

**Tomasz Andrzejewski, Jacek Gębicki, Iwona Hołowacz,
Donata Konopacka-Łyskawa, Patrycja Makoś-Chełstowska,
Piotr Rybarczyk, Bartosz Szulczyński**

INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA – WYBRANE ZAGADNIENIA

pod redakcją Donaty Konopackiej-Łyskawy

Gdańsk 2022

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Dariusz Mikielewicz

RECENZENT
Paweł Gierycz

REDAKCJA JĘZYKOWA
Agnieszka Frankiewicz

SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI
Wioleta Lipska-Kamińska

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy.

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2022

ISBN 978-83-7348-862-5

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 11,9, ark. druku 14,75, 1267/1179

Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

Spis treści

Przedmowa	7
1. Wstęp – obliczenia podstawowe	9
1.1. Jednostki ciśnienia	9
1.2. Nadciśnienie i podciśnienie	10
1.3. Gęstość płynów	10
1.4. Lepkość płynów	11
2. Przepływy płynów	15
2.1. Strumień objętości i strumień masy	16
2.2. Ciągłość strumienia	16
2.3. Równanie Bernoulliego	17
2.4. Wypływ cieczy ze zbiorników	17
2.5. Liczba Reynoldsa	19
2.6. Opory przepływu w przewodach	20
2.7. Opory lokalne	20
2.8. Opory przepływu płynu przez warstwę wypełnienia	22
2.9. Moc silnika pompy odśrodkowej	24
2.10. Pomiary przepływu płynów – metody i urządzenia	24
2.11. Pytania kontrolne i problemy	35
3. Mieszanie	38
3.1. Moc mieszania	39
3.2. Moc mieszania układu dwufazowego gaz–ciecz	41
3.3. Kryteria służące ocenie efektu procesu mieszania	42
3.4. Modelowanie mocy mieszania	44
3.5. Pomiar mocy mieszania	45
3.6. Pomiar czasu mieszania	46
3.7. Pytania kontrolne i problemy	47
4. Opadanie cząstek stałych w płynach	49
4.1. Podstawowe zależności teoretyczne	49
4.2. Klasyfikacja hydrauliczna	54
4.3. Odpylanie gazów	55
4.4. Pytania kontrolne i problemy	58

5.	Fluidyzacja	59
5.1.	Wprowadzenie	59
5.2.	Rodzaje warstw fluidalnych	60
5.3.	Przebieg procesu fluidyzacji	61
5.4.	Prędkość początku fluidyzacji	62
5.5.	Przykłady zastosowań złóż fluidalnych	64
5.6.	Pytania kontrolne i problemy	65
6.	Filtracja	66
6.1.	Wprowadzenie	66
6.2.	Filtracja pod stałym ciśnieniem	67
6.3.	Filtracja przy stałym objętościowym natężeniu przepływu filtratu	70
6.4.	Filtracja dwustopniowa	71
6.5.	Wydajność cyklu filtracji	72
6.6.	Pytania kontrolne i problemy	73
7.	Wymiana ciepła	75
7.1.	Wprowadzenie	76
7.2.	Przewodzenie ciepła	77
7.3.	Wnikanie ciepła	79
7.4.	Przenikanie ciepła	84
7.5.	Wymienniki ciepła	85
7.6.	Promieniowanie	88
7.7.	Pytania kontrolne i problemy	90
8.	Destylacja i kondensacja	93
8.1.	Równowaga ciecż–para w mieszaninach dwuskładnikowych	94
8.2.	Destylacja różniczkowa (prosta, frakcyjna)	97
8.3.	Destylacja równowagowa (rzutowa)	100
8.4.	Kondensacja równowagowa (współprądowa)	101
8.5.	Kondensacja różniczkowa (przeciwprądowa)	102
8.6.	Pytania kontrolne i problemy	103
9.	Rektyfikacja	106
9.1.	Kolumna rektyfikacyjna	107
9.2.	Bilans materiałowy kolumny o działaniu ciągłym	108
9.3.	Bilans materiałowy półki zasilanej, stan cieplny surówki	109
9.4.	Powrót	110
9.5.	Skraplacz (deflegmator)	111
9.6.	Bilans cieplny	112
9.7.	Wyznaczanie liczby półek teoretycznych metodą Mc Cabe’a–Thielego ...	112
9.8.	Wykres entalpowy	114
9.9.	Wyznaczanie liczby półek teoretycznych metodą Savarita–Ponchona ...	115
9.10.	Sprawność półek rzeczywistych	123

9.11. Wysokość kolumn wypełnionych	125
9.12. Rektyfikacja okresowa	128
9.13. Pytania kontrolne i problemy	133
10. Absorpcja	135
10.1. Wprowadzenie	136
10.2. Podstawowe zależności teoretyczne	137
10.3. Modele wnikania masy, przenikanie masy	139
10.4. Przeliczanie stężeń w fazach gazowej i ciekłej na stężenia względne ...	143
10.5. Bilans materiałowy absorbera przeciwpłądowego	143
10.6. Bilans materiałowy absorbera współpłądowego	145
10.7. Absorpcja z recyrkulacją	146
10.8. Baterie absorpcyjne	148
10.9. Półka teoretyczna, wyznaczanie liczby półek teoretycznych	149
10.10. Wysokość warstwy wypełnienia	150
10.11. Pytania kontrolne i problemy	153
11. Ekstrakcja	155
11.1. Równowaga ekstrakcyjna	156
11.2. Ekstrakcja jednostopniowa	159
11.3. Ekstrakcja wielostopniowa współpłądowa	163
11.4. Ekstrakcja przeciwpłądowa	167
11.5. Stopień wyekstrahowania	171
11.6. Pytania kontrolne i problemy	172
12. Suszenie	175
12.1. Parametry materiału wilgotnego i powietrza wilgotnego	176
12.2. Równowagi suszarnicze	179
12.3. Bilans suszarki	181
12.4. Kinetyka suszenia, czas suszenia	183
12.5. Pytania kontrolne i problemy	186
13. Adsorpcja	188
13.1. Adsorbenty	189
13.2. Równowaga adsorpcyjna	191
13.3. Szybkość adsorpcji	196
13.4. Dynamika adsorpcji w adsorberze z nieruchomym złożem adsorbentu ..	197
13.5. Sposoby realizacji procesu adsorpcji	202
13.6. Pytania kontrolne i problemy	205
14. Procesy membranowe	207
14.1. Klasyfikacja procesów membranowych	208
14.2. Membrana, moduł membranowy, instalacja membranowa	211
14.3. Transport masy w membranach, opory transportu	216
14.4. Polaryzacja stężeniowa	218
14.5. Odwrócona osmoza (RO)	219

14.6. Mikrofiltracja (MF), ultrafiltracja (UF) oraz nanofiltracja (NF)	222
14.7. Permeacja gazów (GP)	224
14.8. Perwaporacja (PV)	226
14.9. Destylacja membranowa (MD)	228
14.10. Pytania kontrolne i problemy	232

Przedmowa

Skrypt *Inżynieria chemiczna i procesowa – wybrane zagadnienia* został przygotowany dla studentów Wydziału Chemicznego Politechniki Gdańskiej, realizujących kursy *inżynierii chemicznej, inżynierii chemicznej i bioprosesowej, inżynierii procesowej oraz technik rozdzielania*. W ramach tych kursów studenci poznają podstawowe operacje jednostkowe wykorzystywane w przemyśle chemicznym, biotechnologicznym, ochronie środowiska oraz w przemyśle rafineryjnym, farmaceutycznym, spożywczym, materiałów budowlanych i wielu innych – pokrewnych. Niniejsza książka zawiera podstawy teoretyczne wybranych operacji jednostkowych i jest uaktualnioną i rozszerzoną wersją skryptu *Podstawy inżynierii chemicznej i procesowej* z 2012 roku, przygotowanego przez pracowników Katedry Inżynierii Chemicznej i Procesowej Wydziału Chemicznego Politechniki Gdańskiej.

Zagadnienia poruszane w tym skrypcie obejmują wybrane procesy mechaniczne: przepływy płynów, mieszanie, opadanie cząstek w płynach, fluidyzację i filtrację, procesy przenoszenia ciepła oraz procesy przenoszenia masy: destylację, kondensację, rektyfikację, absorpcję, suszenie, adsorpcję i procesy membranowe. Biorąc pod uwagę fakt, że Czytelnikami skryptu będą przede wszystkim studenci kierunków Wydziału Chemicznego, zdecydowaliśmy się na przedstawienie opisu omawianych operacji jednostkowych z wykorzystaniem prostego ujęcia matematycznego, aby prezentowane treści były dostosowane do aparatu matematycznego, którym dysponują nasi studenci. Na końcu każdego rozdziału umieściliśmy literaturę przedmiotu, a w rozdziałach 2–14 także pytania kontrolne i problemy, które pozwolą studentom ocenić stopień zrozumienia omawianego zagadnienia.

Mamy nadzieję, że treść niniejszego skryptu zachęci przyszłych inżynierów do pogłębiania wiedzy i zdobywania praktycznych umiejętności niezbędnych do prawidłowego projektowania operacji jednostkowych i procesów realizowanych w przemyśle chemicznym, biotechnologicznym i ochronie środowiska.

Autorzy