

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

# TERMODYNAMIKA TECHNICZNA

## Laboratorium

pod redakcją  
Daniela Zbrońskiego

Skrypt



Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej

Częstochowa 2023

**Recenzent**

Prof. dr hab. inż. Jarosław Krzywański, UJD

**Redakcja**

Paulina Rak

**Redakcja techniczna**

Robert Świerczewski

**Projekt okładki**

Dorota Boratyńska

ISBN 978-83-7193-937-2

e-ISBN 978-83-7193-938-9

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2023

© Copyright by Daniel Zbroński, Częstochowa 2023

## SPIS TREŚCI

<b>Przedmowa</b> .....	<b>7</b>
<b>1. Pomiar ciśnienia atmosferycznego (Daniel Zbroński)</b> .....	<b>9</b>
Cel ćwiczenia .....	9
1.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	9
1.1.1. Definicja, wzór i jednostki ciśnienia .....	9
1.1.2. Charakterystyka atmosfery ziemskiej .....	10
1.1.3. Wyznaczanie wartości ciśnienia atmosferycznego .....	10
1.1.4. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	15
1.2. Część praktyczna .....	19
1.3. Wzór sprawozdania .....	22
Literatura .....	22
<b>2. Sprawdzanie wskazań wakuometru sprężystego za pomocą ciśnieniomierza hydrostatycznego i pompy próżniowej (Daniel Zbroński)</b> .....	<b>23</b>
Cel ćwiczenia .....	23
2.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	23
2.1.1. Pojęcia podstawowe .....	23
2.1.2. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	25
2.2. Część praktyczna .....	28
2.3. Wzór sprawozdania .....	33
Literatura .....	33
<b>3. Sprawdzanie wskazań manometru sprężystego za pomocą manometru kontrolnego i prasy hydraulicznej (Daniel Zbroński)</b> .....	<b>34</b>
Cel ćwiczenia .....	34
3.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	34
3.1.1. Pojęcia podstawowe .....	34
3.1.2. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	35
3.2. Część praktyczna .....	38
3.3. Wzór sprawozdania .....	42
Literatura .....	43
<b>4. Wzorcowanie mikromanometru z rurką pochyłą (Daniel Zbroński)</b> .....	<b>44</b>
Cel ćwiczenia .....	44
4.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	44
4.1.1. Pojęcia podstawowe .....	44
4.1.2. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	46
4.2. Część praktyczna .....	48
4.3. Wzór sprawozdania .....	53
Literatura .....	53

---

<b>5. Pomiar temperatury wody termometrem rozszerzalnościowym cieczowym</b> (Agnieszka Kijo-Kleczkowska, Aleksandra Górecka-Zbrońska) .....	<b>54</b>
Cel ćwiczenia .....	54
5.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	54
5.1.1. Podstawy pomiaru temperatury .....	54
5.1.2. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	56
5.2. Część praktyczna .....	60
5.2.1. Określenie dokładności wskazań termometru cieczowego .....	60
5.2.2. Pomiar zmian temperatury wody w naczyniu termometrem cieczowym .....	62
5.3. Wzór sprawozdania .....	66
Literatura .....	67
<b>6. Sprawdzanie wskazań termometrów w punktach przemian fazowych wody</b> (Daniel Zbroński, Aleksandra Górecka-Zbrońska) .....	<b>68</b>
Cel ćwiczenia .....	68
6.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	68
6.1.1. Stany skupienia i przemiany fazowe substancji .....	68
6.1.2. Proces przejścia fazowego ciało stałe-ciecz .....	69
6.1.3. Proces przejścia fazowego ciecz-para .....	71
6.1.4. Proces wrzenia cieczy .....	74
6.1.5. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	75
6.2. Część praktyczna .....	76
6.2.1. Wyznaczanie temperatury topnienia lodu .....	76
6.2.2. Wyznaczanie temperatury wrzenia wody .....	79
6.3. Wzór sprawozdania .....	83
Literatura .....	83
<b>7. Wyznaczanie charakterystyki termometrycznej czujnika termoelektrycznego</b> (Daniel Zbroński) .....	<b>84</b>
Cel ćwiczenia .....	84
7.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	84
7.1.1. Czujniki termometrów termoelektrycznych .....	84
7.1.2. Metody określania wartości siły termoelektrycznej .....	88
7.1.3. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	90
7.2. Część praktyczna .....	93
7.3. Wzór sprawozdania .....	97
Literatura .....	97
<b>8. Wyznaczanie charakterystyki termometrycznej czujnika rezystancyjnego</b> (Daniel Zbroński) .....	<b>98</b>
Cel ćwiczenia .....	98
8.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	98
8.1.1. Czujniki termometrów rezystancyjnych .....	98
8.1.2. Połączenie czujników rezystancyjnych .....	101
8.1.3. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	103

---

8.2. Część praktyczna .....	106
8.3. Wzór sprawozdania .....	110
Literatura .....	110
<b>9. Wyznaczanie gęstości ciał stałych jednorodnych</b> (Aleksandra Górecka-Zbrońska) .....	<b>111</b>
Cel ćwiczenia .....	111
9.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	111
9.1.1. Pojęcia podstawowe .....	111
9.1.2. Wyznaczanie masy i objętości ciała stałego jednorodnego .....	112
9.1.3. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	114
9.2. Część praktyczna .....	116
9.3. Wzór sprawozdania .....	118
Literatura .....	119
<b>10. Wyznaczanie gęstości nasypowej materiałów sypkich</b> (Aleksandra Górecka-Zbrońska) .....	<b>120</b>
Cel ćwiczenia .....	120
10.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	120
10.1.1. Pojęcia podstawowe .....	120
10.1.2. Wyznaczanie masy i objętości materiału sypkiego .....	121
10.1.3. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	122
10.2. Część praktyczna .....	124
10.3. Wzór sprawozdania .....	126
Literatura .....	127
<b>11. Wyznaczanie gęstości wody sieciowej</b> (Aleksandra Górecka-Zbrońska) .....	<b>128</b>
Cel ćwiczenia .....	128
11.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	128
11.1.1. Pojęcia podstawowe .....	128
11.1.2. Wybrane metody pomiaru gęstości cieczy .....	130
11.1.3. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	133
11.2. Część praktyczna .....	136
11.3. Wzór sprawozdania .....	138
Literatura .....	138
<b>12. Pomiar strumienia masy powietrza za pomocą rurki spiętrzającej Prandtla</b> (Daniel Zbroński, Aleksandra Górecka-Zbrońska) .....	<b>139</b>
Cel ćwiczenia .....	139
12.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	139
12.1.1. Pojęcia podstawowe .....	139
12.1.2. Rodzaje rurek spiętrzających .....	141
12.1.3. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	144
12.2. Część praktyczna .....	146
12.3. Wzór sprawozdania .....	151
Literatura .....	151

---

<b>13. Pomiar strumienia masy powietrza za pomocą zwężki pomiarowej typu kryza (Aleksandra Górecka-Zbrońska)</b> .....	<b>152</b>
Cel ćwiczenia .....	152
13.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	152
13.1.1. Pojęcia podstawowe .....	152
13.1.2. Rodzaje zwęzek pomiarowych .....	152
13.1.3. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	154
13.2. Część praktyczna .....	158
13.3. Wzór sprawozdania .....	165
Literatura .....	166
<b>14. Wyznaczanie średniej pojemności cieplnej właściwej powietrza (Daniel Zbroński)</b> .....	<b>167</b>
Cel ćwiczenia .....	167
14.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	167
14.1.1. Pojęcia podstawowe .....	167
14.1.2. Wyznaczanie średniej pojemności cieplnej właściwej .....	173
14.1.3. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	176
14.2. Część praktyczna .....	177
14.3. Wzór sprawozdania .....	184
Literatura .....	185
<b>15. Pomiar wilgotności względnej powietrza za pomocą higrometru (Henryk Otwinowski, Aleksandra Górecka-Zbrońska)</b> .....	<b>186</b>
Cel ćwiczenia .....	186
15.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	186
15.1.1. Pojęcia podstawowe .....	186
15.1.2. Metody i przyrządy do pomiaru wilgotności powietrza .....	190
15.1.3. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	191
15.2. Część praktyczna .....	194
15.3. Wzór sprawozdania .....	199
Literatura .....	199
<b>16. Pomiar wilgotności względnej powietrza za pomocą psychrometru (Daniel Zbroński)</b> .....	<b>201</b>
Cel ćwiczenia .....	201
16.1. Wprowadzenie teoretyczne .....	201
16.1.1. Powietrze wilgotne .....	201
16.1.2. Wybrane przyrządy stosowane w ćwiczeniu .....	202
16.1.3. Określanie wilgotności względnej powietrza metodą psychrometryczną .....	205
16.2. Część praktyczna .....	209
16.3. Wzór sprawozdania .....	214
Literatura .....	214
<b>Dodatki</b> .....	<b>215</b>
Literatura .....	225

## PRZEDMOWA

Termodynamika jest działem fizyki zajmującym się analizą zjawisk związanych z przemianami energii w dostatecznie dużych zbiorowiskach cząstek materii. W zależności od przyjętej skali opisu układu podlegającego przemianie, termodynamikę można podzielić na trzy działy: statystyczną, kwantową i fenomenologiczną. Termodynamika statystyczna uwzględnia cząsteczkową budowę materii, a opisując układ w sposób mikroskopowy, wykorzystuje znajomość dużej liczby parametrów charakteryzujących stan atomów i cząsteczek. Podobnie termodynamika kwantowa oparta jest na mikroskopowym opisie układu z uwzględnieniem dodatkowo praw mechaniki kwantowej. Termodynamika fenomenologiczna zajmuje się zaś opisem makroskopowym układu, traktując go jako całość, bez szczególnego wnikania w wewnętrzną jego strukturę.

Termodynamika techniczna ma na celu praktyczne zastosowanie termodynamiki w zagadnieniach technicznych. Jej początek związany był z wynalezieniem maszyny parowej i jej usprawnieniem przez Jamesa Watta (1763 r.), a dalszy jej rozwój wynikał z wynalezienia silników: spalinowego przez Nikolausa Augusta Otto (1876 r.) i wysokoprężnego przez Rudolfa Diesla (1893 r.), oraz maszyn wirnikowych, turbin gazowych i silników odrzutowych. Termodynamika techniczna pozwala opisywać i analizować nie tylko zjawiska zachodzące w maszynach i urządzeniach cieplnych (np. silnikach, turbinach, pompach, sprężarkach, wymiennikach, urządzeniach chłodniczych), ale i zjawiska związane z suszarnictwem i klimatyzacją. Wynikiem jej analiz jest ustalenie optymalnych warunków przetwarzania oraz wytwarzania energii, zapewniających minimalizację strat i maksymalizację sprawności realizowanych procesów termodynamicznych. Osiągnięcie wskazanych celów wymaga bardzo dobrej praktycznej znajomości podstaw miernictwa cieplnego w przemyśle, związanego z pomiarem szeregu wielkości fizycznych służących do określenia stanu i własności cieplnych czynnika termodynamicznego, niezbędnego w badaniach i eksploatacji maszyn oraz urządzeń cieplnych. Aktualnie najnowsze kierunki badań termodynamiki technicznej związane są z rozwojem urządzeń do bezpośredniego przetwarzania ciepła w energię elektryczną.

Prezentowany skrypt stanowi materiał pomocniczy do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu „Termodynamika techniczna”, prowadzonego na kierunkach: mechanika i budowa maszyn oraz inżynieria gospodarki obiegu zamkniętego na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.

Celem zespołu było stworzenie przystępnego opracowania, które pozwoli studentom przygotować się do ćwiczeń i nabyć umiejętności praktycznego zastosowania wiedzy ogólnej zdobytej na wykładach. Należy podkreślić, że w pracy ograniczono się wyłącznie do zagadnień zawartych w sylabusie przedmiotu, zgodnie z programami studiów dla wskazanych kierunków kształcenia. Każdy z rozdziałów zawiera cel ćwiczenia, wprowadzenie teoretyczne, część praktyczną i wzór sprawozdania. Dodatkowo, w każdym rozdziale podano zalecaną literaturę i przykłady obliczeniowe, które z pewnością ułatwiają studentom samodzielne wykonanie obliczeń wymaganych w ćwiczeniach. Na końcu podręcznika umieszczono dodatki zawierające tabele, wykresy i nomogramy niezbędne w realizacji części praktycznej omawianych zagadnień.

Wyrażamy nadzieję, że tak przygotowany podręcznik z pewnością ułatwi studentom przyswojenie trudnych zagadnień z termodynamiki technicznej, a wskazane źródła literaturowe zachęcą ich do szerszego zainteresowania się ciekawym przedmiotem.

Zespół autorski