

Spis treści

Przedmowa	13
Wykaz ważniejszych oznaczeń	16
1. Projektowanie i realizacja procesu technologicznego	21
1.1. Wprowadzenie	21
1.2. Koncepcja chemiczna metody	23
1.2.1. Przeprowadzenie reakcji chemicznej w elektrolizerze	26
1.2.2. Prowadzenie procesów chemicznych przy podwyższonym ciśnieniu	26
1.2.3. Prowadzenie procesów chemicznych przy obniżonym ciśnieniu	28
1.2.4. Przeprowadzenie procesu w wyniku wielu samorzutnych reakcji pośrednich	29
1.2.5. Stosowanie układu reakcji sprzężonych	29
1.2.6. Metoda Solvaya	31
1.2.7. Procesy złożone	32
1.3. Koncepcja technologiczna metody	35
1.3.1. Dobór rodzaju, kolejności i sposobu realizacji czynności jednostkowych	36
1.3.2. Opracowanie schematu blokowego i technologicznego procesu	42
1.3.3. Badania modelowe	49
1.3.4. Dobór typów i wielkości aparatów i urządzeń	51
1.3.5. Dobór tworzywa konstrukcyjnego	53
1.4. Zasady technologiczne	55
1.4.1. Zasada najlepszego wykorzystania różnic potencjałów	55
1.4.2. Zasada najlepszego wykorzystania surowców	56
1.4.3. Zasada najlepszego wykorzystania energii	60
1.4.4. Zasada najlepszego wykorzystania aparatury	63
1.4.5. Zasada umiaru technologicznego	66
1.5. Ocena zgodności koncepcji z Najlepszymi Dostępnymi Technikami (BAT)	67
1.6. Koncepcja wstępna instalacji produkcyjnej	70
1.7. Projekt procesowy	70
1.8. Koncepcja programowo-przestrzenna	71

1.9.	Projekt podstawowy (<i>Basic Engineering</i>)	71
1.10.	Projekt budowlany	72
1.11.	Projekt wykonawczy (<i>Detail Engineering</i>)	72
1.12.	Budowa inwestycji	72
1.13.	Rozruch	73
2.	Stechiometria procesowa	74
2.1.	Proces chemiczny, reakcja chemiczna	74
2.2.	Mieszanina reakcyjna i jej skład	75
2.3.	Równanie stechiometryczne	76
2.4.	Reakcje niezależne	77
2.5.	Parametry postępu reakcji	80
2.6.	Bilanse stechiometryczne	81
2.6.1.	Procesy proste homogeniczne	81
2.6.2.	Procesy złożone	85
2.6.3.	Procesy heterogeniczne	87
2.7.	Wydajność i selektywność procesu	88
2.8.	Zdolność produkcyjna reaktora	90
2.9.	Przykłady	91
3.	Bilans materiałowy procesu chemicznego	97
3.1.	Wprowadzenie	97
3.2.	Równania bilansu masowego	98
3.3.	Zasady bilansowania procesów fizycznych i chemicznych	103
3.4.	Przykłady	110
4.	Bilans cieplny procesu chemicznego	121
4.1.	Zależności podstawowe	121
4.2.	Bilans cieplny procesu spalania	127
4.3.	Przykłady	130
5.	Analiza termodynamiczna procesu chemicznego	137
5.1.	Wprowadzenie	137
5.2.	Równania stanu gazów	138
5.2.1.	Równanie stanu gazu doskonałego	138
5.2.2.	Równania stanu gazów rzeczywistych	138
5.2.3.	Mieszanina gazów rzeczywistych	144
5.3.	Dane termodynamiczne	145
5.3.1.	Wartości standardowych funkcji termodynamicznych	145
5.3.2.	Ciepło molowe	147
5.3.3.	Ciepło przemian fazowych	148
5.4.	Funkcje termodynamiczne substancji	149
5.5.	Funkcje termodynamiczne reakcji chemicznych	152
5.5.1.	Entalpia reakcji chemicznej	153
5.5.2.	Entropia reakcji chemicznej	154
5.5.3.	Entalpia swobodna reakcji chemicznej	155

5.5.4.	Ciepło reakcji	155
5.6.	Ciepło rozpuszczania	157
5.6.1.	Bilansowanie cieplne procesów mieszania przebiegających bez reakcji chemicznych	159
5.6.2.	Bilansowanie cieplne procesów mieszania z reakcjami chemicznymi przebiegającymi w roztworze	159
5.6.3.	Przypadki szczególne	159
5.7.	Termodynamiczna charakterystyka roztworów	162
5.7.1.	Wprowadzenie	162
5.7.2.	Wielkości cząstkowe molowe	163
5.7.3.	Potencjał chemiczny, aktywność	164
5.7.4.	Współczynnik aktywności ciśnieniowej	166
5.7.5.	Reguła Lewisa-Randalla (L-R)	168
5.7.6.	Funkcje mieszania i funkcje nadmiarowe	169
5.7.7.	Równania Margulesa, van Laara, Redlicha-Kistera	171
5.7.8.	Równania Wilsona	172
5.7.9.	Równania Scatcharda-Hildebranda (S-H)	173
5.7.10.	Aproksymacja funkcji $Q(x_1, x_2)$, $\gamma(x_1, x_2)$	175
5.8.	Powinowactwo chemiczne	175
5.9.	Równowaga chemiczna	177
5.9.1.	Stałe równowagi chemicznej	177
5.9.2.	Wpływ temperatury i ciśnienia na stan równowagi chemicznej	180
5.9.3.	Wpływ stężenia reagentów na kierunek reakcji chemicznej	181
5.9.4.	Obliczanie stałych równowagi	182
5.10.	Skład równowagowy mieszaniny reakcyjnej	183
5.10.1.	Metody niestechiometryczne	184
5.10.2.	Metody stechiometryczne	185
5.11.	Wydaźność termodynamiczna, wykresy równowagi	191
5.11.1.	Równowaga procesów nieizotermicznych	193
5.12.	Stan równowagi z narzuconymi warunkami	194
5.13.	Przykłady	195

6. Analiza termodynamiczna przemian fazowych 220

6.1.	Ogólne właściwości równowagi fazowej	220
6.1.1.	Reguła faz	222
6.1.2.	Prawo równowagi fazowej	223
6.2.	Równowaga parowania	225
6.3.	Równowaga ciecz–para (destylacyjna)	227
6.3.1.	Obliczanie punktu wrzenia	230
6.3.2.	Obliczanie punktu rosy	233
6.3.3.	Rozkład fazowy w procesie destylacji rzutowej	236
6.3.4.	Przypadki szczególne	239
6.4.	Równowaga absorpcyjna	242
6.5.	Równowaga rozpuszczania cieczy	249
6.5.1.	Układy dwuskładnikowe	252
6.5.2.	Układy trójskładnikowe	253
6.5.3.	Proces ekstrakcji	254
6.6.	Równowaga rozpuszczania ciał stałych	256
6.6.1.	Wykresy fazowe	260
6.7.	Równowaga fazowa z reakcją chemiczną	262
6.8.	Przykłady	268

7.	Analiza kinetyczna procesu chemicznego	287
7.1.	Wprowadzenie	287
7.2.	Szybkość reakcji chemicznej	288
7.2.1.	Pojęcie szybkości reakcji	288
7.2.2.	Proces okresowy	289
7.2.3.	Proces przepływowy	290
7.2.4.	Zastępczy czas przebywania i objętościowa szybkość przepływu	293
7.2.5.	Doświadczalne wyznaczanie szybkości procesu	293
7.3.	Równanie kinetyczne	299
7.3.1.	Wprowadzenie	299
7.3.2.	Zależność szybkości reakcji od temperatury	299
7.3.3.	Zależność szybkości reakcji od stężenia	303
7.3.4.	Różne formy równania kinetycznego	307
7.3.5.	Interpretacja danych kinetycznych	309
7.3.6.	Reakcje rozkładu	314
7.3.7.	Analiza funkcji $r_A = f(T, \alpha_A)$	316
7.4.	Reakcje złożone	319
7.4.1.	Wprowadzenie	319
7.4.2.	Reakcje następne	320
7.4.3.	Reakcje równoległe	324
7.4.4.	Reakcje łańcuchowe	325
7.4.5.	Reakcje katalityczne homogeniczne	328
7.4.6.	Reakcje autokatalityczne	329
7.5.	Reakcje heterogeniczne	331
7.5.1.	Wprowadzenie	331
7.5.2.	Transport masy	332
7.5.3.	Obszar procesu heterogenicznego	336
7.5.4.	Absorpcja	342
7.5.5.	Reakcje typu gaz–ciało stałe	344
7.6.	Przykłady	351
8.	Analiza kinetyczna procesów kontaktowych	370
8.1.	Wiadomości ogólne	370
8.1.1.	Wprowadzenie	370
8.1.2.	Właściwości fizyczne katalizatorów stałych	371
8.1.3.	Pojęcie szybkości ogólnej procesu i etapu kontrolującego	373
8.2.	Kinetyka procesu powierzchniowego	374
8.2.1.	Wprowadzenie	374
8.2.2.	Statyka i kinetyka sorpcji	375
8.2.3.	Równanie kinetyczne procesu powierzchniowego	378
8.3.	Dyfuzja zewnętrzna	385
8.3.1.	Wprowadzenie	385
8.3.2.	Ujęcie ilościowe	388
8.3.3.	Różnica temperatury między rdzeniem fazy gazowej a zewnętrzną powierzchnią ziarna	389
8.4.	Dyfuzja wewnętrzna	390
8.4.1.	Wprowadzenie	390
8.4.2.	Dyfuzja w kontaktach porowatych	391
8.4.3.	Moduł Thielego	393
8.4.4.	Współczynnik efektywności kontaktu dla procesu izotermicznego	396

8.4.5. Zmiana energii aktywacji i rzędu reakcji w obszarze dyfuzji wewnętrznej	399
8.4.6. Proces nieizotermiczny w porowatym ziarnie katalizatora	400
8.5. Równanie kinetyczne procesów kontaktowych	403
8.6. Dezaktywacja katalizatorów	406
8.6.1. Chemizm dezaktywacji	406
8.6.2. Kinetyka dezaktywacji	407
8.6.3. Aktywność katalizatora jako funkcja czasu trwania reakcji	409
8.6.4. Aktywność katalizatora jako funkcja stężeń reagentów oraz koksu	409
8.7. Przykłady	412

9. Podstawowe zależności inżynierii reaktorów chemicznych 416

9.1. Klasyfikacja reaktorów chemicznych	416
9.2. Podstawowe charakterystyki reaktorów chemicznych	418
9.2.1. Reaktory okresowe	418
9.2.2. Reaktory przepływowe	418
9.2.3. Reaktory półprzepływowe	420
9.2.4. Reaktory kontaktowe	420
9.2.5. Reaktory barbotażowe, zawieszinowe, trójfazowe	421
9.2.6. Reaktory fluidyzacyjne	421
9.3. Pojęcie reaktora idealnego	422
9.3.1. Idealny reaktor okresowy	423
9.3.2. Idealny reaktor zbiornikowy	423
9.3.3. Idealny reaktor rurowy lub wieżowy	423
9.4. Podstawowe równania inżynierii reaktorowej	424
9.4.1. Bilans masowy (BM)	425
9.4.2. Bilans cieplny (BC)	425
9.4.3. Równanie projektowe	426
9.5. Podstawy obliczeń projektowych	427

10. Projektowanie reaktorów chemicznych 429

10.1. Reaktor okresowy	429
10.1.1. Wprowadzenie	429
10.1.2. Równanie projektowe	429
10.1.3. Równanie bilansu cieplnego	432
10.1.4. Proces izotermiczny	434
10.1.5. Proces adiabatyyczny	436
10.1.6. Proces politropowy	437
10.1.7. Proces złożony	440
10.1.8. Przykłady	441
10.2. Reaktory przepływowe – rurowy i wieżowy	447
10.2.1. Wprowadzenie	447
10.2.2. Równanie projektowe	447
10.2.3. Równanie bilansu cieplnego	449
10.2.4. Proces izotermiczny	451
10.2.5. Proces politropowy	451
10.2.6. Proces złożony	455
10.2.7. Zmiany ciśnienia w reaktorach przepływowych	455
10.2.8. Absorbery	456
10.2.9. Przykłady	458

10.3.	Reaktor przepływowy zbiornikowy	466
10.3.1.	Wprowadzenie	466
10.3.2.	Projektowanie reaktora pojedynczego	467
10.3.3.	Kaskada reaktorów zbiornikowych	470
10.3.4.	Reaktor z recyrkulacją	477
10.3.5.	Przykłady	479
10.4.	Reaktor półprzepływowy	487
10.4.1.	Wprowadzenie	487
10.4.2.	Równanie projektowe	489
10.4.3.	Równanie bilansu cieplnego	493
10.4.4.	Obliczenia projektowe	495
10.4.5.	Przykłady	496
10.5.	Reaktor kontaktowy	499
10.5.1.	Wprowadzenie	499
10.5.2.	Model pseudohomogeniczny jednowymiarowy	503
10.5.3.	Model dwuwymiarowy	507
10.5.4.	Przykłady	511
11.	Rozkład rzeczywistego czasu przebywania w reaktorach	521
11.1.	Wprowadzenie	521
11.2.	Funkcje rozkładu	522
11.3.	Funkcje rozkładu w reaktorach idealnych	528
11.3.1.	Reaktor rurowy	528
11.3.2.	Reaktor zbiornikowy	529
11.3.3.	Kaskada reaktorów	530
11.3.4.	Reaktor z przepływem uwarstwionym	532
11.4.	Funkcje rozkładu w reaktorach rzeczywistych	534
11.4.1.	Przepływ dyspersyjny	534
11.4.2.	Przepływ segregacyjny	540
11.5.	Metody obliczeń reaktorów rzeczywistych	542
11.5.1.	Metoda kaskady zastępczej	542
11.5.2.	Metoda analityczna	545
11.5.3.	Metoda przepływu segregacyjnego	546
11.6.	Przykłady	547
12.	Stabilność i autotermiczność procesu przepływowego	557
12.1.	Wprowadzenie	557
12.2.	Wielokrotne stany stacjonarne w reaktorach przepływowych	558
12.2.1.	Reaktor zbiornikowy	558
12.2.2.	Reaktor rurowy	563
12.3.	Autotermiczność procesu przepływowego	564
12.4.	Przykłady	570
13.	Zagadnienie wyboru reaktora i warunków prowadzenia procesu chemicznego	573
13.1.	Kryteria doboru reaktora	573
13.1.1.	Kryteria technologiczne	573

13.1.2. Kryteria kinetyczne	574
13.2. Reakcje pojedyncze	575
13.2.1. Wprowadzenie	575
13.2.2. Końcowy stopień przemiany i natężenie przepływu substratów	575
13.2.3. Typ reaktora	576
13.2.4. Reakcje autokatalityczne	579
13.2.5. Parametry reakcji	579
13.2.6. Wyprowadzenie ze środowiska reakcji jednego z produktów w postaci odrębnej fazy	583
13.3. Reakcje złożone	583
13.3.1. Wprowadzenie	583
13.3.2. Reakcje równoległe z jednym substratem	584
13.3.3. Reakcje równoległe z dwoma substratami	585
13.3.4. Reakcje następcze	586
13.3.5. Reakcje szeregowo-równoległe	588
13.4. Czułość parametryczna procesu	588
13.5. Przykłady	590
 14. Tablice i wykresy	 594
 Bibliografia cytowana	 625
 Skorowidz rzeczowy	 628