

**Lappeenrannan teknillinen yliopisto**

**Teknillinen tiedekunta**

**LUT Kemia**

**Erotustekniikan laboratorio**

**BJ10A0102 Kandidaatintyö ja seminaari**

**kevät 2013**

# **Katkaisukooltaan alle 8 kDa ultrasuodatusmembraanit**

Tarkastaja: Tutkijatohtori Mari Kallioinen

Tekijä: Jutta Tiitinen

## Symboliluettelo

### Symbolit

$A$	membraanin suodatuspinta-ala, $m^2$
$c_f$	syötön konsentraatio, mol/L tai ppm
$c_p$	permeaatin konsentraatio, mol/L tai ppm
$F$	membraanin likaantuminen, %
$J$	membraanin permeaattivuo, $L/(m^2 h)$ tai $kg/(m^2 h)$
$J_a$	membraanin vesivuo PEG-suodatusten jälkeen, $L/(m^2 h)$ tai $kg/(m^2 h)$
$J_b$	membraanin vesivuo ennen PEG-suodatuksia, $L/(m^2 h)$ tai $kg/(m^2 h)$
$m$	kertyneen permeaatin massa, L tai kg
$P$	permeabiliteetti, $L/(m^2 h bar)$ tai $kg/(m^2 h bar)$
$R$	retentio, %
$t$	aika, h

### Lyhenteet

COD	kemiallisen hapen kulutus, <i>engl.</i> chemical oxygen demand
DOC	liuennut orgaaninen hiili, <i>engl.</i> dissolved organic carbon
HCl	vetykloridi (suolahappo), <i>engl.</i> hydrochloric acid
IEP	isoelektrinen piste, <i>engl.</i> isoelectric point
KCl	kaliumkloridi, <i>engl.</i> potassium chloride
KOH	kaliumhydroksidi, <i>engl.</i> potassium hydroxide
MF	mikrosuodatus, <i>engl.</i> microfiltration
MWCO	katkaisukoko, <i>engl.</i> molecular weight cut-off
NF	nanosuodatus, <i>engl.</i> nanofiltration
PE	polyetyleni, <i>engl.</i> polyethylene
PEG	polyetyleeniglykoli, <i>engl.</i> polyethylene glycol
PES	polyeetterisulfoni, <i>engl.</i> polyethersulfone
PESH	hydrofilisoitu polyeetterisulfoni, <i>engl.</i> hydrophiliced polyethersulfone

PP	polypropyleeni, <i>engl.</i> polypropylene
PSU	polysulfoni, <i>engl.</i> polysulfone
PSUH	hydrofilisoitu polysulfoni, <i>engl.</i> hydrophiliced polysulfone
PVA	polyvinyylialkoholi, <i>engl.</i> polyvinyl alcohol
PVDF	polyvinylideenifluoridi, <i>engl.</i> polyvinylidene fluoride
RC	regeneroitu selluloosa, <i>engl.</i> regenerated cellulose
RO	käänteisosmoosi, <i>engl.</i> reverse osmosis
TC	kokonaishiili, <i>engl.</i> total carbon
TDS	liuennut kiintoaine, <i>engl.</i> total dissolved solids
TOC	kokonaisorgaaninen hiili, <i>engl.</i> total organic carbon
UF	ultrasuodatus, <i>engl.</i> ultrafiltration
UHMW	erittäin korkea moolimassa, <i>engl.</i> ultra high molecular weight

## SISÄLLYS

1	Johdanto.....	2	
KIRJALLISUUSOSA .....			2
2	Ultrasuodatus .....	2	
2.1	Ultrasuodatuksen perusteet.....	2	
2.2	Ultrasuodatuksessa käytettävät membraanit.....	4	
2.2.1	Polymeerimembraanit.....	4	
2.2.2	Keraamiset membraanit.....	4	
3	Membraanien ominaisuudet.....	4	
3.1	Membraanien valmistajia ja ominaisuuksia.....	5	
3.2	pH, lämpötila ja paine.....	6	
3.3	Varaus ja hydrofiilisyys/fobisuus .....	7	
3.4	Vuo ja permeabiliteetti .....	8	
3.5	Retentio.....	10	
4	Membraanien käyttökohteet .....	14	
KOKEELLINEN OSA .....			15
5	Materiaalit ja menetelmät .....	15	
5.1	Membraanit ja kemikaalit .....	15	
5.2	Suodatuskokeet .....	15	
5.3	Kontaktikulma- ja varausmittaukset .....	16	
5.4	Käytetyt yhtälöt .....	17	
6	Tulokset ja tulosten tarkastelu .....	18	
6.1	Membraanien vuot ja likaantuminen .....	18	
6.2	Membraanien retentiot ja katkaisukoot .....	22	
6.3	Kontaktikulmat .....	25	
6.4	Varaukset .....	27	
7	Johtopäätökset.....	28	
Lähteet .....			30

## 1 Johdanto

Tämän työn tarkoituksena on kartoittaa markkinoilla olevat katkaisukooltaan alle 8 kDa:n ultrasuodatusmembraanit. Membraanisuodatus on tehokas erotusmenetelmä ja sillä on paljon käyttökohteita.

Kirjallisuudessa kerrotaan ultrasuodatuksen periaatteesta ja siinä käytettävistä polymeerisistä sekä keraamisista membraaneista ja niiden ominaisuuksista sekä tutustutaan alle 8 kDa:n ultrasuodatusmembraaneilla tehtyihin tutkimuksiin. Kirjallisuudessa käydään läpi myös ultrasuodatusmembraanien käyttökohteita.

Kokeellisessa osiossa karakterisoidaan alle 8 kDa:n polymeerisiä ultrasuodatusmembraaneja. Membraaneille määritetään eri moolimassaisten PEG-liuosten avulla retentiot ja katkaisukoot. Lisäksi mitataan membraanien kontaktikulmat ja varaukset. Suodatuskokeilla määritetään membraanien vesivuot sekä PEG-liuosten vuot ja membraanien likaantuminen.

## KIRJALLISUUSOSA

### 2 Ultrasuodatus

Ultrasuodatus (UF) on yksi paine-eroon perustuvista membraanisuodatustekniikoista. Muut menetelmät ovat mikro-suodatus (MF), nanosuodatus (NF) ja käänteisosmoosi (RO). Ne eroavat toisistaan erotuskyvyiltään.

#### 2.1 Ultrasuodatuksen perusteet

Ultrasuodatus sijoittuu mikro-suodatuksen ja nanosuodatuksen väliin. Ultrasuodatusta käytetään, kun halutaan erottaa esimerkiksi makromolekyylejä ja kolloideja liuoksesta. Rajanvetoa ultrasuodatuksen ja nanosuodatuksen välillä on vaikea tehdä, mutta nanosuodatuksella saadaan erotettua jonkin verran kaksiarvoisia ioneja, mutta ultrasuodatuksella ei. [1]

Ajavana voimana ultrasuodatuksessa on paine-ero membraanin yli, ja suodatuksessa käytetään yleensä painetta 1 ja 10 bar:in väliltä. Membraanin

läpäisyyttä prosessivirran osaa kutsutaan permeaatiksi ja läpäisemätöntä konsentraatiksi. Ultrasuodatusmembraanien huokoskoko on yleensä 1 ja 100 nm:n välillä. Katkaisukoko eli MWCO-arvo (molecular weight cut-off) on välillä 1 kDa (NF/UF-rajapinnalla) ja 1 000 kDa. Katkaisukoko kuvaa membraanin kykyä pidättää moolimassaltaan erikokoisia molekyyliä. 1 Da eli Dalton on 1 g/mol. [1]

Ultrasuodatusta käytetään elintarvike-, meijeri-, lääke-, tekstiili-, kemian-, paperi- ja nahkateollisuudessa sekä metallurgiassa. Elintarviketeollisuudessa ultrasuodatuksen käyttökohteita ovat esimerkiksi maidon konsentointi, hedelmämeijerijä ja alkoholi-juomien selkeytys sekä juuston valmistus. Metallurgiassa ultrasuodatusta käytetään esimerkiksi vesi-öljyemulsioiden käsittelyssä. [1]

Membraanin toimintaa kuvaavia suureita ovat vuo (J), permeabiliteetti (P), retentio (R) ja katkaisukoko (MWCO). Vuo kertoo syöttöliuoksen tilavuusvirtauksen membraanin läpi pinta-alaan ja aikaan nähden. Se esitetään usein yksikössä  $L/(m^2 h)$ . Permeabiliteetti taas saadaan vuon paineriippuvuudesta ja sen yksikkö on usein  $L/(m^2 h bar)$ . Jotta vuon ja permeabiliteetin arvoja voi vertailla, pitää tietää suodatuslämpötila sekä suodatukseen käytetty paine. Retentio kertoo, kuinka suuri osa syöttöliuoksen sisältämistä yhdisteistä pidättyy membraanilla. Retentio lasketaan yhtälöllä (1)

$$R = \left(1 - \frac{c_p}{c_f}\right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

jossa  $R$  retentio, %  
 $c_p$  permeaatin konsentraatio, mol/L tai ppm  
 $c_f$  syötön konsentraatio, mol/L tai ppm.

Mitä lähempänä 100 %:a retentio on, sitä paremmin haluttu aine pidättyy membraanille. MWCO-arvo kertoo, kuinka suuren molekyylin moolimassan membraani pidättää 90-prosenttisesti. Katkaisukoko ilmoitetaan yleensä yksikössä Da tai kDa. [1]

## **2.2 Ultrasuodatuksessa käytettävät membraanit**

Ultrasuodatuksessa käytettävät membraanit voivat olla joko polymeereistä tai keraameista valmistettuja. Ultrasuodatusmembraaneilla on epäsymmetrinen huokosrakenne, mikä tarkoittaa, että huokoskoko kasvaa liikuttaessa membraanin pinnalta poispäin. [1]

### **2.2.1 Polymeerimembraanit**

Yleisimpiä polymeerimateriaaleja, joita käytetään membraanien valmistuksessa, ovat polyeetterisulfoni (PES), polysulfoni (PSU), polyvinylideenifluoridi (PVDF) ja regeneroitu selluloosa (RC). Membraanien tukimateriaaleina käytetään mm. polyetyleenä (PE) ja polypropyleeniä (PP). Polymeerisiä membraaneja valmistavat muun muassa Microdyn-Nadir (Saksa), Millipore (Yhdysvallat) ja Alfa Laval (Ruotsi). [1, 2, 3, 4, 5, 6]

### **2.2.2 Keraamiset membraanit**

Keraamisten ultrasuodatusmembraanien materiaaleina käytetään yleisimmin titaanioksidia ( $\text{TiO}_2$ ), zirkoniumoksidia ( $\text{ZrO}_2$ ) ja piikarbidia ( $\text{SiC}$ ). Tukimateriaalina käytetään esimerkiksi alumiinioksidia ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Keraamiset membraanit ovat kemiallisesti kestävämpiä kuin polymeeriset membraanit. Ne kestävät korkeampia lämpötiloja ja niillä on hyvä mekaaninen kestävyys. Niiden käyttöikä on myös yleensä pidempi kuin polymeerisillä membraaneilla. Keraamisia membraaneja valmistavat esimerkiksi TAMI Industries (Ranska), CeraMem Ceramic Membrane Systems (Veolia Water, Yhdysvallat) ja Atech innovations (Saksa). [1, 7, 8, 9]

## **3 Membraanien ominaisuudet**

Valmistajien ilmoittamia ominaisuuksia membraaneille ovat yleisimmin materiaali, MWCO, vesivuo, käyttöpaino, pH-kestävyys ja lämpötilakestävyys. Keraamisille membraaneille ilmoitetaan lisäksi mm. huokoskoko, huokosten lukumäärä, membraanin pituus, pinta-ala ja kanavien lukumäärä. Tutkimuksista löytyy membraaneille paljon lisää ominaisuuksia. Ominaisuuksien avulla

pystytään valitsemaan sopiva membraani. Tärkeimpiä ominaisuuksia membraanin valinnassa ovat MWCO, suodatuskapasiteetti, paine sekä pH- ja lämpötilakestävyys.

### 3.1 Membraanien valmistajia ja ominaisuuksia

Taulukossa I on esitetty markkinoilla olevia ultrasuodatusmembraaneja eri valmistajilta ja niiden ominaisuuksia.

Taulukko I. Membraanien valmistajia ja ominaisuuksia. [2, 3, 4, 5, 6, 7, 9]

Membraani	Valmistaja	MWCO, kDa	Materiaali	pH-asteikko	Max lämpötila, °C	Paine, bar
UH004	Microdyn-Nadir	4	PESH <sup>(1)</sup>	0-14	95	-
UP005	Microdyn-Nadir	5	PES	0-14	95	-
UC005	Microdyn-Nadir	5	RC	1-11	55	-
GR95PP	Alfa Laval	2	PES	1-13	75	1-10
ETNA01PP	Alfa Laval	1	PVDF	1-11	60	1-10
UFX5 pHt	Alfa Laval	5	PSUH <sup>(1)</sup>	1-13	75	1-15
PBCC	Millipore	5	PES	1-14	80	-
PBFC	Millipore	8	PES	1-14	80	-
PLCCC	Millipore	5	RC	2-13	80	-
PLGCD	Millipore	8	RC	2-13	80	-
PLAC	Millipore	1	RC	2-10	80	-
PLBC	Millipore	3	RC	2-10	80	-
PLCC	Millipore	5	RC	2-10	80	-
INSIDE CéRAM	TAMI	1, 3, 5, 8	TiO <sub>2</sub>	-	-	-
Filtanium	TAMI	1, 3, 5, 8	TiO <sub>2</sub>	-	-	-
atech Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Atech	5	TiO <sub>2</sub>	-	-	-

1) H tarkoittaa hydrofilisoitua

Päämateriaalin lisäksi joissakin membraaneissa käytetään tukimateriaalina jotakin toista materiaalia. Milliporeen PBCC- ja PBFC-membraanien tukimateriaalina on polyolefiinikuitukangas. PLCCC- ja PLGCD-membraanien tukimateriaalina on UHMW polyetyleni. PLAC-, PLBC- ja PLCC-membraanien tukimateriaalina on polypropyleenikuitukangas. Alfa Lavalin ultrasuodatusmembraaneissa



tukimateriaalina käytetään polypropyleeniä. Atechin membraanin tukimateriaalina on  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. [3, 5, 6, 9]

### 3.2 pH, lämpötila ja paine

Taulukkoon I on koottu markkinoilla olevien polymeeristen membraanien valmistajien ilmoittamat pH-, lämpötila- ja painekestävyys.

Keraamiset membraanit kestävät yleensä hyvin sekä happamia että emäksisiä olosuhteita ja niitä voidaan käyttää myös korkeammassa lämpötilassa ja paineessa kuin polymeerisiä membraaneja. [8, 9]

Kirjallisuudesta löytyy paljon tietoja aiemmin mainituista membraaneista ja mittauksissa käytetyistä olosuhteista. Suodatusliuoksen pH on useimmissa tutkimuksissa melko neutraali, mutta myös happamampia liuoksia on käytetty, kuten Restolho *et al.* [10] pH:n ollessa 3,3–3,7 ja membraaneina UP005, GR95PP, ETNA01PP ja UFX5 pHt. Keraamisista membraaneista Filtaniumin 1 ja 5 kDa:n membraaneja ovat käyttäneet Žabková *et al.* [11] emäksisissä olosuhteissa pH-arvon ollessa 12,5.

Useimmiten suodatuslämpötilana käytetään huonelämpötilaa eli 20–25 °C, mutta suurempiakin lämpötiloja on käytetty. Esimerkiksi Persson *et al.* [12] ovat suodattaneet ETNA01PP-membraanilla 60 °C:ssa ja UFX5 pHt-membraanilla 75 °C:ssa. Sainio *et al.* [13] suodattivat GR95PP- ja UFX5 pHt-membraaneilla 70 °C:ssa.

Microdyn-Nadir ja Millipore eivät omissa membraanitaulukoissaan ilmoita painekestävyyttä. Liian suuri paine voi aiheuttaa membraanin kokoonpuristumista suodatuksen aikana. Kokoonpuristuminen muuttaa membraanin ominaisuuksia ja vaikuttaa esimerkiksi aineiden pidättymiseen membraanilla. Vanneste *et al.* [14] ovat suodattaneet Microdyn-Nadirin kaikilla kolmella membraanilla paineessa 3 bar, Koschuh *et al.* [15] UH004-membraanilla 7 bar:ssa ja Restolho *et al.* [10] UP005-membraanilla paineessa 7 bar. Schäfer *et al.* [16] käyttivät suodatukseen PLAC-, PLBC- ja PLCC-membraaneja ja paineena 3 bar. Samoja membraaneja tutkivat Neale *et al.* [17], mutta paineena oli 5 bar. PBCC-membraania ovat

Simonič *et al.* [18] käyttäneet 1-4 bar:ssa. Näistä voisi päätellä, että membraanit kestävät samanlaista painetta kuin Alfa Lavalinkin membraanit eli noin 1-10 bar. Majewska-Nowak [19] on käyttänyt INSIDE CÉRAMia MWCO-arvoilla 1, 5 ja 8 kDa paineissa 0,3, 0,6 ja 0,9 bar eli hyvin pieniä paineita voi myös käyttää.

### 3.3 Varaus ja hydrofiilisyy/fobisuus

Membraanin varaus ja tutkittavan liuoksen varaus sekä myös membraanin hydrofiilisyy/fobisuus vaikuttavat membraanin likaantumiseen. Membraani on hydrofiilinen, jos sen kontaktikulma on alle  $90^\circ$  ja hydrofobinen, jos kontaktikulma on yli  $90^\circ$ . Kwon *et al.* [20] tutkivat membraanin pinnan varausta ja hydrofiilisyyttä/fobisuutta PLCC- ja PBCC-membraaneilla. Suodatusliuoksena oli orgaaninen nanokolloidi, jonka moolimassa oli 1 000-1 500 g/mol. Ionivaihdetulla vedellä PLCC-membraanin kontaktikulma oli  $34,0 \pm 0,6^\circ$  ja PBCC-membraanin  $69,9 \pm 0,4^\circ$ . PLCC on siis hydrofiilisempi kuin PBCC eli RC-membraani on hydrofiilisempi kuin PES-membraani. Membraanin varausta verrattaessa PBCC on pH:ssa 7 ja 8 negatiivisemmin varautunut kuin PLCC, koska sillä on pienempi zeta-potentiaali. pH:ssa 8 PBCC:llä zeta-potentiaali on noin -25 mV, kun PLCC:llä arvo on noin -10 mV. pH-arvon mennessä happamammaksi PLCC muuttuu negatiivisemmin varautuneeksi. Membraanien likaantumisessa ei ole suuresti eroa, mutta PBCC:llä permeaattivuon arvo pienenee hieman enemmän suodatuksen aikana. [20] Koivulan *et al.* [21] mukaan RC-membraani on hydrofiilisempi verrattuna PSU-membraaniin ja PSU-membraani likaantuu enemmän. PSU-membraanin eli Koivulan *et al.* tutkimuksessa käytetyn UFX5 pHt-membraanin kontaktikulma oli  $74^\circ$ . [21]

Koschuh *et al.* [15] tutkivat eri tavalla varauksellisten liuosten retentioita hydrofiilisesti varatulla UH004-membraanilla. Membraanilla ei saatu kovin suurta hiilihydraattien, ionisten suolojen, orgaanisten happojen ja aminohappojen retentiota. Tämä voi johtua myös membraanin suuresta MWCO-arvosta eikä hydrofiilisyydestä. Membraanin suhteellinen vuo pesun jälkeen oli noin 80 % alkuperäisestä vuon arvosta, joten membraani likaantui jonkin verran. [15]

Majewska-Nowakin [19] tutkimuksessa INSIDE CÉRAMia käytettiin anionisten väriaineiden suodatuksessa. Väriaineliuosten pH:sta riippuu membraanin varaus, mutta tässä tutkimuksessa membraanilla on pääosin positiivinen varaus. Vain pH:n ollessa yli 7 keraaminen membraani voi olla hieman negatiivisesti varautunut. Žabková *et al.* [11] mukaan monella membraanilla on positiivinen zeta-potentiaali pienissä pH-arvoissa ja negatiivinen zeta-potentiaali korkeissa pH-arvoissa. Likaantumisen määrittämiseksi Majewska-Nowakin [19] tutkimuksessa mitattiin väriaineen vuo ja tislattun veden vuo ja niiden suhde laskettiin. 1 kDa:n membraanilla suhteellinen vuo on pienin ja 5 ja 8 kDa:n membraaneilla melko samat. Väriaineet likaavat siis eniten 1 kDa:n membraania. Likaantumista voi selittää positiivisesti varautuneen membraanin ja negatiivisesti varautuneen partikkelin välinen elektrostaattinen vuorovaikutus. [19]

### 3.4 Vuo ja permeabiliteetti

Jotkut membraanien valmistajat ilmoittavat membraaneilleen puhtaan veden vuon arvon. Vuon arvo riippuu kuitenkin mittausolosuhteista ja on usein vain viitteellinen, joten kirjallisuudesta löytyy erilaisia vuon arvoja. Puhtaan veden vuon arvo mitataan usein ennen ja jälkeen suodatuksen, jotta nähdään kuinka paljon membraani on likaantunut suodatuksen aikana. Vuon sijaan voidaan määrittää myös permeabiliteetti eli vuon paineriippuvuus. Suodatettavalle aineelle määritetään myös vuo.

Restolho *et al.* [10] suodattivat paperiteollisuuden eukalyptuspuun sulfiittiliuosta, jonka pH oli 3,4-3,7 ja tavoitteena oli erottaa sokereita ja lignosulfonaatteja. Käytössä olivat UP005, GR95PP, ETNA01PP ja UFX5 pHt. UP005-membraanille valmistaja ilmoittaa puhtaan veden permeabiliteetin arvoksi  $>10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h bar})$  mitattuna  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ :ssa ja 3 bar:ssa ja Restolho *et al.* [10] saivat tulokseksi  $27 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h bar})$   $25 \text{ }^\circ\text{C}$ :ssa ja 7 bar:ssa. Vuon ja permeabiliteetin arvot kasvavat paineen ja lämpötilan kasvaessa ja siksi tulos sopii hyvin valmistajan ilmoittamaan arvoon. Muille membraaneille ei ole valmistajan ilmoittamia permeabiliteetteja, mutta paineessa 3 bar ja lämpötilassa  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  UFX5 pHt-membraanin permeabiliteetiksi saatiin  $25 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h bar})$ , GR95PP-membraanille 6 ja  $10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h bar})$  ja ETNA01PP-membraanille  $44 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h bar})$ .

Suodatusliuokselle määritetyt permeattivuon arvot aiemmin mainituissa lämpötiloissa ja paineissa olivat: UP005 2 kg/(m<sup>2</sup> h), UFX5 pHt 8 ja 29 kg/(m<sup>2</sup> h), GR95PP 0,3 ja 0,5 kg/(m<sup>2</sup> h) ja ETNA01PP 2 ja 4 kg/(m<sup>2</sup> h). Vesivuon arvoista alussa ja lopussa laskettiin suhde, jotta nähtiin kuinka paljon membraanit likaantuivat. GR95PP likaantui näistä membraaneista eniten, sillä sen vesivuon arvojen suhteeksi saatiin vain 9 %. [10]

Sainio *et al.* [13] suodattivat lignoselluloosan kuumavesiuutteita. Tavoitteena oli erottaa hemiselluloosia, jotka hydrolysoitiin monosakkarideiksi. Suodatusliuoksen pH oli samalla tasolla kuin Restolhon *et al.* [10] tutkimuksessa. Käytössä olivat UFX5 pHt ja GR95PP kaksivaiheisessa membraanisuodatussysteemissä, jossa ensin liuos suodatettiin löysemmällä ultrasuodatusmembraanilla. Puhtaan veden vuo ja suodatusliuoksen permeattivuo molemmille membraaneille määritettiin paineessa 3 bar ja lämpötilassa 70 °C. UFX5 pHt-membraanille puhtaan veden vuo ennen suodatusta oli 135 kg/(m<sup>2</sup> h) ja suodatuksen jälkeen 125 kg/(m<sup>2</sup> h), joten se ei likaantunut kovin paljoa. GR95PP-membraanilla puhtaan veden vuo alussa oli 84 kg/(m<sup>2</sup> h) ja lopussa 14 kg/(m<sup>2</sup> h), joten se likaantui selkeästi enemmän. Vesivuon arvot ovat jonkin verran suuremmat kuin Restolhon *et al.* [10] tutkimuksessa, mutta se johtuu ainakin osittain suuremmasta lämpötilasta. Myös eri laitteistoilla voi olla vaikutusta tuloksiin. Puu-uutteelle määritetyt permeattivuon arvot olivat UFX5 pHt 53 kg/(m<sup>2</sup> h) ja GR95PP 4 kg/(m<sup>2</sup> h). [13]

Schäfer *et al.* [16] käyttivät Milliporeen PLAC-, PLBC- ja PLCC-membraaneja luonnonvesien suodatuksessa. He määrittivät membraaneille puhtaan veden vuon ja permeabiliteetin paineessa 3 bar. Permeabiliteetin arvot olivat: PLAC 5,0 L/(m<sup>2</sup> h bar), PLBC 7,3 L/(m<sup>2</sup> h bar) ja PLCC 9,3 L/(m<sup>2</sup> h bar). [16] Kwon *et al.* [20] käyttivät myös PLCC-membraania ja lisäksi PBCC-membraania. He saivat puhtaan veden permeabiliteetin arvoiksi PLCC-membraanille 12,5 L/(m<sup>2</sup> h bar) ja PBCC-membraanille 56,7 L/(m<sup>2</sup> h bar). [20]

Majewska-Nowakin [19] tutkimuksessa suodatettiin väriaineita INSIDE CéRAM-membraaneilla. Tislattulle vedelle määritettiin vuon arvo kolmessa eri paineessa. Paineessa 0,9 bar 1 kDa:n membraanilla tislattun veden vuo oli noin 20 L/(m<sup>2</sup> h), 5 kDa:n membraanilla noin 13 L/(m<sup>2</sup> h) ja 8 kDa:n membraanilla noin 19 L/(m<sup>2</sup> h).

Väriaineilla oli erilaisia permeaattivuon arvoja. Metyylioranssilla oli suurin vuon arvo ja titaanikeltaisella pienin. 1 ja 8 kDa:n membraaneilla metyylioranssin vuon arvo oli noin  $17 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$  ja 5 kDa:n membraanilla noin  $9 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$ . Titaanikeltaisen vuon arvo vaihteli  $8 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$  molemmin puolin, pienin oli kuitenkin 5 kDa:n membraanilla. [19]

Žabková *et al.* [11] tutkimuksessa tavoitteena oli saada erotettua vanilliinia ligniini/vanilliini-seoksesta käyttäen Filtaniumin 1 ja 5 kDa:n keraamisia membraaneja. Vesivuo mitattiin eri paineissa. Paineessa 1,55 bar vesivuo oli 1 kDa:n membraanilla noin  $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$  ja 5 kDa:n membraanilla noin  $70 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$ . Suodatusliuoksen pH:n ollessa 12,5 permeaattivuon arvo alussa 1 kDa:n membraanilla oli noin  $3,8 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$  ja 5 kDa:n membraanilla noin  $14 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$ . Vastaavat arvot suodatuksen lopussa olivat noin 2,5 ja  $11 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$ . Jonkin verran likaantumista tapahtui siis suodatuksen aikana. [11]

### 3.5 Retentio

Kuten aiemmin on mainittu, retentio kertoo membraanin kyvystä pidättää liuennetta yhdisteitä. Mitä suurempi retentio, sen paremmin membraani on pidättänyt aineen. Yhtälöä (1) käyttäen retentio saadaan laskettua konsentraation lisäksi myös monilla muilla parametreilla. Konsentraation sijaan voidaan käyttää esimerkiksi syötön ja permeaatin orgaanisen hiilen pitoisuutta (TOC), hiilihydraattipitoisuutta, UV-absorbanssia, sameutta, johtokykyä, liuennan orgaanisen hiilen pitoisuutta (DOC), kemiallisen hapen kulutusta (COD) ja kuiva-aineen pitoisuutta (TDS). [16, 21, 22]

Koivulan *et al.* [21] ja Sainion *et al.* [13] tutkimuksissa oli molemmissa käytössä paperiteollisuuden puuperäiset vedet. Ensin mainitussa suodatettava kuusihydrolysaatti oli esikäsitelty sellaisella metodilla, jossa tarkoituksena oli hapettaa ligniini. Tämän jälkeen hydrolysaatti suodatettiin UFX5 pHt-membraanilla ja määritettiin retentiot eri tavoilla. Suodatuslämpötilana oli  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  ja paineena 5,5 bar. Retentiot on esitetty taulukossa II. [21]

Taulukko II. Koivulan *et al.* eri tavoin määrittämät kuusihydrolysaatin retentiot UFX5 pHt-membraanilla. [21]

Suodatusaika, min	Retentiot, %				
	TOC	Hiilihydraatti	UV (205 nm)	Johtokyky	Sameus
0	38	49	34	14	96
15	36	42	23	5	99
30	28	43	23	9	100
60	13	13	17	-	98
120	9	13	28	3	88

Sainion *et al.* [13] saamat retentiot lignoselluloosan kuumavesiuutteen suodatuksessa on esitetty taulukossa III. Tavoitteena oli saada erotettua hemiselluloosia ja käytössä olivat UFX5 pHt ja GR95PP. Suodatuslämpötila oli 70 °C ja paine 3 bar. Hydrolysaatti oli esisuodatettu 30 kDa:n RC-membraanilla. [13]

Taulukko III. Sainion *et al.* saamat retentiot lignoselluloosan kuumavesiuutteitten suodatuksessa kahdella eri membraanilla. [13]

Membraani	Retentiot, %		
	TC	Hiilihydraatti	UV (280 nm)
UFX5 pHt	28	53	9
GR95PP	43	47	19

Koivulan *et al.* [21] tutkimuksessa sameuden avulla laskettu retentio oli lähellä 100 %:a, mutta muut retentiot jäivät alle 50 %:n. Suodatuksen alussa kuitenkin esimerkiksi hiilihydraattipitoisuudesta laskettu retentio oli lähellä 50 %, joten sillä saatiin erotettua melko hyvin hiilihydraatteja. [21] Sainion *et al.* [13] suodatuksessa UFX5 pHt-membraanilla päästiin myös noin 50 % hiilihydraattiretentioon.

Persson *et al.* [12] tutkimuksen tarkoituksena oli erottaa hemiselluloosaa sellutehtaan prosessivedestä käyttäen ETNA01PP- ja UFX5 pHt-membraaneja. Paineessa 4 bar ja hemiselluloosan konsentraatiossa 2 g/l ETNA01PP-membraanille hemiselluloosan retentioksi saatiin yli 80 % ja ligniinin retentioksi noin 25 %. Vastaavat arvot UFX5 pHt-membraanille olivat noin 90 % ja noin 30

% . UFX5 pHt-membraanille saatiin pienemmissä paineissa suurempia hemiselluloosan retentioita. [12]

Restolhon *et al.* [10] käytössä olivat UFX5 pHt, GR95PP, ETNA01PP ja UP005. He erottivat sokeria ja lignosulfonaattia (LS) eukalyptuspuun sulfiittiliuoksesta. Tulokset on esitetty taulukossa IV.

Taulukko IV. Restolhon *et al.* määrittämät sokerin ja lignosulfonaatin retentiot eukalyptuspuun sulfiittiliuoksesta. [10]

Membraani	Paine, bar	Retentiot, %	
		Sokeri	LS
UFX5 pHt	3	22–25	52–54
GR95PP	3	49–57	74–76
ETNA01PP	3	30–32	54–58
UP005	7	49	80

Kolmella ensimmäisellä membraanilla tehtiin 2 mittausta 3 bar:ssa. UP005-membraanilla saatiin parhaat retentiot, vaikka paine olikin suurempi. [10]

Vanneste *et al.* [14] käyttivät UH004- ja UP005-membraaneja makeutusaineiden erottamiseen Stevia rebaudianasta. Makeutusaineet, joita saatiin erotettua, olivat steviosidin yhdisteet ja uute sekä rebaudiosidi-A:n (reb-A) yhdisteet ja uute. UH004-membraanilla steviosidin yhdisteelle retentioksi saatiin noin 15 % ja uutelle noin 40 %. UP005:llä yhdisteen retentio oli noin 30 % ja uutteen noin 50 %. UH004:lla reb-A:n yhdisteelle retentio oli noin 20 % ja uutelle noin 40 %. Vastaavat arvot UP005-membraanilla olivat noin 40 % ja noin 50 %. UP005-membraanilla saatiin siis erotettua makeutusaineita hieman paremmin. [14]

PLAC-, PLBC- ja PLCC-membraaneilla on tutkittu liuos-liuos vuorovaikutuksia steroidisten hormonien erotuksessa (Neale *et al.* [17]). Hormoneille määritettiin retentiot niin, että tutkittavassa liuoksessa ei ole orgaanista ainesta ja niin, että orgaaninen aines on mukana. Orgaanisella aineksella tarkoitetaan kaikkialla maaperässä ja jätevesissä läsnä olevaa orgaanista ainesta. Hormonit olivat estradioli, estroni, progesteroni ja testosteroni. Ilman orgaanisen aineksen

läsnäoloa retentiot jäävät hyvin pieneksi, alle 30 %:n. Orgaanisen aineksen kanssa määritetyt hormonien retentiot on esitetty taulukossa V.

Taulukko V. Hormonien retentiot niin, että orgaaninen aines on mukana. [17]

Membraani	Retentiot, %			
	Estradioli	Estroni	Progesteroni	Testosteroni
PLAC	50	45	70	40
PLBC	40	35	70	40
PLCC	45	40	65	30

Tutkituilla membraaneilla saadaan erotettua parhaiten progesteronia, mutta melko hyvin myös muita hormoneja. Orgaanisen aineksen mukana olo paransi retentioita, koska hormonit vuorovaikuttivat orgaanisen aineksen kanssa. [17]

Dafinov *et al.* [22] suodattivat mustalipeää INSIDE CéRAMin 1 ja 5 kDa:n membraaneilla. He määrittivät retentiot jatkuvatoimisessa systeemissä kolmessa eri paineessa (3, 5 ja 7 bar) sekä 5 kDa:n membraanilla myös panostoimisessa suodatuksessa (5 bar). He määrittivät retentiot COD:n, orgaanisen aineksen ja TDS:n avulla. Jatkuvatoimisessa systeemissä 5 bar:n kohdalla molempien membraanien COD-retentio oli noin 50 %. Samassa kohdassa orgaanisen aineksen retentio 1 kDa:n membraanilla oli noin 50 % ja 5 kDa:n membraanilla noin 25 %. TDS-retentiot olivat noin 35 % ja 27 %. Panostoimisessa suodatuksessa 5 bar:ssa 5 kDa:n membraanilla TDS-retentioksi saatiin 38,3 %, orgaanisen aineksen retentioksi 39,4 % ja COD-retentioksi 63,4 % suodatuksen lopussa. [22]

Samoilla INSIDE CéRAM-membraaneilla suodatettiin väriaineita (Majewska-Nowak [19]), mutta käytössä olivat 1, 5 ja 8 kDa:n membraanit. Väriaineiden moolimassat vaihtelivat 327 Da:n ja 1084 Da:n välillä. Pienemmän moolimassan väriaineille saatiin kaikilla membraaneilla vain noin 20 % retentio, mutta molekyylimassan kasvaessa noin 700 Da:n, retentio saavutti 100 %. Käytössä olleilla membraaneilla saatiin siis erotettua hyvin suuremman moolimassan väriaineita, mutta pienemmän moolimassan väriaineet pääsivät membraaneista läpi. [19]



Žabková *et al.* [11] erottivat vanilliinia ligniini/vanilliini-seoksesta tarkoituksena saada talteen vanilliinia. Käytössä oli Filtanium 1 ja 5 kDa:n membraanit. Molemmilla membraaneilla ligniinin retentioksi saatiin noin 97 % ja vanilliinin retentioksi 0 % suodatusliuoksella, jonka pH oli 12,5. Vanilliini läpäisi siis membraanin ja ligniini pidättyi membraanille ja ne erottuivat toisistaan. 1 kDa:n membraanilla suodatettiin myös liuosta, jonka pH oli 8,5 ja sillä saatiin ligniinin retentioksi 95 %, joten pH:lla ei ole suurta vaikutusta retentioon. [11]

#### 4 Membraanien käyttökohteet

Aiemmissä kappaleissa on jo mainittu joidenkin membraanien kirjallisuudesta löytyneitä käyttökohteita. Taulukossa VI käyttökohteet on koottu yhteen.

Taulukko VI. Erialaisten membraanien käyttökohteita. [10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]

Membraani	Sellu- ja paperiteollisuus	Elintarvike-teollisuus	Rehu-teollisuus	Meijeri-teollisuus	Tekstiili-teollisuus	Veden käsittely
UH004		x	x			
UP005	x	x		x		
UC005		x				
GR95PP	x					
ETNA01PP	x					
UFX5 pHt	x					
PBCC					x	x
PLCCC						x
PLAC						x
PLBC						x
PLCC						x
INSIDE CēRAM	x				x	
Filtanium			x			

Taulukosta VI käy ilmi, että ultrasuodatusmembraaneja käytetään erityisesti sellu- ja paperiteollisuudessa sekä veden käsittelyssä. Veden puhdistuksessa ultrasuodatusta käytetään esimerkiksi esisuodatuksena ennen nanosuodatusta tai käänteisosmoosia [20]. Tekstiiliteollisuudessa ja myös paperiteollisuudessa ultrasuodatusta voidaan käyttää esim. väriaineiden erotukseen jätevesistä [19].

## **KOKEELLINEN OSA**

### **5 Materiaalit ja menetelmät**

Tässä työssä määritettiin viidelle eri polymeeriselle membraanille vuot ja likaantuminen, kontaktikulmat ja varaukset sekä retentiot ja katkaisukoot.

#### **5.1 Membraanit ja kemikaalit**

Katkaisukoot määritettiin suodatuskokeiden avulla viidelle eri membraanille. Käytössä olivat taulukossa I esitellyt ultrasuodatusmembraanit UH004, UP005, UFX5 pHt ja ETNA01PP sekä näiden lisäksi Nitto Denkon valmistama NTR-7250 HG, jonka materiaali on polyvinyylialkoholi (PVA). Valmistajan mukaan tämä membraani on nanosuodatusmembraani ja sen pH-käyttöaluesuositus on 2-8, paineen kestävyys max 25 bar ja suodatuslämpötila saisi olla enimmillään 45 °C. Samoille membraaneille määritettiin varaukset ja kontaktikulmat. Suodatusliuoksina käytettiin kolmea eri lukukeskimääräisen moolimassan polyetyleeniglykoli- eli PEG-liuosta ja lisäksi ionivaihdettua vettä. Liuoksissa oli PEG:ia 200 ppm ja käytetyt moolimassat UH004-, UP005-, UFX5 pHt- ja NTR-7250 HG-suodatuksissa olivat 1 500, 4 000 ja 6 000 g/mol ja ETNA01PP-suodatuksessa 300, 1 000 ja 2 000 g/mol. PEG-liuokset valmistettiin liuottamalla PEG ionivaihdettuun veteen. [25, 26]

#### **5.2 Suodatuskokeet**

PEG-suodatukset tehtiin cross flow-tyyppisellä suodattimella, jossa membraanin suodatuspinta-ala on 0,01 m<sup>2</sup>. Laitteistoon kuuluu syöttösäiliö, jossa on lämmitys ja jäähdytys, pumppu, suodatuskenno, painemittari ja virtausmittari. Syöttösäiliön tilavuus on noin kolme litraa. Suodatuksen aluksi membraanit esikäsiteltiin

suodattamalla ionivaihdettua vettä paineessa 8 bar ja lämpötilassa 30 °C, jotta säilöntäaineet saatiin poistettua membraanien pinnalta ja vältettiin membraanin kokoonpuristuminen suodatuksen aikana (suodatuspaine max 7 bar). Kaikki suodatukset tehtiin lämpötilassa 30 °C ja virtausnopeus membraanin pinnan yli oli 80 %, jotta virtaus oli turbulenttinen.

Vesivuo mitattiin paineessa 4 bar ja mittaus kesti 30 minuuttia. Vesivuo mitattiin alussa, lopussa sekä PEG-suodatusten välissä. Vesivuon mittauksen aikana noin 15 minuutin suodatuksen jälkeen syötöstä otettiin näyte TOC-analyysiä varten, jotta saatiin selville, mikä on veden TOC-taso ennen ja jälkeen PEG-suodatuksen. PEG-suodatuksen jälkeen laitteisto huuhdeltiin kaksi kertaa kolmella litralla ionivaihdettua vettä, jotta PEG-liuos saatiin poistettua.

PEG-liuosten suodatuksessa laitteisto huuhdeltiin aluksi kaksi kertaa puolella litralla PEG-liuosta, jotta vesi saatiin pois laitteistosta. PEG-suodatukset aloitettiin pienimmän moolimassan PEG-liuoksen suodatuksella. Suodatukset tehtiin kolmessa paineessa, 3, 5 ja 7 bar. Jokaisessa paineessa suodatettiin 20 minuuttia. Suodatuksen alussa syötöstä otettiin näyte TOC-analyysiä varten ja permeaattinäyte kerättiin suodatuksen loppupuolella. Sekä veden että PEG-liuoksen suodatuksen aikana permeaattia kerättiin talteen koko ajan ja kertyneen massan arvo kirjattiin säännöllisin välein ja niiden avulla laskettiin membraanien vuot.

Kerätyistä näytteistä määritettiin kokonaishiilen (TC) pitoisuudet ja niiden avulla määritettiin membraanien retentiot. PEG-liuokset sisältävät vain orgaanista hiiltä, joten kokonaishiilen pitoisuus on myös kokonaisorgaanisen hiilen pitoisuus (TOC). Hiilipitoisuudet määritettiin Shimadzu TOC 5050A-laitteella. Retentioiden avulla määritettiin membraanien katkaisukoot, mikäli retentio oli yli 90 %.

### **5.3 Kontaktikulma- ja varausmittaukset**

Kontaktikulma- ja varausmittauksia varten membraanit esikäsiteltiin Amicon-laitteistolla, jossa membraanin tehollinen suodatuspinta-ala on 0,004 m<sup>2</sup>.

Membranien läpi suodatettiin ionivaihdettua vettä 15 minuutin ajan paineessa 3 bar ja lämpötilassa 50 °C, jotta membraaneilta saatiin poistettua säilöntäaineet. Kontaktikulmamittauksia varten membraanit kuivattiin ja varausmittauksia varten laitettiin pulloihin ionivaihdettuun veteen jääkaappiin.

Kontaktikulmien avulla pystyttiin määrittämään, ovatko membraanit hydrofiilisiä vai -fobisia. Kontaktikulmat määritettiin Millipore-vedellä. Käytetty laite oli KSV Instrumentin kontaktikulmamittari ja ohjelmana oli CAM2008. Membraanille tiputettiin vettä pisara kerrallaan ja jokaisesta pisarasta otettiin kolme kuvaa. Ohjelma laski pisaran molemmille puolille kulmat ja niiden keskiarvot ja näistä keskiarvoista laskettiin membraanin kontaktikulmat.

Membranien varauksien mittaamiseen käytetty laite oli SurPASS electrokinetic analyzer ja käytetty ohjelma VisioLab for SurPASS. Malliaineena varausmittauksissa oli 1 mM KCl ja pH:n säätöön käytettiin 0,05 M KOH- ja HCl-liuoksia. Laite määritti membraaneille zeta-potentiaalit pH:ssa 3-8 ja niiden avulla määritettiin membraanien isoelektrinen piste (IEP), mikäli mahdollista. IEP tarkoittaa pH-arvoa, jossa zeta-potentiaali on nolla eli membraanin nettovaraus on nolla. Zeta-potentiaalilla ollessa negatiivinen myös membraanin varaus on negatiivinen ja toisin päin.

#### 5.4 Käytetyt yhtälöt

PEG-liuosten retentiot määritettiin yhtälön (1) avulla näytteiden orgaanisen hiilen pitoisuuksista.

Membranien permeaattivuot laskettiin yhtälöllä (2)

$$J = \frac{m}{A \cdot t}, \quad (2)$$

jossa	$J$	membraanin permeaattivuo, kg/(m <sup>2</sup> h)
	$m$	kertyneen permeaatin massa, kg
	$A$	membraanin suodatuspinta-ala, m <sup>2</sup>
	$t$	aika, h.

Membraanien likaantuminen laskettiin yhtälöllä (3)

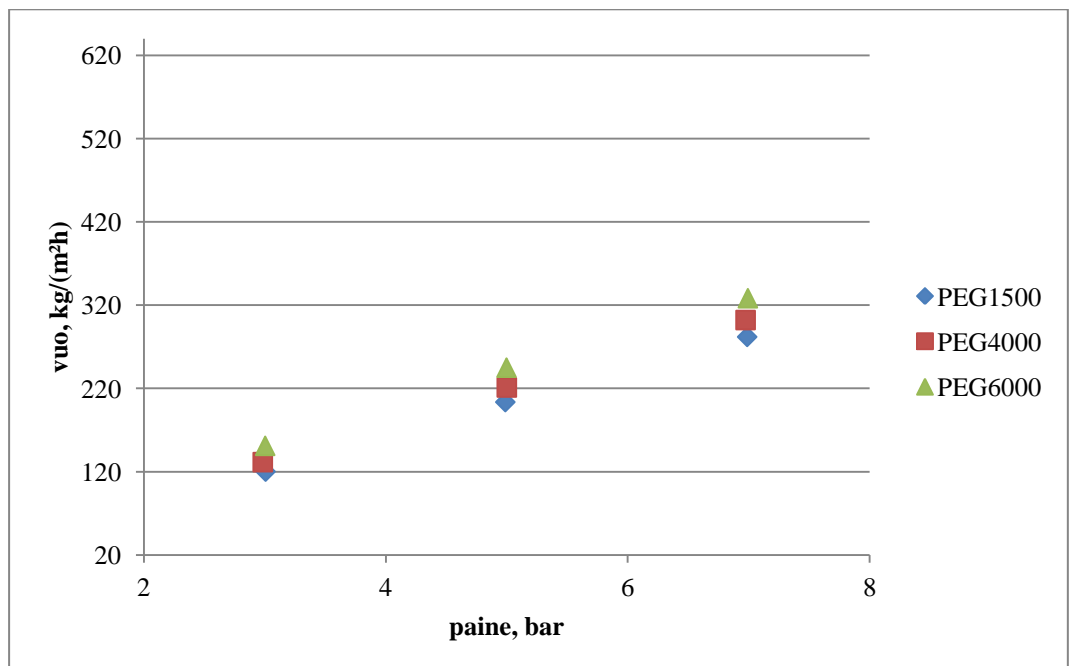
$$F = \left(1 - \frac{J_a}{J_b}\right) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

jossa  $F$  membraanin likaantuminen, %  
 $J_a$  membraanin vesivuo PEG-suodatusten jälkeen, kg/(m<sup>2</sup> h)  
 $J_b$  membraanin vesivuo ennen PEG-suodatuksia, kg/(m<sup>2</sup> h).

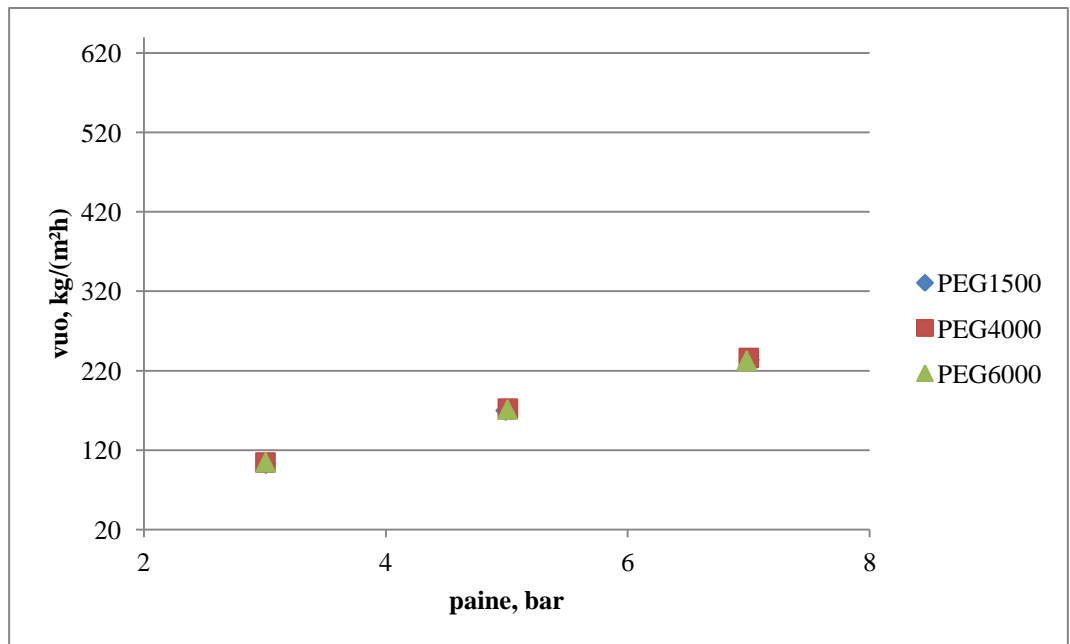
## 6 Tulokset ja tulosten tarkastelu

### 6.1 Membraanien vuot ja likaantuminen

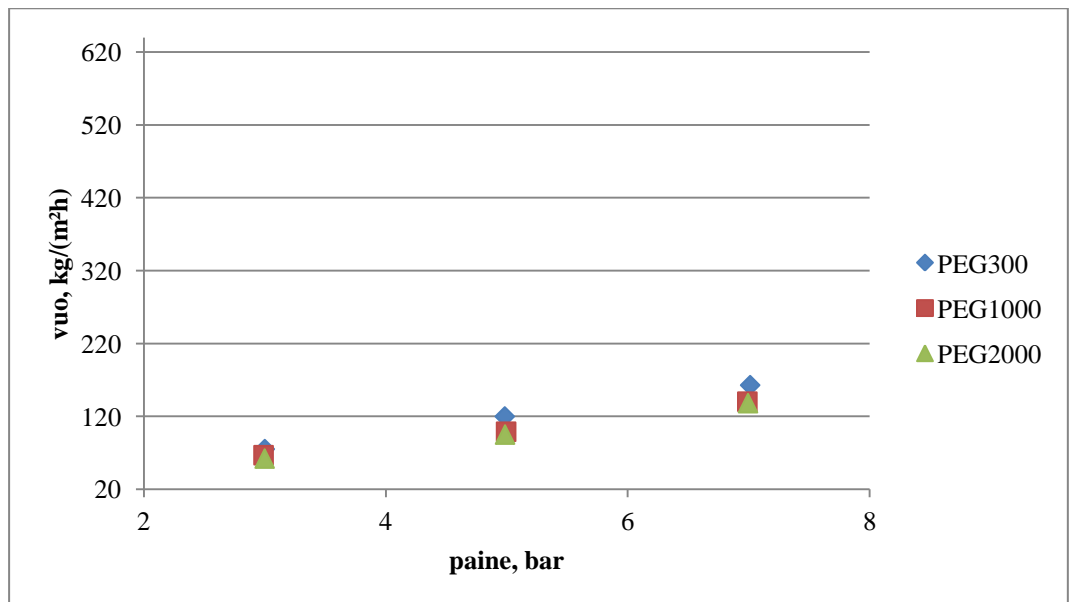
Jokaiselle membraanille määritettiin suodatusten aikana vesivuot sekä PEG-liuosten vuot eri paineissa. Kuvissa 1-5 on esitetty eri membraaneilla mitatut PEG-liuosten permeaattivuot eri paineissa ja virtausnopeudella 80 %.



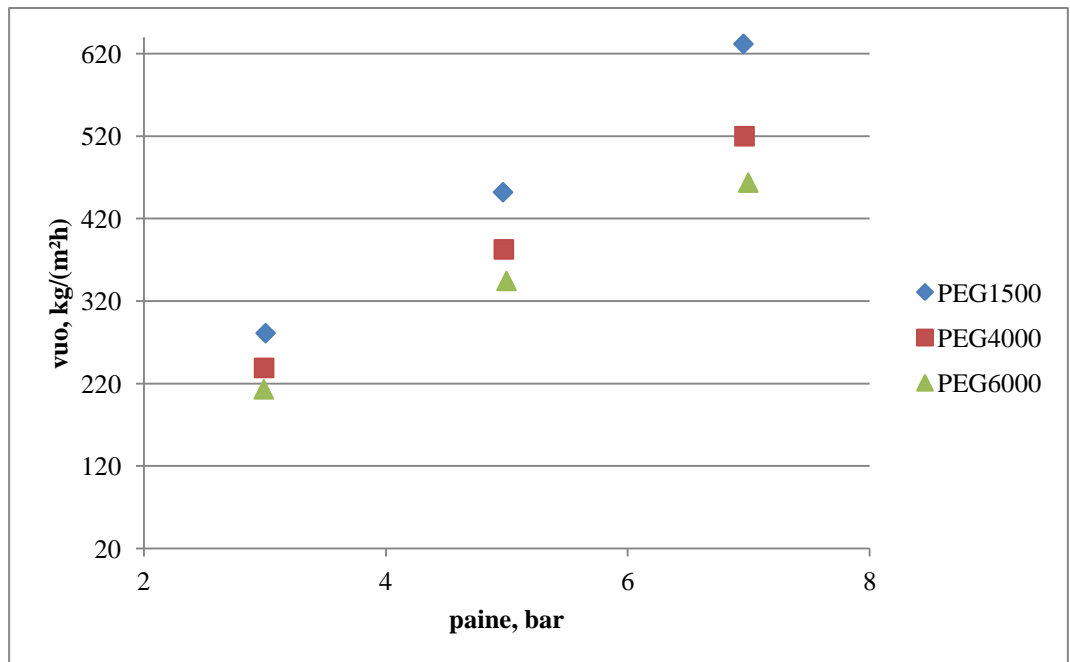
Kuva 1. UH004-membraanilla mitatut PEG-liuosten permeaattivuot eri paineissa, lämpötilassa 30 °C ja virtausnopeudella 80 %.



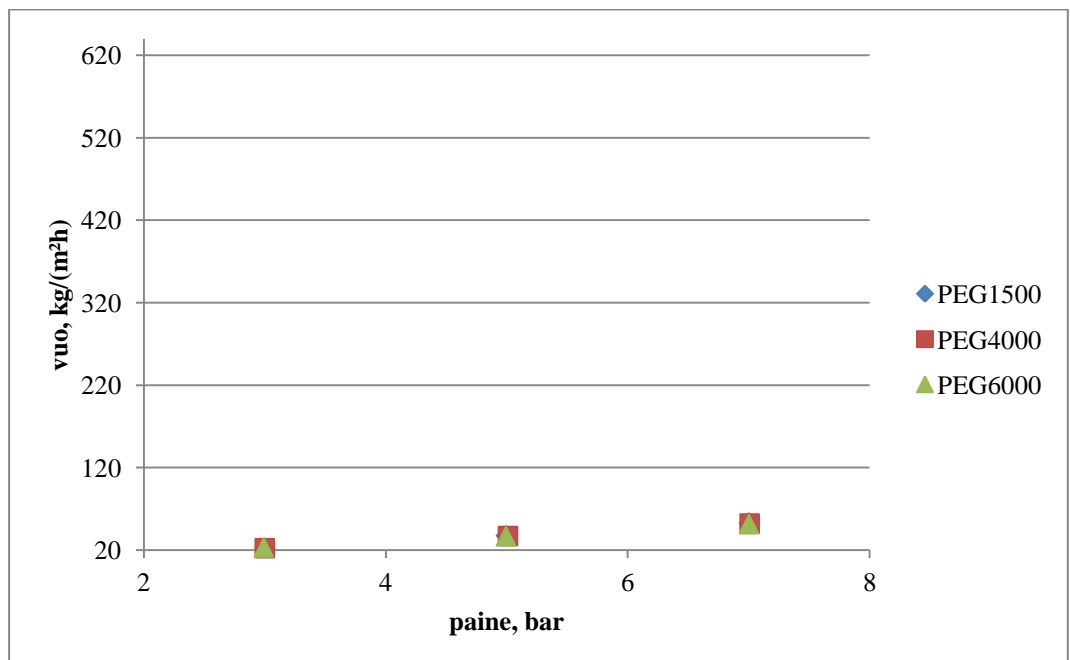
Kuva 2. UP005-membraanilla mitatut PEG-liuosten permeaattivuot eri paineissa, lämpötilassa 30 °C ja virtausnopeudella 80 %.



Kuva 3. ETNA01PP-membraanilla mitatut PEG-liuosten permeaattivuot eri paineissa, lämpötilassa 30 °C ja virtausnopeudella 80 %.



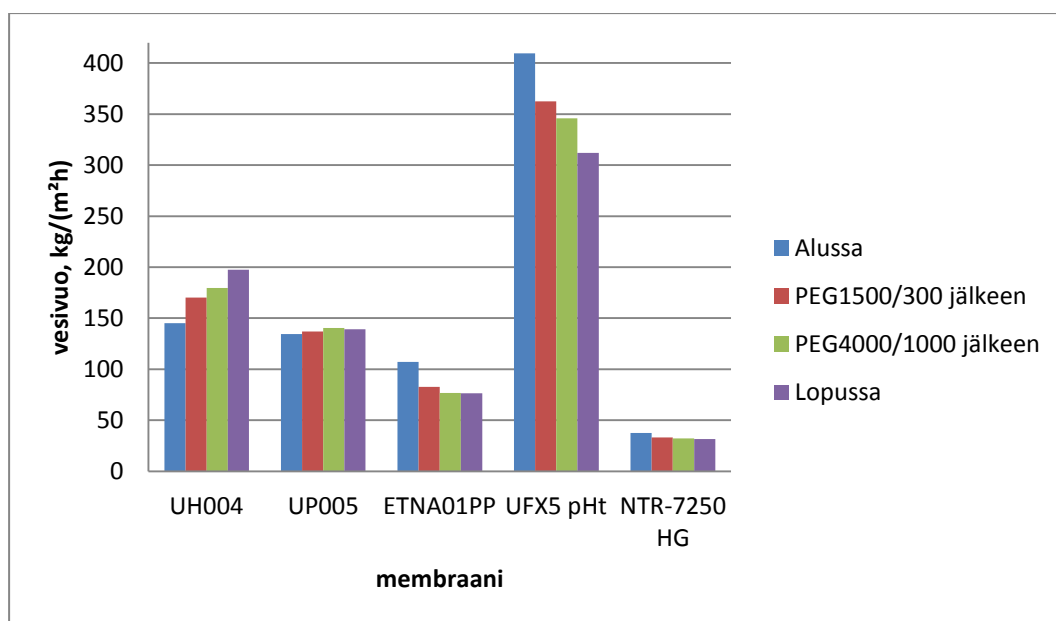
Kuva 4. UFX5 pHt-membraanilla mitatut PEG-liuosten permeaattivuot eri paineissa, lämpötilassa 30 °C ja virtausnopeudella 80 %.



Kuva 5. NTR-7250 HG-membraanilla mitatut PEG-liuosten permeaattivuot eri paineissa, lämpötilassa 30 °C ja virtausnopeudella 80 %.

Kuvista näkee, että vuon arvot vaihtelevat hyvin paljon eri membraanien kesken. UP005- ja NTR-7250 HG-membraaneilla vuon arvot olivat melko samat eri moolimassaisten PEG-liuosten suodatuksessa ja vuon arvot kasvoivat lineaarisesti paineen kasvaessa. UH004-membraanilla vuon arvot kasvoivat, kun PEG:n moolimassa kasvoi. Vuon arvot kasvoivat lineaarisesti jokaisella PEG-liuoksella. ETNA01PP- ja UFX5 pHt-membraaneilla vuon arvot pienenevät, kun PEG:n moolimassa kasvoi. Tämä saattaa johtua membraanien likaantumisen tai siitä ettei liuos pääse niin hyvin membraanin läpi esimerkiksi konsentraatiopolarisaation takia.

Membraanien vesivuot on esitetty kuvassa 6.



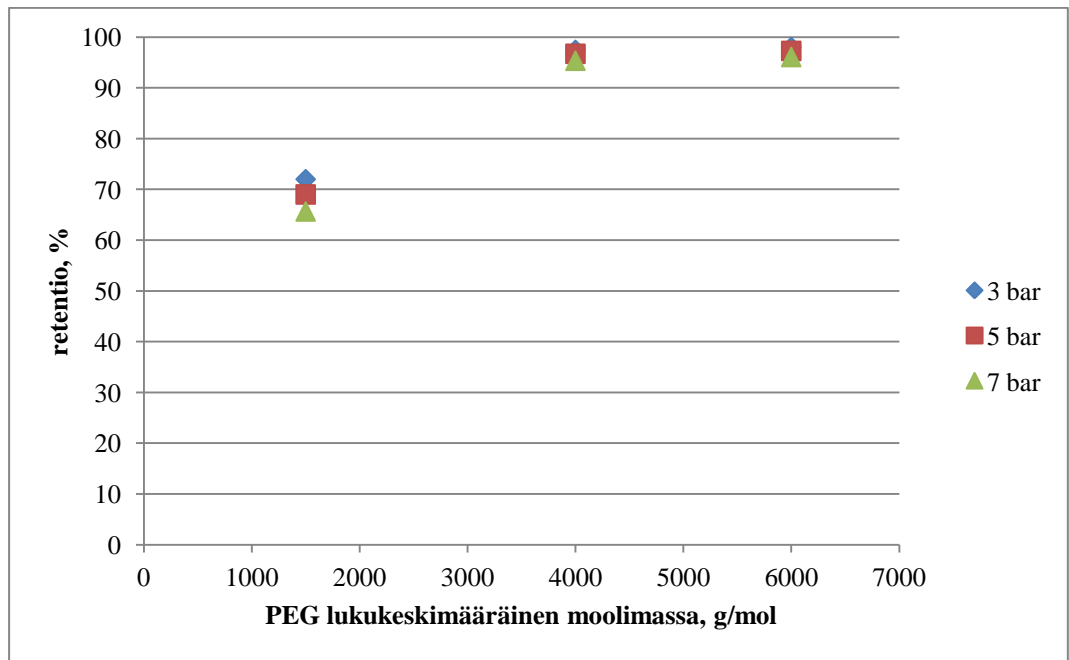
Kuva 6. Membraanien vesivuot mitattuna paineessa 4 bar, lämpötilassa 30 °C ja virtausnopeudella 80 %.

Kuvasta 6 nähdään, että UH004- ja UP005-membraaneilla vesivuon arvo on lopussa suurempi kuin alussa eli membraanit eivät likaannu PEG-suodatusten aikana ollenkaan. Kaikilla muilla membraaneilla vesivuon arvot laskivat eli ne likaantuivat. ETNA01PP likaantui eniten eli noin 29 %. Myös UFX5 pHt likaantui yli 20 %.

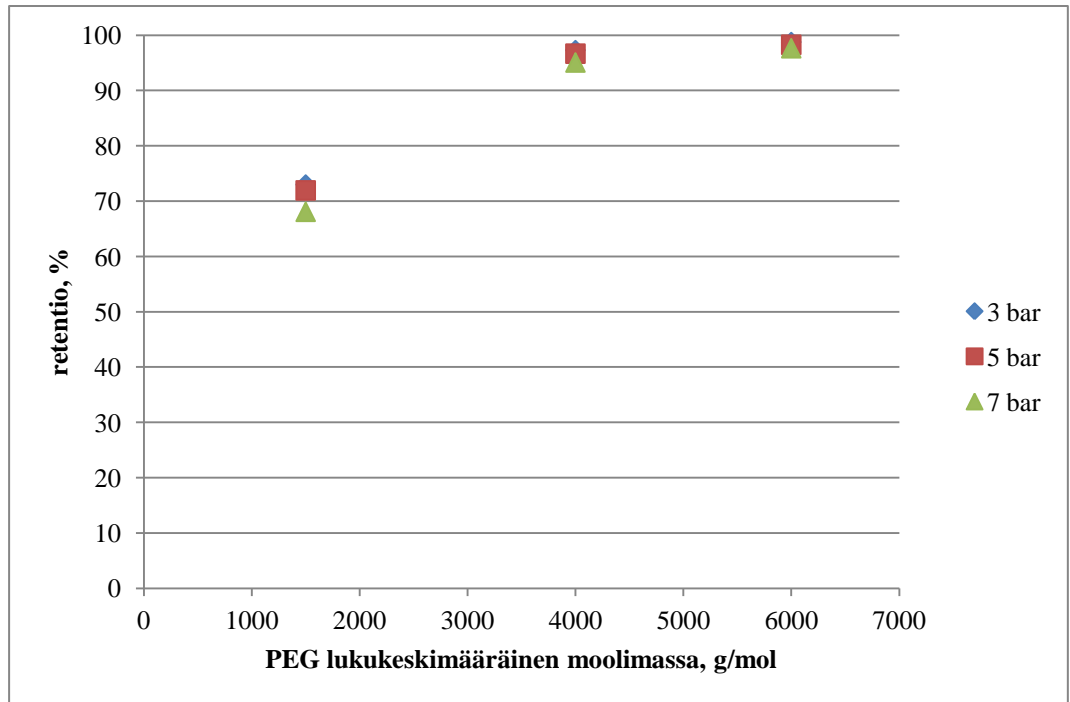


## 6.2 Membraanien retentiot ja katkaisukoot

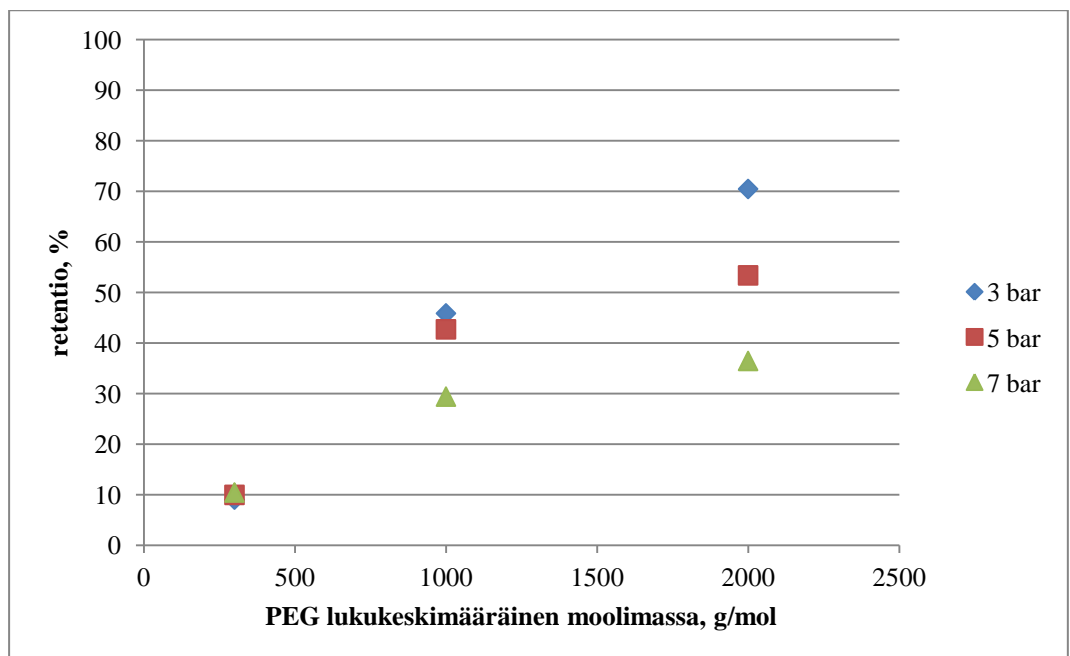
Membraaneille määritettiin retentiot hiilipitoisuuksista yhtälön (1) avulla. Retentioiden avulla määritettiin membraanien katkaisukoot, mikäli saatiin 90 %:n retentio. Membraanien retentiot on esitetty kuvissa 7-11.



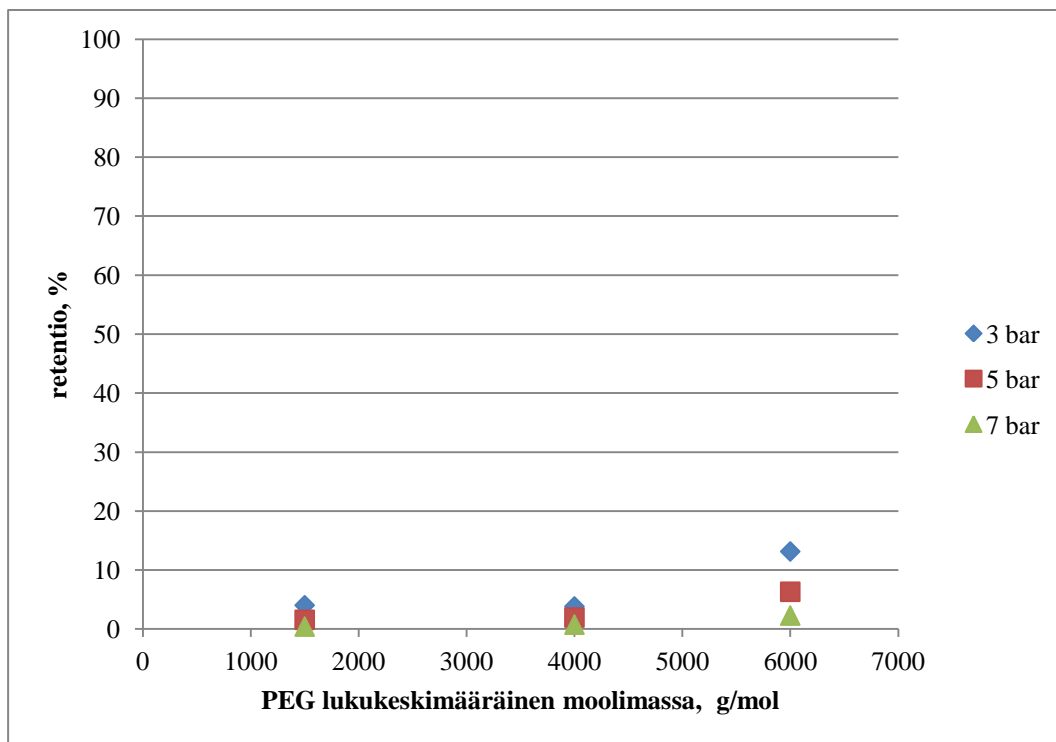
Kuva 7. UH004-membraanin retentiot eri moolimassan PEG-liuksille eri paineissa, lämpötilassa 30 °C ja virtausnopeudella 80 %.



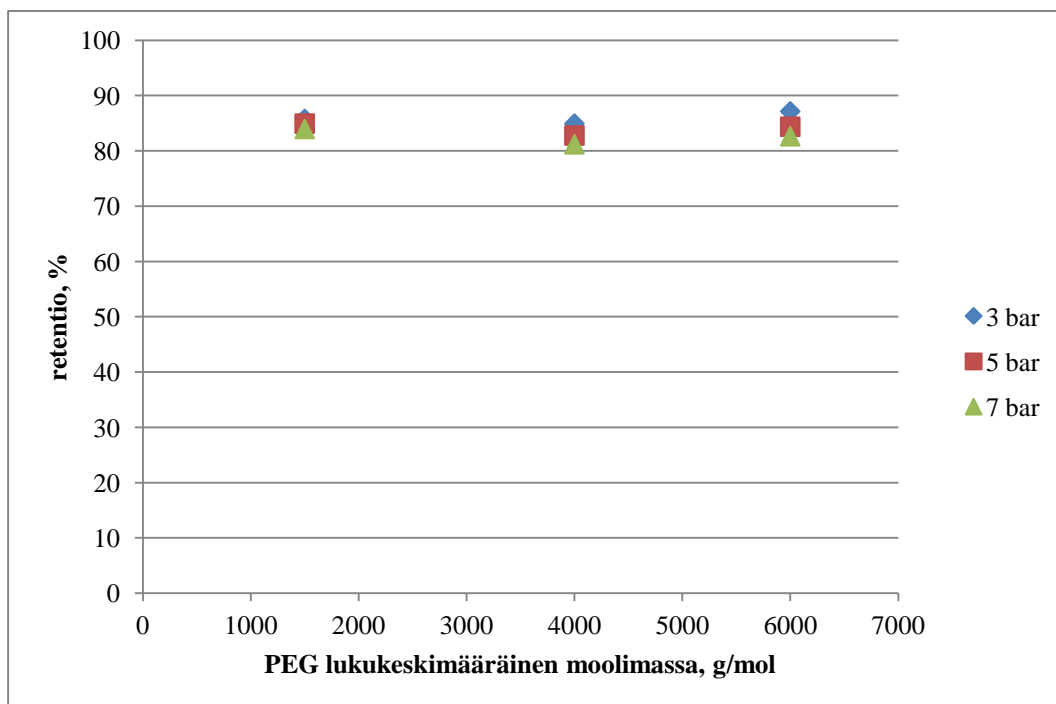
Kuva 8. UP005-membraanin retentiot eri moolimassan PEG-liuoksille eri paineissa, lämpötilassa 30 °C ja virtausnopeudella 80 %.



Kuva 9. ETNA01PP-membraanin retentiot eri moolimassan PEG-liuoksille eri paineissa, lämpötilassa 30 °C ja virtausnopeudella 80 %.



Kuva 10. UFX5 pHt-membraanin retentiot eri moolimassan PEG-liuoksille eri paineissa, lämpötilassa 30 °C ja virtausnopeudella 80 %.



Kuva 11. NTR-7250 HG-membraanin retentiot eri moolimassan PEG-liuoksille eri paineissa, lämpötilassa 30 °C ja virtausnopeudella 80 %.

Kuvista 7-11 on nähtävissä, että jokaisella membraanilla parhaat retentiot saavutetaan paineessa 3 bar. Suuremmissa paineissa membraani läpäisee enemmän yhdisteitä. Suuria eroja eri paineiden välillä ei kuitenkaan ole kuin ETNA01PP-membraanilla moolimassan kasvaessa. Tässä tutkimuksessa käytetyillä PEG-liuoksilla ainoastaan UH004- ja UP005-membraaneilla saavutetaan 90 %:n retentio. Näiden membraanien valmistajan ilmoittamat katkaisukoot ovat 4 ja 5 kDa, mutta tämän suodatuksen perusteella molempien katkaisukoko on noin 3 kDa.

ETNA01PP-membraanilla suurin retentio on 70 % mitattuna paineessa 3 bar ja 2 000 g/mol PEG-liuoksella. Valmistajan ilmoittama katkaisukoko tälle membraanille on 1 kDa, mutta tässä suodatuksessa 1 kDa:n kohdalla retentiot vaihtelevat paineesta riippuen noin 30 ja 50 %:n välillä eli ei lähelläkään valmistajan ilmoittamaa arvoa.

UFX5 pHt-membraanilla oli selkeästi suurimmat PEG- ja vesivuot eikä sillä saavutettu kovin suuria retentioita. Jo suodatuksen aikana oli havaittavissa, että PEG-liuos läpäisee membraanin melko hyvin. Tämän membraanin katkaisukoko pitäisi valmistajan mukaan olla 5 kDa, mikä ei ainakaan tässä suodatuksessa pitänyt paikkansa, koska retentio 5 kDa:n kohdalla oli alle 10 %.

NTR-7250 HG-membraani on valmistajan mukaan nanosuodatusmembraani, joten olisi voinut odottaa, että tässä tutkimuksessa käytetyillä PEG-liuoksilla saavutettaisiin 90 %:n retentio. Suurta vaihtelua retentioissa eri paineissa mitattuna ei ollut, mutta aivan 90 %:n retentiota ei saavutettu eikä siten myöskään varsinaista katkaisukokoa pystytty määrittämään. Verrattuna ETNA01PP- ja UFX5 pHt-membraaneihin NTR-7250 HG-membraanilla saatiin selkeästi paremmat retentiot ja se myös likaantui jonkin verran vähemmän.

### **6.3 Kontaktikulmat**

Amiconilla esikäsitellyille membraaneille määritettiin kontaktikulmat. ETNA01PP-membraanille tehtiin kaksi rinnakkaista mittausta ja muille kolme. Mitatut kontaktikulmat on esitetty taulukossa VII.

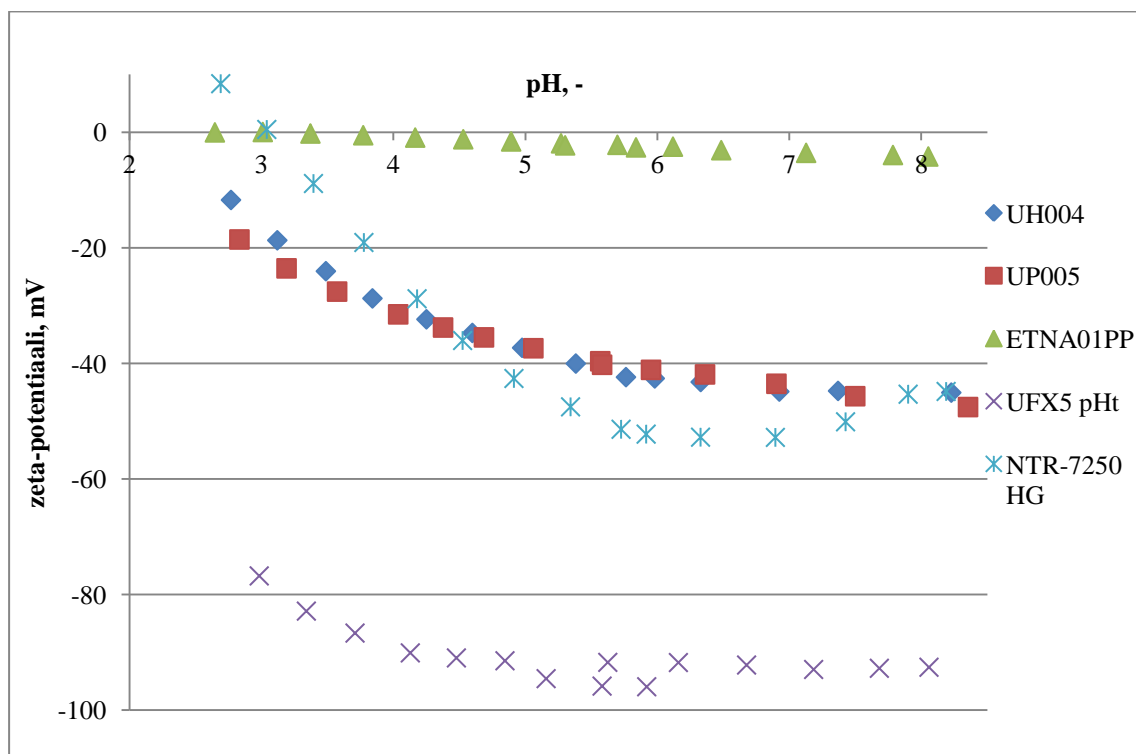
Taulukko VII. Viidelle eri membraanille mitatut kontaktikulmat sekä rinnakkaisten mittausten keskiarvot.

Membraani	Kontaktikulmat, °	Rinnakkaisten mittausten keskiarvot, °
UH004	72	68
	63	
	70	
UP005	62	62
	63	
	63	
ETNA01PP	73	71
	69	
	79	
UFX5 pHt	79	77
	79	
	73	
NTR-7250 HG	25	26
	28	
	26	

Tuloksista selviää, että kaikki membraanit ovat hydrofiilisiä, koska kaikkien kontaktikulmat ovat alle 90°. NTR-7250 HG on kuitenkin selkeästi hydrofiilisin, koska sen kontaktikulma on paljon pienempi kuin muilla. Valmistaja ilmoittaa sekä UH004- että UFX5 pHt-membraanien olevan hydrofilisoitu, mutta tutkituista membraaneista UFX5 pHt- eli PSU-membraani on kuitenkin vähiten hydrofiilinen. Koivulan *et al.* [21] tutkimuksessa UFX5 pHt-membraanin kontaktikulma oli 74° ja tässä työssä 77°, joten ne ovat hyvin lähellä toisiaan. UH004- ja UP005-membraaneilla materiaalina on polyeetterisulfoni ja UH004 on valmistajan mukaan hydrofilisoitu, mutta UP005 on kuitenkin sitä hydrofiilisempi. Milliporeen PBCC-membraani on myös PES-membraani ja sille Kwon *et al.* [20] ovat saaneet ionivaihdetulla vedellä kontaktikulman arvoksi 69,9 ± 0,4° eli se on samaa luokkaa UH004- ja UP005-membraanien kontaktikulmien kanssa.

## 6.4 Varaukset

Membraaneille määritetyt zeta-potentiaalit on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Membraanien zeta-potentiaalit pH-välillä 3-8.

Kuvasta 12 nähdään, että selkeä isoelektrinen piste pystytään määrittämään ainoastaan NTR-7250 HG-membraanille. Membraanin IEP on pH:ssa 3. Kun pH on alle 3, membraanilla on positiivinen varaus ja yli 3, membraanilla on negatiivinen varaus. ETNA01PP on membraaneista selkeästi neutraalein mitatulla pH-välillä ja sen IEP näyttäisi olevan noin pH:ssa 3, mutta zeta-potentiaali ei kuitenkaan ole juurikaan positiivisen puolella. UH004 ja UP005 ovat varaukseltaan hyvin samankaltaiset. Niillä on negatiivinen varaus pH-välillä 3-8 ja kuvaajasta voi päätellä, että niiden IEP voisi olla noin pH:ssa 2 tai vähän yli. UFX5 pHt on kaikkein negatiivisimmin varautunut eli PSU-membraanin varaus on paljon negatiivisempi kuin PES-, fluoripolymeeri- tai PVA-membraaneilla. Kwon *et al.* [20] määrittivät zeta-potentiaalin Milliporeen PBCC-membraanille, joka on UH004- ja UP005-membraanien tapaan valmistettu polyeetterisulfonista.

Sen zeta-potentiaali pH:ssa 5 on noin -5 mV ja pH:ssa 8 noin -25 mV, joten sen varaus ei ole aivan niin negatiivinen kuin tässä työssä käytetyillä PES-membraaneilla. [20] Membraanin materiaalista ei siis voi suoraan päätellä membraanin varausta vaan se vaihtelee eri valmistajien membraanien välillä. Valmistajat käyttävät membraanien valmistuksessa varsinaisen päämateriaalin lisäksi lisäaineita, jotka vaikuttavat pinnan ominaisuuksiin. Näistä lisäaineista ja niiden vaikutuksesta membraanin ominaisuuksiin on erittäin vaikea saada tietoa valmistajilta, koska membraanien valmistusreseptit ovat liikesalaisuuksia. Membraanin varauksesta voi olla apua, kun valitaan membraania varauksellisten liuosten suodatuksen sekä myös eri pH:n liuosten suodatuksen. Erimerkkinen varaus vetää partikkeleita puoleensa.

## **7 Johtopäätökset**

Tämä tutkimus osoittaa, että valmistajan antamat membraanien tiedot eivät aina pidä paikkansa. Microdyn-Nadirin UH004- ja UP005-membraanilla katkaisukoko on tämän tutkimuksen perusteella noin 3 kDa eli pienempi kuin mitä valmistaja ilmoittaa. Valmistajan ja tässä tutkimuksessa mitatun katkaisukoon vertailussa on kuitenkin muistettava, että mittaolosuhteet vaikuttavat huomattavasti katkaisukokomittaukseen. Valmistajan käyttämät olosuhteet ovat erilaiset kuin tässä tutkimuksessa käytetyt, joten tulokset eivät ole täysin verrattavissa keskenään. Muutenkin nämä membraanit ovat ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaiset. Ne ovat samaa materiaalia, mutta valmistaja ilmoittaa hydrofilisoineensa UH004-membraanin. Kontaktikulmamittauksissa UP005 on kuitenkin hydrofiilisempi. Näillä membraaneilla on myös hyvin samankaltaiset varaukset ja retentiot.

ETNA01PP-, UFX5- pHt ja NTR-7250 HG-membraaneilla katkaisukoot olivat tämän tutkimuksen mukaan erilaiset kuin valmistaja ilmoittaa. Tutkimuksessa käytetyillä PEG-liuoksilla olisi valmistajan ilmoittamien tietojen perusteella pitänyt pystyä määrittämään katkaisukoot, mutta se ei kuitenkaan onnistunut. Tuloksiin vaikuttavat kuitenkin monet asiat, kuten käytetty paine, lämpötila ja suodatuslaitteisto ja siksi tuloksia ei voi suoraan verrata valmistajan ilmoittamiin tietoihin.

Tämä tutkimus osoitti, että eri membraanien toiminnassa ja ominaisuuksissa voi olla suuriakin eroja, vaikka materiaalin ja valmistajan ilmoittaman katkaisukoon perusteella membraanien voitaisiin olettaa olevan hyvin samanlaisia. Tämän vuoksi valmistajien antamia tietoja voidaan käyttää karkeaan membraanien esivalintaan, mutta tiettyyn sovellukseen paras membraani löytyy kuitenkin useimmiten kokeilun perusteella. Tässä tutkimuksessa mukana olleista membraaneista UH004 membraanilla oli korkea vuo ja hyvä orgaanisen hiilen erotuskyky. Jos halutaan minimoida membraanin varauksen aiheuttama likaantuminen, kannattaa valita ETNA01PP, koska sen varaus on hyvin neutraali.



## Lähteet

1. Mulder, M., *Basic Principles of Membrane Technology*, 2<sup>nd</sup> ed., Kluwer Academic Publisher, 1996, s. 8-9, 293-296
2. Microdyn-Nadir UH004 ja UP005, [http://www.microdyn-nadir.de/cms/pdf/produkte/en/1\\_katalog\\_engl\\_rz\\_screen.pdf](http://www.microdyn-nadir.de/cms/pdf/produkte/en/1_katalog_engl_rz_screen.pdf), viitattu 13.2.2013
3. Microdyn-Nadir UC005, <http://www.cee-environmental.com/public/data/companyCatalogue1232308481.pdf>, viitattu 13.2.2013
4. Millipore, [http://www.millipore.com/publications.nsf/a73664f9f981af8c852569b9005b4eee/ce8d86a76a8048f08525738e005ac086/\\$FILE/pf1172en00.pdf](http://www.millipore.com/publications.nsf/a73664f9f981af8c852569b9005b4eee/ce8d86a76a8048f08525738e005ac086/$FILE/pf1172en00.pdf), viitattu 13.2.2013
5. Alfa Laval GR95PP ja ETNA01PP, <http://www.alfalaval.com/solution-finder/products/flat-sheet-membranes/Documents/PD%20Sheet%20-%20Flat%20sheet%20Ultrafiltration%20membranes%20-%20EN.pdf>, viitattu 13.2.2013
6. Alfa Laval UFX5 pHt, [http://www.alfalaval.com/solution-finder/products/flat-sheet-membranes/Documents/PCM00018EN\\_0612.pdf](http://www.alfalaval.com/solution-finder/products/flat-sheet-membranes/Documents/PCM00018EN_0612.pdf), viitattu 13.2.2013
7. TAMI Industries, <http://www.tami-industries.com/>, viitattu 13.2.2013
8. CeraMem, <http://www.veoliawaterst.com/ceramem/en/fullsizemodulesceramem.htm>, viitattu 13.2.2013
9. Atech innovations, [http://www.atech-innovations.com/fileadmin/download/atech\\_product\\_data\\_en\\_080206\\_01.pdf](http://www.atech-innovations.com/fileadmin/download/atech_product_data_en_080206_01.pdf), viitattu 13.2.2013
10. Restolho, J.A., Prates, A., de Pinho, M.N., Afonso, M.D., *Sugars and lignosulphonates recovery from eucalyptus spent sulphite liquor by membrane processes*, *Biomass and Bioenergy*, **33** (2009), s. 1558-1566

11. Žabková, M., Borges da Silva, E.A., Rodrigues, A.E., *Recovery of vanillin from lignin/vanillin mixture by using tubular ceramic ultrafiltration membranes*, Journal of Membrane Science, **301** (2007), s. 221-237
12. Persson, T., Jönsson, A.-S., *Isolation of hemicelluloses by ultrafiltration of thermomechanical pulp mill processwater-Influence of operating conditions*, Chemical Engineering Research and Design, **88** (2010), s. 1548-1554
13. Sainio, T., Kallioinen, M., Nakari, O., Mänttari, M., *Production and recovery of monosaccharides from lignocelluloses hot water extracts in a pulp mill biorefinery*, Bioresource Technology, **135** (2013), s. 730-737
14. Vanneste, J., Sotto, A., Courtin, C.M., Van Craeyveld, V., Bernaerts, K., Van Impe, J., Vandeur, J., Taes, S., Van der Bruggen, B., *Application of tailor-made membranes in a multi-stage process for the purification of sweeteners from Stevia rebaudiana*, Journal of Food Engineering, **103** (2011), s. 285-293
15. Koschuh, W., Hong Than, V., Krasteva, S., Novalin, S., Kulbe, K.D., *Flux and retention behaviour of nanofiltration and fine ultrafiltration membranes in filtrating juice from a green biorefinery: A membrane screening*, Journal of Membrane Science, **261** (2005), s. 121-128
16. Schäfer, A.I., Fane, A.G., Waite, T.D., *Fouling effects on rejection in the membrane filtration of natural waters*, Desalination, **131** (2000), s. 215-224
17. Neale, P.A., Schäfer, A.I., *Quantification of solute-solute interactions in steroidal hormone removal by ultrafiltration membranes*, Separation and Purification Technology, **90** (2012), s. 31-38
18. Simonič, M., Lobnik, A., *The efficiency of a hybrid flocculation/UF process for a real dye-house effluent using hydrophilic and hydrophobic membranes*, Desalination, **271** (2011), s. 219-224
19. Majewska-Novak, K.M., *Application of ceramic membranes for the separation of dye particles*, Desalination, **245** (2010), s. 185-191
20. Kwon, B., Cho, J., Park, N., Pellegrino, J., *Organic nanocolloid fouling in UF membranes*, Journal of Membrane Science, **279** (2006), s. 209-219

21. Koivula, E., Kallioinen, M., Preis, S., Testova, L., Sixta, H., Mänttari, M., *Evaluation of various pretreatment methods to manage fouling in ultrafiltration of wood hydrolysates*, Separation and Purification Technology, **83** (2011), s. 50-56
22. Dafinov, A., Font, J., Garcia-Valls, R., *Processing of black liquors by UF/NF ceramic membranes*, Desalination, **173** (2005), s. 83-90
23. Luo, J., Ding, L., Qi, B., Jaffrin, M.Y., Wan, Y., *A two-stage ultrafiltration and nanofiltration process for recycling dairy wastewater*, Bioresource Technology, **102** (2011), s. 7437-7442
24. Wandera, D., Himstedt, H.H., Marroquin, M., Wickramasinghe, S.R., Husson, S.M., *Modification of ultrafiltration membranes with block copolymer nanolayers for produced water treatment: The roles of polymer chain density and polymerization time on performance*, Journal of Membrane Science, **403-404** (2012), s. 250-260
25. Somicon AG, <http://www.somicon.com/download/Nitto.pdf>, viitattu 16.4.2013
26. Choi, S., Yun, Z., Hong, S., Ahn, K., *The effect of co-existing ions and surface characteristics of nanomembranes on the removal of nitrate and fluoride*, Desalination, **133** (2001), s. 53-64

Vesivuon mittaukset

UH004

Vesivuo alussa

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	56,0			4,00	29,0
1	79,2	23,2	139	4,00	29,1
2	103,0	23,8	143	4,00	29,2
3	126,7	23,7	142	4,00	29,2
4	150,2	23,5	141	3,99	29,3
5	174,2	24,0	144	3,99	29,4
10	295,3	24,2	145	3,98	29,6
15	417,3	24,4	146	3,98	29,6
20	541,3	24,8	149	3,98	29,8
25	666,4	25,0	150	3,98	29,8
30	793,2	25,4	152	3,98	29,9

Vesivuo PEG1500 jälkeen

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	14,1			4,00	27,6
2	68,6	27,3	164	4,00	28,1
3	96,2	27,6	166	4,00	28,3
4	124,5	28,3	170	4,00	28,5
5	152,2	27,7	166	4,00	28,6
10	293,4	28,2	169	3,99	29,2
15	436,7	28,7	172	3,97	29,5
20	581,4	28,9	174	3,97	29,7
25	727,0	29,1	175	3,98	29,8
30	873,4	29,3	176	3,97	29,8

## Vesivuo PEG4000 jälkeen

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	20,9			4,01	27,9
1	49,7	28,8	173	4,00	28,1
2	79,0	29,3	176	4,00	28,3
3	108,1	29,1	175	4,02	28,5
5	167,6	29,8	179	4,00	28,8
10	317,8	30,0	180	4,01	29,3
15	476,8	31,8	191	4,00	29,6
20	622,9	29,2	175	3,99	29,7
25	776,7	30,8	185	4,00	29,8
30	930,7	30,8	185	3,99	29,9

## Vesivuo lopussa

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	58,8			4,00	28,3
1	90,7	31,9	191	4,00	28,5
2	123,2	32,5	195	4,00	28,6
3	155,6	32,4	194	4,00	28,8
4	188,4	32,8	197	4,00	28,9
5	221,2	32,8	197	4,00	29,0
10	386,2	33,0	198	3,98	29,4
15	552,5	33,3	200	3,98	29,6
20	719,1	33,3	200	3,97	29,7
25	886,5	33,5	201	3,97	29,8
30	1054,0	33,5	201	3,97	29,9

## UP005

## Vesivuo alussa

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuoksi, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	39,3			3,99	28,3
1	60,9	21,6	130	4,00	28,5
2	83,0	22,1	133	4,00	28,7
3	105,0	22,0	132	4,00	28,8
4	127,0	22,0	132	4,00	29,0
5	149,2	22,2	133	4,00	29,1
10	261,3	22,4	135	3,98	29,4
15	374,8	22,7	136	3,98	29,7
20	489,1	22,9	137	3,97	29,8
25	604,4	23,1	138	3,97	29,8
30	720,0	23,1	139	3,97	29,9

## Vesivuo PEG1500 jälkeen

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuoksi, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	58,8			3,99	28,3
1	80,7	21,9	131	4,00	28,5
2	103,1	22,4	134	4,00	28,7
3	125,4	22,3	134	4,00	28,8
4	148,2	22,8	137	4,00	29,0
5	170,9	22,7	136	4,00	29,1
10	285,3	22,9	137	3,98	29,4
15	400,9	23,1	139	3,98	29,7
20	517,2	23,3	140	3,97	29,8
25	633,2	23,2	139	3,97	29,8
30	750,6	23,5	141	3,97	29,9

## Vesivuo PEG4000 jälkeen

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	23,1			4,01	27,3
2	68,3	22,6	136	4,01	27,9
3	91,2	22,9	137	4,01	28,1
4	114,2	23,0	138	4,01	28,3
5	137,3	23,1	139	4,01	28,5
10	254,0	23,3	140	4,01	29,1
15	372,9	23,8	143	4,00	29,5
20	492,1	23,8	143	3,99	29,7
25	612,2	24,0	144	4,00	29,8
30	732,4	24,0	144	3,99	29,9

## Vesivuo lopussa

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	23,2			4,00	27,6
1	45,3	22,1	133	4,02	27,8
2	67,8	22,5	135	4,02	28,1
3	90,8	23,0	138	4,01	28,3
4	113,8	23,0	138	4,01	28,4
5	136,8	23,0	138	4,00	28,6
10	253,2	23,3	140	4,00	29,2
15	371,3	23,6	142	4,00	29,5
20	490,3	23,8	143	3,99	29,7
25	609,7	23,9	143	3,98	29,8
30	729,5	24,0	144	3,98	29,9

## ETNA01PP

## Vesivuo alussa

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	26,1			4,02	27,7
1	45,1	19,0	114	4,02	28,0
2	63,9	18,8	113	4,03	28,3
3	82,7	18,8	113	4,02	28,5
4	101,0	18,3	110	4,01	28,6
5	119,3	18,3	110	4,02	28,8
10	208,3	17,8	107	4,02	29,3
15	295,3	17,4	104	4,01	29,6
20	380,7	17,1	102	4,01	29,7
25	464,3	16,7	100	4,01	29,8
30	547,3	16,6	100	4,01	29,9

## Vesivuo PEG300 jälkeen

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	18,9			4,00	27,3
1	32,6	13,7	82	4,01	27,5
2	46,3	13,7	82	4,01	27,8
3	60,2	13,9	83	4,01	28,0
4	74,0	13,8	83	4,01	28,2
5	87,9	13,9	83	4,01	28,4
10	156,8	13,8	83	4,01	29,0
15	225,8	13,8	83	4,00	29,4
20	294,6	13,8	83	3,99	29,6
25	363,3	13,7	82	3,99	29,8
30	431,7	13,7	82	3,98	29,9



## Vesivuo PEG1000 jälkeen

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	11,9			4,00	27,1
1	24,4	12,5	75	3,99	27,5
2	37,2	12,8	77	4,00	27,7
3	50,3	13,1	79	4,01	28,0
4	63,1	12,8	77	4,00	28,1
5	75,8	12,7	76	3,98	28,3
10	140,0	12,8	77	3,98	29,0
15	204,1	12,8	77	3,98	29,4
20	268,3	12,8	77	3,98	29,6
25	332,7	12,9	77	3,97	29,8
30	396,5	12,8	77	4,00	29,9

## Vesivuo lopussa

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	19,8			4,00	27,0
1	32,6	12,8	77	4,00	27,3
2	44,9	12,3	74	4,00	27,7
3	57,5	12,6	76	4,00	27,9
4	70,3	12,8	77	4,00	28,1
5	83,1	12,8	77	4,00	28,3
10	147,4	12,9	77	4,00	29,0
15	211,3	12,8	77	4,00	29,4
20	275,7	12,9	77	4,00	29,6
25	339,5	12,8	77	4,00	29,7
30	403,7	12,8	77	3,98	29,8

## UFX5 pHt

## Vesivuo alussa

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	89,5			4,00	28,5
1	157,8	68,3	410	4,00	28,6
2	225,8	68,0	408	3,99	28,8
3	294,2	68,4	410	3,97	28,9
4	362,1	67,9	407	3,98	29,0
5	430,5	68,4	410	3,98	29,1
10	773,7	68,6	412	3,96	29,5
15	1111,7	67,6	406	4,00	28,1
20	1451,7	68,0	408	3,99	29,0
25	1795,2	68,7	412	3,97	29,5
30	2137,8	68,5	411	3,98	29,2

## Vesivuo PEG1500 jälkeen

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	63,9			4,00	27,1
1	122,3	58,4	350	4,00	27,3
2	181,5	59,2	355	3,99	27,7
3	241,4	59,9	359	3,98	28,0
4	301,5	60,1	361	3,99	28,2
5	361,3	59,8	359	3,98	28,4
10	665,5	60,8	365	3,98	29,1
15	974,1	61,7	370	3,97	29,3
20	1283,3	61,8	371	3,96	29,6
25	1588,9	61,1	367	4,01	27,4
30	1893,8	61,0	366	3,98	28,8

## Vesivuo PEG4000 jälkeen

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	53,8			4,00	28,4
1	109,2	55,4	332	4,01	28,6
2	166,4	57,2	343	4,01	28,7
3	223,6	57,2	343	4,01	28,9
4	281,3	57,7	346	4,01	29,0
5	339,1	57,8	347	4,00	29,1
10	627,8	57,7	346	4,00	29,4
15	919,2	58,3	350	4,00	29,7
20	1210,8	58,3	350	3,99	29,8
25	1504,3	58,7	352	3,99	29,9
30	1795,5	58,2	349	3,99	29,6

## Vesivuo lopussa

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	36,4			4,02	27,1
1	86,2	49,8	299	4,02	27,4
2	137,2	51,0	306	4,01	27,7
3	188,3	51,1	307	4,02	27,9
4	239,7	51,4	308	4,01	28,2
5	291,7	52,0	312	4,01	28,4
10	552,8	52,2	313	4,00	29,0
15	817,2	52,9	317	4,00	29,4
20	1082,3	53,0	318	3,98	29,7
25	1349,2	53,4	320	3,98	29,8
30	1615,7	53,3	320	3,97	29,9

## NTR-7250 HG

## Vesivuo alussa

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	5,6			4,02	29,3
1	11,9	6,3	38	4,01	29,4
2	18,2	6,3	38	4,01	29,4
3	24,5	6,3	38	4,01	29,5
4	30,8	6,3	38	4,01	29,5
5	37,0	6,2	37	4,02	29,5
10	68,5	6,3	38	4,01	29,7
15	100,0	6,3	38	4,00	29,8
20	131,4	6,3	38	4,01	29,9
25	162,3	6,2	37	4,01	29,9
30	193,4	6,2	37	4,00	30,0

## Vesivuo PEG1500 jälkeen

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	5,4			4,00	27,8
1	10,6	5,2	31	4,00	28,0
2	15,9	5,3	32	4,01	28,2
3	21,4	5,5	33	4,00	28,4
4	26,7	5,3	32	4,00	28,5
5	32,3	5,6	34	4,00	28,7
10	60,0	5,5	33	3,99	29,2
15	88,2	5,6	34	3,98	29,5
20	116,7	5,7	34	3,98	29,7
25	145,6	5,8	35	3,98	29,8
30	174,3	5,7	34	3,98	29,9

## Vesivuo PEG4000 jälkeen

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	8,6			4,01	27,7
1	13,7	5,1	31	4,00	27,9
2	19,0	5,3	32	4,00	28,1
3	24,2	5,2	31	4,00	28,3
4	29,5	5,3	32	3,98	28,5
5	34,8	5,3	32	4,00	28,6
10	61,5	5,3	32	3,99	29,2
15	88,6	5,4	33	4,00	29,5
20	115,9	5,5	33	4,00	29,7
25	143,5	5,5	33	3,98	29,8
30	171,3	5,6	33	3,98	29,9

## Vesivuo lopussa

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	8,7			4,00	27,6
1	13,9	5,2	31	4,00	27,9
2	19,0	5,1	31	4,00	28,1
3	24,2	5,2	31	4,00	28,3
4	29,4	5,2	31	4,00	28,5
5	34,6	5,2	31	3,99	28,6
10	61,0	5,3	32	4,00	29,2
15	87,5	5,3	32	3,98	29,5
20	114,0	5,3	32	3,99	29,7
25	141,0	5,4	32	3,96	29,8
30	168,0	5,4	32	3,98	29,9

PEG-vuon mittaukset

UH004

PEG1500 3 bar vesi 4000 g, PEG 803,8 mg					
aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	19,8			3,01	28,6
1	38,3	18,5	111	3,01	28,7
2	58,4	20,1	121	3,01	28,8
3	78,3	19,9	119	3,01	28,9
4	98,5	20,2	121	3,00	29,0
5	118,6	20,1	121	3,00	29,1
10	220,5	20,4	122	3,00	29,4
15	323,3	20,6	123	3,01	29,5
20	425,3	20,4	122	3,01	29,7

PEG1500 5 bar					
aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	94,6			5,02	29,5
1	128,5	33,9	203	5,00	29,6
2	162,0	33,5	201	4,98	29,7
3	195,8	33,8	203	4,99	29,7
4	229,9	34,1	205	4,99	29,8
5	263,5	33,6	202	4,96	29,8
10	433,8	34,1	204	4,98	30,0
15	604,9	34,2	205	5,00	30,1
20	776,1	34,2	205	4,98	30,1

PEG1500 7 bar					
aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	50,2			6,98	29,6
1	96,8	46,6	280	6,98	29,6
2	144,0	47,2	283	6,99	29,9
3	190,9	46,9	281	6,99	29,9
5	285,4	47,3	284	7,01	30,1
10	521,0	47,1	283	6,91	30,3
15	758,6	47,5	285	7,00	30,4
20	989,8	46,2	277	7,05	30,6

PEG4000 3 bar vesi 4000 g, PEG 804,4 mg

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	27,9			3,00	27,8
1	49,3	21,4	128	3,00	28,0
2	70,8	21,5	129	3,00	28,2
3	92,6	21,8	131	2,98	28,3
4	114,7	22,1	133	2,98	28,5
5	136,7	22,0	132	2,98	28,6
10	247,2	22,1	133	2,97	29,1
15	359,0	22,4	134	2,97	29,4
20	469,0	22,0	132	2,97	29,5

PEG4000 5 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	42,2			5,01	29,3
1	79,1	36,9	221	5,02	29,4
2	115,9	36,8	221	5,01	29,5
3	152,5	36,6	220	5,00	29,6
4	189,3	36,8	221	5,02	29,6
5	226,3	37,0	222	4,98	29,7
10	410,3	36,8	221	4,98	29,9
15	595,1	37,0	222	4,99	30,0
20	779,7	36,9	222	5,00	30,1

PEG4000 7 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	97,1			7	29,7
1	147,6	50,5	303	7	29,8
2	199,2	51,6	310	6,98	29,9
3	248,1	48,9	293	6,98	30,0
4	298,5	50,4	302	6,98	30,0
5	349,1	50,6	304	6,97	30,1
10	601,1	50,4	302	6,96	30,3
15	852,0	50,2	301	6,96	30,4
20	1102,8	50,2	301	6,95	30,6

PEG6000 3 bar vesi 4000 g, PEG 803,0 mg

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	39,4			3,01	27,8
1	64,3	24,9	149	3,01	28,0
2	89,4	25,1	151	3,01	28,1
3	114,3	24,9	149	3,00	28,2
4	139,7	25,4	152	3,00	28,3
5	164,8	25,1	151	3,00	28,4
10	290,6	25,2	151	3,00	28,8
15	417,3	25,3	152	3,00	29,1
20	544,5	25,4	153	3,00	29,3

PEG6000 5 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	58,1			5,00	29,0
1	98,7	40,6	244	5,00	29,1
2	139,7	41,0	246	5,00	29,2
3	180,7	41,0	246	5,00	29,3
4	221,3	40,6	244	5,00	29,4
5	262,4	41,1	247	5,00	29,4
10	466,6	40,8	245	5,00	29,7
15	670,6	40,8	245	5,00	29,8
20	873,4	40,6	243	4,99	29,9

PEG6000 7 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	105,0			7,00	29,6
1	159,4	54,4	326	7,00	29,7
2	214,7	55,3	332	7,00	29,8
3	269,9	55,2	331	7,00	29,9
4	325,3	55,4	332	7,00	29,9
5	378,9	53,6	322	6,99	30,0
10	655,4	55,3	332	6,99	30,2
15	928,2	54,6	327	6,99	30,3
20	1197,9	53,9	324	6,98	30,4



## UP005

PEG1500 3 bar      vesi 4000 g, PEG 804,1 mg

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	23,2			3,03	27,9
1	40,0	16,8	101	3,01	28,1
2	57,0	17,0	102	3,01	28,3
3	74,0	17,0	102	3,01	28,5
4	91,2	17,2	103	3,01	28,6
5	108,4	17,2	103	3,00	28,8
10	195,1	17,3	104	3,01	29,2
15	283,1	17,6	106	3,00	29,5
20	369,6	17,3	104	3,00	29,6

PEG1500 5 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	38,8			5,00	29,4
1	66,1	27,3	164	4,99	29,5
2	94,6	28,5	171	5,00	29,6
3	123,1	28,5	171	5,00	29,7
4	151,6	28,5	171	5,00	29,7
5	180,0	28,4	170	5,00	29,8
10	322,7	28,5	171	4,99	29,9
15	465,6	28,6	171	4,98	30,1
20	607,0	28,3	170	4,97	30,1

PEG1500 7 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	87,8			7,02	29,8
1	126,4	38,6	232	7,01	29,9
2	165,7	39,3	236	7,01	30,0
3	204,5	38,8	233	7,00	30,1
4	243,8	39,3	236	7,02	30,1
5	282,7	38,9	233	7,01	30,2
10	477,9	39,0	234	7,00	30,3
15	673,0	39,0	234	7,00	30,5
20	866,1	38,6	232	6,99	30,6

PEG4000 3 bar vesi 4000 g, PEG 802,7 mg

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	16,7			3,02	27,5
1	33,9	17,2	103	3,01	27,7
2	51,3	17,4	104	3,01	27,9
3	68,4	17,1	103	3,01	28,0
4	85,8	17,4	104	3,01	28,2
5	103,3	17,5	105	3,00	28,3
10	190,9	17,5	105	3,00	28,8
15	279,1	17,6	106	2,99	29,1
20	367,3	17,6	106	3,00	29,2

PEG4000 5 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	37,5			5,03	29,1
1	66,2	28,7	172	5,02	29,2
2	95,0	28,8	173	5,02	29,3
3	123,8	28,8	173	5,00	29,4
4	152,3	28,5	171	5,02	29,5
5	181,2	28,9	173	5,01	29,5
10	324,8	28,7	172	5,00	29,7
16	497,7	28,8	173	5,00	29,9
20	612,1	28,6	172	4,99	30,0

PEG4000 7 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	65,3			6,99	29,7
1	104,6	39,3	236	6,97	29,8
2	143,9	39,3	236	7,02	29,9
3	183,4	39,5	237	7,02	29,9
4	222,6	39,2	235	7,01	30,0
5	262,1	39,5	237	7,01	30,0
10	459,5	39,5	237	7,00	30,2
15	656,7	39,4	237	7,00	30,4
20	852,5	39,2	235	7,00	30,5

PEG6000 3 bar vesi 4000 g, PEG 800,5 mg

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	16,3			3,01	27,9
1	33,5	17,2	103	3,02	28,1
2	50,9	17,4	104	3,01	28,3
3	68,2	17,3	104	3,01	28,5
4	85,7	17,5	105	3,01	28,6
5	103,2	17,5	105	3,00	28,7
10	190,9	17,5	105	3,00	29,2
15	279,0	17,6	106	3,00	29,4
20	367,4	17,7	106	3,00	29,6

PEG6000 5 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	33,6			5,01	29,3
1	62,1	28,5	171	5,07	29,4
2	90,4	28,3	170	5,01	29,5
3	119,0	28,6	172	5,00	29,6
4	147,6	28,6	172	5,00	29,7
5	176,0	28,4	170	5,00	29,7
10	318,2	28,4	171	4,98	29,9
15	462,1	28,8	173	5,00	30,0
20	604,9	28,6	171	4,99	30,1

PEG6000 7 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	62,4			7,00	29,7
1	100,9	38,5	231	6,99	29,8
2	139,8	38,9	233	6,98	29,9
3	178,4	38,6	232	6,98	30,0
4	217,2	38,8	233	6,98	30,1
5	256,2	39,0	234	6,98	30,1
10	450,7	38,9	233	6,99	30,3
15	645,5	39,0	234	6,98	30,4
20	839,2	38,7	232	6,98	30,5

## ETNA01PP

PEG300 3 bar vesi 4000 g, PEG 817 mg					
aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuo, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	15,6			3,02	27,7
1	28,1	12,5	75	3,00	27,9
2	40,8	12,7	76	3,00	28,1
3	53,3	12,5	75	3,00	28,3
4	65,9	12,6	76	3,00	28,5
5	78,6	12,7	76	3,00	28,6
10	141,2	12,5	75	2,99	29,1
15	203,4	12,4	75	2,99	29,4
20	265,0	12,3	74	3,00	29,5

PEG300 5 bar					
aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuo, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	23,9			5,00	29,3
1	44,5	20,6	124	4,97	29,4
2	65,1	20,6	124	4,98	29,5
3	85,5	20,4	122	5,00	29,6
4	105,7	20,2	121	4,98	29,6
5	125,9	20,2	121	4,98	29,7
10	225,2	19,9	119	4,98	29,9
15	322,0	19,4	116	4,97	30,0
20	415,8	18,8	113	5,00	30,1

PEG300 7 bar					
aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuo, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	42,2			7,02	29,7
1	71,0	28,8	173	7,02	29,8
2	99,7	28,7	172	7,02	29,9
3	127,6	27,9	167	7,01	30,0
4	155,4	27,8	167	7,01	30,0
5	182,5	27,1	163	7,02	30,1
10	316,2	26,7	160	7,01	30,3
15	444,1	25,6	153	7,01	30,4
20	567,4	24,7	148	7,00	30,5

PEG1000 3 bar vesi 4000 g, PEG 800 mg

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	12,4			3,01	27,5
1	23,5	11,1	67	3,00	27,7
2	34,9	11,4	68	2,98	27,9
3	46,0	11,1	67	2,98	28,0
4	57,1	11,1	67	2,98	28,2
5	68,3	11,2	67	2,98	28,3
10	124,2	11,2	67	2,97	28,8
15	180,0	11,2	67	3,00	29,1
20	234,3	10,9	65	3,01	29,3

PEG1000 5 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	21,7			5,01	29,0
1	39,0	17,3	104	4,98	29,1
2	56,1	17,1	103	5,01	29,2
3	73,1	17,0	102	5,01	29,3
4	89,8	16,7	100	4,98	29,4
5	106,7	16,9	101	5,00	29,5
10	189,6	16,6	99	5,00	29,7
15	271,3	16,3	98	4,98	29,9
20	342,0	14,1	85	4,99	30,0

PEG1000 7 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	38,4			7,01	29,6
1	62,0	23,6	142	7,00	29,7
2	85,8	23,8	143	7,00	29,8
3	109,4	23,6	142	6,99	29,9
4	132,7	23,3	140	7,00	30,0
5	156,5	23,8	143	6,99	30,0
10	272,6	23,2	139	6,98	30,2
15	387,8	23,0	138	6,97	30,3
20	501,4	22,7	136	6,97	30,4

PEG2000 3 bar vesi 4000 g, PEG 802 mg

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	13,2			3,00	27,7
1	23,8	10,6	64	3,02	27,9
2	34,2	10,4	62	3,01	28,1
3	44,7	10,5	63	3,00	28,2
4	55,1	10,4	62	3,00	28,4
5	65,5	10,4	62	3,00	28,5
10	116,4	10,2	61	3,00	29,0
15	167,7	10,3	62	2,98	29,3
20	219,0	10,3	62	2,98	29,5

PEG2000 5 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	18,4			5,00	29,2
1	34,5	16,1	97	4,97	29,3
2	50,1	15,6	94	5,00	29,4
3	66,1	16,0	96	4,98	29,5
4	82,0	15,9	95	4,97	29,6
5	98,0	16,0	96	4,98	29,6
10	177,2	15,8	95	4,98	29,8
15	256,5	15,9	95	5,00	30,0
20	334,5	15,6	94	5,00	30,0

PEG2000 7 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	32,7			7,00	29,7
1	55,6	22,9	137	6,99	29,8
2	78,6	23,0	138	7,00	29,9
3	101,5	22,9	137	6,98	30,0
4	124,5	23,0	138	6,98	30,0
5	147,8	23,3	140	6,98	30,1
10	263,2	23,1	138	7,01	30,3
15	378,9	23,1	139	7,01	30,4
20	494,0	23,0	138	7,01	30,5

## UFX5 pHt

PEG1500 3 bar vesi 4000 g, PEG 803,0 mg					
aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	46,0			3,01	27,7
1	92,8	46,8	281	3,02	28,0
2	140,1	47,3	284	3,02	28,2
3	187,0	46,9	281	3,01	28,3
4	233,9	46,9	281	3,00	28,5
5	281,1	47,2	283	3,00	28,6
10	515,0	46,8	281	3,00	29,2
15	747,9	46,6	279	3,00	29,5
20	980,5	46,5	279	3,00	29,6

PEG1500 5 bar					
aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	115,1			5,01	29,3
1	190,8	75,7	454	4,98	29,4
2	265,7	74,9	449	4,98	29,5
3	341,4	75,7	454	4,98	29,6
4	416,8	75,4	452	4,98	29,7
5	492,5	75,7	454	4,97	29,7
10	869,3	75,4	452	4,96	30,0
15	1245,8	75,3	452	4,95	30,1
20	1620,0	74,8	449	4,92	30,1

PEG1500 7 bar					
aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	149,1			7,03	29,5
1	253,8	104,7	628	7,00	29,6
2	359,5	105,7	634	7,00	29,8
3	465,0	105,5	633	7,00	29,9
4	570,2	105,2	631	7,00	30,0
5	676,2	106,0	636	7,00	30,0
10	1205,1	105,8	635	6,98	30,3
15	1734,3	105,8	635	6,91	30,4
19	2150,0	103,9	624	6,70	29,8

PEG4000 3 bar vesi 4000 g, PEG 803,0 mg

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	41,1			3,00	27,0
1	80,2	39,1	235	3,00	27,2
2	119,8	39,6	238	2,98	27,4
3	159,5	39,7	238	2,98	27,6
4	199,5	40,0	240	3,00	27,8
5	239,3	39,8	239	3,00	27,9
10	440,3	40,2	241	3,00	28,5
15	641,5	40,2	241	3,00	28,9
20	842,3	40,2	241	2,99	29,2

PEG4000 5 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	61,6			5,01	28,7
1	126,7	65,1	391	4,99	28,9
2	191,7	65,0	390	4,99	29,0
3	256,7	65,0	390	5,00	29,1
4	321,2	64,5	387	4,98	29,2
5	386,5	65,3	392	4,98	29,3
10	709,7	64,6	388	4,95	29,6
15	1031,2	64,3	386	4,95	29,8
20	1314,2	56,6	340	4,94	30,0

PEG4000 7 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	95,4			7,01	29,4
1	183,7	88,3	530	7,00	29,5
2	271,6	87,9	527	7,00	29,6
3	359,8	88,2	529	7,00	29,7
4	447,0	87,2	523	6,99	29,8
5	534,9	87,9	527	6,98	29,9
10	972,8	87,6	525	6,96	30,2
15	1408,3	87,1	523	6,96	30,4
20	1804,7	79,3	476	6,80	30,2



PEG6000 3 bar vesi 4000 g, PEG 802,6 mg

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	33,0			3,00	27,9
1	68,3	35,3	212	3,00	28,1
2	103,7	35,4	212	2,98	28,3
3	139,2	35,5	213	3,00	28,5
4	174,8	35,6	214	3,00	28,6
5	210,2	35,4	212	3,00	28,7
10	388,5	35,7	214	2,99	29,2
15	567,0	35,7	214	2,98	29,5
20	745,5	35,7	214	2,98	29,7

PEG6000 5 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	82,5			5,01	29,3
1	140,1	57,6	346	5,03	29,4
2	198,0	57,9	347	5,01	29,5
3	255,8	57,8	347	5,01	29,6
5	370,8	57,5	345	5,00	29,7
10	658,2	57,5	345	5,00	29,9
15	943,7	57,1	343	4,97	30,1
20	1227,3	56,7	340	4,96	30,2

PEG6000 7 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	138,5			7,03	29,7
1	216,7	78,2	469	7,01	29,8
2	293,8	77,1	463	7,00	29,9
3	371,7	77,9	467	7,00	30,0
4	449,3	77,6	466	7,00	30,1
5	526,7	77,4	464	7,00	30,1
10	912,6	77,2	463	7,00	30,3
15	1296,8	76,8	461	6,98	30,5
20	1678,0	76,2	457	6,96	30,6

## NTR-7250 HG

PEG1500 3 bar vesi 4000 g, PEG 806,8 mg					
aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	7,6			3,00	27,4
1	11,3	3,7	22	3,00	27,6
2	15,0	3,7	22	3,00	27,7
3	19,0	4,0	24	3,00	27,9
4	22,6	3,6	22	3,00	28,0
5	26,4	3,8	23	3,00	28,2
10	45,4	3,8	23	3,00	28,7
15	64,5	3,8	23	3,00	29,0
20	82,8	3,7	22	3,00	29,2

PEG1500 5 bar					
aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	11,8			4,99	29,3
1	18,1	6,3	38	5,00	29,3
2	24,3	6,2	37	4,99	29,4
3	30,5	6,2	37	5,00	29,5
4	36,8	6,3	38	5,00	29,5
5	43,1	6,3	38	4,99	29,6
10	74,4	6,3	38	4,98	29,8
15	105,8	6,3	38	5,00	29,9
20	136,7	6,2	37	5,00	30,0

PEG1500 7 bar					
aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	17,7			7,00	29,8
1	26,3	8,6	52	7,01	29,9
2	35,1	8,8	53	7,00	29,9
3	44,0	8,9	53	7,01	30,0
4	52,8	8,8	53	7,00	30,1
5	61,7	8,9	53	7,01	30,1
10	106,0	8,9	53	7,00	30,2
15	150,3	8,9	53	7,00	30,4
20	195,9	9,1	55	7,00	30,4

PEG4000 3 bar vesi 4000 g, PEG 800,8 mg

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	4,0			3,00	28,4
1	7,6	3,6	22	3,00	28,6
2	11,2	3,6	22	3,00	28,7
3	14,8	3,6	22	3,00	28,8
4	18,6	3,8	23	3,00	28,9
5	22,3	3,7	22	3,00	29,0
10	41,0	3,7	22	3,00	29,3
15	59,8	3,8	23	3,00	29,5
20	79,3	3,9	23	3,00	29,6

PEG4000 5 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	11,0			5,00	29,6
1	17,0	6,0	36	5,03	29,6
2	23,2	6,2	37	5,00	29,7
3	29,4	6,2	37	5,00	29,7
4	35,6	6,2	37	5,01	29,8
5	41,8	6,2	37	5,02	29,8
10	73,0	6,2	37	5,01	30,0
15	104,3	6,3	38	5,02	30,0
20	134,8	6,1	37	5,01	30,1

PEG4000 7 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	16,9			7,01	29,9
1	25,5	8,6	52	7,00	29,9
2	34,1	8,6	52	7,02	30,0
3	42,9	8,8	53	7,05	30,1
4	51,6	8,7	52	6,96	30,1
5	60,2	8,6	52	7,01	30,1
10	104,1	8,8	53	7,00	30,3
15	147,8	8,7	52	7,02	30,4
20	191,1	8,7	52	7,01	30,5

PEG6000 3 bar vesi 4000 g, PEG 800,1 mg

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	7,2			3,00	27,5
1	11,0	3,8	23	3,00	27,7
2	14,9	3,9	23	3,00	27,9
3	18,7	3,8	23	3,00	28,0
4	22,5	3,8	23	3,00	28,1
5	26,3	3,8	23	2,99	28,3
10	45,3	3,8	23	2,99	28,7
15	64,3	3,8	23	2,97	29,0
20	84,8	4,1	25	2,98	29,3

PEG6000 5 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	7,5			5,00	29,2
1	13,5	6,0	36	5,00	29,3
2	19,5	6,0	36	5,00	29,4
3	25,8	6,3	38	5,00	29,5
4	31,9	6,1	37	5,00	29,5
5	37,9	6,0	36	4,98	29,6
10	68,8	6,2	37	5,00	29,8
15	99,5	6,1	37	4,99	29,9
20	130,4	6,2	37	4,98	30,0

PEG6000 7 bar

aika, min	massa, g	virtaus, g/min	vuok, kg/(m <sup>2</sup> h)	paine, bar	lämpötila, °C
0	21,2			7,00	29,8
1	29,8	8,6	52	7,02	29,9
2	38,1	8,3	50	7,02	30,0
3	46,7	8,6	52	7,04	30,0
4	55,3	8,6	52	7,00	30,1
5	63,8	8,5	51	6,98	30,1
10	106,8	8,6	52	7,00	30,3
15	149,8	8,6	52	6,99	30,4
20	193,3	8,7	52	6,98	30,4

## Näytteiden TC-pitoisuudet

UH004			
näyte	TC, ppm	näyte	TC, ppm
vesi alussa	3,652	PEG4000 5 bar syöttö	123,8
vesi PEG1500 jälkeen	1,175	PEG4000 7 bar syöttö	131,1
vesi PEG4000 jälkeen	1,181	PEG4000 3 bar permeaatti	2,912
vesi lopussa	0,890	PEG4000 5 bar permeaatti	4,053
PEG1500 3 bar syöttö	113,9	PEG4000 7 bar permeaatti	6,089
PEG1500 5 bar syöttö	115,5	PEG6000 3 bar syöttö	117,1
PEG1500 7 bar syöttö	119,4	PEG6000 5 bar syöttö	121,4
PEG1500 3 bar permeaatti	31,87	PEG6000 7 bar syöttö	127,1
PEG1500 5 bar permeaatti	35,78	PEG6000 3 bar permeaatti	2,274
PEG1500 7 bar permeaatti	40,99	PEG6000 5 bar permeaatti	3,287
PEG4000 3 bar syöttö	115,9	PEG6000 7 bar permeaatti	4,965

UP005			
näyte	TC, ppm	näyte	TC, ppm
vesi alussa	0,433	PEG4000 5 bar syöttö	121,5
vesi PEG1500 jälkeen	0,335	PEG4000 7 bar syöttö	119,5
vesi PEG4000 jälkeen	0,274	PEG4000 3 bar permeaatti	3,115
vesi lopussa	0,637	PEG4000 5 bar permeaatti	4,026
PEG1500 3 bar syöttö	114,7	PEG4000 7 bar permeaatti	5,868
PEG1500 5 bar syöttö	117,8	PEG6000 3 bar syöttö	116,5
PEG1500 7 bar syöttö	119,8	PEG6000 5 bar syöttö	122,2
PEG1500 3 bar permeaatti	30,95	PEG6000 7 bar syöttö	122,1
PEG1500 5 bar permeaatti	33,03	PEG6000 3 bar permeaatti	1,424
PEG1500 7 bar permeaatti	38,22	PEG6000 5 bar permeaatti	2,084
PEG4000 3 bar syöttö	116,2	PEG6000 7 bar permeaatti	2,851

ETNA01PP			
näyte	TC, ppm	näyte	TC, ppm
vesi alussa	0,765	PEG1000 5 bar syöttö	114,5
vesi PEG300 jälkeen	0,204	PEG1000 7 bar syöttö	114,9
vesi PEG1000 jälkeen	0,057	PEG1000 3 bar permeaatti	60,96
vesi lopussa	0,090	PEG1000 5 bar permeaatti	65,6
PEG300 3 bar syöttö	109,2	PEG1000 7 bar permeaatti	81,11
PEG300 5 bar syöttö	110	PEG2000 3 bar syöttö	114,3
PEG300 7 bar syöttö	110,2	PEG2000 5 bar syöttö	116,7
PEG300 3 bar permeaatti	99,33	PEG2000 7 bar syöttö	119,2
PEG300 5 bar permeaatti	99,03	PEG2000 3 bar permeaatti	33,76
PEG300 7 bar permeaatti	98,69	PEG2000 5 bar permeaatti	54,41
PEG1000 3 bar syöttö	112,6	PEG2000 7 bar permeaatti	75,75

UFX5 pHt			
näyte	TC, ppm	näyte	TC, ppm
vesi alussa	0,406	PEG4000 5 bar syöttö	117,3
vesi PEG1500 jälkeen	0,625	PEG4000 7 bar syöttö	117,3
vesi PEG4000 jälkeen	0,382	PEG4000 3 bar permeaatti	112,6
vesi lopussa	0,207	PEG4000 5 bar permeaatti	115,0
PEG1500 3 bar syöttö	113,7	PEG4000 7 bar permeaatti	116,4
PEG1500 5 bar syöttö	114,3	PEG6000 3 bar syöttö	116,2
PEG1500 7 bar syöttö	114,6	PEG6000 5 bar syöttö	118,4
PEG1500 3 bar permeaatti	109,1	PEG6000 7 bar syöttö	117,1
PEG1500 5 bar permeaatti	112,5	PEG6000 3 bar permeaatti	100,9
PEG1500 7 bar permeaatti	114,1	PEG6000 5 bar permeaatti	110,9
PEG4000 3 bar syöttö	117,1	PEG6000 7 bar permeaatti	114,4

NTR7250			
näyte	TC, ppm	näyte	TC, ppm
vesi alussa	0,310	PEG4000 5 bar syöttö	117,1
vesi PEG1500 jälkeen	0,998	PEG4000 7 bar syöttö	118,4
vesi PEG4000 jälkeen	0,352	PEG4000 3 bar permeaatti	17,33
vesi lopussa	0,930	PEG4000 5 bar permeaatti	20,17
PEG1500 3 bar syöttö	114,2	PEG4000 7 bar permeaatti	22,26
PEG1500 5 bar syöttö	115,6	PEG6000 3 bar syöttö	115,3
PEG1500 7 bar syöttö	115,9	PEG6000 5 bar syöttö	116,9
PEG1500 3 bar permeaatti	16,23	PEG6000 7 bar syöttö	117,6
PEG1500 5 bar permeaatti	17,42	PEG6000 3 bar permeaatti	14,81
PEG1500 7 bar permeaatti	18,59	PEG6000 5 bar permeaatti	18,27
PEG4000 3 bar syöttö	115,0	PEG6000 7 bar permeaatti	20,40