Spis treści

Przedmowa ... 11

CZĘŚĆ A – PODSTAWY TEORII ... 15

I. Wprowadzenie ... 15
I.1. Pojęcia podstawowe ... 15
I.2. Mechanizmy procesów przenoszenia pędu, energii i masy ... 21
I.3. Zasady bilansowania pędu, energii, masy i składnika ... 27
I.4. Ogólny i różniczkowy bilans masy – równanie ciągłości ... 28
I.4.1. Ogólny bilans masy ... 28
I.4.2. Różniczkowy bilans masy ... 29

II. Podstawy przenoszenia pędu ... 32
II.1. Przepływ laminarny i turbulentny płynów ... 32
II.2. Klasyfikacja płynów ze względu na właściwości reologiczne ... 34
II.3. Elementy biorelogii ... 38
II.3.1. Zasady ogólne ... 41
II.3.2. Reologia krwi ... 41
II.4. Ogólny i różniczkowy bilans pędu ... 44
II.4.1. Ogólny bilans pędu ... 44
II.4.2. Różniczkowy bilans pędu – równanie ruchu ... 45
II.5. Wyznaczanie rozkładów prędkości dla laminarnego przepływu płynów niutonowskich ... 47
II.5.1. Spływ cieczy po płaskiej płycie nachylonej do poziomu pod kątem α ... 47
II.5.2. Przepływ płynu w przewodzie rurowym nachylonym do poziomu pod kątem α ... 50
II.6. Wyznaczanie rozkładów prędkości dla laminarnego przepływu płynów nieniutonowskich ... 53
II.7. Hydrodynamiczna warstwa przyścienna ... 55
II.8. Wyznaczanie rozkładów prędkości dla burzliwego przepływu płynów niutonowskich ... 57

III. Przenoszenie energii ... 60
III.1. Wprowadzenie ... 60
III.2. Przenoszenie ciepła przez promieniowanie termiczne ... 61
III.3. Różniczkowy bilans energii ... 63
III.4. Ustalone przewodzenie ciepła ... 69
III.4.1. Przewodzenie przez ściankę płaską ... 69
III.4.2. Przewodzenie ciepła przez ściankę cylindryczną ... 75
III.4.3. Przewodzenie ciepła przez ściankę sferyczną ... 83

III.5. Nieustalone przewodzenie ciepła ... 86
III.6. Konwekcyjne przenoszenie ciepła ... 91
III.6.1. Wymuszona konwekcja w przepływie laminarnym ... 94
III.6.2. Inne przypadki konwekcyjnego przenoszenia ciepła ... 99
III.7. Wybrane problemy wymiany ciepła ... 101
III.7.1. Wymiana ciepła przez powierzchnie ożebrowane ... 101
III.7.2. Wymienniki ciepła ... 104

IV. Przenoszenie masy ... 111
IV.1. Wprowadzenie ... 111
IV.2. Różniczkowy bilans składnika w układzie przepływowym – równanie ciągłości składnika ... 116
IV.3. Dyfuzja ustalona ... 119
IV.3.1. Dyfuzja równomolowa przeciwkierunkowa ... 119
IV.3.2. Dyfuzja jednokierunkowa ... 120
IV.4. Dyfuzja nieustalona ... 123
IV.4.1. Dyfuzja nieustalona w nieruchomym płynie ... 123
IV.4.2. Dyfuzja nieustalona w płycie nieskończonej ... 127
IV.5. Konwekcyjne przenoszenie masy ... 130
IV.5.1. Wymuszona konwekcja w przepływie laminarnym ... 133
IV.5.2. Inne przypadki konwekcyjnego przenoszenia masy ... 138
IV.6. Przenikanie masy ... 140
IV.7. Jednoczesne przenoszenie ciepła i masy ... 145
IV.8. Wybrane problemy wymiany masy ... 146
IV.8.1. Wymiennik masy ... 146
IV.8.2. Wyznaczanie objętościowego współczynnika wnikania masy ($k_c a$) ... 151
IV.8.3. Wymiennik masy o działaniu okresowym ... 154

Skorowidz rzeczowy ... 158

Bibliografia ... 160

CZĘŚĆ B – PRZYKŁADY I ZADANIA ... 161

I. Bilansowanie ... 161

I.1. Przykłady ... 161

Przykład I.1.1. Destylacja trójskładnikowa ... 161
Przykład I.1.2. Zasilanie bioreaktora powietrzem ... 163
Przykład I.1.3. Przygotowanie powietrza w komorze parownika ... 164
Przykład I.1.4. Bilans układu złożonego ... 167
Przykład I.1.5. Stężenie glukozy w zbiorniku przepływowym ... 169
Przykład I.1.6. Bilans układu przepływowego z akumulacją ... 170
Przykład I.1.7. Bilans reaktora o działaniu okresowym z reakcją ... 173
Przykład I.1.8. Bilans bioreaktora przepływowego z reakcją następczą ... 175

I.2. Zadania ... 177

Zadanie I.2.1. Destylacja dwuskładnikowa ... 177
Zadanie I.2.2. Przepływ pęcherzy gazu przez ciecz w bioreaktorze ... 177

Zadanie I.2.3. Bilans układu złożonego ... 178
Zadanie I.2.4. Rozdzielanie zawiesiny biologicznej ... 178
Zadanie I.2.5. Rozdzielanie ścieków pofermentacyjnych w filtracji ciągłej ... 178
Zadanie I.2.6. Rozdzielanie rozpuszczalników organicznych ... 179
Zadanie I.2.7. Przepływ gazu przez ciecz o niskiej temperaturze wrzenia ... 179
Zadanie I.2.8. Mieszanie cieczy w zbiorniku ... 179
Zadanie I.2.9. Bilans zbiornika przepływowego ... 179

Spis symboli ... 180

Bibliografia ... 180

II. Reologia i wymiana pędu ... 181

II.1. Przykłady ... 181

Przykład II.1.1. Reologia brzeczki pofermentacyjnej ... 181
Przykład II.1.2. Wpływ stężenia zawiesiny drożdży na wartości parametrów krzywej płynięcia ... 184
Przykład II.1.3. Pomiar lepkości brzeczki ... 188
Przykład II.1.4. Opis krzywej płynięcia cieczy modelem Herschela-Bulkleya ... 190
Przykład II.1.5. Wyznaczenie wartości parametrów reologicznych płynu Cassona ... 192
Przykład II.1.6. Krzywa płynięcia krwi ... 194
Przykład II.1.7. Charakter przepływu zawiesiny ... 196
Przykład II.1.8. Charakter przepływu krwi w naczyniach krwionośnych ... 197
Przykład II.1.9. Pomiar lepkości wody w przepływie ciągnionym ... 201
Przykład II.1.10. Natlenowanie krwi w oksygenatorze ... 204
Przykład II.1.11. Przepływ płynu fizjologicznego przez dializator ... 208
Przykład II.1.12. Spływ zawiesiny drożdży nachylonym przewodem o przekroju kołowym ... 213
Przykład II.1.13. Przepływ krwi w naczyniu krwionośnym ... 218
Przykład II.1.14. Spływ cieczy newtonowskiej po zewnętrznej powierzchni pionowej rury ... 222
Przykład II.1.15. Przepływ krwi w tętnicy z nieruchomym i ruchomym cewnikiem ... 226
Przykład II.1.16. Obrót pręta w zbiorniku wypełnionym roztworem białek ... 231
Przykład II.1.17. Badanie roztworu erytrocytów w wiskozymetrze rotacyjnym ... 235
Przykład II.1.18. Pomiar lepkości pozornej płynu potęgowego w przepływie ciągnionym ... 239
Przykład II.1.19. Pomiar lepkości plastycznej krwi opisanej modelem płynu Cassona ... 243
Przykład II.1.20. Spływ roztworu skrobi po nachylonej powierzchni ... 245
Przykład II.1.21. Spływ płynu Binghama po nachylonej powierzchni ... 249
Przykład II.1.22. Wypływ cieczy binghamowskiej z pionowej rury ... 252
Przykład II.1.23. Mieszanie oleju w zbiorniku z obracającym się prętem ... 258
Przykład II.1.24. Określenie czasu mieszania brzeczki w reaktorze ... 260
Przykład II.1.25. Powiększanie skali zbiornika z mieszadłem ... 261

II.2. Zadania ... 264

Zadanie II.2.1. Krzywe płynięcia płynów fizjologicznych ... 264
Zadanie II.2.2. Lepkość pozorna płynów biologicznych ... 264
Zadanie II.2.3. Model reologiczny krwi ... 265

Zadanie II.2.4. Przepływ roztworu polimeru ... 266
Zadanie II.2.5. Reżim przepływu cieczy biologicznej ... 266
Zadanie II.2.6. Przepływ gazu przez kanał wentylacyjny ... 266
Zadanie II.2.7. Wpływ punktu zaczepienia prostokątnego układu współrzędnych na postać wyrażenia określającego profil prędkości ... 266
Zadanie II.2.8. Przepływ cieczy newtonowskiej w szczelinie między dwiema równoległymi płytkami, z których górna się porusza ... 267
Zadanie II.2.9. Spływ swobodny cieczy po nachylonej powierzchni ... 267
Zadanie II.2.10. Przepływ brzeczki w poziomej kapilarze ... 267
Zadanie II.2.11. Przepływ brzeczki w przewodzie o przekroju kołowym ... 267
Zadanie II.2.12. Dopływ pożywki do reaktora ... 268
Zadanie II.2.13. Spływ zawiesiny drożdży pionowym przewodem ... 268
Zadanie II.2.14. Spływ zawiesiny drobnoustrojów nachyloną do poziomu rurą ... 268
Zadanie II.2.15. Spływ cieczy newtonowskiej po wewnętrznej powierzchni pionowej rurki ... 268
Zadanie II.2.16. Przepływ cieczy newtonowskiej w pierścieniu, między dwiema poruszającymi się rurami ... 269
Zadanie II.2.17. Ruch obrotowy zawiesiny drożdży w szczelinie między pionowymi, współosiowymi cylindrami ... 269
Zadanie II.2.18. Przepływ ciągniony płynu Herschela-Bulkleya ... 269
Zadanie II.2.19. Granica płynięcia krwi opisanej modelem reologicznym Cassona ... 270
Zadanie II.2.20. Spływ roztworu polimeru po płaskiej, nachylonej do poziomu powierzchni ... 270
Zadanie II.2.21. Wypływ cieczy binghamowskiej ... 270
Zadanie II.2.22. Przepływ cieczy przez przewód o przekroju kołowym ... 270

Spis symboli ... 271

Bibliografia ... 273

III. Wymiana ciepła ... 275

III.1. Przykłady ... 275

Przykład III.1.1. Przenikanie ciepła przez płaską przegrodę ... 275
Przykład III.1.2. Przewodzenie ciepła przez warstwy skóry ... 278
Przykład III.1.3. Straty ciepła przez okna ... 281
Przykład III.1.4. Straty cieplne rury osłoniętej i nieosłoniętej izolacją ... 283
Przykład III.1.5. Ochładzanie krwi w wymienniku rurowo-płaszczowym ... 287
Przykład III.1.6. Rozkład temperatury w medium o przewodności zależnej od temperatury ... 289
Przykład III.1.7. Rozkład temperatury w płynie przepływającym przez szczelinę ... 292
Przykład III.1.8. Rozkład prędkości cieczy w szczelinie między płytami o różnych temperaturach ... 294
Przykład III.1.9. Wyznaczenie współczynnika wnikania ciepła w roztworze białka ... 299
Przykład III.1.10. Wnikanie ciepła w zbiorniku z mieszadłem ... 302
Przykład III.1.11. Straty ciepła na plaży w czasie wiatru ... 304
Przykład III.1.12. Straty ciepła na plaży w bezwietrzny dzień ... 307
Przykład III.1.13. Zasada działania termoanemometru ... 309
Przykład III.1.14. Ochładzanie się krwi ... 311

Przykład III.1.15. Chłodzenie pożywki w wymienniku rura w rurze ... 312
Przykład III.1.16. Bilans ciepła w reaktorze zbiornikowym ... 314
Przykład III.1.17. Podgrzewanie płynu w rurze ... 316
Przykład III.1.18. Wymiana ciepła w fermentorze zbiornikowym ... 318
Przykład III.1.19. Wpływ stężenia komórek na wymianę ciepła w fermentorze ... 321
Przykład III.1.20. Chłodzenie roztworu cieczy biologicznej w wymienniku ciepła ... 324
Przykład III.1.21. Wymiana ciepła w wymienniku typu rura w rurze ... 327
Przykład III.1.22. Wątroba jako wewnętrzne źródło ciepła ... 335
Przykład III.1.23. Nieustalone chłodzenie diamentu ... 337
Przykład III.1.24. Pochłanianie energii emitowanej przez promieniowanie słoneczne ... 339

III.2. Zadania ... 341

Zadanie III.2.1. Izolacyjne właściwości ubrania ... 341
Zadanie III.2.2. Ustalone przenikanie ciepła przez skórę ... 341
Zadanie III.2.3. Straty ciepła przez ścianę pieca ... 341
Zadanie III.2.4. Przenikanie ciepła przez metalową przegrodę ... 342
Zadanie III.2.5. Opory przenikania przez rurę pokrytą osadem ... 342
Zadanie III.2.6. Straty ciepła z kubka z kawą ... 342
Zadanie III.2.7. Straty ciepła z rurociągu ... 343
Zadanie III.2.8. Izolacja fermentora ... 343
Zadanie III.2.9. Transport ciepła od płynu do wymiennika ... 343
Zadanie III.2.10. Przepływ powietrza przez kanał wentylacyjny ... 343
Zadanie III.2.11. Konwekcyjne chłodzenie ciała wiatrem ... 344
Zadanie III.2.12. Zmiana długości obiegu chłodzącego ... 344
Zadanie III.2.13. Wpływ foulingu na wymianę ciepła w wężownicy chłodzącej ... 344
Zadanie III.2.14. Ogrzewacz krwi ... 345
Zadanie III.2.15. Efekt foulingu w wężownicy chłodzącej ... 345
Zadanie III.2.16. Wymiana ciepła w fermentorze zbiornikowym ... 345
Zadanie III.2.17. Dogrzewanie pożywki w wymienniku typu rura w rurze ... 346

Spis symboli ... 347

Bibliografia ... 351

IV. Wymiana masy ... 353

IV.1. Przykłady ... 353

Przykład IV.1.1. Pomiar współczynnika dyfuzji w rurce Winkelmanna ... 353
Przykład IV.1.2. Odparowanie warstewki wody ... 360
Przykład IV.1.3. Dyfuzja gazów powstających w wyniku reakcji heterogenicznej ... 363
Przykład IV.1.4. Zapotrzebowanie niedźwiedzia na tlen w czasie snu zimowego ... 366
Przykład IV.1.5. Dyfuzja substancji czynnej przez cylindryczną ściankę naczynia krwionośnego ... 372
Przykład IV.1.6. Dyfuzja przez cylindryczną warstwę gazu ... 375
Przykład IV.1.7. Dyfuzja z naftalenowej kulki ... 379
Przykład IV.1.8. Model warstewkowy ... 384
Przykład IV.1.9. Lokalna gęstość strumienia leku ... 387
Przykład IV.1.10. Wnikanie tlenku węgla(IV) w konwekcji wymuszonej ... 389
Przykład IV.1.11. Konwekcyjne rozpuszczanie leku w płynie fizjologicznym ... 396

Przykład IV.1.12. Absorpcja tlenku węgla(IV) w kolumnie z wypełnieniem ... 401
Przykład IV.1.13. Wyznaczenie współczynnika wnikania tlenu w fermentorze metodą równowagową ... 405
Przykład IV.1.14. Odparowanie substancji lotnej z cieczy ... 407
Przykład IV.1.15. Konwekcja swobodna masy z sublimującej kulki ... 409
Przykład IV.1.16. Rozpuszczanie substancji w zbiorniku z mieszadłem ... 414
Przykład IV.1.17. Przenikanie masy w kolumnie absorpcyjnej ... 417
Przykład IV.1.18. Przenikanie składnika w procesie desorpcji ... 423
Przykład IV.1.19. Przenikanie masy w procesie ekstrakcji ... 426
Przykład IV.1.20. Wzbogacanie krwi w substancję leczniczą ... 428
Przykład IV.1.21. Sublimacja naftalenu do przepływającego powietrza ... 433
Przykład IV.1.22. Wyznaczenie rzędu reakcji nieodwracalnej metodą całkową ... 439
Przykład IV.1.23. Kinetyka reakcji enzymatycznej bez inhibitora i z inhibitorem ... 443
Przykład IV.1.24. Zmiany stężenia reagentów w czasie reakcji ... 448
Przykład IV.1.25. Zależność stałej szybkości reakcji od temperatury ... 450

IV.2. Zadania ... 453

Zadanie IV.2.1. Czas pomiaru podczas dyfuzji w rurce Wilkelmanna ... 453
Zadanie IV.2.2. Dyfuzja toluenu z płaskiej powierzchni ... 453
Zadanie IV.2.3. Odparowanie wody z tafli jeziora ... 454
Zadanie IV.2.4. Dyfuzja gazów powstających w wyniku reakcji heterogenicznej ... 454
Zadanie IV.2.5. Dyfuzja leku przez płaską błonę biologiczną ... 454
Zadanie IV.2.6. Dyfuzja pary wodnej z powierzchni o zwiększającym się przekroju ... 454
Zadanie IV.2.7. Dyfuzja gazu przez cylindryczną ściankę szkła pyreksowego ... 455
Zadanie IV.2.8. Dyfuzja leku z polimerowej kapsułki ... 455
Zadanie IV.2.9. Desorpcja gazu w kolumnie ze zwilżanymi ściankami ... 455
Zadanie IV.2.10. Wnikanie amoniaku w kolumnie ze zwilżanymi ściankami ... 456
Zadanie IV.2.11. Opadanie kropli wody w suchym powietrzu ... 456
Zadanie IV.2.12. Konwekcja w cieczy przy opływie sfery ... 456
Zadanie IV.2.13. Szybkość absorpcji amoniaku ... 457
Zadanie IV.2.14. Przenikanie amoniaku w kolumnie absorpcyjnej ... 457
Zadanie IV.2.15. Absorpcja chloru w wodzie ... 458
Zadanie IV.2.16. Przenikanie składnika w procesie desorpcji ... 458
Zadanie IV.2.17. Długość wymiennika masy ... 458
Zadanie IV.2.18. Wyznaczenie stopnia nasycenia na wylocie z wymiennika masy ... 459
Zadanie IV.2.19. Wyznaczenie rzędu reakcji nieodwracalnej ... 459
Zadanie IV.2.20. Rozpad substancji aktywnej ... 459
Zadanie IV.2.21. Wpływ temperatury na stałą szybkości reakcji ... 460
Zadanie IV.2.22. Stężenie substratów i produktów w reakcji syntezy ... 460
Zadanie IV.2.23. Okres połowicznej przemiany dla reakcji utleniania etanolu ... 460

Spis symboli ... 460

Bibliografia ... 470

V. Załącznik ... 471