



Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo
in kemijsko tehnologijo

Veronika Kolar

**VPLIV OBRATOVALNIH POGOJEV NA
HITROST PRENOSA VODE PRI PROCESU
OSMOZE**

Diplomsko delo

Maribor, september 2016



Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo
in kemijsko tehnologijo

Diplomsko delo visokošolskega študijskega programa

Vpliv obratovalnih pogojev na hitrost prenosa vode pri procesu osmoze

Študentka:	Veronika Kolar
Študijski program:	visokošolski, Kemijska tehnologija
Predvideni strokovni naslov:	diplomirana inženirka kemijske tehnologije (VS)
Mentor:	doc. dr. Irena Petrinić
Somentor:	izr. prof. dr. Marjana Simonič

Maribor, 2016



Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo
in kemijsko tehnologijo

Številka: K/496

Datum: 13.04.2016

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 44/2015)

izdajam

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

Veronika Kolar, študent-ka visokošolskega strokovnega študijskega programa KEMIJSKA TEHNOLOGIJA, lahko izdela diplomsko delo.

Mentor-ica: asist. dr. Irena Petrinč

Somentor-ica: izr. prof. dr. Marjana Simonič

Naslov diplomskega dela:

VPLIV OBRATOVALNIH POGOJEV NA HITROST PRENOSA VODE PRI PROCESU OSMOZE

Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:

THE IMPACT OF OPERATIONAL PARAMETERS ON THE WATER TRANSPORT IN FORWARD OSMOSES PROCESS

Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z »Navodili za izdelavo diplomskega dela« in ga oddati v treh izvodih ter en izvod elektronske verzije v referatu za študentske zadeve Fakultete za kemijo in kemijsko tehnologijo. Rok za zaključek študija je 30. 9. 2016.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.

Obvestiti:

- kandidata -ko,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv



UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA KEMIJO IN KEMIJSKO TEHNOLOGIJO

DEKAN:

red. prof. dr. Zdravko Kravanja

Zorka Novak Pintarič

Po pooblastilu dekana
prodekanica
red. prof. dr. Zorka Novak Pintarič

Izjava

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal/a sam/a, prispevki drugih so posebej označeni. Pregledal/a sem literaturo s področja diplomskega dela po naslednjih geslih:

Vir: Science Direct (<http://www.sciencedirect.com/>)

Gesla:	Število referenc
forward osmosis IN biomimetic membrane IN draw solution IN water permeability IN selectivity	36
forward osmosis IN biomimetic membrane IN water permeability	87

Vir: COBISS/OPAC (<http://www.cobiss.si/scripts/cobiss?ukaz=getid>)

Gesla:	Število referenc
Osmoza IN biomimetične membrane	2

Skupno število pregledanih člankov: 39

Skupno število pregledanih knjig: 0

Zahvala

Zahvaljujem se doc. dr. Ireni Petrinić za mentorstvo in izr. prof. Marjani Simonič za somentorstvo.

Jasmini Korenak za vse strokovne nasvete in pomoč pri laboratorijskem delu.

Moji mami, ki mi je omogočila šolanje in me vedno spodbuja.

Posebej pa možu Nejcu,
ter sinovoma Gašperju in Primožu.
Hvala za motivacijo, potrpežljivost in podporo.

VPLIV OBRATOVALNIH POGOJEV NA HITROST PRENOSA VODE PRI PROCESU OSMOZE

Povzetek

Osmoza je membranski proces, ki mu zadnja leta posvečajo veliko pozornosti, še posebej zato, ker predstavlja možnosti za boljše in predvsem bolj ekonomično pridobivanje pitne vode ter ponovno uporabo industrijskih in odpadnih voda. Pri prenosu snovi je pomembna pravilna izbira vhodne in gonilne raztopine, saj proces osmoze izkorišča razliko v osmotskem tlaku med dvema raztopinama. Namen diplomskega dela je bil določiti vpliv različnih obratovalnih pogojev na prenos snovi skozi asimetrično membrano med procesom osmoze. Uporabili smo biomimetične membrane z vgrajenimi proteini akvaporini, za katere je značilno, da omogočijo hitrejši pretok molekul vode skozi membrano in hkrati zmanjšajo povratni tok topljenca v vhodno raztopino. V prvem delu smo določali vpliv uporabe treh različnih gonilnih raztopin, in sicer vodne raztopine NaCl, CaCl₂ in MgCl₂. Hkrati smo spremljali tudi spremembe glede na različne koncentracije raztopine NaCl. Gonilne raztopine, ki so imele za topljenec soli z višjo molsko maso in večjim premerom ionov, to sta v našem primeru CaCl₂ in MgCl₂, so imele manjši povratni tok topljenca skozi membrano, kar je ena izmed lastnosti dobrih gonilnih raztopin. Višje koncentracije raztopin pa so rezultirale višji pretok molekul vode skozi membrano. Višji pretok vode skozi membrano smo opazili tudi pri procesu osmoze, kjer je aktivna stran membrane bila v stiku z gonilno raztopino. Hitrost pretoka raztopin na vsaki strani membrane je tudi eden izmed obratovalnih parametrov, ki smo ga spreminjali in spremljali vpliv na prehod vode skozi asimetrično membrano. Eksperimenti so bili izvedeni pri dveh različni pretokih raztopin, in sicer, 50 mL/min in 70 mL/min. Ugotovili smo, da ob spremenjenih pretokih, ne pride do bistvenih sprememb pri fluksu vode in povratnemu toku topljenca. Ravno tako, smo vpliv hitrosti pretoka spremljali med mašenjem membrane z alginatom, kjer tudi ni prišlo do sprememb v prenosu snovi skozi membrano. Na koncu smo s pridobljenimi meritvami določili koeficient permeabilnosti *A* in koeficient selektivnosti *B*, kjer smo ugotovili, da sta dosti bolj odvisna od obratovalnih pogojev kot sama hitrost snovi skozi membrano.

Ključne besede: osmoza, biomimetične membrane, gonilna raztopina, permeabilnost, selektivnost

UDK: 66.081.63(043.2)

THE IMPACT OF OPERATIONAL PARAMETERS ON THE WATER TRANSPORT IN FORWARD OSMOSES PROCESS

Abstract

Forward osmosis is a membrane process, which in recent years devoted a great attention, especially because it presents an efficient and economical production of potable water and reuse of industrial wastewater. The feed and appropriate draw solution have an important role in the water and solute transport, because the driving force of forward osmosis is a difference in osmotic pressure between two solutions. The goal of this diploma work was to determine the impact of various operating conditions on the water and salt transport through asymmetric membrane with embedded proteins aquaporin. The incorporated proteins enable higher flow-rate of water molecules through the membrane and at the same time reduce the salt reverse flux. In the first part of experimental work we define the impact of different types of draw solutions, namely, NaCl, CaCl₂ and MgCl₂. At the same time the influence of different concentrations of NaCl was determined. Draw solutions with a higher molecular weight and a larger ion diameter, which in this case are CaCl₂ and MgCl₂, provided a lower salt reverse flux, which is one of the benefits of draw solutions. Higher concentrations of draw solution has resulted in a higher flow rate of the water molecules through the membrane. The higher water flux was also observed in the process of osmosis where the active side of the membrane was in a contact with draw solution. One of the operating parameters, which has been changed is the flowrate of the solutions on either side of the membrane. Experiments were carried out at two different flow rates of solutions, namely, 50 mL/min and 70 mL/min. We found that the modified flow did not occur any significant change in the water flux and salt reverse flux. In additionally, we monitored the impact of flow velocity during the fouling experiment. There has been no changes in the water flux at higher flowrate. Within the final part of experimental work, we obtained the coefficient of permeability A , and the selectivity coefficient B , where we have found that they are much more dependent on the operating conditions in comparison with water flux and salt reverse flux.

Key words: forward osmosis, biomimetic membrane, draw solution, water permeability, selectivity

UDK: 66.081.63(043.2)

KAZALO

1 UVOD	1
1.1 Namen in cilji diplomske naloge	1
2 TEORETIČNI DEL	2
2.1 Proces osmoze	2
2.1.1 Osmotsko vodeni membranski procesi	2
2.1.2 Uporaba FO procesov	3
2.1.3 Uporaba PRO procesov.....	4
2.1.4 Mašenje v osmotsko vodenih procesih	4
2.2 Transport molekul vode in topljenca skozi polprepustno membrano.....	5
2.2.1 Gonilna raztopina	6
2.2.2 Osmotski tlak.....	6
2.2.3 Koncentracijska polarizacija	7
2.3. Permeabilnost in selektivnost membrane	8
2.3.1 Načini določanja permeabilnosti in selektivnosti	8
2.3.2 Hitrost prečnega pretoka	9
2.4 Biomimetične membrane	10
3 EKSPERIMENTALNI DEL	12
3.1 Materiali	12
3.1.1 Uporabljene kemikalije	12
3.1.2 Membrane	13
3.1.3 Proces osmoze.....	13
3.2 Fizikalne in kemijske metode	15
3.2.1 Umeritvena krivulja <i>TDS</i>	15
3.3 Določanje permeabilnosti in selektivnost membrane	16
4 REZULTATI IN DISKUSIJA	17
4.1 Prenos snovi med procesom AL-FS pri različnih membranah	17
4.2 Vpliv koncentracije gonilne raztopine na prenos snovi	18
4.3 Vpliv različnih gonilnih raztopin na prenos snovi	20
4.4 Prenos snovi v AL-FS in AL-DS načinu	23
4.5 Vpliv hitrosti toka na prenos snovi.....	24
4.6 Mašenje	25
4.7 Določitev koeficienta permeabilnosti	26
4.8 Določitev koeficienta selektivnosti	31
4.9 Primerjava permeabilnosti in selektivnosti.....	32
4.10 Določitev morebitnih poškodb na membrani.....	33
5 ZAKLJUČEK	35
6 LITERATURA	36
7 PRILOGE	39

7.1 Umeritvena krivulja <i>TDS</i> za NaCl.....	39
7.2 Umeritvena krivulja <i>TDS</i> za CaCl ₂	40
8 ŽIVLJENJEPIS	41

SEZNAM SLIK

Slika 2-1: Osmotski procesi	2
Slika 2-2: Mehanizem mašenja v osmotsko vodenih procesih	4
Slika 2-3: Transport molekul topljenca pri AL-FS in AL-DS načinu.....	5
Slika 2-4: Odvisnost osmotskega tlaka od koncentracije različnih gonilnih raztopin	7
Slika 2- 5: Prikaz koncentracijske polarizacije v AL-FS in AL-DS načinu	8
Slika 2-6: Prikaz membrane z vstavljenimi AQP	10
Slika 3-1: Testna celica	14
Slika 3-2: Shema procesa	14
Slika 4-1: Fluks vode v odvisnosti od časa pri različnih membranah.....	17
Slika 4-2: Povratni tok topljenca v odvisnosti od časa pri različnih membranah	18
Slika 4-3: Fluks vode v odvisnosti od časa pri različnih koncentracijah gonilne raztopine	19
Slika 4-4: Povratni tok topljenca odvisnosti od časa pri različnih koncentracijah gonilne raztopine	19
Slika 4-5: Fluks vode v odvisnosti od časa za različne gonilne raztopine na membrani M01	20
Slika 4-6: Fluks vode v odvisnosti od časa za različne gonilne raztopine na membrani M02	21
Slika 4-7: Povratni tok topljenca v odvisnosti od časa za različne gonilne raztopine na membrani M01	22
Slika 4-8: Povratni tok topljenca v odvisnosti od časa za različne gonilne raztopine na membrani M02	22
Slika 4-9: Primerjava AL-FS in AL-DS načina na membrani M02	23
Slika 4-10: Primerjava AL-FS in AL-DS načina na membrani M03.....	24
Slika 4-11: Vpliv hitrosti toka na prenos snovi na membrani M02	24
Slika 4-12: Vpliv hitrosti toka na prenos snovi na membrani M03	25
Slika 4-13: Vpliv hitrosti toka na mašenje membrane M03.....	25
Slika 4-14: Eksperimentalni in idealni fluks vode v odvisnosti od osmotskega tlaka, M02.....	27
Slika 4-15: Eksperimentalni in idealni fluks vode v odvisnosti od osmotskega tlaka, M02.....	28
Slika 4-16: Eksperimentalni in idealni fluks vode v odvisnosti od osmotskega tlaka, M03.....	29
Slika 4-17: Eksperimentalni in idealni fluks vode v odvisnosti od osmotskega tlaka, M03.....	30
Slika 4-18: Namakanje membrane v raztopini metil vijolično.....	33
Slika 4-19: Poškodbe na membrani M01	34

SEZNAM TABEL

Tabela 3-1: Lastnosti NaCl	12
Tabela 3-2: Lastnosti CaCl ₂	12
Tabela 3-3: Lastnosti MgCl ₂	13
Tabela 4-1: Osmotski tlak za eksperimentalni in idealni fluks vode, M02.....	26
Tabela 4-2: Osmotski tlak za eksperimentalni in idealni fluks vode, M02.....	27
Tabela 4-3: Osmotski tlak za eksperimentalni in idealni fluks vode, M03.....	28
Tabela 4-4: Osmotski tlak za eksperimentalni in idealni fluks vode, M03.....	29
Tabela 4-5: Določitev koeficienta B za membrano M02	31
Tabela 4-6: Določitev koeficienta B za membrano M03	31
Tabela 4-7: Koeficienti permeabilnosti in selektivnosti	32
Tabela 4-8: Koeficienti permeabilnosti in selektivnosti iz drugih raziskav.....	32

UPORABLJENE KRATICE

RO – reverzna osmoza (angl. *reverse osmosis*)

FO – osmoza (angl. *forward osmosis*)

PRO – tlačno zavirana osmoza (angl. *pressure retarded osmosis*)

DS – gonilna raztopina (angl. *draw solution*)

FS – vhodna raztopina (angl. *feed solution*)

AL-FS – način osmoze, kjer je aktivna stran v stiku z vhodno raztopino

AL-DS – način osmoze, kjer je aktivna stran v stiku z gonilno raztopino

NF – nanofiltracija (angl. *nanofiltration*)

OsMBR – osmotski membranski bioreaktor

UF – ultrafiltracija (angl. *ultrafiltration*)

AQP – akvaporin (angl. *aquaporine*)

TFC – tanko-slojne kompozitne membrane (angl. *thin-film composite membrane*)

CTA – membrane (angl. *cellulose triacetate membrane*)

HTI – membrane proizvajalca Hydration Technologies Innovation

LMH – L/m²h

GMH – g/m²h

RSF – povratni tok topljenca (angl. *reverse salt flux*)

ECP – zunanja koncentracijska polarizacija (angl. *external concentration polarisation*)

ICP – notranja koncentracijska polarizacija (angl. *internal concentration polarisation*)

M01 – membrana 1

M02 – membrana 2

M03 – membrana 3

UPORABLJENI SIMBOLI

J_w	fluks vode	L/(m ² h), LMH
J_s	povratni tok topljenca	g/(m ² h), GMH
A	koeficient permeabilnosti	L/(m ² h bar)
B	koeficient selektivnosti topljenca	L/(m ² h)
R	koeficient zadrževanja	-
ΔP	hidravlični tlak	bar
$\Delta \pi$	razlika osmotskih tlakov	bar
R	plinska konstanta	8,314 J/(K mol)
T	temperatura	K
M	množinska koncentracija	mol/L
I	van't Hoffov faktor	-
t	čas	h

Grške črke

σ	refleksijski koeficient	-
β	van't Hoffov koeficient	-

1 UVOD

Procesi membranske filtracije se uporabljajo za ločevanje različnih medijev, kot so npr. tekočine, plini in tudi snovi. Bariero predstavlja membrana, katera zadrži določene snovi, na osnovi velikosti delcev v mediju ali fizikalno-kemijskih lastnosti samega medija, na osnovi katerega se tudi izbere vrsta membrane. Gonilna sila prenosa molekul vode je lahko temperaturni ali koncentracijski gradient, razlika v električnem potencialu ali hidravlični tlačni gradient.

Raziskave na področju osmoze (FO) so se močno povečale v zadnjih letih, saj predstavlja alternativo ostalim tlačno vodenim membranskim filtracijam, kot so mikrofiltracija, ultrafiltracija, nanofiltracija in reverzna osmoza. Ti procesi za delovanje potrebujejo dodaten hidravlični tlak. Pri procesu osmoze je pogonska sila razlika v koncentraciji osmotskih tlakov med dvema raztopinama. Na eni strani membrane je raztopina z visokim osmotskim tlakom (gonilna raztopina), medtem ko mora biti na drugi strani membrane raztopina z nižjim osmotskim tlakom (vhodna raztopina). Razlika teh osmotskih tlakov omogoča prehajanje molekul vode skozi polprepustno membrano in filtracija poteka brez dodatne porabe energije (zunanjega tlaka). Nizka poraba energije pa procesu osmoze doprinese dodano vrednost v primerjavi z ostalimi membranskimi procesi. Uporaba osmoze pri pridobivanju pitne vode, razsoljevanju in obdelavi odpadnih in industrijskih voda, bi pripomogla pri globalnemu problemu čiste vode. Na sam proces osmoze vpliva več dejavnikov, kot so npr. temperatura raztopine, vrsta gonilne raztopine, hitrost pretoka raztopine, ipd., s katerimi lahko bistveno pripomoremo k sami učinkovitosti procesa. Uporaba procesa osmoze je v industrijskem merilu pogojena predvsem z ekonomičnostjo procesa ter tudi z želenim končnim produktom.

1.1 Namen in cilji diplomske naloge

Namen diplomskega dela je bil preučiti proces osmoze ter vpliv hitrosti prečnega toka raztopin na prehod vode skozi polprepustno membrano. Hkrati se je določal tudi vpliv različnih gonilnih raztopin pri različnih koncentracijah. Visoko ponovljivost rezultatov smo zagotovili z enakimi obratovalnimi pogoji. Eden izmed ciljev diplomskega dela, je bil tudi določitev koeficienta permeabilnosti (A) in koeficienta selektivnosti (B), s tem pa določiti karakteristike biomimetične membrane. Dobljene koeficiente je možno nadalje uporabiti pri napovedovanju oz. modeliranju toku vode skozi membrano pri procesih osmoze.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Proces osmoze

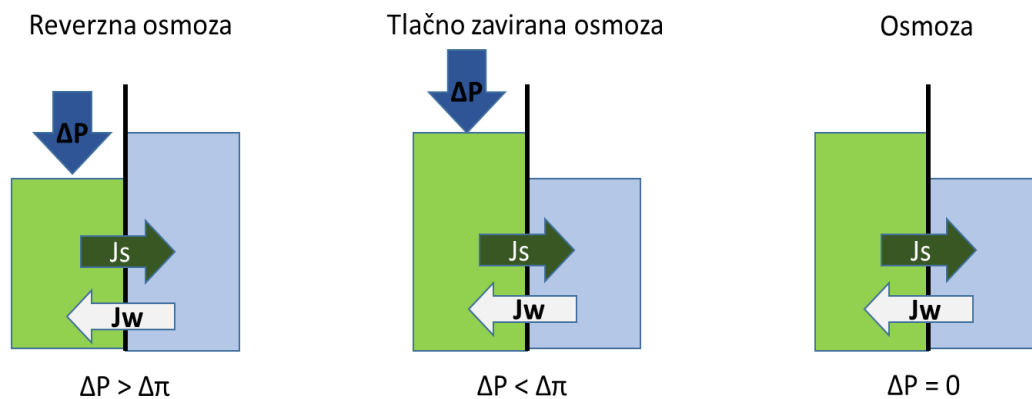
2.1.1 Osmotsko vodeni membranski procesi

Obstajata dva membranska procesa, ki delujeta na osnovi osmoze. To sta tlačno zavirana osmoza (angl. *Pressure Retarded Osmosis*, PRO) in osmoza (angl. *Forward Osmosis*, FO). Na eni strani membrane imamo vhodno oz. napajalno raztopino (angl. *Feed Solution*, FS), na drugi gonilno raztopino (angl. *Draw Solution*, DS).

Obratni proces od osmoze je proces reverzne osmoze, kjer delujemo na bolj koncentrirano raztopino z zunanjim hidravličnim tlakom, ki je večji od razlike osmotskih tlakov. Prenos vode poteka iz bolj koncentrirane v manj koncentrirano raztopino.

Osmoza (FO) poteka ravno obratno od reverzne osmoze. Prenos vode poteka iz manj koncentrirane v bolj koncentrirano na osnovi različnih osmotskih tlakov. Vhodna raztopina se med procesom koncentrira, gonilna raztopina pa redči in jo lahko ponovno koncentriramo.

Tlačno zavirana osmoza ima lastnosti obeh procesov, tako RO kot FO. Ker na membrano delujemo z hidravličnim tlakom, hkrati pa tok vode gre iz manj koncentrirane v bolj koncentrirano raztopino in zaradi tega ima značilnosti FO procesa.



Slika 2-1: Osmotski procesi

2.1.2 Uporaba FO procesov

FO lahko uporabljamo za razsoljevanje morske vode, čiščenje odpadnih voda in v prehrabni industriji. Prav zaradi razsoljevanja in obdelave odpadnih voda, je razvoj FO membran v zadnjih letih zelo napredoval.

2.1.2.1 Razsoljevanje

Za razsoljevanje morske vode in odstranjevanje soli so včasih uporabljali le RO tehnologijo, po letu 1970 pa so se usmerili v FO procese, ki predstavljajo tehnologijo z nižjimi stroški.

Pri neposrednem FO procesu se sveža voda pridobiva neposredno iz slane vode. V tem primeru uporabljajo za napajalno raztopino morsko vodo ali somornico, za gonilno raztopino pa raztopino osmotskega reagenta NaCl. Pri tem je potreben še nadaljevalni proces v katerem se regenerira gonilno raztopino, tako da se pridobi sveža voda in loči gonilna raztopina [1].

Pri posrednem FO procesu se za napajalno raztopino uporabljajo različni viri odpadnih voda, za gonilno raztopino pa morska voda in somornico [2].

Za razsoljevanje se uporablja tudi kombinacija različnih filtracijskih procesov. Pri FO-RO procesih gre za hibridno pridobivanja čiste vode in hkrati uporabo osmotske energije za reverzno osmozo somornice [3, 4, 5]. Uporabljajo se tudi procesi FO-NF (angl. *Nanofiltration*), kjer gonilno raztopino obnovijo z nanofiltracijo. Pri tem je pomembna izbira primerne gonilne raztopine. Tan in Ng [6] sta za razsoljevanje raziskala raztopine NaCl, KCl, CaCl₂, MgCl₂, MgSO₄, NaSO₄ in C₆H₁₂O₆.

2.1.2.2 Obdelava odpadnih voda

Večinoma je proces čiščenja odpadnih voda podoben procesu neposrednega razsoljevanja morske vode. Za napajalno raztopino se uporablja odpadna voda. V nadaljnjih procesih se regenerira gonilna raztopina in pridobiva čista voda.

FO se uporablja za čiščenje različnih vrst odpadnih voda: industrijskih in komunalnih odpadnih vod, kanalizacijskih vod, izcednih vod iz odlagališč, odpadnih vod, nafte in plinov, jedrskih odpadnih vod, za separacijo olja in vode [7, 8, 9].

Tehnologija membran je usmerjena tudi v razvoj novih FO membran, ki zmanjšajo pojav mašenja membran. Glede na kakovost odpadnih vod in uporabljene gonilne raztopine, se osmoza uporablja z drugimi membranskimi postopki npr. FO, FO-RO, FO-NF ali OsMBR.

OsMBR je osmotski membranski bioreaktor in je zadnje čase eden najpogosteje uporabljenih tehnologij pri čiščenju odpadnih vod. Bioreaktor so testirali za pridobivanje vode iz suspenzije aktivnega blata. Pri tem so uporabljali različne FO membrane [10, 11].

2.1.2.3 Obdelava odpadne vode iz tekstilne industrije

Tekstilne odpadne vode predstavljajo poseben izziv. Tekstilna industrija je namreč eden največjih porabnikov sveže vode. Prisotnost velikega števila kemikalij, potencialno tudi rakotvornih predstavlja kompleksen medij za obdelavo, saj je vedno potrebno odpadno vodo obdelati do tretje stopnje čiščenja.

Tekstilna odpadna voda je eden izmed najbolj neugodnih medijev za obdelavo tudi iz ekološkega vidika, saj je močno obarvana, vsebujejo visoke koncentracije soli in ima visoko biokemijsko porabo kisika (BPK) ter kemijsko potrebo po kisiku (KPK) [12].

2.1.3 Uporaba PRO procesov

Procesi PRO predstavljajo novo obliko pridobivanja obnovljivih virov energije. Metoda temelji na proizvodnji obnovljive energije z uporabo vodnih virov različnih slanosti, na eni strani površinsko vodo, na drugi pa morsko vodo. Sistem izkorišča razliko v osmotskem tlaku in dodatek hidravlične energije v obliki zunanega tlaka (do 10 bar), ki se dovaja na strani bolj koncentrirane oz. bolj slane raztopine, za pridobivanje električne energije.

Prvi prototip osmotske elektrarne je leta 2009 odprlo podjetje Statkraft na Norveškem. Elektrarna je opremljena z 2000m² membran in z izhodno zmogljivostjo med 2kW in 4kW. Predstavljajo potencialni vir energije, saj naj bi bili sposobni ustvariti približno 2000 TWh (teravatna ura) na leto. Tako bi stroškovno konkurirala drugim obnovljivim virom, kot so vetrna energija in energija biomase [13].

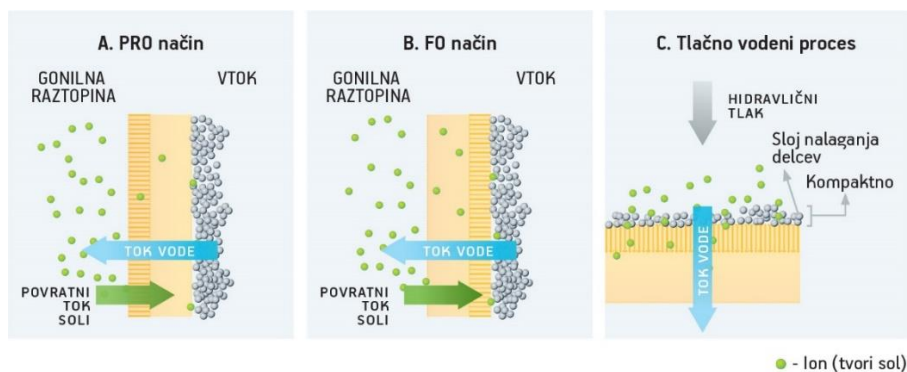
Vendar je še vedno eden od resnih izzivov razvoj PRO membran. Strukturno so PRO membrane podobne FO membranam, pri katerih je porozni nosilni sloj tanjši kot pri RO membranah. Eden od bistvenih faktorjev pri izdelavi PRO membran je zagotavljanje mehanske trdnosti, saj morajo zdržati uporabo hidravličnega tlaka. Ugotovljeno je bilo, da lahko uporaba tlaka neugodno sproži membranske deformacije, kar privede do večje prepustnosti soli in s tem do zmanjšanja pogonske sile [14].

2.1.4 Mašenje v osmotsko vodenih procesih

Večina membranskih procesov se sooča s problemom mašenja oz. nalaganjem zadržanih snovi na površini membrane in znotraj por. Mašila zmanjšujejo tok vode skozi membrano, kar vpliva na delovanje, posledično pa tudi na ekonomičnost procesov. Mašila delimo na koloide, bio mašila (bakterije in glive), organska in anorganska mašila [15].

Mehanizem mašenja je odvisen od različnih dejavnikov, npr. pretok vode, karakteristika vode, postavitve in struktura membrane. Raziskave potekajo v smeri zmanjšanja vpliva mašenja, spreminjanja obratovalnih pogojev, čiščenja membran in sprememb materialov membran.

Osmotsko vodeni procesi imajo drugačne karakteristike mašenja, kot pa tlačno vodeni procesi. RO procesi so tlačno vodeni, delovanje z hidravličnim tlakom še dodatno povzroča bolj kompakten sloj oz. kolač nanesenih delcev. Mašenje pri osmotskih procesih je odvisno od postavitve membrane. Na sliki 2-2 sta prikazana dva osmotsko vodena procesa, ter tlačno vodeni proces. Oznaka PRO v tem primeru označuje postavitev membrane, kjer je aktivni del na strani gonilne raztopine. Pri FO načinu se delci nalagajo na aktivni plasti membrane, pri PRO načinu pa prodirajo tudi v podporno plasti [16].

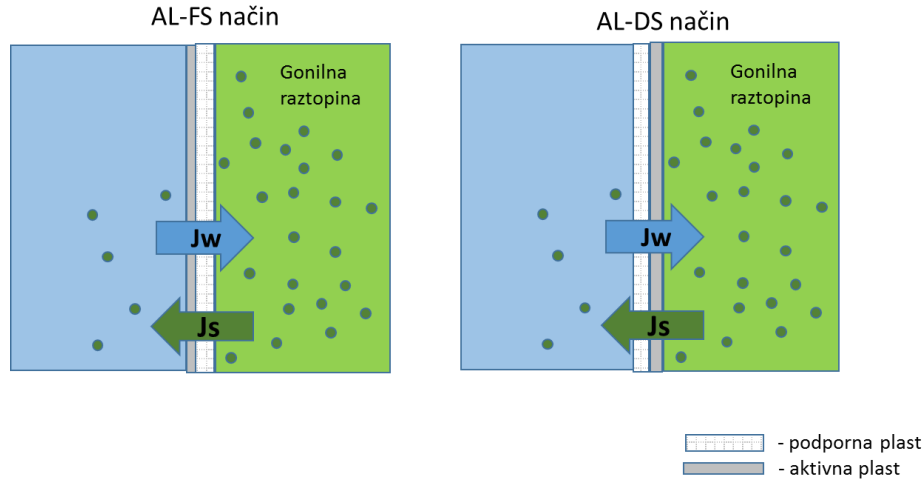


Slika 2-2: Mehanizem mašenja v osmotsko vodenih procesih [16]

2.2 Transport molekul vode in topljenca skozi polprepustno membrano

Osmoza lahko poteka na dva načina in sicer odvisno od postavitve membrane. Pri AL-FS načinu (angl. *active layer facing feed solution*) je aktivni sloj membrane obrnjen na stran FS, med tem ko je pri AL-DS (angl. *active layer facing draw solution*) načinu aktivni sloj obrnjen na stran DS.

Polprepustna membrana omogoča prenos vode zaradi naravnega osmotskega tlaka, ki se ustvari v gonilni raztopini.



Slika 2-3: Transport molekul topljenca pri AL-FS in AL-DS načinu

Fluks vode, J_w , je definiran kot:

$$J_w = A \times (\sigma \Delta \pi - \Delta P) \quad (2.1)$$

kjer so: J_w – fluks vode, $L/(m^2 h)$,
 A – koeficient permeabilnosti, $L/(m^2 h \text{ bar})$,
 ΔP – uporabljen hidravlični tlak, bar,
 $\Delta \pi$ – razlika osmotskih tlakov, bar,
 σ – refleksijski koeficient (za popolno polprepustno membrano, $\sigma = 1$).

Topljenec iz gonilne raztopine preko membrane prehaja v vhodno raztopino in to označimo kot povratni tok topljenca. Koncentracija vhodne raztopine se večja, zmanjšuje se razlika osmotskih tlakov med raztopinami in povzroči nižji pretok molekul vode skozi membrano.

Povratni tok topljenca je izražen z Fickovim zakonom [17]:

$$J_s = B \Delta c \quad (2.2)$$

kjer so: J_s – povratni tok topljenca, $g/(m^2 h)$ oz. GMH ,
 B – koeficient selektivnosti topljenca, $L/(m^2 h)$,
 Δc – razlika v koncentraciji topljenca.

Za FO membrane so povratni tok topljenca definirali [25] kot:

$$J_s = J_w \frac{B}{A\beta RT} \quad (2.3)$$

kjer je: β – van't Hoffov koeficient,
 R – plinska konstanta; 8,314 J/(K mol),
 T – temperatura, K.

2.2.1 Gonilna raztopina

Gonilna raztopina (DS) ima velik pomen pri procesu osmoze. Biti mora bolj koncentrirana od vhodne raztopine, saj ima največji vpliv na prehajanje molekul vode preko polprepustne membrane prav razlika v koncentraciji. Izbira ustrezne gonilne raztopine predstavlja izziv za raziskovalce, saj so lastnosti idealne gonilne raztopine [18]:

- visok osmotski tlak
- minimalen povratni tok topljenca
- enostavna regeneracija razredčene gonilne raztopine
- v vodi dobro topen topljenec z majhno molekulsko maso
- minimalen kemijski in fizikalni vpliv na membrano
- nizka cena na tržišču

Za gonilno raztopino uporabljajo različne topljence, najpogosteje NaCl, ki ima relativno visok osmotski potencial. Raziskavo najpogosteje uporabljenih DS je objavil Cath [19], ki je primerjal NaCl, CaCl₂, MgCl₂, KCl, NH₄HCO₃, saharozo in ostale (slika 2-4). Pogosto je uporabljena 0,5 M NaCl, saj ima podoben osmotski tlak (23 bar) kot morska voda.

Velikost topljenca in elektrostatska interakcija vplivata na povratni tok soli. Dokazali so, da manjši monovalentni ioni (npr. Na⁺) lažje prehajajo skozi membrano, kot ioni z dvovalentnim nabojem in večjim premerom (npr. Ca²⁺, Mg²⁺) [20, 21].

Poleg raztopin soli so v uporabi tudi druge gonilne raztopine. V zadnjih letih so testirali tudi različno velike magnetne nanodelce (angl. *Synthesized magnetic nanoparticles*, MNPs) [22].

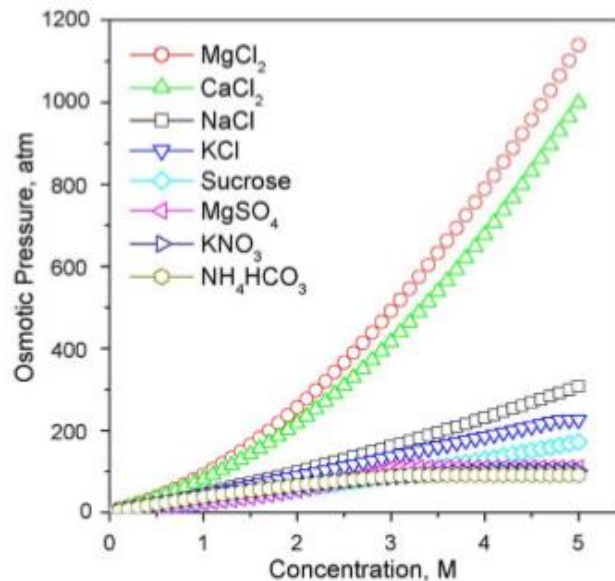
2.2.2 Osmotski tlak

Osmotski tlak je definiran z Van't Hoffovo enačbo:

$$\pi = iMRT = i \left(\frac{n}{V} \right) RT \quad (2.4)$$

kjer sta: i – van't Hoffov faktor
 (ionske snovi dajejo visoko vrednost, saj se popolnoma disociirajo)
 M – molarost, mol/L.

Vrednosti osmotskega tlaka za različne gonilne raztopine so prikazane na sliki 2-4, kjer vidimo, da ima raztopina MgCl_2 najvišje vrednosti.



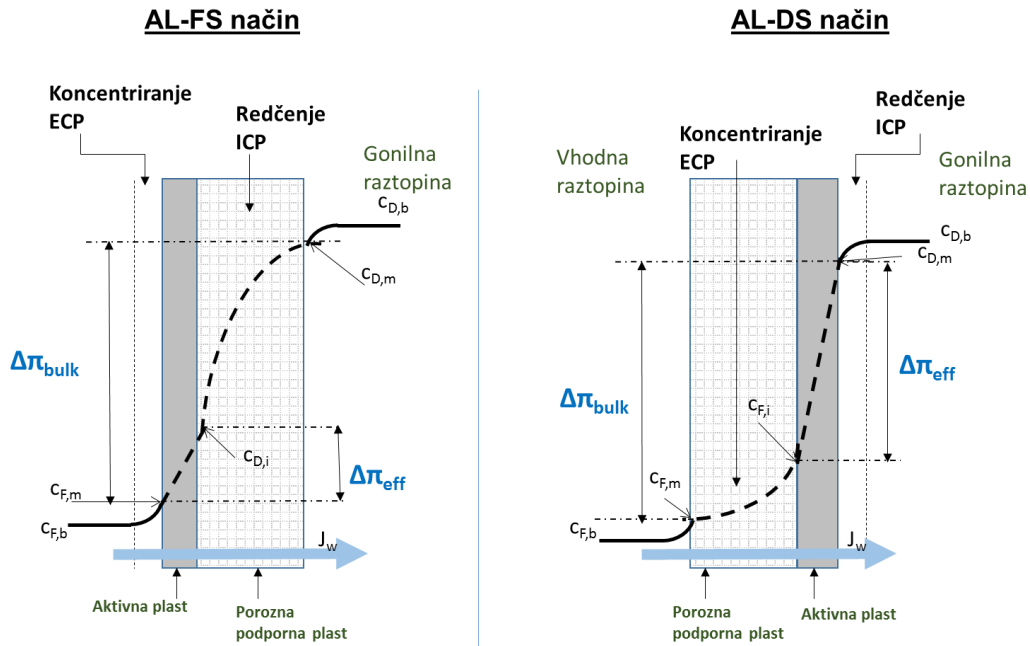
Slika 2-4: Odvisnost osmotskega tlaka od koncentracije različnih gonilnih raztopin [19]

2.2.3 Koncentracijska polarizacija

Do koncentracijske polarizacije prihaja ob površini membrane zaradi difuzije topljenca. Koncentracija topljenca se tako na strani FS kot DS spreminja, in sicer ob površini membrane je koncentracija topljenca višja kot v osnovni raztopini (angl. *bulk*).

Ob membrani nastajata dve različni koncentracijski polarizaciji: zunanja koncentracijska polarizacija (angl. *external concentration polarisation*, ECP) in notranja koncentracijska polarizacija (angl. *internal concentration polarisation*, ICP).

ECP nastaja na površini aktivne plasti membrane, ICP pa na podporni plasti. Med procesom prihaja do redčenja ali koncentriranja, odvisno od postavitev membrane. V AL-FS načinu je aktivna plast na strani vtoka, pojavi se koncentriranje ECP in redčenje ICP. Ravno obratno pa pri AL-DS načinu prihaja do redčenja ECP in koncentriranja ICP. Vpliv ECP lahko zmanjšamo s povečanjem pretoka, težje pa je zmanjšati vpliv ICP, saj je odvisen od strukture porozne nosilne plasti.



Slika 2-5: Prikaz koncentracijske polarizacije v AL-FS in AL-DS načinu [23]

Pri modeliranju enačbe za pretok vode je McCutcheon [23] upošteval vpliv ICP in EPC v AL-DS načinu:

$$Jw = A \left[\pi_{D,b} \exp\left(-\frac{Jw}{k}\right) - \pi_{F,b} \exp(JwK) \right] \quad (2.5)$$

Oziroma za AL-FS način:

$$Jw = A \left[\pi_{D,b} \exp(-JwK) - \pi_{F,b} \exp\left(\frac{Jw}{k}\right) \right] \quad (2.6)$$

kjer so: $\pi_{D,b}$ – osmotski tlak gonilne raztopine,
 $\pi_{F,b}$ – osmotski tlak vhodne raztopine,
 K – upornost topljenca iz DS proti difuziji.

2.3. Permeabilnost in selektivnost membrane

Ena izmed osnovnih parametrov pri karakteristiki membrane sta permeabilnost in selektivnost. Permeabilnost membrane (angl. *water permeability*, A) predstavlja upornost membrane pri prehajanju snovi. Selektivnost membrane (angl. *salt permeability*, B) nam pove možnost zadrževanja določenih raztopljenih snovi v vhodni raztopini.

2.3.1 Načini določanja permeabilnosti in selektivnosti

V različnih raziskavah FO membran, so permeabilnost določali v testnih celicah, ki so drugače namenjene RO membranam. Tirafferi [24] je testiral TFC-FO membrane (angl. *Thin-film composite membrane*), She in sodelavci [25] so testirali komercialne HTI-FO membrane

(membrane proizvajalca Hydration Technologies Innovation HTI), Stefani [26] pa CTA-FO membrane (angl. *Cellulose triacetate membrane*).

Koeficient permeabilnosti je izražen iz en.(2.1):

$$A = J_w / \Delta P \quad (2.7)$$

Stefani [26] je permeabilnost določal s primerjavo idealnega fluksa vode in realnih eksperimentalnih rezultatov in jo določal po enačbi:

$$J_w = A \Delta \pi \quad (2.8)$$

Uvedli so stopnjo zadržanosti komponente (angl. *rejection, R*), ki je definirana kot:

$$R = 1 - c_p / c_b \quad (2.9)$$

kjer sta: c_b – začetna koncentracija gonilne raztopine, mg/L,
 c_p – končna koncentracija soli v permeatu, mg/L.

Oziroma:

$$R\% = 1 - \left(\frac{c_p}{c_b} \right) * 100 \quad (2.10)$$

Koeficient selektivnosti so izračunali na različne načine. Tirafferi [24] ga je izrazil kot:

$$B = J_w \left(\frac{1-R}{R} \right) \exp \left(- \frac{J_w}{k} \right) \quad (2.11)$$

kjer je: k – koeficient prenosa mase.

Medtem ko Bui [27] ni upošteval koeficienta k in za določitev koeficienta B uporabil enačbo:

$$B = \frac{(1-R)A(\Delta P - \Delta \pi)}{R} = \frac{(1-R)J_w}{R} \quad (2.12)$$

2.3.2 Hitrost prečnega pretoka

Pri dinamičnih filtracijah (angl. *cross-flow filtration*) uporabljamo črpalke, ki zagotavljajo neprekinjen tangencialni tok vzdolž membrane. Nastale strižne sile na površini membrane so predvidljive, če so znane lastnosti črpalke, dimenzije kanala, natančen položaj membrane in drugih notranjih delov.

Hitrost prečnega pretoka (angl. *cross-flow velocity*) ima vpliv na tokove in prenos snovi skozi membrano. V FO sistemih imajo nižje hitrosti prečnega pretoka za posledico večji učinek ECP [23]. Hancock in Cath (2009) sta preučevala kakšen vpliv na ECP imata tok vhodne in gonilne raztopine. Predlagala sta, da bi v FO sistemih uporabljali nižje hitrosti prečnega pretoka, saj naj bi s tem zmanjšali povratni tok topljenca. Vendar bi to zmanjšalo fluks vode, povzročilo višji ECP in mašenje membran.

2.4 Biomimetične membrane

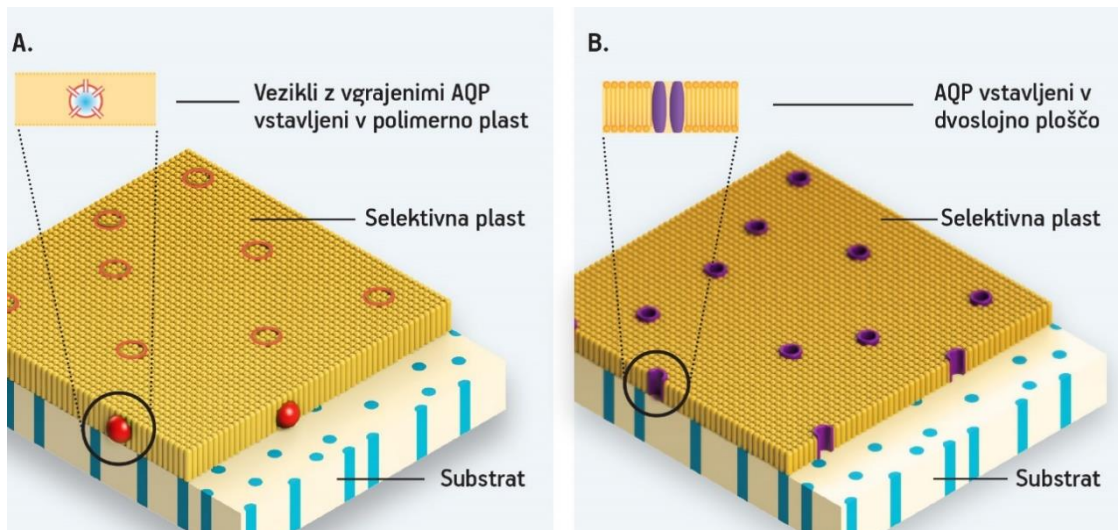
Biomimetične membrane spadajo v skupino bioloških membran, kjer so proteini (v večini primerov so to akvaporini) vgrajeni v matrico membrane. Vpeti so v aktivni sloj membrane, saj je njihova glavna naloga prenos molekul vode.

Pri opazovanju bioloških membran nekaterih tokov niso mogli razložiti samo na osnovi difuzije in obstoj akvaporinov je bil desetletja le hipoteza. Dokler niso Agee in sodelavci prvič dokazali obstoj vodnih kanalov. To je bil človeški akvaporin, kasneje preimenovan v AQP1. Od takrat so našli še deset človeških/živalskih akvaporinov imenovanih AQP0 do AQP10. Akvaporine so našli tudi v rastlinah, kvasovkah in bakterijah. Funkcija večine akvaporinov je povezana s transportom molekul vode [28].

S svojo strukturo akvaporini omogočajo prenos molekul vode in hkrati zavračajo prehod drugim raztopljenim snovem, ionom in celo protonu H^+ . Tvorijo kanale v obliki peščene ure, v velikosti por približno $0,3 \mu m$, okrog pa so obdani z hidrofobnimi aminokislinami. Pretok poteka v smeri osmotskega gradienta [28].

Vodni kanali, ki jih tvorijo akvaporini, zaradi ozkosti in značilnosti naboja, preprečujejo ionom in drugim molekulam transport skozi membrano. Visoka prepustnost vode, regulacija pretoka vode in sposobnost skorajšnjega popolnega zadrževanja raztopljenih snovi, pa so lastnosti, ki dajejo potencial, zakaj se je v zadnjih letih znanost usmerila k posnemanju bioloških membran z vključitvijo akvaporinov v biomimetične membrane.

Akvaporini so vključeni v tanko-slojne kompozitne (TFC) membrane. Biomimetične membrane potrebujejo nosilne materiale na eni ali obeh straneh in glede na strukturo jih delimo na dva načina. V polimerno plast so lahko vstavljeni (a) v obliki veziklov z vgrajenimi AQP, ali (b) pa so AQP vstavljeni v dvoslojno ploščo, kot prikazuje slika 2-6 [29, 30].



Slika 2-6: Prikaz membrane z vstavljenimi AQP (a) vezikli z vgrajenimi AQP so vpeti v polimerni sloj na porozno podporno plast, (b) AQP vstavljeni v dvoslojno ploščo in nanoseni na porozno podporno plast [30]

Izziv znanosti je torej ustvariti membrane, ki bi jih lahko uporabljali pri čiščenju in proizvodnji vode. Membrane na osnovi nanocevk ogljika (angl. *Carbon nanotubes*, CNT) in biomimetične membrane z akvaporini predstavljajo vodilo v razvoju, saj želijo optimizirati učinkovitost membran in znižati porabo energije. Vendar so, vsaj v industrijskem merilu, membrane z akvaporini trenutno tržno nedostopne [31].

Izvedli so precej raziskav in poskusov vgradnje akvaporinov v biomimetično membrano za različne procese osmoze, reverzne osmoze in nanofiltracije [32-34].

Nekateri AQP imajo sposobnost zadrževanja tudi zelo majhnih raztopljenih snovi kot so glicerol, sečnina in glukoza, tudi pri visokih hitrostih prenosa. Za FO aplikacijo je najbolj zanimiv akvaporin Z (AQPZ), najmanjši in najenostavnejši sestavni del, ki ga proizvajajo iz kulture *Escherichia coli* (*E.coli*). Je zelo stabilen pod različnimi redukcijskim pogoji, očistimo ga lahko v visokih koncentracijah in pri temperaturi 4 °C je obstojen dolgo obdobje [35].

Kumar s sod. [36] je s karakterističnimi poskusi dokazal, da bi z vgraditvijo AQPZ v biomimetično membrano lahko dosegli do 80-krat višjo prepustnost vode od sedanjih komercialnih membran reverzne osmoze. Zhong in sod. [32] so razvili biomimetične membrane z vgrajenimi akvaporini na membrano celuloznega acetata. Vendar pa je TFC sloj sestavljen iz proteinov akvaporinov in poliamida, kar bi lahko predstavljalo oviro pri uporabi FO aplikacij za odpadne vode. Membrane so namreč občutljive na snovi, ki se nahajajo v odpadnih vodah tekstilne industrije.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

Izvajali smo teste na biomimetičnih membranah z vstavljenimi akvaporini, pri čemer smo uporabili različne gonilne raztopine.

3.1 Materiali

3.1.1 Uporabljene kemikalije

Za pripravo gonilnih raztopin smo uporabili tri različne soli. Raztopine so bile različnih koncentracij (0,5 M, 1,0 M in 1,5 M), saj nas je poleg vpliva različnih DS zanimal tudi vpliv koncentracij na prepustnost membrane. Za DS smo pripravili 250 mL raztopine, soli smo raztapljali v deionizirani vodi.

Natrijev klorid (angl. *Sodium chloride*) je anorganska sol bele barve. V vodi se dobro raztaplja in popolnoma disociira. Van't Hoffov faktor ima 2.

Tabela 3-1: Lastnosti NaCl

Kemijska formula	NaCl
Proizvajalec	Fisher Chemical
Molska masa (MW)	58,44 g/mol
Čistost	99,75 %

Kalcijev klorid (angl. *Calcium chloride*) je bela sol v oblika granul. Med raztapljanjem v vodi se sprošča toplota, zato smo uporabili hladno vodno kopel.

Tabela 3-2: Lastnosti CaCl₂

Kemijska formula	CaCl ₂
Proizvajalec	Sigma – Aldrich
Molska masa (MW)	110,98 g/mol
Čistost	≥ 97,0 %

Magnezijev klorid (angl. *Magnesium chloride*) je sol v obliki belega praha. Med raztapljanjem v vodi smo zaradi eksotermne reakcije uporabili hladno vodno kopel in ob stalnem mešanju počasi dodajali topljenec.

Tabela 3-3: Lastnosti MgCl₂

Kemijska formula	MgCl ₂
Proizvajalec	Sigma – Aldrich
Molska masa (MW)	95,21 g/mol
Čistost	≥ 98 %

Pri eksperimentu mašenja smo za vhodno raztopino uporabili 2 g/L alginata (angl. *Alginate*). Alginat oz. algininska kislina je naraven polisaharid. Nahaja se v različnih vrstah morskih alg v obliki kalcijevih, natrijevih, stroncijevih, barijevih in magnezijevih soli. Po svoji kemijski sestavi je nerazvejan polisaharid, sestavljen iz monomernih enot, b-D manuronske (M) in a-L-guluronske (G) kisline, povezanih z 1,4 glikozidno vezjo. Vpliv kemijske sestave na sproščanje, je izrazitejši pri višjih vsebnostih alginata (30% in 50%) in je odvisen od pH medija. V kislem alginat z večjim deležem hitreje nabreka, kar vodi v hitrejši nastanek difuzijske bariere in počasnejše sproščanje. Nasprotno je v nevtralnem sproščanje bolj zadržano, posledica je tvorba stabilnejšega gela [37]. Zato predstavlja najbolj primerne predstavnika za organsko mašenje. Dodali smo 0,01 M NaCl, ki izboljša raztapljanje in povezovanje v raztopini. Za gonilno raztopino smo uporabili 2 M NaCl.

3.1.2 Membrane

Procese FO v AL-FS in AL-DS smo izvajali na biomimetičnih membranah AIM (angl. *aquaporine inside membranes*). Proizvaja jih podjetje Aquaporin A/S iz Danske. To so TFC membrane, ki imajo v aktivni plasti vstavljene vezikle z biomimetičnimi proteini akvaporini, nanešenimi na tanko-slojno podporno plast iz polietersulfona (PES).

Uporabili smo dve različni membrani (M01 in M02). Med eksperimentalnim delom smo ugotovili, da je membrana M01 poškodovana, zato smo ponovili teste na enaki, vendar nepoškodovani membrani (M03).

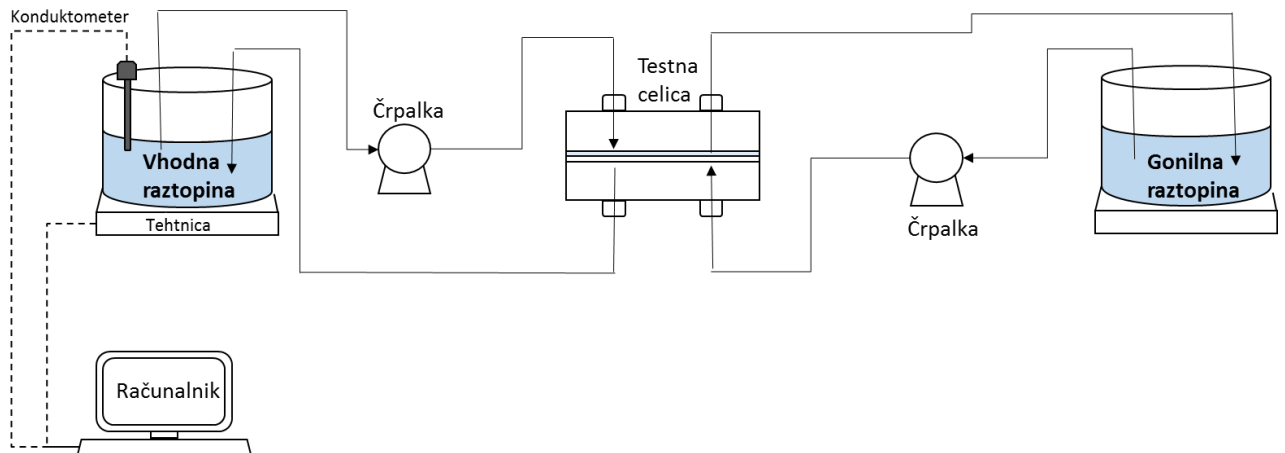
3.1.3 Proces osmoze

Uporabili smo testno celico CF042 proizvajalca Sterlitech Corporation (ZDA) z aktivno površino 0,003315m². Na sliki 3-1 je prikazana celica, ki smo jo uporabili pri eksperimentalnem delu. Sestavljena je iz dveh delov ohišja, ki jih pritrdimo skupaj, vmes pa vstavimo membrano. Pri vstavljanju membrane je potrebno natančno izrezati velikost membrane, da robovi segajo ravno med zunanji in notranji gumijasti črni obroč. Tako zagotovimo, da ne prihaja do iztekanja tekočine med procesom osmoze.



Slika 3-1: Testna celica

Na sliki 3-2 je prikazana procesna shema. Med procesom po dveh ločenih cevkah tečeta vhodna in gonilna raztopina v testno celico, nato pa na drugi strani membrane nazaj v vhodno oz. gonilno raztopino. V vhodni raztopini smo med celotnim procesom merili spremembe mase in prevodnosti.



Slika 3-2: Shema procesa

3.1.3.1 Določevanje pretoka vode skozi membrano, J_w

Med procesom osmoze smo merili spremembo mase po času na strani vhodne raztopine. Z uporabo spodnje enačbe en (3.1) smo lahko določili pretok molekul vode na enoto površine (J_w). Izračun eksperimentalnega fluksa vode skozi membrano je definiran kot [38]:

$$J_w = \Delta V / A \Delta t \quad (3.1)$$

kjer so: ΔV – sprememba volumna vhodne raztopine, L,
 A – površina membrane, m²,
 Δt – sprememba časa, h.

3.1.3.2 Določevanje povratnega toka soli

Glede na eksperimentalne meritve, kjer smo merili spremembo mase ter koncentracijo topljenca na vhodni raztopini, uporabimo naslednjo enačbo za izračun eksperimentalne vrednosti povratnega toka topljenca (J_s) [38]:

$$J_s = \frac{C_t V_t - C_o V_o}{A \Delta t} \quad (3.2)$$

kjer so: C_t – koncentracija gonilne raztopine po določenem času, g/L,
 V_t – volumen gonilne raztopine po določenem času, L,
 C_o – začetna koncentracija gonilne raztopine, g/L,
 V_o – začetni volumen gonilne raztopine, L.

3.1.3.3 Določitev morebitnih poškodb na membrani

Za določitev poškodb na membranah smo uporabili raztopino metil-vijolično (angl. *Methyl violet solution*, MV), ter sledili navodilom s strani proizvajalca membran Aquaporin A/S. Metil vijolično je raztopina, ki obarva podporno plast na membrani. Če je membrana nepoškodovana, ostane po namakanju v raztopini še vedno bele barve, poškodovana pa se obarva vijolično.

Uporabili smo 0,01 % raztopino metil vijolično. Za testno raztopino smo pripravili 100 mL destilirane vode, kateri smo dodali 10 mL raztopine metil vijolično. Barvilo mora biti v stiku z membrano 10 minut.

Raztopina je zelo intenzivna in lahko obarva tudi pripomočke in opremo, zato je potrebno po uporabi opremo čim hitreje očistiti, da ne pride do kontaminacije. Prav zaradi intenzivnosti barvila nismo raztopine spustili čez sistem skozi testno celico, ampak smo uporabljeno membrano potopili v pripravljeno raztopino za 10 minut.

Slabost metode je tudi to, da po testiranju membrana ni več primerna za uporabo. Tako ne moremo preveriti membrane pred uporabo FO procesov, ampak šele kasneje lahko s testom še dodatno potrdimo, ali je za morebitna odstopanja kriva membrana.

3.2 Fizikalne in kemijske metode

Skozi celotni eksperiment smo preko računalniškega programa *SPDC Data Collection V2.01* beležili spremembo mase. Prevodnost smo merili z merilnikom *SD 302 Con* in prav tako beležili spremembe, za kar smo uporabili računalniški program *GSOFT3050*.

3.2.1 Umeritvena krivulja TDS

TDS (angl. *Total dissolved solids*) je kratica za skupno vsoto raztopljenih trdnih snovi. Zajema vse katione in anione, ki so ostali v vodi po filtraciji. Pitna voda vsebuje običajno karbonat, bikarbonat, klorid, fluorid, sulfat, fosfat, nitrat, kalcij, magnezij, natrij, kalij, lahko pa so prisotne tudi organske snovi npr. onesnaževala in herbicidi.

Določili smo umeritveno krivuljo TDS za raztopine NaCl in CaCl₂ (prilogi 7.1 in 7.2). Preko nje in meritev prevodnosti smo lahko določili koncentracijo topljenca v mg/L.

3.3 Določanje permeabilnosti in selektivnost membrane

Za določitev permeabilnosti smo izvedli eksperimente osmoze z uporabljenimi različnimi koncentracijami raztopine NaCl kot pogonsko raztopino. Pri tem smo izračunali povprečne vrednosti fluksa vode ter po en.(2.8) (po načinu Mattia Stefani [26]) določili vrednost koeficienta permeabilnosti.

Pri določanju koeficienta selektivnosti smo tekom procesa osmoze, merili koncentracijo topljenca v gonilni raztopini pred procesom osmoze in koncentracijo topljenca v vhodni raztopini po končanem procesu.

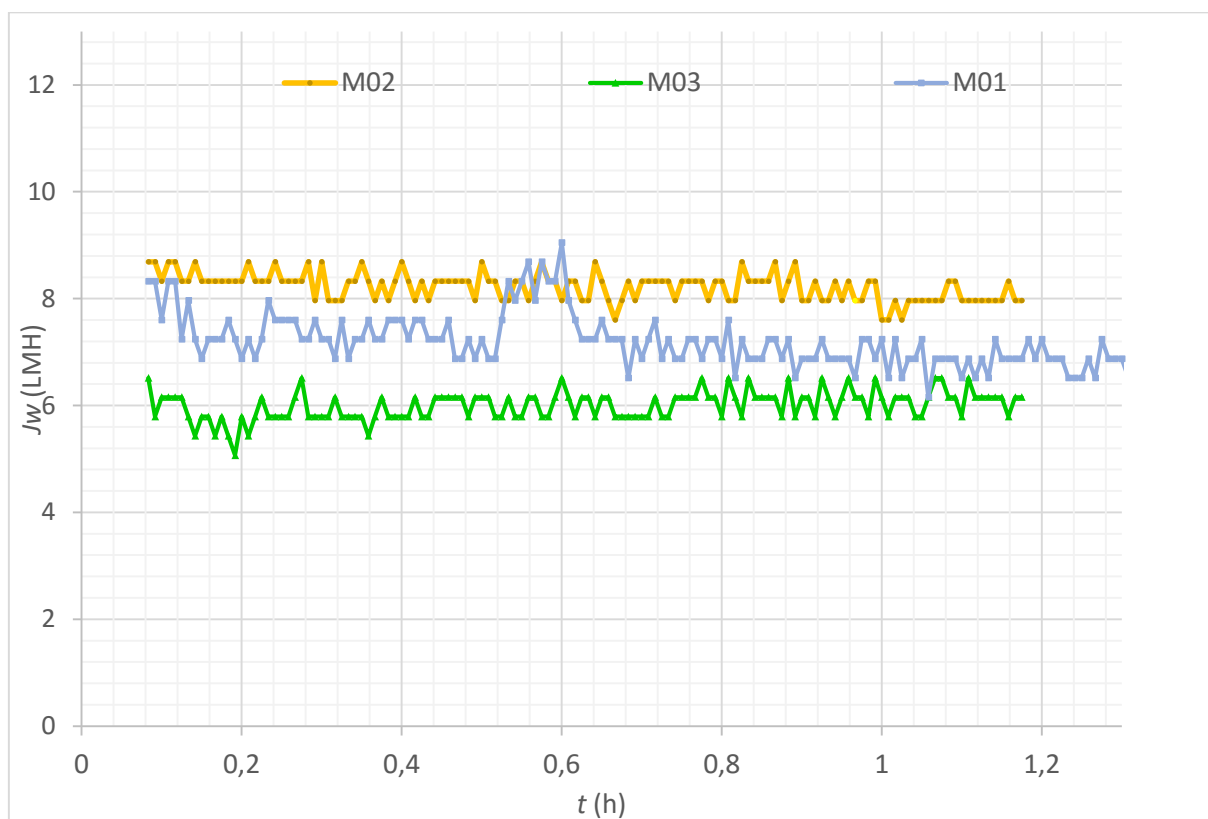
Zadržanost oz. stopnjo zadržanosti komponente smo izračunali po en.(2.9) in en(2.10), ter po enakem načinu kot Bui [27] določili selektivnost; en.(2.12).

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

V nadaljevanju so prikazani eksperimentalni rezultati dobljeni na treh različnih membranah. Poizkusi so bili izvedeni pri temperaturi 20-25 °C.

4.1 Prenos snovi med procesom AL-FS pri različnih membranah

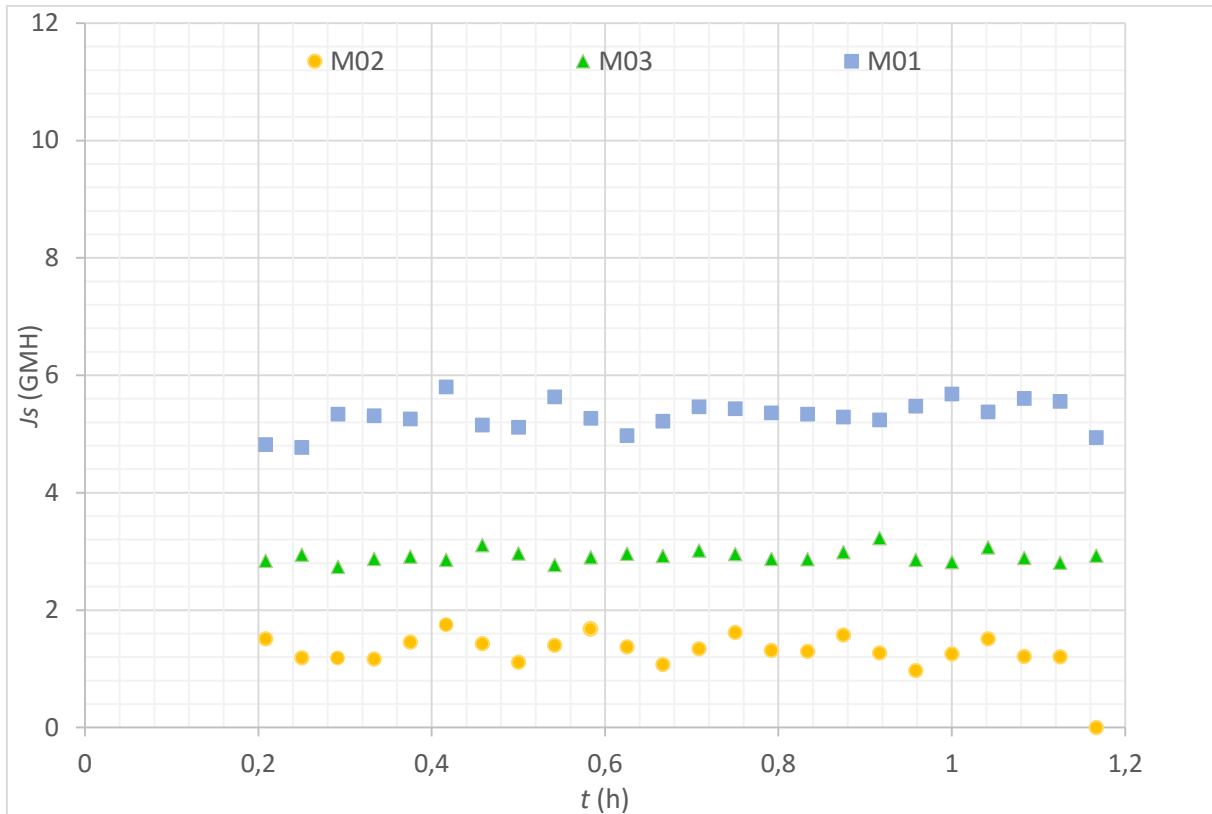
Primerjali smo vse tri membrane v AL-FS načinu. Za gonilno raztopino smo uporabili 1,0 M NaCl.



Slika 4-1: Fluks vode v odvisnosti od časa pri različnih membranah

Na membrani M02 opazimo največji fluks vode, ta je povprečno 8,27 LMH, na M01 je 7,36 LMH in na M03 je 5,98 LMH.

Slika 4-2 prikazuje spremembo povratnega toka topljenca v odvisnosti od časa.

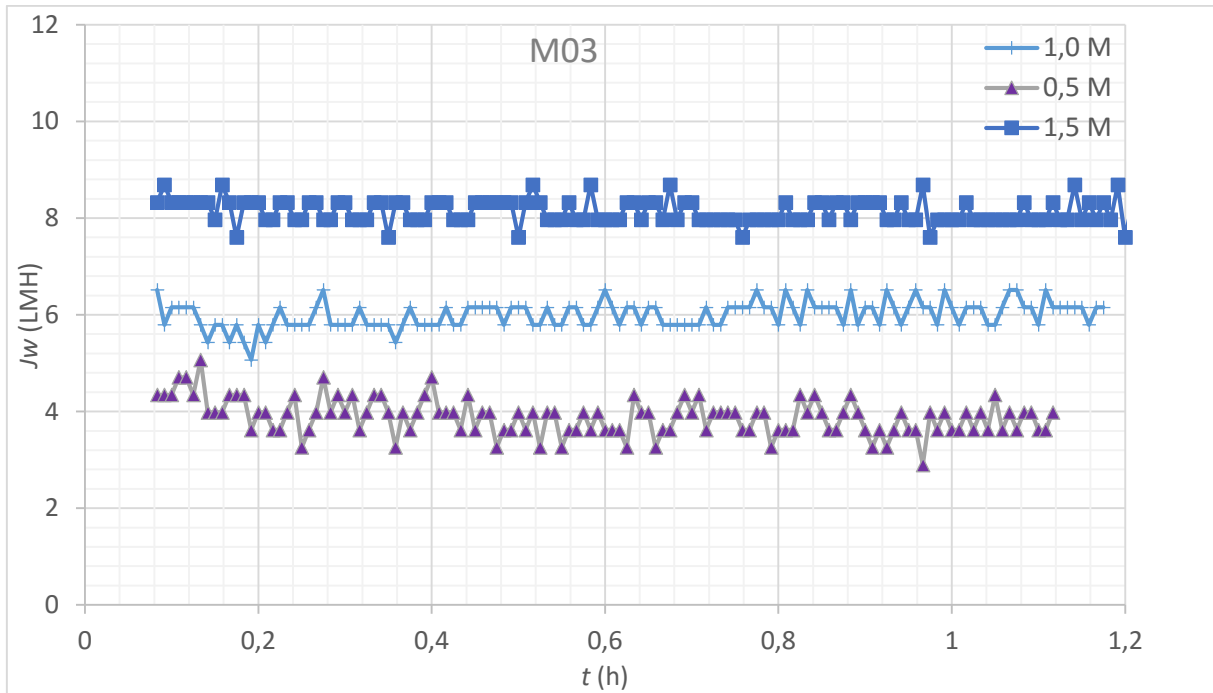


Slika 4-2: Povratni tok topljenca v odvisnosti od časa pri različnih membranah

Pri primerjanju membran med sabo, vidimo razliko v vrednosti povratnega toka, J_s . Najmanjši J_s je bil izmerjen pri procesu FO z membrano M02, in sicer znašal je 1,38 GMH. Zanimiva je primerjava membrane M01 in M03. Gre za iste membrane, vendar je povratni tok topljenca izmerjen z membrano M01 5,28 GMH, z M03 pa 2,80 GMH. Gre za isto vrsto membran, vendar smo na M01 dokazali, da je poškodovana. Vidimo, da že čisto majhne poškodbe močno vplivajo na rezultate, saj ima poškodovana membrana M01 veliko večjo prepustnost topljenca. Ugotovili smo, da je najboljša membrana M02, saj ima najmanjši povratni tok topljenca in hkrati največji fluks vode.

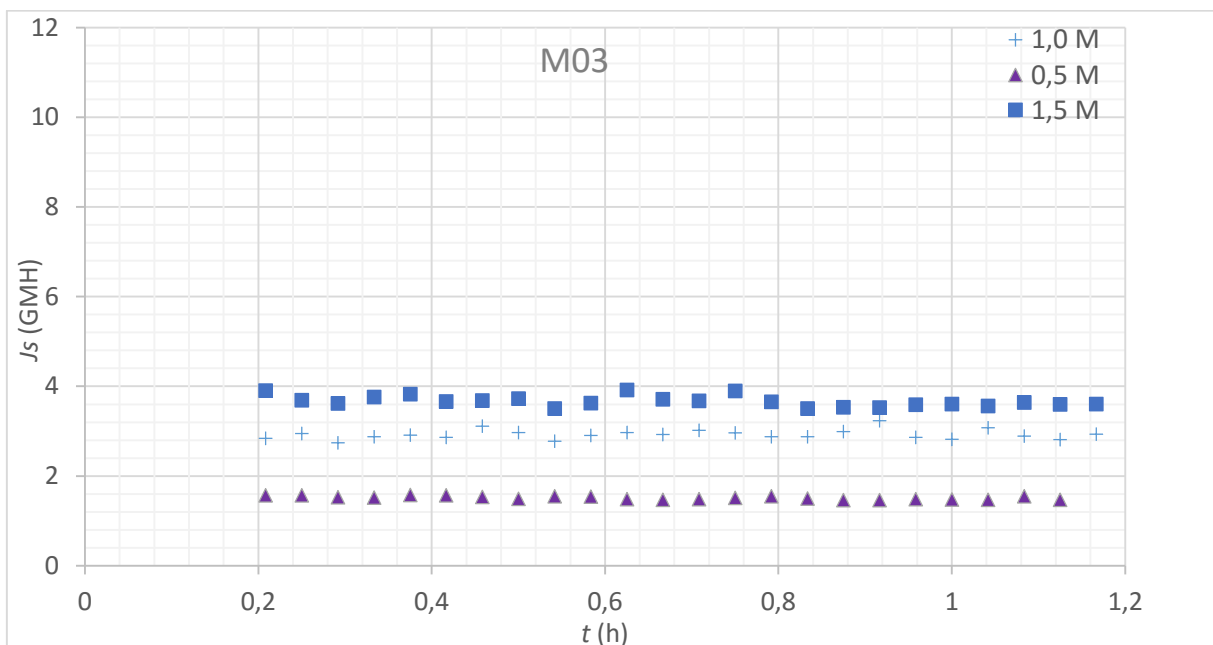
4.2 Vpliv koncentracije gonilne raztopine na prenos snovi

Izvedli smo eksperimente FO procesa z uporabo gonilne raztopine NaCl z različnimi koncentracijami, in sicer 0,5 M, 1,0 M in 1,5 M. Na strani vhodne raztopine smo uporabili deionizirano vodo. Pretok obeh, tako vhodne kot gonilne raztopine je bil 50 mL/min. Slika 4-3 prikazuje primerjavo pretoka vode na enoto površine pri različnih koncentracijah gonilne raztopine.



Slika 4-3: Fluks vode v odvisnosti od časa pri različnih koncentracijah gonilne raztopine

Na sliki 4-3 vidimo, da se z višjo koncentracijo gonilne raztopine NaCl povečuje tudi fluks vode. Tako je pri 0,5 M raztopini povprečni fluks 3,9 LMH, pri 1,0 M je 6 LMH in pri 1,5 M 8,15 LMH. Slika 4-4 prikazuje primerjavo vrednosti J_s med procesi FO z različnimi koncentracijami raztopine NaCl.



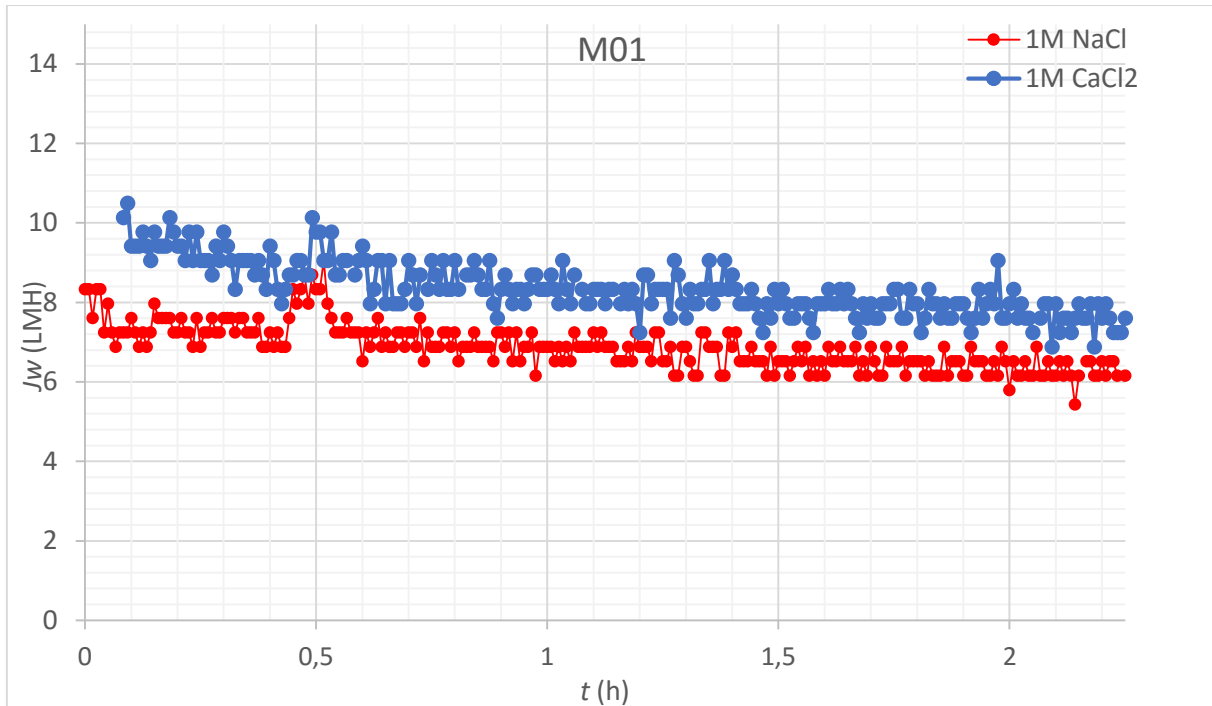
Slika 4-4: Povratni tok topljenca v odvisnosti od časa pri različnih koncentracijah gonilne raztopine

Pri bolj koncentriranih raztopinah NaCl, je višji tudi povratni tok topljenca, ki je pri 0,5 M raztopini povprečno 1,3 GMH, pri 1,5 M pa 3,5 GMH.

4.3 Vpliv različnih gonilnih raztopin na prenos snovi

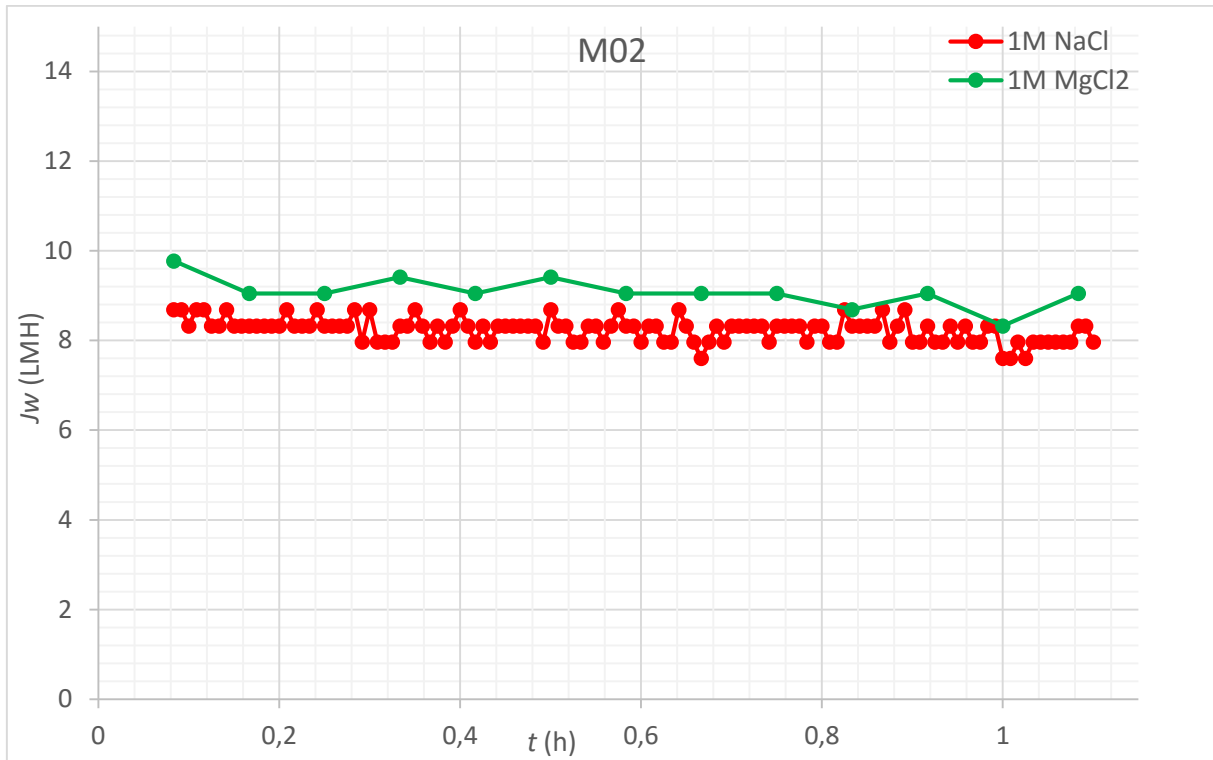
Testirali smo tri različne gonilne raztopine, in sicer NaCl, CaCl₂ in MgCl₂. Za vhodno raztopino smo uporabili deionizirano vodo. Eksperiment smo izvajali v AL-FS načinu, pri pretoku 50 mL/min in na dveh membranah M01 in M02.

Slika 4-5 prikazuje primerjavo hitrosti pretoka vode na enoto površine pri dveh različni gonilnih raztopinah, in sicer NaCl (1 M) in CaCl₂ (1 M). Eksperimenti so bili izvedeni z membrano M01.



Slika 4-5: Fluks vode v odvisnosti od časa za različne gonilne raztopine na membrani M01

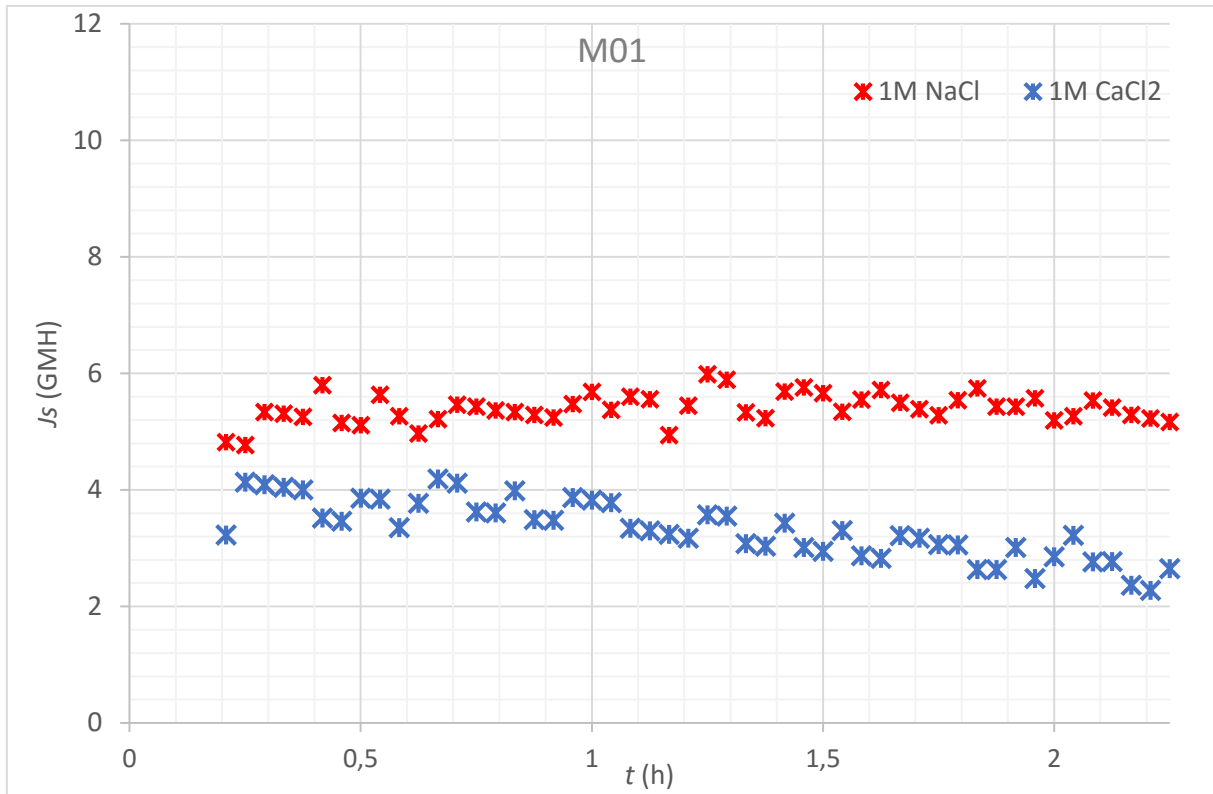
Na membrani M01 sta bila povprečna fluksa vode za NaCl in CaCl₂ 6,98 LMH in 8,44 LMH. Kot vidimo, z raztopino dvovalentnih ionov dosežemo višji fluks vode skozi membrano. Na sliki 4-6 so prikazani rezultati meritev fluksa vode z gonilno raztopino NaCl in MgCl₂ obeh z enako koncentracijo, 1 M.



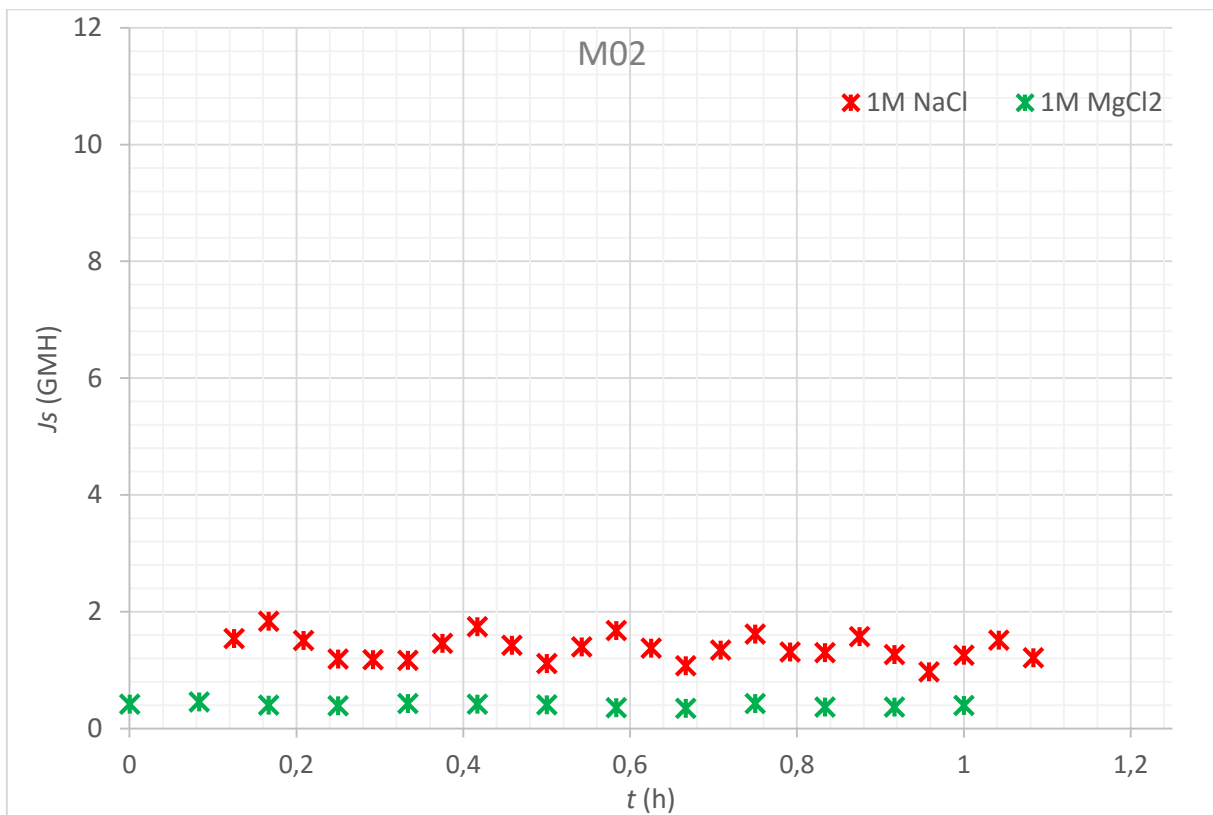
Slika 4-6: Fluks vode v odvisnosti od časa za različne gonilne raztopine na membrani M02

Povprečni fluks vode za raztopini NaCl in $MgCl_2$ je bil 8,27 LMH oz. 9,04 LMH. Iz slike 4-5 in 4-6 vidimo, da je fluks vode nižji, če uporabimo za gonilno raztopino NaCl, kot pa $CaCl_2$ ali $MgCl_2$. Opazijo se tudi razlike med membranami, saj je fluks vode z 1,0 M NaCl nižji na membrani M01, kot pa na membrani M02.

Naslednji dve sliki 4-7 in 4-8 prikazujeta vrednosti J_s z uporabo različnih DS. Predvidevali smo, da bo membrana bolj zadrževala topljenec, ki ima ione z večjim premerom.



Slika 4-7: Povratni tok topljenca v odvisnosti od časa za različne gonilne raztopine na membrani M01



Slika 4-8: Povratni tok topljenca v odvisnosti od časa za različne gonilne raztopine na membrani M02

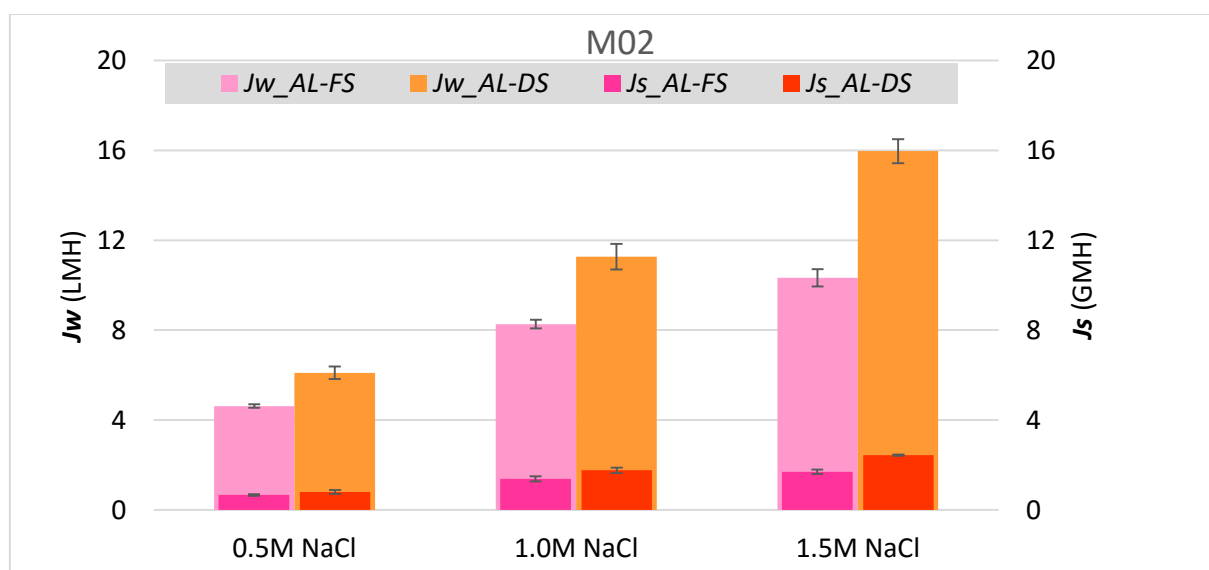
Ravno obratno kot s fluksom vode je s povratnim tokom topljenca (slika 4-7 in 4-8), ki je za NaCl višji kot pa za CaCl_2 ali MgCl_2 . Na membrani M01 je J_s za NaCl znašal 5,39 GMH in za CaCl_2 3,41 GMH, na membrani M02 pa so vrednosti bile 1,38 GMH za NaCl in 0,40 GMH za MgCl_2 .

Membrane naj bi bolj zadrževale molekule gonilnih raztopin, ki imajo topljenec z večjo molsko maso [20, 21]. Trditve smo eksperimentalno dokazali, saj je bil povratni tok topljenca nižji pri dvovalentnih topljencih. Sklepali bi lahko, da so zato boljše gonilne raztopine, vendar se pri večjih molekulah srečujemo z drugim problemom, to je mašenje membran in nalaganje kolača.

4.4 Prenos snovi v AL-FS in AL-DS načinu

Kot smo že v teoriji omenili, sta možni dve postavitvi asimetrične membrane. Vpliv postavitve membrane na fluks vode in povratni tok topljenca je prikazan v nadaljevanju. Eksperimente smo izvedli pri pretoku obeh raztopin 50 mL/min. V AL-FS načinu je aktivna plast membrane na strani vhodne raztopine, medtem ko v AL-DS načinu je aktivna plast na strani gonilne raztopine.

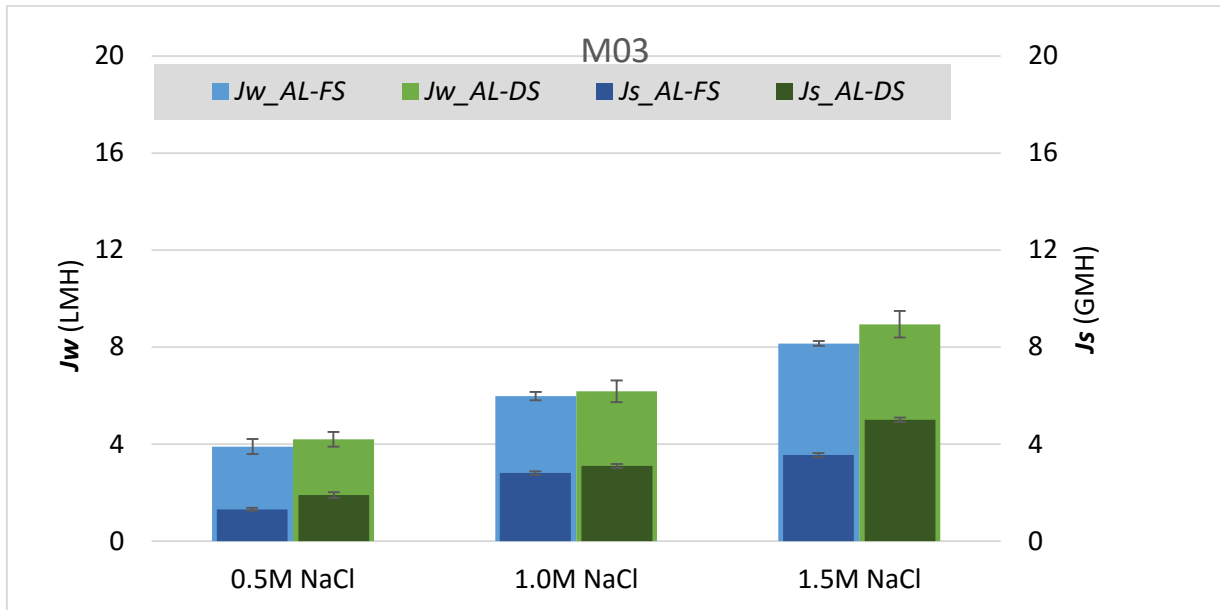
Slika 4-9 prikazuje primerjavo J_w in J_s pri različnih postavitvah membrane pri uporabi različnih koncentracij gonilne raztopine.



Slika 4-9: Primerjava AL-FS in AL-DS načina na membrani M02

Če primerjamo AL-FS in AL-DS način, ugotovimo, da je pri nižjih koncentracijah prenos snovi skozi membrano primerljiv. Razlika med načinom postavitve je bolj vidna pri 1,5 M NaCl, torej ko je koncentracija gonilne raztopine višja. Da pri AL-DS načinu dosežemo večji fluks vode skozi membrano, je potrjeno tudi s strani drugih avtorjev.

Enako primerjavo, vendar na drugi membrani prikazuje slika 4-10.



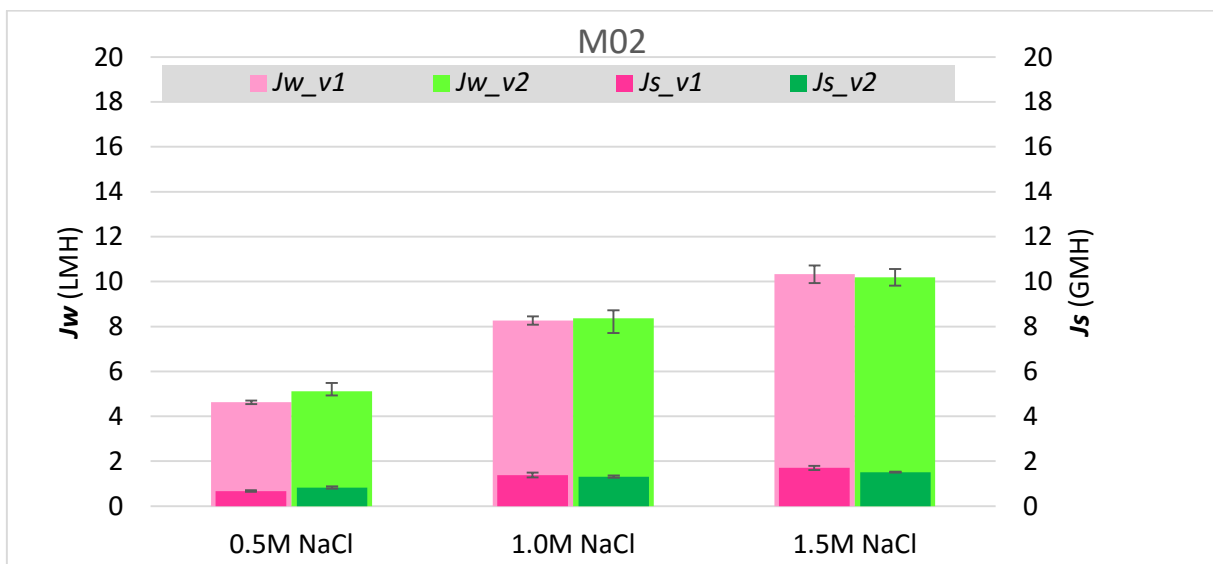
Slika 4-10: PrIMERJVA AL-FS IN AL-DS NAČINA NA MEMBRANI M03

Pri membrani M03 pa vidimo, da način postavitve ne vpliva toliko na J_w in J_s .

4.5 Vpliv hitrosti toka na prenos snovi

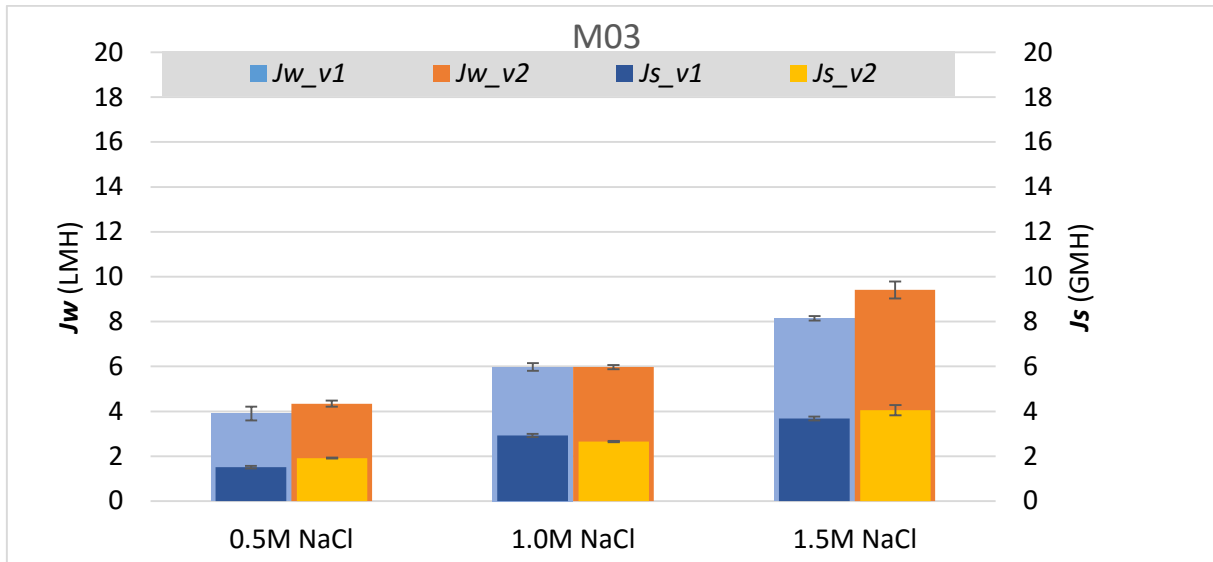
Namen je bil ugotoviti vpliv hitrosti toka DS in FS na tok vode in povratni tok topljenca skozi membrano. Zato smo eksperiment v AL-FS načinu izvedli pri dveh različnih pretokih, in sicer pri hitrosti 50 mL/min (v_1) in 70 mL/min (v_2). Za DS smo uporabili tri različno koncentrirane raztopine NaCl.

Slika 4-11 prikazuje primerjavo J_w in J_s pri dveh hitrostih in treh različnih koncentracijah NaCl.



Slika 4-11: Vpliv hitrosti toka na prenos snovi na membrani M02

Enako primerjavo vendar na drugi membrani (M03) prikazuje slika 4-12.

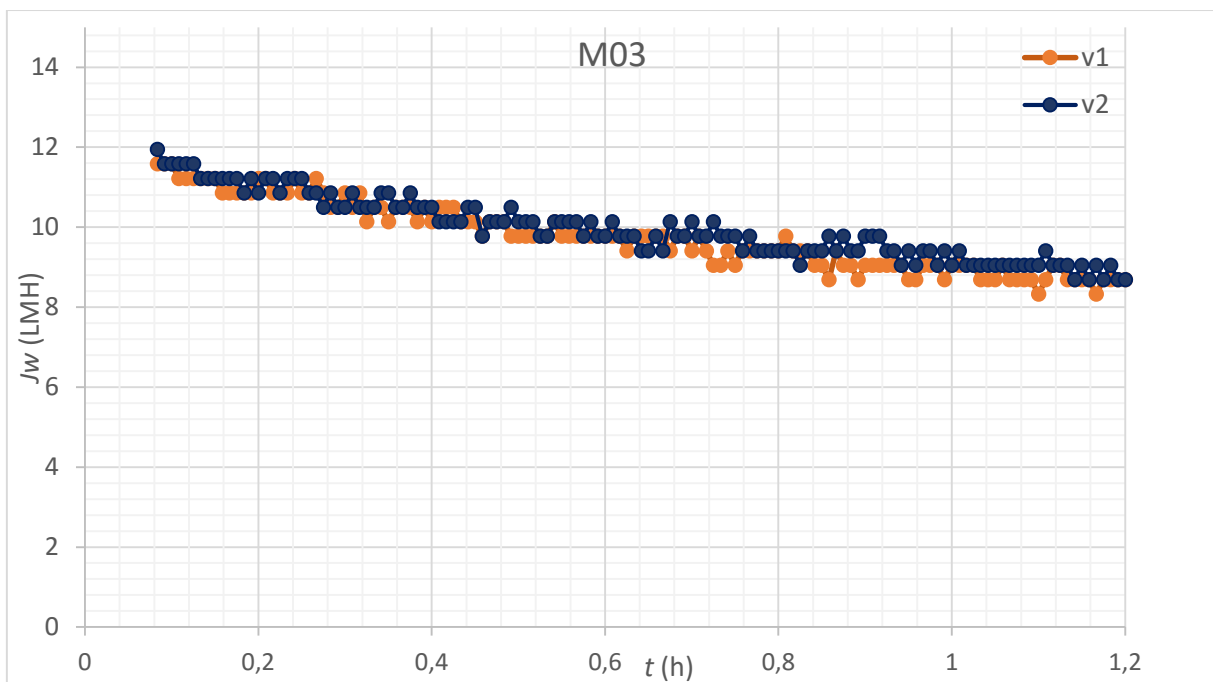


Slika 4- 12: Vpliv hitrosti toka na prenos snovi na membrani M03

Iz slik 4-11 in 4-12 opazimo, da naše hitrosti tokov v povprečju minimalno vplivajo na fluks vode in povratni tok topljenca. Večje razlike je opaziti na membrani M03, kjer ima višja hitrost toka za posledico tudi višji fluks vode.

4.6 Mašenje

Do sedaj so bili predstavljeni rezultati eksperimentov, kjer smo za vhodno raztopino uporabljali deionizirano vodo. To pomeni, da je fluks vode s časom padal le zaradi manjšanja pogonske sile, ker se je med samim procesom DS redčila (osmotski tlak se je posledično zmanjševal). Da bi prikazali mašenje membrane smo za vhodno raztopino imeli raztopino alginata (2 g/L), za gonilno raztopino smo uporabili 2 M NaCl. Eksperiment smo izvedli v AL-FS načinu pri dveh hitrostih in sicer 50 mL/min (v_1) in 70 mL/min (v_2).



Slika 4-13: Vpliv hitrosti toka na mašenje membrane M03

Iz grafa (slika 4-13) vidimo, da ni bistvene razlike v toku vode skozi membrano, če uporabimo različne hitrosti. Opazimo, da se s časom pretok vode manjša, kar je posledica mašenja. Podoben padec fluksa vode vidimo tudi raziskavah, ki jih je opravil She [21], ki je za gonilno raztopino prav tako uporabljal alginat.

4.7 Določitev koeficienta permeabilnosti

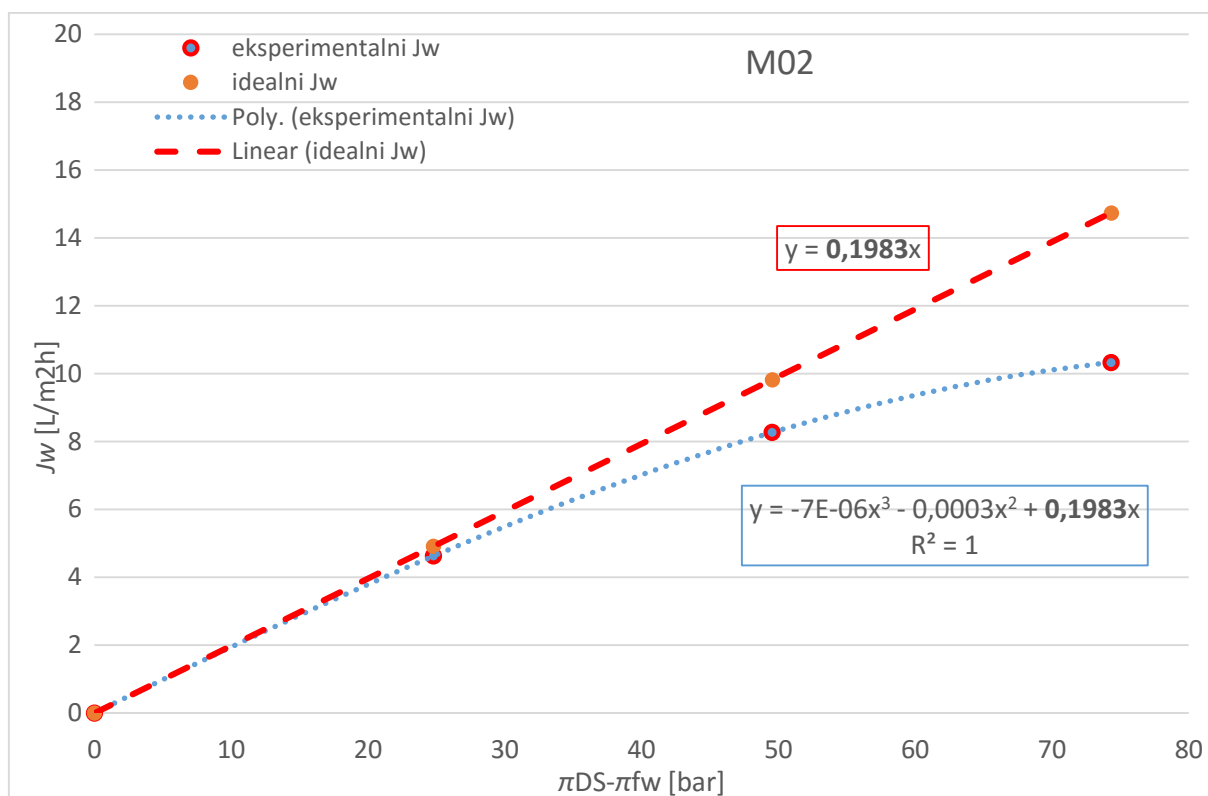
Koeficient permeabilnosti smo določali po načinu Matia Steffani [22], ki se je v svoji tezi skliceval na postopke Saleh O. M. Al Aswad (University of Surrey Velika Britanija, 2014). Če fluks vode prikažemo kot funkcijo osmotskega tlačnega gradienta, iz naklona izrazimo koeficient permeabilnosti A . Iz eksperimentalnih podatkov fluksa vode, je tako možno dobiti prepustnost vode z izračunom prvega odvoda funkcije. Iz enačbe trendne črte $J_w = A \cdot \Delta\pi$, lahko izrazimo vrednost koeficienta A . Za izračun idealnega fluksa vode smo uporabili en.(2.4).

4.7.1 Membrana M02

Izvedli smo poskus z NaCl s hitrostjo toka 50 mL/min. Rezultati so podani v tabeli 4-1 in na sliki 4-14.

Tabela 4-1: Osmotski tlak za eksperimentalni in idealni fluks vode, M02

c [M]	J_w [LMH] (eksper.)	π [bar]	J_{wi} [LMH] (idealni)
0	0	0	0
0,5	4,62	24,78	4,91
1	8,27	49,55	9,83
1,5	10,33	74,33	14,74



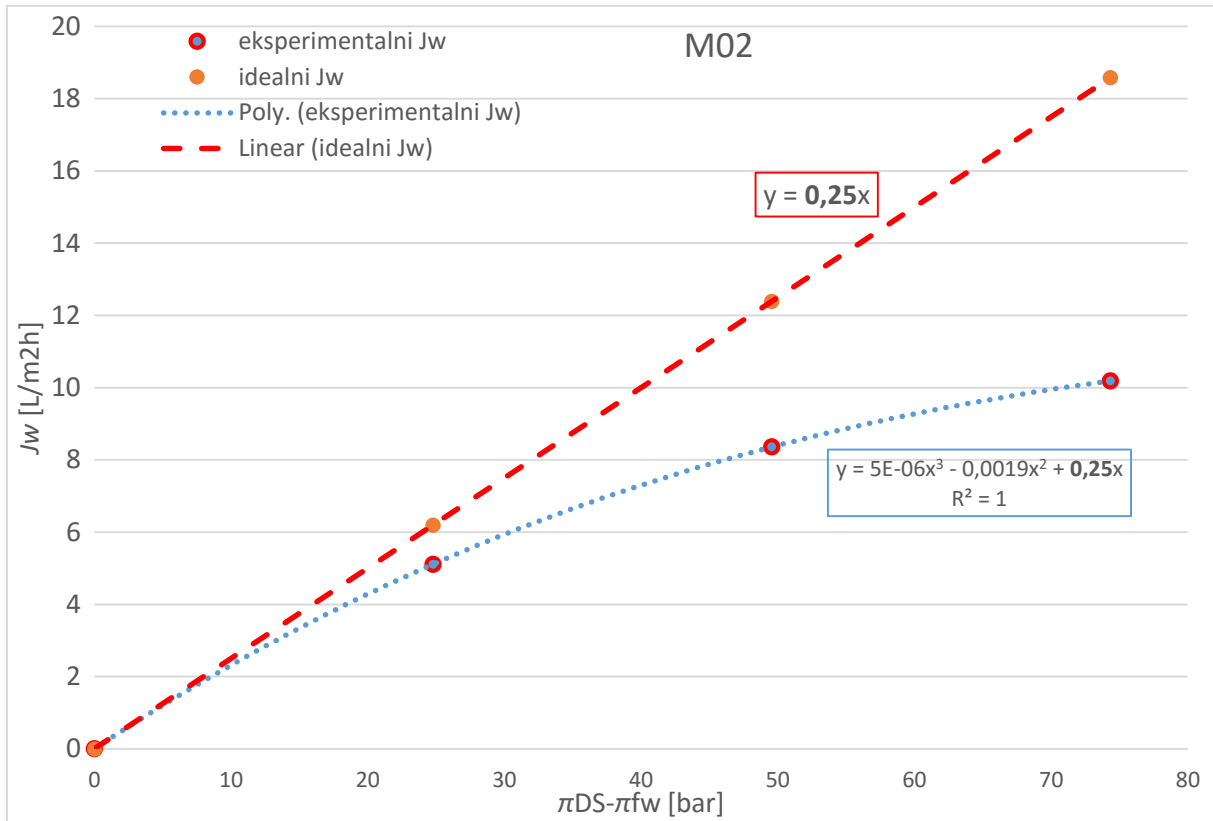
Slika 4-14: Eksperimentalni in idealni fluks vode v odvisnosti od osmotskega tlaka, M02

Iz naklona premice smo izrazili koeficient A , ki je $0,1983 \text{ L}/(\text{m}^2\text{h bar})$.

Enak poskus smo izvedli tudi pri hitrosti toka $70 \text{ mL}/\text{min}$. Rezultati so podani v tabeli 4-2 in na sliki 4-15.

Tabela 4-2: Osmotski tlak za eksperimentalni in idealni fluks vode, M02

c [M]	J_w [LMH] (eksper.)	π [bar]	J_{wi} [LMH] (idealni)
0	0	0	0
0,5	5,11	24,78	6,19
1	8,36	49,55	12,39
1,5	10,19	74,33	18,58



Slika 4- 15: Eksperimentalni in idealni fluks vode v odvisnosti od osmotskega tlaka, M02

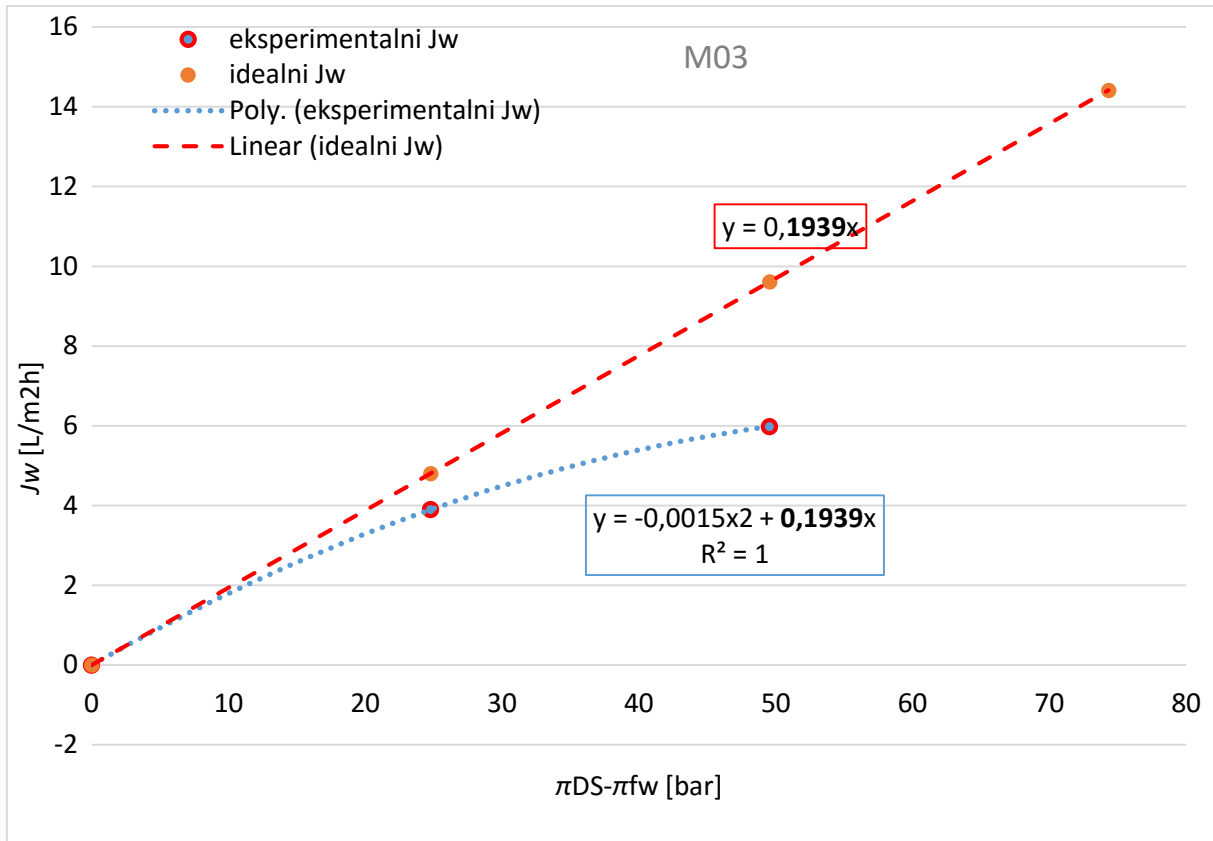
Iz naklona premice smo izrazili koeficient A, ki je $0,25 L/(m^2h \text{ bar})$.

4.7.2 Membrana M03

V tabeli 4-3 in na sliki 4-16 so prikazani rezultati eksperimentov narejenih z membrano M03 in pri hitrosti pretoka 50 mL/min . Kot DS smo uporabili 3 različne koncentracije raztopine NaCl.

Tabela 4-3: Osmotski tlak za eksperimentalni in idealni fluks vode, M03

c [M]	J_w [LMH] (eksper.)	π [bar]	J_{wi} [LMH] (idealni)
0	0	0	0
0,5	3,90	24,78	4,80
1	5,98	49,55	9,61



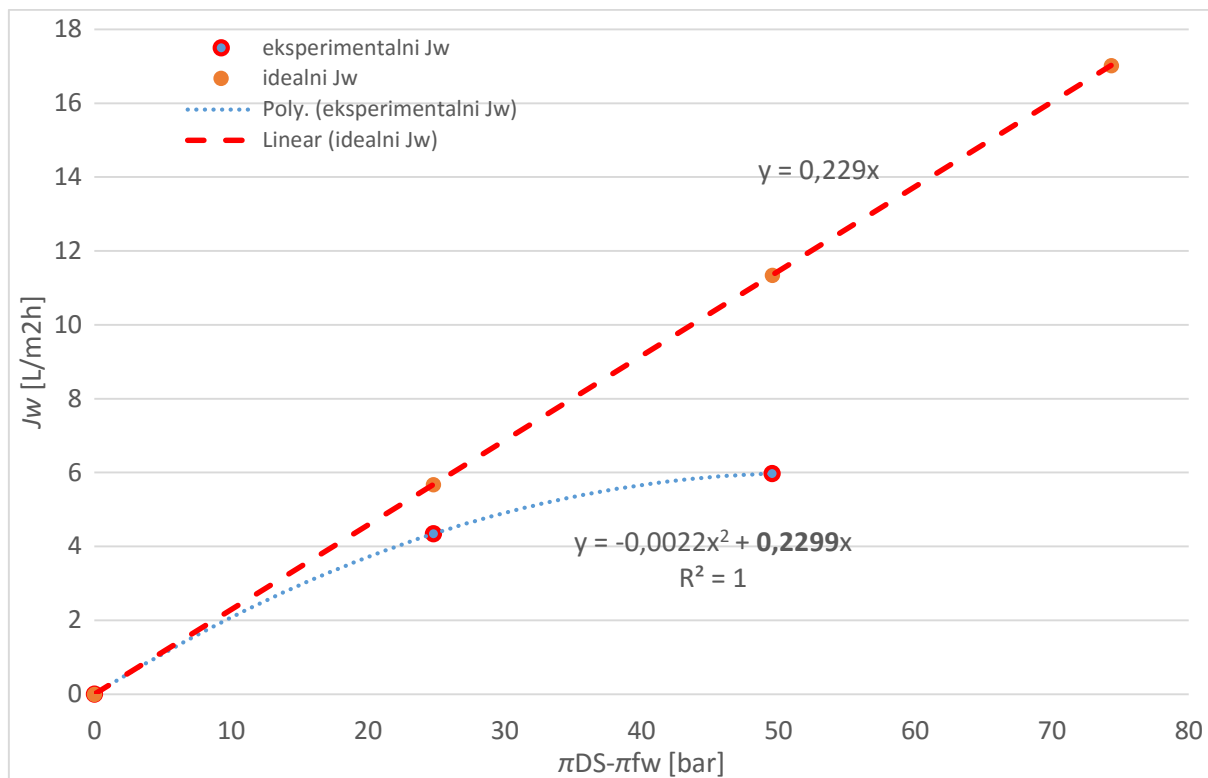
Slika 4-16: Eksperimentalni in idealni fluks vode v odvisnosti od osmotskega tlaka, M03

Iz naklona premice smo izrazili koeficient A, ki je 0,1939 L/(m²h bar).

Na enaki membrani so bili izvedeni eksperimenti pri hitrosti toka 70 mL/min. Rezultati so podani v tabeli 4-4 in na sliki 4-17.

Tabela 4-4: Osmotski tlak za eksperimentalni in idealni fluks vode, M03

c [M]	J_w [LMH] (eksper.)	π [bar]	J_{wi} [LMH] (idealni)
0	0	0	0
0,5	4,34	24,78	5,67
1	5,97	49,55	11,35



Slika 4-17: Eksperimentalni in idealni fluks vode v odvisnosti od osmotskega tlaka, M03

Iz naklona premice smo izrazili koeficient A, ki je 0,2299 L/(m²h bar).

Če primerjamo dobljene permeabilnosti, ugotovimo, da je pri hitrosti toka 50 mL/min 0,19 L/(m²h bar) na obeh membranah in pri hitrosti 70 mL/min 0,25 L/(m²h bar) na membrani M02 oz. 0,23 L/(m²h bar) na M03.

4.8 Določitev koeficienta selektivnosti

Najprej smo določili koeficient zadrževanje R , ki smo ga izračunali po en.(2.9). Pri tem smo uporabili začetno in končno koncentracijo topljenca, ki smo jo preračunali iz prevodnosti in TDS. Za izračun koeficienta selektivnosti smo uporabili en.(2.12).

V tabeli 4-5 so prikazani izračunani koeficienti selektivnosti za membrano M02 pri dveh hitrostih pretoka in 3 koncentracijah raztopin NaCl.

Tabela 4-5: Določitev koeficienta B za membrano M02

	c [M]	R	J_w [L/(m ² h)]	B [L/(m ² h)]
v1	0,5	0,999	4,625	0,005
	1,0	0,999	8,270	0,008
	1,5	0,999	10,326	0,010
v2	0,5	0,999	5,112	0,005
	1,0	0,999	8,357	0,008
	1,5	0,999	10,186	0,010

Ugotovili smo, da je koeficient zadrževanja zelo velik, saj na membrani M02 dosega vrednosti 0,99, pri čemer bi vrednost 1 pomenila popolno zadrževanje.

Tabela 4-6 navaja enake podatke meritev in izračunov, vendar za membrano M03.

Tabela 4-6: Določitev koeficienta B za membrano M03

	c [M]	R	J_w [L/(m ² h)]	B [L/(m ² h)]
v1	0,5	0,999	3,897	0,004
	1,0	0,999	5,981	0,006
	1,5	0,999	8,146	0,008
v2	0,5	0,999	4,341	0,004
	1,0	0,999	5,971	0,006
	1,5	0,999	9,412	0,009

Kot vidimo v tabeli 4-6 imamo tudi na membrani M03 velik koeficient zadrževanja, in sicer 0,9993.

Na koeficient selektivnosti bolj kot različne hitrosti toka, vpliva koncentracija gonilne raztopine, saj se z večanjem koncentracije povečuje fluks vode, s tem pa tudi koeficient selektivnosti.

4.9 Primerjava permeabilnosti in selektivnosti

Naše eksperimentalne izračune, ki so podani v tabeli 4-7, smo primerjali z rezultati drugih avtorjev (ti so podani v tabeli 4-8), ki so prav tako za gonilno raztopino uporabljali NaCl.

Tabela 4-7: Koeficienti permeabilnosti in selektivnosti

		A [L/(m ² h bar)]	J _w [L/(m ² h)]	B [L/(m ² h)]	R [%]	c (DS)
M02	v1	0,1983	10,33	0,01	99,9	1,5 M NaCl
	v2	0,25	10,19	0,01	99,9	
M03	v1	0,1939	8,15	0,008	99,9	1,5 M NaCl
	v2	0,2299	9,41	0,009	99,9	

Tabela 4-8: Koeficienti permeabilnosti in selektivnosti iz drugih raziskav

Referenca	Membrana	A [L/(m ² h bar)]	B [L/(m ² h)]	R [%]	Gonilna raztopina
Yip et al, Es&T_2010 [24]	HTI-CTA	0,3528	/	94.1±1.1	1,5 M NaCl
Yip et al, Es&T_2010 [24]	TFC-FO	1,1448	/	97.4±0.5	1,5 M NaCl
Yip et al, Es&T_2010 [24]	TFC-RO z PET	1,2780	/	98.9±0.4	1,5 M NaCl
Yip et al, Es&T_2010 [24]	TFC-RO brez PET	1,4616	/	98.3±0.4	1,5 M NaCl
Stefani Matia [26]	CTA-FO	0,2730	/		NaCl
She et al_2012 [25]	HTI-CTA	1,0332	0,5760	97-98	1,5 M NaCl
Wang et al, 2010a [39]	CA	0,7812	0,6228		NaCl
Gray et al, 2006 [39]	CTA	1,1088	0,4572		NaCl
Phillip et al, 2010 [39]	CTA	0,4428	0,2628	89,1-96,1	NaCl

Izračunane vrednosti koeficienta *B* se glede na druge študije razlikujejo. Razlog za to je predvsem v izvedbi eksperimenta. Kot smo že omenili v teoretičnem delu, se koeficient *B*, eksperimentalno določa v načinu reverzne osmoze pri povišanih tlakih [25, 26].

V našem primeru to ni bilo mogoče izvesti, saj uporabljene membrane niso primerne za delo z višjimi tlaki in je med delom prišlo do mehanske poškodbe membran.

Ravno tako k nizki vrednosti koeficienta *B* doprinese visok koeficient zadržanosti soli. V naših eksperimentih je bil zelo visok v primerjavi z drugimi, saj dosegamo vrednosti več kot 99 %, pri drugih avtorjih pa je procent nekoliko nižji, in sicer od 89-99 %. To dokazuje, da membrane z vstavljenimi akvaporini veliko bolj zadržujejo snovi.

V našem primeru smo za določitev koeficienta zadržanosti in nato za izračun koeficienta permeabilnosti, beležili začetno koncentracijo topljenca v gonilni raztopini in končno koncentracijo topljenca v vhodni raztopini, ki je bila pred začetkom procesa enaka nič.

Pri primerjanju izračunanih koeficientov med različnimi koncentracijami vidimo, da z naraščanjem koncentracije, narašča tudi vrednost koeficienta, kajti z naraščanjem koncentracije gonilne raztopine prihaja do večjih razlik osmotskega tlaka in posledično je večji tudi fluks vode skozi membrano. V eni od raziskav so uporabili fluks vode približno 35 L/(m²hbar) [25], v naši raziskavi pa smo pri 1,5 M gonilni raztopini NaCl dosegli fluks vode približno 10 L/(m²h bar).

V primeru, ko primerjamo vrednosti B , izračunane pri različnih hitrostih pretoka raztopin, pa razlik med vrednostmi ni opaziti.

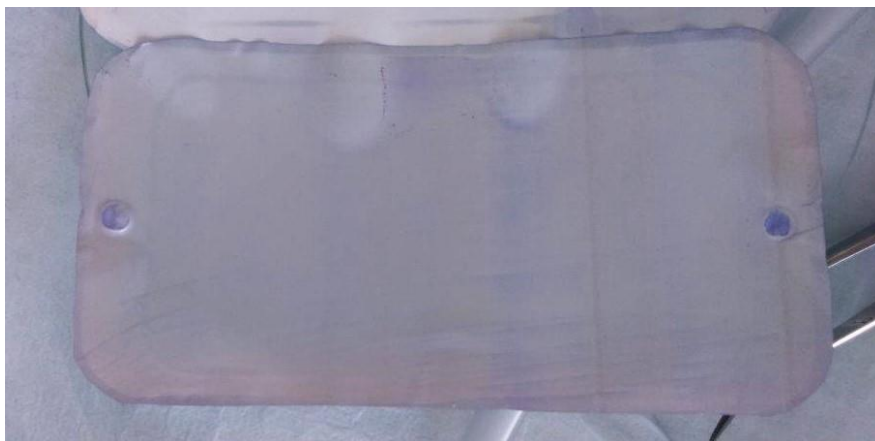
4.10 Določitev morebitnih poškodb na membrani

Pri obdelavi eksperimentalnih meritev opravljenih na membrani M01, smo ugotovili, da so vrednosti povratnega toka topljenca bistveno višje, kot pa je specificirano na tehničnem listu dobavitelja teh membran. Zato smo opravili test z barvilom metil-vijolično, da preverimo ali je membrana poškodovana oz. da določimo vzrok napake. Med samim izvajanjem eksperimenta smo tudi ugotovili, da je potrebna natančnost pri nameščanju membrane v celico ter previdnost pri rokovanju z membrano, da preprečimo poškodbe.

Po izvedbi procesa osmoze, smo membrano 10 minut namakali v 0,01 % raztopini metil vijolično.



Slika 4-18: Namakanje membrane v raztopini metil vijolično



Slika 4-19: Poškodbe na membrani M01

Iz slike 4-19 opazimo, da so na membrani M01 vidne vijolične praske, kar pomeni, da je aktivna plast na membrani poškodovana. Meritve zato niso točne, saj že majhne poškodbe vplivajo na prepustnost membrane, tok vode in povratni tok soli.

5 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu smo določali različne vplive na prenos snovi skozi biomimetično membrano z vgrajenimi akvaporini. Spreminjali smo obratovalne pogoje in beležili kako se spreminjata fluks vode in povratni tok topljenca.

Uporabili smo različne gonilne raztopine, in sicer vodne raztopine soli NaCl, CaCl₂ in MgCl₂. Ugotovili smo, da je bil ob uporabi NaCl fluks vode skozi membrano 7 oz. 8,3 L/(m²h), kar je manj kot pri uporabi CaCl₂ oz. MgCl₂. Ravno nasprotno pa je bil višji povratni tok topljenca, kar smo tudi pričakovali, saj so Ca²⁺ in Mg²⁺ ioni večji in zato jih membrana lažje zadrži. Na podlagi testov, bi bila najboljša gonilna raztopina MgCl₂, ki ima povratni tok le 0,4 g/(m²h).

Testirali smo tri membrane, vendar smo na membrani M01 dokazali poškodbe. Najprimernejša je membrana M02, saj zagotavlja najvišji fluks vode, ki je bil ob uporabi 1,0 M NaCl 8,3 L/m²h, in najmanjši povratni tok topljenca 1,4 g/(m²h).

Različne koncentracije prav tako vplivajo na prenos. Pri uporabi 0,5 M, 1,0 M in 1,5 M NaCl smo ugotovili, da se z višanjem koncentracije povečujeta tudi opazovana parametra.

Pri eksperimentih smo uporabljali različne hitrosti pretoka, in sicer 50 mL/min in 70 mL/min. Pričakovali smo, da bomo opazili večje razlike pri fluksu vode in povratnem toku topljenca, vendar so bile zelo majhne, še posebej ob upoštevanju intervala napak. Večji razlik ni bilo niti pri mašenju membrane z uporabo raztopine alginata kot vhodne raztopine.

Glede na različno postavitev membrane smo dobili različne flukse vode in povratne toke, način AL-DS daje višje vrednosti. Veliko pa je odvisno tudi od membrane. Pri M03 smo opazili le manjše povečanje pri AL-DS, tako je bil pri uporabi 1,0 M NaCl fluks vode za 0,2 L/(m²h) višji od AL-FS načina, pri membrani M02 pa je bila razlika 3 L/(m²h).

Iz pridobljenih meritev smo določili permeabilnost oz. koeficient *A*, ki je bil pri hitrosti toka 50 mL/min 0,19 L/(m²h bar) in pri hitrosti 70 mL/min 0,25 oz. 0,23 L/(m²h bar).

Selektivnost oz. koeficient *B* je bil nizek, in sicer približno 0,01 L/(m²h). Odvisen pa je tudi od koncentracije, saj se večja skupaj z koncentracijo gonilne raztopine. Dosegli smo visoko 99,9 % stopnjo zadrževanja, kar je še en dokaz učinkovitost membran z vstavljenimi akvaporini.

6 LITERATURA

- [1] Chekli, L., et al., A review of draw solutes in forward osmosis process and their use in modern applications. *Desalination and Water Treatment*, 2012. 43, 167-184.
- [2] Valladares Linares, R., et al., Water harvesting from municipal wastewater via osmotic gradient: An evaluation of process performance. *Journal of Membrane Science*, 2013. 447, 50-56.
- [3] Cath, T.Y., et al., A multi-barrier osmotic dilution process for simultaneous desalination and purification of impaired water. *Journal of Membrane Science*, 2010. 362, 417-426
- [4] Yangali-Quintanilla, V., et al., Indirect desalination of Red Sea water with forward osmosis and low pressure reverse osmosis for water reuse. *Desalination*, 2011. 280, 160-166.
- [5] Bamaga, O.A., Yokochi, A. in Beaudry, E.G., Application of forward osmosis in pretreatment of seawater for small reverse osmosis desalination units. *Desalination and Water Treatment*, 2009. 5, 183-191.
- [6] Tan, C.H. in Ng, H.Y., A novel hybrid forward osmosis - nanofiltration (FO-NF) process for seawater desalination: Draw solution selection and system configuration. *Desalination & Water Treatment*, 2010. 13, 356.
- [7] Xie, M., et al., A Forward Osmosis–Membrane Distillation Hybrid Process for Direct Sewer Mining: System Performance and Limitations. *Environmental Science & Technology*, 2013. 47, 13486-13493.
- [8] Duong, P.H.H. in Chung, T.-S., Application of thin film composite membranes with forward osmosis technology for the separation of emulsified oil–water. *Journal of Membrane Science*, 2014. 452, 117-126.
- [9] McGinnis, R.L., et al., Pilot demonstration of the NH₃/CO₂ forward osmosis desalination process on high salinity brines. *Desalination*, 2013. 312, 67-74.
- [10] Cornelissen, E.R., et al., Membrane fouling and process performance of forward osmosis membranes on activated sludge. *Journal of Membrane Science*, 2008. 319, 158-168.
- [11] Zhang, J., et al., Membrane biofouling and scaling in forward osmosis membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 2012. 403–404, 8-14.
- [12] Petrinić, I., Membrane technologies for water treatment and reuse in the textile industry. *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment*. 2015

- [13] Goh, Matsuura, Recent trends in membranes and membrane processes for desalination. *Desalination*. 2015
- [14] She, Wong, Zhao, Organic fouling in pressure retarded osmosis
- [15] Mi, B. in Elimelech, M., Chemical and physical aspects of organic fouling of forward osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*, 2008. 320, 292-302.
- [16] Seidel, A. in Elimelech, M., Coupling between chemical and physical interactions in natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes: implications for fouling control. *Journal of Membrane Science*, 2002. 203, 245-255.
- [17] Andrea Achilli, Tzahi Y. Cath, Amy E. Childress, Selection of Inorganic-based draw solution for forward osmosis applications. *Journal of Membrane Science*, Volume 364, Issue 1-2, 15 November 2010, Pages 233-241.
- [18] Korenak, J., Petrinić, I., Osnove procesov osmoze in biomimetičnih membran. *Kemija v šoli in družbi*, 2015
- [19] Cath, T., Forward osmosis: Principles, applications and recent developments. *Journal of Membrane Science*. 2006
- [20] Hancock, N.T., et al., Bidirectional Permeation of Electrolytes in Osmotically Driven Membrane Processes. *Environmental Science & Technology*, 2011. 45, 10642-10651
- [21] Inger Lise Alsvik, May-Britt Hägg (March 2013). Pressure Retarded Osmosis and Forward Osmosis Membranes: Materials and Methods. *Polymers* 2013, 5(1), 303-327.
- [22] Ge, Q., et al., Hydrophilic Superparamagnetic Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Performance in Forward Osmosis Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011. 50, 382-388.
- [23] McCutcheon, J.R. in Elimelech, M., Influence of concentrative and dilutive internal concentration polarization on flux behavior in forward osmosis. *Journal of Membrane Science*, 2006. 284, 237-247.
- [24] Yip, N.Y. in Tiraferri, A., High performance thin-film composite forward osmosis membrane. *Environmental Science and Technology*, 2010
- [25] She, Q., Jin, X., Tang, C., Relating reverse and forward diffusion to membrane fouling in osmotically driven membrane processes. *Water Research*, 2012
- [26] Stefani, M., Forward osmosis: Influence of sucrose and sodium chloride as draw solutions on process performance, 2014
- [27] Bui, N., Proper accounting of mass transfer resistance in forward osmosis: Improving the accuracy of model predictions of structural parameter, *Journal of Membrane Science*, 2015, 289-302.
- [28] Kumar, M., Biomimetic membranes as new materials for applications in environmental engineering and biology. 2010, University of Illinois: Urbana, Illinois.
- [29] Tang, C., et al., Biomimetic aquaporin membranes coming of age. 2015.

- [30] Korenak, J., Osnove procesov osmoze in biomimetičnih membran. 2015
- [31] Tang, C.Y., et al., Desalination by biomimetic aquaporin membranes: Review of status and prospects. *Desalination*, 2013. 308, 34-40.
- [32] Zhong, P.S., et al., Aquaporin-embedded biomimetic membranes for nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 2012. 407–408, 27-33.
- [33] Duong, P.H.H., et al., Planar biomimetic aquaporin-incorporated triblock copolymer membranes on porous alumina supports for nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 2012. 409–410, 34-43.
- [34] Wang, H., et al., Highly Permeable and Selective Pore-Spanning Biomimetic Membrane Embedded with Aquaporin Z. *Small*, 2012. 8, 1185-1190.
- [35] Borgnia, M.J., et al., Functional reconstitution and characterization of AqpZ, the E. coli water channel protein1. *Journal of Molecular Biology*, 1999. 291, 1169-1179.
- [36] Kumar, M., et al., Highly permeable polymeric membranes based on the incorporation of the functional water channel protein Aquaporin Z. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007. 104, 20719-20724.
- [37] Smrdel, P., Bogataj, M., Mrhar, A., Alginat v dostavnih sistemih s prirejenim sproščanjem, *Pregledni znanstveni članki, Farm Vestn*, 2008, 59
- [38] Nguyen, H., A new class of draw solutions for minimizing reverse salt flux to improve forward osmosis desalination, *Science of the Total Environment*, 2015
- [39] Lutchmiah, K., Forward osmosis for application in wastewater treatment: A review, *Water Research*, 2014.

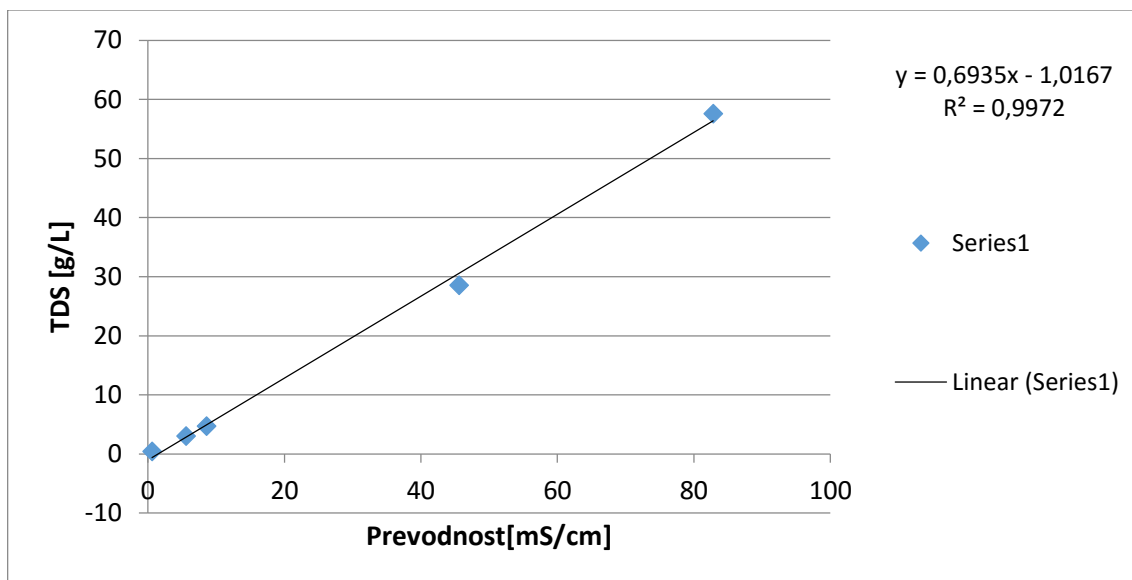
7 PRILOGE

7.1 Umeritvena krivulja TDS za NaCl

Tabela 7- 1: TDS za NaCl

Koncentracija [M]	Masa [g]		Razlika [g]	TDS [g/L]	κ [mS/cm]
	Prej	Potem			
0,005	49,2032	49,2115	0,0083	0,415	0,61
0,05	53,0564	53,1165	0,0601	3,005	5,57
0,08	39,1685	39,262	0,0935	4,675	8,56
0,5	79,3083	79,8791	0,5708	28,54	45,6
1	39,19	40,3411	1,1511	57,555	82,8

Iz eksperimentalnih podatkov smo naredili umeritveno krivuljo.



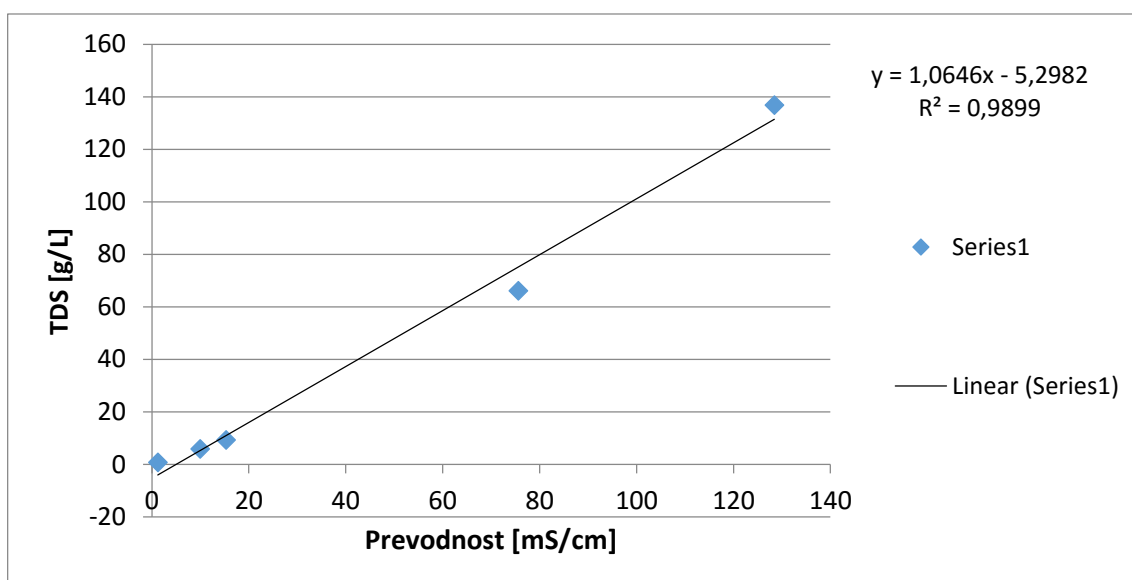
Slika 7- 1: Umeritvena krivulja TDS za NaCl

7.2 Umeritvena krivulja TDS za CaCl₂

Tabela 7- 2: TDS za CaCl₂

Koncentracija [M]	Masa [g]			TDS [g/L]	κ [mS/cm]
	Prej	Potem	Razlika [g]		
0,005	39,1699	39,18458	0,01468	0,734	1,194
0,05	39,1922	39,3093	0,1171	5,855	9,96
0,08	49,205	49,3906	0,1856	9,28	15,29
0,5	53,0582	54,3807	1,3225	66,125	75,6
1	79,3108	82,0478	2,737	136,85	128,4

Iz eksperimentalnih podatkov smo naredili umeritveno krivuljo.

Slika 7- 2: Umeritvena krivulja TDS za CaCl₂

8 ŽIVLJENJEPIS



OSEBNI PODATKI **Kolar Veronika**

Zabukovica 46a, SI-3302 Griže (Slovenija)



veronika.h.kolar@gmail.com

DELOVNE IZKUŠNJE

10. 2011–4. 2012 **Praksa + Študentsko delo v laboratoriju**
Inštitut za ekološke raziskave ERICo d.o.o., Koroška cesta 58, 3320 Velenje

IZOBRAŽEVANJE IN USPOSABLJANJE

2003–2007 **Gimnazijski maturant**
Gimnazija Celje-Center, Celje (Slovenija)

2008–v teku **Diplomirani inženir kemijske tehnologije**
Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Maribor (Slovenija)

KOMPETENCE

Materni jezik slovenščina

Drugi jeziki	RAZUMEVANJE		GOVORJENJE		PISNO SPOROČANJE
	Slušno razumevanje	Bralno razumevanje	Govorno sporazumevanje	Govorno sporočanje	
angleščina	B2	B2	B1	B1	A2
nemščina	A1	A1	A1	A1	A1

Stopnja: A1 in A2: Osnovni uporabnik - B1 in B2: Samostojni uporabnik - C1 in C2: Usposobljeni uporabnik
Skupni evropski jezikovni okvir