

Spis treści

1. Wprowadzenie	
1.1. Ocena światowych zasobów wód	9
1.2. Aktualne poglądy na procesy uzdatniania wody do picia	13
1.3. Zastosowanie membran w zaopatrzeniu w wodę	17
1.4. Porównanie ciśnieniowych procesów membranowych i procesów tradycyjnych w produkcji wody do spożycia w Europie	23
1.5. Uwagi ogólne	29
2. Odsalanie wód powierzchniowych i podziemnych	
2.1. Wprowadzenie	33
2.2. Metody odsalania	35
2.2.1. Metody termiczne	37
2.2.2. Odwrócona osmoza	40
2.2.2.1. Zasada procesu	41
2.2.2.2. Odsalanie metodą RO	45
2.2.2.3. Wstępne oczyszczanie wody przed odsalaniem	47
2.2.2.4. System membranowy	52
2.2.2.5. Odzysk energii	57
2.2.2.6. Końcowe uzdatnianie wody odsolonej	59
2.2.3. Elektrodializa	60
2.2.4. Destylacja membranowa	67
2.2.5. Technologia wymiany jonowej	73
2.3. Hybrydowe procesy odsalania	76
2.3.1. Układy hybrydowe odsalania metodą RO i termiczną oraz odsalanie z wytwarzaniem energii elektrycznej	76
2.3.2. Układy hybrydowe z wykorzystaniem nanofiltracji	82
2.4. Rozważania energetyczne procesu odsalania	86
2.5. Koszty odsalania	95
2.6. Wpływ odsalania na środowisko	101
2.7. Przegląd wybranych konfiguracji odsalania wody morskiej i wód miernie zasolonych metodą odwróconej osmozy pracujących na świecie	104
2.8. Przykłady rzeczywistych obiektów odsalania i demineralizacji stosowane do otrzymywania wody do picia i do celów przemysłowych w polskiej energetyce i kopalnictwie	118
2.8.1. Stacja uzdatniania „Rydułtowy”	118
2.8.2. Stacja uzdatniania KWK „Pokój”	120
2.8.3. Demineralizacja wody dla celów przemysłowych	121
2.8.4. Zastosowanie odwróconej osmozy w ciepłownictwie	124
2.9. Podsumowanie	126

3. Membranowe zmiękczenie wody	
3.1. Wprowadzenie	139
3.2. Klasyczne metody zmiękczenia wody	140
3.2.1. Metoda termiczna usuwania twardości węglanowej	141
3.2.2. Strącanie/koagulacja wapnem, sodą, NaOH i fosforanami	141
3.2.3. Wymiana jonowa	143
3.3. Nanofiltracyjne zmiękczenie wody	148
3.3.1. Proces nanofiltracji	148
3.3.2. Nanofiltracyjne zmiękczenie wody	150
3.3.3. Usuwanie siarczanów w procesie RO i NF	158
3.3.4. Skaling membran w procesie membranowego zmiękczenia wody	160
3.4. Zmiękczenie metodą ultrafiltracji lub mikrofiltracji wspomaganą polimerami	162
3.5. Metody hybrydowe strącanie/wiązanie chemiczne – proces membranowy	165
3.6. Procesy elektromembranowe w zmiękczeniu wody	169
3.6.1. Działanie systemu ED w usuwaniu jonów twardości z wody	169
3.6.2. Elektrodializa odwracalna w usuwaniu twardości wody	170
3.6.3. EDI w usuwaniu twardości z wody	171
3.7. Podsumowanie	174
4. Usuwanie metali	
4.1. Żelazo i mangan	179
4.1.1. Żelazo i mangan w wodach podziemnych i powierzchniowych	179
4.1.2. Wpływ Fe i Mn na organizmy żywe oraz infrastrukturę zaopatrzenia w wodę	181
4.1.3. Usuwanie żelaza i manganu z wody metodami klasycznymi	183
4.1.3.1. Usuwanie żelaza	183
4.1.3.2. Usuwanie żelaza związanego z substancją organiczną	185
4.1.3.3. Usuwanie manganu	187
4.1.3.4. Inne metody usuwania żelaza i manganu z wody	189
4.1.4. Wykorzystanie mikro- i ultrafiltracji w usuwaniu żelaza i manganu z wód naturalnych	190
4.1.4.1. Układy zintegrowane utlenienie – UF/MF	192
4.1.4.2. Membrany zanurzone w procesie z utlenieniem powietrzem i KMnO_4	193
4.1.4.3. Metody zaawansowanego utlenienia oraz MF/UF w usuwaniu manganu	198
4.1.4.4. Zastosowanie jonowymiennej membrany polisulfonowej do oczyszczania roztworów wodnych zawierających substancje humusowe i jony metali	202
4.1.5. Zastosowanie elektrodializy	205
4.1.6. Podsumowanie	206
4.2. Glin	206
4.2.1. Specjacja glinu w wodzie do picia	207
4.2.2. Skutki zdrowotne obecności aluminium	210
4.2.3. Usuwanie glinu z wody do picia	211
4.2.4. Podsumowanie	214
4.3. Metale ciężkie	215
4.3.1. Usuwanie metali ciężkich ze środowiska wodnego	216
4.3.2. Zastosowanie technik membranowych	222
4.3.2.1. Odwrócona osmoza i nanofiltracja	222
4.3.2.2. Ultrafiltracja	225
4.3.2.3. Membrany ciekłe	228
4.3.3. Zastosowanie bioreaktorów membranowych	232
4.3.4. Elektrodializa	234
4.3.5. Podsumowanie	236
5. Usuwanie mikrozanieczyszczeń o charakterze anionów	
5.1. Wprowadzenie	243
5.2. Procesy stosowane do usuwania mikrozanieczyszczeń anionowych	248
5.2.1. Ciśnieniowe procesy membranowe	248
5.2.2. Bioreaktory z ciśnieniowymi procesami membranowymi	250
5.2.3. Membranowe procesy dialityczne	253
5.2.4. Dializa Donnana	254

5.2.5. Bioreaktor z membranami jonowymiennymi.	256
5.2.6. Elektrodializa.	259
5.2.7. Bioreaktory z transportem wodoru.	260
5.3. Membranowa denitryfikacja wody.	262
5.3.1. Usuwanie azotanów metodą odwróconej osmozy i nanofiltracji.	264
5.3.2. Usuwanie azotanów w procesie ultrafiltracji.	266
5.3.3. Zastosowanie elektrodializy.	267
5.3.4. Dializa Donnana w usuwaniu jonów azotanowych.	269
5.3.5. Denitryfikacja biologiczna.	272
4.3.5.1. Bioreaktory membranowe z modułami ciśnieniowymi.	273
4.3.5.2. Ekstrakcyjne bioreaktory membranowe.	276
5.4. Usuwanie bromianów(V).	280
5.4.1. Odwrócona osmoza i nanofiltracja.	282
5.4.2. Elektrodializa.	284
5.4.3. Dializa Donnana.	286
5.4.4. Oczyszczanie biologiczne.	289
5.4.4.1. Redukcja biologiczna azotanów i bromianów w reaktorze szarżowym i w układzie biofiltracji.	289
5.4.4.2. Redukcja biologiczna azotanów i bromianów w reaktorze z membranami jonowymiennymi.	291
5.5. Usuwanie chloranów(VII).	293
5.5.1. Odwrócona osmoza–nanofiltracja–ultrafiltracja.	295
5.5.2. Ultrafiltracja wspomagana polimerami i surfaktantami.	300
5.5.3. Elektrodializa.	305
5.5.4. Redukcja biologiczna.	307
5.6. Usuwanie fluoru.	313
5.6.1. Odwrócona osmoza i nanofiltracja.	313
5.6.2. Ultrafiltracja.	319
5.6.3. Elektrodializa.	320
5.6.4. Dializa Donnana.	323
5.7. Usuwanie boru z wód i ścieków.	325
5.7.1. Metody separacji boru z roztworów wodnych.	327
5.7.2. Zastosowanie odwróconej osmozy.	329
5.7.2.1. Wielostopniowe układy odwróconej osmozy.	332
5.7.2.2. Oczyszczanie w układzie zintegrowanym odwróconej osmozy i wymiany jonowej.	337
5.7.3. Oczyszczanie w układzie zintegrowanym sorpcyjno-membranowym.	340
5.7.4. Wykorzystanie procesu ultrafiltracji wspomagane polimerami.	344
5.7.5. Usuwanie boru z wody morskiej i wód gruntowych metodą elektrodializy.	346
5.7.6. Podsumowanie.	350
5.8. Arsen.	350
5.8.1. Usuwanie arsenu metodą odwróconej osmozy.	355
5.8.2. Usuwanie arsenu metodą nanofiltracji.	360
5.8.3. Niskociśnieniowe procesy membranowe.	367
5.8.3.1. Bezpośrednia mikro- i ultrafiltracja.	367
5.8.3.2. Koagulacja – mikrofiltracja/ultrafiltracja.	370
5.8.3.3. Utlenienie – mikrofiltracja.	376
5.8.4. Elektrodializa (ED) i elektrodializa odwracalna (EDR).	377
5.8.5. Podsumowanie.	378
5.9. Uwagi końcowe.	380
6. Chrom.	
6.1. Występowanie chromu w środowisku.	399
6.2. Metody usuwania chromu ze środowiska wodnego.	402
6.3. Odwrócona osmoza i nanofiltracja.	405
6.4. Ultrafiltracja.	414
6.4.1. Ultrafiltracja wspomagana polimerami.	417
6.4.2. Ultrafiltracja z roztworów micelarnych wspomagana surfaktantami.	420

6.5. Membrany ciekłe	424
6.5.1. Podstawy teoretyczne membran ciekłych	424
6.5.2. Usuwanie chromu za pomocą membran ciekłych	428
6.5.2.1. Zastosowanie unieruchomionych membran ciekłych do separacji chromu ..	430
6.5.2.2. Systemy hybrydowe z mobilną membraną ciekłą i modułami membranowymi	433
6.5.2.3. Polimerowe membrany inkluzyjne	437
6.5.2.4. Emulsyjne membrany ciekłe	438
6.5.2.5. Ciekłe membrany grubowarstwowe	441
6.6. Membranowe metody elektrochemiczne	445
6.6.1. Elektroliza membranowa	445
6.6.2. Elektro-elektrodializa membranowa	448
6.7. Usuwanie chromu (VI) metodą elektrodializy i elektrodejonizacji	455
6.8. Ceramiczne mikroporowate membrany jonowymienne	459
6.9. Podsumowanie	460