

OBSAH

PŘEDMLUVA	7
SEZNAM SYMBOLŮ	15
1 TLAKOVÉ MEMBRÁNOVÉ PROCESY A JEJICH HISTORIE	19
1.1 Úvod	19
1.2 Typy membrán	22
1.3 Mikrofiltrace	24
1.3.1 Základní popis a historický vývoj	24
1.3.2 Aplikace mikrofiltrace	24
1.3.3 Souhrn	25
1.4 Ultrafiltrace	25
1.4.1 Základní popis a historický vývoj	25
1.4.2 Aplikace ultrafiltrace	26
1.4.3 Souhrn	27
1.5 Nanofiltrace	27
1.5.1 Základní popis a historický vývoj	27
1.5.2 Aplikace nanofiltrace	28
1.5.3 Souhrn	28
1.6 Reverzní osmóza	29
1.6.1 Základní popis a historický vývoj	29
1.6.2 Aplikace reverzní osmózy	30
1.6.3 Souhrn	31
2 MEMBRÁNOVÉ MATERIÁLY	33
2.1 Úvod	33
2.2 Membrány pro ultrafiltraci	33
2.2.1 Metoda inverze fází	33
2.2.2 Ultrafiltrační membrány z polysulfonu a polyethersulfonu	34
2.2.3 Ultrafiltrační membrány z acetátu celulosy	35
2.2.4 Ultrafiltrační membrány z regenerované celulosy	35
2.2.5 Ultrafiltrační membrány z polyvinylidenfluoridu	35
2.2.6 Ultrafiltrační membrány z polyakrylonitrilu	36
2.3 Membrány pro reverzní osmózu	36
2.3.1 Kompozitní membrány s polyamidovou selektivní vrstvou	36
2.3.2 Kompozitní membrány s polyetherovou selektivní vrstvou	37
2.3.3 Asymetrické membrány z acetátu celulosy	38
2.4 Membrány pro nanofiltraci	38
2.4.1 Kompozitní membrány s polyamidovou selektivní vrstvou	38
2.4.2 Kompozitní membrány s kationtově selektivní vrstvou	38
2.4.3 Kompozitní membrány s aniontově selektivní vrstvou	39

2.5	Membrány pro mikrofiltraci	39
2.5.1	Metoda inverze fází	39
2.5.2	Příprava mikrofiltračních membrán mechanickým dloužením	40
2.5.3	Příprava mikrofiltračních membrán ozářením a leptáním	40
2.6	Anorganické membránové materiály	42
2.6.1	Úvod	42
2.6.2	Architektura anorganických membrán, jejich textura a porézní systém	43
2.6.3	Funkce jednotlivých vrstev v architektuře anorganické membrány	45
2.6.4	Výroba základních těles nosičů a mikrofiltračních membrán	46
2.6.5	Příprava keramických separačních vrstev technikou sol-gel	48
2.6.6	Membrány se separační vrstvou na bázi zeolitů a jejich analogů	51
2.6.7	Membrány se separační vrstvou na bázi mikroporézního uhlíku	53
2.7	Hybridní membrány	55
3	MEMBRÁNOVÉ MODULY A ZAŘÍZENÍ	57
3.1	Membránové moduly	57
3.1.1	Deskové moduly	57
3.1.2	Spirálně vinuté moduly	59
3.1.3	Trubkové moduly	60
3.1.4	Kapilární moduly	62
3.1.5	Moduly s dutými vlákny	63
3.1.6	Skládané moduly	63
3.1.7	Rotační moduly	64
3.2	Membránová zařízení	65
3.2.1	Kontinuální uspořádání	65
3.2.2	Vsádkové uspořádání	65
3.2.3	Semikontinuální uspořádání	65
3.3	Shrnutí	67
4	CHARAKTERIZACE MEMBRÁN	69
4.1	Úvod	69
4.2	Charakterizace porézních membrán	69
4.2.1	Charakterizace mikrofiltračních membrán	70
4.2.2	Charakterizace ultrafiltračních a nanofiltračních membrán	75
4.3	Charakterizace neporézních membrán	80
4.3.1	Stanovení permeability	80
4.3.2	Stanovení dalších fyzikálních vlastností	82
4.3.3	Metody povrchové analýzy	84
5	TRANSPORT LÁTEK MEMBRÁNAMI	87
5.1	Úvod	87
5.2	Transport porézními membránami	87
5.2.1	Plouživý tok nestlačitelných tekutin vrstvou částic	87
5.2.2	Tok rozpouštědla mikrofiltračními a ultrafiltračními membránami	92
5.2.3	Tok stlačitelných tekutin vrstvou částic	92
5.3	Transport látek neporézními polymerními membránami	94
5.3.1	Tok rozpouštědla nanofiltračními membránami	95
5.3.2	Tok rozpouštědla membránami při reverzní osmóze	98

6	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝKONNOST TLAKOVÝCH MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ	101
6.1	Úvod	101
6.2	Procesní charakteristiky	101
6.2.1	Doba trvání procesu	102
6.2.2	Režim proudění nástríku	103
6.2.3	Rozdíl tlaků nad membránou a pod ní	103
6.2.4	Koncentrace nástríku	106
6.2.5	Vliv dalších parametrů	106
6.3	Faktory ovlivňující výkonnost mikrofiltrace	108
6.4	Faktory ovlivňující výkonnost ultrafiltrace	108
6.5	Faktory ovlivňující výkonnost nanofiltrace	109
6.6	Faktory ovlivňující výkonnost reverzní osmózy	110
7	TEORETICKÝ POPIS TLAKOVÝCH MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ	113
7.1	Úvod	113
7.2	Modely popisující transport látek při MF a UF	113
7.2.1	Model sériově řazených odporů	113
7.2.2	Model osmoticko-tlakový	114
7.2.3	Filmový model	115
7.2.4	Model gelové polarizace	118
7.2.5	Další modely	118
7.2.6	Modely MF a UF vycházející z uspořádání dead-end	119
7.3	Modely popisující transport látek při NF a RO	122
7.3.1	Model rozpouštění–difuze	122
7.3.2	Spojení modelu koncentrační polarizace a modelu rozpouštění–difuze	123
7.3.3	Spojení modelu rozpouštění–difuze a Donnanovy rovnováhy	124
7.3.4	Donnanův stérický model, DSPM	125
7.3.5	Donnanův sterický model a dielektrická exkluze	127
7.3.6	Modely založené na nerovnovážné termodynamice	129
8	METODY INTENZIFIKACE	133
8.1	Úvod	133
8.2	Metody intenzifikace	133
8.2.1	Metody vyžadující přerušování procesu	134
8.2.2	Metody nevyžadující přerušování procesu	137
8.2.3	Souhrn	147
9	DIAFILTRACE	149
9.1	Úvod	149
9.2	Diafiltrace jako pracovní technika při membránových separacích	150
9.2.1	Diafiltrace za konstantního objemu v zásobní nádrži	150
9.2.2	Kontinuální diafiltrace	152
9.3	Optimalizace procesu diafiltrace	155
9.3.1	Optimální ředění při vsádkové diafiltraci	156
9.3.2	Optimální provedení vsádkové diafiltrace	157
9.4	Aplikace diafiltrace	161

10 NÁVRH MEMBRÁNOVÝCH JEDNOTEK	165
10.1 Úvod	165
10.2 Návrh výpočtem	165
10.2.1 Použití a princip návrhu	165
10.2.2 Informace potřebné k návrhu	166
10.2.3 Orientační ruční návrh	167
10.2.4 Optimalizace ručního návrhu programem	168
10.3 Návrh experimentem	172
10.3.1 Použití a princip návrhu	172
10.3.2 Experiment	172
10.3.3 Zvětšování měřítka (<i>scale-up</i>)	173
10.3.4 Technologická rezerva	175
10.3.5 Dokumentace návrhu	175
10.4 Výběr komponent jednotek	176
10.4.1 Materiály	176
10.4.2 Membránové elementy	177
10.4.3 Membránové moduly	177
10.4.4 Čerpadla	177
10.4.5 Potrubí a armatury	178
10.4.6 Pojistná filtrace	178
10.4.7 Měření a regulace	178
10.4.8 Chemické čištění	179
11 APLIKACE MIKROFILTRACE	181
11.1 Úvod	181
11.2 Průmyslové využití mikrofiltrace	181
11.2.1 Úprava pitné vody	181
11.2.2 Potravinářský průmysl	184
11.2.3 Využití mikrofiltrace v průmyslových oborech	186
11.2.4 Zpracování odpadních vod	188
11.3 Další aplikace mikrofiltrace	193
12 APLIKACE ULTRAFILTRACE	197
12.1 Úvod	197
12.2 Průmyslové využití ultrafiltrace	197
12.2.1 Úprava pitné vody	197
12.2.2 Potravinářský průmysl	199
12.2.3 Zpracování odpadních vod	206
12.3 Další aplikace ultrafiltrace	209
13 APLIKACE NANOFILTRACE	213
13.1 Úvod	213
13.2 Průmyslové využití nanofiltrace	213
13.2.1 Úprava pitné vody	213
13.2.2 Potravinářský průmysl	217
13.2.3 Využití nanofiltrace v průmyslových oborech	217
13.2.4 Zpracování odpadních vod	220

13.3	Další aplikace nanofiltrace	224
13.3.1	Diafiltrační aplikace ve farmaceutickém průmyslu	224
13.3.2	Čištění a zkoncentrování proteinů	225
13.3.3	Čištění oligosacharidů	225
14	APLIKACE REVERZNÍ OSMÓZY	227
14.1	Úvod	227
14.2	Průmyslové využití reverzní osmózy	227
14.2.1	Úprava pitné vody	227
14.2.2	Potravinářský průmysl	232
14.2.3	Využití reverzní osmózy v průmyslových oborech	233
14.2.4	Zpracování odpadních vod	235
14.3	Další aplikace reverzní osmózy	237
15	DALŠÍ VÝVOJ TLAKOVÝCH MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ	239
15.1	Úvod	239
15.2	Kombinované (hybridní) membránové procesy	239
15.2.1	Membránové bioreaktory	241
15.2.2	Membránové systémy spojené s fyzikálně-chemickými procesy	245
15.3	Integrované membránové procesy	249
15.3.1	Úprava vody	249
15.3.2	Potravinářství	251
15.3.3	Farmacie a chemický průmysl	252
15.3.4	Papírenství	252
15.4	Shrnutí	252
REJSTŘÍK		255