

Ewa Klugmann-Radziemska

**termo
dynamika
techniczna**

dla studentów technologii chemicznej

Gdańsk 2022

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

RECENZENT

Jarosław Mikielewicz

PROJEKT OKŁADKI

Katarzyna Olszonowicz

Wydanie II – 2013

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 978-83-7348-481-8

Spis treści

Wstęp	5
1. Podstawowe jednostki miar	7
2. Podstawowe pojęcia termodynamiki	8
2.1. Stan układu termodynamicznego	9
2.2. Parametry stanu	10
2.2.1. Temperatura. Skale temperatury..... <i>Termometry zbudowane na podstawie różnych parametrów termometrycznych</i> <i>ciał</i>	10 14
2.2.2. Ciśnienie	17
2.2.3. Objętość	17
2.2.4. Energia wewnętrzna	17
2.2.5. Entalpia	18
2.2.6. Entropia	19
2.2.7. Energia swobodna	19
2.2.8. Entalpia swobodna	19
2.2.9. Egzergia	20
2.3. Przemiana termodynamiczna. Klasyfikacja procesów termodynamicznych	21
2.3.1. Proces odwracalny	28
2.3.2. Proces nieodwracalny	28
2.3.3. Proces samorzutny	28
2.3.4. Proces quasi-statyczny	29
2.3.5. Model gazu doskonałego	29
<i>Prawo Avogadra</i>	30
2.3.6. Mieszaniny gazów doskonałych i półdoskonałych	31
3. Zasady termodynamiki	33
3.1. Zerowa zasada termodynamiki = prawo równocенności stanów układów termodynamicznych	33
3.2. Pierwsza zasada termodynamiki = prawo zachowania energii	33
<i>Bilans energetyczny układu (I zasada termodynamiki w układzie zamkniętym)</i>	35
<i>Bilans energetyczny w układzie otwartym (I zasada termodynamiki w układzie przepływowym)</i>	36
<i>Konsekwencje pierwszej zasady termodynamiki</i>	39
3.3. Druga zasada termodynamiki = prawo stałego wzrostu entropii	40
3.3.1. Znaczenie II zasady termodynamiki w chemii	42
3.3.2. Termodynamiczna strzałka czasu	43
3.4. Trzecia zasada termodynamiki = prawo dążenia entropii do 0 ze spadkiem temperatury	44
3.5. Czwarta zasada termodynamiki = symetria macierzy współczynników w twierdzeniu Onsagera	45
4. Termodynamika procesów odwracalnych	46

5. Podstawy termodynamiki procesów nieodwracalnych	46
6. Właściwości gazów rzeczywistych. Przemiany charakterystyczne	47
6.1. Przemiana izobaryczna (stałe ciśnienie $p = \text{const.}$)	48
6.2. Przemiana izotermiczna (stała temperatura $T = \text{const.}$)	50
6.3. Przemiana izochoryczna (stała objętość $V = \text{const.}$)	51
6.4. Przemiana adiabatyczna (brak wymiany ciepła z otoczeniem $Q = \text{const.}$)	52
6.5. Przemiana politropowa ($pV^\nu = \text{const.}$, gdzie ν wykładnik politropy)	53
6.6. Przemiana izentalpowa (stała entalpia $H = \text{const.}$)	55
7. Obiegi termodynamiczne	56
7.1. Cykl Carnota	57
7.2. Obieg Rankine'a	58
7.3. Obieg Otta	59
7.4. Obieg Diesla	60
7.5. Obieg Seiligera-Sabathé'a	61
7.6. Obieg Braytona-Joule'a	61
7.7. Obieg Lindego	63
7.8. Obieg chłodniczy Joule'a	63
8. Podstawy wymiany ciepła przez konwekcję, promieniowanie i przewodzenie	64
8.1. Wymiana ciepła przez przewodzenie	64
8.2. Wymiana ciepła przez konwekcję	66
8.3. Wymiana ciepła przez promieniowanie	69
9. Obliczenia termodynamiczne	70
Przykłady do rozdziału 2	70
Przykłady do rozdziału 3 – I zasada termodynamiki	82
Przykłady do rozdziału 3 – II zasada termodynamiki	88
Przykłady do rozdziału 6	95
Przykłady do rozdziału 7	109
Przykłady do rozdziału 8	112
Literatura	116
Dodatek – Przemiany charakterystyczne gazów doskonałych i półdoskonałych	117

Wstęp

Niniejszy skrypt jest przeznaczony dla studentów II roku kierunku **Technologia chemiczna** na Wydziale Chemicznym Politechniki Gdańskiej. Jest on ściśle dostosowany do programu nauczania przedmiotu **Termodynamika techniczna** i może służyć jako pomoc dydaktyczna, zarówno do opanowania materiału, wchodzącego w zakres wykładu, jak i ćwiczeń rachunkowych.

W pierwszej części przedstawiono, powiązane w logiczną całość, zagadnienia teoretyczne termodynamiki technicznej. W części drugiej omówione treści zilustrowano przykładami obliczeniowymi.

Wszystkie pojęcia podstawowe oraz jednostki stosowanych wielkości zostały w skrypcie zdefiniowane, aby stworzyć jednolitą, logiczną treść, nawet jeżeli powinny one być już znane studentom II roku Wydziału Chemicznego.

Zakres zagadnień rozpatrywanych przez termodynamikę jest szeroki i sięga do różnych dziedzin fizyki. **Termodynamika techniczna** służy analizie wymiany ciepła (przewodzenie, konwekcja, przejmowanie, przenikanie) oraz zmianie energii cieplnej w inne rodzaje energii.

Przedmiot **Termodynamika techniczna** jest przedmiotem obowiązkowym dla studentów III semestru w wymiarze: 1 godzina wykładu, 1 godzina ćwiczeń rachunkowych w tygodniu. Brak jest odpowiedniego podręcznika, odpowiadającego programowi tego przedmiotu dla studentów Wydziału Chemicznego, którzy po raz pierwszy spotykają się pojęciami podstawowymi termodynamiki. Dlatego materiał do niniejszego skryptu został przygotowany na bazie wielu opracowań, dotyczących termodynamiki teoretycznej, technicznej, chemicznej i procesowej tak, aby stworzyć podstawy wiedzy inżynierskiej, konieczne do opanowania na pierwszym etapie kształcenia przyszłego chemika.