

Witold M. Lewandowski, Robert Aranowski

# Technologie ochrony środowiska w przemyśle i energetyce

 PWN

Projekt okładki i stron tytułowych: *Bartosz Dobrowolski*

Ilustracja na okładce: *Bartosz Dobrowolski*

Wydawca: *Katarzyna Włodarczyk-Gil*

Koordynator ds. redakcji: *Renata Ziótkowska*

Redaktor: *inż. Lech Oleksiak*

Produkcja: *Mariola Grzywacka*

Łamanie: *Marta Jeczeń-Bańkowska*

Recenzent: *dr hab. inż. Adam Cenian*

Źródła rysunków: *Witold M. Lewandowski, Robert Aranowski*

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw im przysługujących. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Jednak nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło.

A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo.

Więcej na [www.legalnakultura.pl](http://www.legalnakultura.pl)

Polska Izba Książki

© Copyright by Wydawnictwo Naukowe PWN  
Warszawa 2016

Wydanie 1

ISBN 978-83-01-18600-5

Wydawnictwo Naukowe PWN SA  
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2  
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288  
infolinia 801 33 33 88  
e-mail: [pwn@pwn.com.pl](mailto:pwn@pwn.com.pl), [www.pwn.pl](http://www.pwn.pl)

Informacje w sprawie współpracy reklamowej: [reklama@pwn.pl](mailto:reklama@pwn.pl)

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o. o.

---

# Spis treści

---

<b>Wykaz ważniejszych oznaczeń, jednostek, czynników konwersji i przedrostków do tworzenia nazw i symboli</b> .....	15
<b>Przedmowa</b> .....	19
<b>Wstęp</b> .....	21
<b>Wprowadzenie</b> .....	23
<b>1. Charakterystyka zanieczyszczeń środowiska</b> .....	29
1.1. Wprowadzenie .....	29
1.2. Antropogeniczne zanieczyszczenia atmosfery .....	29
1.2.1. Charakterystyka głównych zanieczyszczeń atmosfery .....	33
1.2.2. Tlenki azotu NO <sub>x</sub> .....	33
1.2.3. Tlenki siarki .....	34
1.2.4. Tlenki węgla .....	36
1.2.5. Związki organiczne w spalinach .....	38
1.2.6. Sadza .....	39
1.2.7. Pyły i popioły .....	39
1.2.8. Pozostałe szkodliwe produkty spalania węgla .....	40
1.2.9. Fluorowodór .....	41
1.2.10. Ozon .....	42
1.3. Antropogeniczne zanieczyszczenia wód .....	43
1.3.1. Znaczenie wody dla organizmów żywych .....	43
1.3.2. Rodzaje zanieczyszczeń wody .....	44
1.3.3. Zanieczyszczenia wody związane z energetyką .....	47
1.4. Antropogeniczne zanieczyszczenia gleby .....	49
1.4.1. Charakterystyka zanieczyszczeń gleby .....	49
1.4.2. Metale ciężkie .....	49
1.4.3. Odpady paleniskowe żużel, popiół i pozostałości z odsiarczania .....	52
1.5. Skażenie środowiska ciepłem .....	53
1.5.1. Przyczyny skażenia środowiska ciepłem. ....	53

1.5.2.	Skutki zrzutów ciepła do środowiska .....	54
1.5.3.	Sposoby przeciwdziałania skażeniu środowiska ciepłem .....	55
1.6.	Przyczyny skażenia środowiska promieniowaniem .....	56
1.6.1.	Skutki oddziaływania promieniowania na środowisko .....	57
1.6.2.	Sposoby przeciwdziałania skażenia środowiska promieniowaniem ...	60
1.7.	Skutki zanieczyszczeń środowiska .....	61
1.8.	Podsumowanie .....	61
	Bibliografia .....	62
<b>2.</b>	<b>Skażenie powietrza w Polsce i udział w nim ditlenku węgla .....</b>	<b>66</b>
2.1.	Wprowadzenie .....	66
2.2.	Skażenie środowiska w Polsce .....	66
2.3.	Źródła i rodzaje skażeń .....	68
2.3.1.	Przemysłowe skażenie środowiska .....	69
2.3.2.	Energetyka i skażenie środowiska .....	71
2.4.	Ditlenek węgla i jego rola w środowisku .....	71
2.4.1.	Efekt cieplarniany .....	72
2.4.2.	Ditlenek węgla a globalne ocieplenie .....	73
2.4.3.	Rehabilitacja ditlenku węgla .....	77
2.5.	Co dalej z ditlenkiem węgla .....	79
2.5.1.	O konieczności redukcji emisji CO <sub>2</sub> .....	79
2.5.2.	Metody usuwania CO <sub>2</sub> .....	80
2.6.	Podsumowanie .....	81
	Bibliografia .....	81
<b>3.</b>	<b>Ochrona powietrza – odpylanie suche .....</b>	<b>84</b>
3.1.	Wprowadzenie .....	84
3.2.	Główne źródła zapylenia powietrza w Polsce .....	84
3.2.1.	Budowa autostrad .....	85
3.2.2.	Budownictwo mieszkaniowe .....	85
3.2.3.	Zapylenie i skażenie wywołane odzyskiem materiałów .....	86
3.3.	Metody usuwania zanieczyszczeń z powietrza .....	86
3.4.	Podział i skuteczność odpylaczy .....	87
3.5.	Odpylacze grawitacyjne .....	87
3.5.1.	Typy grawitacyjnych odpylaczy .....	87
3.5.2.	Podstawy teoretyczne grawitacyjnego odpylacza komorowego .....	89
3.5.3.	Rodzaje grawitacyjnych odpylaczy komorowych .....	90
3.5.4.	Grawitacyjne odpylacze półkowe .....	91
3.5.5.	Grawitacyjne odpylacze przewodowe .....	92
3.5.6.	Charakterystyka techniczna odpylaczy grawitacyjnych .....	93
3.6.	Odpylacze inercyjne .....	94
3.6.1.	Odpylacze inercyjno-uderzeniowe .....	95
3.6.2.	Odpylacze inercyjno-odśrodkowe .....	95
3.6.3.	Multicyklony .....	100
3.7.	Odpylacze filtracyjne .....	101
3.7.1.	Filtracja .....	101
3.7.2.	Etapy filtrowania .....	102
3.7.3.	Filtry z tkaninami filtracyjnymi .....	104

3.7.4.	Charakterystyka filtrów tkaninowych .....	105
3.7.5.	Rodzaje filtrów tkaninowych .....	105
3.7.6.	Filtry z wypełnieniem warstwowym .....	108
3.7.7.	Filtry z wypełnieniem ceramicznym .....	111
3.8.	Elektrofiltry .....	111
3.8.1.	Zależności opisujące zjawisko elektrofiltracji .....	112
3.8.2.	Elektrofiltry .....	113
3.8.3.	Elektrostatyczny separator .....	114
3.9.	Podsumowanie .....	116
	Bibliografia .....	116
<b>4.</b>	<b>Odpylanie i oczyszczanie mokre .....</b>	<b>118</b>
4.1.	Wprowadzenie .....	118
4.2.	Mechanizm odpylania mokrego .....	118
4.3.	Płuczki bez wypełnienia – Skrubery .....	120
4.3.1.	Odpylacze natryskowe .....	120
4.3.2.	Mokre odpylacze inercyjne .....	121
4.3.3.	Skrubery Venturiego .....	122
4.3.4.	Skrubery odśrodkowe .....	124
4.4.	Skrubery z wypełnieniem do odpylania i oczyszczania gazu .....	124
4.4.1.	Sposoby rozwinięcia powierzchni wymiany masy .....	125
4.4.2.	Rodzaje wypełnień stałych .....	126
4.4.3.	Skrubery z wypełnieniem stałym .....	126
4.4.4.	Skrubery z wypełnieniem ciekłym, barbotażowe i półkowe .....	128
4.4.5.	Skrubery pianowe .....	130
4.5.	Podsumowanie .....	131
	Bibliografia .....	132
<b>5.</b>	<b>Odsiarczanie węgla – separatory .....</b>	<b>133</b>
5.1.	Wprowadzenie .....	133
5.2.	Metody odsiarczania paliw stałych .....	133
5.3.	Grawitacyjne odsiarczanie węgla i usuwanie skały płonnej .....	135
5.3.1.	Podstawy teoretyczne separacji grawitacyjnej w płynie .....	135
5.3.2.	Podstawy teoretyczne separatorów odśrodkowych– –hydrocyklonów .....	137
5.3.3.	Rodzaje separatorów .....	139
5.4.	Grawitacyjno-inercyjne odsiarczanie węgla .....	141
5.4.1.	Osadzarki .....	141
5.4.2.	Wzbogacalniki stożkowe .....	143
5.4.3.	Wzbogacalniki strumieniowe .....	143
5.4.4.	Wzbogacalniki zawieszinowe .....	144
5.4.5.	Wzbogacalniki zawieszinowe odśrodkowe .....	146
5.4.6.	Wzbogacanie węgla na stołach koncentracyjnych .....	147
5.4.7.	Podsumowanie grawitacyjno-inercyjnego odsiarczania węgla .....	148
5.5.	Odsiarczanie przez flotacyjne wzbogacanie węgla .....	149
5.5.1.	Proces flotacji .....	149
5.5.2.	Środki flotacyjne .....	150
5.5.3.	Flotatory do wzbogacania węgla .....	150
5.6.	Podsumowanie .....	152
	Bibliografia .....	153

<b>6. Odsiarczanie gazu, ropy naftowej i ropopochodnych</b> .....	155
6.1. Wprowadzenie .....	155
6.2. Zestawienie metod odsiarczania .....	155
6.3. Odsiarczanie surowej ropy .....	156
6.3.1. Termiczne odsiarczanie surowej ropy .....	156
6.3.2. Biotechnologiczne odsiarczanie surowej ropy .....	157
6.4. Odsiarczanie gazów .....	157
6.4.1. Odsiarczanie aminowe gazów zawierających siarkowodor .....	158
6.4.2. Redukcyjno-utleniająca konwersja H <sub>2</sub> S .....	160
6.4.3. Adsorpcyjna metoda desulfuryzacji gazów zasiarczonych .....	160
6.4.4. Proces Clausa .....	161
6.5. Odsiarczanie produktów z ropy naftowej .....	162
6.5.1. Wstępna rafinacja ropopochodnych .....	163
6.5.2. Hydroodsiarczanie HDS .....	163
6.5.3. Desulfuryzacja oksydacyjna .....	164
6.5.4. Technologia ULSD .....	166
6.5.5. Proces Merox .....	167
6.6. Charakterystyka aparatury do odsiarczania ropopochodnych .....	168
6.6.1. Płuczka wstępnego ługowania .....	168
6.6.2. Reaktor Merox .....	169
6.6.3. Filtr piaskowy .....	169
6.6.4. Oddzielnac ługu .....	171
6.6.5. Płuczka wodna .....	171
6.6.6. Filtr solny .....	171
6.6.7. Filtr z ziemią bielącą Fullera .....	172
6.7. Podsumowanie .....	172
Bibliografia .....	172
<b>7. Ochrona powietrza przez odsiarczanie spalin</b> .....	175
7.1. Wprowadzenie .....	175
7.2. Odsiarczanie spalin w palenisku .....	175
7.3. Podział technologii odsiarczania spalin .....	176
7.3.1. Odsiarczanie mokre .....	177
7.3.2. Metoda sucha .....	180
7.3.3. Odsiarczanie półsuche .....	181
7.3.4. Odsiarczanie adsorpcyjno-utleniające .....	185
7.3.5. Odsiarczanie metodą RESOX .....	186
7.4. Absorbery .....	187
7.4.1. Wprowadzenie .....	187
7.4.2. Przegląd absorberów .....	187
7.5. Podsumowanie .....	190
Bibliografia .....	190
<b>8. Ochrona powietrza przez ograniczanie emisji NO<sub>x</sub></b> .....	193
8.1. Wprowadzenie .....	193
8.2. Ograniczenie powstawania NO <sub>x</sub> w procesie spalania .....	195
8.3. Mechanizmy powstawania NO <sub>x</sub> .....	196
8.3.1. Mechanizm termiczny .....	196

8.3.2.	Mechanizm szybki .....	197
8.3.3.	Mechanizmy paliwowy .....	197
8.3.4.	Mechanizmy powstawania NO za pośrednictwem N <sub>2</sub> O .....	198
8.3.5.	Mechanizm tworzenia się ditlenku azotu NO <sub>2</sub> .....	199
8.3.6.	Porównanie metod powstawania NO <sub>x</sub> w procesach spalania .....	199
8.4.	Metody pierwotne obniżania emisji NO <sub>x</sub> w spalinach .....	200
8.4.1.	Palniki niskoemisyjne .....	201
8.4.2.	Obniżenie temperatury spalania przez recyrkulację spalin .....	203
8.4.3.	Niskoemisyjne paleniska .....	203
8.4.4.	Wielostrefowe spalanie paliwa .....	204
8.4.5.	Zastosowanie wiru niskotemperaturowego .....	205
8.4.6.	Redukcja NO <sub>x</sub> przez spalanie paliw w cyrkulującej warstwie fluidalnej .....	207
8.5.	Podsumowanie .....	209
	Bibliografia .....	210
<b>9.</b>	<b>Metody usuwania NO<sub>x</sub> ze spalin .....</b>	<b>212</b>
9.1.	Wprowadzenie .....	212
9.2.	Przegląd suchych metod usuwania tlenków azotu ze spalin .....	213
9.2.1.	Selektywna niekatalityczna redukcja NO <sub>x</sub> .....	213
9.2.2.	Selektywna sucha redukcja katalityczna NO <sub>x</sub> .....	215
9.2.3.	Nieselektywna sucha redukcja katalityczna NO <sub>x</sub> .....	216
9.2.4.	Katalityczny suchy rozkład NO <sub>x</sub> .....	217
9.2.5.	Sucha adsorpcja NO <sub>x</sub> .....	218
9.2.6.	Sucha radiacyjna metoda usuwania NO <sub>x</sub> .....	220
9.3.	Wtórne mokre metody obniżania emisji NO <sub>x</sub> w spalinach .....	222
9.3.1.	Usuwanie NO <sub>x</sub> w ciekłych absorberach alkalicznych .....	223
9.3.2.	Adsorpcja w EDTA .....	223
9.3.3.	Metody utleniająco-absorpcyjne .....	224
9.3.4.	Metody z zastosowaniem silnych utleniaczy i absorpcji .....	224
9.3.5.	Metody absorpcyjne redukujące .....	226
9.4.	Biotechnologiczne metody usuwania NO <sub>x</sub> i CO <sub>2</sub> ze spalin .....	226
9.5.	Nakłady inwestycyjne na redukcję NO <sub>x</sub> .....	228
9.6.	Jednoczesne usuwanie NO <sub>x</sub> i SO <sub>2</sub> .....	228
9.6.1.	Metoda SHL .....	229
9.6.2.	Metoda WSA-SNOX .....	229
9.6.3.	Zmodyfikowana metoda suszenia rozpyłowego SDA .....	231
9.7.	Katalityczne utlenianie CO, węglowodorów i SO <sub>2</sub> .....	231
9.7.1.	Dopalanie katalityczne .....	232
9.7.2.	Technologia Swingtherm .....	232
9.8.	Fotokataliza heterogeniczna .....	233
9.8.1.	Mechanizm fotokatalizy heterogenicznej .....	233
9.8.2.	Reakcje fotokatalitycznego rozkładu NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> i VOC .....	234
9.8.3.	Reaktory fotokatalityczne .....	235
9.9.	Technologie związane z CO <sub>2</sub> .....	236
9.9.1.	Metody usuwania ditlenku węgla z gazów .....	236
9.9.2.	Metody zagospodarowania ditlenku węgla .....	241
9.9.3.	Wykorzystanie ditlenku węgla w przemyśle chemicznym .....	241
9.9.4.	Niekonwencjonalne sposoby wykorzystania ditlenku węgla .....	243
9.10.	Podsumowanie .....	244
	Bibliografia .....	245

<b>10. Wpływ energetyki i przemysłu na hydrosferę Polski</b> .....	250
10.1. Wprowadzenie .....	250
10.2. Hydrosfera .....	250
10.2.1. Zasoby hydrologiczne świata .....	250
10.2.2. Światowy potencjał hydroenergetyczny .....	251
10.2.3. Zasoby wodne Polski .....	253
10.2.4. Zasoby hydroenergetyczne Polski .....	253
10.3. Wpływ energetyki wodnej na środowisko wodne Polski .....	254
10.3.1. Zalety i wady DEW .....	254
10.3.2. Wpływ MEW na środowisko .....	256
10.4. Wpływ energetyki konwencjonalnej na hydrosferę Polski .....	257
10.4.1. Skażenie wód produktami spalania .....	258
10.4.2. Straty ekologiczne związane z uzdatnianiem wody .....	258
10.4.3. Straty wody w procesach technologicznych elektrowni .....	259
10.4.4. Straty wody związane z odprowadzaniem żużla .....	259
10.4.5. Pośrednie oddziaływanie energetyki parowej na środowisko .....	259
10.5. Podsumowanie .....	260
Bibliografia .....	260
<b>11. Gospodarka wodna w zakładzie energetycznym</b> .....	262
11.1. Wprowadzenie .....	262
11.2. Gospodarka wodna w elektrociepłowni .....	262
11.3. Charakterystyka obiegów wodnych w energetyce .....	264
11.3.1. Obieg wodno-parowy .....	264
11.3.2. Obieg chłodzący .....	265
11.3.3. Obieg wody ruchowej .....	267
11.3.4. Obieg hydrotransportu żużla .....	267
11.3.5. Obiegi ciepłownicze .....	270
11.4. Wpływ otwartych obiegów w elektrowni na środowisko .....	272
11.4.1. Charakterystyka zagrożeń związanych ze wzrostem temperatury .....	272
11.4.2. Wpływ temperatury na skład chemiczny wód powierzchniowych .....	273
11.4.3. Wpływ temperatury na procesy biologiczne wód powierzchniowych .....	274
11.4.4. Metody walki ze skażeniem bakteryjnym wód chłodzących .....	275
11.4.5. Wpływ otwartego obiegu wód chłodzących na życie flory i fauny .....	275
11.4.6. Wpływ zamkniętych obiegów chłodni na otoczenie .....	277
11.5. Podsumowanie .....	278
Bibliografia .....	279
<b>12. Procesy mechaniczne gospodarki wodnej</b> .....	281
12.1. Wprowadzenie .....	281
12.2. Operacje mechaniczne w czerpaniu i uzdatnianiu wody .....	281
12.2.1. Podział urządzeń mechanicznych stosowanych w gospodarce wodnej .....	282
12.3. Urządzenia oczyszczania wstępnego .....	283
12.3.1. Kraty .....	283
12.3.2. Sita .....	284
12.3.3. Przykłady krat i sit .....	285



12.3.4.	Urządzenia do transportu i zagęszczania skrutek .....	287
12.3.5.	Mikrosita .....	287
12.3.6.	Przykłady mikrosit .....	289
12.4.	Urządzenia separacji z wykorzystaniem różnicy gęstości .....	290
12.4.1.	Podstawy teoretyczne separacji grawitacyjnej .....	290
12.4.2.	Piaskowniki .....	292
12.4.3.	Tłuszczowniki – separatory tłuszczu .....	293
12.4.4.	Flotatory .....	294
12.4.5.	Osadniki .....	297
12.5.	Operacje mieszania cieczy i rodzaje mieszalników .....	298
12.5.1.	Metody mieszania cieczy i rodzaje mieszalników .....	299
12.5.2.	Mieszanie pneumatyczne .....	299
12.5.3.	Mieszanie hydrauliczne .....	301
12.5.4.	Mieszanie mechaniczne .....	303
12.5.5.	Mieszalniki .....	306
12.6.	Napowietrzanie wody – aeratory .....	306
12.6.1.	Podstawy teoretyczne .....	307
12.6.2.	Podział aeratorów .....	310
12.6.3.	Aeratory stosowane do odżelaziania wody .....	314
12.6.4.	Aeratory stosowane do oczyszczania ścieków .....	317
12.7.	Podsumowanie .....	318
	Bibliografia .....	319

### 13. Urządzenia hydromechaniczne i ich wpływ

	<b>na środowisko .....</b>	<b>321</b>
13.1.	Wprowadzenie .....	321
13.2.	Operacje hydrotransportu .....	321
13.2.1.	Podział pomp .....	321
13.2.2.	Pompy wyporowe .....	322
13.2.3.	Pompy wirowe .....	324
13.2.4.	Współpraca pompy z rurociągiem .....	326
13.2.5.	Pompowanie hydromieszanin (płynu i zawiesin) .....	326
13.2.6.	Rodzaje pomp .....	328
13.2.7.	Pompy obiegu głównego zasilania kotłów .....	328
13.2.8.	Pompy obiegów chłodniczych .....	329
13.2.9.	Pompy obiegów pomocniczych i wspomagających .....	330
13.3.	Rurociągi .....	330
13.3.1.	Rury .....	330
13.3.2.	Łączenie rur .....	332
13.4.	Zawory .....	334
13.4.1.	Typy i budowa zaworu .....	335
13.4.2.	Zawory wzniosowe .....	336
13.4.3.	Zawory zasuwowe .....	341
13.4.4.	Zawory klapowe .....	342
13.4.5.	Zawory kurkowe .....	342
13.4.6.	Zawory specjalne .....	345
13.5.	Uszczelnienia i zadławienia .....	346
13.5.1.	Uszczelnienia spoczynkowe .....	346
13.5.2.	Podstawy teoretyczne płaskich uszczelnień kołnierзовych .....	347
13.5.3.	Przykłady spoczynkowych uszczelnień kołnierзовych .....	348
13.5.4.	Uszczelnienia ruchowe (zadławienia) .....	349

13.6. Podsumowanie .....	351
Bibliografia .....	351
<b>14. Operacje fizykochemiczne stosowane w uzdatnianiu wody .....</b>	<b>352</b>
14.1. Wprowadzenie .....	352
14.2. Pierwszy etap uzdatniania wody – klarowanie przez koagulację koloidalnych zanieczyszczeń .....	354
14.2.1. Teoria koloidów .....	355
14.2.2. Koagulacja koloidów .....	357
14.2.3. Koagulanty .....	358
14.2.4. Mechanizm działania koagulantów .....	359
14.2.5. Technologia koagulacji .....	360
14.2.6. Przygotowanie roztworów koagulantów .....	361
14.2.7. Reaktory koagulacyjne .....	362
14.2.8. Komory flokulacji .....	363
14.2.9. Osadzanie zanieczyszczeń i klarowanie .....	366
14.3. Filtracja .....	368
14.3.1. Podstawy teoretyczne filtracji .....	369
14.3.2. Podział filtrów .....	370
14.3.3. Rodzaje filtrów piaskowych stosowanych do uzdatniania wody .....	370
14.4. Mikro i ultrafiltracja .....	372
14.4.1. Mikrofiltracja .....	372
14.4.2. Ultrafiltracja .....	373
14.4.3. Mikro i ultrafiltracja w obiegach chłodzących w energetyce .....	373
14.5. Podsumowanie .....	374
Bibliografia .....	374
<b>15. Procesy chemiczne uzdatniania wody .....</b>	<b>376</b>
15.1. Wprowadzenie .....	376
15.2. Odżelazianie wody .....	377
15.2.1. Formy występowania żelaza w wodzie .....	377
15.2.2. Odżelazianie wód obojętnych i lekko zasadowych .....	377
15.2.3. Odżelazianie wód kwaśnych .....	378
15.2.4. Odżelazianie wód powierzchniowych .....	379
15.2.5. Urządzenia do odżelaziania wody .....	379
15.3. Odmanganianie wody .....	380
15.3.1. Reakcje odmanganiania .....	381
15.3.2. Urządzenia do odmanganiania wody .....	381
15.3.3. Inne metody i uwarunkowania odmanganiania wody .....	382
15.4. Odgazowanie wody .....	382
15.4.1. Korozyjne działanie gazów rozpuszczonych w wodzie .....	383
15.4.2. Metody odgazowania wody .....	384
15.4.3. Odgazowywacze .....	387
15.4.4. Zastosowania praktyczne odgazowywaczy .....	390
15.5. Fotokatalityczne uzdatnianie wody .....	391
15.5.1. Mechanizm fotokatalitycznego oczyszczania wody .....	391
15.5.2. Reaktory do fotokatalitycznego oczyszczania wody .....	392
15.6. Podsumowanie .....	393
Bibliografia .....	393

<b>16. Zmiękczenie wody</b> .....	396
16.1. Wprowadzenie .....	396
16.2. Metody zmiękczenia .....	398
16.3. Dekarbonizacja termiczno-chemiczna .....	398
16.4. Dekarbonizacja chemiczna .....	399
16.4.1. Zmiękczenie wody wapnem .....	400
16.4.2. Zmiękczenie sodą .....	403
16.4.3. Zmiękczenie wody ługiem sodowym .....	404
16.4.4. Zmiękczenie wapnem i sodą .....	405
16.4.5. Metoda fosforanowa .....	406
16.5. Jonitowe zmiękczenie wody .....	409
16.5.1. Charakterystyka wymiany jonowej .....	409
16.5.2. Układy wymienników jonowych .....	412
16.5.3. Jonitowe sposoby zmiękczenia wody .....	412
16.5.4. Budowa wymienników jonowych .....	415
16.5.5. Cykl pracy wymienników jonowych .....	416
16.6. Membranowe techniki zmiękczenia wody .....	418
16.6.1. Przegląd technik membranowych .....	418
16.6.2. Podstawy teoretyczne technik membranowych .....	419
16.6.3. Zjawiska osmozy w demineralizacji wody .....	420
16.6.4. Odwrócona osmoza .....	421
16.6.5. Wykorzystanie odwróconej osmozy w energetyce .....	423
16.6.6. Elektrodializa ED .....	424
16.6.7. Elektrodializa odwracalna EDR .....	426
16.6.8. Elektrodejonizacja .....	428
16.6.9. Membranowe układy hybrydowe demineralizacji wody .....	429
16.7. Analiza wpływu poszczególnych etapów uzdatniania wody na środowisko .....	429
16.7.1. Środowiskowe oddziaływanie gospodarki wodnej elektrociepłowni .....	430
16.7.2. Oddziaływanie mechanicznych metod oczyszczania wody na środowisko .....	430
16.7.3. Wpływ pracy hydromechanicznych urządzeń na środowisko .....	431
16.7.4. Operacje fizykochemiczne uzdatniania wody i ich wpływ na środowisko .....	431
16.7.5. Chemiczne uzdatnianie wody w aspekcie ochrony środowiska .....	432
16.7.6. Oddziaływanie produktów zmiękczenia, dekarbonizacji i demineralizacji wody na środowisko .....	432
16.8. Podsumowanie .....	433
Bibliografia .....	433
<b>17. Litosfera i wpływ na nią energetyki konwencjonalnej</b> .....	435
17.1. Wprowadzenie .....	435
17.2. Gleba .....	436
17.2.1. Procesy glebotwórcze .....	436
17.2.2. Rodzaje gleb .....	437
17.2.3. Charakterystyka gleb .....	438
17.2.4. Gleby antropogeniczne .....	439
17.2.5. Zanieczyszczenia gleby .....	440
17.2.6. Czynniki wpływające na samooczyszczanie się gleby .....	442

17.3.	Wpływ produktów spalania na litosferę .....	442
17.3.1.	Skutki zmiany pH gleby .....	442
17.4.	Odpady z przemysłu paliwowo-energetycznego .....	444
17.4.1.	Zagospodarowanie odpadów przemysłu wydobywco- -paliwowego .....	444
17.4.2.	Wtórne odpady przemysłu energetycznego i ich zastosowanie .....	445
17.4.3.	Charakterystyka popiołów i żużli węglowych .....	446
17.4.4.	Skład chemiczny popiołów i żużli węglowych .....	447
17.4.5.	Promieniotwórczość węgla i produktów jego spalania .....	448
17.5.	Mokre składowanie odpadów paleniskowych .....	450
17.5.1.	Własności filtracyjne popiołów i żużli paleniskowych .....	450
17.5.2.	Charakterystyka wody nadosadowej w składowiskach mokrych .....	451
17.5.3.	Wpływ składowisk popiołów i żużli na hydrosferę .....	452
17.6.	Suche składowanie odpadów paleniskowych .....	453
17.6.1.	Składowanie odpadów paleniskowych z kotłów fluidalnych .....	453
17.6.2.	Wpływ składowisk popiołów i żużli na atmosferę .....	454
17.6.3.	Wpływ stałych produktów spalania na organizmy żywe .....	455
17.6.4.	Metody przeciwdziałające pyleniu składowisk .....	457
17.6.5.	Rekultywacja składowisk odpadów paleniskowych .....	457
17.7.	Składowanie odpadów z odsiarczania spalin .....	459
17.7.1.	Odpady z mokrej IOS .....	459
17.7.2.	Specyfika składowania odpadów z mokrej IOS .....	459
17.7.3.	Odpady z półsuchej technologii odsiarczania spalin .....	460
17.8.	Zagospodarowanie odpadów z przemysłu energetycznego .....	460
17.8.1.	Tradycyjne sposoby recyklingu odpadów z energetyki .....	460
17.8.2.	Typy, rodzaje, sortymenty i gatunki pyłów i żużli .....	461
17.8.3.	Wytwarzanie i zagospodarowanie popiołów lotnych w Polsce .....	463
17.8.4.	Zagospodarowanie UPS w Polsce, UE i USA .....	464
17.9.	Lekkie kruszywa budowlane z suchych popiołów lotnych .....	465
17.9.1.	Technologia pollytag .....	465
17.9.2.	Własności mechaniczne kruszyw lekkich pollytag .....	467
17.9.3.	Mit o radioaktywności kruszyw lekkich pollytag .....	467
17.9.4.	Zalety kruszyw lekkich pollytag .....	469
17.9.5.	Proekologiczność pollytagu i prognozy jego dalszych zastosowań ....	470
17.9.6.	Postscriptum .....	471
17.10.	Technologia otrzymywania z żużlu i popiołu budowlanej wełny mineralnej ....	472
17.10.1.	Chińska jednoczesna produkcja energii i materiałów budowlanych ...	472
17.10.2.	Technologia produkcji materiałów budowlanych z ciekłego żużla ....	472
17.10.3.	Wełna mineralna z ciekłego żużla .....	473
17.11.	Podsumowanie .....	475
	Bibliografia .....	476
	Skorowidz .....	479

---

# Wstęp

---

Wiedza z zakresu ochrony środowiska, w ujęciu techniczno-technologicznym, nie jest zagadnieniem monotematycznym, lecz jak najbardziej interdyscyplinarnym. Zarówno szeroko rozumiane określenie – środowisko, jak i pozostałe człony tytułu tej książki, są pojęciami, które niosą w sobie głęboki ładunek tematyczny, obejmujący, oprócz: biologii, chemii i fizyki, także: technologię, biotechnologię, agrotechnikę, ekologię, sozotechnikę, mechanikę, energetykę oraz wiele innych dziedzin wiedzy i techniki. Zebranie ich razem w jednej książce poświęconej ochronie środowiska wydawało się zagadnieniem nierealnym. Dlatego technologie ochrony środowiska w ujęciu chemicznym, fizycznym, mechanicznym traktowane były dotychczas osobno. Próbę ich całościowego zestawienia, w jednym ujęciu, podjęto w niniejszym podręczniku po raz pierwszy. Jeżeli nawet próba ta nie do końca się powiedzie, to i tak spełni swoje inspirujące zadanie, zwracając uwagę na rangę techniczno-technologicznych aspektów w praktycznym podejściu do ochrony środowiska.

Nie ma więc w tej książce szczegółowych opisów technologii i zagadnień, które są zdaniem autorów jedynie faktami medialnymi, wypreparowanymi z ogromnej liczby wyników badań pod kątem ich przydatności do udowodnienia założonej z góry tezy. Dotyczy to zwłaszcza promowanych technologii utylizacji ditlenku węgla, np.: przez wtłaczanie go do wyeksploatowanych kopalni, złóż ropy czy do oceanów. Straty środowiskowe bezpośrednie oraz pośrednie, związane z wyprodukowaniem energii do realizacji tego i podobnych, zamawianych, badanych i realizowanych na doraźne polityczne zapotrzebowanie pomysłów, są ewidentne i wymierne, a zyski środowiskowe jedynie wyimaginowane i nie do udowodnienia.

W książce tej są natomiast przedstawione techniczne i technologiczne zagadnienia, które zdaniem autorów, są faktycznie związane z ochroną atmosfery, hydrosfery i litosfery Ziemi. Każde z omawianych zagadnień poprzedza wstęp, w postaci nawiązania do podstaw teoretycznych, następnie są przedstawione metody jego realizacji z podaniem aparatów i urządzeń oraz parametrów technologicznych. Zakończeniem tematu jest charakterystyka środowiskowa i ekonomiczna omawianych proekologicznych technologii z podaniem miejsca ich realizacji.



---

# Wprowadzenie

---

Wykładniczo rosnąca konsumpcja energii, wzrastające skażenie środowiska oraz kurczące się zasoby paliw kopalnych mają swój wspólny mianownik, którym jest energetyka i przemysł. To ona korzysta z nośników energii, których energię chemiczną przekształca, w wyniku konwersji, w prąd elektryczny i ciepło. Negatywną konsekwencją tej przemiany są produkty odpadowe, takie jak: gazy spalinowe, popioły i żużle, ścieki oraz ciepło, które przedostając się do atmosfery, wody i gleby powodują degradację środowiska. Na tym nie kończą się możliwości negatywnego oddziaływania energetyki i przemysłu na ekosystem. Mogą być one również odpowiedzialne za: deficyt wody, zakłócanie lokalnej i regionalnej równowagi hydrologicznej, dewastację terenu i szkody górnicze, związane z wydobywaniem paliw i składowaniem żużli i popiołów. Do tego dochodzą również problemy z liniami przesyłowymi (z nie do końca zbadanymi oddziaływaniami na środowisko), które wraz z kominami przypiływowymi, chłodniami kominowymi i rurociągami szpecą krajobraz i powodują wiele innych szkód.

Energetyka funkcjonuje jako krajowy system energetyczny KSE, który łączy w jedną funkcjonalną całość obiekty do pozyskiwania, transportu i przetwarzania nośników energii, zakłady energetyczne (elektrownie, ciepłownie i elektrociepłownie), sieci przesyłowe energii elektrycznej i ciepłej oraz urządzenia do użytkowania wyprodukowanej energii.

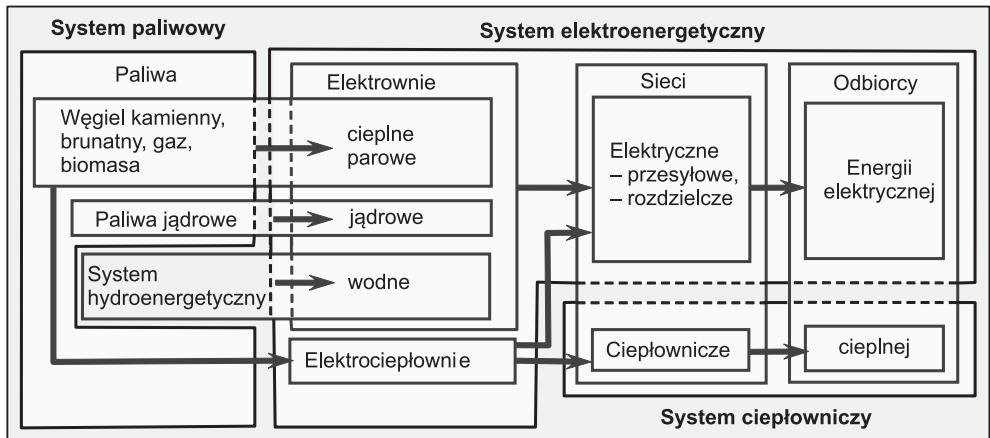
Celem KSE jest dostarczanie do odbiorców, zarówno przemysłowych, jak i indywidualnych, energii użytecznej w wymaganej ilości i o odpowiedniej jakości. W tabeli 1 przedstawiono, na podstawie Raportów KSE, strukturę mocy zainstalowanej w latach 2009÷2013 z uwzględnieniem udziału jednostek wytwórczych centralnie dysponowanych (JWCD) i pozostałych (nJWCD).

W funkcjonowaniu systemu energetycznego można wyodrębnić wzajemnie powiązane ze sobą podsystemy, takie jak podsystem paliw stałych, ciekłych, gazo-energetyczny, elektroenergetyczny i ciepłno-energetyczny i inne, jak to pokazano w uproszczonym schemacie systemu elektroenergetycznego na rys. 1.

Najważniejszym elementem KSE są elektrownie, które w zależności od rodzaju wykorzystywanej energii pierwotnej dzielą się na: ciepłne, wodne i niekonwencjonalne (jądrowe, geotermalne, słoneczne itd.).

**Tabela 1.** Struktura mocy zainstalowanej w KSE [MW], wg Raportu KSE 2014

	31.12.2010	31.12.2011	31.12.2012	31.12.2013
Elektrownie zawodowe, w tym:	32 304	32 937	32 942	35 845
– elektrownie zawodowe ciepłne, w tym:	30 083	30 716	30 721	30 120
– na węglu kamiennym	20 377	20 152	20 152	19 812
– na węglu brunatnym	8 772	9 630	9 635	9 374
– gazowe	934	934	934	934
– elektrownie zawodowe wodne	2 221	2 221	2 221	2 221
Elektrownie przemysłowe	2 486	2 486	2 486	3 504
Źródła odnawialne	966	1 943	2 617	2 561
<b>Ogółem</b>	<b>35 756</b>	<b>37 367</b>	<b>38 046</b>	<b>38 406</b>
JWCD	25 429	26 062	25 498	25 052
nJWCD	10 327	11 305	12 549	13 354

**Rys. 1.** Uproszczony schemat systemu elektroenergetycznego

## Elektrownie ciepłne

Elektrownie ciepłne, zarówno konwencjonalne, jak i niekonwencjonalne (jądrowe), produkują energię elektryczną z paliw kopalnych (węgiel kamienny, brunatny, gaz i ropa naftowe, ale również z izotopu uranu  $^{235}\text{U}$ ) oraz paliw organicznych (biomasa, biogaz, potencjalnie biodiesel i bioetanol). Konwersja energii w elektrowniach ciepłych przebiega etapami:

- w kotle parowym, reaktorze lub palniku z energii chemicznej uzyskuje się energię ciepłą;
- w turbinie – z energii ciepłej energię mechaniczną;
- w generatorze (prądniczy) zachodzi konwersja energii mechanicznej w elektryczną.



W zależności od sposobu wytwarzania energii cieplnej elektrownie ciepłe dzielą się na:

- parowe – klasyczne (konwencjonalne), w których energia spalania paliw w kotle jest wykorzystywana do produkcji przegrzanej pary wodnej, będącej czynnikiem roboczym w turbinie;
- parowe – jądrowe, w których energii do wytwarzania pary wodnej dostarczają reakcje rozszczepienia lub syntezy jądrowej;
- gazowe, w których czynnikiem roboczym, napędzającym turbinę gazową lub silnik spalinowy, są gazowe produkty spalania paliw.

Kolejny podział elektrowni ciepłych wyznacza sposób i rodzaj oddawanego ciepła, gdyż zgodnie z II Zasadą Termodynamiki nie można całego wyprodukowanego ciepła zamienić w pracę, lecz część tego ciepła musi być wyprowadzona z układu. W myśl tego kryterium elektrownie dzielą się na:

- kondensacyjne, w których zrzut ciepła odbywa się w chłodniach kominowych lub do zbiorników wodnych;
- kogeneracyjne (elektrociepłownie), które produkują jednocześnie energię elektryczną i ciepłą; zamiast zrzucić energię ciepłą do środowiska sprzedają ją w postaci pary lub gorącej wody, rozprowadzanych sieciami ciepłowniczymi.

## Elektrownie wodne

Elektrownie wodne służą do produkcji energii elektrycznej za pomocą turbin wodnych, sprzężonych z generatorami. Ich siłą napędową są energia potencjalna i kinetyczna wody. Wśród elektrowni rzecznych rozróżnia się następujące elektrownie:

- przepływowe, które nie mają zbiornika magazynującego wodę i dlatego nie można w nich regulować, ani czasu ich pracy, ani wydajności;
- regulacyjne zawodowe z dużym zbiornikiem wodnym, umożliwiającym regulację ich pracy w cyklu dobowym lub kilkudniowym, który dodatkowo stanowi zabezpieczenie przeciwpowodziowe;
- regulacyjne lokalne z małym zbiornikiem wodnym z możliwością jedynie dobowej regulacji czasu pracy, z uwzględnieniem godzin tzw. szczytu;
- regulacyjne kaskadowe, które dzięki postawieniu na jednej rzece kilku zapór i utworzeniu wielu zbiorników magazynowania wody dają największe możliwości regulacyjne; w Polsce budowa kaskady na Wiśle rozpoczęła się i skończyła tamą we Włocławku;
- szczytowo-pompowe, które służą do przetwarzania w okresie nocnym, kłopotliwej w magazynowaniu, energii elektrycznej na energię potencjalną wody, pompowanej do górnego zbiornika, aby wykorzystać ją do produkcji energii elektrycznej w ciągu dnia, w okresie szczytowego zapotrzebowania;

- ❑ zbiornikowe z członem pompowym z naturalnym spływem wody z kaskadowo usytuowanymi jeziorami; okresowe przepompowywanie wody z dolnych do górnych jezior umożliwia, podobnie jak w przypadku elektrowni szczytowo-pompowych, magazynowanie tańszej elektrycznej energii nocnej i odzyskiwanie jej w okresie szczytowym.

Najbardziej popularne elektrownie wodne, to elektrownie lądowe, ale hydrosfera Ziemi nie kończy się na rzekach i jeziorach. Potencjał energetyczny wód w morzach i oceanach jest znacznie większy niż w rzekach, jednak techniczne jego wykorzystanie jest znacznie bardziej skomplikowane. Nie przeszkadza to jednak badać, konstruować i udoskonalać elektrownie morskie [1.31], które dzielą się na:

- ❑ pływowe, które wykorzystują energię przyptyków i odpływów oceanicznych; pływy te, zmieniające swój kierunek co 12 h 25 min, mogą napędzać turbiny wodne, przypominające kształtem turbiny wiatrowe, lub włączać wody oceaniczne do rzek intensyfikując pracę elektrowni rzecznej (elektrownia przy ujściu rz. Rance k. Saint Malo w Bretanii we Francji);
- ❑ prądowe, które mogą być napędzane prądami oceanicznymi np.: Zatokowym, Równikowym Wstecznym, Kuro Siwo i innymi; są duże obawy przed upowszechnieniem się tych elektrowni, gdyż mogłyby one zahamować naturalną cyrkulację i wpłynąć na zmianę klimatu; w przypadku energetycznego wykorzystania Golfstromu u wybrzeży Florydy, w Wielkiej Brytanii, Irlandii i w Norweskich Fior-dach klimat niewiele by się wówczas różnił od grenlandzkiego;
- ❑ wykorzystujące energię falowania, którą przetwarzają na energię elektryczną; w zależności od zastosowanej metody konwersji różnią się wśród nich wersje indukcyjną, pneumatyczną, hydrauliczną, mechaniczną i inne;
- ❑ dyfuzyjne, których ciśnienie dyfuzji, między zasoloną wodą oceaniczną i słodką rzeczną, które są przedzielone półprzepuszczalną membraną może napędzać silnik dyfuzyjny, połączony z generatorem;
- ❑ temperaturowe, których siłą napędową jest różnica temperatur wody na powierzchni i w głębi oceanu; różnicę tę można dzięki układowi ORC wykorzystać do produkcji energii elektrycznej [1.31].

## Elektrownie niekonwencjonalne

Oprócz wymienionych wyżej elektrowni jądrowych i morskich, do elektrowni niekonwencjonalnych można zaliczyć również elektrownie:

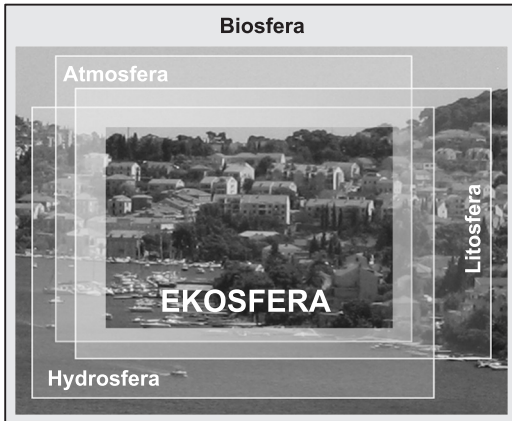
- ❑ słoneczne cieplne, które w zależności od sposobu rozmieszczenia absorberów promieniowania słonecznego dzielą się na: zcentralizowane z jednym absorberem (wytwornicą pary), na którym ogniskuje się promieniowanie z wielu lustrowanych koncentratorów oraz zdecentralizowane, w których czynnik roboczy jest podgrzewany płynąc szeregowo przez liniowy absorber z rynnowym koncentratorem lub przez szereg koncentratorów talerzowych;

- ❑ słoneczne fotowoltaiczne, w których konwersja energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną odbywa się bezpośrednio z pominięciem etapów pośrednich (wytwarzanie pary, napędzanie turbiny, otrzymywanie i schładzanie kondensatu); pomimo to ich sprawność jest niższa niż elektrowni słonecznych cieplnych; jest to konsekwencja własności fotoelektrycznych materiałów półprzewodnikowych opartych na krzemie; być może nowa generacja tych materiałów usunie tę wadę.
- ❑ wiatrowe, które w zależności od mocy mogą być zawodowymi (> 1 MW) lub MEW (małymi elektrowniami wiatrowymi) (< 1 MW), natomiast ze względu na lokalizację dzielą się one na: lądowe (*onshore*) i morskie (*offshore*).
- ❑ paliwowe, ich nazwa pochodzi od ogniw paliwowych, w których zachodzą procesy utleniania paliw (wodoru, metanu, węglowodorów, metanolu, kwasu mrówkowego itd.) ale w elektrolicie, bez płomienia, spalin i odpadowego ciepła. Ich sprawność bezpośredniej konwersji energii chemicznej paliwa na energię elektryczną jest wyższa niż w tradycyjnych elektrowniach cieplnych, których sprawność nie może przekroczyć wartości odwracalnego idealnego obiegu Carnota; więcej informacji na ten temat w pracy [1.31].
- ❑ geotermalne, które w zależności od rodzaju energii geotermalnej dzielą się na elektrownie hydrotermiczne, zasilane wodą geotermalną i petrotermiczne, korzystające z ciepła ogrzanych skał, z których po wstrzyknięciu wody wypływa przegrzana para wodna [1.31].

## Wpływ energetyki i przemysłu na środowisko

Oddziaływanie każdego elementu systemu energetyczno-przemysłowego nie jest środowisku obojętne, najwyżej może być ono mniej lub bardziej szkodliwe. W przypadku elektrowni parowych opalanych węglem skażenie to jest ewidentne. Również łatwo przewidzieć szkody jakie by wyrządziła morska elektrownia prądowa korzystająca z energii Golfstromu i hamująca jego przepływ. Kontrowersje budzi też energetyka jądrowa, mająca wielu zdecydowanych przeciwników, ale również oddanych zwolenników. Jednak analizowanie pod tym kątem pojedynczo każdego elementu systemu energetyczno-przemysłowego sprowadzi się do inwentaryzacji, której wynik nie poprawi stanu środowiska, a jedynie zwiększy chaos i bałagan w przywracaniu jego pierwotnego stanu.

Mając to na uwadze, zamiast wciąż rozpamiętywać, jak to energetyka i przemysł szkodzą środowisku, skupiono się na tym, jak to środowisko przed tymi negatywnymi skutkami chronić. Podmiotem uczyniono więc, nie energetykę, lecz ekosferę wraz z jej elementami: atmosferą, hydrosferą i litosferą (rys. 2). Elementy te są, przez biosferę, wzajemnie powiązane, jednak są one na tyle specyficzne, że wymagają indywidualnego potraktowania. Dlatego zagadnienia ochrony powietrza, wody i gleby przed skażeniami, związanymi z produkcją energii i jej przemysłowym wykorzystaniem, stanowią tematy osobnych rozdziałów.



**Rys. 2.** Ekosfera i jej powiązane z biosferą elementy

Najwięcej uwagi poświęcono ochronie powietrza, gdyż produkty spalania bezpośrednio do niego się przedostają, w postaci pyłów, tlenków węgla, siarki i azotu i innych zanieczyszczeń. Ponieważ ekosystem nie jest jednak układem zamkniętym, to produkty skażenia powietrza trafiają następnie do wód i do gleby.

Ochrona hydrosfery w oparciu o potencjalne i rzeczywiste zagrożenia, będące skutkiem funkcjonowania zakładów energetyczno-przemysłowych, stanowi temat kolejnych, już mniej obszernych, rozdziałów.

Zagadnienia poświęcone ochronie litosfery, przed odpadami głównie związanymi z energetyką (pyłami, żużłami, metalami ciężkimi i innymi), stanowią końcowe rozdziały książki.

---

# 4. Odpylanie i oczyszczanie mokre

---

## 4.1. Wprowadzenie

Mokry proces wychwytywania pyłu z powietrza jest poprzedzony jego koagulacją w skupiska i aglomeraty o większych wymiarach i ciężarze niż pojedyncze ziarna pyłu. Dzięki temu odpylanie mokre jest skuteczniejsze od suchego, zarówno z punktu widzenia wydajności odpylania, jak i wielkości ziaren usuwanego pyłu.

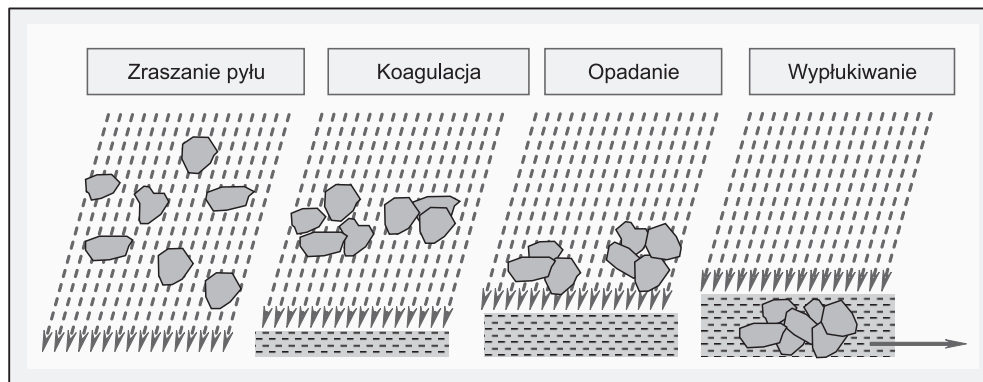
Odpylaniu mokremu towarzyszy jednocześnie proces oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń gazowych, które rozpuszczają się w cieczy zraszającej. Rozpuszczanie to można przyspieszyć lub selektywnie zmodyfikować zastępując proces fizycznej absorpcji w wodzie chemisorpcją w roztworach odpowiednich związków chemicznych.

## 4.2. Mechanizm odpylania mokrego

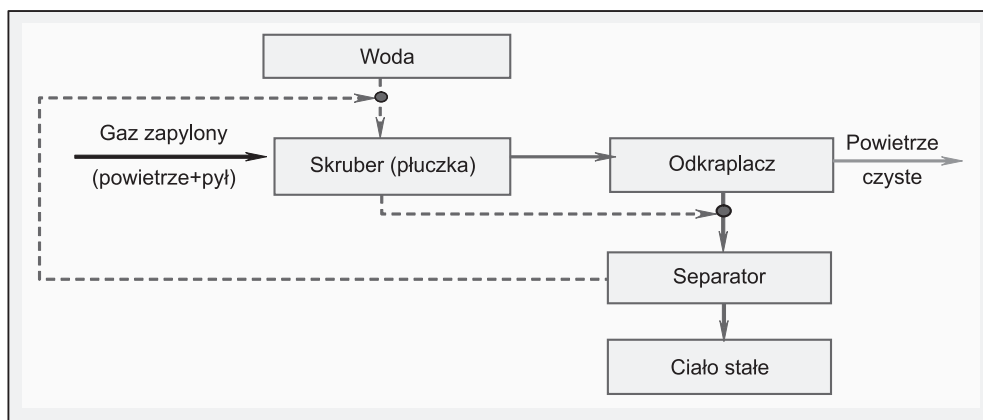
W odpylaniu mokrym, ziarna pyłu są wychwytywane na kroplach rozpylanej cieczy. Proces ten składa się z etapów, pokazanych na rys. 4.1 i przebiega zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 4.2.

Odpylacze do odpylania mokrego, zwane również płuczkami lub skruberami, dzielą się na dwie grupy: bez wypełnienia i z wypełnieniem. W każdej z tych grup można wyszczególnić cztery rodzaje, jak pokazano to na rys. 4.3.

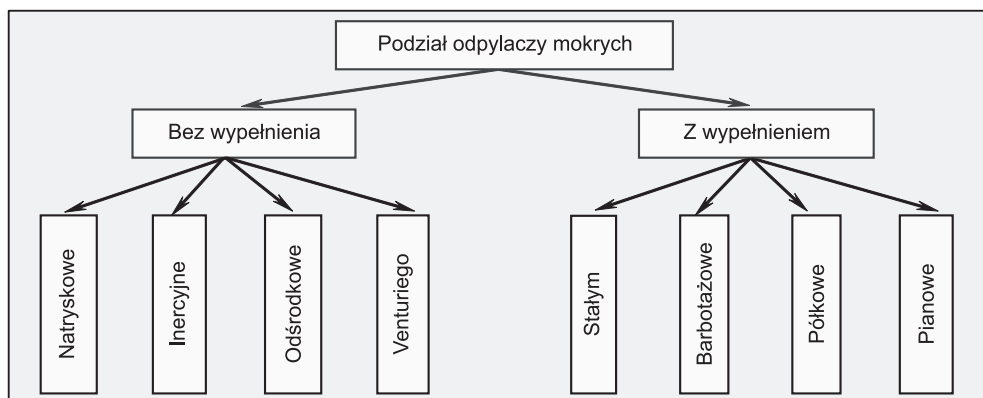
Płuczki służą do wstępnego odpylania gazów. Są one cylindrycznymi pionowymi aparatami o wysokości 20÷40 m. Sprawność odpylania płuczek bez wypełnienia wynosi  $\eta = 30\div 60\%$ , wydajność odpylanego gazu  $Q = 5000\div 15\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ , aspadek ciśnienia gazu i tym samym spręż wentylatora tłoczącego  $\Delta p = 100\div 150\ \text{Pa}$ . Natomiast dane techniczne płuczek z wypełnieniem wynoszą odpowiednio:  $\eta = 80\div 95\%$ ,  $Q = 5000\div 20\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ ,  $\Delta p = 100\div 500\ \text{Pa}$ . W obydwu grupach odpylaczy średnie zapotrzebowanie wody wynosi:  $1\div 4\ \text{m}^3/1000\ \text{m}^3$  gazu.



Rys. 4.1. Etapy procesu odpylania mokrego



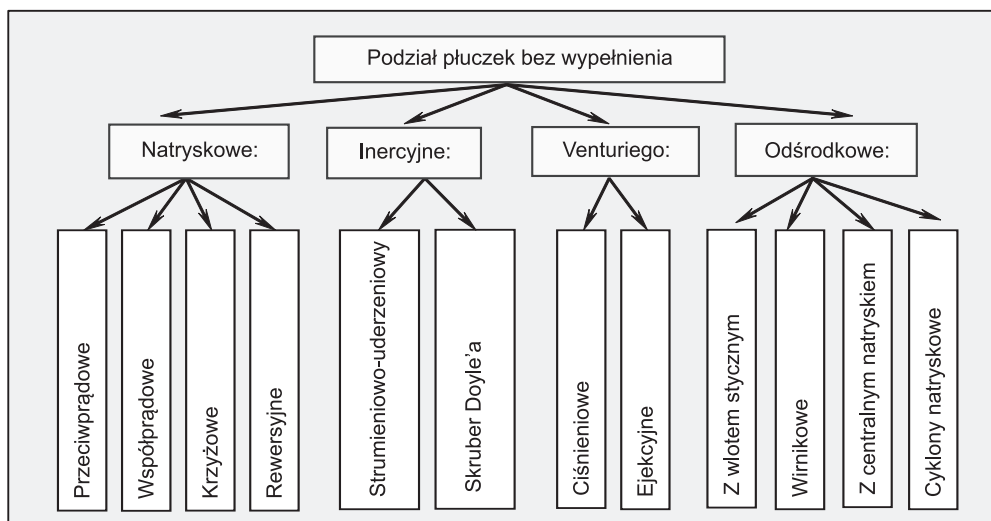
Rys. 4.2. Schematyczne przedstawienie procesu odpylania mokrego



Rys. 4.3. Podział odpylaczy mokrych

### 4.3. Płuczki bez wypełnienia – Skrubery

Wśród skrubarów natryskowych można wyróżnić: współprądowe, przeciwprądowe, krzyżowe i rewersyjne. Inercyjne dzielą się na: strumieniowo-uderzeniowe i skrubar Doyle'a. Natomiast skrubary odśrodkowe mogą być: z wlotem stycznym, wirnikowe, z centralnym natryskiem i cyklony natryskowe. Z kolei skrubar Venturiego ma dwa typy: ciśnieniowy i eżejktorowy. Podział ten jest przedstawiony na rys. 4.4.



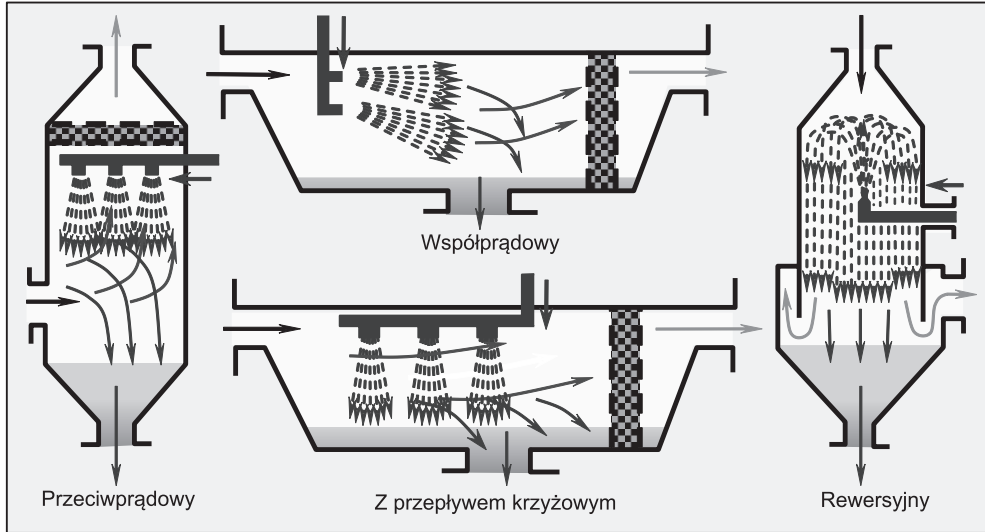
Rys. 4.4. Podział odpylaczy mokrych bez wypełnienia

#### 4.3.1. Odpylacze natryskowe

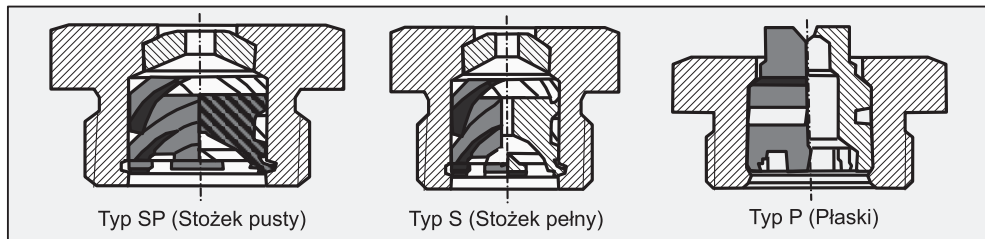
W zależności od kierunku ruchu kropeł wody w stosunku do kierunku ruchu zapyłonego gazu rozróżnia się odpylacze: współprądowe, przeciwprądowe, krzyżowe i rewersyjne. Schematy ich działania są pokazane na rys. 4.5.

Natrysk, w postaci pyłu wodnego, jest wytwarzany w dyszach hydraulicznych, spryskiwaczach sitkowych ciśnieniowych lub grawitacyjnych. Prędkość początkowa kropeł jest proporcjonalna do spadku ciśnienia w cieczy  $(\Delta p)^{1/2}$ .

Sprawność odpylnia i ilość zużytej wody zależy od skuteczności rozpylania, którą wyznacza wielkość kropeł. W odpylaczach mokrych bardzo istotnym zagadnieniem jest jakość i niezawodność dysz. Na rysunku 4.6 pokazano trzy typy dysz rozpylających wodę o różnych kształtach strugi: stożek pusty, stożek pełny i strumień płaski. Nominalna wydajność dysz f-my ZP Stalmet dla  $p = 1$  MPa wynosi  $0,1 \div 0,25$  dm<sup>3</sup>/s [4.9]. Budowa dysz stosowanych w napowietrzaniu wody, podczas jej odżelaziania lub odmanganiania, jest pokazana na rys. 12.32 i 12.33.



Rys. 4.5. Schematy odpylaczy natryskowych



Rys. 4.6. Zunifikowany typoszereg dysz zraszających f-my ZP Stalmet [4.9]

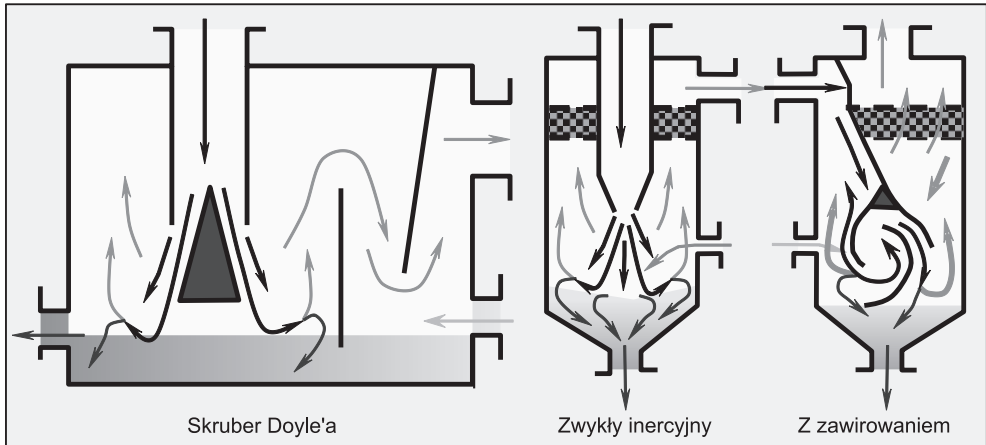
### 4.3.2. Mokre odpylacze inercyjne

Schematy trzech podstawowych typów mokrych odpylaczy inercyjnych są przedstawione na rys. 4.7.

Odpylanie polega na uderzeniu z dużą prędkością zapyłonego gazu w powierzchnię cieczy. Powoduje to zdyspergowanie wody i powstanie aerozolu wodno-powietrzno-pyłowego. W aerozolu tym dochodzi do koagulacji zwilżonego pyłu w większe i cięższe aglomeraty, które ulegają wytrąceniu podczas zmiany kierunku przepływu mieszaniny, podobnie, jak to odbywa się w suchych odpylaczach inercyjnych.

Parametry techniczne mokrych odpylaczy inercyjnych są następujące: minimalna prędkość przepływu odpylanego gazu  $w = 15 \text{ m/s}$ , wielkość kropeł  $300 \div 400 \mu\text{m}$ , opory przepływu gazu  $\Delta p = 750 \div 1500 \text{ Pa}$ , zużycie wody  $Q_w = 0,03 \div 0,15 \text{ dm}^3/\text{m}^3$  gazu oraz cyrkulacja cieczy z osadem  $3 \div 4 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ .





Rys. 4.7. Typy mokrych odpylaczy inercyjnych

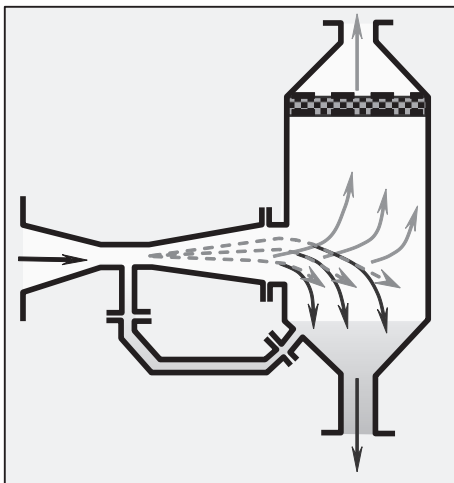
### 4.3.3. Skrubery Venturiego

Znane są dwa podstawowe typy skrubarów ze zwężką Venturiego: ciśnieniowo-rozpraszający (rys. 4.8) i eżektorowy (rys. 4.9).

#### Skruber ciśnieniowo-rozpraszający

W odpylaczu tym zapyłony gaz przepływa z dużą prędkością ( $w = 45 \div 120$  m/s) przez dyszę. Zgodnie z równaniem Bernoulliego w przewężeniu dyszy, gdzie jest największa prędkość, ciśnienie spada. Wytworzone podciśnienie zasysa wodę oraz powoduje jej jednoczesne odparowanie w zapyłonym gazie.

Następnie, gdy mieszanina gazu i pary wodnej miną przewężenie dyszy, prędkość przepływu się zmniejsza a ciśnienie wzrasta. W tych warunkach dochodzi do skroplenia pary wodnej na cząsteczkach pyłu, które są zarodkami kondensacji.



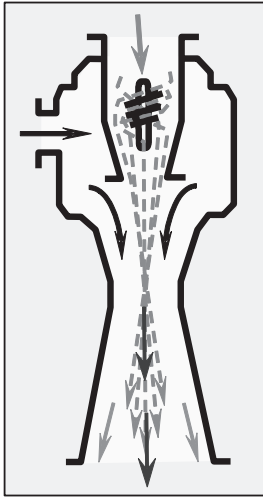
Rys. 4.8. Skruber Venturiego ciśnieniowo-rozpraszający

W dalszej części krople wody z pyłem opadają na dno skrubera, a czysty gaz po przejściu przez łącznik kropel opuszcza odpylacz.

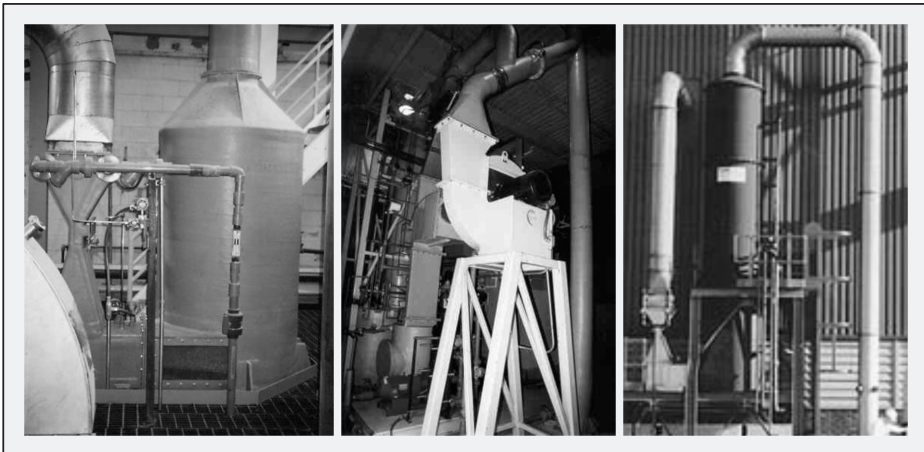
### Skruber eżektorowy

W odpylaczu tym, przedstawionym na rys. 4.9, to woda o ciśnieniu  $p = 0,6 \div 1,2$  MPa rozproszona jest w dyszy hydraulicznej i zasysa zapyłony gaz. Mieszanina gazu i wody ulega zawirowaniu i trafia do dyszy właściwej, gdzie zwiększa się jej prędkość i maleje ciśnienie. W tych warunkach dochodzi do dalszego odparowania wody. W dalszej części odpylacza proces jest podobny do zachodzącego w poprzednim skruberze: kondensacja wody na pyłe i jego przejście do szlamu. Woda z nad osadu jest zwracana do dalszego zraszania, a szlam jest kierowany na prasy odwadniające.

Na rysunku 4.10 pokazano przykładowe instalacje przemysłowe do odpylania z zastosowaniem skrubierów Venturiego [4.6, 4.7].



Rys. 4.9. Skrubier eżektorowy

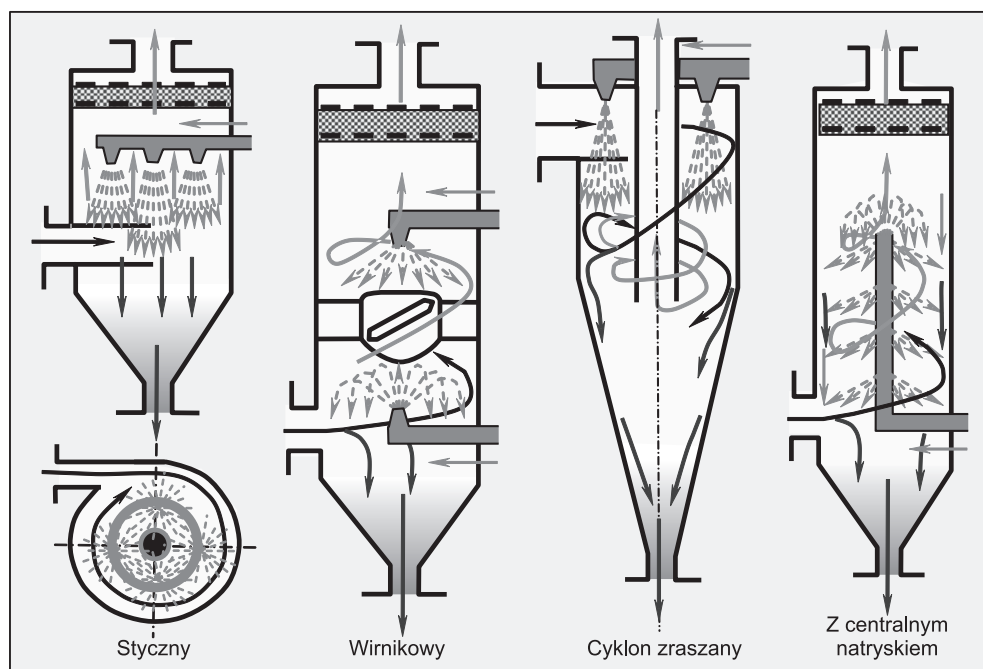


Rys. 4.10. Przykłady przemysłowych zastosowań mokrych odpylaczy Venturiego [4.6, 4.7]

#### 4.3.4. Skrubery odśrodkowe

Typy mokrych odpylaczy odśrodkowych są pokazane na rys. 4.11.

Zasada działania mokrych odpylaczy odśrodkowych jest taka sama jak odpylaczy inercyjnych odśrodkowych suchych, a jedyna różnica polega na zwilżeniu pyłu, co powoduje jego skuteczniejsze usunięcie z zanieczyszczonego gazu [4.1].



Rys. 4.11. Typy skruberów odśrodkowych

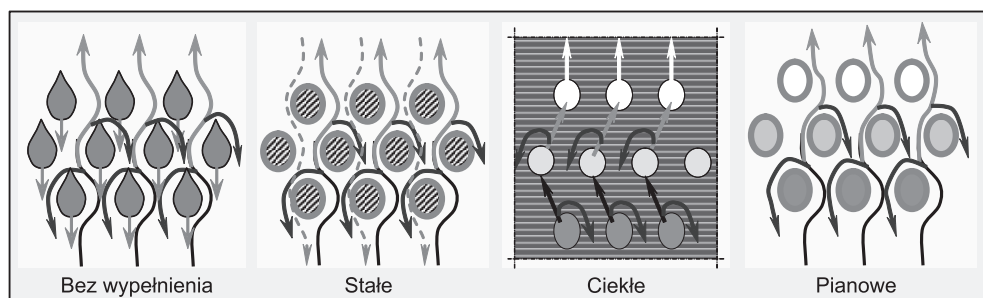
Parametry skruberów odśrodkowych są następujące: prędkość wlotowa gazu zapyłonego  $w = 15 \div 45$  m/s, wielkość ziaren pyłu do  $2 \div 3$   $\mu\text{m}$ ,  $\eta > 90\%$ ,  $\Delta p = 400 \div 1500$  Pa, zużycie wody  $Q_w = 0,25 \div 1,4$   $\text{dm}^3/\text{m}^3$  gazu i ciśnienie rozpylania  $p = 275 \div 700$  kPa.

#### 4.4. Skrubery z wypełnieniem do odpylania i oczyszczania gazu

W odpylaczach mokrych skuteczność odpylania zależy od wielkości powierzchni kontaktu gaz-ciecz. W skruberach bez wypełnienia: natryskowych, inercyjnych i odśrodkowych rozwinięcie powierzchni uzyskuje się poprzez zdyspersję cieczy w gazie.

### 4.4.1. Sposoby rozwinięcia powierzchni wymiany masy

Wypełnieniem w odpylaczach mokrych może być ciecz lub złożone ciała stałego zwilżane cieczą. Zadaniem wypełnienia jest zwiększenie powierzchni kontaktu oczyszczanego gazu z cieczą płuczącą. Na rysunku 4.12 pokazano sposoby rozwinięcia powierzchni w skruberze bez wypełnienia oraz trzy sposoby realizacji tego za pomocą wypełnienia: stałego, ciekłego i pianowego.



**Rys. 4.12.** Sposoby rozwinięcia powierzchni kontaktu gaz-ciecz w skruberach do odpylania lub oczyszczania gazów bez wypełnienia oraz z wypełnieniem stałym, ciekłym lub pianowym

#### Bez wypełnienia

W skruberach bez wypełnienia w celu rozwinięcia powierzchni kontaktu w oczyszczanym gazie rozpyła się ciecz. Kropelki zdyspergowanej cieczy są omywane przez gaz i w wyniku wymiany masy składniki gazu, w postaci zanieczyszczeń zarówno stałych, jak i gazowych, przechodzą do cieczy.

#### Wypełnienie stałe

Są to elementy (kulki, ziarna, kształtki itd.) o możliwie dużej powierzchni, lekkie i nie przylegające do siebie. Ich złożone tworzy porowatą strukturę zraszaną od góry płynem, przez kanaliki wypełnienia przeciska się oczyszczany gaz. Im większa powierzchnia kanalików, tym większa powierzchnia kontaktu i mniejsza ilość zużywanego płynu.

#### Wypełnienie ciekłe

Rozwinięcie powierzchni w wypełnieniu ciekłym uzyskuje się przez zdyspergowanie pęcherzyków zanieczyszczonego gazu w cieczy. Im mniejsze będą te pęcherzyki, tym więcej i szybciej składniki gazu przenikną do cieczy.

#### Wypełnienie pianowe

W tym przypadku skrubier nie jest w całości wypełniony płynem. Płynu jest w nim tylko tyle, ile potrzeba do wytworzenia piany z pęcherzyków odpylanego gazu. Rozwinięcie powierzchni kontaktu gazu z płynem na powierzchni piany jest bardzo skuteczne nawet przy małej ilości zużytego płynu. Wymaga jednak stosowania środków spieniających, zmieniających napięcie powierzchniowe (detergentów, my-

deł, saponinów), które mogą stanowić zagrożenie dla środowiska, już nie powietrza, ale wody.

#### 4.4.2. Rodzaje wypełnień stałych

Najbardziej popularnym wypełnieniem stałym są pierścienie Raschiga, Białeckiego, Tok-Pak, Pall, siodełka Intalox, pokazane na rys. 4.13.



**Rys. 4.13.** Rodzaje wypełnień stałych do rozwinięcia powierzchni kontaktu gazu z płynem w skrubkach, płuczkach oraz w kolumnach rektyfikacyjnych

Wypełnienia stałe przedstawione na rys. 4.13, są jedynie przedstawicielami najbardziej znanych i opatentowanych grup wypełnień, w których dominuje zróżnicowanie ich kształtu (nieregularne, cylindryczne, kuliste, siodełkowe, spiralne). W każdej z tych grup znajduje się od kilku do kilkudziesięciu różnych modyfikacji kształtów.

Wypełnienia stałe można także podzielić ze względu na materiał, z którego zostały wykonane. Najbardziej popularne materiały to: piasek, koks, trociny, ceramika, metal, szkło, tworzywa sztuczne.

#### 4.4.3. Skrubery z wypełnieniem stałym

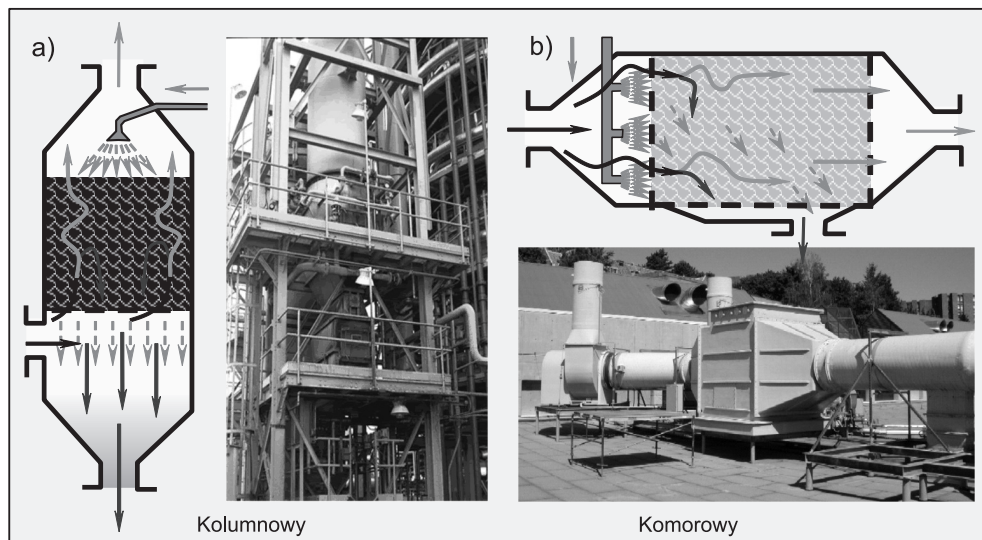
Są dwa rodzaje wypełnień stałych w skrubkach: wypełnienie nieruchome w postaci złoża spoczywającego na perforowanym dnie sitowym oraz ruchome unoszone przez płynący ku górze gaz [4.3, 4.6].

##### Skrubery z wypełnieniem nieruchomym

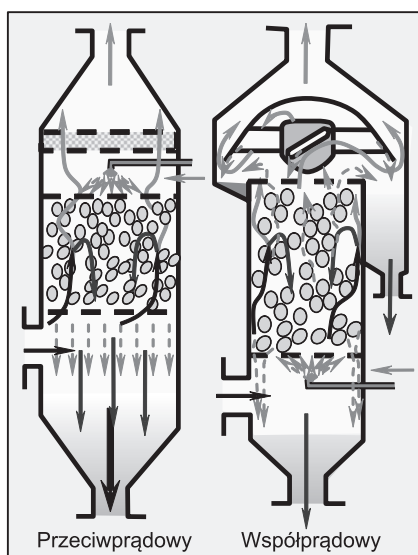
Skrubery z nieruchomym wypełnieniem mogą mieć dwa kształty: kolumnowy cylindryczny, pionowy i komorowy, prostokątny, poziomy. Schematy i widoki tych skrubków przedstawia rys. 4.14.

##### Skrubery z wypełnieniem ruchomym

Są dwa typy skrubków z wypełnieniem ruchomym: fluidalne ze zraszaniem przeciwpłynowym i fluidalne ze zraszaniem współpłynowym. Wypełnieniem są w nich lekkie kulki plastikowe o średnicy  $d = 20 \div 50$  mm i gęstości  $\rho = 100 \div 1000$  kg/m<sup>3</sup> pełne lub puste w środku. Schematy tych skrubków są pokazane na rys. 4.15.



Rys. 4.14. Schematy i widok skruberów z nieruchomym (stacjonarnym) złożem: a) kolumnowy piono-owy, b) komorowy poziomy



Rys. 4.15. Schematy skruberów z wypełnieniem ruchomym

### Charakterystyka skruberów z wypełnieniem

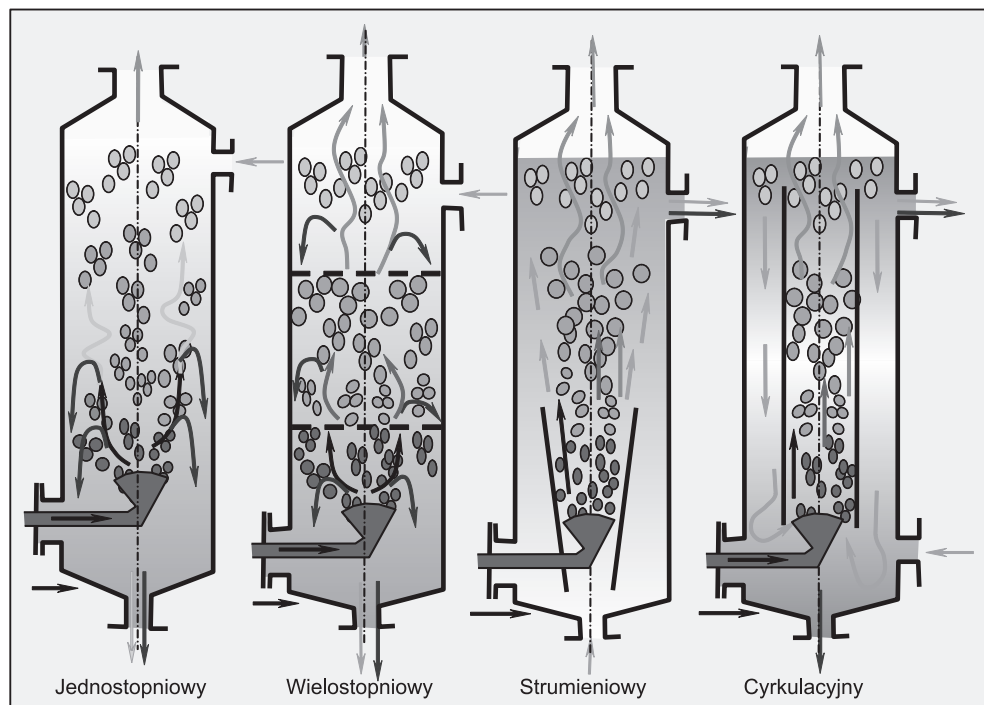
Skrubery z wypełnieniem mają podobne gabaryty jak i te bez wypełnienia, ale ich skuteczność dla pyłów o średnicy ziaren  $d > 2 \mu\text{m}$  jest większa i wynosi  $\eta = 80 \div 95\%$ . Ich wydajność osiąga:  $Q = 5 \div 20 \text{ tys. m}^3/\text{h}$ , opory przepływu  $\Delta p = 100 \div 500 \text{ Pa}$  i przepływ wody  $Q_w = 1 \div 4 \text{ m}^3 \text{ wody}/1000 \text{ m}^3 \text{ gazu}$ .

#### 4.4.4. Skrubery z wypełnieniem ciekłym, barbotażowe i półkowe

Skrubery z wypełnieniem ciekłym są to cylindryczne pionowe zbiorniki, zwane kolumnami. Mają one wszechstronne zastosowanie jako: odpylacze, pochłaniacze (zapachów), absorbery (oczyszczające gaz z zanieczyszczeń gazowych  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ) Są dwa typy skrubierów z wypełnieniem ciekłym: barbotażowe – całkowicie wypełnione cieczą i półkowe, w których warstwa cieczy spływa grawitacyjnie z jednej półki na drugą.

##### Skrubery barbotażowe

Gaz w postaci drobnych pęcherzyków jest przepuszczany w tych odpylaczach lub pochłaniaczach przez słup cieczy. Im wyższy jest aparat i mniejsze są wymiary pęcherzyków gazu tym droga kontaktu i powierzchnia wymiany jest większa, a więc i skuteczność odpylania lub pochłaniania jest wyższa. W zależności od wzajemnego przepływu gazu i płynu rozróżnia się następujące typy skrubierów barbotażowych: jednostopniowy, wielostopniowy, strumieniowy i cyrkulacyjny. Zasada działania tych podstawowych skrubierów została przedstawiona na rys. 4.16 [4.2].

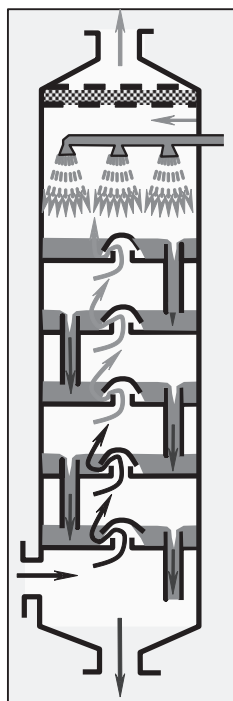


Rys. 4.16. Schematy i zasady działania podstawowych typów skrubierów barbotażowych

##### Skrubery półkowe

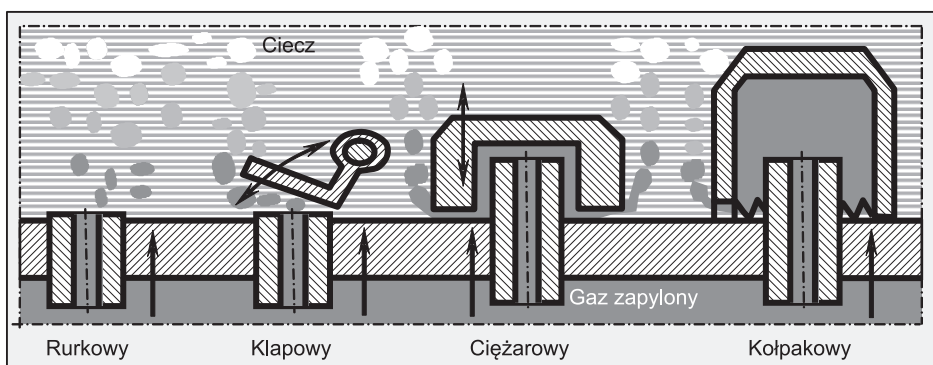
Skrubery półkowe są to cylindryczne, pionowe kolumny przedzielone w poprzek półkami. Półkami kaskadowo od góry ku dołowi przelewa się ciecz, w przeciwną

dzie do płynących ku górze gazów. Są one częściej stosowane do usuwania zanieczyszczeń gazowych  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $CO_x$ , niż do odpylania. Schemat skrubera półkowego z bocznym przelewem cieczy i centralnym zaworem przepuszczającym gaz przedstawia rys. 4.17. W rzeczywistości, zamiast jednego zaworu, jest ich kilkadziesiąt na każdej półce, które są w tym celu perforowane.



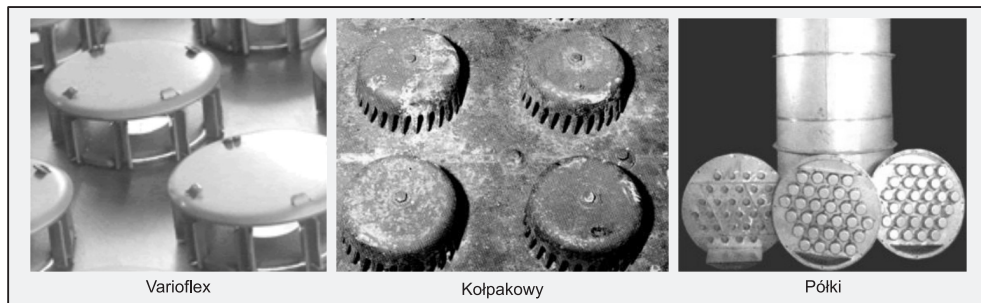
Rys. 4.17. Skruber półkowy

Rodzaje zaworów, umieszczonych w otworach tych półek, które przepuszczają gaz w postaci pęcherzyków, a zatrzymują ciecz, są przedstawione na rys. 4.18 i rys. 4.19.



Rys. 4.18. Rodzaje zaworów w półkach sitowych skrubierów



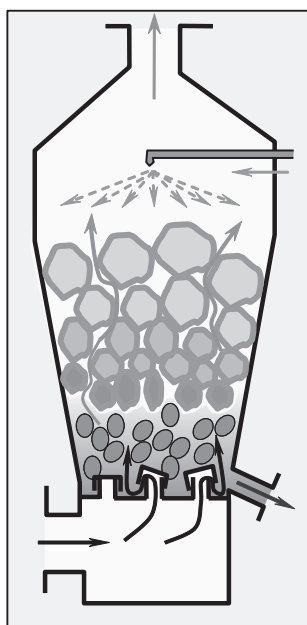


Rys. 4.19. Widok zaworów w półkach skruberów oraz półki f-my Sathe Engineering Co.Pvt. Ltd [4.5, 4.8]

Parametry techniczne skruberów półkowych są następujące: objętościowe natężenie przepływu gazu  $Q = 5 \div 40$  tys.  $\text{m}^3/\text{h}$ , skuteczność odpylania  $\eta = 90\%$  ( $d \geq 1 \mu\text{m}$ ), opory przepływu  $\Delta p = 1100 \div 1900$  Pa i zużycie wody  $Q_w = 0,1 \div 0,5$   $\text{m}^3$  wody/ $1000 \text{ m}^3$  gazu.

#### 4.4.5. Skrubery pianowe

W skruberach pianowych zanieczyszczony gaz jest tłoczony przez zawory, umieszczone w dnie sitowym, do płynu ze środkiem spieniającym. Mogą to być zawory takie, jak na rys. 4.18 i rys. 4.19. Zdyspergowany w postaci pęcherzyków gaz tworzy pianę, przez którą przeciska się oczyszczany gaz. Do błonki piany pył przykleja się z dwóch stron: od wewnątrz i od zewnątrz pęcherzyka. Przy dużym stężeniu pyłu w ciekłej błonce zmienia się jej napięcie powierzchniowe i pęcherzyki pękają. Szlam



Rys. 4.20. Schemat i zasada działania skrubera pianowego

powstały z pyłu jest odprowadzany dolnym króćcem, umieszczonym nad dnem sitowym. Uwolniony gaz z pękniętych pęcherzyków jest zraszany zregenerowanym, zawracanym płynem i ponownie ulega spienieniu i dalszemu oczyszczaniu, tak jak to pokazano na rys. 4.20.

Płuczki pianowe charakteryzują się: wysoką skuteczność odpylania do  $\eta = 95\%$ , dla pyłów o średnicy  $d$  od 1 do kilku mikrometrów, małym zużyciem wody  $Q_w = 0,1 \div 1 \text{ m}^3/1000 \text{ m}^3$ , ale również dużymi oporami przepływu  $\Delta p \geq 2000 \text{ Pa}$ , które wymagają stosowania wentylatorów o większej mocy.

## 4.5. Podsumowanie

Odpylanie mokre jest bardziej rozbudowanym technicznie i technologicznie procesem niż odpylanie suche. Korzysta ono z niektórych takich samych mechanizmów rozdziału, jak: grawitacja i inercja. Nie stosuje się w nim jednak mechanizmów związanych z oddziaływaniem elektromagnetycznym oraz z filtracją. W zamian w odpylaniu mokrym wykorzystuje się zjawiska związane z hydrodynamiką i termodynamiką.

W odpylaniu mokrym, proces odpylania właściwego jest poprzedzony wymieszaniem zanieczyszczonego gazu z płynem, którego rola sprowadza się do: koagulacji drobnych i lekkich cząsteczek pyłu w duże i cięższe aglomeraty, łatwiejsze wówczas do oddzielenia.

Skuteczność odpylania mokrego zależy od wielkości powierzchni kontaktu zanieczyszczonego gazu ze zraszającym płynem. W celu zwiększenia tego kontaktu stosuje się:

- rozpylenie cieczy w oczyszczanym gazie (odpylacze bez wypełnienia),
- barbotaż lub spienienie gazu w cieczy (odpylacze z wypełnieniem ciekłym),
- zraszanie złoża z materiału o dobrze rozwiniętej powierzchni (odpylacze z wypełnieniem stałym).

W porównaniu z odpylaczami suchymi mokre charakteryzują się następującymi zaletami i wadami:

### Zalety:

- możliwość odpylania gazów z ich jednoczesnym chłodzeniem (gazy spalinowe);
- możliwość oddzielania nawet koloidalnych pyłów oraz pyłów o właściwościach wybuchowych;
- oprócz odpylania możliwość jednoczesnej absorpcji niektórych zanieczyszczeń gazowych ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  itd.); dzięki tej zaletie środek ciężkości przemysłowych zastosowań tych urządzeń przesunął się, z kierunku odpylania, w kierunku oczyszczania gazów (rys. 3.13), gdzie występują jako kolumny lub płuczki absorpcyjne.

### Wady:

- przechodzenie zanieczyszczeń z gazu do płynu i związane z tym trudności z gospodarką ściekową,

- duże koszty eksploatacyjne,
- duże zużycie wody  $0,1\div 4 \text{ m}^3/1000 \text{ m}^3$  gazu (nie dotyczy pianowych).

## Bibliografia

- 4.1. Hupka J., Aranowski R., Dąbrowski B., Bokotko R., Potential of ASH technology for protection against chemical and biological attacks, IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security and Safety, TEHOSS 2005, September 28-30, 2005, Gdansk, 503÷508, 2005.
- 4.2. Bubble cups on tray, [http://www.cp.umist.ac.uk/SBL/Module1/Column/distillation\\_column\\_history.htm](http://www.cp.umist.ac.uk/SBL/Module1/Column/distillation_column_history.htm) (dostępne 10.05.2011).
- 4.3. Crossflow and Vertical Flow Packed Bed Scrubbers for Acid, Caustics, Metal Finishing, <http://www.tri-mer.com/pdf-fieles/product-catalog.pdf> (dostępne 07.02.2015).
- 4.4. Exhaust Gases Scrubbed and Monitored, Skrubery z wypełnieniem, <http://www.nar-chem.com/environmental.html> (dostępne 07.02.2015).
- 4.5. Sathe Engineering Co.Pvt. Ltd, <http://www.indiamart.com/satheengineering/> (dostępne 07.02.2015).
- 4.6. Venturi scrubber, <http://www.iwi-systems.com/tourpic0.html> (dostępne 07.02.2015).
- 4.7. Wet Venturi scrubber, <http://slyinc.com/wet-scrubbers/venturi-wet-scrubber/> (dostępne 07.02.2015).
- 4.8. Zawory typu Varioflex, [http://www.koch-glitsch.com/koch/products/varioflex\\_trays.asp](http://www.koch-glitsch.com/koch/products/varioflex_trays.asp) (dostępne 10.05.2011).
- 4.9. Zunifikowany typoszereg dysz zraszających, f-my ZP Stalmet, <http://www.zpstalmet.pl/index.php?section=2&id=61> (dostępne 07.02.2015).