

1. Teoretyczne podstawy pomiaru i opracowania wyników 11

mgr inż. Zbigniew Wiejacki, dr inż. Stanisław Jędrzejowski,
prof. dr hab. inż. Tadeusz R. Fodemski

1.1.	Wstęp.....	11
1.2.	Jednostki miar.....	12
1.3.	Pojęcia podstawowe, klasyfikacja przyrządów.....	17
1.4.	Fizyczne zasady działania przyrządów.....	18
1.5.	Skale przyrządów pomiarowych.....	25
1.6.	Statyka i dynamika przyrządów pomiarowych.....	26
1.7.	Metody pomiaru	33
1.8.	Przyrządy elektryczne do pomiaru wielkości nieelektrycznych	36
1.9.	Błędy pomiaru	42
1.10.	Opracowanie wyników pomiarów	47
1.10.1.	Metody przedstawiania danych eksperymentalnych.....	47
1.10.2.	Błąd pomiaru jako zmienna losowa.....	50
1.10.3.	Ocena błędów.....	65
1.11.	Komputeryzacja pomiarów.....	68
	Literatura	75

2. Pomiary masy, objętości, gęstości i strumienia przepływającej substancji 77

dr inż. Andrzej Deka

2.1.	Pojęcia podstawowe	77
2.2.	Pomiar masy ciał stałych, ciekłych i gazowych.....	78
2.2.1.	Podział wag według zasad działania.....	79
2.2.2.	Podział wag według dokładności ważenia.....	82
2.2.3.	Podział wag w zależności od zastosowania	82
2.2.4.	Błędy pomiaru masy	83
2.3.	Pomiar objętości	83
2.3.1.	Pomiar objętości ciał stałych	83
2.3.2.	Pomiar objętości cieczy	84
2.3.3.	Pomiar objętości gazów	85
2.4.	Pomiar gęstości.....	85
2.4.1.	Pomiar gęstości ciał stałych.....	86
2.4.2.	Pomiar gęstości cieczy.....	86
2.4.3.	Pomiar gęstości gazów	87
2.5.	Pomiary strumienia przepływających materiałów stałych.....	90
2.6.	Pomiary objętości przepływu, masy przepływu i strumienia przepływających płynów	91
2.6.1.	Liczniki przepływu	92
2.6.1.1.	Podwójny zbiornik wzorcowany	92
2.6.1.2.	Licznik nieckowy	93
2.6.1.3.	Liczniki komorowe.....	93
2.6.1.4.	Liczniki wirnikowe.....	96
2.6.2.	Strumieniomierze.....	97
2.6.2.1.	Przepływomierze zwężkowe.....	97
2.6.2.2.	Danajda i naczynie Ponceleta	100
2.6.2.3.	Przepływomierze pływakowe.....	102
2.6.2.4.	Pomiary strumienia objętości metodami całkowania bryły prędkości.....	104

2.6.2.5.	Przepływomierze kapilarne	107
2.6.2.6.	Przepływomierze elektromagnetyczne	107
2.6.2.7.	Przepływomierze ultradźwiękowe	108
2.6.2.8.	Przepływomierze wibracyjne	110
2.6.2.9.	Przepływomierz z zewnętrznym oddziaływaniem – przepływomierz Coriolisa ..	110
2.6.2.10.	Przepływomierze jonizacyjne	112
2.6.2.11.	Metoda izotopowa pomiaru strumienia przepływu	112
2.6.3.	Anemometry	112
2.6.3.1.	Anemometry mechaniczne	112
2.6.3.2.	Termoanemometry	112
2.6.3.3.	Anemometry laserowe	113
2.6.4.	Pomiary strumienia przepływającej cieczy w przewodach otwartych	115
2.6.4.1.	Przelewy miernicze	115
2.6.4.2.	Zwężkowe kanały miernicze	115
2.6.4.3.	Metoda korelacyjna	116
2.6.4.4.	Metoda elektromagnetyczna	118
2.6.5.	Tendencje rozwoju przepływomierzy	118
	Literatura	119

3. Pomiar temperatury

120

dr inż. *Bolesław Długoszewski*, prof. dr hab. inż. *Tadeusz R. Fodemski*

3.1.	Pojęcia podstawowe	120
3.1.1.	Temperatura	120
3.1.2.	Skale termometryczne	120
3.2.	Podział przyrządów do pomiaru temperatury	123
3.3.	Przyrządy do pomiaru temperatury stykowe	124
3.3.1.	Termometry nieelektryczne	124
3.3.1.1.	Termometry rozszerzalnościowe	124
3.3.1.2.	Termometry ciśnieniowe	130
3.3.2.	Termometry elektryczne	132
3.3.2.1.	Termometry rezystancyjne	133
3.3.2.2.	Termometry termoelektryczne	138
3.3.2.3.	Nowoczesne termometry termoelektryczne NANMAC i ich zastosowanie	145
3.4.	Bezstykowe przyrządy do pomiaru temperatury	149
3.4.1.	Termometr (pirometr) optyczny całkowitego promieniowania	149
3.4.2.	Termometr (pirometr) fotoelektryczny	151
3.4.3.	Termometr (pirometr) monochromatyczny z zanikającym włóknem	152
3.4.4.	Termometr (pirometr) dwubarwowy	154
3.5.	Termometry specjalne	155
3.5.1.	Termofarby, termokredki	155
3.5.2.	Stożki Segera	155
3.5.3.	Metalograficzna metoda oznaczania temperatury	155
3.5.4.	Termowizyjna metoda określania temperatury	156
3.5.5.	Kalorymetryczna metoda oznaczania temperatury	156
3.6.	Wzorcowanie i sprawdzanie termometrów	156
3.6.1.	Sprawdzanie termometrów cieczowych	157
3.6.2.	Wzorcowanie i sprawdzanie termometrów rezystancyjnych	160
3.6.3.	Wzorcowanie i sprawdzanie termometrów termoelektrycznych	161
3.7.	Metodyka prowadzenia pomiarów temperatury – uwagi ogólne	163
3.7.1.	Pomiar temperatury ciał stałych	164
3.7.2.	Pomiar temperatury cieczy znajdującej się w spoczynku	165
3.7.3.	Pomiar temperatury gazów znajdujących się w spoczynku	165
3.7.4.	Pomiar temperatury cieczy, gazów i par znajdujących się w ruchu	166

3.7.5.	Pomiar nieustalonej w czasie temperatury płynu.....	167
3.7.5.1.	Charakterystyka skokowa czujnika termometrycznego.....	167
3.7.5.2.	Wymuszenie liniowe czujnika termometrycznego	168
3.7.5.3.	Wymuszenie sinusoidalne	170
3.7.5.4.	Rzeczywiste czujniki termometryczne.....	170
	Literatura	172

4. Pomiar ciśnienia 173

mgr inż. Jerzy Podfilipski

4.1.	Określenia podstawowe	173
4.1.1.	Wprowadzenie.....	173
4.1.2.	Poziom odniesienia.....	174
4.1.3.	Jednostki ciśnienia.....	175
4.2.	Klasyfikacja przyrządów do pomiaru ciśnienia.....	175
4.3.	Manometry cieczowe.....	175
4.3.1.	Manometr cieczowy dwuramienny (U-rurka).....	177
4.3.2.	Manometr jednoramienny.....	178
4.3.3.	Manometry z rurką pochyłą.....	180
4.3.4.	Manometr pierścieniowy (waga pierścieniowa)	181
4.3.5.	Rozwiązania specjalne manometrów cieczowych	183
4.4.	Manometry sprężyste.....	184
4.4.1.	Manometr z rurką sprężystą.....	184
4.4.2.	Manometry z przeponą sprężystą	187
4.4.3.	Manometry z komorą sprężystą	192
4.4.4.	Manometry z przegrodą wiotką i oddzielnym elementem sprężystym	194
4.5.	Manometry parametryczne	197
4.6.	Skalowanie przyrządów do pomiaru ciśnienia	197
4.7.	Eksploatacja przyrządów do pomiaru ciśnienia.....	198
	Literatura	198

5. Indykatory ciśnienia (mocy) 199

dr inż. Stanisław Jędrzejowski

5.1.	Wstęp.....	199
5.2.	Budowa indykatorów.....	199
5.2.1.	Indykatory mechaniczne.....	199
5.2.2.	Indykatory elektroniczne	201
5.2.2.1.	Czujniki ciśnienia	201
5.2.2.2.	Przetworniki położenia tłoka	204
5.3.	Nowoczesna aparatura do indykacji	205
5.4.	Wykresy indykatorowe.....	208
5.4.1.	Planimetry	209
5.4.2.	Obliczanie mocy indykowanej (wewnętrznej).....	210
5.4.3.	Wykorzystanie wykresów indykatorowych.....	211
	Literatura	212

6. Pomiar ciepła właściwego i dyfuzyjności termicznej materiałów 213

doc. dr inż. Jacek Kulesza

6.1.	Pomiar ciepła właściwego	213
6.1.1.	Podstawowe zależności	213
6.1.2.	Kalorymetr wodny (cieczowy)	214
6.1.3.	Kalorymetr Nernsta-Lindemanna	216

6.1.4.	Kalorymetr lodowy Bunsena	216
6.1.5.	Różnicowe kalorymetry skaningowe.....	218
6.1.6.	Pomiary ciepła właściwego w warunkach nieustalonej wymiany ciepła.....	219
6.2.	Pomiary dyfuzyjności termicznej metodami impulsowymi.....	219
6.2.1.	Pomiar właściwości cieplnych materiałów metodą nieograniczonego wzorca.....	219
6.2.2.	Metoda impulsowa pomiaru dyfuzyjności termicznej	220
6.3.	Zastosowanie uporządkowanych warunków wymiany ciepła (stanu uporządkowanego) do wyznaczania właściwości cieplnych materiałów	222
6.3.1.	Wprowadzenie teoretyczne.....	222
6.3.2.	Pomiar dyfuzyjności termicznej w warunkach uporządkowanych	228
6.3.3.	Pomiar współczynnika przewodności cieplnej i pojemności cieplnej (λ -kalorymetrem)	229
6.3.4.	Określenie właściwości cieplnych metodą nagrzewania (chłodzenia) ze stałą szybkością	231
	Literatura	232

7. Pomiary przewodności cieplnej materiałów 234

doc. dr inż. *Jacek Kulesza*

7.1.	Wprowadzenie i podstawy teoretyczne	234
7.1.1.	Wiadomości ogólne	234
7.1.2.	Podstawowe zależności dotyczące przewodzenia ciepła w stanie ustalonym.....	236
7.1.3.	Podstawowe zależności przewodzenia ciepła w stanie nieustalonym wymiany ciepła	237
7.2.	Pomiary przewodności cieplnej w stanach ustalonych	238
7.2.1.	Aparat dwupłytkowy Poensgena	238
7.2.2.	Aparat jednopłytkowy Poensgena	243
7.2.3.	Aparat rurowy	244
7.2.4.	Aparat kulowy	245
7.2.5.	Aparat do pomiaru przewodności cieplnej na zasadzie znanego oporu cieplnego	246
7.2.6.	Aparat do pomiaru przewodności cieplnej oparty na metodzie porównawczej dwu prętów	247
7.2.7.	Aparat Schofielda	249
7.2.8.	Ciepłomierz Schmidta	249
7.2.9.	Aparat do pomiaru przewodności cieplnej przez ściany i stropy budynku.....	250
7.3.	Pomiary współczynnika przewodności cieplnej w stanach nieustalonej wymiany ciepła	251
7.3.1.	Aparat płytowy	251
7.3.2.	Sonda cieplna	253
7.3.3.	Aparat dwupłytkowy	253
7.3.4.	Aparat rurowy.....	254
7.3.5.	Komparator Powella	254
7.4.	Wybór metody pomiaru, metodyka pomiarów	255
	Literatura	256

8. Pomiar niestałych składników powietrza 258

doc. mgr inż. *Tadeusz Bratek*, dr inż. *Andrzej Gorczakowski*

8.1.	Własności powietrza wilgotnego	258
8.1.1.	Podstawowe definicje.....	258
8.1.2.	Wykres Molliera $h-x$	259
8.2.	Pomiar wilgotności powietrza	261
8.2.1.	Higrometry	261
8.2.2.	Psychrometry	264
8.2.3.	Pomiary wilgotności powietrza w kanale (tunelu).....	269
8.2.4.	Pomiary wilgotności powietrza w niskich i wysokich temperaturach	270

8.2.5.	Wzorcowanie higrometrów	270
8.3.	Pomiar zanieczyszczenia powietrza pyłami i gazami	270
8.3.1.	Parametry zanieczyszczonego powietrza.....	270
8.3.2.	Sposoby i miejsca poboru próbek zanieczyszczonego powietrza.....	270
8.3.3.	Przyrządy do pomiaru stężeń zapylenia powietrza – pyłomierze	274
8.3.4.	Pomiary zanieczyszczeń gazowych	278
8.4.	Pomiary emisji i opadu zanieczyszczeń.....	281
8.4.1.	Pomiary emisji zanieczyszczeń pyłowych w gazach odlotowych z procesów technologicznych.....	281
8.4.2.	Określenie stężenia zanieczyszczeń zawartych w powietrzu atmosferycznym.....	286
	Literatura	291

9. Badanie i przygotowanie wody do celów technicznych 293

doc. mgr inż. *Tadeusz Bratek*, mgr inż. *Krystyna Bakinowska*

9.1.	Wstęp.....	293
9.2.	Woda i jej właściwości	293
9.2.1.	Właściwości chemiczne wody	294
9.2.2.	Właściwości fizyczne wody	294
9.2.3.	Charakterystyka wód naturalnych i ich zanieczyszczenia	295
9.2.4.	Badanie fizycznych wskaźników jakości wody.....	297
9.2.4.1.	Temperatura.....	297
9.2.5.	Badanie chemicznych wskaźników wody	297
9.2.5.1.	Utlenialność.....	298
9.2.5.2.	Odczyn.....	298
9.2.5.3.	Zawartość związków azotu.....	299
9.2.5.4.	Zawartość chlorków i siarczanów.....	299
9.2.5.5.	Zawartość żelaza i manganu	300
9.2.5.6.	Twardość wody	300
9.2.5.7.	Zasadowość	302
9.2.5.8.	Sucha pozostałość i strata po prażeniu	303
9.2.5.9.	Rozpuszczone gazy.....	303
9.2.5.10.	Stabilność wody [3, 17].....	304
9.3.	Wymagania jakościowe stawiane użytkowej wodzie	304
9.3.1.	Woda do zasilania kotłów parowych, dla gospodarki parowej i do celów grzewczych	305
9.3.2.	Woda stosowana w urządzeniach klimatyzacyjnych i w obiegach chłodniczych	306
9.4.	Uzdatnianie wody	308
9.4.1.	Zanieczyszczenia występujące w wodzie	308
9.4.2.	Metody uzdatniania wody	309
9.4.2.1.	Aeracja.....	311
9.4.2.2.	Filtracja.....	312
9.4.2.3.	Odżelazianie i odmanganianie.....	314
9.4.2.4.	Jonitowe preparowanie wody	315
9.4.2.5.	Odolejanie wody.....	320
9.4.2.6.	Magnetyczne uzdatnianie wody	320
	Literatura	321

10. Badanie paliw i produktów spalania 322

dr inż. *Władysław Kasieczka*

10.1.	Wstęp.....	322
10.2.	Rodzaje i własności fizyczne stosowanych paliw.....	324
10.2.1.	Paliwa stałe.....	324
10.2.2.	Klasyfikacja i charakterystyka paliw ciekłych.....	327
10.2.3.	Klasyfikacja i charakterystyka paliw gazowych.....	329

10.3.	Badanie własności fizycznych paliw stałych	330
10.3.1.	Oznaczanie gęstości rzeczywistej i nasypowej paliw	330
10.3.2.	Analiza sitowa paliw	331
10.4.	Analiza techniczna paliw stałych.....	332
10.4.1.	Pobieranie próbek paliwa stałego	335
10.4.2.	Oznaczanie zawartości wilgoci.....	336
10.4.3.	Oznaczanie zawartości popiołu i jego analiza	340
10.4.4.	Oznaczanie zawartości części lotnych w paliwie.....	342
10.4.5.	Oznaczanie ciepła spalania i wartości opałowej paliw stałych	343
10.4.6.	Oznaczanie zawartości siarki w paliwie stałym	353
10.5.	Badania własności fizycznych i analiza techniczna stosowanych paliw ciekłych	353
10.5.1.	Oznaczanie gęstości paliw ciekłych.....	353
10.5.2.	Oznaczanie ciepła spalania i wartości opałowej paliw ciekłych	354
10.6.	Oznaczanie własności fizyko-chemicznych i kalorycznych paliw gazowych	357
10.6.1.	Pobieranie próbek paliw gazowych do wykonania oznaczeń	357
10.6.2.	Oznaczanie gęstości paliw gazowych	358
10.6.3.	Oznaczanie ciepła spalania i wartości opałowej paliw gazowych	358
10.7.	Analiza spalin i gazów.....	361
10.7.1.	Chemiczna analiza spalin i paliw gazowych za pomocą analizatorów Orsata.....	361
10.7.2.	Metoda analizy składu gazu ziemnego przy zastosowaniu chromatografii gazowej	364
10.7.3.	Oznaczanie składu chemicznego paliw gazowych i spalin aparatem typu Orsato-chromatograf.....	366
10.7.4.	Zawartość szkodliwych składników w spalinach	366
	Literatura	369

11. Pomiary strumienia ciepła

370

doc. dr inż. Jacek Kulesza

11.1.	Wstęp.....	370
11.2.	Pomiary strumienia ciepła w stanach ustalonych	372
11.2.1.	Pomiary średnich – całkowitych strumieni ciepła	372
11.2.2.	Pomiary miejscowych strumieni ciepła	373
11.3.	Pomiary strumieni ciepła w stanach niestabilnych	375
11.3.1.	Wykorzystanie przypadku stanu uporządkowanego ciała o małym oporze cieplnym (małych gradientach temperatury) do pomiarów strumienia ciepła.....	375
11.3.2.	Wykorzystanie przypadku stanu uporządkowanego przy dużych liczbach Biota	378
11.4.	Czujniki do pomiaru strumienia ciepła, wprowadzenie i klasyfikacja.....	378
11.5.	Czujniki oparte na ustalonym polu temperatur czujnika	380
11.5.1.	Czujniki o działaniu opartym na metodzie znanego oporu cieplnego, warstwa – ścianka pomocnicza	380
11.5.2.	Czujniki prętowe	383
11.5.3.	Czujniki tarczowe typu Gardona	383
11.5.4.	Czujniki z elektrycznym wytwarzaniem strumienia ciepła.....	387
11.5.5.	Przepływowe czujniki do pomiaru strumienia ciepła	389
11.5.6.	Kondensacyjny czujnik do pomiaru strumienia ciepła (lub chłodzony cieczą wrzącą)	390
11.6.	Czujniki oparte na niestabilnym polu temperatur	392
11.6.1.	Czujniki oparte na uporządkowanym stanie wymiany ciepła.....	392
11.6.2.	Czujniki oparte na warunkach uporządkowanego stanu niestabilnego trzeciego rodzaju	393
11.7.	Pomiary promieniowania.....	393
11.8.	Cechowanie czujników strumienia ciepła.....	394
	Literatura	395
	Skorowidz.....	396