

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Kemia

Erotustekniikan laboratorio

Kandidaatintyö

**MEMBRAANIMODUULIEN RAKENNESUUNNITTELU JA
INNOVAATIOT AINEENSIIRRON PARANTAMISEKSI**

19.5.2011

Eero Leskinen

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	2
2	KALVOEROTUSMENETELMÄT	3
2.1	Osmoosi ja käänteisosmoosi.....	4
2.2	Nano- ja ultrasuodatus	5
3	EROTUSTEHOKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	6
3.1	Suodatusolosuhteet	6
3.2	Konsentraatiopolarisaatio ja fouling.....	7
4	MODUULIRAKENTEET	9
4.1	Levymoduulit	10
4.2	Putkimoduulit	11
4.3	Onttokuitumoduulit	12
4.4	Kapillaarimoduulit.....	13
4.4.1	Kapillaarimoduulien käyttö nanosuodatuksessa	14
4.4.2	Deanin pyörteet aineensiirron parantamisessa.....	17
4.4.2.1	Kierukkamaiset moduulit	18
4.4.2.2	Muut moduuligeometriat.....	26
4.5	Spiraalimoduulit	33
4.5.1	Välikkeet	34
4.5.1.1	Välikkeiden geometrian merkitys	35
4.5.1.2	3-kerrosvälike.....	39
4.6	Kaasu-neste -kaksifaasivirtaus aineensiirron parantamisessa	46
4.6.1	Kaksifaasivirtaus nanosuodatuksessa	48
4.7	Dynaamiset moduulit.....	52
5	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	53
6	LÄHTEET	55

1 JOHDANTO

Kalvoerotusmenetelmien teollinen käyttö alkoi 1960-luvulla minkä jälkeen niiden kehitys on ollut nopeaa. Ne voivat tarjota taloudellisen ja energiatehokkaan vaihtoehdon perinteisille erotusmenetelmille. Tällä hetkellä laajimmin levinyt kalvo- eli membraaniprosessi on puhtaan veden valmistus merivedestä käänteisosmoosin avulla. Membraaniprosesseja käytetään paljon myös jätevesien puhdistuksessa, elintarviketeollisuudessa, biokemian alalla sekä lääketieteen sovellutuksissa.

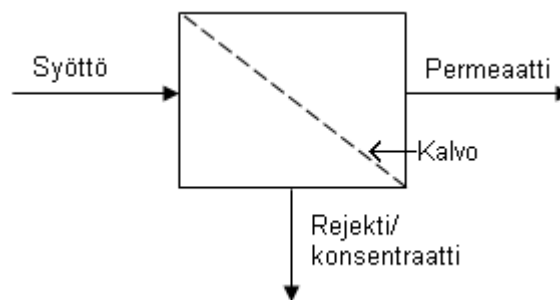
Käytetyimmät kalvoerotusmenetelmät ovat käänteisosmoosi sekä ultrasuodatus. Ominaisuuksiltaan näiden kahden väliin asettuu nanosuodatus, joka on myöhemmin kehitetty prosessi. Kaikissa mainituissa erotusmenetelmissä aineensiirron ajavana voimana toimii paine-ero membraanikalvon yli. Jotta membraanit kestäisivät korkeita paineita ja niitä voitaisiin hyödyntää teollisesti, vaativat ne ympärilleen tukirakenteen. Tällaista tuettua membraaniyksikköä kutsutaan moduuliksi. Ominaisuuksiltaan ihanteellisessa moduulissa membraanin ominaispinta-ala on suuri, aineensiirto tehokasta ja painehäviöt pienet. Tällä hetkellä käytetyimmät moduulityypit ovat spiraalimoduuli ja kapillaarimoduuli suurten ominaispinta-alojensa vuoksi.

Merkittävimmät rajoitteet membraaniprosessien laajemmalle yleistymiselle ovat kalvojen likaantuminen (*fouling*) sekä konsentraatiopolarisaatio. Yhdessä nämä kaksi ilmiötä heikentävät aineensiirtoa ja lyhentävät membraanien elinikää. Näihin voidaan vaikuttaa eri tekijöillä kuten käytetyllä ristivirtausnopeudella (*cross-flow velocity*), paine-erolla, lämpötilalla sekä virtausominaisuuksilla. Viimeksi mainittuun on mahdollista vaikuttaa membraanimoduulien rakennesuunnittelulla.

Tässä työssä on kartoitettu 2000-luvun alussa tehtyä kalvoerotusprosessitutkimusta ja pyritty selvittämään minkälaisia uusia moduulirakennemuotoja on tehty aineensiirron parantamiseksi. Erityisenä huomion kohteena ovat olleet kapillaari- ja spiraalimoduulit.

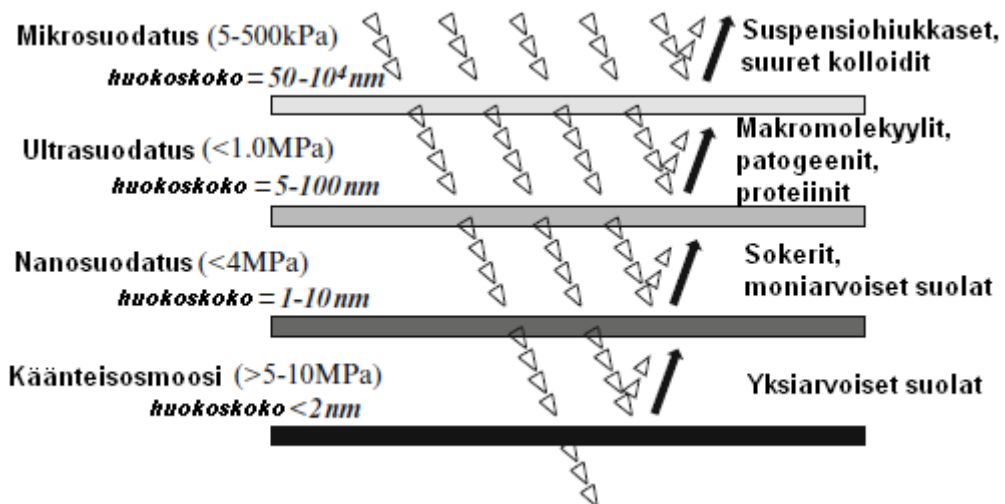
2 KALVOEROTUSMENETELMÄT

Kalvoerotusmenetelmät on joukko erilaisia erotusmenetelmiä, joissa ohut puoliläpäisevä kalvo, membraani, erottaa toisistaan kaksi eri faasia ja päästää lävitseen komponentteja selektiivisesti. Kalvon läpi virrannutta osaa syötöstä sanotaan permeaatiksi, ja kalvoa läpäisemätöntä osaa rejektiksi tai konsentraatiksi (kuva 1). Komponenttien siirtyminen membraanin yli tapahtuu jonkin ajavan voiman vaikutuksesta. Tällainen voima voi olla paine-ero, konsentraatiogradientti tai sähköinen potentiaali. [1, s. 3.47]



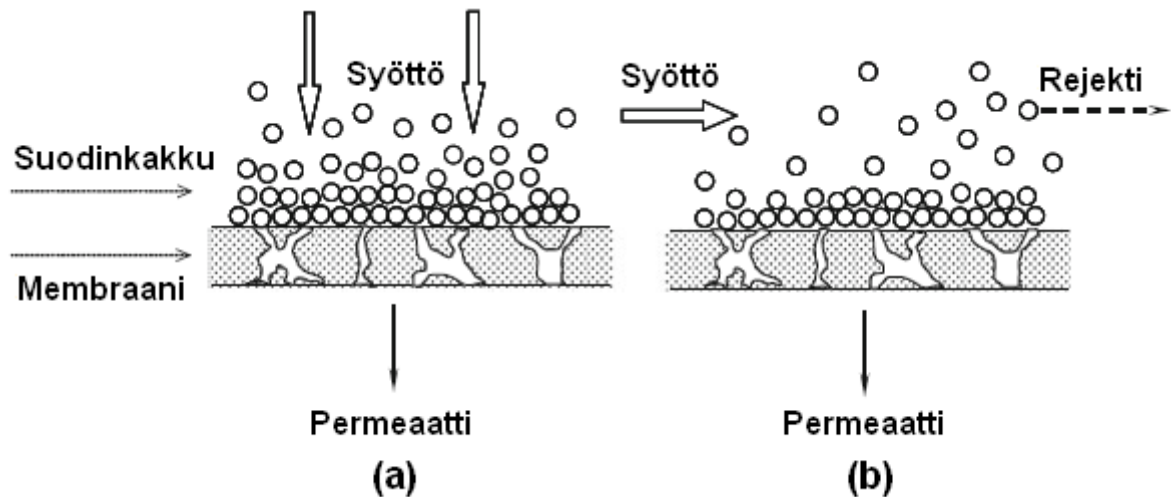
Kuva 1 Kalvoerotusyksikön periaatekuva

Paine-eroon perustuvia kalvoerotusmenetelmiä ovat käänteisosmoosi (*reverse osmosis, RO*), nanosuodatus (*nanofiltration, NF*), ultrasuodatus (*ultrafiltration, UF*) ja mikrosuodatus (*microfiltration, MF*). Nämä eroavat toisistaan erotettavien partikkelien koon perusteella (kuva 2), mutta tämä jako ei ole kuitenkaan täysin yksiselitteinen. Myös käytetyissä paineissa on eroa.



Kuva 2 Paine-eroon perustuvien membraaniprosessien luokittelu [2, s. 4]

Kaikki edellä mainitut prosessit toimivat pääsääntöisesti ns. ristivirtaus suodatus (*cross-flow filtration*) periaatteella, jolloin syöttö virtaa kalvon pinnan suuntaisesti. Näin pyritään ehkäisemään suodatettavan aineen kertymistä kalvon pinnalle joka tapahtuu perinteisessä kakkusuodatuksessa, jossa syöttö virtaa kohtisuoraan suodatinkalvoon nähden (*dead-end filtration*). Ero näiden kahden välillä on esitetty kuvassa 3.

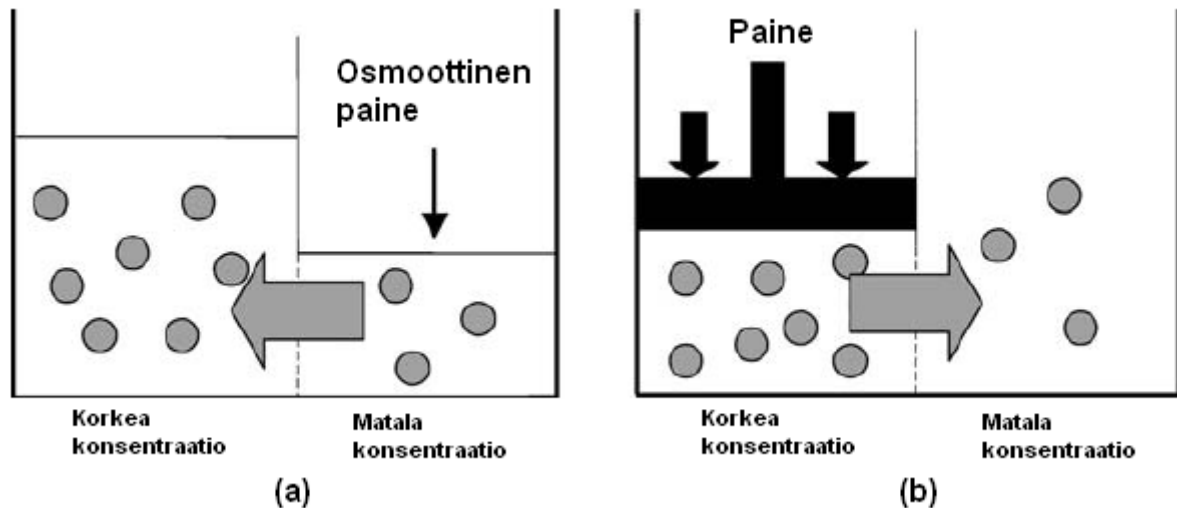


Kuva 3 (a) Dead-end ja (b) Cross-flow –suodatus [4, s. 5]

2.1 Osmoosi ja käänteisosmoosi

Osmoosi on ilmiö, jossa liuotin virtaa puoliläpäisevän kalvon läpi laimeammasta liuoksesta kohti väkevämpää pyrkien näin tasoittamaan konsentraatioeron (kuva 4a). Virtaus jatkuu kunnes osmoottinen tasapaino on saavutettu. Tällöin nestepatsaiden korkeuserosta johtuva hydrostaattinen paine on yhtä suuri kuin liuoksen osmoottinen paine. Mitä suurempi on liuenneiden aineiden pitoisuus, sitä suurempi on osmoottinen paine ja nestepatsaiden korkeusero.

Jos väkevämpään liuokseen kohdistetaan paine, joka on suurempi kuin osmoottinen paine-ero, saadaan liuotin kulkemaan väkevämmästä pitoisuudesta kohti laimeampaa (kuva 4b). Tätä ilmiötä kutsutaan käänteisosmoosiksi, ja sen avulla voidaan aikaansaada hyvin puhdas liuos matalamman pitoisuuden puolelle.



Kuva 4 (a) Osmoosi ja (b) käänteisosmoosi [3, s. 8.6]

Käänteisosmoosiprosesseissa käytetyt membraanit pidättävät tyypillisesti kaikki molekyylit joiden molekyylimassa on yli 150 Da ja lähes kaikki (> 99 %) väliltä 25 – 150 Da. Täten sillä on mahdollista erottaa hyvin pieniä molekyyleja kuten yksiarvoisia suoloja. Liuottimen kulkeutuminen membraanin läpi perustuu enneminkin diffuusioon kuin virtaukseen huokosten läpi. Tyypillisin käyttökohte käänteisosmoosille on suolan poisto vedestä. [4, s. 50]

2.2 Nano- ja ultrasuodatus

Nanosuodatus asettuu ominaisuuksiltaan käänteisosmoosin ja ultrasuodatuksen väliin, joskin tarkkoja rajoja näiden välillä on vaikea määrittellä. Nanosuodatus perustuu eri mekanismien yhteisvaikutukseen. Näitä ovat molekyyliin kokoon perustuva seulonta, diffuusio, sekä ns. Donnan ilmiö, jossa membraanin kanssa samanmerkkisesti varautuneet ionit eivät läpäise sitä. [2, s. 51] Nanosuodatuksella voidaan erottaa kaksi- ja korkeampi-arvoisia suoloja, liuennaita orgaanisia komponentteja sekä veteen hajuja ja makuja aiheuttavia aineksia. Tällä hetkellä tärkein käyttökohte nanosuodatukselle on kovuuden poisto pinta- ja pohjavesistä. Tämän lisäksi sitä käytetään myös elintarvike-, tekstiili- ja kaivosteollisuudessa. [4, s. 14]

Ultrasuodatuksella voidaan erottaa partikkeleja, joiden koko on 5 – 100 nm, kuten makromolekyyleja ja proteiineja. Erotusmekanismina on pääasiassa kokoon perustuva seulonta. Syöttöliuoksen osmoottinen paine ei ole merkittävä, sillä ultrasuodatuksessa käytettyjen kalvojen rakenne sallii pienimpien molekyyliin (molekyylimassa < 300 Da)

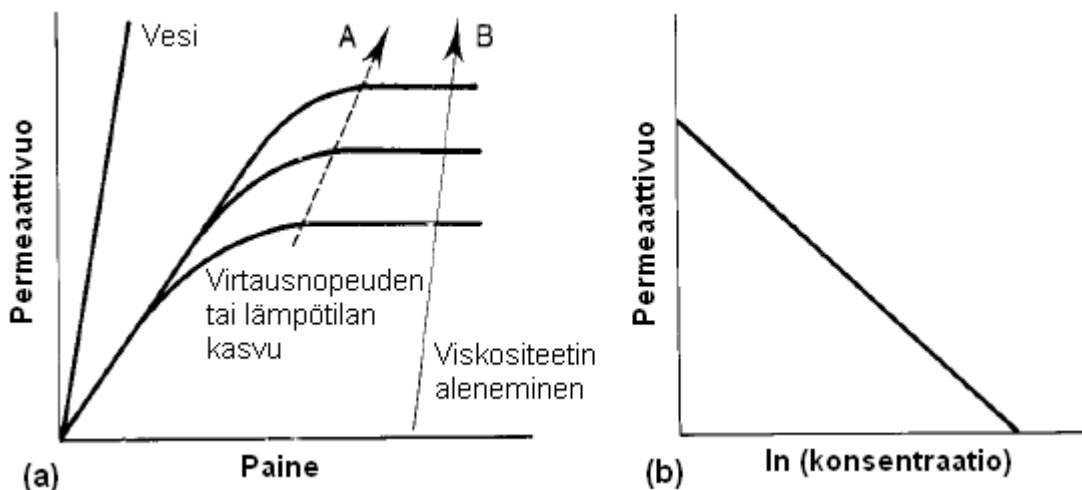
läpäisyn. Ultrasuodatusta käytetään vesien esikäsittelyssä ennen RO/NF -prosesseja, jätevesien käsittelyssä auto-, sellu- ja paperiteollisuudessa, sekä elintarvike-, lääke- ja puolijohdeteollisuudessa.

3 EROTUSTEHOKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Membraniin tehokkuutta kuvataan käsitteillä permeabiliteetti ja selektiivisyys. Permeabiliteettia mitataan permeaattivuolla, joka tarkoittaa kalvon läpi virtaavan liuoksen tilavuutta pinta-alaa ja aikayksikkö kohden (tyypillisimmin $L/(m^2 h)$). Selektiivisyys puolestaan tarkoittaa kuinka hyvin kalvo pystyy pidättämään erotettavana olevat komponentit. Näihin voidaan vaikuttaa käytetyn membraanin lisäksi myös suodatusolosuhteilla, joista tärkeimmät ovat paine, syöttöliuoksen konsentraatio, lämpötila ja virtauskanavan turbulenssi.

3.1 Suodatusolosuhteet

Paineen, virtausnopeuden, lämpötilan ja syöttöliuoksen konsentraation vaikutus permeaattivuohon yleisesti on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5 (a) Paineen, virtausnopeuden ja lämpötilan sekä (b) konsentraation vaikutus permeaattivuohon [5, s. 108]

Painetta nostettaessa huomataan permeaattivuon kasvavan aluksi tasaisesti. Vuon kasvun seurauksena myös rejektoidun materiaalin määrä membraanin pinnalla kasvaa mikä aiheuttaa aineensiirtoa rajoittavan geelikerroksen muodostumisen. Sitä permeaattivuon arvoa, jonka jälkeen sen kasvu alkaa hidastua, sanotaan kriittiseksi vuoksi (*critical flux*) [6]. Vuon kasvu hidastuu kunnes saavutetaan ns. rajoittava vuo (*limiting flux*), jonka jälkeen paineen lisäys ei enää kasvata sen arvoa. Tällöin ollaan paineesta riippumattomalla alueella (alue AB kuvassa 5a), jossa paineen nostaminen kompensoituu uuden geelikerroksen muodostumisella membraanin pinnalle. Rajoittavan vuon saavuttamisen jälkeen painetta ei siis kannata enää nostaa, sillä se olisi vain energian tuhlausta. Membraanin rejektio tyypillisesti kasvaa paineen noustessa [8].

Huomattavaa on, että paine-eroon perustuvissa membraaniprosesseissa erottuminen ei tapahdu bulkkivirtauksessa, vaan hyvin ohuella alueella lähellä membraanin pintaa, jota kutsutaan rajakerrokseksi, sekä itse membraanissa [5, s. 72]. Virtausnopeuden kasvu lisää turbulenssia membraanin pinnassa ja näin pienentää rajakerroksen paksuutta, minkä seurauksena permeaattivuo kasvaa. Korkeampi virtausnopeus myös kasvattaa painetta, jota voidaan käyttää ennen kuin rajoittava vuo saavutetaan.

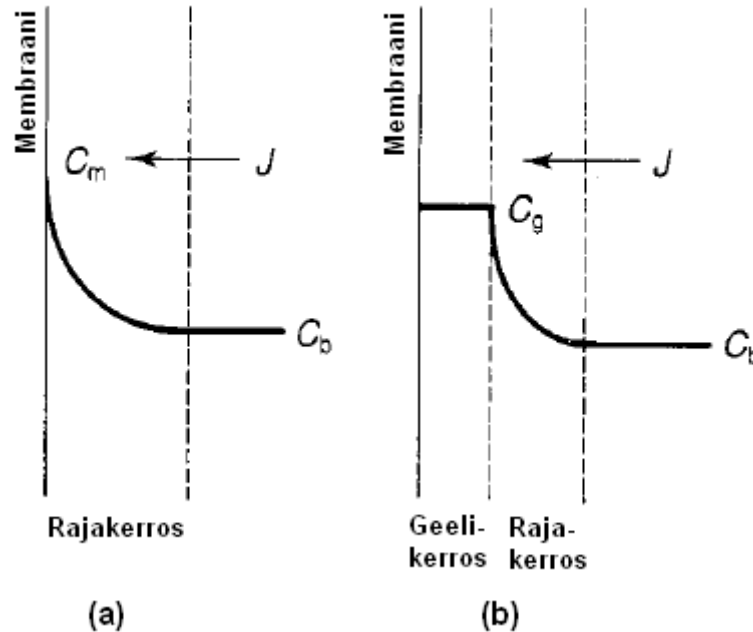
Lämpötilan kasvun tiedetään myös kasvattavan permeaattivuota. Mahdollisia syitä tälle ovat membraanin huokoisuuden muuttuminen, syöttöliuoksen viskositeetin aleneminen, suuremmat diffuusionopeudet tai diffundoituvan materiaalin korkeampi liukoisuus membraaniin. [5, s. 108] Nyrkkisääntönä voidaan sanoa vuon kasvavan 3 % kun lämpötila nousee 1 °C. [7, s. 195] Lämpötilan kasvun seurauksena myös membraanin rejektio kasvaa vähän.

Syöttöliuoksen konsentraation kasvu lisää liuoksen tiheyttä ja viskositeettia, mutta pienentää diffusiviteettia. Yhdessä nämä pienentävät permeaattivuota sekä rejektiota. [8]

3.2 Konsentraatiopolarisaatio ja fouling

Liuottimen virratessa membraanin läpi myös liuenneet komponentit siirtyvät membraania kohti konvektion seurauksena. Suurin osa liuenneesta aineesta ei läpäise membraania, vaan alkaa kertyä sen pinnalle, jolloin rajakerrokseen muodostuu konsentraatiogradientti (kuva 6a). Tätä ilmiötä kutsutaan konsentraatiopolarisaatioksi. Konsentraation kasvu membraanin

pinnassa jatkuu kunnes diffusiivinen aineensiirto siitä pois päin on yhtä suuri kuin konvektiivinen aineensiirto sitä kohti. Voimakkaan konsentraatiopolarisaation vaikutuksesta liuos saattaa tulla kylläiseksi membraanin pinnalla, mikä voi aiheuttaa geelikerroksen muodostumisen (kuva 6b).



Kuva 6 Konsentraatiopolarisaatio (a) ilman geelikerrosta ja (b) geelikerroksen kanssa [5, s. 73]

Konsentraatiopolarisaatio on membraanin toiminnan kannalta haitallinen ilmiö, sillä se lisää liuoksen osmoottista painetta lähellä membraanin pintaa, jonka seurauksena tehollinen paineero membraanin yli pienenee. Tämä vaikeuttaa huomattavasti liuottimen virtausta membraanin läpi. Konsentraatiopolarisaation vaikutusta voidaan kuitenkin ehkäistä lisäämällä virtauksen turbulenssia, mikä pienentää rajakerroksen paksuutta.

Konsentraatiopolarisaatio itsessään on reversiibeli prosessi; jos käsiteltävänä oleva liuos korvataan puhtaalla vedellä, alkuperäinen permeaattivuo voidaan saavuttaa. Käytännössä näin tapahtuu kuitenkin harvoin johtuen membraanien pysyvästä likaantumisen eli ns. fouling-ilmiöstä. Tällöin erotettavana olevaa materiaalia kertyy membraanin pinnalle tai sen huokosiin aiheuttaen permeaattivuon aleneman. Likaantunut membraani on mahdollista puhdistaa, mutta usein suoritettuina puhdistustoimenpiteet kuitenkin lyhentävät membraanin elinikää.

Fouling-ilmiö on osittain irreversiibeli prosessi ja sen estäminen kokonaan on käytännössä mahdotonta. Sitä voidaan kuitenkin ehkäistä lisäämällä turbulenssia, esikäsittelemällä liuos tai muuttamalla itse membraanin ominaisuuksia.

4 MODUULIRAKENTEET

Membraanit itsessään ovat hyvin ohuita. Jotta ne kestäisivät korkeita paineita ja niiden käsittely olisi helpompaa, ne tarvitsevat ympärilleen tukirakenteen. Membraanin ja tukirakenteen yhdessä muodostamaa yksikköä kutsutaan moduuliksi. Membraanimoduulien suunnittelussa on otettava huomioon monia asioita. Membraanin pinta-alan tulee olla suuri suhteessa moduulin tilavuuteen ja moduulin tulee tukea membraania riittävästi. Moduulin tulee mahdollistaa vaaditut prosessiolosuhteet turbulenssin, leikkausjännitysten, painehäviöiden, tilavuusvirtauksien ja energiankulutuksen suhteen konsentraatiopolarisaation ja foulingin minimoimiseksi. Tarvittaessa moduulin puhdistuksen tai vaihtamisen uuteen tulisi olla helppoa. Luonnollisesti myös taloudellisilla seikoilla on merkitystä. [5, s. 76]

Tällä hetkellä yleisesti tunnettuja moduulityyppejä on viisi: putki-, levy-, onttokuitu-, spiraali- ja kapillaarimoduuli. Näitä on vertailtu keskenään taulukossa I. Käytettävän moduulityypin valinta riippuu membraaniprosessista taulukon II mukaisesti.

TAULUKKO I

Membraanimoduulien vertailu [4, s. 50]

		Putki	Levy	Spiraali	Kapillaari	Onttokuitu
Pakkaustiheys	Alhainen	→				Korkea
Hinta	Korkea	←				Alhainen
Fouling taipumus	Alhainen	→				Korkea
Puhdistus	Helppoa	←				Vaikeaa

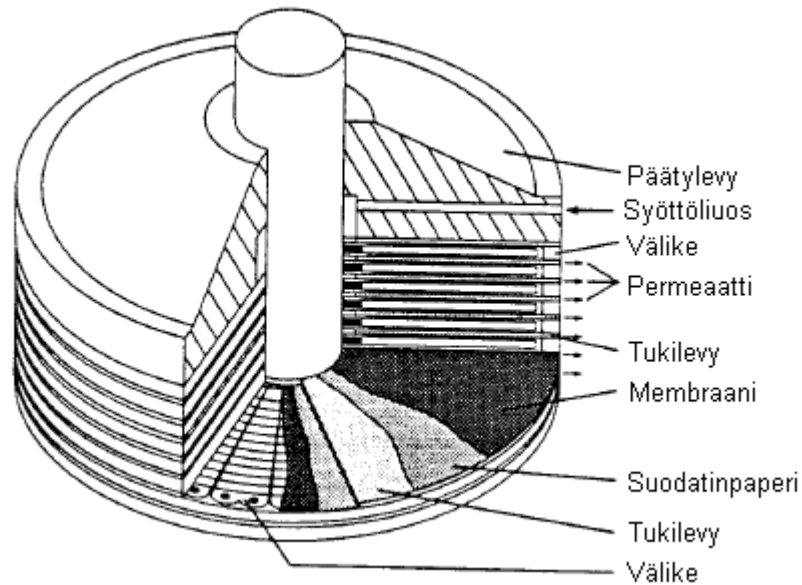
TAULUKKO II

Eri membraaniprosesseissa käytetyt moduulityypit (suluissa harvemmin käytetyt) [9, s. 273]

Prosessi	Moduulityyppi
Käänteisosmoosi	Onttokuitu, spiraali
Nanosuodatus	Spiraali, putki (onttokuitu, kapillaari, levy)
Ultrasuodatus	Onttokuitu, kapillaari, putki, spiraali, levy

4.1 Levymoduulit

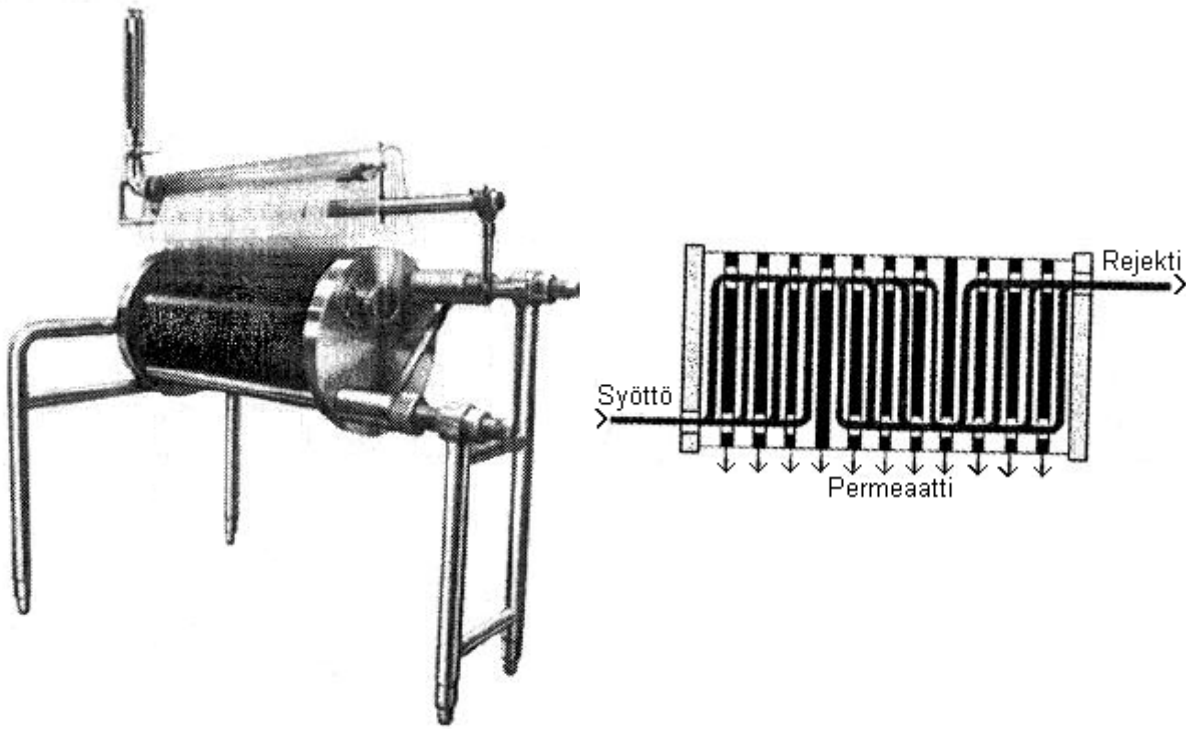
Levymoduulit (*plate-and-frame, flat sheet*) koostuvat päällekkäin pinotuista membraaneista joiden väliin on asetettu välikkeitä (*spacer*), jotka muodostavat virtauskanavat syöttöä ja permeaatin talteenottoa varten, sekä muista tukilevyistä (kuva 7). Virtauskanavien korkeus on 0.4 – 2.5 mm ja virtaus on laminaaria tai lievästi turbulენტtista.



Kuva 7 Levymoduulin rakennekuva [10, s. 142]

Yleensä tällaisia yksiköitä on kytketty useampi peräkkäin kahden päätylevyn väliin, joskin kytkentätapoja on erilaisia. Kuvassa 8 on esitetty DDS tyyppinen levymoduuliratkaisu.

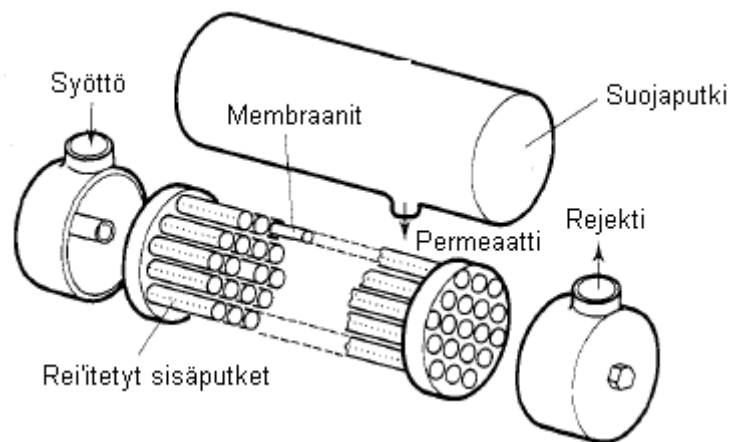
Levymoduuleiden pakkaustiheys on $30 - 500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ [2, s. 299]. Useita levymoduuleja on kehitetty pienenmittakaavan sovelluksia varten, mutta ne ovat verrattain kalliita ja suuresta tiivistemäärästä aiheutuvat vuodot ovat merkittävä ongelma. Ensimmäiset membraaniprosessit hyödynsivät levymoduuleja, mutta nykyään niitä käytetään lähinnä elektrodialyysissa ja pervaporaatiossa, sekä joissain pienissä ultrasuodatus ja käänteisosmoosi sovellutuksissa. [10, s. 140]



Kuva 8 DDS levymoduuli [7, s. 208]

4.2 Putkimoduulit

Putkimoduulit (*tubular*) koostuvat yhdestä tai useammasta rei'itetystä tai huokoisesta putkesta, joiden sisäpinnalla membraanit sijaitsevat. Nämä sisäputket ovat asetettu isomman suoja-putken sisään (kuva 9).

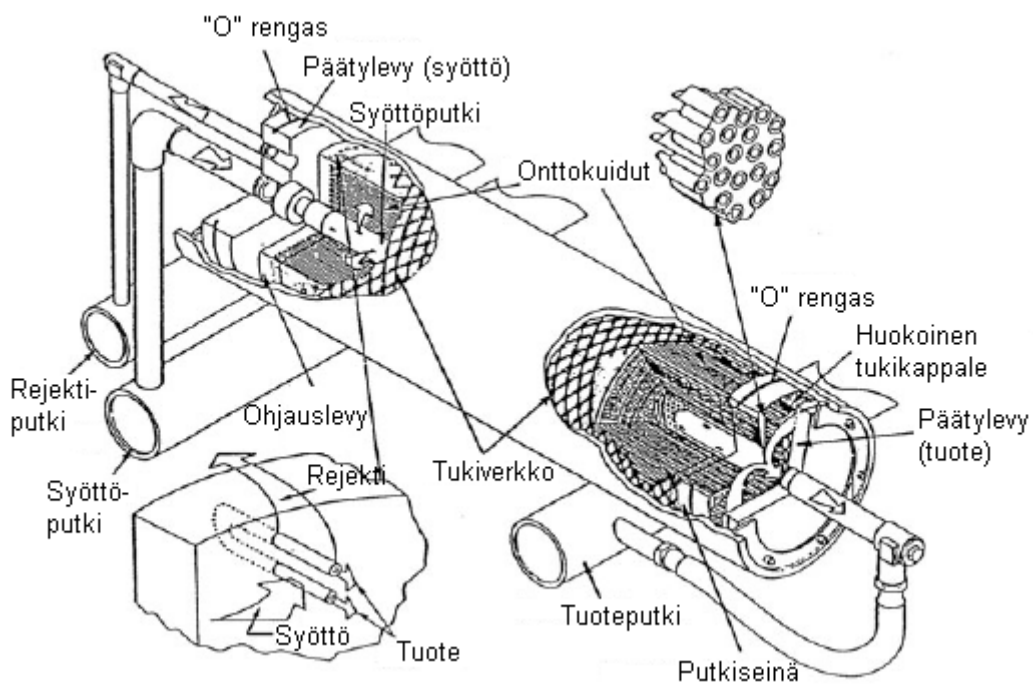


Kuva 9 Putkimoduulin rakennekuva [5, s. 78]

Sisäputkien halkaisijat vaihtelevat välillä 5 – 25 mm (yleisimmin noin 12 mm) ja pituudet välillä 1.2 – 3.6 m. Virtaus putkien sisällä on turbulenttista virtausnopeuden ollessa yli 2 m/s. Näin saavutetaan suuri permeaattivuo, mutta vastaavasti pumppauskustannukset ovat korkeat. Putkimoduulit ovat vähiten alttiita likaantumiselle ja konsentraatiopolarisaatiolle, ja niiden puhdistus paiknapäällä (*clean-in-place, CIP*) on helppoa. Tämän vuoksi niillä on mahdollista käsitellä melko viskooseja nesteitä, ja nesteitä jotka sisältävät suspensiohiukkasia (partikkelikoko enintään kymmenesosa sisäputken halkaisijasta). Putkimoduulien huonoina puolina voidaan pitää niiden korkeaa hintaa ja alhaista pakkaustiheyttä (30 – 300 m²/m³). [5, s. 78 – 79; 4, s. 49]

4.3 Onttokuitumoduulit

Onttokuitumoduulit (*hollow fiber*) koostuvat kimpusta hyvin ohuita ja onttoja membraanikuituja, joiden halkaisija on 0.001 – 0.5 mm. Yhdessä kimpussa kuituja voi olla tuhansia, ja sen paksuus on tyypillisesti noin 10 – 20 cm ja pituus 120 cm. Kuitukimppu on usein lenkillä, ja se asetetaan suojaputken sisään jonka päihin kuidut kiinnitetään (kuva 10). Syöttö tulee kuitujen ulkopuolelle ja permeaatti virtaa kuituja pitkin ulos moduulista. Kuitujen pienen halkaisijan vuoksi syötön tulee olla kohtalaisen puhdasta tukkiintumisen välttämiseksi, ja syötön esisuodatus onkin suositeltavaa.

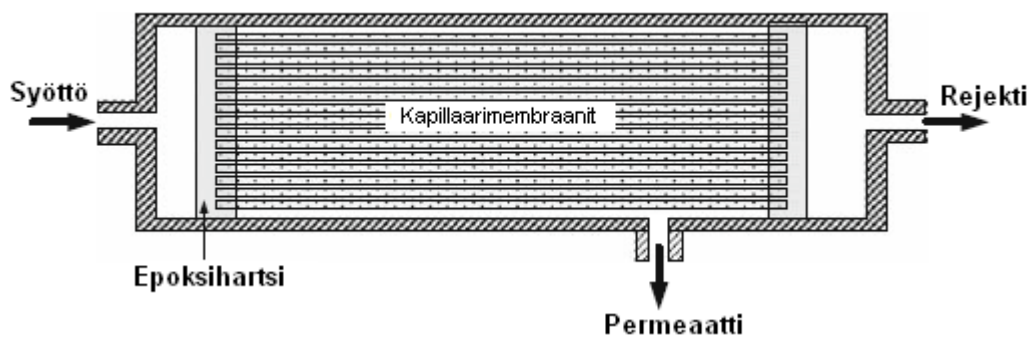


Kuva 10 Onttokuitumoduuli [2, s. 244]

Onttokuitumoduulien pakkaustiheys on suurin eri membraanimuodulleista ($500 - 9\,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$), mutta permeaattivuo vastaavasti pienin. Virtaus kuitujen sisällä on laminaaria, mutta leikkausjännitykset ovat suuria. Onttokuitumoduulien yksi suurimmista eduista on mahdollisuus puhdistaa ne vastavirtahuuhtelulla sillä kuidut ovat itsekantavia. Suurin ongelma on alttius foulingille ja konsentraatiopolarisaatiolle.

4.4 Kapillaarimoduulit

Kapillaarimoduulit (*capillary*) ovat muuten lähes samanlaisia kuin onttokuitumoduulit, mutta kuidut ovat halkaisijaltaan isompia ($0.2 - 3 \text{ mm}$). Kuidut ovat kiinnitetty päistään moduulin päihin esim. epoksihartsilla, polyuretaanilla tai silikonikumilla. Lisäksi syöttö tulee yleensä kuitujen sisäpuolelle ja permeaatti kerätään moduulin vaipan sisäpuolelta (ns. *inside-out -konfiguraatio*), kuten kuvassa 11 on esitetty, joskin myös toinen virtaussuunta on mahdollinen (*outside-in*). Valinta näiden kahden välillä tapahtuu suodatusolosuhteiden ja käsiteltävän liuoksen perusteella.



Kuva 11 Kapillaarimoduuli [4, s. 49]

Kapillaarimoduulien pakkaustiheys ($600 - 1200 \text{ m}^2/\text{m}^3$) on jonkin verran pienempi kuin onttokuitumoduuleilla, mutta fouling ja konsentraatiopolarisaatio eivät ole yhtä merkittäviä ongelmia.

4.4.1 Kapillaarimoduulien käyttö nanosuodatuksessa

Tavallisesti nanosuodatuksessa on totuttu käyttämään spiraali- ja putkimoduuleita. Spiraalimoduulien pakkaustiheys on suuri ja hinta alhainen, mutta ne likaantuvat helposti ja vaativat syötön esikäsitteilyä. Putkimoduulit eivät likaannu yhtä helposti ja ne voidaan puhdistaa vastavirtahuuhtelulla, mutta ne ovat kalliita ja niiden pakkaustiheys on alhainen. Kapillaarimoduulissa yhdistyvät näiden kahden moduulin parhaat puolet, mutta vielä 2000-luvulle tultaessa nanosuodatukseseen soveltuvaa mallia ei oltu kuitenkaan kehitetty. Mainittuja moduuleita on vertailtu keskenään taulukossa III. [11]

TAULUKKO III Spiraali-, putki- ja kapillaarimoduulien vertailu [11]

Ominaisuus	Spiraali	Putki	Kapillaari
Pakkaustiheys	++	- ^a	++
Hinta	+++ ^b	-	+++
Vaadittu esikäsitteily	-	+++	++
Vastavirtahuuhtelu	-	+	+++

^a Huomattava haitta.

^b Huomattava etu.

Frank *et al.* [11] ovat kehittäneet uuden nanosuodatukseseen soveltuvan kapillaarimoduulin ja verranneet sen toimintaa sillä hetkellä (v. 2001) parhaimpina pidettyihin spiraalimoduuleihin. Kehitetyn kapillaarimoduulin lähtökohtana toimivat saksalaisen Membrana GmbH:n valmistavat UltraPES kapillaarit, joiden sisähalkaisija oli 1.5 mm. Nämä tukimembraanit päällystettiin sisäpuolelta polyamidilla, jolloin niihin muodostui kerroksia, joiden erotusominaisuudet vastasivat käänteisosmoosia ja nanosuodatusta. Kapillaarimembraaneja asetettiin 512 kappaletta moduuliin jonka halkaisija oli 3" ja pituus 1 m. Moduulin kokonaismembraanipinta-ala oli 2.2 m². Kapillaarimoduulia verrattiin Dow Chemicalsin NF-45 ja NF-70 spiraalimoduuleihin käsittelemällä niillä synteettistä suolaliuosta, joesta otettua pintavettä sekä heraa.

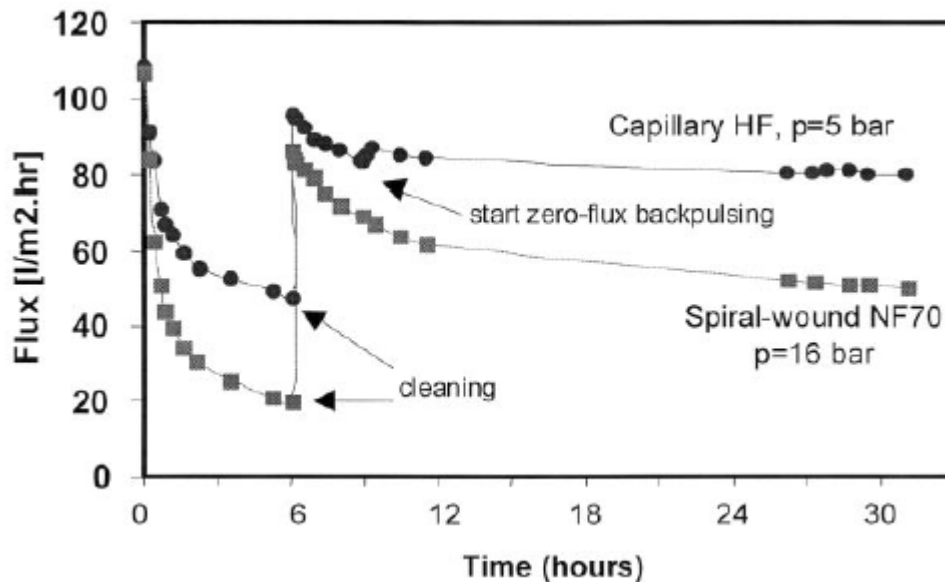
Kuten taulukosta IV nähdään, kapillaarimoduuli pärjäsi erotustehokkuudessa NF-45 spiraalimoduulille rejektoiden natrium- ja kalsiumkloridin likimain yhtä tehokkaasti. NF-45:n rejektiot natrium- ja magnesiumsulfaatile sekä glukoosille olivat kuitenkin suuremmat. Käyttöpaineeseen suhteutettuna puhtaan veden vuo oli kapillaarimoduulilla noin 5-kertainen

NF-45:een verrattuna. NF-70 moduulin rejektiot ovat yleisesti hyvin korkeita ja niihin nähden sillä saavutettu vuo oli myös todella suuri.

TAULUKKO IV Frankin *et al.* [11] määrittämät rejektion arvot uudelle kapillaarimoduulille ja Dow Chemicalsin valmistamille NF-45 ja NF-70 spiraalimoduuleille. Ensimmäinen lukuarvo kapillaarimoduulille viittaa pintaveden ja jälkimmäinen heran käsittelyssä käytettyyn moduuliin

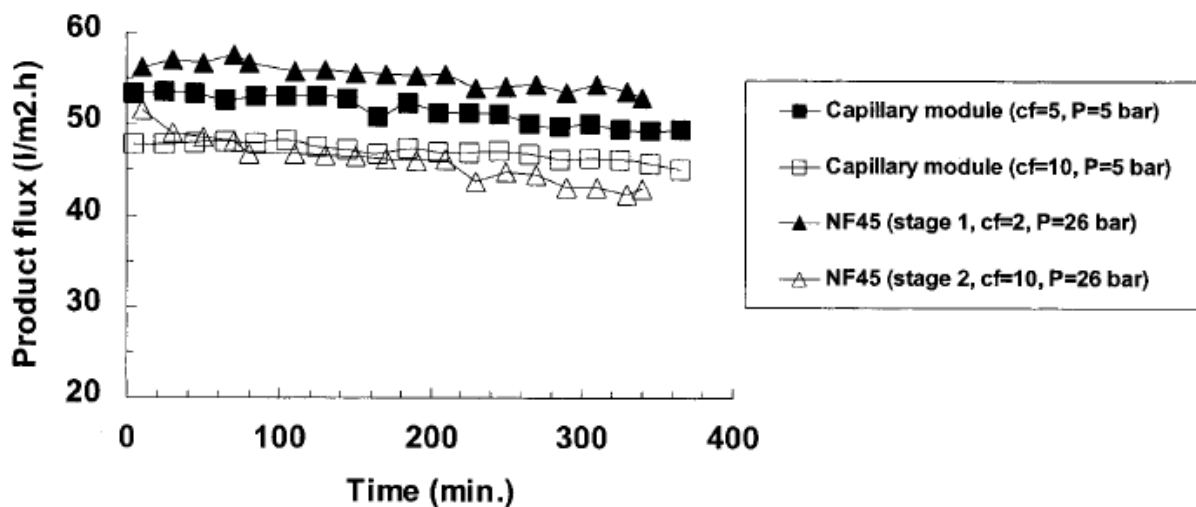
	Kapillaarimoduuli	Spiraalimoduulit	
		NF-45	NF-70
Puhtaan veden vuo ($L/(m^2 \text{ h bar})$)	22/22	4	11
<i>Rejektio</i>			
NaCl	40/40	45	88
CaCl ₂	92/96	90	
Na ₂ SO ₄	70/75	>99	
MgSO ₄	98/99	>99	
Glukoosi	80/80	96	

Selvittääkseen foulingin vaikutusta moduulien toimintaan, Frank *et al.* [11] suodatti joesta otettua pintavettä kapillaarimoduulilla sekä NF-70 spiraalimoduulilla. Kokeen alussa molempien moduulien vuot säädettiin yhtä suuriksi ($110 L/(m^2 \text{ h bar})$), mutta kuten kuvasta 12 nähdään, niiden arvot laskivat nopeasti kokeen aloittamisen jälkeen. Vuon pienenemisen havaittiin kuitenkin olevan selvästi voimakkaampaa käytettäessä spiraalimoduulia. Kuuden tunnin toiminnan jälkeen, jolloin kapillaarimoduulin vuo oli noin $50 L/(m^2 \text{ h bar})$ ja spiraalimoduulin vain noin $20 L/(m^2 \text{ h bar})$, molemmat moduulit puhdistettiin Ultrasil 10-puhdistusaineella. Kapillaarimoduulin vuo palasin noin 88 prosenttiin ja spiraalimoduulin noin 78 prosenttiin alkuarvosta. Frankin *et al.* [11] mukaan kapillaarimoduulin rakenne saattaa mahdollistaa tehokkaamman puhdistuksen kuin spiraalimoduulin rakenne.



Kuva 12 Permeaattivuon muutokset ajan suhteen kun uudella kapillaarimoduulilla ja Dow Chemicalsin NF-70 spiraalimoduulilla suodatettiin joesta otettua pintavettä [11]

Frank *et al.* [11] vertasivat heran suodatuksessa uutta kapillaarimoduulia NF-45 spiraalimoduuliin joita oli kytketty kaksi sarjaan. Kapillaarimoduulille suoritettiin kaksi koeajoa käyttäen konsentrointisuhteita (c_f) 5 ja 10. Spiraalimoduulille suoritettiin yksi koeajo, jossa ensimmäisessä vaiheessa c_f oli 2 ja toisessa 5, jolloin kokonaiskonsentrointisuhteeksi tuli 10. Kuten kuvasta 13 nähdään, konsentrointisuhteen arvolla 10 NF-45 spiraalimoduulin permeaattivuo oli likimain samansuuruinen kuin kapillaarimoduulilla, vaikka käytetty paine oli yli viisinkertainen. Frankin *et al.* mukaan vaaditut investointi ja energiakustannukset ovat selvästi alhaisemmat käsiteltäessä heraa kapillaarimoduulilla kuin NF-45 spiraalimoduulilla.

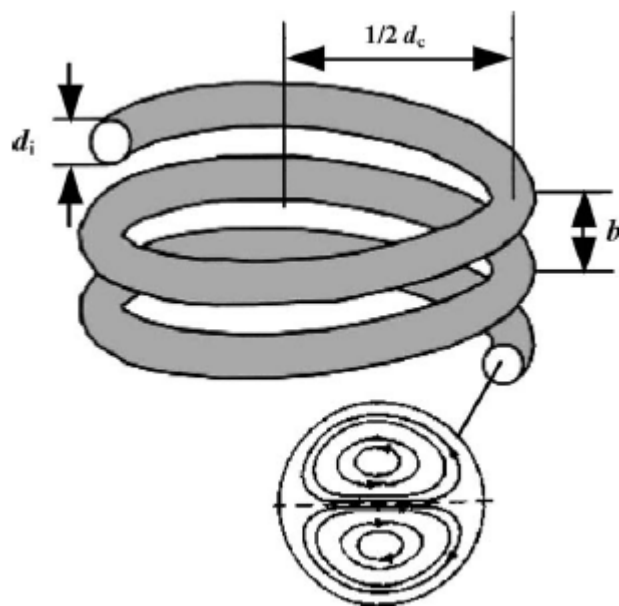


Kuva 13 Permeaattivuot ajan suhteen suodatettaessa heraa Dow Chemicalsin NF-45 spiraalimoduulilla ja uudella kapillaarimoduulilla [11]

Saatujen tulosten perusteella Frank *et al.* totesivat uuden kapillaarimoduulin olevan erotustehokkuudeltaan samaa luokkaa spiraalimoduuleiden kanssa joita on tavallisesti käytetty vedenpehmenyksessä ja värinpoistossa. Kapillaarimoduulilla saavutettu permeaattivuo oli kuitenkin selvästi suurempi kuin perinteisillä spiraalimoduuleilla, kuten Dow Chemicalsin NF-45:llä. Frankin *et al.* [11] mukaan tiiviimpien nanosuodatus membraanien kehitys on tulevaisuudessa kuitenkin tarpeen, jotta kapillaarimoduulilla voitaisiin poistaa suoloja (yksiarvoisia ioneja) yhtä tehokkaasti kuin NF-70 spiraalimoduulilla ilman, että permeaattivuo kuitenkaan laskee.

4.4.2 Deanin pyörteet aineensiirron parantamisessa

Fluidin virratessa kaarevassa putkessa keskipakoisvoima aiheuttaa putken keskiosassa virtaavaan fluidin ajautumisen kohti putken ulkoseinää. Tämä synnyttää paine-eron putken ulko- ja sisäseinän välillä, jonka seurauksena putken ulkoseinällä oleva fluidi virtaa putken sisäpintaa pitkin sen sisäseinälle. Tällöin putken poikkileikkauksen halki muodostuu kaksi vastakkaisiin suuntiin pyörivää pyörrettä (kuva 14) [12]. Kuakuvin *et al.* [13] mukaan muodostuneita sivuvirtauksia kutsutaan Deanin pyörteiksi ne ensimmäisenä vuonna 1928 havainneen englantilaisen W. R. Deanin mukaan.



Kuva 14 Deanin pyörteet kaarevassa putkessa [12]

Deanin pyörteiden voimakkuutta voidaan kuvata dimensiottomalla parametrilla, Deanin luvulla:

$$De = Re \sqrt{\frac{d_i}{d_c}} \quad (1)$$

jossa Re on Reynoldsin luku (-), d_i virtauskanavan sisähalkaisija (m) ja d_c kaarevuushalkaisija (m). Kierteisen virtauskanavan jaotuksen b (m) (kuva 14) huomioimiseksi voidaan käyttää ns. modifioitua Deanin lukua:

$$De' = gRe \quad (2)$$

jossa

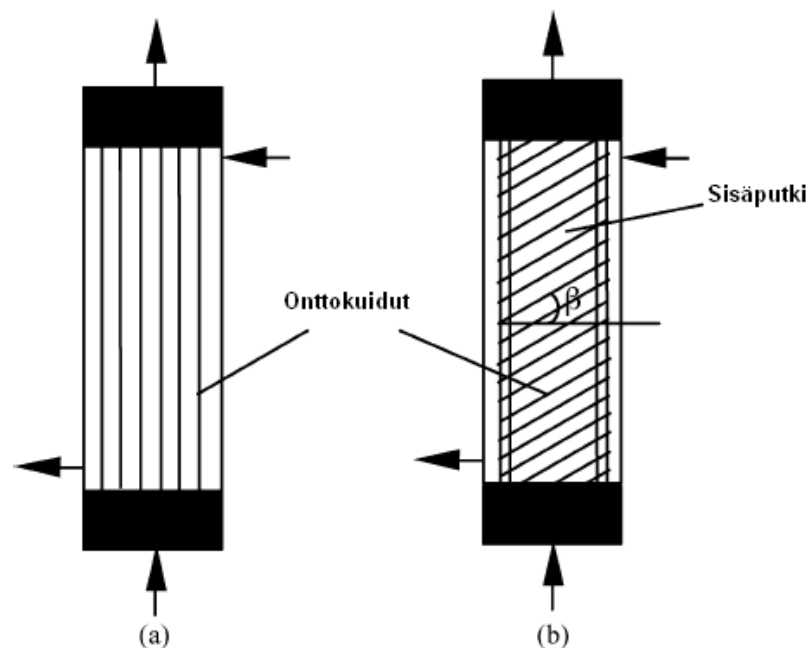
$$g = \sqrt{\frac{d_i}{d_c [1 + (b/\pi d_c)^2]}} \quad (3)$$

4.4.2.1 Kierukkamaiset moduulit

Deanin pyörteiden aiheuttamaa fluidin sekoittumista voidaan käyttää apuna aineensiirron parantamisessa kapillaarimoduuleissa, sillä se ehkäisee konsentraatiopolarisaatiota ja foulingia. Eniten tutkimusta on tehty moduuleilla, joissa membraanikuidut on asetettu kierukalle (*helically coiled*) kuvan 14 osoittamalla tavalla [14]. Käytettäessä kierukkamaista moduulia Mallubhotla *et al.* [19] havaitsivat permeaattivuossa 80 % kasvun ultrasuodatuksessa ja 100 % kasvun nanosuodatuksessa perinteiseen suoraan moduuliin verrattuna. Kokeet suoritettiin vakioenergiankulutuksella ja -virtausnopeudella. Moulin *et al.* [20] puolestaan huomasivat kolloidiliuosten ultrasuodatuksessa rajoittavan permeaattivuon olevan kaksinkertainen kierukkamaisella moduulilla suoraan moduuliin verrattuna, ja puolitoistakertainen makromolekyyliliuoksen ultrasuodatuksessa.

Kierukkamainen moduulirakenne ei paranna aineensiirtoa pelkästään membraanikuitujen sisäpuolella, vaan myös niiden ulkopuolella lisääntyneen turbulenssin ansiosta. Suurin osa kierukkamaisia moduuleja käsittelevistä tutkimuksista on kuitenkin keskittynyt yksinomaan aineensiirtoon membraanikuitujen sisäpuolella, ja vain muutama aineensiirtoon niiden ulkopuolella. Lisäksi näitä on yleensä tutkittu erillään. Tämän vuoksi Liu *et al.* [12] halusivat omassa tutkimuksessaan tarkastella näitä molempia ilmiöitä yhtä aikaa käytettäessä samaa moduulia. Lisäksi he pyrkivät selvittämään geometrinen parametrien kuten kuitujen kietomiskulman, kaarevuushalkaisijan ja kuitujen sisähalkaisijan merkitystä aineensiirtoon.

Tutkimuksia varten Liu *et al.* rakensivat kuusi kierukkamaista ja kolme suoraa membraanimoduulia. Kierukkamaisissa moduuleissa kuidut kiedottiin ruostumattomasta teräksestä valmistetun sisäputken (halkaisija 6 – 12 mm) ympärille tietyllä kietomiskulmalla tasavälein ja samansuuntaisesti. Kietomiskulmalla tarkoitetaan kulmaa, joka muodostuu kuidun ja moduulin vertikaalisen akselin välille, kun moduuli on pystyasennossa (kuva 15). Tällöin kietomiskulman β ollessa 90° on kyseessä perinteinen suora moduuli. Tarkemmat tiedot käytetyistä moduuleista on esitetty taulukossa V. Kokeet suoritettiin strippaamalla veteen liuennutta happea typpien. Aineensiirtoa kuitujen sisäpuolella tutkittaessa vesi virtasi kuitujen sisällä ja typpi vastakkaiseen suuntaan niiden ulkopuolella. Tutkittaessa aineensiirtoa kuitujen ulkopuolella vesi virtasi kuitujen ulkopuolella ja typpi sisäpuolella.

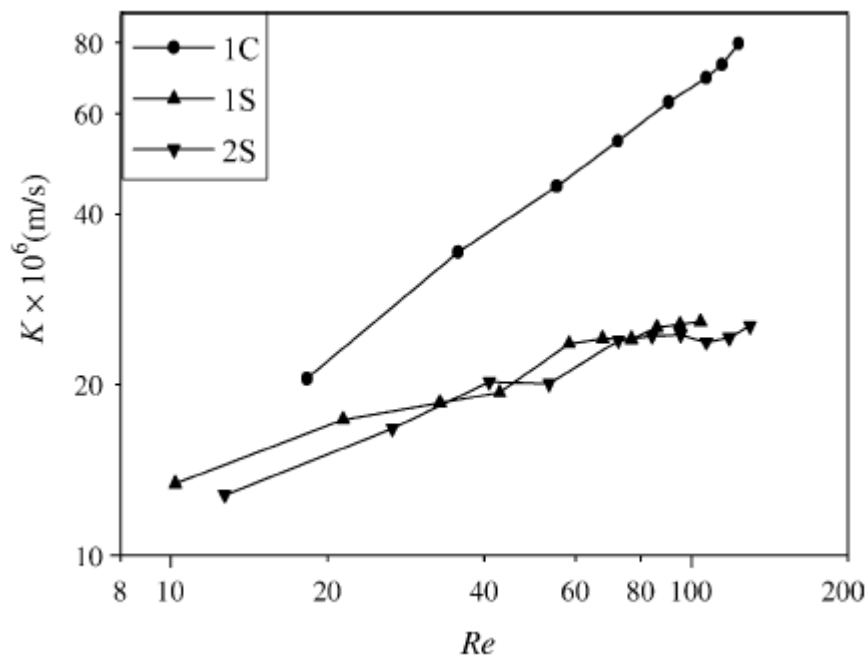


Kuva 15 Rakennekuva (a) suorasta ja (b) kierukkamaisesta moduulista [12]

TAULUKKO V Liun *et al.* [12] tutkimien moduulien ominaisuudet. Moduulien parametrit: d_i membraanikuitujen sisähalkaisija, d_o membraanikuitujen ulkohalkaisija ja d_c membraanikuitujen kaarevuushalkaisija.

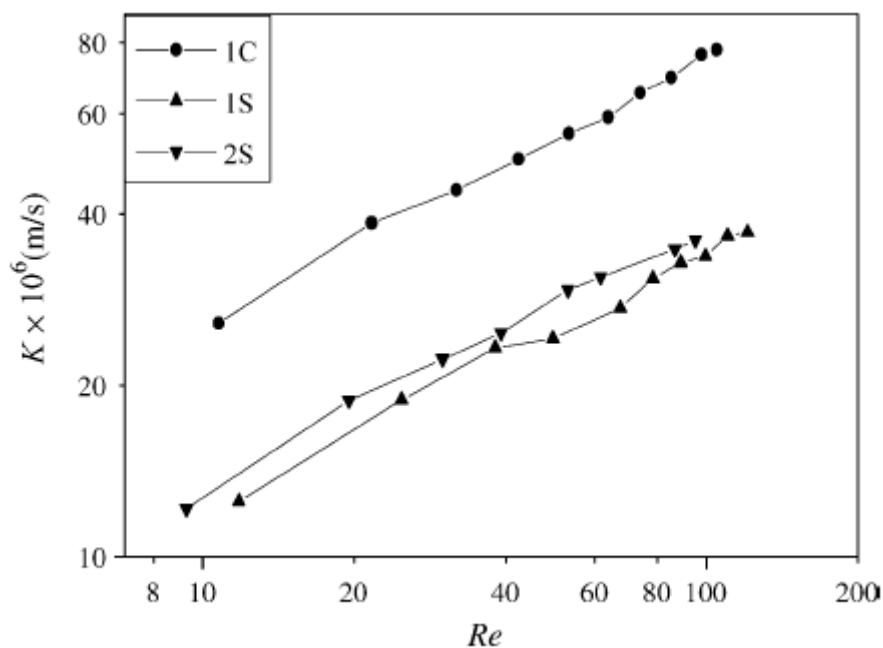
Geometria	No.	d_i-d_o (mm)	d_c (mm)	Tehollinen pituus (mm)	Kuitujen lukumäärä	Pakkaus osuus (%)	Pinta-ala ($\times 10^2 \text{ m}^2$)	Kietomis- kulma β
Kierukka	1C	0.5-0.7	6	170	54	34.8	2.89	45°
	2C	0.8-1.1	6	140	15	33.6	1.45	30°
	3C	0.8-1.1	6	198	15	23.8	1.45	45°
	4C	0.8-1.1	6	242	15	19.4	1.45	60°
	5C	0.8-1.1	8	198	15	23.8	1.45	45°
	6C	0.8-1.1	12	198	15	23.8	1.45	45°
Suora	1S	0.5-0.7	-	200	61	29.9	2.68	90°
	2S	0.5-0.7	-	200	82	40.2	3.60	90°
	3S	0.8-1.1	-	280	15	16.8	1.45	90°

Kuten kuvasta 16 nähdään, aineensiirto kuitujen sisäpuolella oli huomattavasti tehokkaampaa kierukkamaisella moduulilla kuin suorilla moduuleilla. Samalla Reynoldsin luvun arvolla kierukkamaisen moduulin aineensiirtokertoimet olivat 2 – 3.5-kertaisia suoriin moduuleihin verrattuna. Ero oli sitä suurempi mitä suurempaa Reynoldsin lukua käytettiin. Liun *et al.* mukaan syynä tähän voidaan pitää Deanin pyörteiden voimistumista Reynoldsin luvun kasvaessa.



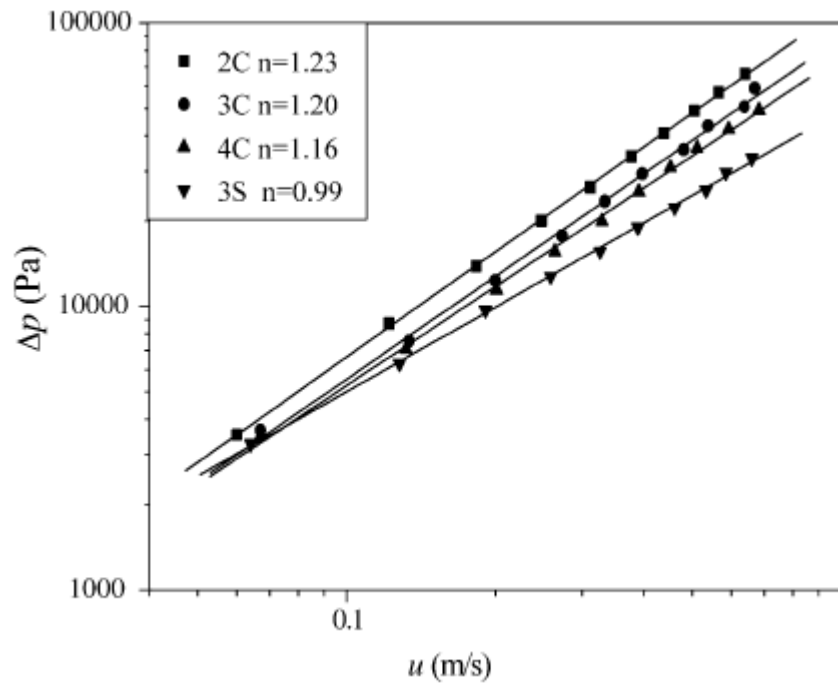
Kuva 16 Aineensiirtokertoimet membraanikuitujen sisäpuolella eri Reynoldsin luvun arvoilla kierukkamaisella (1C) ja kahdella suoralla (1S & 2S) moduulilla [12]

Myös kuitujen ulkopuolella aineensiirron todettiin olevan tehokkaampaa kierukkamaisella moduulilla; sillä saavutettavat aineensiirtokertoimet olivat yli 2.2-kertaisia suoriin moduuleihin verrattuna (kuva 17). Liun *et al.* mukaan tämä johtuu suotuisammista virtausolosuhteista kierukkamaisessa moduulissa. Suorissa moduuleissa neste virtaa membraanikuitujen suuntaisesti mikä saattaa aiheuttaa virtauksen kanavoitumista. Kierukkamaisessa moduulissa tätä ilmiötä ehkäisee kuitujen vino asento nesteen virtaussuuntaan nähden, mikä lisää nesteen sekoittumista. Kuvat 16 ja 17 osoittavat että aineensiirtoa voidaan samanaikaisesti parantaa sekä kuitujen sisä- että ulkopuolella.

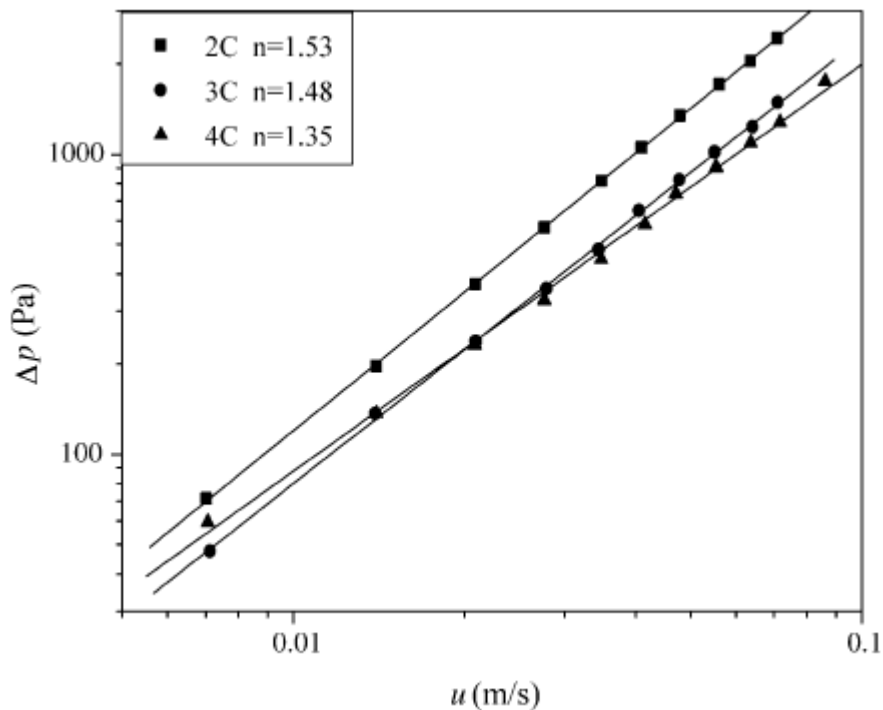


Kuva 17 Aineensiirtokertoimet membraanikuitujen ulkopuolella eri Reynoldsin luvun arvoilla kierukkamaisella (1C) ja kahdella suoralla (1S & 2S) moduulilla [12]

Liu *et al.* mittasivat painehäviöt membraanikuitujen sisäpuolella, kun kierukkamaisissa moduuleissa käytettiin eri kuitujen kietomiskulmia. Tulokset on esitetty kuvissa 18. Kierukkamaisissa moduuleissa painehäviöt olivat suuremmat kuin suorassa moduulissa johtuen Deanin pyörteiden aiheuttamasta ylimääräisestä virtausvastuksesta. Lisäksi virtausnopeuden lisääntyessä painehäviöt kasvoivat kierukkamaisissa moduuleissa nopeammin kuin suorassa moduulissa. Tuloksista nähdään myös Deanin pyörteiden olevan sitä heikompia mitä suurempaa kietomiskulmaa käytetään. Mitattaessa painehäviöitä kuitujen ulkopuolella saatiin vastaavanlaisia tuloksia (kuva 19).

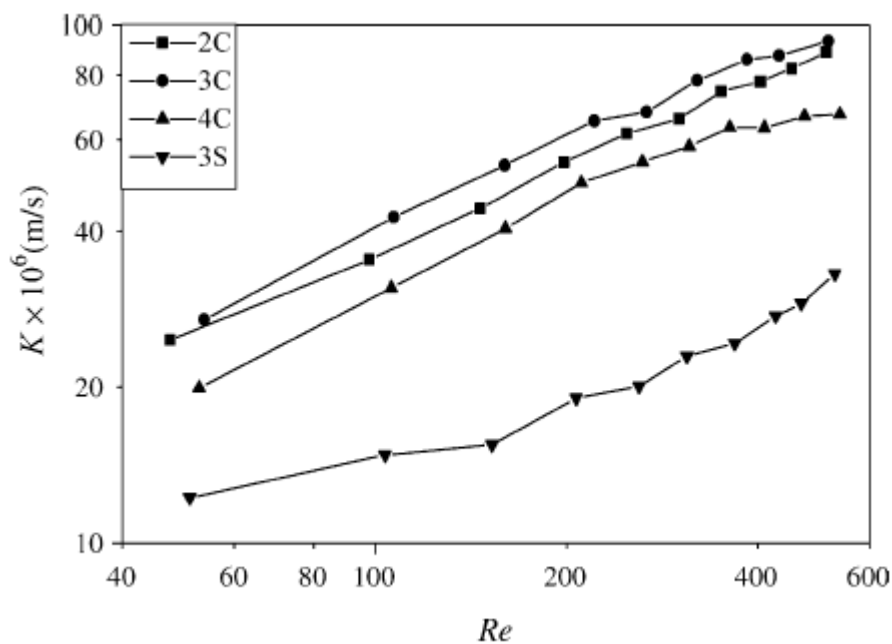


Kuva 18 Painehäviöt membraanikuitujen sisäpuolella eri virtausnopeuksilla. Kierukkamaisten moduulien kietomiskulmat olivat 30° (2C), 45° (3C) ja 60° (4C). n on eksponentti painehäviön ja virtausnopeuden välistä korrelaatiota kuvaavassa yhtälössä $\Delta p = au^n$. [12]

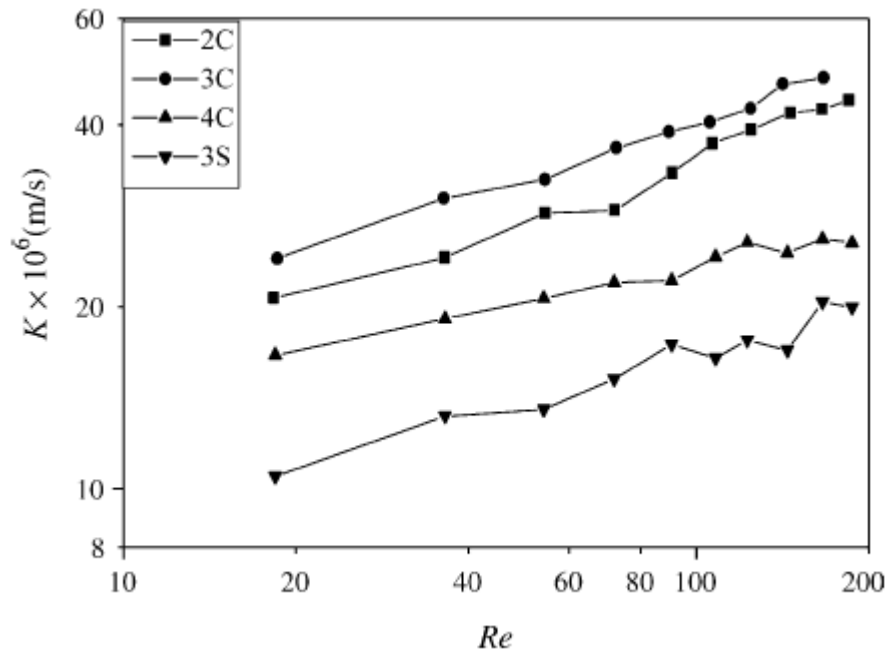


Kuva 19 Painehäviöt membraanikuitujen ulkopuolella eri virtausnopeuksilla. Kierukkamaisten moduulien kietomiskulmat olivat 30° (2C), 45° (3C) ja 60° (4C). n on eksponentti painehäviön ja virtausnopeuden välistä korrelaatiota kuvaavassa yhtälössä $\Delta p = au^n$. [12]

Selvittääkseen kuitujen kietomiskulman vaikutusta aineensiirtoon, Liu *et al.* vertasivat keskenään kolmea kierukkamaista ja yhtä suoraa moduulia, joiden kaikkien membraanipinta-
alat olivat yhtä suuret. Kuten kuvista 20 ja 21 nähdään, aineensiirto oli tehokkaampaa kaikilla
kierukkamaisilla moduuleilla kuin suoralla moduulilla. Kierukkamaisista moduuleista
aineensiirto oli tehokkainta, niin kuitujen sisä- kuin ulkopuolellakin, moduulilla jossa kuitujen
kietomiskulma oli 45°. Lisäksi moduulilla, jossa kuitujen kietomiskulma oli 30°, aineensiirto
oli tehokkaampaa kuin moduulilla, jossa kietomiskulma oli 60°. Liun *et al.* mukaan syy tähän
löytyy kietomiskulman ja pakkaustiheyden aiheuttamasta yhteisvaikutuksesta aineensiirtoon:
yleisesti ottaen aineensiirto tehostuu kietomiskulman pienentyessä, mutta heikentyy
pakkaustiheyden kasvaessa. Pakkaustiheyden kasvu on puolestaan seurausta kietomiskulman
pienemisestä. Tämän vuoksi aineensiirto oli tehokkainta, kun kietomiskulma oli 45°.
Tällöin myös painehäviöt olivat kohtalaiset, kuten kuvista 18 ja 19 nähtiin. On kuitenkin
huomattava, että ero aineensiirtotehokkuuksissa kuitujen kietomiskulmien ollessa 45° ja 30°
ei ole kovin suuri. Koska pienemmällä kietomiskulmalla saavutettava pakkaustiheys on
suurempi, myös pääomakustannukset sillä ovat pienemmät. Tämän vuoksi on vaikea sanoa,
kumpi kietomiskulma olisi kannattavampi kokonaisuutta ajatellen todellisessa
teollisuusprosessissa.

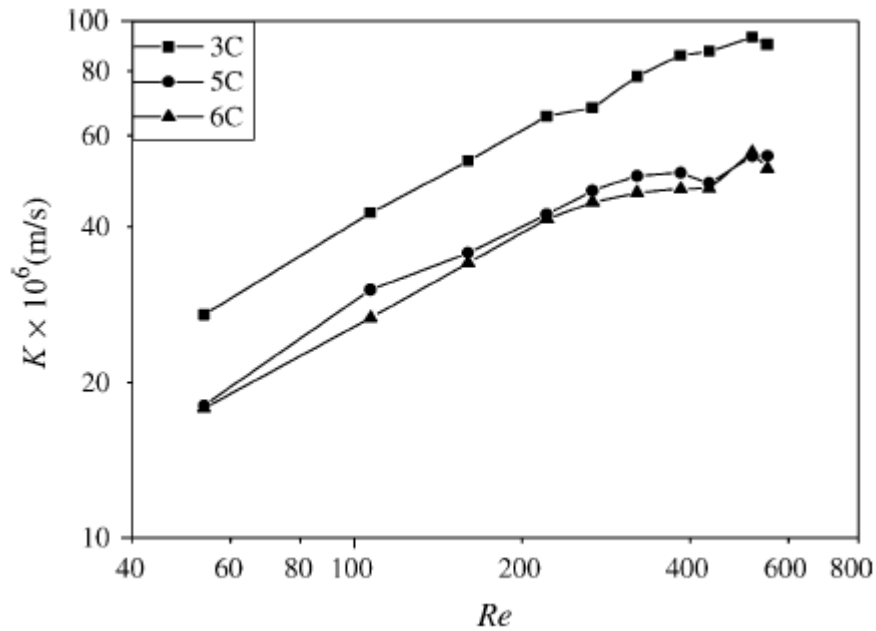


Kuva 20 Aineensiirtokertoimet membraanikuitujen sisäpuolella eri Reynoldsin luvun arvoilla. Kierukkamaisten moduulien kietomiskulmat olivat 30° (2C), 45° (3C) ja 60° (4C). [12]



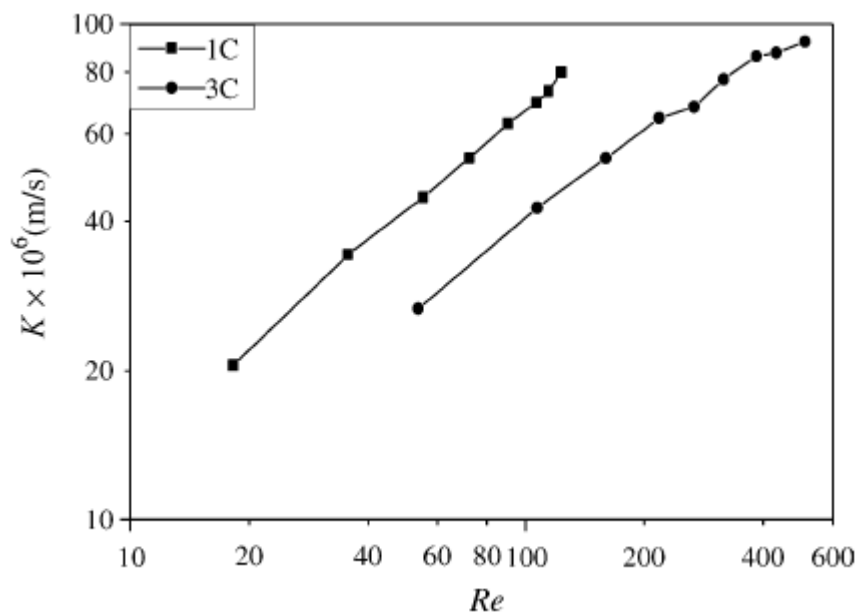
Kuva 21 Aineensiirtokertoimet membraanikuitujen ulkopuolella eri Reynoldsin luvun arvoilla Kierukkamaisten moduulien kietomiskulmat olivat 30° (2C), 45° (3C) ja 60° (4C). [12]

Membranikuitujen kaarevuushalkaisijan vaikutusta aineensiirtoon Liu *et al.* tutkivat rakentamalla kolme kierukkamaista moduulia, joissa kuitujen pituus, sisähalkaisija ja kietomiskulma olivat samoja, mutta kaarevuushalkaisijat vaihtelivat. Kuten kuvasta 22 nähdään, aineensiirto oli sitä tehokkaampaa mitä pienempää kaarevuushalkaisijaa käytettiin. Liun *et al.* mukaan tämä johtuu voimakkaammasta keskipakovoimasta pienemmällä kaarevuushalkaisijalla, mikä synnyttää voimakkaampia rinnakkaisvirtauksia. Koska käytettyjen kuitujen pituus oli sama kaikissa moduuleissa, kuidulle tuli enemmän kierroksia sisäputken ympärille käytettäessä pienempää kaarevuushalkaisijaa. Tällöin liuos sentrifugoituu useammin moduulin sisällä ja aineensiirto on tehokkaampaa.



Kuva 22 Aineensiirtokertoimen arvot eri Reynoldsin luvun arvoilla. Kierukkamaiset moduulit vastasivat muuten toisiaan, mutta niiden kaarevuushalkaisijat vaihtelivat seuraavasti: 6 mm (3C), 8 mm (5C) ja 12 mm (6C). [12]

Kuitujen sisähalkaisijan vaikutusta aineensiirtoon Liu *et al.* tutkivat kahdella kierukkamaisella moduulilla, joissa kuitujen kietomiskulma oli sama. Kuten myös suoralla moduulilla, kierukkamaisilla moduuleilla saavutetaan tehokkaampi aineensiirto kun käytetään kuituja joiden halkaisija on pienempi (kuva 23).

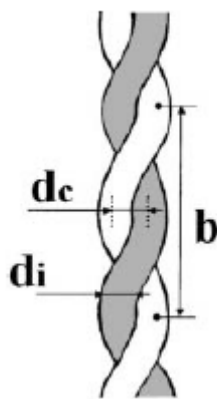


Kuva 23 Aineensiirtokertoimen arvot eri Reynoldsin luvun arvoilla. Kierukkamaisten moduulien kuitujen sisähalkaisijat olivat 0.5 mm (1C) ja 0.8 mm (3C). [12]

Huomattavaa on, että Liu *et al.* tutkima aineensiirtoprosessi oli strippaus – ei ultrasuodatus, nanosuodatus tai käänteisosmoosi. Aineensiirrossa näiden prosessien välillä on joitakin eroja. Esimerkiksi Liu *et al.* oletti strippauksessa koko aineensiirtovastuksen johtuvan vesifaasista josta happea siirrettiin tyypen. UF-, NF- ja RO-prosesseissa itse membraaninkin tiedetään kuitenkin aiheuttavan aineensiirtovastusta. Lisäksi konsentraatiopolarisaation ja foulingin vaikutusta aineensiirtoon ei ole voitu selvittää, vaikka ne ovat kuitenkin yleensä isoimmat aineensiirtoa rajoittavat tekijät UF-, NF- ja RO-prosesseissa. Tämän vuoksi myöskään rajoittavan vuon suuruutta tai vuon muutosta ajansuhteen ei ole voitu tutkia. Mekanismi joka Liun *et al.* suorittamissa strippaukskokeissa paransi aineensiirtoa (lisääntynyt turbulenssi) on kuitenkin sama jonka tiedetään ehkäisevän myös konsentraatiopolarisaatiota ja foulingia. Tämän vuoksi voidaan olettaa, että kierukkamaisen moduulin geometrian vaikutus aineensiirtoon on samankaltainen UF-, NF- ja RO-prosesseissa kuin strippauksessakin.

4.4.2.2 Muut moduuligeometrit

Kierukkamoduulin eduista huolimatta sillä on myös kaksi huonoa puolta: sillä saavutettava pakkaustiheys ei ole suuri, ja se lisää membraanikuituihin kohdistuvaa mekaanista jännitystä [13]. Näiden ongelmien välttämiseksi muita mahdollisia moduuligeometrioita on alettu tutkia. Kuakivi *et al.* [13] ovat tutkineet moduulia, jossa on käytetty pareittain punottuja membraanikuituja (kuva 24), ja verranneet sitä kierukkamaiseen sekä suoraan moduuliin joita Moulin *et al.* [20] ovat käyttäneet omissa tutkimuksissaan. Näiden moduulien ominaisuudet on esitetty taulukossa VI. Membraanikuituina käytettiin ranskalaisen Aquasourcen BCDA 68 selluloosa-asetaatti kapillaareja ja suodatuskokeet tehtiin Dextran DT2000 liuoksella.

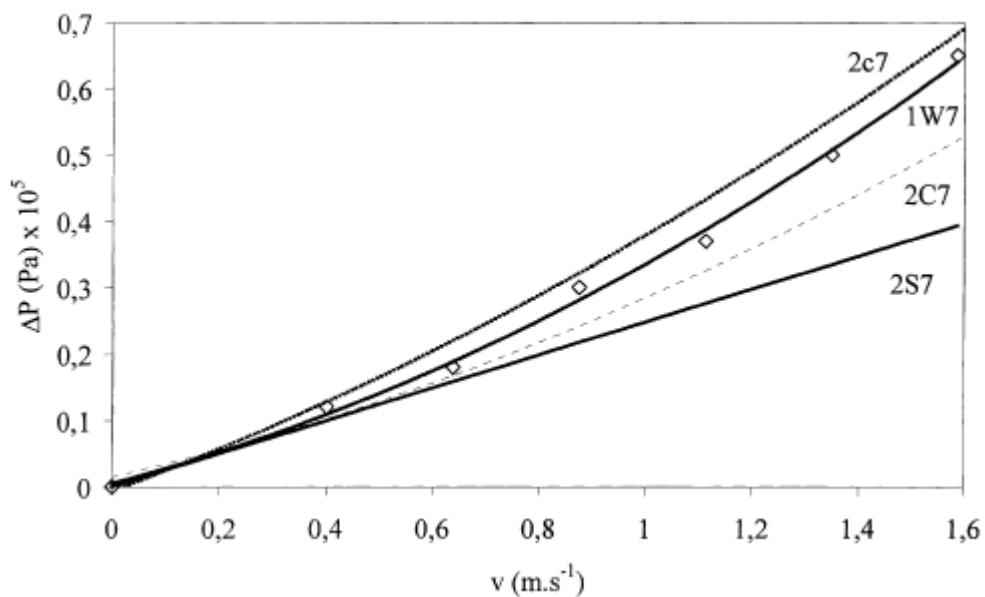


Kuva 24 Rakennekuva punotusta membraanimoduulista [13]

TAULUKKO VI Kuakuvin *et al.* [13] ja Moulinin *et al.* [20] käyttämien moduulien ominaisuudet. Kuitujen parametrit: l_t kokonaispituus, l_A tehollinen pituus, d_i sisähalkaisija, d_c kaarevuushalkaisija ja b jakoväli.

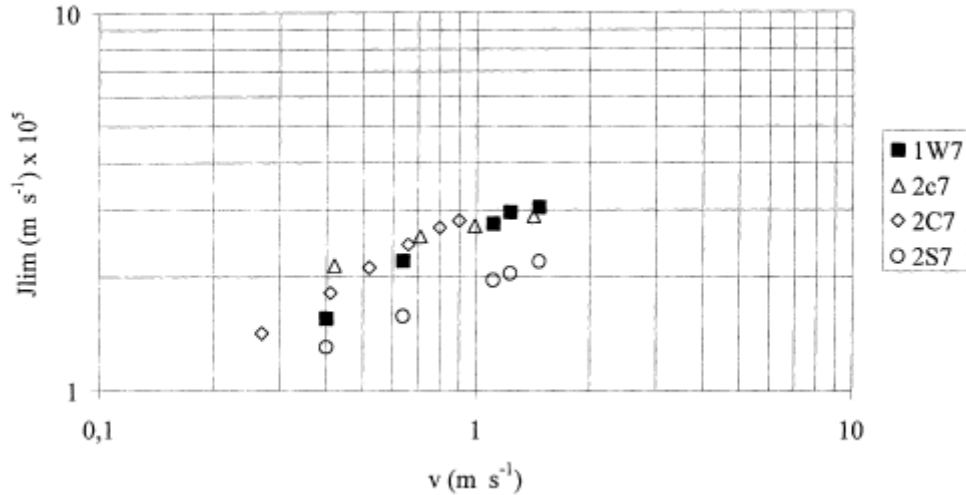
Nimi	Geometria	l_t (m)	l_A (m)	Kuitujen lukumäärä	d_i (mm)	Membraanipinta-ala [(m ²) × 100]	d_c (mm)	b (cm)
1W7	Punottu	0.36	0.28	12	0.70	0.73	1.2	7.5
2c7	Kierukka	0.24	0.23	5	0.70	0.25	41	0.6
2C7	Kierukka	0.48	0.47	20	0.70	2.05	110	1
2S7	Suora	0.57	0.47	20	0.70	2.05	-	-
2S7'	Suora	0.40	0.30	17	0.70	1.14	-	-

Kuvassa 25 on esitetty Kuakuvin *et al.* kokeellisesti määrittämät painehäviöt punotulle moduulille, sekä laskennalliset arvot Moulinin *et al.* [20] käyttämille suoralle ja kierukkamaiselle moduulille. Deanin pyörteiden vuoksi painehäviöt ovat odotetusti suuremmat kierukkamaisissa ja punotussa moduulissa kuin suorassa moduulissa. Niin ikään painehäviöt ovat suuremmat 2c7 kierukkamoduulissa kuin 1W7 punotussa moduulissa. Kuakuvin *et al.* mukaan 2C7 kierukkamoduulin pientä painehäviötä ei voida automaattisesti pitää myönteisenä ominaisuutena, sillä syy siihen löytyy moduulin suuresta kierukkahalkaisijasta (d_c). Teollisissa sovellutuksissa painehäviöiden tulee olla pienet yhdessä kierukkahalkaisijan kanssa, mikä Kuakuvin *et al.* mukaan tekee punotusta moduulista näistä vaihtoehdoista houkuttelevimman.



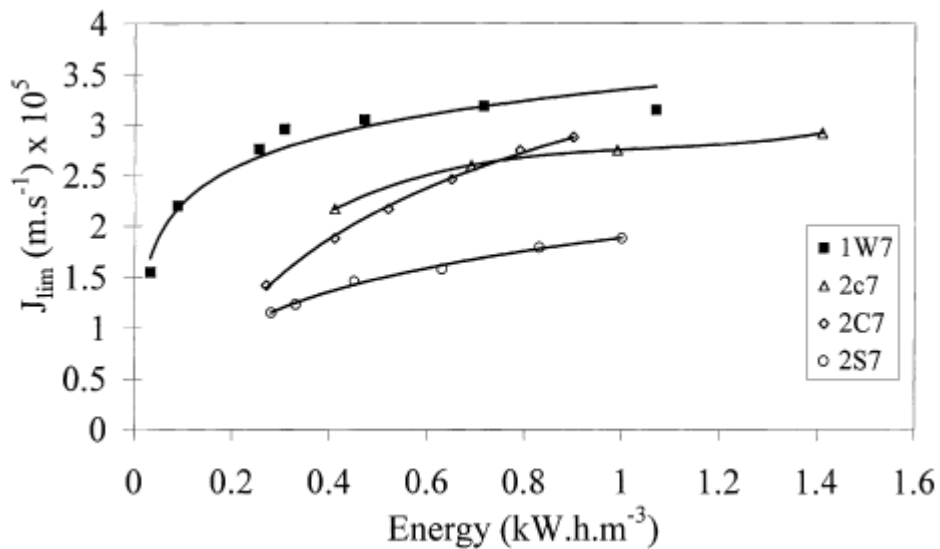
Kuva 25 Kokeellinen painehäviö punotulle moduulille (1W7), sekä teoreettiset arvot Moulinin *et al.* tutkimalle suoralle (2S7) ja kahdelle kierukkamaiselle (2c7 & 2C7) moduulille [13]

Rajoittavan permeaattivuon riippuvuus käytetystä ristivirtausnopeudesta eri moduuligeometrioilla on esitetty kuvassa 26. Kuten havaitaan, punotulla moduulilla rajoittavat vuot ovat selvästi suuremmat kuin suoralla moduulilla.



Kuva 26 Rajoittavan vuon riippuvuudet ristivirtausnopeudesta suoralla (2S7), punotulla (1W7) ja kahdella kierukkamaisella (2c7 & 2C7) moduulilla (Dextran liuos, $C = 1 \text{ g kg}^{-1}$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) [13]

Kuvassa 27 on esitetty rajoittavan permeaattivuon riippuvuus energiankulutuksessa. Punottu moduuli osoittautui selvästi tehokkaimmaksi: tietyllä energiankulutuksella sillä saavutettava rajoittava vuo on suurin. Ero punotun ja kierukkamaisen moduulin välillä on selvä.



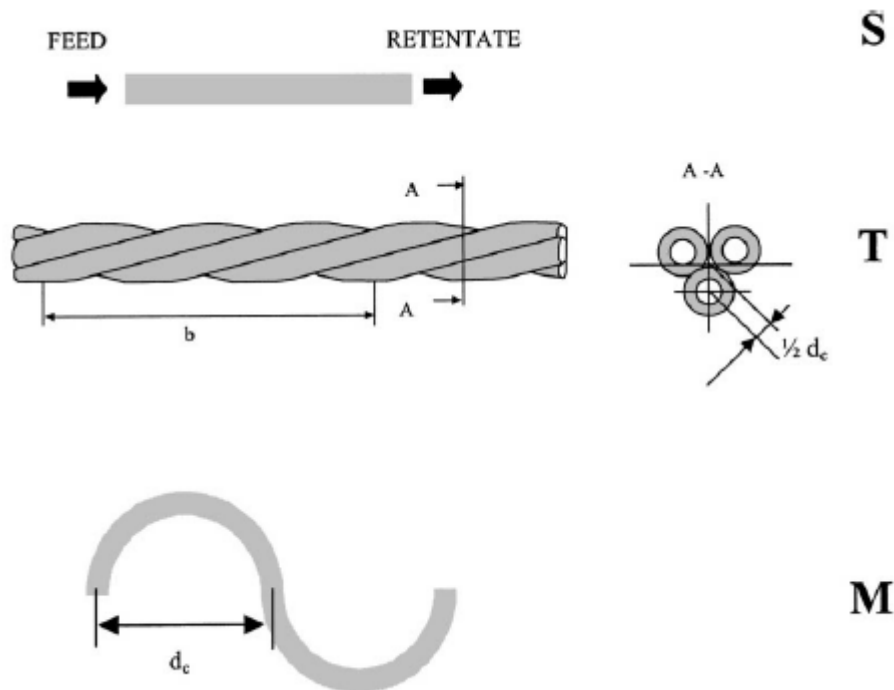
Kuva 27 Rajoittavan vuon riippuvuudet energiankulutuksesta suoralla (2S7), punotulla (1W7) ja kahdella kierukkamaisella (2c7 & 2C7) moduulilla (Dextran liuos, $C = 1 \text{ g kg}^{-1}$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) [13]

Kuakuvin *et al.* tekemä yhteenveto saatujen tulosten perusteella on esitetty taulukossa VII. Heidän mukaansa suuria kierukkamaisia moduuleja ei ole vielä testattu, ja sellaisen rakentaminen vaatisi kuitujen tukemista moduulin sisällä. Punotussa moduulissa kuitujen tukeminen ei ole tarpeen. Lisäksi punotulla moduulilla voidaan saavuttaa suurempi pakkaustiheys kuin kierukkamaisella moduulilla, mikä on huomattava etu teollisissa sovellutuksissa. [13]

TAULUKKO VII Kuakuvin *et al.* esittämä kierukkamaisen ja punotun moduulin vertailu [13]

Geometria	Aineensiirto	Energiankulutus	Pakkaustiheys	Membraanin jännitys
Kierukkamainen	++	++	+	++
Punottu	++	+	++	+

Myös Ghogomu *et al.* [14] ovat tutkineet erilaisia kaarevia moduuligeometrioita. He vertasivat ultrasuodatuksessa keskenään neljää moduuligeometriaa, jotka olivat suora (*straight, S*), kierukkamainen (*helically coiled, H*), punottu (*twisted, T*) ja mutkitteleva (*meander-shaped, M*) (kuva 28).



Kuva 28 Rakennekuva eri membraanimoduuleista: suora (*straight, S*), punottu (*twisted, T*) ja mutkitteleva (*meander-shaped, M*) [14]

Ghogomun *et al.* käyttämät membraanikuidut olivat myös ranskalaisen Aquasourcen valmistamia. Kuitujen sisähalkaisija oli 0.93 mm ja ulkohalkaisija 1.67 mm. Jokainen moduuleista sisälsi yhdeksän kuitua ja moduulit oli suunniteltu niin, että kaikkien g arvo (yhtälö (3)) oli sama. Tällöin tietyllä Reynoldsin luvun arvolla kaikkien moduulien Deanin luku oli yhtä suuri. Tutkittujen moduulien ominaisuudet on esitetty taulukossa VIII. Suodatuskokeet tehtiin kahdella bentoniittiliuoksella joiden pitoisuudet olivat 3.3 g kg^{-1} ja 10 g kg^{-1} , ja viskositeetit 20 °C lämpötilassa vastaavasti $1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ja $1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Käytetyt ristivirtausnopeudet olivat välillä $0.4 - 0.6 \text{ m s}^{-1}$ jolloin oltiin laminaarilla alueella. Kaikki kokeet suoritettiin vakiopaineella ja -virtausnopeudella 20 °C lämpötilassa.

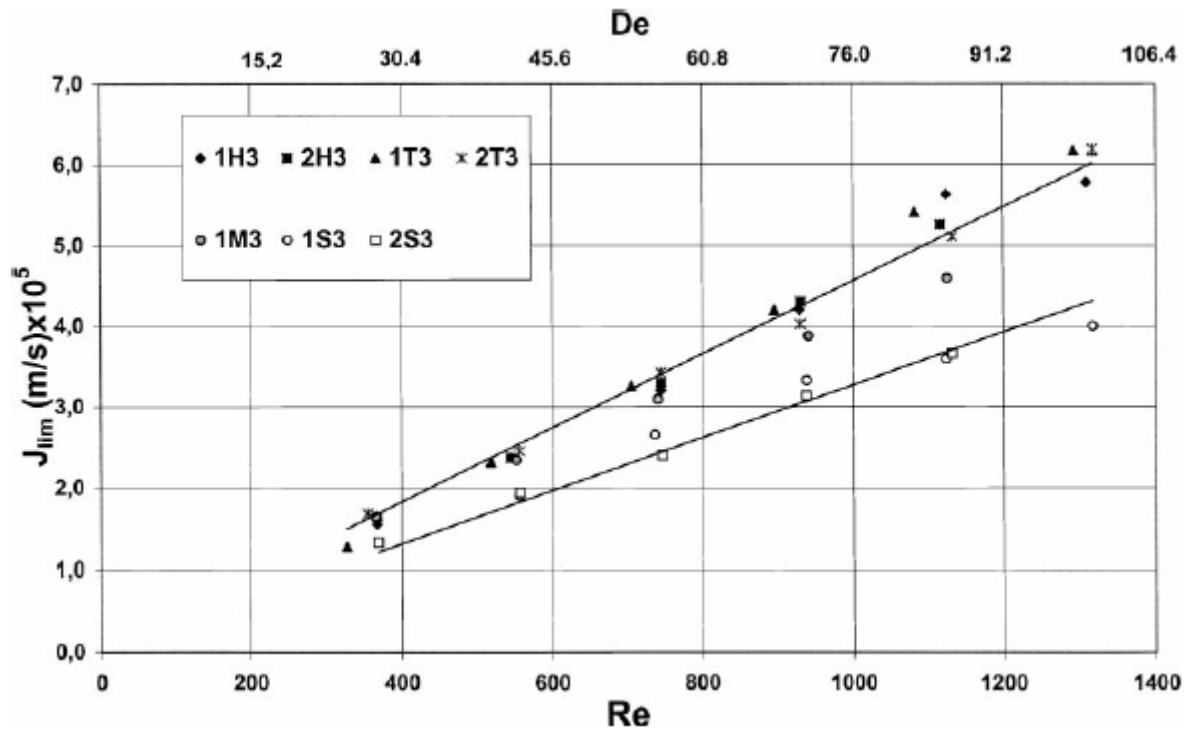
TAULUKKO VIII Ghogomun *et al.* tutkimien membraanimoduulien geometriset parametrit^a [14]

Nimi	Geometria	Tehollinen pituus l_U (cm)	Tehollinen pinta-ala $S \times 10^3$ (cm ²)	Kaarevuushalkaisija d_c (mm)	Jakoväli b (mm)	$g \times 10^2$
1S3	Suora	19	5.0	-	-	-
1H3	Kierukka	20	5.3	160	16	7.6
1T3	Punottu	20	5.3	1.9	55	7.6
1M3	Mutkitteleva	47	12.4	160	-	7.6
2S3	Suora	22	5.8	-	-	-
2H3	Kierukka	20	5.3	160	16	7.6
2T3	Punottu	20	5.3	1.9	55	7.6
3S10	Suora	20	5.3	-	-	-
3H10	Kierukka	20	5.3	160	16	7.6
3T10	Punottu	20	5.3	1.9	55	7.6

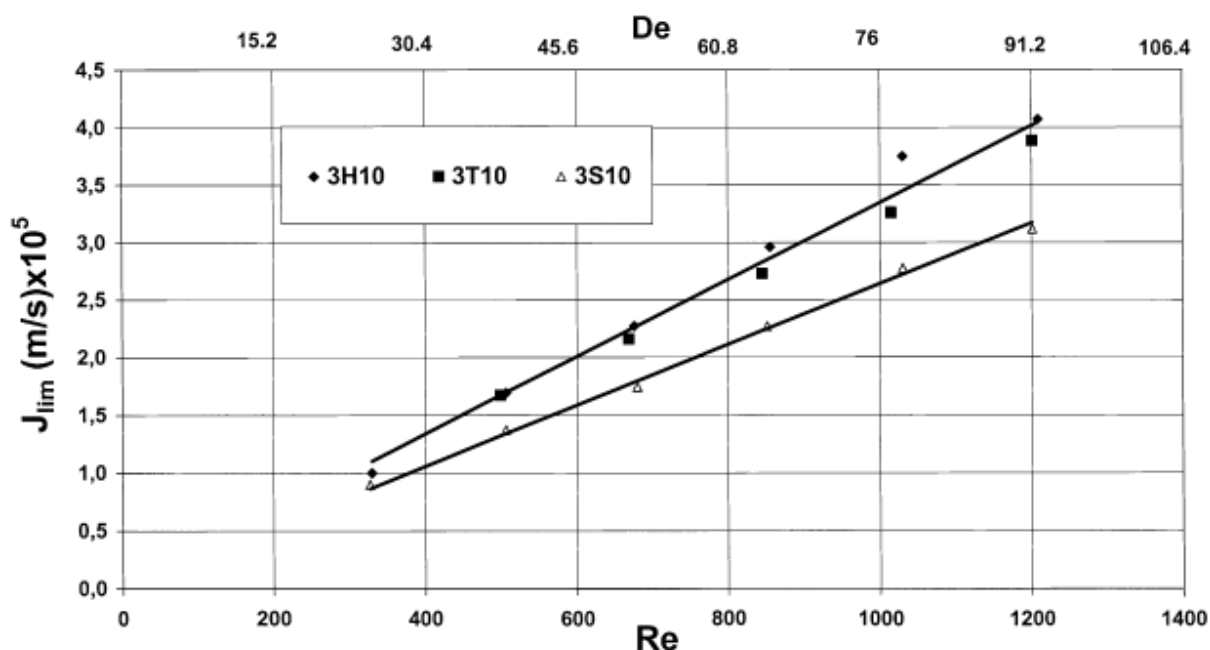
^a Moduulin geometriaa tarkoittavan kirjaintunnuksen edessä on moduulin sarjanumero, ja sen jälkeen bentoniittiliuoksen pitoisuus, 3 ja 10 tarkoittaa 3.3 g kg^{-1} ja 10 g kg^{-1} . Kuitujen keskihydraulinen permeabiliteetti 20 °C lämpötilassa oli $L_p = 6.1 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$.

Ghogomun *et al.* kokeissa rajoittavan vuon havaittiin riippuvaan lähes lineaarisesti käytetystä Reynoldsin ja Deanin luvusta syöttöliuoksen pitoisuudella 3.3 g kg^{-1} (kuva 29). Mielenkiintoinen huomio on, että kaikilla kaarevilla moduuleilla saatiin sama rajoittavan vuon arvo virhemarginaalin sisällä. Kaarevien moduulien rajoittavat vuot olivat noin 1.4-kertaisia suoraan moduuliin verrattuna samalla Reynoldsin luvun arvolla. Koska kaikkien moduulien g arvo oli sama, Ghogomun *et al.* mukaan voidaan selvästi todeta että yhtälöiden (2) ja (3) määrittelemä Deanin luku on oikea parametri kuvaamaan Deanin pyörteiden aiheuttamaa hydrodynaamista vaikutusta aineensiirtoon.

Vastaavanlaiset tulokset saatiin käsiteltäessä 10 g kg^{-1} liuosta (kuva 30), joskin ero kaarevien ja suorien moduulien rajoittavan vuon arvoissa ei ollut enää aivan yhtä suuri. Ghogomu *et al.* totesivat kuvien 29 ja 30 tukevan jo aiemmin tehtyjä havaintoja, joiden mukaan Deanin pyörteiden vaikutus aineensiirtoon alkaa, kun Deanin luku saavuttaa kriittisen arvon $De = 20$.



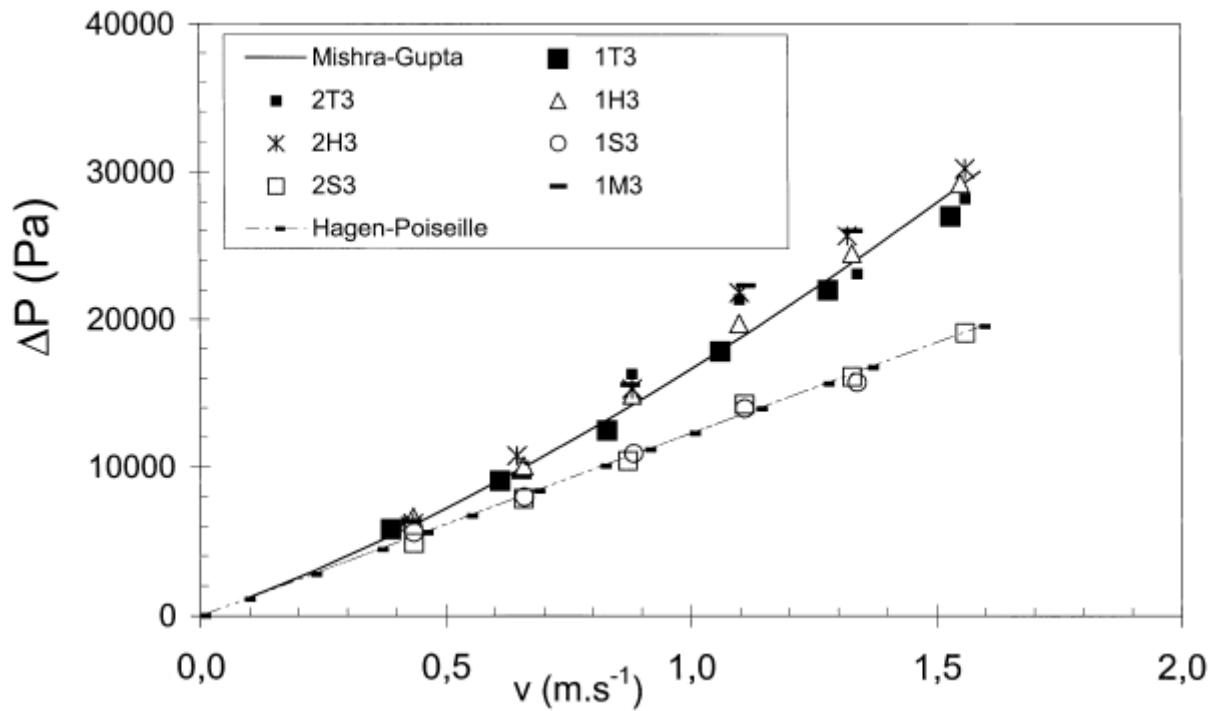
Kuva 29 Rajoittavan vuon arvot lämpötilassa $20 \text{ }^\circ\text{C}$ Reynoldsin ja Deanin lukujen suhteen. Syötön bentoniitti pitoisuus oli 3.3 g kg^{-1} ($De = (0.076)Re$ ja $280 \leq Re \leq 1100$). H tarkoittaa kierukkamaista, T punottua, M mutkittelevaa ja S suoraa moduulia. [14]



Kuva 30 Rajoittavan vuon arvot lämpötilassa 20 °C Reynoldsin ja Deanin lukujen suhteen. Syötön bentoniitti pitoisuus oli 10 g kg⁻¹ ($De = (0.076)Re$ ja $280 \leq Re \leq 1100$). H tarkoittaa kierukkamaista, T punottua ja S suoraa moduulia. [14]

Kokeellisten ja laskennallisten painehäviöiden arvot on esitetty kuvassa 31. Suorassa moduulissa painehäviö kasvaa lineaarisesti ristivirtausnopeuden ja Reynoldsin luvun suhteen, mutta kaarevissa moduuleissa kasvu on voimakkaampaa. Ghogomun *et al.* mukaan tämä johtuu kaarevien membraaniseinien isommasta virtausvastuksesta, mikä kasvattaa vaadittuja energiakustannuksia syötön pumppaamiseksi moduulin läpi. Ghogomun *et al.* mukaan on kuitenkin matemaattisesti osoitettavissa, että tietyllä permeaattivuon arvolla energiakustannukset ovat pienemmät kaareville moduuleille kuin suoralle moduulille.

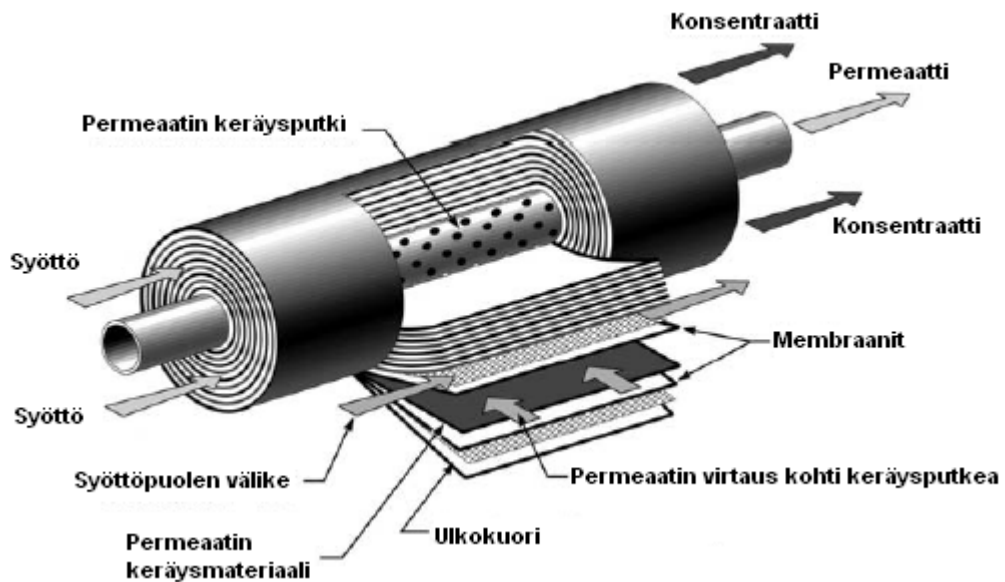
Ghogomun *et al.* tutkimien kierukkamaisen ja mutkittelevan moduulin kaarevuushalkaisijat olivat kuitenkin hyvin suuret, mikä pienentää moduulien pakkaustiheyttä. Kierukkamaisen moduulin pakkaustiheyttä voidaan kasvattaa pienentämällä kaarevuushalkaisijaa, mutta tällöin painehäviöt kasvavat tehden punotusta moduulista käyttökustannuksiltaan edullisemmän kuten Kuakivi *et al.* osoitti. Tämän vuoksi punottua moduulia voidaan pitää tällä hetkellä houkuttelevimpana moduuligeometriana.



Kuva 31 Kokeellisesti määritetyt ja laskennalliset painehäviöt eri membraanimoduuleilla ristivirtausnopeuden suhteen. Syötön bentoniitti pitoisuus oli 3.3 g kg^{-1} ja lämpötila $20 \text{ }^\circ\text{C}$. H tarkoittaa kierukkamaista, T punottua, M mutkittelevaa ja S suoraa moduulia. [14]

4.5 Spiraalimoduulit

Spiraalimoduulissa (*spiral wound*) kahden membraanikalvon väliin on asetettu permeaatin keräysmateriaali, ja kalvot ovat liimattu yhteen kolmelta reunalta. Näin muodostuneiden pussimaisten rakenteiden avoimet suut on liitetty rei'itettyyn permeaatin keräysputkeen. Pussit kiedotaan spiraalille tämän keskicutken ympärille, ja näin muodostunut yksikkö asetetaan suojaputken sisälle (kuva 32).



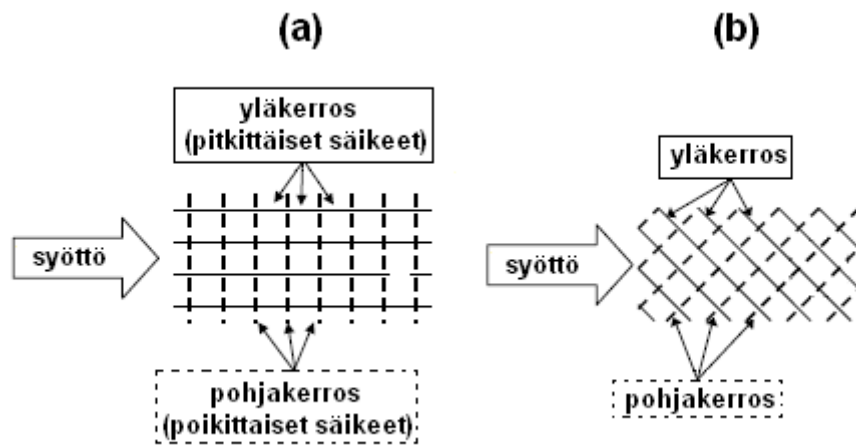
Kuva 32 Spiraalimoduulin rakennekuva [3, s. 8.10]

Membraanipussit on erotettu toisistaan verkkomaisilla välikkeillä (*spacer*), jotka muodostavat virtauskanavat syötölle. Syöttö virtaa moduulissa membraanien pinnan suuntaisesti, jolloin permeaatti läpäisee membraanin ja rejekti poistuu moduulin toisesta päästä. Permeaatti virtaa membraanipussien sisällä spiraalimaisesti kohti rei'itettyä keskiputkea ja poistuu sitä pitkin moduulista. Spiraalimoduulien halkaisija on tyypillisesti 12 – 45 cm ja pituus noin 1 m [4, s. 48; 5, s. 79]. Virtaus moduulin sisällä on turbulenttia välikkeiden aiheuttaman sekoittumisen vuoksi.

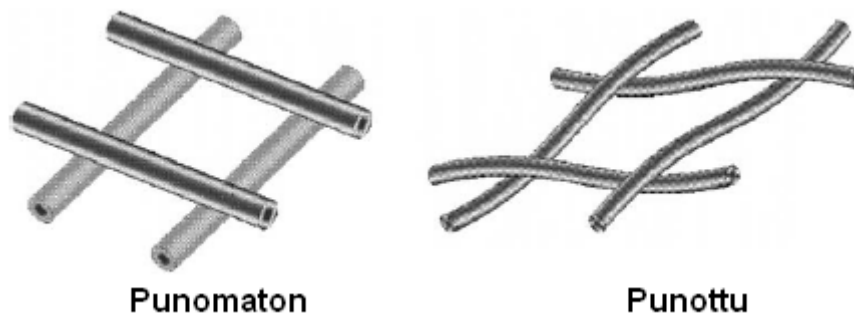
Kohtalaisen suuren pakkaustiheyden ($500 - 800 \text{ m}^2/\text{m}^3$) [4, s. 48] lisäksi spiraalimoduulien eduksi voidaan katsoa niiden pienempi alttius foulingille ja konsentraatiopolarisaatiolle kuin kapillaari- ja onttokuitumoduuleilla. Spiraalimoduulien puhdistaminen on kuitenkin vaikeampaa, sillä spiraalimoduulien rakenteen vuoksi vastavirtahuuhtelua ei voida käyttää.

4.5.1 Välikkeet

Spiraalimoduulissa membraanit erillään pitävät välikkeet ovat muovisista säikeistä (*filament*) koostuvia verkkoja. Verkoissa säikeet ovat tyypillisesti asetettu kahteen kerrokseen, joko tikapuu- (*ladder-type*) tai vinoneliörakenteen (*diamond*) mukaisesti (kuva 33). Lisäksi välikkeet voidaan luokitella punomattomiin (*non-woven*) ja punottuihin (*woven*) (kuva 34).



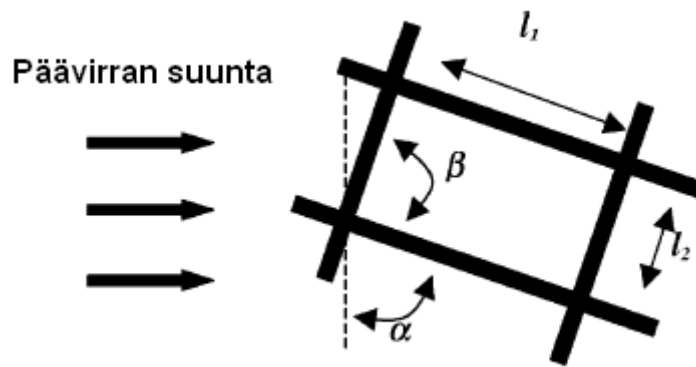
Kuva 33 (a) Tikapuu- ja (b) vinoneliötyyppisen 2-kerrosvälikkeen rakenne [17]



Kuva 34 Punomattoman ja punotun välikkeen rakenne [18]

4.5.1.1 Välikkeiden geometrian merkitys

Virtauskanavan muodostamisen lisäksi välikkeet lisäävät syötön sekoittumista, ja näin ollen tehostavat aineensirtoa membraanin pinnalla. Parantuneen aineensiirron käänköpuolena ovat kuitenkin lisääntyneet painehäviöt. Tämän vuoksi ihanteellisena voidaan pitää sellaista välikettä, joka parantaa aineensirtoa aiheuttamatta suuria painehäviöitä. Välikkeiden vaikutus virtaukseen riippuu voimakkaasti välikkeen geometrisista ominaisuuksista kuten säikeiden paksuudesta (d), säikeiden poikkileikkauksesta, verkon jaotuksesta (l_1 , l_2), kahden säikeen välisestä kulmasta (β) ja kohtauskulmasta suhteessa päävirtaan (α) (kuva 35) [15].



Kuva 35 Välikeverkon geometriset ominaisuudet [18]

Sablani *et al.* [16] tutkivat kokeellisesti välikkeiden paksuuden (h) vaikutusta permeaattivuohon (2-kerrosvälikkeillä välikkeiden paksuus on kaksi kertaa säikeiden paksuus). Kolmeen spiraalimoduuliin asetettiin välikkeet, joiden paksuudet olivat 0.1168, 0.0711 ja 0.0508 cm. Tällöin membraanipinta-alat olivat vastaavasti 3.066, 2.601 ja 1.905 m². Permeaattivuon ($L/(m^2 h)$) havaittiin oleva sitä suurempi mitä paksumpia välikkeitä käytettiin. Sablanin *et al.* mukaan tämä viittaa voimakkaampaan turbulenssiin paksummilla välikkeillä. Paksummat välikkeet kuitenkin pienentävät tehollista membraanipinta-alaa, ja suurin tuotevirta (L/h) saavutettiin käytettäessä välikkeitä joiden paksuus oli 0.0711 cm. Sablani *et al.* mukaan tätä välikepaksuutta voidaan pitää testatuista vaihtoehdoista taloudellisesti kannattavimpana. Asia ei välttämättä ole kuitenkaan aivan näin yksinkertainen. Taloudellisuuteen vaikuttavat myös painehäviöt jotka riippuvat käytetystä välikepaksuudesta. Sablani *et al.* ei ole tutkimuksessaan kuitenkaan ilmoittanut minkäänlaisia mitattuja tai laskennallisia arvoja painehäviöille. Lisäksi paksummat välikkeet pienentävät membraanimoduulin pakkaustiheyttä, joka puolestaan kasvattaa pääomakustannuksia.

Li *et al.* [18] ovat pyrkineet CFD-mallinnuksen (*Computational Fluid Dynamics*) avulla selvittämään optimaalista välikeverkon rakennetta. Tutkimuksen kohteena oli geometrysten parametrien α , β ja l/h vaikutus aineensiirtoon ja energiankulutukseen. Mallinnuksessa simuloitiin sylinterimäisistä säikeistä rakennetun punomattoman 2-kerrosvälikkeen toimintaa, jossa l_1 oli yhtä suuri kuin l_2 ($l_1 = l_2 = l$). Aineensiirtoa kuvattiin Sherwoodin luvulla Sh , ja energiankulutusta ns. teholluvulla:

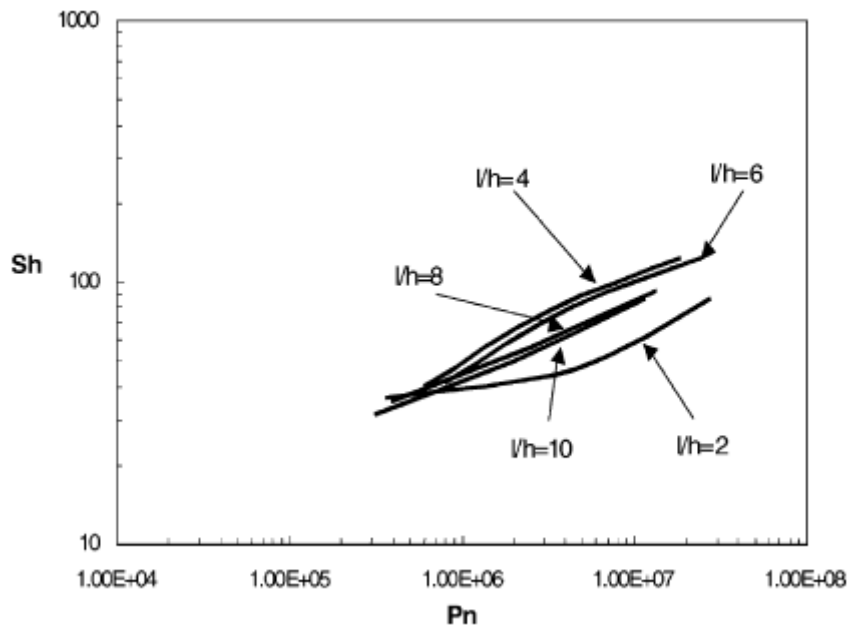
$$Pn = Eu \frac{h}{L} Re^3 \quad (4)$$

jossa L on virtauskanavan pituus ja Eu Eulerin luku:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho u^2} \quad (5)$$

jossa ΔP on paine-ero (Pa), ρ fluidin tiheys (kg/m^3) ja u virtausnopeus (m/s).

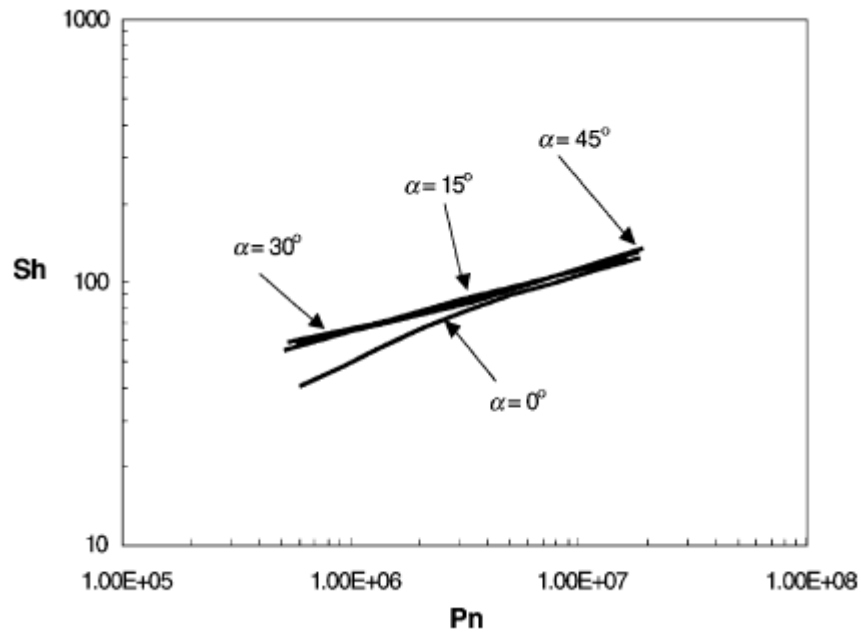
Aluksi Li *et al.* pyrkivät mallinnuksella selvittämään suhteen l/h vaikutusta aineensiirtoon sen arvoilla 2, 4, 6, 8 ja 10. Kulmat α ja β olivat 0° ja 90° , jolloin kyseessä oli siis tikapuu-tyyppinen rakenne (kuva 33). Kuvassa 36 esitettyjen tulosten perusteella Li *et al.* totesi suhteella l/h olevan huomattava vaikutus aineensiirtoon. Optimaalisin arvo oli noin 4.



Kuva 36 CFD-mallinnuksella määritetyt Sherwoodin luvun Sh arvot teholumen Pn funktiona eri l/h arvoilla ($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 90^\circ$) [18]

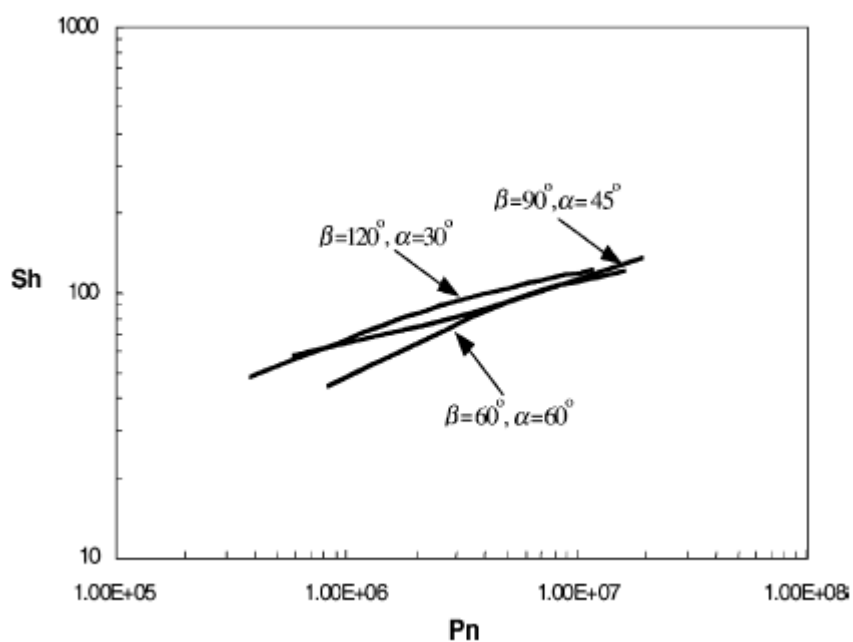
Kohtauskulman α vaikutusta aineensiirtoon tutkittiin käyttämällä arvoja 0, 15, 30 ja 45° vakioarvoilla $l/h = 4$ ja $\beta = 90^\circ$. Kuvasta 37 nähdään välikkeen toiminnan olevan suotuisinta alhaisilla teholuilla α arvoilla 15, 30 ja 45° , eli hiukan toisistaan poikkeavilla vinoneliötyyppisillä välikkeillä. Suuremmilla teholuilla tikapuu-tyyppinen väliکه suoriutuu

likimain yhtä hyvin (neliömäisillä verkonsilmukoilla välikkeen rakenne on sama α :n arvoilla 0 ja 90°).



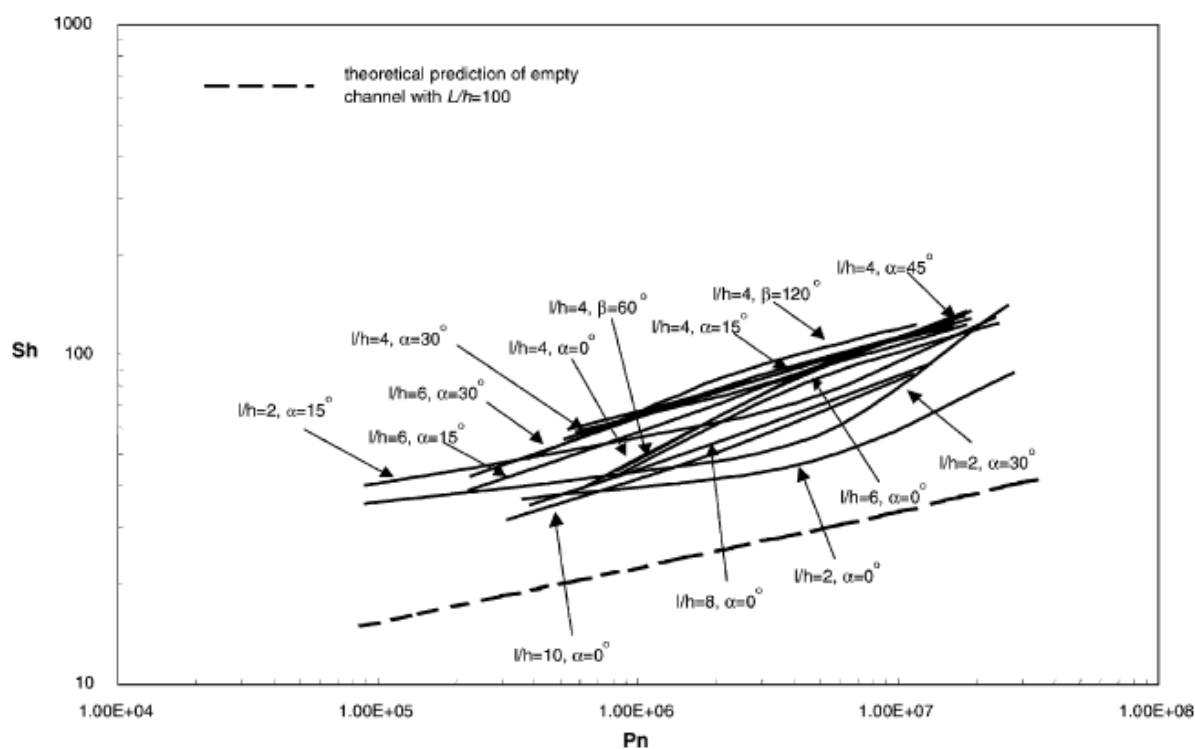
Kuva 37 CFD-mallinnuksella määritetyt Sherwoodin luvun Sh arvot teholumun Pn funktiona eri α arvoilla ($l/h = 4$, $\beta = 90^\circ$) [18]

Kulman β vaikutusta tutkittiin arvoilla 60, 90 ja 120° käyttämällä sääntöä $\beta + 2\alpha = 180^\circ$. Paras tulos saatiin arvolla $\beta = 120^\circ$.



Kuva 38 CFD-mallinnuksella määritetyt Sherwoodin luvun Sh arvot teholumun Pn funktiona eri β arvoilla ($l/h = 4$) [18]

Yhteenvetona kaikki Lin *et al.* suorittaman CFD-simuloinnin tulokset on esitetty kuvassa 39. Heidän mukaansa tulokset osoittavat, ettei ole olemassa yhtä optimaalista välike geometriaa joka olisi paras kaikilla tehluvun Pn arvoilla. Kuitenkin yleisesti ottaen optimaalisimpana Lin *et al.* tulosten perusteella voidaan pitää välikettä, jonka geometriset parametrit ovat $l/h = 4$, $\alpha = 30^\circ$ ja $\beta = 120^\circ$. Sekä kirjallisuudesta löytyvät kokeelliset tulokset, että Lin *et al.* itse suorittamat muutamat käytännön kokeet tukivat saatuja CFD-simulointi tuloksia, joten niitä voidaan pitää luotettavina.

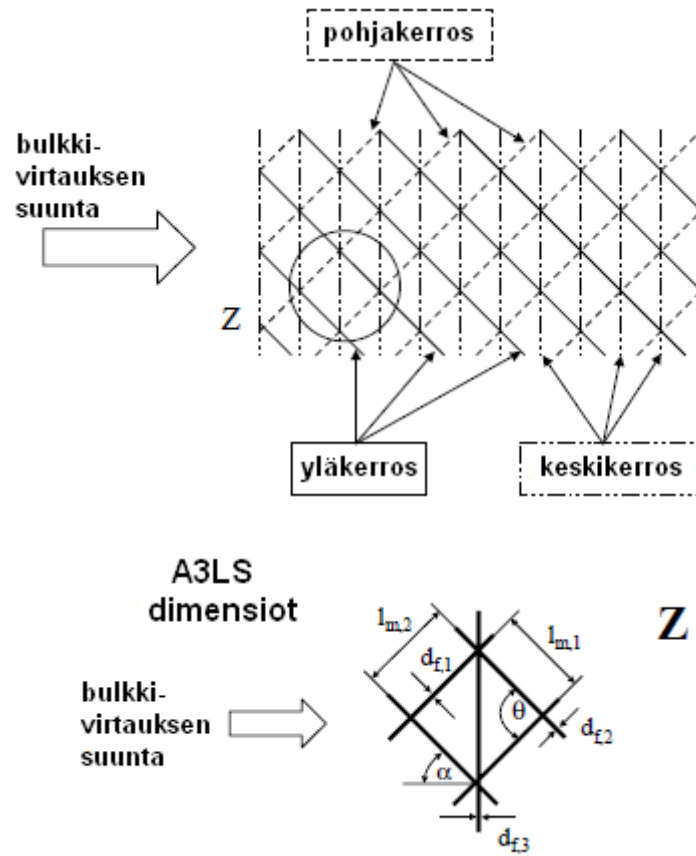


Kuva 39 CFD-mallinnuksella määritetyt Sherwoodin luvun Sh arvot tehluvun Pn funktiona eri α , β ja l/h arvoilla [18]

4.5.1.2 3-kerrosvälike

Schwinge *et al.* [17] ovat kehittäneet uuden tyyppisen välikkeen, jossa säikeet ovat asetettu kolmeen kerrokseen, ja verranneet sen toimintaa 2-kerrosvälikkeisiin. Rakenteeltaan tämä uusi 3-kerrosvälike (*advanced 3-layer spacer, A3SL*) vastaa vinoneliö tyyppistä 2-kerrosvälikettä (*2-layer spacer, 2LS*), jonka vinojen säikeiden väliin on asetettu vielä yksi säie kohtisuoraan virtaussuuntaan nähden (kuva 40). 3-kerrosvälike voi mahdollistaa 2-

kerrosvälikkettä suuremman permeaattivuon, sillä se vähentää membraanien välissä olevaa tyhjän tilan määrää ilman, että ylimääräistä membraanipinta-alaa peitetään.



Kuva 40 Schwingen *et al.* [17] kehittämän uuden 3-kerrosvälikkeen (A3LS) rakenne

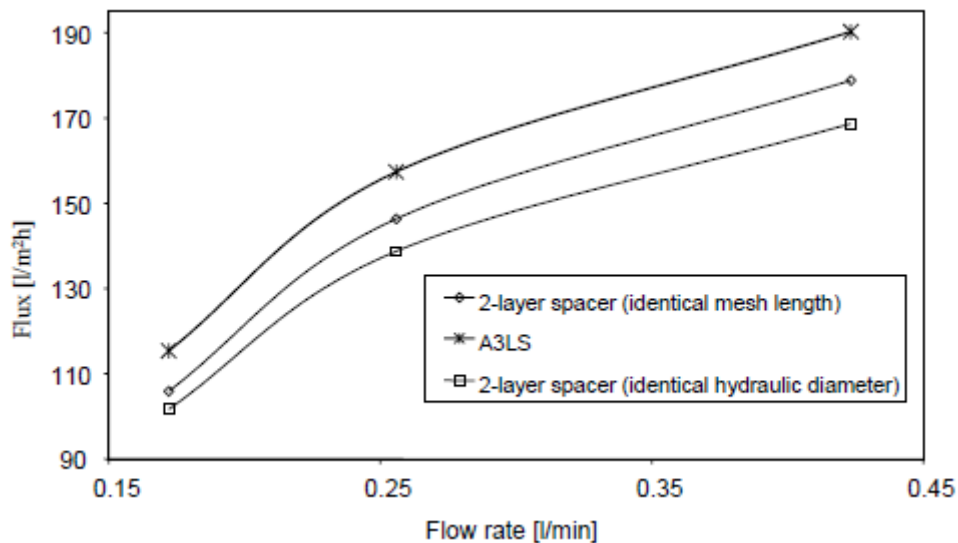
Verratakseen erilaisia väliskeitä keskenään, Schwinge *et al.* rakensivat väliskeet niin, että niiden kaikkien verkon jaotus (l_m) tai hydraulinen halkaisija (d_h) olivat keskenään samoja. Schock ja Miquel [24] ovat määrittelleet hydraulisen halkaisijan seuraavasti:

$$d_h = \frac{4(V_{tot} - V_{sp})}{S_{slit} + S_{sp}} \quad (6)$$

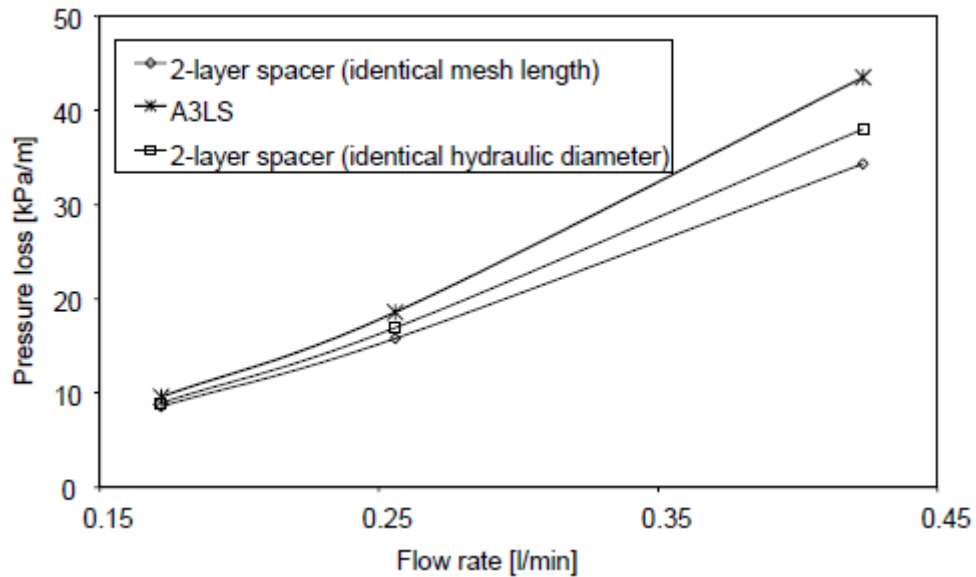
jossa V_{tot} on tyhjän virtauskanavan kokonaistilavuus, V_{sp} väliskeen tilavuus, S_{slit} tyhjän virtauskanavan pinta-ala ja S_{sp} välikesäikeiden pinta-ala.

Aluksi Schwinge *et al.* testasivat välikkeitä käyttämällä niitä Dextran T500-liuoksen ultrasuodatuksessa. Tämä liuos ei aiheuta membraanin foulaantumista. Syöttöliuoksen väkevyys oli 1 g/L, syötön tilavuusvirtaus 0.1 – 0.5 L/min ja paine-ero kalvon yli 100 – 300 kPa. Kokeet suoritettiin virtauskanavassa, jonka pohjalle membraani oli asetettu ja välikkeet membraanin päälle.

Kuten kuvasta 41 nähdään, 3-kerrosvälikkeellä saavutettiin suurempi permeaattivuo kuin 2-kerrosvälikkeillä. Syötön tilavuusvirtauksen ja välikkeiden verkonjaotuksen ollessa samoja, A3LS-välikkeellä saavutettu vuo oli 9 % suurempi kuin 2-kerrosvälikkeellä, mutta myös painehäviöt olivat 25 % suuremmat ristivirtausnopeuden ollessa 0.35 m/s (kuva 42). Verrattaessa 3-kerrosvälikettä saman hydraulisen halkaisijan omaavaan 2-kerrosvälikkeeseen, Schwinge *et al.* totesivat 3-kerrosvälikkeen kasvattavan vuota vielä enemmän. A3LS-välikkeellä sekä vuo että painehäviöt olivat 14 % suurempia kuin 2-kerrosvälikkeellä ristivirtausnopeuden ollessa 0.35 m/s (kuvat 41 ja 42).

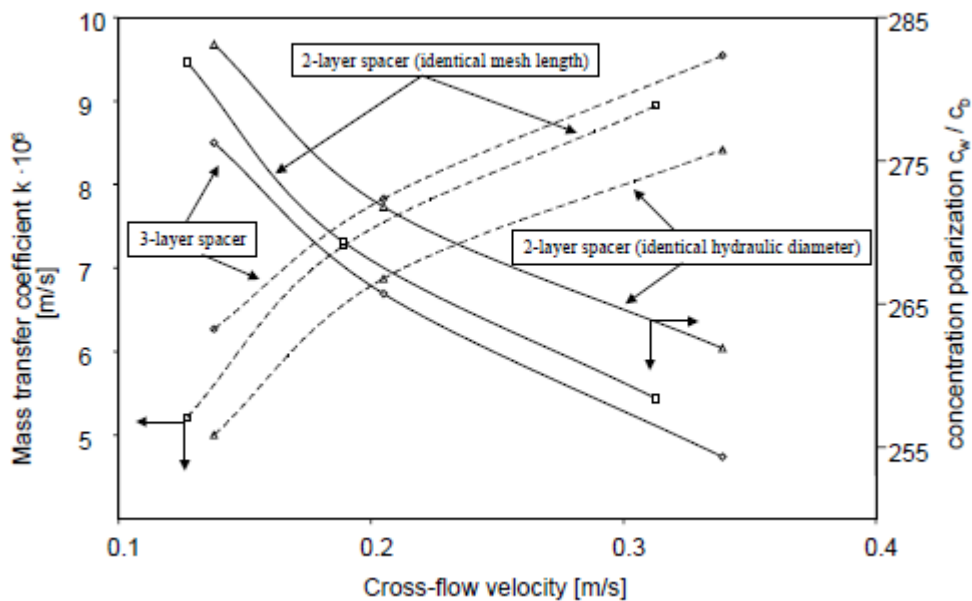


Kuva 41 Permeaattivuot dextran liuoksen ultrasuodatuksessa eri virtausnopeuksilla käytettäessä uutta A3LS-välikettä ja perinteisiä 2-kerrosvälikkeitä. Paine-ero kalvon yli oli 300 kPa.



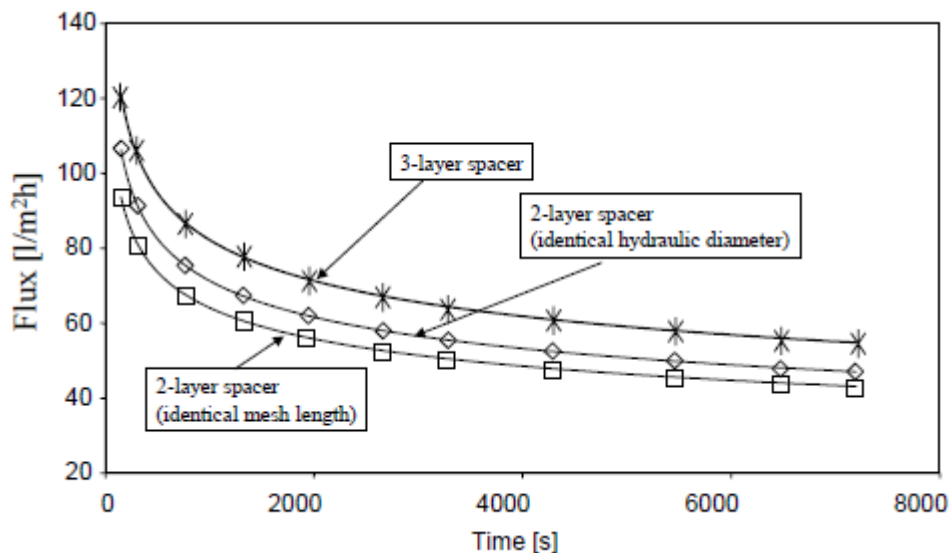
Kuva 42 Painehäviöt dextran liuoksen ultrasuodatuksessa eri virtausnopeuksilla käytettäessä uutta A3LS-välikettä ja perinteisiä 2-kerrosvälikkeitä [17]

Schwingen *et al.* määrittämät laskennalliset arvot konsentraatiopolarisaatio- ja aineensiirtokertoimille antavat tarkemman selityksen sille, mihin 3-kerros välikkeellä saavutettava suurempi permeaattivuo perustuu. Kuten kuvasta 43 nähdään, A3LS-välikkeellä konsentraatiopolarisaatio oli vähäisintä. Schwingen *et al.* mukaan kuva 43 myös osoittaa vähentyneen konsentraatiopolarisaation olevan kytköksissä tehokkaampaan aineensiirtoon.



Kuva 43 Konsentraatiopolarisaatio- ja aineensiirtokertoimet dextran liuoksen ultrasuodatuksessa eri virtausnopeuksilla käytettäessä uutta A3LS-välikettä ja perinteisiä 2-kerrosvälikkeitä [17]

Saadakseen paremman käsityksen A3LS-välikkeen toiminnasta, Schwinge *et al.* testasivat sitä myös suodattamalla 10 g/L väkevyistä heraproteiini-konsentraattia, jonka tiedetään aiheuttavan voimakasta foulingia. Permeaattivuon muutosta seurattiin kahden tunnin ajan, ja kuten kuvasta 44 nähdään, A3LS-välikkeellä saavutettiin suurin vuo. Kokeen lopussa A3LS-välikkeen vuo oli 17 % suurempi kuin 2-kerrosvälikkeellä jonka verkonjaotus oli sama, ja painehäviöt 20 % suuremmat ristivirtausnopeuden ollessa 0.2 m/s. A3LS-välikkeen vuo oli 27 % suurempi kuin 2-kerrosvälikkeellä jonka hydraulinen halkaisija oli sama, ja painehäviöt 25 % suuremmat ristivirtausnopeuden ollessa 0.2 m/s. Käsiteltävässä voimakasta foulingia aiheuttavaa liuosta A3LS-välikkeellä voidaan siis saavuttaa selvästi suurempi vuo kuin 2-kerrosvälikkeillä, mutta myös painehäviöt ovat suuremmat.

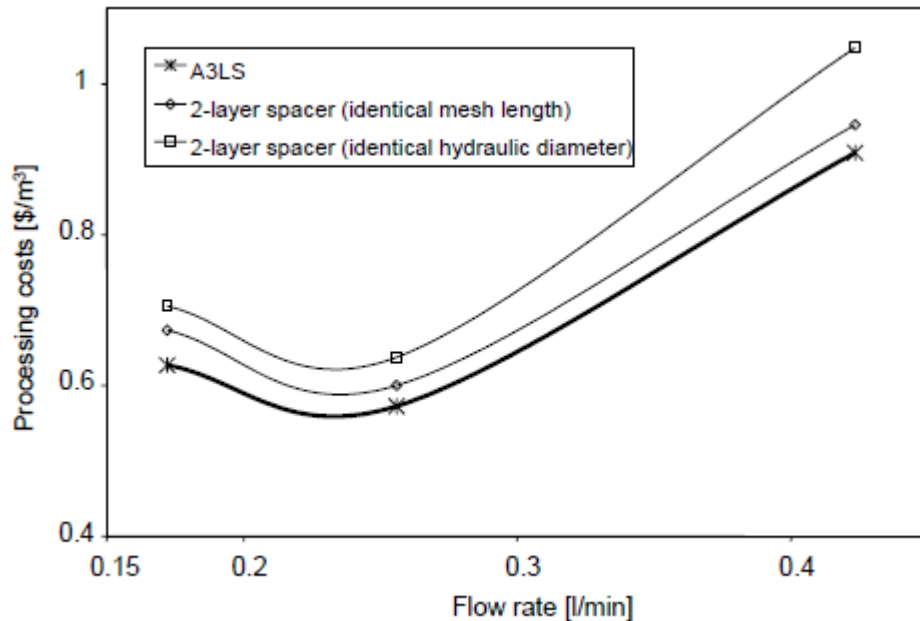


Kuva 44 Permeaattivuon muutokset ajan suhteen Schwingen *et al.* [17] suorittamissa heraproteiini-konsentraattiin ultrasuodatuskokeissa käytettäessä uutta A3LS-välikettä ja perinteisiä 2-kerrosvälikkeitä

Schwinge *et al.* tekivät myös taloudellisen kannattavuusarvion selvittääkseen riittääkö uuden A3LS-välikkeen korkeampi permeaattivuo kattamaan suuremmista painehäviöistä aiheutuvat kustannukset. He käyttivät seuraavia oletuksia:

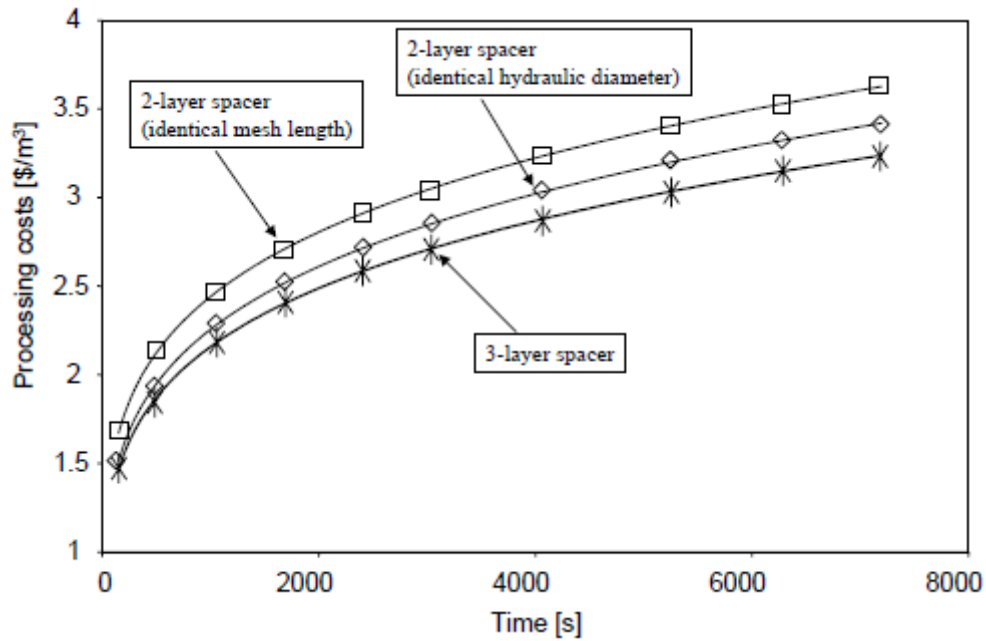
- prosessi toimii 8000 tuntia vuodessa
- laite- ja membraanikulut ovat 800 \$/m²
- kuoletuskerroin on 0.4 per vuosi
- käyttökustannukset aiheutuvat pumppaamisen energiakustannuksista
- energiakustannukset 0.15 \$/kWh

Näiden oletusten ja dextran liuoksen suodatuskokeista saadun tiedon perusteella lasketut kustannukset yhden permeaattikuutiometrin tuottamiseksi eri väliketyypeillä on esitetty kuvassa 45. Kuten tuloksista nähdään, erityisesti pienillä virtausnopeuksilla A3LS-välike osoittautui halvemmaksi johtuen pienemmistä pääomakustannuksista. Parhaimmillaan A3LS-välikkeen kulut ovat 12 % pienemmät kuin 2-kerrosvälikkeillä.



Kuva 45 Prosessikustannukset dextran liuoksen ultrasuodatuksessa eri virtausnopeuksilla käytettäessä uutta A3LS-välikettä ja perinteisiä 2-kerrosvälikkeitä [17]

Heraproteiinkonsentraatin suodatuskokeiden perusteella tehdyn kannattavuusarvion tulokset on esitetty kuvassa 46. Myös niissä A3LS-välike osoittautui halvimmaksi vaihtoehdoksi. Samalla hydraulisella halkaisijalla A3LS-välike on 14 % halvempi ja samalla verkon jaotuksella 20 % halvempi kuin 2-kerrosvälike.



Kuva 46 Prosessikustannukset kahden tunnin heraproteiinikonsentraatin ultrasuodatuskokeessa käytettäessä uutta A3LS-välikettä ja perinteisiä 2-kerrosvälিকেitä [17]

Schwingen *et al.* mukaan näistä tuloksista ei voida kuitenkaan tehdä vielä kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä, sillä kokeet suoritettiin erillisessä virtauskanavassa eikä oikeassa spiraalimoduulissa. Spiraalimoduulissa virtauskanava on pidempi, jolloin suuremmat painehäviöt voivat Schwingen *et al.* mukaan vaikuttaa prosessin kokonaiskannattavuuteen. Schwingen *et al.* mukaan käytännön vaikeuksia saattaa myös aiheuttaa 3-kerrosvälিকেen valmistuksen vaikeus. Lisäksi kehitetyn A3LS-välিকেen jäykkyyttä tulisi vähentää, jotta membraanit saataisiin kiedottua spiraalille helposti.

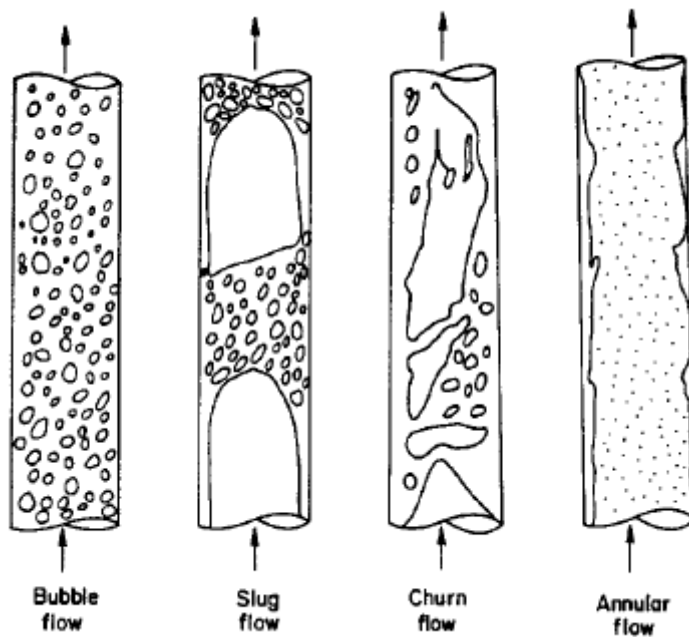
Lisätiedon saamiseksi 3-kerrosvälিকেillä varustetun spiraalimoduulin toiminnasta voisi tilannetta yrittää simuloida CFD-mallinnuksella ja katsoa tukevatko saadut tulokset virtauskanavassa suoritettujen kokeiden tuloksia. Ennen pidemmälle menevän arvion tekemistä 3-kerrosvälিকেiden teollisesta potentiaalista tulisi prototyyppi rakentaa, ja suorittaa sillä suodatuskokeita. Muutamista epävarmuustekijöistä huolimatta 3-kerrosvälিকেellä voi olla potentiaalia tulevaisuudessa kunhan em. mainitut käytännönongelmat saadaan ratkaistua.

4.6 Kaasu-neste -kaksifaasivirtaus aineensiirron parantamisessa

Kaksifaasivirtauksen on pitkään tiedetty olevan tehokas keino parantaa lämmön- ja aineensiirtoa eri sovellutuksissa, kuten reaktoreissa ja lämmönsiirtimissä [21]. Viime vuosikymmenen aikana kiinnostus kaasuvirtauksen käyttämiseksi apuna aineensiirron tehostamisessa myös membraaniprosesseissa on herännyt, sillä sen on todettu olevan tehokas ja edullinen keino vähentää konsentraatiopolarisaatiota ja foulingia.

Kaksifaasivirtausta hyödyntävissä moduuleissa varsinaisen nestesyötön mukana moduuliin injektoidaan kaasua, useimmiten ilmaa. Kaasuvirtauksen aiheuttama aineensiirron tehostuminen perustuu pääasiassa kaasukuplien aikaansaamiin rinnakkaisvirtauksiin jotka lisäävät paikallista sekoittumista membraanikalvon lähellä. Kaasukuplat myös mekaanisesti irrottavat membraanin pintaan kerääntyneitä partikkeleja. Periaatteessa aineensiirtoa voitaisiin tehostaa myös kiintoaine-neste –kaksifaasivirtauksella, mutta ylimääräinen kiintoaine saattaisi vahingoittaa membraanin pintaa ja lisäksi sen poistaminen rejektivirrasta olisi hankalaa.

Kaasu-neste –kaksifaasivirtaus on luonteeltaan epästabiili ja voi saada erilaisia virtausmuotoja (kuva 47). Eri virtausmuodot tehostavat aineensiirtoa eri tavoin, joten halutun virtausmuodon saavuttaminen membraanimoduulin sisällä on tärkeää. Putki-, kapillaari- ja onttokuitumoduuleissa tulppavirtaus (*slug flow*) on osoittautunut tehokkaimmaksi. [2, s. 669 – 683]



Kuva 47 Kaasu-neste –kaksifaasivirtauksen virtausmuodot vertikaalisessa putkessa [22, s. 6-28]

Taulukossa IX on esitetty kaasu-neste -kaksifaasivirtauksella saavutettuja vuon parannuksia suhteessa suodatukseen ilman kaasuvirtausta erilaisilla membraanimoduuleilla, liuoksilla ja toimintaolosuhteilla.

TAULUKKO IX Vuon kasvu käytettäessä kaasu-neste –kaksifaasivirtausta apuna aineensiirron tehostamisessa erilaisilla membraanimoduuleilla ja vaihtelevilla kaasun (V_g) sekä nesteen (V_l) virtausnopeuksilla [2, s. 677]

Käsitelty liuos	Membraanimoduuli & toimintaolosuhteet	Vuon kasvu (%)
Värjätty dextran M: 87 kDa	Vertikaalinen putkimoduuli d_i : 12.7 mm V_g/V_l : 0.7	70 – 250
Dextran M: 260 kDa	Vertikaalinen putkimoduuli V_g : 0-0.35 m/s V_l : 0.14 – 0.78 m/s	320
Dextran	Vertikaalinen putkimoduuli	60
Sininen dextran	V_g : 0 – 0.13 m/s	113
BSA	V_l : 0.13 – 0.39 m/s	91
Dextran M: 83 kDa	Onttokuitumoduuli V_g : 0.006 – 0.014 m/s V_l : 0.097 – 0.18 m/s d_i : 0.2 mm	20 – 50
HSA M: 66 kDa	Kapillaarimoduuli V_g : 0.007 – 0.017 m/s V_l : 0.12; 0.21 m/s d_i : 0.5 mm	10 – 60
Savisuspensio d_p : 1 μ m	Onttokuitumoduuli V_g : 0 – 0.6 m/s	155
Savisuspensio d_p : 1 μ m	Kapillaarimoduuli V_g : 0 – 1 m/s d_i : 0.93 mm	110
Bentoniittisuspensio	Putkimoduuli V_g : 0 – 2.5 m/s V_l : 0.31 – 1.57 m/s d_i : 15 mm	200
HSA & IgG mikstuura	Putkimoduuli V_g : 30 – 150 mL/min V_l : 0.25 – 1 L/min	70
BSA, Lysotsyymi, HSA, IgG	Suorakulmainen tasolevymoduuli V_g : 0 – 200 mL/min	50
Hiivasuspensio	Keraaminen tasolevymoduuli V_g : 0 – 10 mL/min V_l : 3 – 16.66 L/min	100

4.6.1 Kaksifaasivirtaus nanosuodatuksessa

Useimmat tähänastiset tutkimukset liittyen kaksifaasivirtauksen käyttämiseen aineensiirron tehostamisessa membraaniprosesseissa ovat keskittyneet ultrasuodatukseen. Verberk ja van Dijk [21] ovat kuitenkin tutkineet kaksifaasivirtauksen käyttämistä apuna kapillaari nanosuodatuksessa. Käytetty membraanimuuli oli X-Flown:n valmistama NR 015-500, jonka halkaisija oli 1". Kapillaarimembraanien sisähalkaisija oli 1.5 mm ja niitä oli moduulin sisällä yhteensä 45, jolloin kokonaismembraanipinta-ala oli 0.21 m². Moduulin toimintaa tutkittiin ensin puhtaalla vedellä lämpötilan ollessa 20 °C, paine-eron kalvon yli 2 bar ja virtausnopeuden 1.5 m s⁻¹. Tämän jälkeen suoritettiin suodatuskokeita kahdella synteettisellä MgSO₄ liuksella, joiden pitoisuudet olivat 0.34 ja 0.59 m-%. Käytetyt paine-erot olivat välillä 1 – 4 bar, veden virtausnopeudet ($u_{L,s}$) 0–1.5 m s⁻¹ ja ilman virtausnopeudet ($u_{G,s}$) 0–1.5 m s⁻¹.

Taulukosta X nähdään että permeaattivuo eri vesi-ilma seoksilla vastasi permeaattivuota ilman ilmavirtausta. Korkeilla paine-eroilla ja pienellä vesi/ilma -virtaussuhteella puhtaan veden vuo kuitenkin laskee selvästi. Verberkin ja van Dijkin mukaan tämä johtuu luultavasti virtauksen muuttumisesta tulppavirtauksesta rengasvirtaukseksi (*annular flow*, kuva 47). Kokeiden perusteella voidaan kuitenkin todeta, ettei ilmavirtaus yleisesti ottaen vaikuta puhtaan veden permeabiliteettiin.

TAULUKKO X Puhtaan veden permeabiliteetit L_p (L m⁻² h⁻¹ bar⁻¹) eri paine-eroilla sekä veden ja ilman virtausnopeuksilla [21]

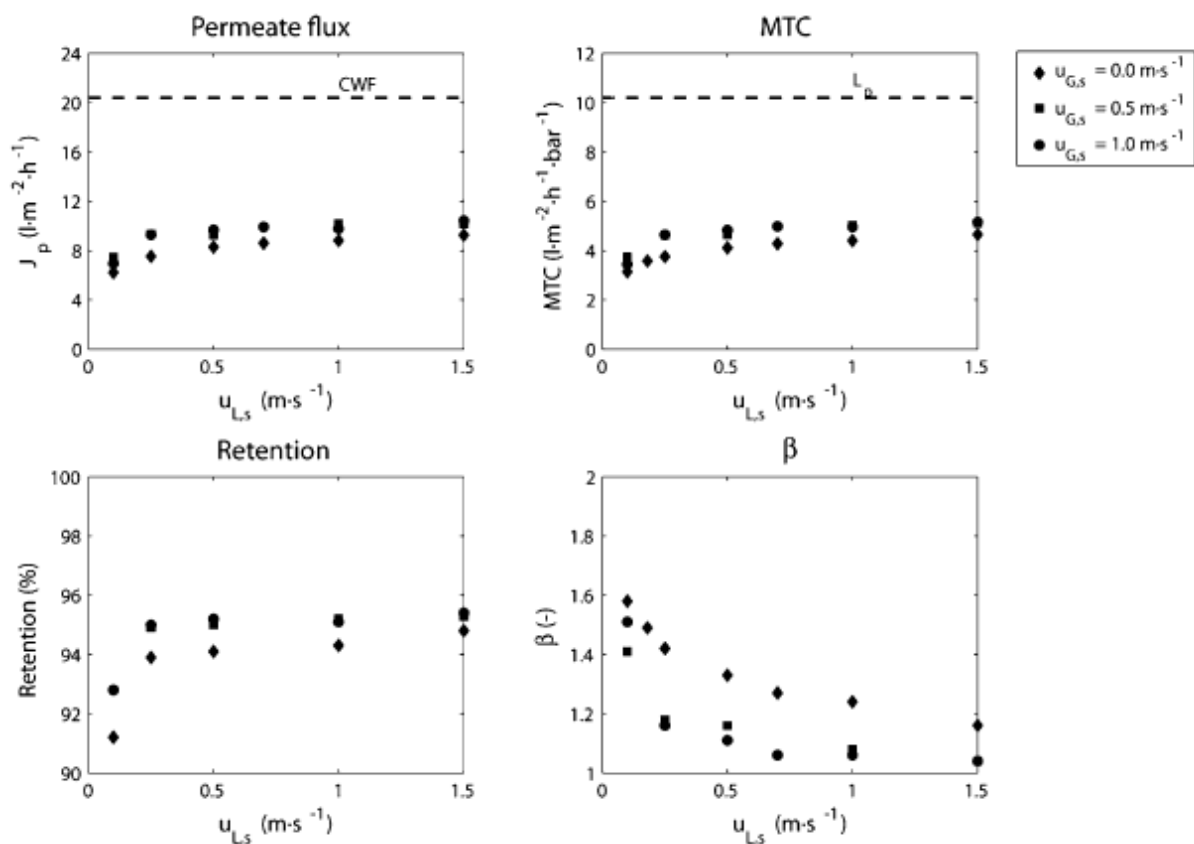
	Paine-ero (bar)	$u_{L,s}$ (m s ⁻¹)	$u_{G,s}$ (m s ⁻¹)		
			0	0.5	1.0
1		0.25	9.9	9.9	9.9
		0.5	9.7	9.8	9.7
		1.0	9.6	9.6	9.6
		1.5	9.6	9.7	9.7
2		0.25	10.2	10.3	10.3
		0.5	8.9	9.3	9.3
		1.0	9.4	9.7	9.8
		1.5	10.0	10.1	10.1
3		0.25	11.0	11.0	10.3
		0.5	10.3	10.5	10.3
		1.0	10.6	10.7	10.7
		1.5	10.8	10.8	10.9
4		0.25	11.2	10.8	9.4
		0.5	0.5	11.2	11.1
		1.0	11.5	11.5	11.4
		1.5	11.7	11.7	11.7

Kuvassa 48 on esitetty ilmavirtauksen vaikutus permeaattivuohon, aineensiirtokertoimeen (*mass transfer coefficient, MTC*), rejektioon ja konsentraatiopolarisaatioon (β) suodatettaessa synteettistä 0.34 m-% MgSO_4 liuosta. Konsentraatiopolarisaatio on määritetty yhtälöllä

$$\beta = \frac{c_m - c_p}{c_b - c_p} \quad (7)$$

jossa c_m on konsentraatio membraanin pinnalla, c_p permeaatin konsentraatio ja c_b bulkkiliuoksen konsentraatio.

Paine-eron ollessa 2 bar ilmavirtauksen voidaan havaita kasvattavan permeaattivuota 11 – 17 % tutkituissa tapauksissa verrattuna tilanteeseen jossa ilmavirtausta ei ole käytetty. Myös rejektiossa havaitaan selvä kasvu käytettäessä ilmavirtausta. Permeaattivuon ja rejektion kasvu on nähtävissä myös konsentraatiopolarisaatiossa; sen arvossa tapahtuu huomattava lasku kun vesivirran mukana syötetään ilmaa.



Kuva 48 Permeaattivuon, aineensiirtokertoimen, rejektion ja konsentraatiopolarisaation riippuvuus käytetystä veden ja ilman virtausnopeudesta paine-eron ollessa 2 bar ja MgSO_4 pitoisuuden 0.34 m-% [21]

Aineensiirtokertoimet muissa toimintaolosuhteissa ja 0.59 m-% MgSO₄ liuoksella on esitetty taulukossa XI. Yleisesti ottaen aineensiirtokertoimet kasvavat käytettäessä ilmavirtausta apuna. Aineensiirtokertoimien kasvun havaitaan myös olevan suurempaa alhaisilla veden virtausnopeuksilla. Verberkin ja van Dijkin mukaan tämä johtuu siitä, että alhaisilla veden virtausnopeuksilla virtaus on laminaaria, ja ilman syöttö lisää turbulenssia suhteessa enemmän ehkäisten näin konsentraatiopolarisaatiota tehokkaammin. Taulukosta XI voidaan myös nähdä, ettei ilman virtausnopeuden nosto arvosta 0.5 m s⁻¹ arvoon 1.0 m s⁻¹ juurikaan kasvata aineensiirtokertoimen arvoa tai vähennä konsentraatiopolarisaatiota. Myös aiemmin tehdyt tutkimukset tukevat Verberkin ja van Dijkin tekemää havaintoa, ettei permeaattivuon kasvu riipu käytetyn ilmavirtauksen suuruudesta.

TAULUKKO XI Aineensiirtokertoimet (m s⁻¹ bar⁻¹) eri paine-eroilla sekä veden ja ilman virtausnopeuksilla [21]

Paine-ero (bar)	$u_{L,s}$ (m s ⁻¹)	$u_{G,s}$ (m s ⁻¹)		
		0	0.5	1.0
MgSO ₄ (0.34 m-%)				
2	0.5	4.11	4.64 (13 %)	4.83 (17 %)
	1.0	4.40	5.02 (14 %)	4.96 (13 %)
	1.5	4.61	5.11 (11 %)	5.15 (11%)
3	0.5	5.36	6.26 (17 %)	6.44 (20 %)
	1.0	5.87	6.67 (14 %)	6.80 (16 %)
	1.5	6.35	6.92 (9 %)	6.98 (9 %)
4	0.5	5.95	7.03 (18 %)	6.63 (11 %)
	1.0	6.68	7.70 (15 %)	8.09 (20 %)
	1.5	7.30	8.15 (11 %)	8.23 (13 %)
MgSO ₄ (0.59 m-%)				
2	0.25	1.80	2.27 (26 %)	2.37 (32 %)
	0.5	2.03	2.16 (6 %)	1.79 (-12 %)
	1.0	2.22	2.71 (22 %)	2.63 (18 %)
	1.5	2.34	2.60 (11 %)	2.57 (10 %)
3	0.25	3.08	4.16 (35 %)	3.68 (19 %)
	0.5	3.53	4.04 (14 %)	4.07 (15 %)
	1.0	4.21	4.72 (12 %)	4.85 (15 %)
	1.5	4.35	5.00 (14 %)	5.02 (15 %)
4	0.25	3.76	3.60 (-4 %)	3.68 (-2 %)
	0.5	4.34	4.51 (4 %)	4.46 (3 %)
	1.0	5.08	6.08 (20 %)	6.24 (23 %)
	1.5	5.68	6.44 (13 %)	6.52 (5 %)

Verberkin ja van Dijkin mukaan on todennäköistä, että käytettäessä rejektin palautusta kaasuvirtauksen tuoma etu permeaattivuon kasvuun on suurempi. Rejektin palautus aiheuttaa liuenneen aineen ja kiintoaineiden pitoisuuden kasvun systeemissä, jonka seurauksena osmoottinen paine kasvaa vähitellen ja permeaattivuo pienenee. Koska

konsentraatiopolarisaatio edelleen kasvattaa osmoottista painetta, kaasuvirtauksen avulla voidaan hidastaa permeaattivuon laskua sillä se ehkäisee tehokkaasti konsentraatiopolarisaatiota.

Verberk ja van Dijk arvioivat kaasusyötön vaikutusta energiankulutukseen systeemille, jossa koko rejekti (sisältäen nesteen ja kaasun) palautetaan takaisin syöttöön. Kokonaisenergiankulutus koostuu pumppujen ja kompressorin käyttämästä energiasta, ja se on ilmaistu yhtä kuutiometriä permeaattia kohti. Tulokset on esitetty taulukossa XII.

TAULUKKO XII Energiankulutus eri konsentraatiopolarisaation arvoilla ja eri paine-eroilla sekä veden ja ilman virtausnopeuksilla [21]

Konsentraatiopolarisaatio, β	Paine-ero (bar)	MgSO ₄ (m-%)	$u_{L,s}$ (m s ⁻¹)	$u_{G,s}$ (m s ⁻¹)	Energian kulutus (Wh m ⁻³)
1.13	2	0.34	1.5	0	260.3
			0.5	0.5	189.7
			0.25	1.0	264
1.12	2	0.59	1.0	0	246.2
			0.5	0.5	318
			0.25	0.5	273.7
1.73	4	0.34	1.31	0	201.5
			0.5	0.5	192.6
			0.5	1.0	226.9

Konsentraatiopolarisaation ollessa 1.13 ja paine-eron 2 bar, energiankulutus oli alhaisin kun sekä veden että kaasun virtausnopeus oli 0.5 m s⁻¹. Suurella kaasuvirtausnopeudella ($u_{G,s} = 1.0$ m s⁻¹) energiankulutus oli kuitenkin suurempi kuin ilman kaasuvirtausta ($u_{G,s} = 0$ m s⁻¹). Verberkin ja van Dijkin mukaan syynä on ilman puristamiseen käytetyn kompressorin suuri energiankulutus. Samankaltaista vaihtelua energiankulutuksissa eri nesteen ja kaasun virtausnopeuksilla myös muilla paine-eroilla on havaittavissa. Verberkin ja van Dijkin mukaan tulosten perusteella voidaan todeta, että teollisissa sovelluksissa optimaalinen kaasumäärä aineensiirron tehostamiseksi tulee selvittää tapauskohtaisesti. Huomioitavaa on myös se, että jos ilmaa ei kierrätetä takaisin syöttöön, kompressorin aiheuttama lisäys energiankulutuksessa tulee olemaan huomattavasti suurempi.

Verberkin ja van Dijkin mukaan niin sanottu vastapaine saattaa aiheuttaa käytännönongelmia kaasuvirtauksen käytössä nanosuodatuksessa. Moduulin sisällä olevan korkean paineen (3 – 8 bar) vuoksi osa syötetystä kaasusta liukenee nesteeseen. Permeaattipuolella paine on alhaisempi, jolloin neste kyllästyy kaasulla ja muodostuu vastapaine, joka vähentää tehollista

paine-eroa membraanin yli ja heikentää systeemin toimintaa. Lisäksi huomiota tulee kiinnittää kaasun syöttämiseen, jotta se saadaan levittymään tasaisesti koko membraanille moduulin sisällä.

4.7 Dynaamiset moduulit

Suurien leikkausnopeuksien käyttämisen on pitkään tiedetty olevan yksi tehokkaimmista keinoista ehkäistä konsentraatiopolarisaatiota ja kasvattaa permeaattivuota ultra- ja nanosuodatuksessa, sekä käänteisosmoosissa. Perinteisissä ristivirtausperiaatteella toimivissa membraanimoduuleissa suuri leikkausnopeus membraanin pinnalla saavutetaan kasvattamalla ristivirtausnopeutta ja pienentämällä virtauskanavan halkaisijaa, mikä aikaansaa suuria aksiaalisia painegradientteja. Suuret virtausnopeudet ja painegradientit kuitenkin vaativat tehokkaita pumppuja, sekä aiheuttavat aleneman paine-erossa kalvon yli liikuttaessa membraanin pintaa pitkin, jonka vuoksi suodatusolosuhteet eivät ole täysin optimaaliset.

Dynaamisessa suodatuksessa leikkausnopeus membraanin pinnalla voidaan aikaansaadaksi liikuttamalla membraanimoduulia tai osaa siitä (*rotating cylindrical membrane*), pyörittämällä kiekkoa kiinteän pyöreän membraanin lähellä (*rotating disk system*) tai täräyttämällä membraania (*vibratory shear enhanced processing, VSEP*). Dynaamisella suodatuksella voidaan sekä huomattavasti kasvattaa permeaattivuota, että parantaa membraanien selektiivisyyttä. Lisäksi se mahdollistaa käytetyn syötön virtausnopeuden erottamisen leikkausnopeudesta, jolloin sen suuruutta voidaan säädellä itsenäisesti eikä sen tarvitse olla juurikaan suodatusnopeutta suurempi. Dynaamisten membraanimoduulien haittoja ovat niiden monimutkainen rakenne sekä verrattain alhainen membraanipinta-ala, mitkä kasvattavat pääomakustannuksia. Nämä ongelmat ovat koskettaneet erityisesti varhaisimpia putkimaisia pyöriviä moduuleita, sekä yksiakselisia pyöriviä kiekkomoduleja (*single shaft rotating disk system*).

Näistä syistä johtuen dynaamiset moduulit ovat edelleen melko harvinaisia. Jaffrinin [23] mukaan mainitut ongelmat ovat kuitenkin pikkuhiljaa katoamassa toisen sukupolven moduulien mukana. Hänen mukaansa on todennäköistä, että dynaaminen suodatus kasvattaa suosiotaan erityisesti sovelluksissa joissa vaaditaan korkeaa rejektiota ja korkeita konsentroidimiskertoimia, sekä 50 – 1000 m² membraani pinta-aloja.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä pyrittiin selvittämään, minkälaisia rakenneuudistuksia membraanimuoduleihin on tehty 2000-luvun alussa konsentraatiopolarisaation ja foulingin ehkäisemiseksi sekä aineensiirron parantamiseksi. Erityisen huomion kohteena olivat kapillaari- ja spiraalimuodulit.

Kapillaarimuodulien aineensiirtoa pystytään parantamaan käyttämällä apuna Deanin pyörteinä tunnettujen sivuvirtausten aiheuttamaa turbulenssia. Deanin pyörteet syntyvät keskipakoisvoiman vaikutuksesta kaarevassa virtauskanavassa. Muuttamalla suorien membraanikuitujen geometriaa kapillaarimuodulin sisällä, voidaan Deanin pyörteitä hyödyntää aineensiirron tehostamisessa. Eri moduuligeometrioista tällä hetkellä parhaimpina voidaan pitää ratkaisua, jossa membraanikuidut on punottu yhteen. Tietyllä energiankulutuksella sillä saavutettava rajoittava vuo on suurempi kuin muilla moduuligeometrioilla. Lisäksi sillä voidaan saavuttaa suuri pakkaustiheys, eivätkä kuidut vaadi erillistä tukemista moduulin sisällä [13][14].

Kapillaarimuodulien aineensiirtoa voidaan tehostaa myös käyttämällä apuna kaksifaasivirtausta. Syöttämällä ilmaa moduuliin voidaan turbulenssia lisätä, mikä kasvattaa sekä permeaattivuota että rejektiota. Optimaalinen ilman määrä tulee selvittää tapauskohtaisesti [21].

Spiraalimuoduleissa membraanit erillään pitävillä väliskeillä on keskeinen rooli aineensiirron tehostamisessa, sillä ne lisäävät turbulenssia virtauskanavassa. Schwinge *et al.* [17] ovat kehittäneet uudentyyppisen väliskeen, jossa säikeet on asetettu kolmeen kerrokseen, ja verranneet sen toimintaa perinteisiin 2-kerrosväliskeisiin. Rakenteeltaan tämä uusi 3-kerrosväliske vastaa vinoneliötyyppistä 2-kerrosväliskettä, jonka vinojen säikeiden väliin on asetettu vielä yksi säie kohtisuoraan virtaussuuntaan. 3-kerrosväliske mahdollistaa 2-kerrosväliskettä suuremman permeaattivuon, sillä se vähentää membraanien välissä olevaa tyhjän tilan määrää ilman, että ylimääräistä membraanipinta-alaa peitetään. 3-kerrosväliske kasvattaa myös painehäviöitä, mutta Schwingen *et al.* mukaan se tulee silti kokonaiskustannuksiltaan edullisemmaksi kuin 2-kerrosväliskeet. Huomattavaa on, että kokeet suoritettiin erillisessä virtauskanavassa, ei oikealla spiraalimuodulilla. Tämän vuoksi saatuihin tuloksiin liittyy vielä paljon epävarmuustekijöitä. Käytännön ongelmia saattaa

aiheuttaa 3-kerrosvälkkeen valmistuksen vaikeus. Lisäksi 3-kerrosvälkkeen jäykkyyttä tulisi vähentää, jotta membraanit saataisiin kiedottua helpommin spiraalille.

Dynaamisissa moduuleissa aineensirtoa pyritään tehostamaan liikuttamalla tai täräyttämällä membraanimoduulia tai osaa siitä. Dynaamisten membraanimoduulien haittoja ovat niiden monimutkainen rakenne sekä verrattain alhainen membraanipinta-ala, minkä vuoksi niiden käyttö on edelleen melko vähäistä. Mainitut ongelmat ovat kuitenkin vähitellen katoamassa toisen sukupolven dynaamisten moduulien mukana, ja on todennäköistä, että dynaamisten moduulien suosio tulee lisääntymään tulevaisuudessa [23].

Monissa tutkimuksissa membraanimoduulien rakennemuutosten kannattavuutta on tarkasteltu pelkästään painehäviöiden aiheuttamien käyttökustannusten kannalta. Membraanimoduulien rakenne voi kuitenkin vaikuttaa huomattavasti myös pääomakustannuksiin. Koska käyttö- ja pääomakustannukset yhdessä määrittävät moduulin todellisen taloudellisen potentiaalin, tulisi jatkossa kiinnittää enemmän huomiota kokonaiskustannusten arviointiin membraanimoduuleja suunniteltaessa.

6 LÄHTEET

- [1] Rosaler, R.C., *Standard Handbook of Plant Engineering*, 3. painos, McGraw-Hill, 2002, s. 3.47
- [2] Wang, L.K., Chen, J.P., Hung, Y., Shammas, N.K., *Membrane and Desalination Technologies*, Handbook of Environmental Engineering, Volume 13, Humana Press, 2008, s. 4, 51, 299, 244
- [3] Flynn, D.J., *Nalco Water Handbook*, 3. painos, McGraw-Hill, 2009, s. 8.6, 8.10
- [4] Micale, G., Rizzuti, L., Cipollina, A., *Seawater Desalination*, Springer, 2009, s. 5, 14, 48-50
- [5] Grandison, A.S., Lewis, M.J., *Separation Processes in the Food and Biotechnology Industries - Principles and Applications*, Woodhead Publishing, 1996, s. 72-79, 108
- [6] Bacchin, P., A possible link between critical and limiting flux for colloidal systems: consideration of critical deposit formation along a membrane, *J. Membr. Sci.*, **228** (2004) 237–241
- [7] Porter, M.C., *Handbook of Industrial Membrane Technology*, William Andrew Publishing/Noyes, 1990, s. 195, 208
- [8] Niemi, H., Modelling, Simulation and Optimisation of Ultrafiltration and Reverse Osmosis Processes, *Acta Polytechnica Scandinavica, Chemical Technology Series* No. **279**, Espoo 2000
- [9] Li, N.N., Fane, A.G., Ho, W.S.W., Matsuura, T., *Advanced Membrane Technology and Applications*, John Wiley & Sons, 2008, s. 273
- [10] Baker, R.W., Cussler, E.L., Eykamp, W., Koros, W.J., Riley, R.L., Strathmann, H., *Membrane Separation Systems - Recent Developments and Future Directions*, William Andrew Publishing/Noyes, 1991, s. 140-142
- [11] Frank, M., Bargeman, G., Zwijnenburg, A., Wessling, M., Capillary hollow fiber nanofiltration membranes, *Sep. Purif. Technol.*, **22-23** (2001) 499–506
- [12] Liu, L., Li, L., Ding, Z., Ma, R., Yang, Z., Mass transfer enhancement in coiled hollow fiber membrane modules, *J. Membr. Sci.*, **264** (2005) 113–121
- [13] Kuakivi, D.N., Moulin, P., Charbit, F., Dean vortices: a comparison of woven versus helical and straight hollow fiber membrane modules, *J. Membr. Sci.*, **171** (2000) 59–65
- [14] Ghogomu, J.N., Guigui, C., Rouch, J.C., Clifton, M.J., Aptel, P., Hollow-fibre membrane module design: comparison of different curved geometries with Dean vortices, *J. Membr. Sci.*, **181** (2001) 71–80

- [15] Shakaib, M., Hasani, S.M.F., Mahmood, M., Study on the effects of spacer geometry in membrane feed channels using three-dimensional computational flow modeling, *J. Membr. Sci.*, **297** (2007) 74–89
- [16] Sablani S.S., Goosen M.F.A., Al-Belushi R., Gerardos V., Influence of spacer thickness on permeate flux in spiral-wound seawater reverse osmosis systems, *Desalination*, **146** (2002) 225-230
- [17] Schwinge, J., Wiley, D.E., Fane, A.G., Novel spacer design improves observed flux, *J. Membr. Sci.*, **229** (2004) 53–61
- [18] Li, F., Meindersma, W., Haan, A.B., Reith, T., Optimization of commercial net spacers in spiral wound membrane modules, *J. Membr. Sci.*, **208** (2002) 289–302
- [19] Ghogomu, J.N., Guigui, C., Rouch, J.C., Clifton, M.J., Aptel, P., Hollow-fibre membrane module design: comparison of different curved geometries with Dean vortices, *J. Membr. Sci.*, **181** (2001) 71–80, Ref. Mallubhotla, H., Luque, S., Belfort, G., Membrane filtration with self-cleaning spiral vortices, *Proceed. of Euromembr.*, (1997) 386-387
- [20] Moulin, P., Manno, P., Rouch, J.C., Serra, C., Clifton, M.J., Aptel, P., Flux improvement by Dean vortices: ultrafiltration of colloidal suspensions and macromolecular solutions, *J. Membr. Sci.*, **156** (1999) 109-130
- [21] Verberk, J.Q.J.C., van Dijk, J.C., Air sparging in capillary nanofiltration, *J. Membr. Sci.*, **284** (2006) 339–351
- [22] Green, D.W., Perry, R.H., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 8. painos, McGraw-Hill, 2008, s. 6-28
- [23] Jaffrin, M.Y., Dynamic shear-enhanced membrane filtration: A review of rotating disks, rotating membranes and vibrating systems, *J. Membr. Sci.*, **324** (2008) 7–25
- [24] Schwinge, J., Wiley, D.E., Fane, A.G., Novel spacer design improves observed flux, *J. Membr. Sci.*, **229** (2004) 53–61, Ref. Schock, G., Miquel, A., Mass transfer and pressure loss in spiral wound modules, *Desalination*, **64** (1987) 339–352