | 23 |
| 2.3.3. Dyfuzja składnika A przez składnik inertywny B .....                               | 24 |
| 2.4. Współczynniki dyfuzji .....                                                          | 26 |
| 2.4.1. Współczynniki dyfuzji w fazie gazowej .....                                        | 26 |
| 2.4.2. Współczynniki dyfuzji w fazie ciekłej .....                                        | 32 |
| 2.4.3. Współczynnik dyfuzji w ciałach porowatych .....                                    | 35 |
| <b>3. Różniczkowy bilans masy</b> .....                                                   | 39 |
| 3.1. Różniczkowy bilans masy dla układu dwuskładnikowego .....                            | 39 |
| 3.2. Rozwiązania różniczkowego bilansu masy .....                                         | 43 |
| 3.2.1. Nieustalona dyfuzja w fazie gazowej .....                                          | 43 |
| 3.2.2. Wnikanie masy podczas spływu cieczy po ścianie pionowej<br>ruchem laminarnym ..... | 47 |

|                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.3. Szybkość rozpuszczania ciała stałego podczas laminarnego spływu cieczy . . . .              | 50        |
| 3.2.4. Wnikanie masy od płyty płaskiej przy stabilizującym się rozkładzie prędkości . .            | 52        |
| 3.2.5. Dyfuzja nieustalona do wnętrza kuli (pęcherzyka). . . . .                                   | 54        |
| 3.2.6. Jednokierunkowa dyfuzja z chwilowego źródła masy . . . . .                                  | 55        |
| <b>4. Ruch masy przy turbulentnym przepływie płynów . . . . .</b>                                  | <b>59</b> |
| 4.1. Wprowadzenie . . . . .                                                                        | 59        |
| 4.2. Różniczkowy bilans masy w ruchu turbulentnym . . . . .                                        | 59        |
| 4.3. Modele procesu wnikania masy. Współczynnik wnikania masy . . . . .                            | 63        |
| 4.4. Kryteria podobieństwa w procesach wnikania masy . . . . .                                     | 70        |
| 4.5. Współczynnik przenikania masy . . . . .                                                       | 71        |
| <b>5. Procesy i operacje wymiany masy . . . . .</b>                                                | <b>77</b> |
| <b>6. Absorpcja fizyczna gazów . . . . .</b>                                                       | <b>85</b> |
| 6.1. Wprowadzenie . . . . .                                                                        | 85        |
| 6.2. Krótka charakterystyka podstawowych aparatów absorpcyjnych . . . . .                          | 87        |
| 6.3. Równowaga absorpcyjna. Rozpuszczalność gazu w cieczy jednoskładnikowej. . . . .               | 96        |
| 6.4. Bilanse masy aparatów . . . . .                                                               | 102       |
| 6.4.1. Bilanse masy absorberów przeciwprądowych . . . . .                                          | 102       |
| 6.4.2. Bilanse masy absorberów współprądowych . . . . .                                            | 107       |
| 6.4.3. Bilans masy dla różniczkowej objętości kolumny<br>z przeciwprądowym przepływem faz. . . . . | 109       |
| 6.4.4. Różniczkowy bilans masy dla współprądowej kolumny absorpcyjnej . . . . .                    | 118       |
| 6.4.5. Bilans masy dla aparatów barbotażowych . . . . .                                            | 120       |
| 6.4.6. Bilanse masy dla przypadku idealnego wymieszania obu faz. . . . .                           | 123       |
| 6.5. Kolumny półkowe. . . . .                                                                      | 124       |
| 6.5.1. Bilans masy dla całej kolumny . . . . .                                                     | 124       |
| 6.5.2. Półka teoretyczna. . . . .                                                                  | 127       |
| 6.5.3. Sprawność kolumny . . . . .                                                                 | 130       |
| 6.5.4. Sprawność półki Murphree'go. . . . .                                                        | 132       |
| 6.5.5. Sprawność lokalna półki . . . . .                                                           | 133       |
| 6.6. Bilanse masy w procesach absorpcji czystych gazów . . . . .                                   | 136       |
| 6.7. Efekty cieplne w absorpcji . . . . .                                                          | 137       |
| 6.8. Desorpcja (odpędzanie) gazów . . . . .                                                        | 138       |

|                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>7. Nawilżanie gazów, wykraplanie par</b>                                                                                | 141 |
| 7.1. Wprowadzenie                                                                                                          | 141 |
| 7.2. Parametry powietrza wilgotnego                                                                                        | 141 |
| 7.3. Proste operacje kontaktu powietrze-woda                                                                               | 146 |
| 7.4. Przypadek ogólny operacji woda-powietrze                                                                              | 153 |
| <b>8. Destylacja i rektyfikacja</b>                                                                                        | 161 |
| 8.1. Wprowadzenie                                                                                                          | 161 |
| 8.2. Równowaga destylacyjna                                                                                                | 163 |
| 8.2.1. Równowaga fazowa dla mieszanin o nieograniczonej rozpuszczalności                                                   | 163 |
| 8.2.2. Równowaga ciecz-para dla roztworów o ograniczonej rozpuszczalności i dla cieczy praktycznie nierozpuszczających się | 171 |
| 8.3. Destylacja                                                                                                            | 173 |
| 8.4. Rektyfikacja ciągła                                                                                                   | 178 |
| 8.4.1. Wprowadzenie                                                                                                        | 178 |
| 8.4.2. Bilans masy i ciepła jednostki rektyfikacyjnej                                                                      | 180 |
| 8.4.3. Bilanse molowe dla górnej i dolnej części kolumny rektyfikacyjnej                                                   | 181 |
| 8.4.4. Stan cieplny surówki                                                                                                | 184 |
| 8.4.5. Bilans materiałowy półki teoretycznej. Obliczenia kolumn półkowych                                                  | 186 |
| 8.5. Rektyfikacja w kolumnach wypełnionych                                                                                 | 192 |
| 8.6. Rektyfikacja okresowa                                                                                                 | 193 |
| 8.7. Podsumowanie                                                                                                          | 194 |
| 8.7.1. Rektyfikacja mieszanin wieloskładnikowych                                                                           | 195 |
| 8.7.2. Destylacja ekstrakcyjna                                                                                             | 196 |
| 8.7.3. Destylacja azeotropowa                                                                                              | 198 |
| <b>9. Adsorpcja</b>                                                                                                        | 201 |
| 9.1. Wprowadzenie                                                                                                          | 201 |
| 9.2. Równowaga adsorpcyjna                                                                                                 | 205 |
| 9.3. Kinetyka procesu adsorpcji                                                                                            | 213 |
| 9.4. Bilansowanie adsorberów                                                                                               | 217 |
| 9.4.1. Adsorber okresowy                                                                                                   | 217 |
| 9.4.2. Adsorber półprzepływowy (półokresowy)                                                                               | 220 |
| 9.4.3. Adsorber przepływowy z przeciwnieprzbiegłym przepływem faz                                                          | 223 |

|                                                                 |            |
|-----------------------------------------------------------------|------------|
| 9.5. Procesy desorpcji .....                                    | 225        |
| <b>10. Suszenie .....</b>                                       | <b>227</b> |
| 10.1. Wprowadzenie .....                                        | 227        |
| 10.2. Charakterystyka suszarek .....                            | 228        |
| 10.3. Równowaga suszarnicza .....                               | 231        |
| 10.4. Mechanizm i kinetyka procesu suszenia .....               | 235        |
| 10.5. Bilans masowy suszarek .....                              | 243        |
| <b>11. Procesy membranowe .....</b>                             | <b>249</b> |
| 11.1. Wstęp – podstawowe pojęcia .....                          | 249        |
| 11.2. Klasyfikacja procesów membranowych .....                  | 252        |
| 11.3. Charakterystyka ciśnieniowych procesów membranowych ..... | 258        |
| 11.3.1. Mikro- i ultrafiltracja .....                           | 259        |
| 11.3.2. Odwrócona osmoza (RO) .....                             | 263        |
| 11.3.3. Nanofiltracja (NF) .....                                | 266        |
| 11.4. Dyfuzyjne procesy membranowe .....                        | 266        |
| 11.4.1. Dializa .....                                           | 266        |
| 11.4.2. Perwaporacja .....                                      | 268        |
| 11.5. Inne procesy membranowe – destylacja membranowa .....     | 269        |
| <b>Zakończenie .....</b>                                        | <b>271</b> |
| <b>Literatura .....</b>                                         | <b>275</b> |