

**PÖÖRDOSMOOS JA PÄRIOSMOOS VEETEHNOLOOGIAS**  
**REVERSE OSMOSIS AND FORWARD OSMOSIS IN WATER**  
**TECHNOLOGY**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Kristjan Kurim

Üliõpilaskood: 179553EACB

Juhendaja: Inna Kamenev  
vanemlektor

Tallinn 2023

*(Tiitellehe pöördel)*

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“15.” jaanuar 2023

Autor: Kristjan Kurim  
/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“15.” jaanuar 2023

Juhendaja: Inna Kamenev  
/ allkirjastatud digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

“.....” jaanuar 2023

Kaitsmiskomisjoni esimees: Oliver Järvik

.....  
/ allkirjastatud digitaalselt /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Kristjan Kurim

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Pöördosmoos ja päriosmoos veetehnoloogias, mille juhendaja on Inna Kamenev,

1.1.reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

/Allkirjastatud digitaalselt/

15. jaanuar 2023

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

**Tallinna Tehnikaülikool  
Energiatehnoloogia instituut**

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Kristjan Kurim, 179553EACB

Õppekava, peaariala: EACB, Keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia ,

Juhendaja: vanemlektor Inna Kamenev, 56692170

## Lõputöö teema:

(eesti keeles) Pöördosmoos ja päriosmoos veetehnoloogias

(inglise keeles) Reverse Osmosis and Forward Osmosis in Water Technology

## Lõputöö põhieesmärgid:

1. Tutvuda pöördosmoosi ja päriosmoosi protsesside põhimõtete ja teostamisega
2. Koostada kirjanduse põhjal ülevaade pöördosmoosi ja päriosmoosi protsessi põhiprintsiipidest, tehnilisest teostamisest, võimalikest probleemidest nende rakendamisel ning arengusuundadest

## Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lühiülevaate koostamine mebraanprotsesside olemusest ja teostamise põhimõtetest ja rakendamise kohta kirjanduse põhjal	1.04.2022
2.	Koostada kirjanduse põhjal ülevaade pöördosmoosi ja päriosmoosi kohta ning võrrelda neid protsesse.	22.04.2022
3.	Koostada kirjanduse põhjal ülevaade pöördosmoosi ja päriosmoosi rakendustest	13.05.2021
4.	Lõputöö vormistamine	28.05.2021

**Töö keel:** eesti      **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "01"juuni 2022.a

**Üliõpilane:** Kristjan Kurim ..... "01."veebruar 2022.a

**Juhendaja:** Inna Kamenev . ..... "01."veebruar 2022.a

**Programmijuht:** Oliver Järvik ..... "01."veebruar 2022.a  
/allkirjastatud digitaalselt/

## SISUKORD

<b>LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....</b>	<b>6</b>
<b>SISSEJUHATUS.....</b>	<b>7</b>
<b>MEMBRAANPROTSESSID VEETEHNOLOOGIAS .....</b>	<b>8</b>
1.1. Membraanprotsesside üldine iseloomustus .....	8
1.2. Membraanprotsesside mehhanism .....	10
1.2.1 Lahustuvus-difusiooni mudel .....	10
1.2.2 Hüdrodünaamiline mudel .....	11
1.3. Membraanide materjalid ja moodulid .....	13
<b>2. PÖÖRDOSMOOS JA PÄRIOSMOOS.....</b>	<b>18</b>
2.1. Osmootsete protsesside põhimõtted.....	19
2.2 Pöördosmoosi protsess .....	21
2.2.1 Pöördosmoosi protsessiga seotud probleemid.....	23
2.2.2. Pöördosmoosi protsessi hind .....	27
2.2.3 Pöördosmoosi rakendused.....	28
2.3 Pärivosmoosi protsess.....	29
2.3.1. Pärivosmoosi protsessi põhimõtte ja teostamine .....	29
2.3.2 Pärivosmoosi probleemid.....	31
2.3.3 Pärivosmoosi rakendused .....	32
2.4. Pärivosmoosi ja pöördosmoosi võrdlus .....	33
<b>KOKKUVÕTE .....</b>	<b>34</b>
<b>KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....</b>	<b>36</b>

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

DS – töölahus ehk tõmbelahus (ingl k *draw solution*, DS)

IUPAC – Rahvusvaheline Puhta ja Rakenduskeemia Liit (ingl k *International Union of Pure and Applied Chemistry*)

FO – päriosmoos (ingl k *forward osmosis*, FO)

MF – mikrofiltratsioon

$P$  – rõhk

$\pi$  - osmootne rõhk

PEO – rõhuga soodustatud osmoos (ingl k *pressure enhanced osmosis*, PEO)

PRO – rõhuga takistatud osmoos (ingl k *pressure retarded osmosis*, PRO)

RO – pöördosmoos (ingl k *reverse osmosis*, RO)

UF – ultrafiltratsioon

## SISSEJUHATUS

Käesoleval ajal on maailmas veemajanduses kaks olulist probleemi – üks on seotud puhta vee puudusega, mis on seotud elanikkonna järsu kasvuga maailmas, ning teine kasvava vee saastumisega, mis tingitud suurenevast tööstuslikust ja põllumajanduslikust tegevusest. Samuti on oma osa kliima muutustel, eriti sellega seotud põudadel. Nende probleemide tõttu tuleb ratsionaalsemalt kasutada veeressursse, vältida vee saastumist ning tagada reovee nõutav puhastus. Alternatiivseteks puhta vee ressursideks on merevee magestamine ning reovee kasutamine pärast sobivat töötlemist. Seega tuleb kaitsta loodusliku vee varusid ning arendada uusi tehnoloogiaid vee ja reovee puhastamiseks.

Traditsioonilised füüsikalise-keemilised meetodid ei ole sageli piisavalt efektiivsed mikrosaasteainete ning mikrobioloogilise saaste kõrvaldamisel. Kaasajal on uuritud ja kasutusele võetud erinevaid oksüdatsioonimeetodeid (sealhulgas täiustatud oksüdatsiooniprotsesse) ning ka membraanprotsesse. Membraanprotsessidest kasutatakse laialdaselt madalrõhuprotsesse mikro- ja ultrafiltratsiooni, kuid need ei ole efektiivsed vee puhastamisel mikrosaasteainetest. Kõrgrõhuprotsessid - nanofiltratsioon ning pöördosmoos – on selles osas väga efektiivsed, kuid nende puuduseks on suured energiakulud rõhu tekitamiseks ja membraanide saastumine, mille tõttu on nende protsesside maksumus kõrge. Seetõttu on viimasel aastakümnel uuritud ning kasutusele võetud osmootsel rõhul põhinevaid protsesse – osmoosi ning päriosmoosi.

Veepuhastusprotsessides puutub rohkem kokku pöördosmoosiga, kus liikumapanevaks jõuks on hüdrostaatiline rõhk, mis peab ületama osmootset rõhku ning seetõttu toimub protsess vastupidiselt osmoosile s.t toimub vee transport lahusest puhtasse lahustisse ehk puhtasse vette. Päriosmoosi liikumapanevaks jõuks on osmootse rõhu erinevus membraanis, seega pole vajadust rakendada kõrget rõhku ning protsessi energiavajadus on oluliselt madalam kui pöördosmoosil. Selle tõttu on päriosmoosi rakendamine veetehnoloogias väga huvipakkuv. Kui pöördosmoosi kasutatakse laialdaselt, siis päriosmoosi rakendatakse veel piiratult. Selle üheks põhjuseks on piiratud teadmised protsessi ja selle võimaluste ning teostamise kohta.

### ***Seetõttu on käeoleva bakalaureusetöö eesmärkideks:***

- koostada kirjanduse põhjal ülevaade pöördosmoosi ja päriosmoosi protsessi põhiprintsiipidest, teostamisest, võimalikest probleemidest nende rakendamisel ning kasutamisevõimalustest,
- võrrelda pöördosmoosi ja päriosmoosi protsessi kasutamist.

# MEMBRAANPROTSESSID VEETEHNOLOOGIAS

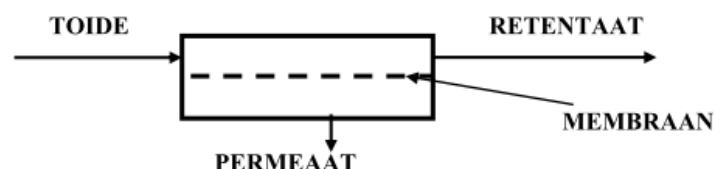
Vee- ja reoveepuhastuses kasutatakse järjest enam membraanlahutusprotsesse, kus puhastatavast veest eemaldatakse saasteained füüsiliselt poolläbilaskvate membraanide abil. Membraanprotsesside eeliseks võrreldes paljude alternatiivsete separatsiooniprotsessidega on madalam energiatarbimine, suurem saasteainete eraldusefektiivsus, väiksem töötlemisastmete arv ja parema kvaliteediga vee tootmine. Peamised veetehnoloogias kasutusel olevad membraanprotsessid on nano-, ultra- ning mikro-, ultra- ja nanofiltratsioon ja pöördosmoos. Viimastel aastatel on nendele lisandunud ka päriosmoos.

Käesolevas peatükis esitatakse veetehnoloogias rakendatavate membraanprotsesside üldiseloomustus ning käsitletakse membraanprotsesside mehhanisme, kirjeldatakse kasutatavaid membraane ja membraanmooduleid. Samuti antakse ülevaade membraanprotsesside teostamisel tekkivatest probleemidest.

## 1.1. Membraanprotsesside üldine iseloomustus

Membraanlahutusprotsessid on operatsioonid, milles segude lahutamine toimub poolläbilaskvate membraanide abil, mis kontrollivad osakeste (ioonide, molekulide, kolloidosakeste) liikumise kiirust kas kahe vedelfaasi, kahe gaasifaasi või vedeliku ja gaasifaasi vahel. Osakesed läbivad membraani selektiivselt või erinevate kiirustega.

Membraanprotsesside läbiviimisel sisestatakse alglahus e toide moodulisse ja ta voolab paralleelselt membraaniga, membraani läbivat voolu nimetatakse permeaadiks (filtraadiks) ning moodulist väljuvat toite kontsentreeritud jäägi voolu nimetatakse retentaadiks. Voogude skeem membraanmoodulis on esitatud joonisel 1.1.



Joonis 1.1. Voogude skeem membraanmoodulis

Membraani võib kirjeldada kui õhukest kelmet või kilet, mis eraldab kahte faasi ja toimib selektiivse vaheseinana ainete transportimisel. Siinkohal on tähtis tähele panna, et membraan ei ole passiivne materjal, vaid pigem funktsionaalne, sest isegi kui membraane saab iseloomustada struktuuri järgi, sõltub nende töö efektiivsus (vooluhulga kiirus ja



selektiivsus) ainete olemusest ja liikumapanevast jõust. (McGraw-Hill, 1996) Samuti on membraani karakteristikud (poorsus, selektiivsus ja laeng) suspensioonide või lahuste lahutamisel kriitilise tähtsusega. (Ortiz, 2011)

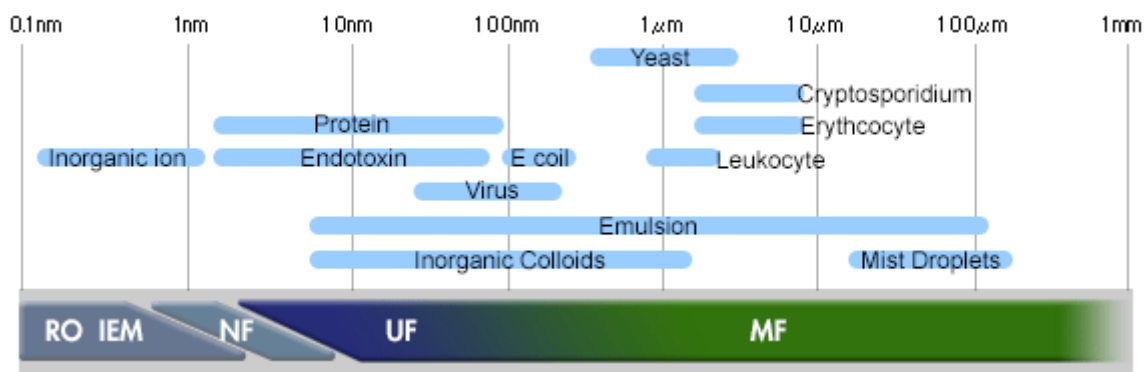
Sageli käsitletakse membraanprotsesse ka kui täiustatud filtrimisprotsesse, kus kasutatakse osakeste üksteisest eraldamisel ära peenpoorsete polümeersete või anorgaaniliste kileda eraldusomadusi. (Hilal, N., 2017)

Protsessis kasutatakse ära poolläbilaskvate membraanide omadust lasta vett läbi ning püüda kinni lahustunud ained. Muidugi ei takistata kõiki aineid, kindlad veemolekulidele sarnased orgaanilised molekulid liiguvad samuti koos veega membraanist läbi. (madala molekulaarmassiga ja suure polaarsusega) (Water Treatment Membranes and Their Processes, 2022)

Vee töötlemisel kasutatakse tööstuslikult järgmisi protsesse (Geankoplis, C. J., 2003):

- mikrofiltratsioon (MF)- hõljuvainete või õliemulsioonide kõrvaldamiseks veest. Separeerimine toimub suuruse järgi, liikumapanevaks jõuks on rõhkude vahe ning membraane läbivad vood on suured;
- ultrafiltratsioon(UF) - kasutatakse kolloidainete ja makromolekulide kõrvaldamiseks veest. Permeaadis on soolad ja madalmolekulaarsed orgaanilised ühendid, jääk on kontsentraat, milles on hõljuvained ja lahustunud ained molaarmassiga üle 1000;
- nanofiltratsioon (NF) on pöördosmoosist eraldunud membraanprotsess (vahel nimetatakse "lõdvaks" pöördosmoosiks). Nanofiltratsiooni membraanid lasevad läbi ühevalentseid ioone ( $\text{Na}^+$ ) ja madalmolekulaarseid orgaanilisi lahusteid. Jäägis orgaanika, hõljuvained, mitmevalentsed ioonid;
- pöördosmoosi (RO, i.k reverse osmosis) kasutatakse lahustunud soolade ja orgaanika eraldamiseks (suurus  $<1$  nm), võimaldab eraldada veest ka ühevalentseid ioone ( $\text{Na}^-$  ja kloori-ioone), siiski võib permeaadis s.o puhastatud vees olla vähesel määral lahustunud aineid;
- päriosmoos – uuem protsess, kasutatakse lahustunud soolade ja orgaanika eraldamiseks.

Eelpool toodud protsessid võivad olla veepuhastusjaamades rakendatud erinevates etappides. Joonisel 1.2. on näidatud nende protsesside kasutuspiirkonnad.



Joonis 1.2. Separatsiooniprotsesside kasutuspiirkonnad osakeste suuruste järgi (Membrane separation technology primer, 2022)

## 1.2. Membraanprotsesside mehhanism

Membraanprotsesse saab klassifitseerida protsessi mehhanismide järgi, mis sõltuvad omakorda ainete spetsiifilistest omadustest, siin mängib rolli osakeste suurus, ainete lahustuvuse ja difusiooni erinevus membraani materjalis ning eraldavate osakeste laengute erinevus. Klassifitseerida võib ka membraani struktuuri põhjal s.t kas on tegemist poorsete, mittepoorsete või hoopis ionivahetusmembraanidega.

Membraanid võivad olla makropoorsed, mikropoorsed või mittepoorsed ehk tihedad.

Membraanprotsesside mehhanismi kirjeldamiseks on kaks mudelit (Degremont, 2017):

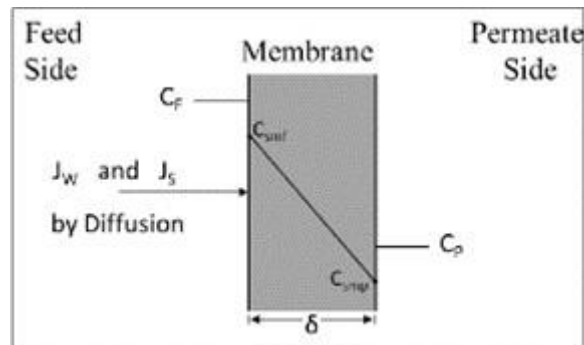
- lahustuvus-difusiooni mudel,
- hüdrodünaamiline ehk nn sõela mudel.

Protsessi mehhanism sõltub membraani materjali pooride moodust. Lahustuvus-difusiooni mudeli järgi on ka tihedates membraanides poorideks membraani materjali molekulide vahelised väikesed alad. Need poorid ilmnevad siis, kui aine difundeerub läbi membraani. Sõela mudel on rakendatav siis, kui membraani poorid suured ja nad ei muutu, kui aine vool läbib membraani.

### 1.2.1 Lahustuvus-difusiooni mudel

Lahustuvus-difusiooni mudeliga kirjeldatakse membraanprotsessi mehhanismi mittepoorsetes, tihedates membraanides, mida rakendatakse pöörd- ja päriosmoosi moodulites. (Malville et. Al., 1996)

Selle mudeli järgi toimub aine massiülekanne toitelahusest membraani pinnale, kus see lahustub membraani materjalis ja difundeerub läbi membraani materjali kõrgema kontsentratsiooniga alast madalama kontsentratsiooniga alasse, liikumapanevaks jõuks on kontsentratsioonigradient. Membraani teisel pinnal aine desorbeerub ning toimub aine massiülekanne permeaadi voolu tuuma. (Degremont, 2017)



Joonis 1.3. Lahustuvus-difusiooni mehhanismi skeem (Degremont, 2017)

Tuleb mainida, et reaalsed membraanid lasevad siiski lahustunud ainet osaliselt läbi. Membraani võimet eraldada lahustunud ainet iseloomustatakse efektiivsuskoefitsiendiga ("rejection coefficient")  $R$  mõistet:

$$R = 1 - \frac{c_p}{c_f} \quad , \quad (1.1)$$

kus  $c_p$  on lahustunud aine kontsentratsioon permeaadis ja  $c_f$  on lahustunud aine kontsentratsioon toites.

### 1.2.2 Hüdrodünaamiline mudel

Hüdrodünaamilise ehk nn sõela mudeli järgi toimub lahutamine vastavalt membraani poori suurusele. (Malville et. Al., 1996)

Pooride suurused membraanides jagunevad IUPAC-ile järgmiselt (Water Treatment Membrane Processes, 1996):

- makropoorid on suuremad kui 50 nm,
- mesopooride suurused on vahemikus 2-50 nm,
- mikropoorid on väiksemad kui 2 nm

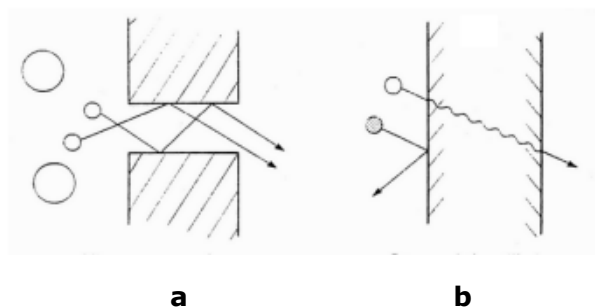
Mikro-, nano- ja ultrafiltratsiooni korral kasutatakse poorseid membraane, aineid separeeritakse nende liikumisega läbi pooride. Operatsioonid erinevad membraani pooride suuruse ja liikumapaneva jõu poolest. (Malville et. Al., 1996)

Mikrofiltratsioon on tihti tehnoloogias esimene protsess, selleks, et kõrvaldada toitevoost väikesed osakesed. Mikrofiltratsiooni membraanidel on võrreldes eelmainitud protsessides kasutatavate membraanidega kõige suurema läbimõõduga poorid, mis võimaldavad eraldada lahuses hõljuvaid tahkeid aineid suuruses 0,1-10  $\mu\text{m}$ , tänu sellele saab mikrofiltratsiooni läbi viia ka madalama rõhu all.

Poori suuruste poolest järgmine protsess on ultrafiltratsioon, kus kasutatavate membraanide pooride suurused jäävad vahemikku 1-100 nm.

Nanofiltratsioon (NF) erineb mikro-, ja ultrafiltratsioonist selle poolest, et teda võib klassifitseerida nii poorse kui ka mittepoorse membraanina, kuna siin peab massiläbikande arvutamisel arvestama lahustuvus-difusiooni ning mõnikord isegi elektrokeemiliste efektidega. Nanofiltratsiooni pooride suurused on vahemikus 0,1-10 nm. Nanofiltratsiooni membraanid suudavad kinni püüda madala molekulmassiga lahustunud aineid, mille laeng puudub, näiteks suhkrud ja teised orgaanilised molekulid. Samas suudab NF kinni püüda ka laetud osakesi, näiteks mitmevalentseid ja suuri monovalentseid ioone, väiksemad monovalentsed ioonid liiguvad aga membraanist läbi. (Malville, 1996)

Joonisel 1.4. on esitatud sõela ja lahustuvus-difusiooni mudeleid illustreerivad skeemid.



Joonis 1.4. Membraanprotsesside mehhanismid: **a** sõela mehhanism poorses membraanis ja **b** lahustuvus difusiooni mehhanism mittepoorses, tihedas membraanis

Tabelis 1.1. on esitatud veetehnoloogias kasutatavad membraanprotsessid ja neid mõjutavad faktorid.

Tabel 1.1. Membraanprotsesse mõjutavad faktorid (Cheremisinoff, 2002)

Protsess	Liikuma-panev jõud	Faktorid			
		Membraani pooride suurus	Difusioon membraanis	Ioonide laeng	Lahustuvus
Mikrofiltratsioon	Rõhk	+++	-	-	-
Ultrafiltratsioon	Rõhk	+++	-	+	-
Nanofiltratsioon	Rõhk	+++	+	+	-
Pöördosmoos	Rõhk	+	+++	+	+++
Päriosmoos	Osmootne rõhk	+	+++	+	+++

### 1.3. Membraanide materjalid ja moodulid

#### **Membraanide iseloomustus**

Membraanidele esitatakse järgmised nõuded:

- hea läbitavus ja kõrge selektiivsus;
- keemiline ja mehaaniline püsivus;
- stabiilsus, vähe saastuv, sobiv kasutusiga;
- võime taluda suuri rõhkude erinevusi.

Tavaliselt on membraani materjaliks õhukesed polümeeridest kiled, mida valmistatakse valamise või ekstrusiooni teel, õhukesed metall-lehed ja poorne klaas või muu poorne materjal. Membraanide peen ühtlane poorsus saavutatakse  $\alpha$ -kiiritusel või kristallide väljalahustamisel. Tavaliselt on membraanid mitmekihilised, tugivõrgustikuga (Geankoplis, 2003).

Süntetilisi membraane saab teha paljudest erinevatest materjalidest, mille tõttu jagunevadki nad üldisemalt orgaanilisteks ja anorgaanilisteks membraanideks.

Orgaaniliste membraanide sünteesimisel võib põhimõtteliselt kasutada kõiki polümeere, kuid membraani eluiga ning protsesside nõudeid arvesse võttes on see polümeeride arv üsna limiteeritud. Tselluloos ning sellest tuletatud erinevad ühendid on nendest kõige tavalisemad.

Anorgaanilised materjalid on tihitipeale nii keemiliselt, mehaaniliselt kui ka termiliselt stabiilsemad, kuid on seevastu kallimad ning väga haprad. Seetõttu on kasutatakse anorgaanilisi membraane enamasti keemiatööstustes, kus on vaja töödelda kõrge temperatuuriga vedelikke.

Oma struktuurilt võivad membraanid olla kas sümmeetrilised ehk isotroopsed või asümmeetrilised ehk anisotroopsed. Sümmeetrilised membraanid on kogu membraani lõikes ühtlase koostise, asümmeetriliste membraanide ja komposiitmembraanide kihid on erineva struktuuriga või erinevast materjalist (Degremont, 2017).

Tabelis 1.2. on esitatud veetehnoloogias kasutatavate protsesside mehhanismid, liikumapanevad jõud ning kasutatavate membraanide iseloomustus.

Tabel 1.2. Veetehnoloogias kasutatavate protsesside iseloomustus (Cheremisinoff, N. P., 2002)

<b>Protsess</b>	<b>Liikumapanev jõud</b>	<b>Mehhanism</b>	<b>Membraani struktuur</b>
Mikrofiltratsioon	Rõhk, 1 – 5 atm,	Hüdrodünaamiline, Sõela mudel	Sümmeetriline mikropoorne (0,02 – 10 $\mu\text{m}$ )
Ultrafiltratsioon	Rõhk, 2-10 atm	Hüdrodünaamiline, Sõela mudel	Asümmeetriline mikropoorne (1 – 20 nm)
Nanofiltratsioon	Rõhk, 5-50 atm	Hüdrodünaamiline, Sõela mudel või Lahustuvus-difusioon	Asümmeetriline mikropoorne (0,01 – 5 nm)
Pöördoosmoos	Rõhk, 10 – 100 atm	Lahustuvus-difusioon	Asümmeetriline homogeense kihiga ja mikropoorse toega (nn tihe membraan)
Päriosmoos	Osmootne rõhk $\pi$	Lahustuvus-difusioon	Asümmeetriline homogeense kihiga ja mikropoorse toega (nn tihe membraan)

### **Membraanmoodulid**

Membraanseadme olulisemaks osaks on nn membraanmoodul. Membraanmoodulite ülesandeks on membraani mehaanilise tugevuse, stabiilsuse ja piisava tööaja tagamine ning toite, permeaadi ja retentaadi voogude suunamine. Membraanseade koosneb kas ühest või mitmest moodulist, mis võivad olla ühendatud kas paralleelselt või järjestikku.

Moodulid on kavandatud täitma kolme peamist eesmärki:

- membraanitasandil piisava toitevedeliku tsirkuleerimise tagamine, et vähendada kontsentratsioonipolarisatsiooni teket ja setete tekkimist,
- kompaktsuse tagamine (maksimaalne membraani pindala mahu kohta) s.t suure eripinna tagamine,
- toite- ja permeaadi voolude lekete ära hoidmine.

Esimesed kaks eesmärki vähendavad mooduli enda maksumust, kuid võivad suurendada vajalikku energiakulu. Nimelt kõrge tsirkulatsioonikiiruse ja väikese voolu ristlõike tõttu on vaja suurendada energiakulu (rõhku), et ületada moodulis tekkivat hõõrdetakistust.

Kolmas eesmärk on kõige vajalikum - praktika on näidanud, et membraanseadmete töös on enam levinud probleemiks lekked, mille põhjuseks võib olla pigem defektne kokkupanek, mitte vigased membraanid.

Moodulid peavad vastama veel järgmistele nõuetele:

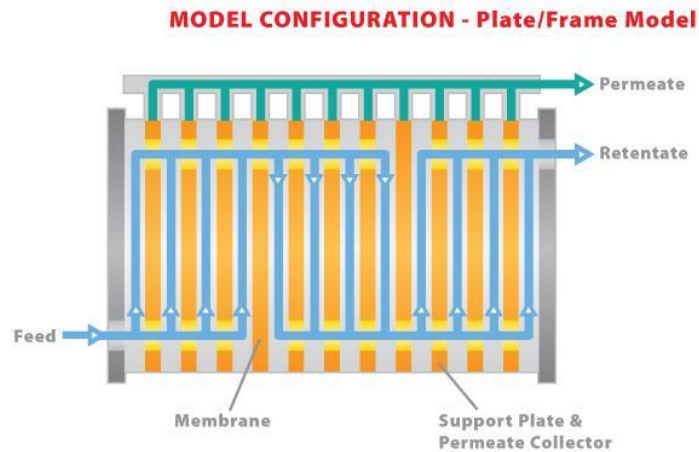
- lihtne puhastamine,
- lihtne kokkupanek ja lahtivõtmine,
- mooduli korpusesse või membraani jäänud vedelikku peab olema võimalik eemaldada kas õhuga läbipuhumisega või ilma

Käesoleval ajal on kasutusel põhiliselt neli mooduli tüüpi:

- plaat-raammoodul
- spiraalmoodul
- torumoodul
- õõneskiudmoodul

### **Plaat-raammoodul**

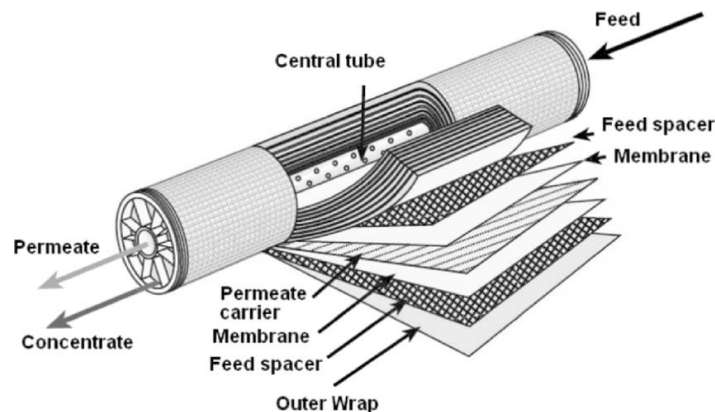
Membraanid katavad paralleelseid tugiplaate mõlemalt poolt, toide liigub läbi kahe naaberplaadi vahel oleva membraani. Plaadid tagavad membraanide mehaanilise toetuse ning samal ajal ka toite äravoolu. Joonisel 1.5 on toodud plaat-raammooduli skeem.



Joonis 1.5. Plaat-raammooduli skeem (Plate and frame membranes, 2022)

### ***Spiraalmoodul***

Koosneb tasapinnalistest lehtedest, mille vahel on poorse tugimaterjal ning nad on spiraalselt keeratud ümber poorse toru, kust eraldatakse permeaat. Toide voolab mööda poorseid vahetükke, mis võivad olla võrguna või laineliselt, membraanide vahele ning läbib membraani ja liigub kõige keskel oleva poorse toru suunas.

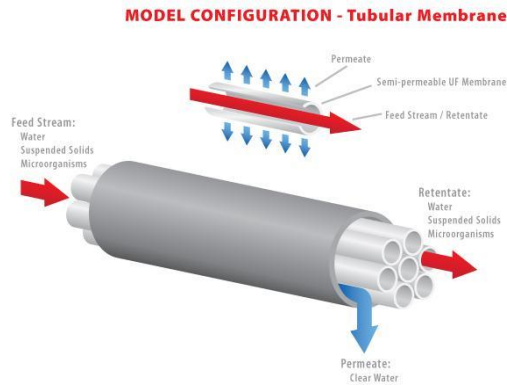


Joonis 1.6. Spiraalmooduli skeem (Hasani, 2019)

### ***Torumoodul***

Membraanid on paigutatud poorse tugitoru sisesintele, torud on kimpudena ja nende sisediameeter on 6-40 mm. Toide suunatakse läbi membraanide ning permeaat eraldatakse läbi õhukeste, poorsete tugitorude, retendaat eraldatakse mööda torusid.

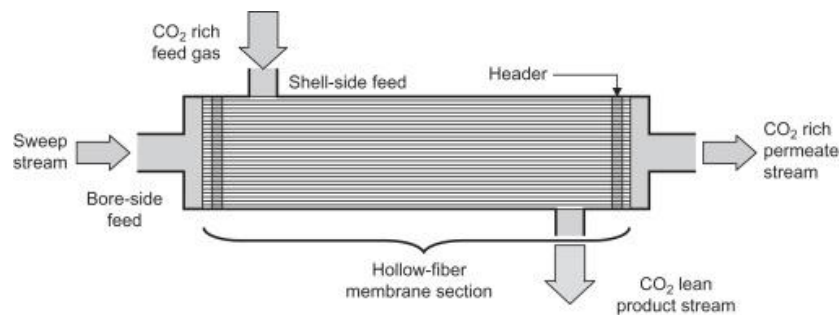




Joonis 1.7. Torumooduli skeem (Tubular membranes, 2022 )

### Õõneskiudmoodul

Õõneskiudmoodulis on omavahel tihedalt kimpu kogutud mitu tuhat või isegi mitu miljonit kiudu. Toide voolab kas kiudude sees või väljaspool kiude, permeaat väljub samas kui toide ja retendaat vastupidises suunas.



Joonis 1.8. Õõneskiudmooduli skeem (Rackley, 2017)

Membraanmoodulite põhitüüpide võrdlus on esitatud tabelis 1.3.

Tabel 1.3. Membraanmoodulite põhitüüpide võrdlus (Cheremisinoff, 2002)

Parameeter	Mooduli tüüp		
	Toru	Spiraal	Õõneskiud
Eripind, m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	300	1000	15000
Sisediameeter/kanali laius, mm	20 - 50	4 - 20	0,5 - 2
Toite voog, dm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ööp)	300 - 1000	300 - 1000	30 - 100
Tootlikkus, m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> membraani · ööp)	100 - 1000	300 - 1000	450 - 1500
Eeltötluse nõuded	Lihtne	Keskmine	Kõrge
Saaste	Väike	Keskmine	Kõrge
Mehaaniline puhastus	Võimalik	Ei ole võimalik	Ei ole võimalik
Keemiline puhastus	Võimalik	Võimalik	Võimalik

## 2. PÖÖRDOSMOOS JA PÄRIOSMOOS

Osmoosi kui füüsikalist nähtust on uuritud ja igapäeva elu hüvanguks ära kasutatud juba inimkonna algusaegadest alates. Enamik baktereid, seeni ja muid patogeenseid organisme dehüdreeruvad soolases keskkonnas ning osmoosi toimumise korral surevad või muutuvad passiivseteks. Osmoosi võib kirjeldada kui vee liikumist läbi selektiivselt läbilaskva membraani, mille liikumapanevaks jõuks on osmootse rõhu erinevus membraanis. Samal põhimõttel toimub puhta vee eraldamine päriosmoosi protsess. Membraani ülesanne on läbivoolavast lahusest kinni püüda ning eraldada lahustunud aine molekulid või ioonid. Protsessi liikumapanevaks jõuks on osmootne rõhk. Tänapäeva tehnoloogias on osmoosile rakendust leitud veepuhastuse, toiduainete töötlemise, elektri tootmise ning isegi meditsiinilistes protsessides. Ka päriosmoosil on tähtis roll veepuhastusprotsessides. Ehkki päriosmoos on membraanprotsessidest üks uuemaid, kasutatakse seda tööstusliku reovee puhastamisel, merevee magestamisel või puhastatakse vett kriisiolukordades tekkinud vee puuduse leevendamiseks. (Ince, 2022)

Veepuhastusprotsessides rakendatakse rohkem pöördosmoosi, kus liikumapanevaks jõuks on hüdrauliline rõhk, mis ületab osmootset rõhku ning seetõttu toimub protsess vastupidiselt päriosmoosile. Pöördosmoosi korral surutakse hüdraulilise rõhuga, mis on osmootsest rõhust suurem ning vastupidise suunaga, soolast vett läbi membraani ning saaduseks on puhas vesi..

Tuleb mainida, et alates 1960. aastatest on uuritud ja katsetatud ka rõhuga takistatud päriosmoosi (PRO) kasutamist elektritootmise protsessis. PRO-s kasutatakse kontsentreeritud soolvee ja mageda vee vahelist osmootset rõhku, et survestada soolalahuse voolu, mis omakorda muudab osmootse rõhu hüdrauliliseks rõhuks, mida saab elektri tootmisel kasutada. (Nicoll,2017)

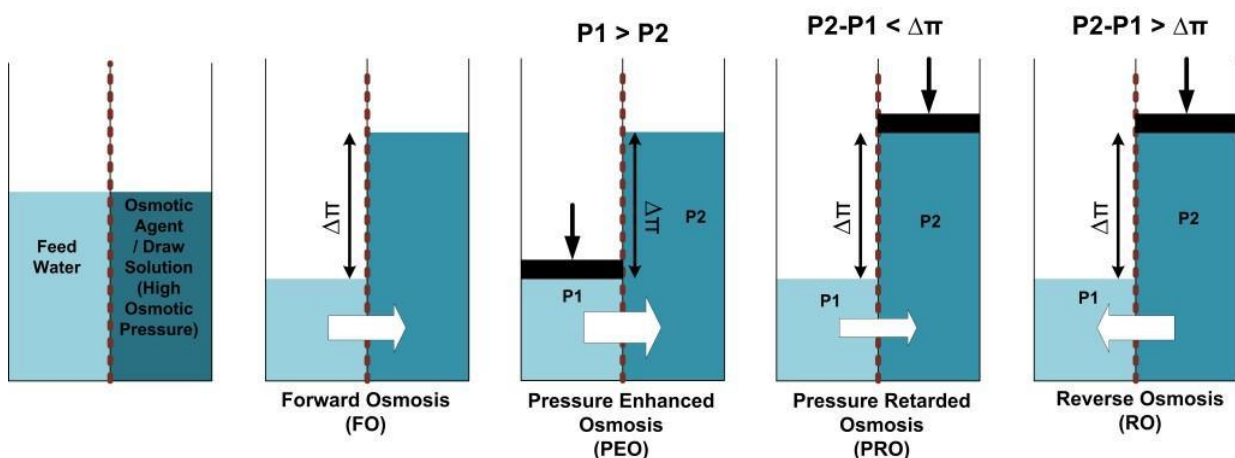
Käesolevas peatükis käsitletakse osmootsete protsesside põhimõtteid ning on kirjeldatud ja analüüsitud pöörosmoosi ja päriosmoosi protsesse.

## 2.1. Osmootsete protsesside põhimõtted

Osmootseteks protsessideks on järgmised protsessid (Duranceau, 2012):

- osmoos,
- päriosmoos (FO, ingl k – forward osmosis),
- rõhuga soodustatud osmoos (PEO, ingl k - pressure enhanced osmosis),
- rõhuga takistatud osmoos (PRO, ingl k – pressure retarded osmosis),
- pöördosmoos (RO, ingl k – reverse osmosis).

Joonisel 2.1 esitatud skeemidel on näidatud osmootsed rõhud ( $\pi$ ) ja hüdrostaatilised rõhud (P) ja vee voolu suunad erinevates osmootsetes protsessides. (Duranceau, 2012)



Joonis 2.1. Osmootsed membraanprotsessid (Nicoll, 2017)

(valge noolega on näidatud vee vool läbi membraani)

Päriosmoos on vee liikumine läbi poolläbilaskva membraani madalama kontsentratsiooniga piirkonnast (vee puhul - kõrgema veepotentsiaaliga) kõrgema kontsentratsiooniga piirkonda (vee puhul - madalam veepotentsiaaliga) osmootse rõhu rakendumise korral. Vee liikumise suuna puhul eristatakse hüpo- ja hüpertoonset keskkonda. Liikumapanevaks jõuks on kontsentratsioonide erinevus membraanis, mida lahus läbib. Lahustunud aine kontsentratsioon on hüpotoonsetes keskkonnas madalam ning vesi liigub sellest hüpertoonsetesse keskkonda. Protsess toimub seni kuni nende keskkondade rõhud on võrdsustunud. Saaduseks on kõrge kontsentratsiooniga lahus. Osmoos on füüsikaline protsess, mis toimub iseeneslikult ehk süsteem ei vaja lisaenergiat.

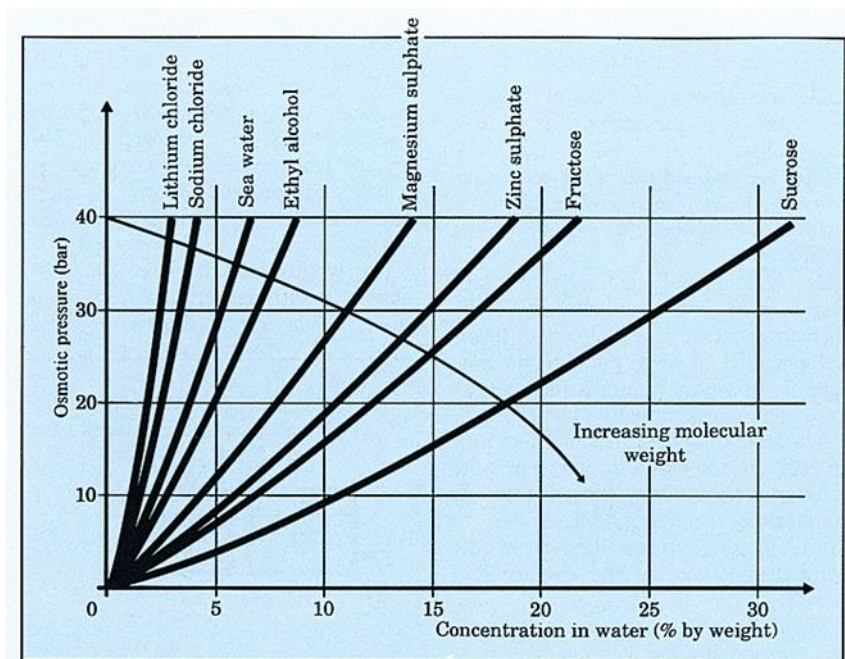
Pöördosmoosis avaldatakse kõrgema kontsentratsiooniga vedelikule hüdrostaatilist rõhku, mis paneb vedeliku liikuma osmoosile vastupidises suunas, madalama kontsentratsiooniga piirkonna suunas läbi membraani, mis takistab keemiliste ainete molekulide läbiliikumise, ning produktiks on puhas vesi.

Rõhuga takistatud osmoosi (PRO) võib vaadelda kui päri- ja pöördosmoosi vahepealist protsessi, kus on sarnaselt pöördosmoosile rakendatud osmootsele rõhule vastupidises suunas hüdraulilist rõhku, kuid kus osmootne rõhk on endiselt ülekaalus ning vee vool on endiselt kõrgema kontsentratsiooniga vedeliku suunas.

Rõhuga soodustatud osmoos (PEO) on protsess, kus lisaks osmootsele rõhule rakendatakse protsessi kiirendamiseks alglahusele ka rõhku.

Päriosmoos on osmootne protsess, milles kasutatakse poolläbilaskvat membraani, et veest eraldada lahustunud ainet. Liikumapanevaks jõuks on osmootse rõhu gradient. Päriosmoosi puhul kasutatakse permeaadi pool kõrge lahustunud aine kontsentratsiooniga töölahust (i. k - draw solution, DS), mille osmootne rõhk on kõrge. Protsessi tulemusena töölahus lahjeneb ning puhta vee kättesaamiseks tuleb see lahjast lahusest eraldada. Töölahusena kasutatakse enamasti NaCl lahust, kuna NaCl-l on kõrge lahustuvus ja seda on üpris lihtne taastada pöördosmoosiga kõrge kontsentratsiooniga lahuseks. (Duranceau, 2012)

Kõikide kirjeldatud protsesside puhul on oluline teada lahuse osmootset rõhku. Joonisel 2.2 on esitatud osmootse rõhu sõltuvus lahuste kontsentratsioonist.



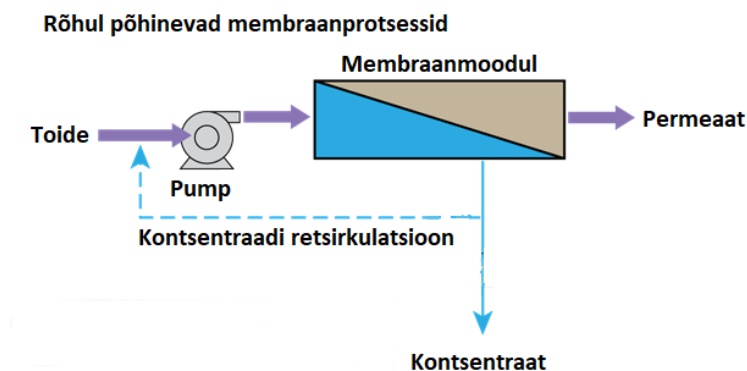
Joonis 2.2. Osmootse rõhu sõltuvus lahuse kontsentratsioonist (Water Treatment Handbook)

## 2.2 Pöördosmoosi protsess

Pöördosmoosi korral eraldatakse toiteveest seal lahustunud ioonid kasutades poolläbilaskvaid membraani, kus liikumapanevaks jõuks on keemilise potentsiaali erinevus. (Basile, A. et.al.,2015).

Sarnaselt päriosmoosile kasutatakse poolläbilaskvaid membraane, et eraldada puhast vett selles lahustunud ainetest. Erinevalt päriosmoosist rakendatakse selles operatsioonis liikumapanevaks jõuks hüdraulilist rõhku, mis oleks suurem kui osmootiline rõhk. Osmootiline rõhk sõltub lahuse omadustest, see omakorda mõjutab kui kiiresti või aeglaselt lahusti lahusesse liigub. Lahustunud aine säilitatakse rõhu all oleva membraani poolel ja puhas lahusti liigub vabalt teisele poole. Erinevalt päriosmoosile, kus vesi liigub läbi membraani kõrgema kontsentratsiooniga lahusesse, kasutatakse hüdraulilist rõhku, et suruda vett läbi membraani puhta lahusti poole, jättes lahustunud ained maha. (Basile, A. et.al.,2015).

Joonisel 2.3. on esitatud membraanseadme põhimõtteline skeem.



Joonis 2.3. Membraanseadme põhimõtteline skeem

Pöördosmoos on protsess, kus on vaja rakendada palju mehaanilist energiat; kõrge survepumpi ja -mahuteid; forsseerimist.

Erinevalt päriosmoosist, on pöördosmoosi korral membraane läbivaks veeks puhas vesi, mida saab juba kasutada. Päriosmoosi korral toimub põhimõtteliselt töö- ja toitelahustes oleva lahusti vahetus. Enamlevinud kasutusala on puhta joogivee eraldamine mereveest, eemaldades soolad ja teised heitvee materjalid.

### **Permeaadi voo arvutamine pöördosmoosi protsessis**

Pöördosmoosi protsessi hindamisel on põhilised näitajad produkti voolukiirus (mahtkulu) membraani pindalaühiku kohta (s.o permeaadi voog) ja produkti kvaliteet.

Permeaadi voog läbi membraani sõltub

- membraani omadustest,
- süsteemi parameetritest (temperatuur, rõhkude vahe, soola kontsentratsioon, lahusti voolu kiirus läbi membraani)

Lahustuvus-difusiooni mudeli järgi lahusti voogu läbi membraani arvutatakse järgmiselt (Geankoplis, 2003):

$$J_v = \frac{P_v}{z} (\Delta p - \Delta \pi) = A_m (\Delta p - \Delta \pi) \quad (2.1)$$

kus  $J_v$  on solvendi (vee) voog läbi membraani ( $\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ ),  $P_v$  – läbitavus ( $\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}\cdot\text{atm})$ ),  $z$  – membraani paksus (m),  $A_m$  – membraani solvendi läbivuse konstant ( $\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ ),  $\Delta p = p_1 - p_2$  (atm), toite ja permeaadi poolsete hüdrostaatiliste rõhkude vahe,  $\Delta \pi = \pi_1 - \pi_2$  (atm), toite ja permeaadi osmootse rõhkude vahe.

Lahustunud aine (soola) voog läbi membraani (Geankoplis, 2003):

$$J_s = \frac{D_s K_s}{z} (c_1 - c_2) = B_m (c_1 - c_2) \quad (2.2)$$

kus  $J_s$  on soola voog läbi membraani ( $\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ );  $D_s$  – soola difusioonikonstant membraanis ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $K_s$  - jaotuskoefitsient (soola lahustumisel membraani materjalis;  $B_m$  – membraani soola läbivuse koefitsient (m/s),  $c_1$  – soola kontsentratsioon enne membraani,  $c_2$  – soola kontsentratsioon permeaadis ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Võrrandist (2.2) järeldub, et kui lahustunud aine kontsentratsioon enne membraani on kõrge, läbib membraani mitte ainult lahusti, vaid ka mingil määral selles lahustunud soolasid.

## 2.2.1 Pöördosmoosi protsessiga seotud probleemid

Pöördosmoosi kasutatakse sagedalt vee puhastamiseks ning kvaliteedi tõstmiseks, kuid kogu protsessi mõjutavad mitmed faktorid, mis võivad tekitada probleeme.

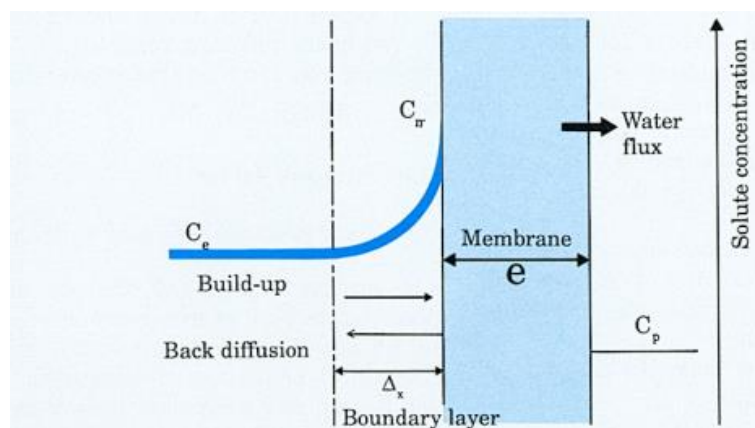
Pöördosmoosi (samuti ka päriosmoosi) läbiviimisel võivad tekkida järgmised probleemid (Membrane Processes, 2022):

- kontsentratsioonipolarisatsioon,
- osmoosi künnis,
- membraanide saastumine.

### 2.2.1.1. Kontsentratsioonipolarisatsioon

Kontsentratsiooni polarisatsiooni tekkimine on membraanprotsessides laialdaselt esinev probleem. Kui toitevedelikule, mis sisaldab ka membraani mitteläbivat komponenti, avaldatakse rõhku, takistab membraan osakeste läbimise ning toimub tagasidifusioon ehk eraldatud osakesed liiguvad tagasi toitevedelikku. Konvektiivse voolu tõttu komponendi kontsentratsioon membraanide pinna vahetus läheduses aga tõuseb pidevalt ning väheneb ka komponendi tagasidifusioon toitelahusesse. Tekkiva kontsentratsioonipolarisatsiooni tõttu langeb membraani efektiivsus ning lahustunud aine osakesed liiguvad kontsentratsioonide vahe tõttu membraanist läbi. (Concentration Polarization In Pressure Driven Processes, 2022)

Joonisel 2.4. on näidatud vood ja kontsentratsioonid kontsentratsioonipolarisatsiooni korral (Degremont, 2017)

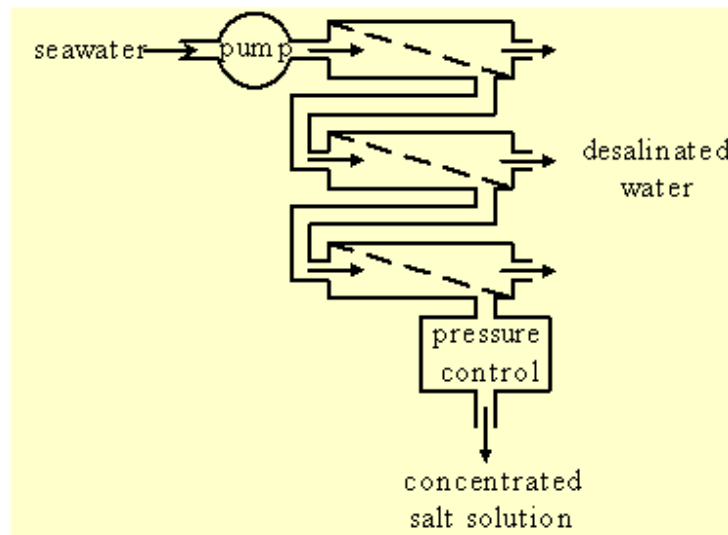


Joonis 2.4. Lahustunud aine kontsentratsiooniprofiil toites ( $C_e$ ) membraani vahetus läheduses ( $C_m$ ) ja permeaadis ( $C_p$ ) (Degremont, 2017)

### 2.2.1.2. Osmoosi künnis

Pöördosmoosi juures on üks kriitilisemaid parameetreid on osmootne rõhk. Toitevedeliku pumpamisel moodulisse kasvab soola kontsentratsioon moodulis ja membraanide pinnal, mis omakorda suurendab ka osmootset rõhku. Hüdraulilise takistuse tõttu tekib PO mooduli kanalisid koht, kus hüdrostaatiline rõhk on minimaalne, aga osmootne rõhk maksimaalne, seda nimetataksegi osmoosi künniseks, kus liikumapanev jõud on minimaalne. Moodul peaks töötama nii, et osmoosi künnisel oleks vähemalt 1MPa-ne ülerõhk.

Osmoosi künnises oleva permeaadi kvaliteet on madal, selle tõstmiseks saab ühendada mitu moodulit järjestikku, kus iga mooduli permeaat kogutakse kokku ja retentaat juhitakse edasi järgmisesse moodulisse.



Joonis 2.5. Mitmeastmeline pöördosmoosi seade



### **2.2.1.3 Membraanide saastumine**

Membraanide saastumine on üks suurimaid probleeme pöördosmoosi protsessis, mis kahjustab membraanide efektiivsust ja terviklikkust. Peamised probleemid on permeaadi voo vähenemine, membraani selektiivsuse ja läbilaskvuse halvenemine ning samuti väheneb oluliselt membraanide eluiga.

Saastumise tüübid on järgmised:

- orgaaniline: suure tihedusega orgaaniliste ainete sadestumine membraani pinnal.
- anorgaaniline: anorgaaniliste ainete sadestumine membraani pinnal.
- kolloidne: liiva, muda, prahi, heljumi sadenemine.
- mikrobioloogiline: mikroorganismide adhesioon ja akumulatsioon membraani pinnale. (AlSawaftah, 2021)

Membraanide saastumine võib toimuda nii membraanisiseselt kui ka pindmiselt. Pöördosmoosis, kus kasutatakse kompaktsemaid membraane esineb rohkem pindmist saastumist.

Pöördosmoosi on viimasel ajal eelistatud mikro- ja ultrafiltratsiooni asemel veepuhastusprotsessides orgaanilise saaste eemaldamiseks, kuid sellega kaasneb membraanide ummistumine ja saastumine. Seetõttu on väga oluline nii membraanide arv kui ka nende efektiivsuse tagamine kogu protsessi vältel. Selleks, et ummistusi vältida, tuleb membraane puhastada või vahetada. Toitevee eeltöötlemine kemikaalidega, aitab samuti membraanide saastumise ja ummistuste tekkimise vastu. Oluline on ka pumpade ja ventiilide valik ning nende võimsuse reguleerimine, et ei tekiks nõ „dead end“ olukordi, mis soodustavad bakterite kasvu. (Mukibi, 2022)

Enamikke saastumistüüpe saab vältida toitevedeliku eeltöötlemisega. Mikrobioloogilist saastumist vähendada ei saa, kuna eelpuhastamisprotsessis ei hävitata kõiki toitevees olevaid mikroorganisme. Mikrobioloogilise saastumise korral tekib membraani pinnale mikroorganismidest koosnev kile. Mikroorganismid kasvavad veest akumulatsioonid toitaineid ning membraanipinnale kinnitades eritavad rakuväliseid polümeerseid aineid, millesse nad ise on tugevalt põimitud ja moodustavad biokile, mida ei ole loputades võimalik eemaldada. (Matin, et. Al., 2011)

Mikrobioloogiline saastumine on kõige suurem probleem, kuna võib tekitada kontsentratsioonipolarisatsiooni ning heljumit membraanides. (Matin, et. al., 2011)

Biokile on jääv probleem pöördosmoosi protsessis ja selle ennetamiseks ja lahendamiseks on erinevaid lahendusi. Toitevee eelpuhastamine filtratsiooniga (UF või MF); biotsiidide kasutamine mikroorganismide hävitamiseks; eeltöötlemine klooriga; eeltöötlemine osooniga; UV-kiirgusega. (Matin, et. al. 2011)

#### **2.2.1.4 Membraanide eluiga**

Tavalises pöördosmoosi protsessis tuleks vahetada membraane iga kolme kuni seitsme aasta tagant, kuid see sõltub protsessist. Suurema tootlikkusega süsteemides võib membraanide eluiga olla üks kuni kaks aastat. (Johnson, 2006)

Membraanide eluiga sõltub mitmetest faktoritest. Süsteemi disain, membraanide õige valik, toitevee eeltöötlemine, membraanide ja süsteemi hooldamine tagavad kõik võimalikult pika membraanide töövõime. Samas metallioksiidide hüdraadid, orgaaniliste ja anorgaaniliste ainete sadestumine ja biokile teke – need kõik on ohuks membraanide elueale. (Johnson, 2006)

Kõige levinumaks lahenduseks on toitevee filtratsioon enne pöördosmoosi protsessi, kasutades ultra-või mikrofiltratsiooni. Filtratsiooni käigus vähendatakse kolloidsete ainete hulka toitevees. Pinna- ja põhjavee puhastamine on lihtsam ja vähenõudlikum, kuna tahkeid osakesi ja heljumit esineb väiksel määral. Palju suurem probleem on reovee puhastamisel, kus tahkete osakeste läbimõõt ja hulk on märgatavalt suurem, seetõttu on ka vee eeltöötlemisprotsess palju pikem ja etapid spetsiifilisemad. (Johnson, 2006)

Membraanide saastumise korral on võimalik membraane puhastada ning uuesti kasutada, mõningatel juhtudel on odavam membraanid välja vahetada. Reeglina, mida väiksem on membraan, seda otstarbekam on membraanid välja vahetada, suurema läbimõõduga membraanid puhastatakse ning taaskasutatakse. Paljude pöördosmoosi süsteemide varustusse kuulub ka puhastamisalus, kuhu kuulub puhastamiseks mõeldud spetsiaalne puhastamispaak ja pump. Tüüpiliselt puhastatakse pinnavee töötlemisel kasutatavaid membraane kaks kuni neli korda aastas ja põhjavee membraane üks kuni kaks korda aastas. (Johnson, 2006)

Membraanide puhastamise kriteeriumid on:

- Permeaadi vool langus on >10%
- Soola läbitavus membraanis suureneb 5-10%
- Rõhu langus suureneb 10-15%

Protsessi parameetreid registreeritakse stabiilselt töötava pöördosmoosi süsteemi esimese 48-72 tunni jooksul. Kriteeriumitest kinnipidamine on väga tähtis, kuna see lihtsustab membraanide puhastamist ja väldib membraanide kahjustamist või uute paigaldamist.

Membraanide töövõimet kontrollitakse väljatöötatud tarkvarade abil, kus võrreldakse membraanide soovituslikku sooritusvõimet tegelikuga.

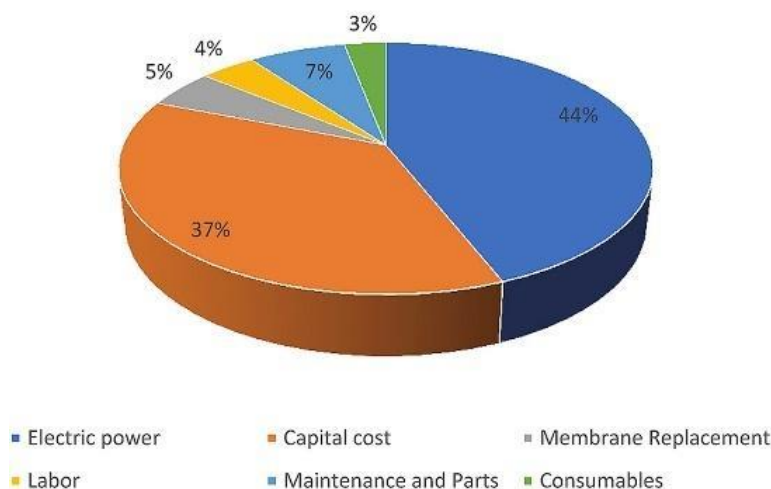
### 2.2.2. Pöördosmoosi protsessi hind

Tüüpilist pöördosmoosi protsessi hinda mõjutavateks teguriteks on energiavajadus, tööjõud, membraanide hooldamine ja vahetamine jne. (Rosales-Asensio, et. al., 2018)

Suurem osa maksumusest moodustab energiavajadus ja püsikulud. Püsikulud sisaldavad endas näiteks kindlustusmaksmeid, remondikulusid jne. Energiavajadus ja membraanide soetamise ning hoolduse maksumus mõjutavad protsessi hinda suurel määral. Tänu pidevalt arenevale membraantehnoloogiale on tulemuseks väiksem energiavajadus, mis omakorda on langetanud protsessi hinda. Arengud on toimunud taastuvate energiaallikate sidumisel pöördosmoosi protsessiga, kõige rohkem on tootmisjaamade varustamisel energiaga leidnud kasutust tuuleenergia. (Al-Karaghoul, 2013)

Pöördosmoosi hind tõuseb toitevee kvaliteedi langemise arvelt. Toitevee kvaliteedi tõstmiseks on vaja vett eelpuhastada filtratsiooni abil. Lisaks on vaja protsessi käigus tekkinud retendaati puhastada ainetest, mis võivad keskkonda ohustada. (Al-Karaghoul, 2013)

Typical cost structure for RO seawater desalination



Joonis 2.6. Pöördosmoosi hinna kujunemine (Al-Karaghoul, 2013)

Hinna alandamiseks ning keskkonnasäästlikuks tootmiseks on tehtud märkimisväärseid samme nii membraanitehnoloogias kui ka alternatiivsete energiaallikate valdkonnas, ja kogu protsess on pidevalt edasiarenev. (Al-Karaghoul, 2013)

### 2.2.3 Pöördosmoosi rakendused

Pöördosmoos leidnud laialdast kasutust erinevates valdkondades:

- veepuhastusprotsessides joogivee ja reovee kvaliteedi parandamisel;
- toidutehnoloogias mahlade kontsentreerimisel;  
piimatööstuses vadakupulbri tootmisel;
- alkoholivaba õlle tootmisel;
- akvaariumivee puhastamisel.

Enimlevinud pöördosmoosi kasutusala on veepuhastusprotsessides. Pidevalt kasvava populatsiooni ja tööstussektori arengu tõttu ülemaailne veetarbidus viimastel aastakümnetel märgatavalt suurenenud. Kohtades, kus vee kättesaadavus ei olnud varasemalt probleem, on see nüüd kriitilise tähtsusega.

Joogivee tootmisel pinna- ja põhjaveest eemaldatakse suurem praht ja heljum enne ringluse laskmist. Tööstusliku reovee töötlemine on keerukam ja mitmeetapilisem enne pöördosmoosi rakendamist. Mõlema protsessi korral on pöördosmoosil suur roll vee puhastamisel heljumist ja vees sisalduvate komponentide eemaldamisel.

Pöördosmoosi tähtsusele veepuhastamisprotsessides võib leida kinnitust näiteks Ameerika Ühendriikide sõjaväest, kus on välja arendatud spetsiaalne veepuhastamise üksus, mis suudab tagada puhta joogivee tootmist peaaegu igast veeallikast.

Mahlade kontsentratsioonide tootmisel on pöördosmoosi eelduseks nii madal töötlemiskulu kui ka suurem proteiinide ja ensüümide hulk tootes. Piimatööstuses vadakupulbri tootmine ja piima kontsentreerimine aitab alandada märkimisväärselt nii transpordi kui ka aurustamisprotsesside kulusid.

Akvaariumites tagatakse süsteemides merevee omadusi, kuna kraanivesi võib sisaldada liiga palju kloori, vaske, nitraate, fosfaate, silikaate või muid kemikaale, mille suhtes akvaariumis olev keskkond on väga tundlik. (Metcalf, 1972)

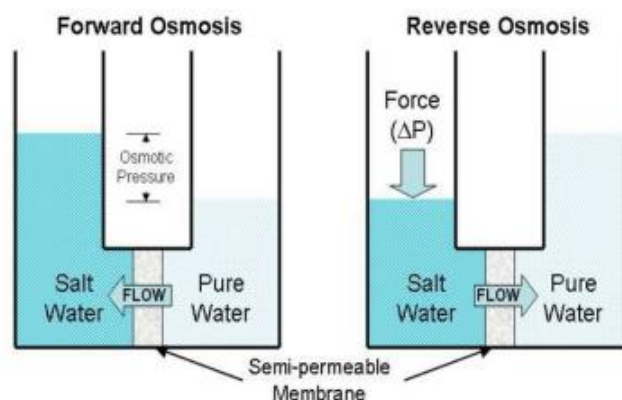
## 2.3 Päriosmoosi protsess

Päriosmoos on vee eraldamise protsess, kus kasutatakse poolläbilaskvaid membraane ja osmootset rõhku, eesmärgiga eraldada vesi selles lahustunud ainetest. Protsessis paneb vee voolama läbi membraani kõrgema kontsentratsiooniga lahusesse osmootiline rõhk. Kui kontsentratsioonide erinevus muutub protsessi käigus väiksemaks väheneb ka Gibbsi vabaenergia, mis tekitab süsteemis osmootse rõhu. Liikumapanevaks jõuks on osmootse rõhu gradient – kõrgema kontsentratsiooniga lahus (töölahus) paneb vee liikuma läbi membraani töölahusesse, mille käigus eraldatakse vesi temas lahustunud ainetest. Vesi liigub siis madala kontsentratsiooniga lahusest läbi membraani, kõrgema kontsentratsiooniga lahusesse. Päriosmoos leiab aset ainult juhul, kui osmootse rõhu gradient toite ja töölahuse vahel on positiivne ( $\Delta\pi > 0$ ) ja mõlemale lahusele rakendub samasugune hüdrostaatiline rõhk. (Duranceau, 2012)

### 2.3.1. Päriosmoosi protsessi põhimõtte ja teostamine

Arusaam päri- ja pöördosmoosist ning nende erinevusest võib olla keeruline. Nende protsesside erinevuse mõistmiseks vaatleme kõigepealt osmoosi, kus kasutatakse poolläbilaskvast membraani. Läbi selle difundeerub vesi, mille liikumissuund on alati madalamast kontsentratsioonist kõrgema kontsentratsiooni suunas nii, et mõlema poolte vahel eksiteeriks tasakaal. Täpselt sama põhimõtte kehtib ka päriosmoosi kohta.

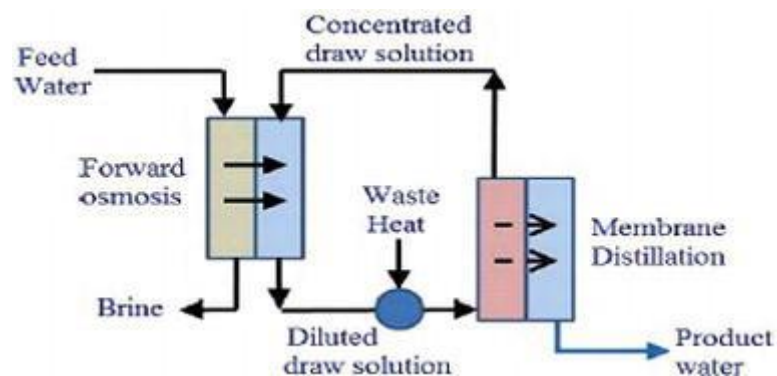
Pöördosmoosil kasutatakse sarnaseid membraani nagu päriosmoosil, kuid selle asemel, et lasta veel liikuda läbi membraani osmootse rõhu tõttu oma tavapärasel suunas, rakendatakse kõrgema kontsentratsiooniga vedelikule hüdraulilist rõhku, et ületada osmootset rõhku ja panna protsess vastupidiselt tööle. Tulemuseks on puhta vee liikumine läbi membraani ning lahustunud aine jääb toitelahuse poole. Joonisel 2.7 on näidatud vee voolu suunad päri- ja pöördosmoosi protsessides.



Joonis 2.7 Vee voolud päri- ja pöördosmoosi protsessis (Bergstedt, 2015)

Päriosmoos on osmootne protsessis toimub osmootse rõhu diferentsi tõttu vee vool toitelahusest läbi poolläbikaskva membraani permeaadi poolele. Päriosmoosi puhul kasutatakse permeaadi pool kõrge lahustunud aine kontsentratsiooniga töölahust (i. k. draw solution, DS), mille osmootne rõhk on kõrge. Protsessi tulemusena töölahus lahjeneb ning puhta vee kättesaamiseks tuleb see lahjast lahusest eraldada. Selleks võib kasutada pöördosmoosi, nanofiltratsiooni, membraandestillatsiooni või elektrodialüüsi. Mõningate orgaaniliste soolade lahjade lahuste korral on võimalik neid kasutada otse väetiste lahustena. (Mecha, 2017)

Joonisel 2.8 on kujutatud Päriosmoosiseadme põhimõtteline skeem. Selles seadmes kasutatakse töölahuse regenereerimiseks s.t puhta vee saamiseks membraandestillatsiooni. (Ince, 2022)



Joonis 2.8 Päriosmoosiseadme põhimõtteline skeem (Ince, 2022)

DS- töölahus, RO - pöördosmoos, ED – elektrodialüüs, MD – membraandestillatsioon

Ideaalsel töölahusel peavad olema järgmised omadused: kõrge osmootne rõhk, madal molaarmass, ei tohi olla toksiline, hea vee lahustuvus, madal hind ning lihtne regenereeritavus. (Ince, 2022) Töölahusena kasutatakse enamasti NaCl lahust, kuna NaCl-l on kõrge lahustuvus ja seda on üpris lihtne taastada pöördosmoosiga kõrge kontsentratsiooniga lahuseks, seda kasutatakse ka merevee magestamisel päriosmoosiga.. (Duranceau, 2012)

Viimasel aastakümnel on teostatud palju uuringuid leidmaks soovitud töölahust. Töölahustena on võimalik kasutada anorgaaniliste soolade NaCl, NaNO<sub>3</sub>, MgSO<sub>4</sub> lahuseid, orgaanilisi ühendeid (glükood, fruktoos, 2-metüülimidiasooli-põhiseid ühendeid) ning funktsionaalseid nanoosakesi(näiteks magnetilisi nanoosakesi. (Ince, 2022)

Teine päriosmoosi uuringutes on seotud uute membraani materjalide uurimisega (Ince, 2022).

### **Vee ja lahustunud ainete voo arvutamine päriosmoosi protsessis**

Päriosmoosi puhul arvutatakse vee voogu läbi membraani järgmiselt (A. Mecha, 2017):

$$J_w = A \Delta P - \Delta \pi \quad (2.3)$$

kus  $J_w$  – veevoog,

$A$  – membraani hüdrauliline läbilaskvus,

$\Delta \pi$  – osmootsete rõhkude erinevus membraani kahel küljel,

$\Delta P$  – hüdrostaatilise rõhu erinevus enne ja pärast membraani.

Kuigi antud võrrand on praktiliselt kasutades palju keerulisem, kuna arvestama peab membraani, toite-ja töölahuse omadustest ning vedeliku dünaamikast protsessis, mis kõik mõjutavad vee voolu.

Lahustunud aine voogu läbi membraani arvutatakse järgmiselt (A. Mecha, 2017):

$$J_s = B \Delta c \quad (2.4)$$

kus  $J_s$  – lahustunud aine voog,

$B$  – lahustunud aine läbilaskvuse koefitsient,

$\Delta c$  – lahustunud aine kontsentratsioonide erinevus membraanis.

### **2.3.2 Päriosmoosi probleemid**

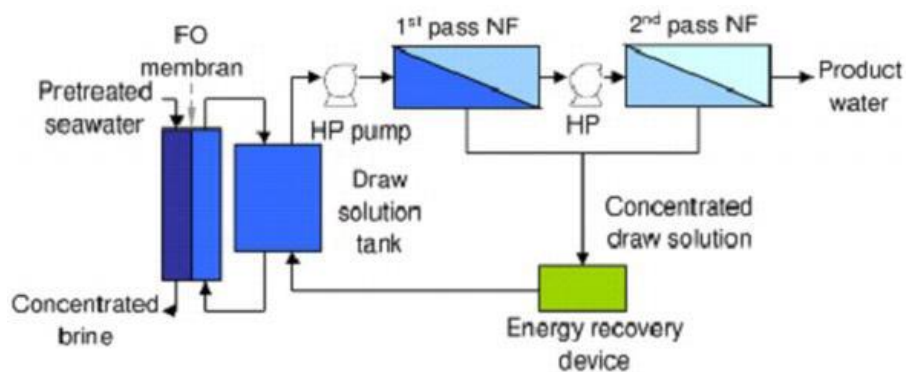
Päriosmoosi teostamisel kerkivad esile samad probleemid nagu pöördosmoosi korral. Peamisteks probleemideks on membraanide saastumine, kontsentratsioonipolarisatsioon, tootlikkuse vähenemine pideval kasutamisel, töölahuse saastumine membraanisese saastumise tõttu.

Sarnaselt pöördosmoosile võib esineda membraanide saastumist. Erinevalt pöördosmoosile toimub siin aga membraanisene saastumine, kuna puudub hüdrauliline rõhk. Toitevedeliku molekulid ummistavad membraanipoore vähendades osmootse rõhu gradienti, mistõttu protsessis liikumapanevaks jõuks olev osmootne rõhk langeb. Kui veevool on aeglasem võivad toitevedeliku molekulid sattuda töölahusesse.

### 2.3.3 Päriosmoosi rakendused

Päriosmoosi eeliseks on, et erinevalt pöördosmoosist suudab päriosmoos lahutada väga kõrge kontsentratsiooniga lahuseid, näiteks, kõrge soolasisaldusega veel on väga suur osmootne rõhk, mis vajab töötamiseks palju kõrgemat rõhku kui pöördosmoosi membraanid suudavad taluda. Teine eelis on päriosmoosi membraanide palju madalam kalduvus saastumisele ja lagunemisele. (Rufuss et al., 2022)

Päriosmoosi kasutatakse laialdaselt merevee magestamisel. (Nicolli, 2017) Joonisel 2.9 on esitatud merevee magestamise seade. Töölahuse regenereerimiseks s.o puhta vee eraldamiseks lahjendatud töölahusest kasutatakse kaheastmelist nanofiltratsiooni (Ince, 2022)



Joonis 2.9. Merevee magestamine päriosmoosiga (Ince, 2022)

FO – päriosmoos, NF – nanofiltratsioon, HP pump - kõrgsurvepump

Meditsiinitööstuses saavutatakse päriosmoosiga soovitud kõrge kontsentratsiooniga lahuseid, mida saab kasutada kriitilises seisundis patsientide ravimiseks. Tüüpilised lahustunud aineteks on glükoos ja fruktoos. (Ince, 2022)

Päriosmoosi kasutatakse ka puhta jahutusvee regenereerimisel tehastes. Jahutusvedelik on antud juhul toitevedelik ja aurustumise teel tekkinud vee puudujääk asendatakse sobivast veeallikast kasutades päriosmoosi. Protsessi eeldusteks on madalam energiakulu ja membraanide madal saastumine. (Nicolli, 2017)

Prügilates kasutatakse päriosmoosi ära nõrgvee puhastamisel eeltöötlemisel. Päriosmoosi käigus eraldatakse vesi nõrgveest kõrgema kontsentratsiooniga (tavaliselt NaCl) lahusesse, mis seejärel suunatakse edasi pöördosmoosi protsessi, kus eraldatakse puhas vesi ja taaskasutatav soolvee kontsentraat. Eeliseks on pöördosmoosi membraanide madalam saastumine. (Nicolli, 2017)



## 2.4. Päriosmoosi ja pöördosmoosi võrdlus

Päriosmoosi eelis pöördosmoosi suhtes on tema madal või olematu vajadus rakendada hüdrostaatilist rõhku, kõrge erinevate saasteainete eraldusvõime Kuna survet protsessis mõjutab sisuliselt ainult voolu hüdrauliline takistus, kasutatakse protsessis võrdlemisi lihtsaid seadmeid ning membraani saastumise ja kulumine on palju madalam. Päriosmoos sobib kasutamiseks toidu- ja farmatseutilistes protsessides, kus on vajalik madala rõhu säilitamine, et mitte kahjustada toitelahust. (Rufuss et. Al., 2022)

Tabelis 2.1. on esitatud eelnevalt käsitletud teemade põhjal pöördosmoosi ja päriosmoosi protsesside võrdlus.

Tabel 2.1. Pöördosmoosi ja päriosmoosi protsesside võrdlus

Näitaja	Pöördosmoos	Päriosmoos
Liikumapanev jõud	Hüdrauliline rõhk	Osmootiline rõhk
Mehhanism	Lahustuvus-difusioon	Lahustuvus-difusioon
Vee voolu suund	Puhta lahusti suunas	Hüpertoonse keskkonna suunas
Membraani tüüp	Tihe, mittepoorne, poolläbilaskev	Tihe, mittepoorne, poolläbilaskev; kuna ei rakendata rõhku, siis on need vastupidavamad kui pöördosmoosi membraanid
Energiavajadus	Kõrge	Madal
Lisarõhu vajadus	Vajadus rakendada hüdrostaatilist rõhku	Puudub
Probleemid	Kontsentratsioonipolarisatsioon, Membraanide saastumine, osmoosi künnis	Kontsentratsioonipolarisatsioon, Membraanide saastumine, osmoosi künnis
Eelised	Permeaadi poolel puhas vesi, mida saab kohe kasutada	Kõrge eraldusefektiivsus, madalam membraanide saastumine ning kulumine kui pöördosmoosi membraanidel
Puudused	Kallis Mitmeetapiline (sageli) Suur kontsentreeritud jäägi (permeaadi) hulk	Töölahus vajab lisatöötlemist, et eraldada puhas vesi

Käesoleva töö põhjal võib öelda, et nii pöördosmoos kui ka päriosmoosil on oma koht veetehnoloogias. Arvestades päriosmoosi eeliseid ja potentsiaali on ta tööstuslik kasutamine eraldiseisva protsessina või kombineerituna teiste protsessidega perspektiivne.

# KOKKUVÕTE

## **Pöördosmoos ja päriosmoos**

### **Bakalaureusetöö**

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli koostada kirjanduse põhjal ülevaade pöördosmoosi ja päriosmoosi protsessidest veetehnoloogias, nende mehhanismidest ja kasutatavatest membraanmoodulitest, rakendustest ning probleemidest nende protsesside läbiviimisel.

Bakalaureusetöös on esitatud ülevaade välja päri- ja pöördosmoosi põhiprintsiipidest, on analüüsitud nende protsesside teostamisel esinevaid probleeme ja nende rakendusi veetehnoloogias. Lisaks töös toodud pöörd- ja päriosmoosi protsesside võrdlus, mille põhjal võib järeldada, et kui pöördosmoosi protsess on juba laialdaselt kasutusel, siis päriosmoos on perspektiivne ning järjest enam kasutust leidev tänu oma eelistele – protsessi läbiviimiseks ei vajata lisarõhu rakendamist ning membraanid on vähem saastuvad, mis muudab protsessis odavamaks.

# **SUMMARY**

## **Reverse Osmosis and Forward Osmosis in Water Technology**

### **Bachelor thesis**

The aim of the bachelor's thesis was to provide an overview of the use of forward and reverse osmosis in water technology, the problems that arise during the processes, and to introduce the mechanisms and modules of membrane processes.

In the bachelor's thesis, the basic principles of the forward and reverse osmosis processes are presented. Also, the technical problems and applications of the processes are discussed. In addition, the comparison of the forward and reverse osmosis is presented. It is shown that reverse osmosis has been widely used and forward osmosis is a prospective process in water technology because of its advantages such as not requiring hydraulic pressure and less fouling of membranes compared to reverse osmosis.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

Al-Karaghoul, A. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113000208> (30.05.22)

Basile, A., Cassano, A., & Rastogi, N. K. (2015). *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment*. Cambridge: Elsevier Science & Technology.

[https://books.google.ee/books?id=TgdhEAAAQBAJ&pg=PA73&lpg=PA73&dq=DOI:+http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.97483&source=bl&ots=zeSrlkTII3&sig=ACfU3U30C6W04hh8SwkblL4ErH17wKtarQ&hl=et&sa=X&ved=2ahUKewjWp56\\_xLr8AhWKsKQKHTzUD\\_AQ6AF6BAgHEAM#v=onepage&q=DOI%3A%20http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.5772%2Fintechopen.97483&f=false](https://books.google.ee/books?id=TgdhEAAAQBAJ&pg=PA73&lpg=PA73&dq=DOI:+http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.97483&source=bl&ots=zeSrlkTII3&sig=ACfU3U30C6W04hh8SwkblL4ErH17wKtarQ&hl=et&sa=X&ved=2ahUKewjWp56_xLr8AhWKsKQKHTzUD_AQ6AF6BAgHEAM#v=onepage&q=DOI%3A%20http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.5772%2Fintechopen.97483&f=false) (07.09.22)

Bergstedt, M. (2015). A Novel Forward Osmosis Draw Solution. <https://www.aiche.org/chenected/2014/12/novel-forward-osmosis-draw-solution> (02.04.22)

Cheremisinoff, N. P. (2002). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies*. Butterworth-Heinemann.

Concentration Polarization In Pressure Driven Processes. <https://synderfiltration.com/learning-center/articles/membranes/concentration-polarization-in-pressure-driven-processes/> (03.06.22)

Degremont (1991). *Water Treatment Handbook* Ondeo Degremont II

Duranceau., S.J. (2012). Emergence of Forward Osmosis and Pressure-Retarded Osmotic Processes for Drinking Water Treatment.

<http://www.fwrj.com/techarticles/0712%20tech%201.pdf>

Forward Osmosis. [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Forward\\_osmosis](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Forward_osmosis) (02.04.22)

Geankoplis, C. J. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles (Includes Unit Operations)*. Fourth Edition. Pearson.

Hasani, S.M.F. et. al (2019). The Effect of Spacer Orientations on Temperature Polarization in a Direct Contact Membrane Distillation Process Using 3-d CFD Modeling. [https://www.researchgate.net/figure/Spiral-wound-membrane-distillation-module-Courtesy-GE-Osmonics-Inc\\_fig1\\_335416318](https://www.researchgate.net/figure/Spiral-wound-membrane-distillation-module-Courtesy-GE-Osmonics-Inc_fig1_335416318) (03.04.22)

AlSawaftah, N., et al. (2021) A Comprehensive Review on Membrane Fouling: Mathematical Modelling, Prediction, Diagnosis, and Mitigation

<https://www.mdpi.com/2073-4441/13/9/1327>

Hilal, N., et al. (2017). Membrane Characterization.

<https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/membrane-process>

Ince, M., Ince O.K. Osmotically Driven Membrane Processes. (2022)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.97483>

Johnson, J. (2006). Membrane Cleaning Fundamentals: Cleaning Criteria and Normalization of Reverse Osmosis Systems.

<https://www.watertechonline.com/home/article/14171904/membrane-cleaning-fundamentals-cleaning-criteria-and-normalization-of-reverse-osmosis-systems>  
(02.06.22)

Mallevalle, J., Odendaal, P.E. Wiesner, M. R. (1996) Water Treatment Membrane Processes. McGraw-Hill.

Matin, A., Khan, Z., Zaidi, S.M.J., Boyce., M.C. (2011). Biofouling in reverse osmosis membranes for seawater desalination: Phenomena and prevention.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916411005911?via%3Dihub>

Mecha, A. (2017) Applications of reverse and forward osmosis processes in wastewater treatment: evaluation of membrane fouling. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.72971>

Membrane Processes. <https://synderfiltration.com/learning-center/articles/membranes/membrane-processes/> (02.04.22)

Mukibi M. Reverse Osmosis – Opportunities and Challenges. (2022)

<https://wcponline.com/2008/11/21/reverse-osmosis-challenges-opportunities-2/>

Membrane separation technology primer.

[https://www.asahi-kasei.co.jp/membrane/microza/en/kiso/kiso\\_1.html](https://www.asahi-kasei.co.jp/membrane/microza/en/kiso/kiso_1.html) (02.04.22)

Metcalf, E. (1972). Wastewater Engineering. McGraw-Hill

Nicoll, G. (2017). Forward Osmosis – A Brief Introduction. Water Today – The Magazine I June 2017. [www.watertoday.org](http://www.watertoday.org)

Ortiz, E.L. (2011). Membrane Processes. <https://www.thermopedia.com/content/948/>  
(03.06.22)

Plate And Frame Membranes. <https://synderfiltration.com/learning-center/articles/module-configurations-process/plate-and-frame-membranes/> (04.04.22)

Rackley, S.A. (2017). Carbon Capture and Storage (Second Edition). 8, 187-225. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hollow-fibre-module> (03.04.22)

Rosales-Asensio, E., Borge-Diez, D., Perez-Hoyos, A., Colmenar-Santos., A. (2018). Reduction of water cost for an existing wind-energy-based desalination scheme: A preliminary configuration. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218322084> (30.05.22)

Rufuss, D.D.W., Kapoor, V., Arulvel, S., Davies, P.A. (2022) Advances in Forward Osmosis (FO) Technology for Enhanced Efficiency and Output: A Critical Review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622013816?via%3Dihub>

Tubular Membranes. <https://synderfiltration.com/learning-center/articles/module-configurations-process/tubular-membranes/> (03.04.22)

Water Treatment Membranes and Their Processes. <https://www.fluencecorp.com/water-treatment-membranes/> (03.06.22)