

**Tekniikan kandidaatintyö**

**Kaupallisten selluloosamembraanien muokkaaminen**

Lappeenranta 2017

Jenni Aaltonen

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Engineering Science

Kemiantekniikan koulutusohjelma

BJ01A0030 Kandidaatintyö ja seminaari

## **Kaupallisten selluloosamembraanien muokkaaminen**

Lappeenranta 16.4.2017

Jenni Aaltonen

Tarkastaja Arto Pihlajamäki

Ohjaaja Arto Pihlajamäki

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Engineering Science  
Kemiantekniikan koulutusohjelma

Jenni Aaltonen

### **Kaupallisten selluloosamembraanien muokkaaminen**

Kandidaatintyö  
Kevät 2017

22 Sivua, 16 kuvaa, 1 taulukko, 2 liitettä

Työn tarkastaja ja ohjaaja: TkT Arto Pihlajamäki

Hakusanat: Ultrasuodatus, membraanitekniikka, katkaisukoko, puhdasvesivuo

Työn tavoitteena on selvittää, saadaanko fysikaalisella käsittelyllä tai selluloosapinnoitteella vaikutettua selluloosamembraanin katkaisukokoon.

Kirjallisuusosassa on katsaus kokeellisen osion tärkeimpiin kohtiin; membraanitekniikkaan ja ultrasuodatukseen. Membraanitekniikassa käsiteltiin pääpiirteitä ja membraanin rakenteita. Ultrasuodatuksessa määritettiin tärkeimmät materiaalit sekä moduulit.

Kokeellisessa osiossa membraaneja käsiteltiin uunissa 1—5 tunnin ajan ja membraanin päälle saostettiin selluloosapinnoite. Vesivuo mittaukset suoritettiin paineen funktiona Amicon-suodatuskennolla. Membraanien retentiota tutkittiin polyetyleeniglykoliliuosten avulla, jotka analysoitiin orgaanisen hiilen (TOC) analysaattorilla.

Lämpökäsittelyllä, sekä selluloosapinnoitteella saatiin pienennettyä puhdasvesivuota. Selluloosapinnoitteella saatiin parhaimmat tulokset vesivuomittauksista. Malliaineretentioissa ei saatu merkittäviä muutoksia selluloosapinnoitteella tai lämpökäsittelyllä.

**ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Engineering Science  
Degree Programme in Chemical Engineering

Jenni Aaltonen

**Modification of commercial cellulose membranes**

Bachelor's thesis  
Spring 2017

22 pages, 12 figures, 1 table, 2 appendices

Examiner and instruction: D.Sc. Arto Pihlajamäki

Keywords: Ultrafiltration, membrane technology, cut-off, pure water flux

The aim of this thesis is to determine if physical treatment or additional cellulose coating affects the cut-off of cellulose membrane.

The literature section provides an overview for membrane technology and ultrafiltration. The membrane technology section discusses membrane technology and membranes' structures.

In the experimental section, the author explains how membranes were manipulated in the oven for one to five hours which precipitates a cellulose coating over the membrane. The pure water flux (PWF) was measured by Amicon stirred cell. The retentate of membranes was researched with polyethylene glycol solutions. The solutions were analyzed using an organic carbon (TOC) analyzer.

The heat treatment and the cellulose coating affected the pure water flux; however, the cellulose coating produced the best results. The model retention measurements did not produce significant results either way.

## Sisällysluettelo

SYMBOLILUETTELO .....	5
LYHENTEET .....	5
KIRJALLISUUSOSA.....	6
1 JOHDANTO.....	6
2 MEMBRAANITEKNIikka .....	7
3 ULTRASUODATUS .....	9
3.1 Ultrasuodatuksen yleisimmät moduulit.....	9
3.1.1 Tasomainenmoduuli .....	9
3.1.2 Spiraalimoduuli .....	10
3.1.3 Putkimainenmoduuli.....	11
3.1.4 Onttokuitumoduuli .....	12
KOKEELLINEN OSUUS .....	13
5. MATERIAALIT JA MENETELMÄT .....	13
5.2 KÄYTETYT YHTÄLÖT.....	15
6. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU .....	16
7. Johtopäätökset.....	22
8. LÄHTEET .....	23
LIITEET.....	24

## SYMBOLILUETTELO

$m$	permeaatin massa, kg
$\rho$	veden tiheys, kg/m <sup>3</sup>
$A$	membraanin pinta-ala, m <sup>2</sup>
$\Delta t$	kulunut aika, h
$C_{perm}$	permeaattiliuoksen konsentraatio, mg/L
$C_{syöttö}$	Syötön konsentraatio, mg/L

## LYHENTEET

CA	Selluloosa-asetaatti
PSU	Polysulfoni
PVDF	Polyvinyylideenifluoridi
PES	Polyeetterisulfoni
PEG	Polyetyleenikopolymeeri
PWF	Puhdasvesivuo

## **KIRJALLISUUSOSA**

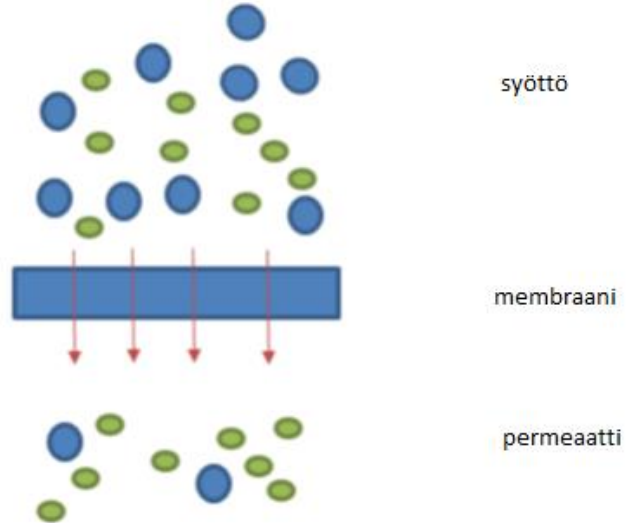
### **1 JOHDANTO**

Jäteveden puhdistus on yksi suurimmista haasteistamme tällä hetkellä, sekä tulevaisuudessa veden lisääntyneiden jätteiden takia. Jätteet lisäävät vesistöjen kuormitusta. Puhdas vesi on yhteiskunnalle perusedellytys. Jätevesien asianmukainen käsittely on oltava kunnossa, jotta voimme ylläpitää puhtaat joet, järvet ja rannikkoalueet. (ympäristö, 2017). Käytössä olevat jätevedenpuhdistamot keskittyvät kemialliseen ja biologiseen puhdistukseen. Jossa kemiallinen puhdistus poistaa fosforia. Biologisella puhdistuksella hyödynnetään jäteveden bakteereita ja poistetaan muun muassa typpeä. (HSY, 2017) Membraanitekniikan markkina-alue on kasvanut 2000-luvun alusta lähtien. Kunnallisessa vedenkäsittelylaitoksessa 20% käytetään membraanitekniikkaa osana puhdistusta. (Lesjean.B, Huisjes.E.H., 2000).

Tässä työssä tutkimme markkinoilla olevaa UC030T- selluloosamembraania. Työssä tarkoituksena on muokata kaupallista selluloosamembraania ja pienentää membraanin ominaista katkaisukykyä. Selluloosamembraanien kaupallinen myynti on vähentynyt, vaikka membraaneja tarvitaan yhä enemmän (Lesjean.B, Huisjes.E.H., 2000). Jos on mahdollista pienentää membraanin katkaisukykyä fysikaalisella käsittelyllä, saadaan näin myös tulevaisuudessa helpommin pienemmän katkaisukoon membraaneita käyttöön.

## 2 MEMBRAANITEKNIikka

Membraaniteknikalla suodatetaan kaasuseosta tai nesteliuosta ohuen membraanikalvon läpi. Ultrasuodatuksessa käytettävä membraani on puoliläpäisevä kalvo, joka estää syöttöliuoksen partikkeleiden pääsyn permeaattiliuokseen. (kuva 1).



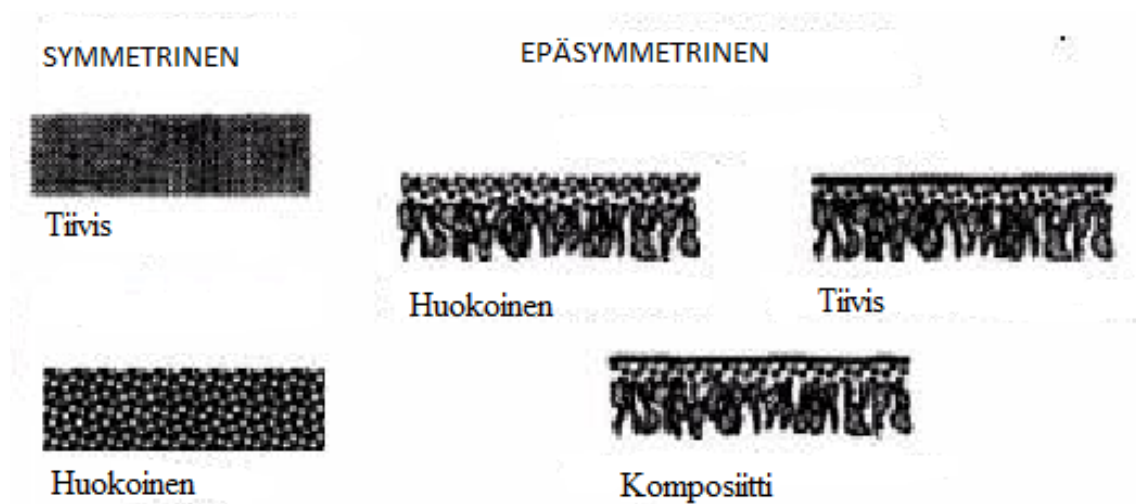
Kuva 1. Havaintokuva membraanin toiminnasta.

Membraanien läpi ajava voima voidaan luoda konsentraatio-, paine-, lämpötila- tai sähköisellä potentiaalierolla. Paine-ero toimii ajavana voimana mikro-suodatuksessa, ultrasuodatuksessa, nanosuodatuksessa ja käänteisosmoosissa. Kaasujen osapaine-erot toimivat ajavana voimana pervaporaatiossa ja kaasuerotuksessa. Konsentraatioero toimii ajavana voimana dialyysissa, ja



nestekalvoissa. Lämpötila ero toimii ajavana voimana membraanituslauksessa ja lämpöosmoosissa. Sähköinen potentiaaliero toimii ajavana voimana elektrodialyysissä ja membraanielektrolyysissä. (Mulder, 1996)

Membraanin rakenteeseen vaikuttavat sen paksuus, homo- tai heterogeenisuus, sekä symmetrisyys tai epäsymmetrisyys, jolla tarkoitetaan membraanin poikkileikkausta (kuva. 2). Käyttökohde vaikuttaa membraanin valintaan. Ultrasuodatuksessa käytetään yleensä epäsymmetrisiä membraaneita. Epäsymmetrisissä membraaneissa on aktiivinen pintakerros, jonka avulla erotus tapahtuu. Epäsymmetrisen membraanin pintaa tukee tukirakenne. Symmetrisessä membraanissa ei ole tukirakennetta, vaan koko membraani on erottavaa materiaalia. (Mulder, 1996)



Kuva 2. Havainnekuva poikkileikatusta membraanin rakenteesta. (Strathman. H., 2001)

### 3 ULTRASUODATUS

Ultrasuodatusta käytetään poistamaan syöttöliuoksesta partikkeleita, makromolekyylejä ja kolloideja. Ultrasuodatusmembraani pidättää katkaisukooltaan noin 1-1000 kDa:n partikkeleita, jotka ovat halkaisijaltaan noin 1-100 nm. (Mulder, 1996) Ultrasuodatuksessa membraanin materiaalina käytetään selluloosa-asetaattia (CA), polysulfonia (PSU), polyvinyyliideenifluoridia (PVDF) tai keraamista materiaalia, riippuen halutuista suodatuksen kemiallisista vaatimuksista. (Wagner, 2000)

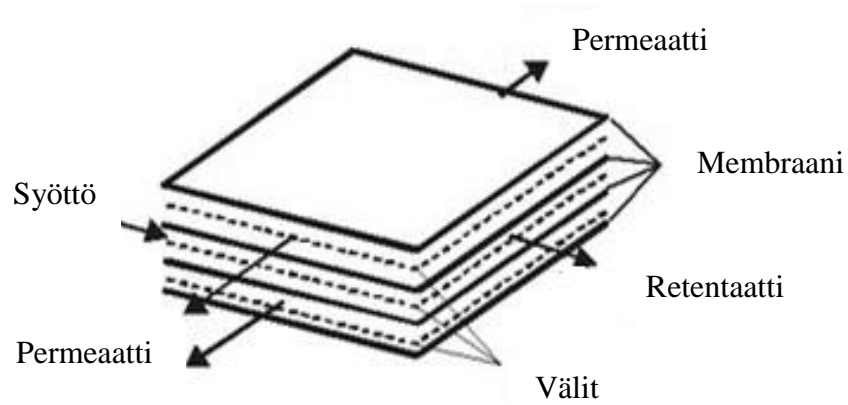
Ultrasuodatus suoritetaan 1—10 bar:n paineessa epäsymmetrisellä membraanilla. Polysulfonista ja polyvinyyliideenifluoridista valmistetut membraanit kestävät korkeita lämpötiloja ja toimivat laajalla pH alueella. Polysulfonimembraanit toimivat 1-14 pH:n alueella ja polyvinyyliideenifluoridimembraanit toimivat 0-12 pH:n alueella. Molemmilla membraaneilla päästään jopa 90 °C käyttölämpötiloihin. Selluloosamembraanien käyttölämpötila on yleensä maksimissaan 35 °C ja se toimii 4-7 pH:n alueella. (Cheryan, 1998)

#### 3.1 Ultrasuodatuksen yleisimmät moduulit

Ultrasuodatuksessa neljä yleisintä kalvomoduulia ovat tasomainen, spiraalia-, putki- ja onttokuitumoduuli.

##### 3.1.1 Tasomainen moduuli

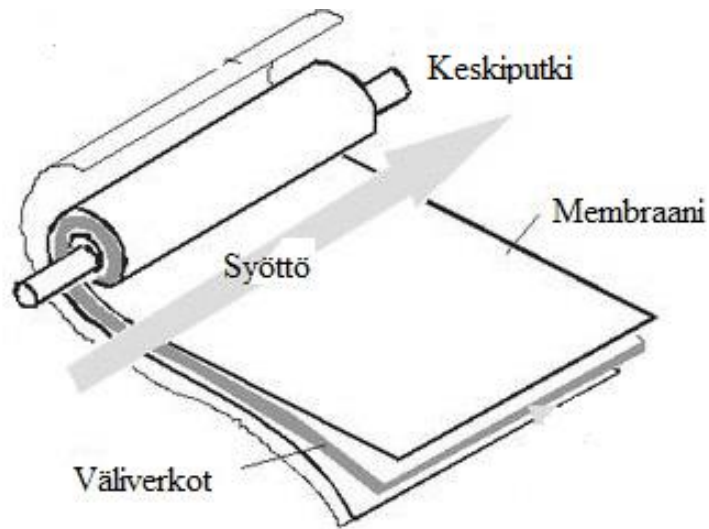
Tasomainen moduuli (kuva 3) on yksi kalleimmista moduuleista, mutta sietävät korkeita paineita, jonka ansiosta erittäin käytännöllinen vaativiin olosuhteisiin. (Wagner, 2000)



Kuva 3. Havainnekuva tasomaisesta cross-flow moduulin rakenteesta (Mecadi GmbH, 2008.).

### 3.1.2 Spiraalimoduuli

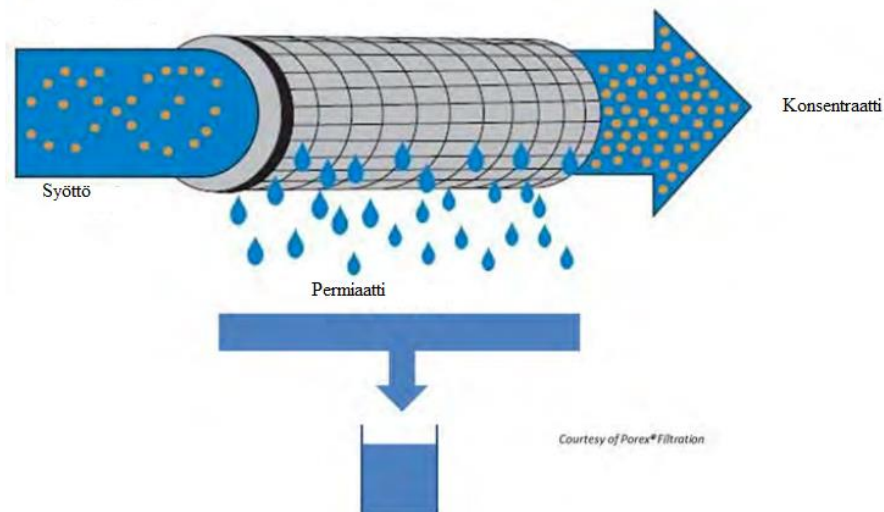
Spiraalimoduuli (kuva 4) on käytetyin moduulimuoto. Se on suunniteltu alun perin suolanpoistoon, mutta halvan hinnan ja käytännöllisyyden vuoksi sitä käytetään monissa eri teollisuuden sovelluksissa esimerkiksi meijeri-, massa- ja paperiteollisuudessa. (Wagner, 2000)



Kuva 4. Havainnekuva spiraalimoduulin rakenteesta (Mecadi GmbH. 2008.).

### 3.1.3 Putkimainen moduuli

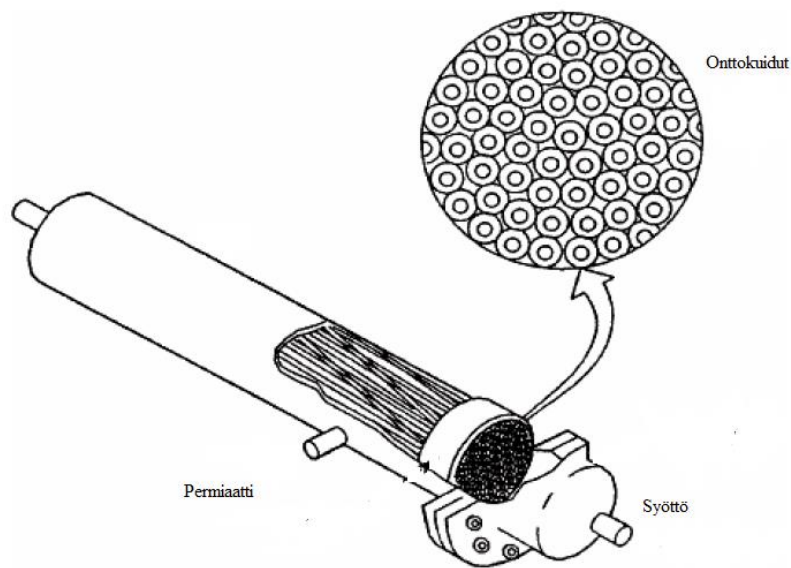
Putkimaiset moduulit (kuva 5) ovat suurikokoisia, vaikka niiden suodatuskyky ei ole yhtä tehokas kuin muilla moduuleilla. Moduulin mallin takia kalvojen vaihtaminen vie aikaa ja on hankalaa. Yksinkertaisen rakenteen (kuva 5) ansiosta teoreettiset arvot on helppo laskea, jonka takia putkimaista moduulia käytetään paljon tutkimuksissa. (Wagner, 2000)



Kuva 5. Havainnekuva putkimaisen moduulin rakenteesta (Porex, 2017).

### 3.1.4 Onttokuitumoduuli

Onttokuitumoduulit (kuva 6) ovat hyvin samankaltaisia putkimaistenmoduulien kanssa. Onttokuitumoduulien suodatuspinta-ala on huomattavasti suurempi kuin putkimaisessa moduulissa. Onttokuitumoduuleita on vähemmän käytössä, kuin putkimaisia- tai spiraalimoduuleita, koska ne likaantuvat helpommin ja puhdistaminen on hankalaa. Tällä hetkellä suurimmat käyttökohteet ovat öljy- ja maitoteollisuudessa. (Wagner, 2000)



Kuva 6. Havainnekuva onttokuitumoduulin rakenteesta (Chen.JP. 2006)

## **KOKEELLINEN OSUUS**

### **5. MATERIAALIT JA MENETELMÄT**

Kokeellisessa osuudessa tutkitaan UC030T-selluloosamembraanin muokkaamista lämpökäsittelyllä, sekä pinnoittamalla selluloosakerroksella. Membraanin valmistaja on saksalainen Microdyn Nadir GmbH yritys. Puhdasvesivuon ja retentioiden mittaukset suoritettiin Amicon-suodatuskennolla (kuva 7). Esikäsittelyssä jokainen membraani käsiteltiin puhtaassa vedessä dekantterilasissa ultraäänihauteessa puolentunnin ajan, jonka aikana dekantterilasin puhdasvesi vaihdettiin 10 minuutin välein. Esikäsittelyllä poistettiin membraanissa oleva suojaglyseroli. Membraanit paineistettiin 20 minuutin ajan 3 barin paineessa 250 rpm:n sekoitusnopeudella huoneenlämpötilassa.



Kuva 7. Amicon- suodatuskenno.

Membraanit esikäsiteltiin aina ennen lämpökäsittelyä. Unissa lämpökäsiteltiin viisi membraania, 1, 2, 3, 4 ja 5 tunnin ajan. Puhdasvesivuot laskettiin mittaamalla, kuinka paljon grammoina membraani läpäisee permeaattia tietyssä ajassa (yhtälö 1). Mittaukset suoritettiin paineilla 0,5 bar, 1,0 bar, 1,5 bar, 2,0 bar, 2,5 bar ja 3 bar.

Katkaisukoon mittauksen käytettiin polyetyleeniglykoli-liuoksia (PEG). Katkaisukoko tarkasteltiin 8, 12, 20 kDa:n PEG-liuoksilla. Liuokset valmistettiin litran mittapulloihin, joihin lisättiin polyetyleeniglykolia noin 0,2 grammaa. PEG-liuosten väkevyys oli noin 200 ppm. Katkaisukoot analysoitiin TOC-analysaattorilla. TOC-analysaattori eli Total organic carbon-analysaattorilla, joka lämmittää näytteet 680 °C:n ja mittaa hapettuvat yhdisteet (Shimadzu, 2017).

Selluloosapinnoiteliuos valmistettiin liuottamalla selluloosaa 1-etyyli-3-metyylimidatsolium asetattiin. Käytetty selluloosa oli kaupan pumpulia. Seos lämmitettiin 70 °C:n ja sitä sekoitettiin noin kuuden tunnin ajan tai kunnes kaikki selluloosa oli liuennut. Liuoksen selluloosapitoisuus oli noin 1 p-%:n. Selluloosapinnoiteliuos saostettiin vedellä selluloosamembraanin pinnalle. Ylimääräinen liuos kaavittiin päältä pois.

## 5.2 KÄYTETYT YHTÄLÖT

Membranien puhdasvesivuo (PWF) laskettiin yhtälöllä 1. Puhdasvesivuon ja paineen kuvaajan kulmakerroin on permeabiliteetti.

$$PWF = \frac{m}{\rho * A * \Delta t} \quad (1)$$

jossa  $m$  permeaatin massa

$\rho$  veden tiheys

$A$  membraanin pinta-ala

$\Delta t$  kulunut aika

Retentio määritetään permeaattiliuoksen ja syöttöliuoksen konsentraatioiden avulla. Läpi suodatettava liuos on PEG-liuos. (Yhtälö 2)

$$R = \left( 1 - \frac{C_{perm}}{C_{syöttö}} \right) * 100 \quad (2)$$

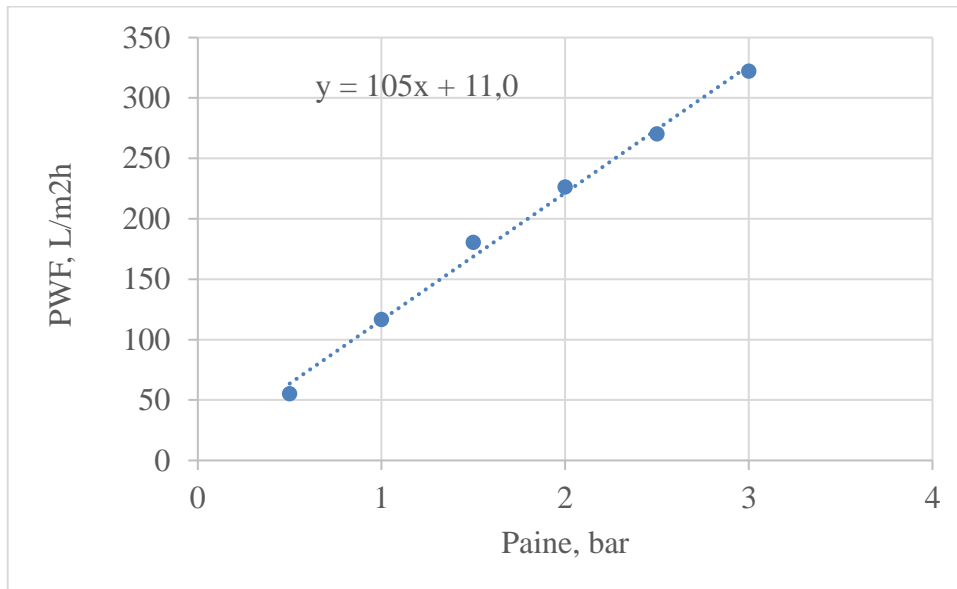
jossa  $C_{perm}$  permeaattiliuoksen konsentraatio

$C_{syöttö}$  Syötön konsentraatio

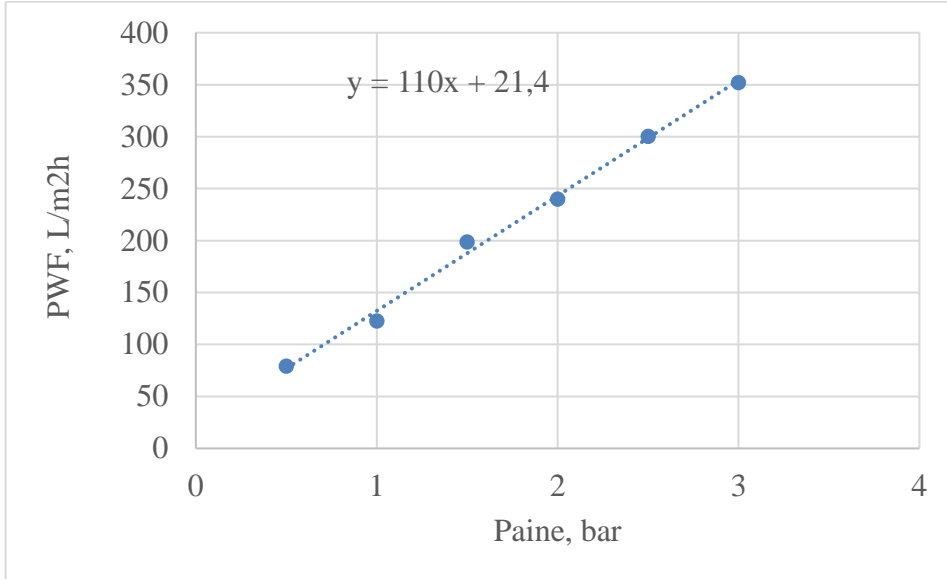


## 6. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELO

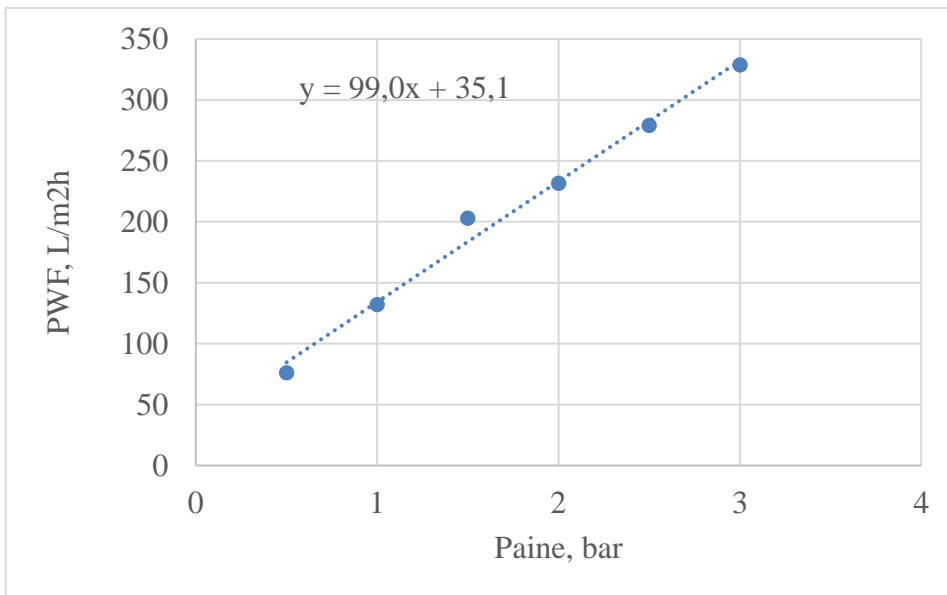
Kuvissa 9-15 on esitetty puhdasvesivuot paineen funktiona. Kuvissa on esitetty yhtälöt, joiden kulmakerroin on permeabiliteetti. Mittausten lukuarvot on esitetty Liitteessä I.



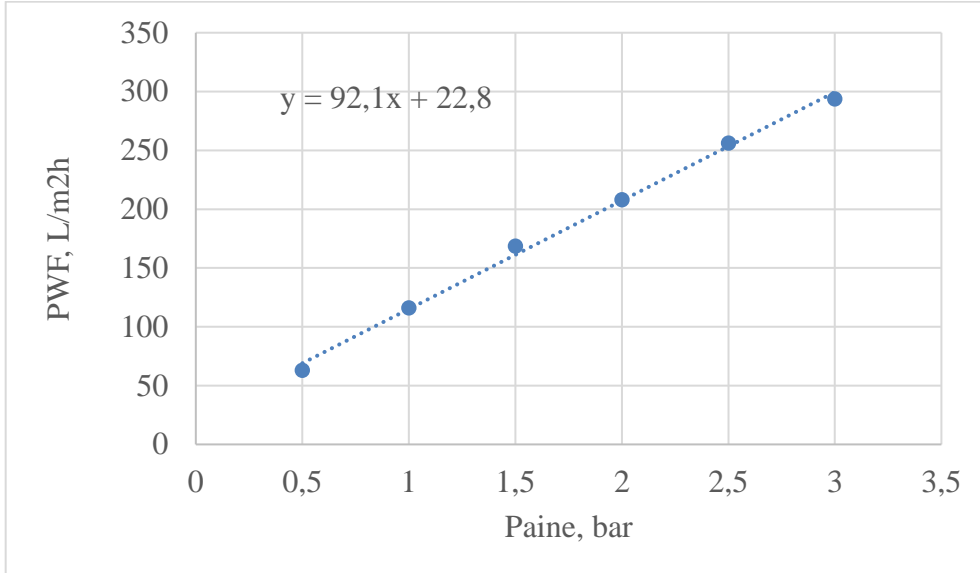
Kuva 9. 0-näyte, Puhdasvesivuo mittaukset suoritettiin Amicon-suodattimella huoneenlämpötilassa. Kuvassa on esitetty puhdasvesivuon tulokset paineenfunktiona.



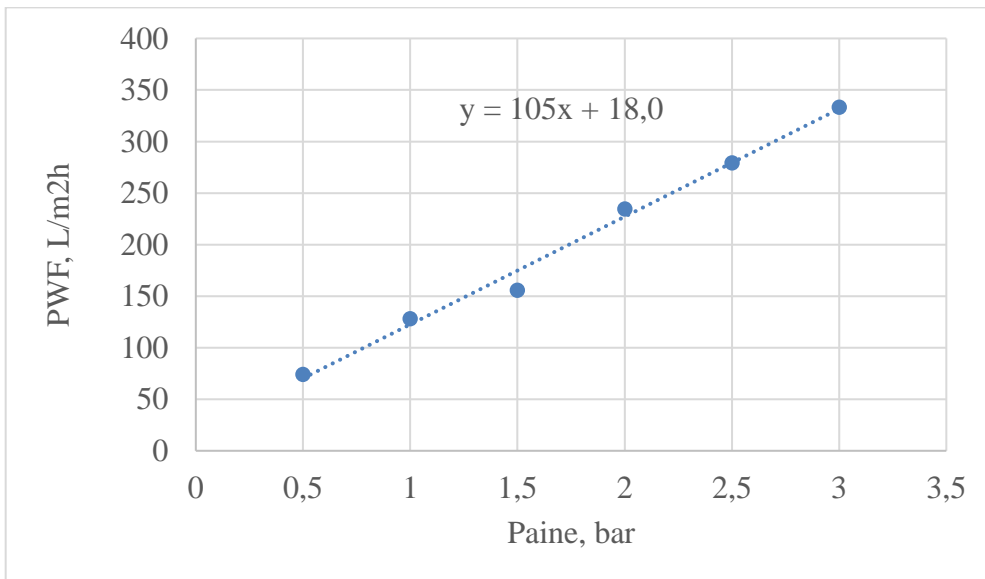
Kuva 10. Näytettä on käsitelty 50°C:ssa uunissa 1 tunnin ajan. Puhdasvesivuo mittaukset suoritettiin amicon-suodattimella huoneenlämpötilassa. Kuvassa on esitetty tulokset puhdasvesivuon tulokset paineenfunktiona.



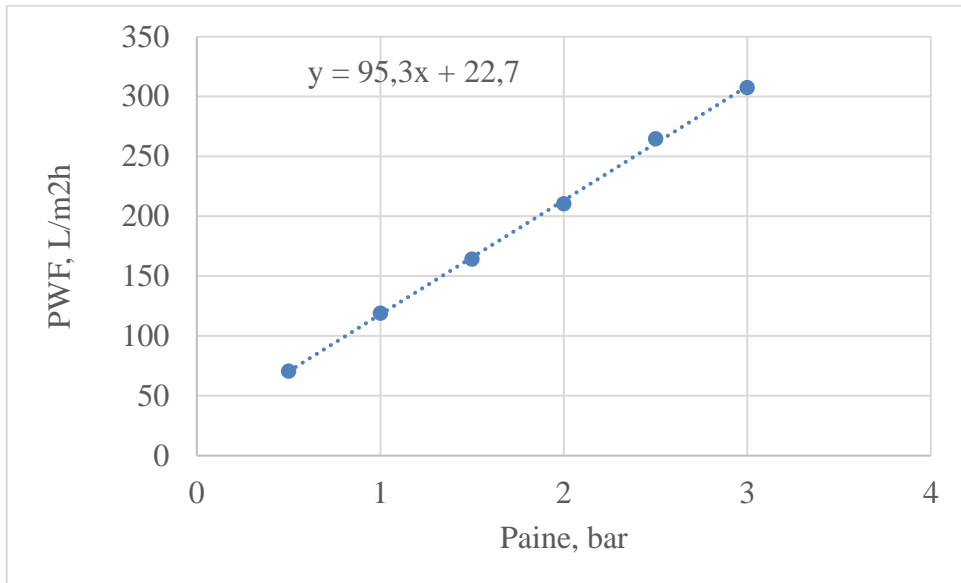
Kuva 11. Näytettä on käsitelty 50°C:ssa uunissa 2 tunnin ajan. Puhdasvesivuo mittaukset suoritettiin amicon-suodattimella huoneenlämpötilassa. Kuvassa on esitetty tulokset puhdasvesivuon tulokset paineenfunktiona.



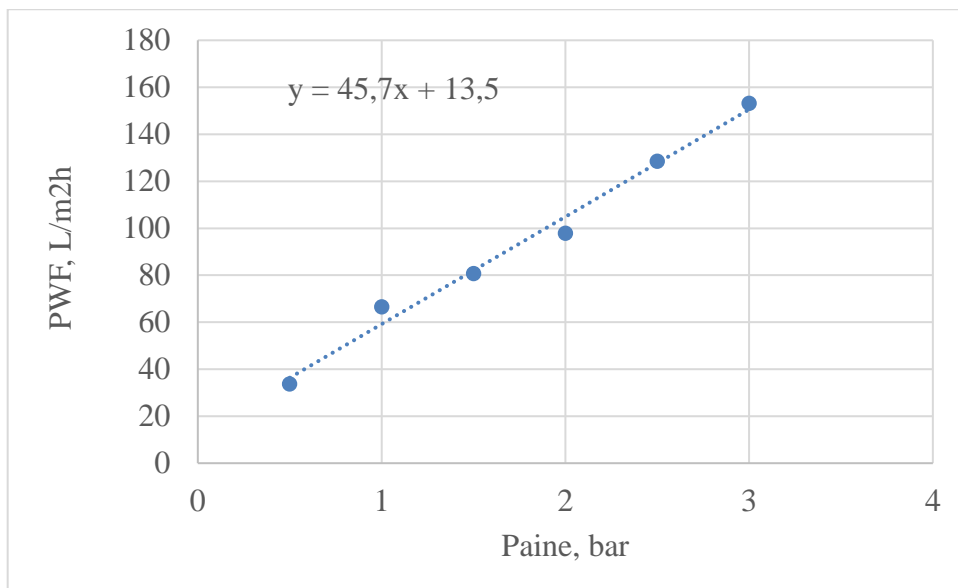
Kuva 12. Näytettä on käsitelty 50°C:ssa uunissa 3 tunnin ajan. Puhdasvesivuo mittaukset suoritettiin amicon-suodattimella huoneenlämpötilassa. Kuvassa on esitetty tulokset puhdasvesivuon tulokset paineenfunktiona.



Kuva 13. Näytettä on käsitelty 50°C:ssa uunissa 4 tunnin ajan. Puhdasvesivuo mittaukset suoritettiin amicon-suodattimella huoneenlämpötilassa. Kuvassa on esitetty tulokset puhdasvesivuon tulokset paineenfunktiona.



Kuva 14. Näytettä on käsitelty 50°C:ssa uunissa 5 tunnin ajan. Puhdasvesivuo mittaukset suoritettiin amicon-suodattimella huoneenlämpötilassa. Kuvassa on esitetty tulokset puhdasvesivuon tulokset paineenfunktiona.



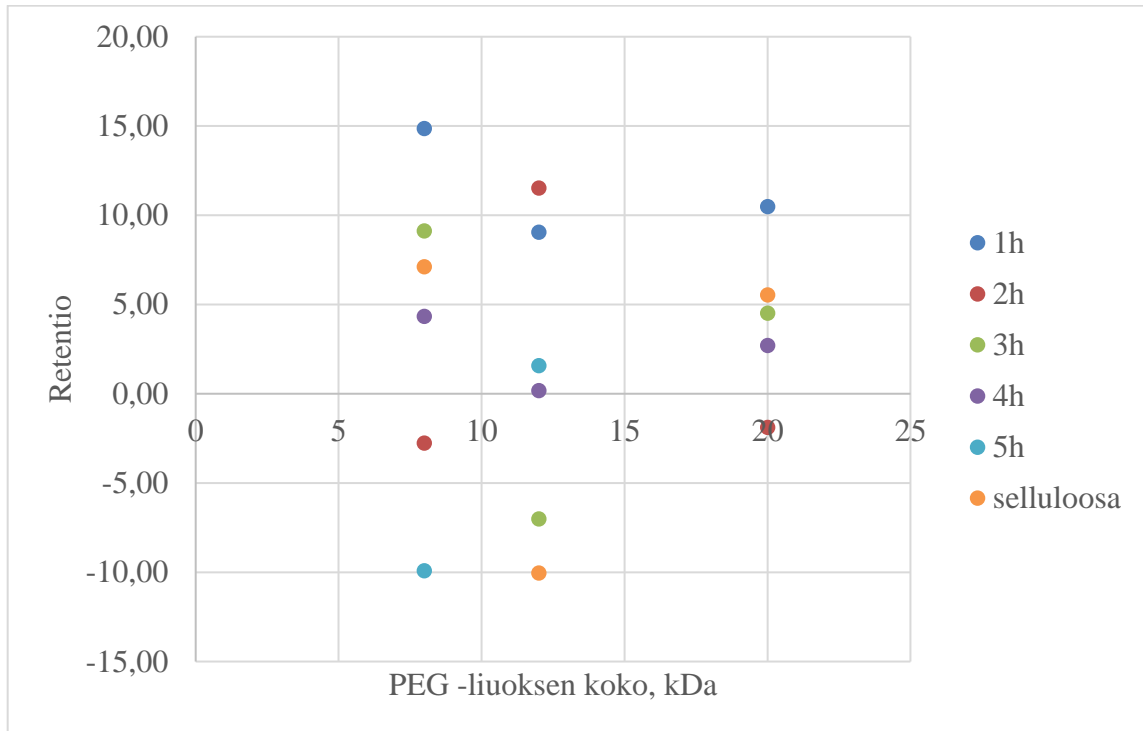
Kuva 15. Selluloosalla päällystetty näyte. Puhdasvesivuo mittaukset suoritettiin amicon-suodattimella huoneenlämpötilassa. Kuvassa on esitetty tulokset puhdasvesivuon tulokset paineenfunktiona.

Permeabiliteetit on esitetty taulukossa I. Näistä huomataan selluloosalla päällystetyn membraanin poikkeavan huomattavasti enemmän käsittelemättömästä membraanista.

Taulukko 1. Membraanien permeabiliteetit esitettynä. Permeabiliteetit saadaan kuvien 9-15 kulmakertoimista.

Näyte	Permeabiliteetti, L/m <sup>2</sup> hbar
0-näyte	105
Selluloosa	45,7
1 h	110
2 h	99,0
3 h	92,1
4 h	105
5 h	95,3

TOC – analyysillä mitatut pitoisuudet on esitetty liitteessä II. Kuvassa 16 on esitetty yhtälöllä 2 lasketut retentiot. Mittauksissa permeaatin konsentraation pitäisi olla aina pienempi kuin retentaatin. Mittaus tuloksia tarkastelemalla voidaan olettaa mittauksissa tapahtuneen virhettä. Mittauksia ei kuitenkaan ollut aikaa toistaa. Virhe on luultavasti tapahtunut näytteiden oton yhteydessä. Pipettiin, jolla näytteet otettiin, on mahdollisesti jäänyt syöttö liuosta. Toinen mahdollinen virhe lähde on TOC –analysointori. TOC –analysointorin huuhtelu ei välttämättä toiminut tarpeeksi hyvin ja sen putkiin on voinut jäädä jäämiä edellisestä näytteestä.



Kuva 8. TOC –analyysistä saatujen tulosten avulla lasketut retentiot. Retentiot on laskettu permeaatin ja konsentraatin suhteesta.

## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli saada kaupallisten selluloosamembraanien katkaisukoko pienemmäksi muokkaamalla sitä fysikaalisesti tai lisäämällä siihen selluloosapinnoite. Fysikaalisena keinona käytettiin lämmitystä uunissa. Selluloosapinnoiteliuos valmistettiin liuottamalla kaupan pumpulia 1-etyyli-3-metyylimidatsolium asetattiin. Selluloosapinnoiteliuos oli noin 1 p-% väkevyydeltään selluloosan suhteen.

Membranissa tapahtuneita muutoksia tutkittiin mittaamalla puhdasvesivuo. Puhdasvesivuo mittausten avulla lasketut permeabiliteetit on esitetty taulukossa 1. Puhdasvesivuot paineen funktiona on esitetty kuvissa 9-15. Permeabiliteeteista ja puhdasvesivuosta huomataan, ettei lämpökäsittely muuttanut membraanin puhdasvesivuota merkittävästi. Selluloosapinnoitteen lisäämisellä saatiin muutoksia puhdasvesivuohon.

Membraanien katkaisukoot mitattiin TOC-analyssaattorilla. Mittausten avulla lasketut retentiot on esitetty kuvassa 16 ja liitteestä 2 on esitetty mittaustulokset. Permeaatin pitäisi sisältää vähemmän kuin referenssiliuoksen. Mittauksissa on luultavasti tapahtunut virhettä, joten katkaisukokoja ei saatu selville.

Katkaisukoon pienentämiseksi tutkimuksen perusteella selluloosapinnoite toimisi parhaiten puhdasvesivuo mittausten perusteella. Selluloosapinnoite liuoksen koostumusta voisi vaihdella ja tutkia minkä väkevöinen liuos antaa parhaan tuloksen. Lämpökäsittelyä voisi tutkia lisää eri lämpötiloissa, sekä lämpösuodatuksella.

## 8. LÄHTEET

Cheryan, M., 1998. *Ultrafiltration and microfiltration Handbook*. Lancaster: Technomic Publishing Company, Inc.

Mulder. M., 1996. *Basic Principles of Membrane Technology*, Enschede: Kluwer Academic Publisher.

Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. 2017. [ Ympäristöhallinnon www-sivuilla] Viitattu 2.4.2017. Saatavilla: [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat\\_ja\\_tilastot/Vesistöjen\\_ravinnekuormitus\\_ja\\_luonnon\\_huhtouma](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Vesistöjen_ravinnekuormitus_ja_luonnon_huhtouma)

Wagner, J. 2000. *Membrane Filtration Handbook Practical Tips and Hints*. Second Edition, Revision 2 ed. 2001,

HSY. 2017 .[ HSY:n www-sivulla] Viitattu 15.3.2017. Saatavilla: <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/vesihuolto/jatevedenpuhdistus/Sivut/default.aspx>

Shimadzu. 2017. [SHIMAZU www-sivuilla] Viitattu 3.4.2017. Saatavilla: <http://www.shimadzu.com/an/toc/lab/toc-l4.html>

Mecadi GmbH. 2008. [online] Saatavilla: [http://technologyreport.mecadi.com/Chapter\\_2\\_Gas\\_separation\\_with\\_membranes.php](http://technologyreport.mecadi.com/Chapter_2_Gas_separation_with_membranes.php)

Lesjean.B, Huisjes.E.H. 2007 Survey of the European MBR market: trends and perspectives. [online] Viitattu 17.4.2017 Saatavilla: [http://ac.els-cdn.com/S0011916408003470/1-s2.0-S0011916408003470-main.pdf?\\_tid=bef3bbb4-2349-11e7-a936-00000aacb361&acdnat=1492418710\\_5e43e543e53d5fe7cf134257878b8ffb](http://ac.els-cdn.com/S0011916408003470/1-s2.0-S0011916408003470-main.pdf?_tid=bef3bbb4-2349-11e7-a936-00000aacb361&acdnat=1492418710_5e43e543e53d5fe7cf134257878b8ffb)

Porex Filtration Division. 2017. [online] saatavilla: <http://www.porexfiltration.com/downloads/copper-wastewater-treatment/>

Chen JP, Honghui M, Lawrence KW, Matsuura T. .2006. *Advanced Physicochemical Treatment Processes*. Humana Press Totowa, New Jersey, USA.



**LIITEET**

LIITE I      Membraanien puhdasvesivuot

LIITE II     TOC-analyysin tulokset

## Membraanien puhdasvesivuot

0-näyte	Paine, bar	0,5	1	1,5	2	2,5	3
L/m <sup>2</sup> h		55,24122	116,5446	180,3486	226,1935	270,22	322,127
selluloosa	Paine, bar	0,5	1	1,5	2	2,5	3
L/m <sup>2</sup> h		33,79641	66,60773	80,77797	97,82773	128,517	153,145
1h	Paine, bar	0,5	1	1,5	2	2,5	3
L/m <sup>2</sup> h		79,11089	126,1682	198,6865	240,0606	300,303	352,134
2h	Paine, bar	0,5	1	1,5	2	2,5	3
L/m <sup>2</sup> h		76,0798	132,0788	203,0058	231,7252	279,0477	328,7762
3h	Paine, bar	0,5	1	1,5	2	2,5	3
L/m <sup>2</sup> h		63,02932	115,9632	168,5469	207,9759	256,295	293,635
4h	Paine, bar	0,5	1	1,5	2	2,5	3
L/m <sup>2</sup> h		74,10962	128,3279	155,8348	234,6615	279,3319	333,4933
5h	Paine, bar	0,5	1	1,5	2	2,5	3
L/m <sup>2</sup> h		70,6239	119,0452	164,2839	210,5077	264,688	307,5019

## TOC-analyysin tulokset

1h	mg/L	8 kDa	12 kDa	20 kDa
	C <sub>p</sub>	95,36	106,6	105,9
	C <sub>F</sub>	112	117,2	118,3
2h	mg/L	8 kDa	12 kDa	20 kDa
	C <sub>p</sub>	107,8	104,4	113,1
	C <sub>F</sub>	104,9	118	111
3h	mg/L	8 kDa	12 kDa	20 kDa
	C <sub>p</sub>	89,28	96,23	92,94
	C <sub>F</sub>	98,24	89,93	97,34
4h	mg/L	8 kDa	12 kDa	20 kDa
	C <sub>p</sub>	108,1	115,2	107,7
	C <sub>F</sub>	113	115,4	110,7
5h	mg/L	8 kDa	12 kDa	20 kDa
	C <sub>p</sub>	84,34	104,2	112,8
	C <sub>F</sub>	0,3204	94,8	114,6
selluloosa	mg/L	8 kDa	12 kDa	20 kDa
	C <sub>p</sub>	108,5	100,7	100,6
	C <sub>F</sub>	116,8	91,51	106,5

## Lasketut retentiot

	8 kDa	12 kDa	20 kDa
1h	14,86	9,04	10,48
2h	-2,76	11,53	-1,89
3h	9,12	-7,01	4,52
4h	4,34	0,17	2,71
5h	-26223,35	-9,92	1,57
selluloosa	7,11	-10,04	5,54