

**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 2024**

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

wydanie I – 2022

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 2024

ISBN 978-83-7348-917-2

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

---

Wydanie II. Ark. wyd. 11,9, ark. druku 14,63, 1263/1303

---

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*