

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Kemiantekniikka

Opinnäytetyö

Mikko Koppanen

NANOSUODATUKSEN AJOPARAMETRIT

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2008

Yliopettaja Torolf Öhman
TPI Control Oy, valvojana kemisti Karin Paavilainen

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kemiantekniikan koulutusohjelma

Kemiantekniikka

Koppanen, Mikko

Nanosuodatuksen ajoparametrit

Opinnäytetyö

27 sivua + 25 liitesivua

Työn ohjaaja

Yliopettaja Torolf Öhman

Työn teettäjä

TPI Control Oy, Myllyhaantie 2 33960 Pirkkala <http://www.tpi.fi/>,
valvojana kemisti Karin Paavilainen

Syyskuu 2008

Hakusanat

nanosuodatus, kalvosuodatus, glykolin puhdistus, koeajot

TIIVISTELMÄ

TPI-Control Oy on Pirkkalassa sijaitseva alle 20 työntekijän yritys, joka on erikoistunut talotekniikassa ja teollisuudessa käytettävien lämmönsiirtonesteiden kunnossapitoon. Yritys tekee muun muassa lämmönsiirtoverkkojen kuntokartoituksia, kunnossapitosuunnitelmia, huoltoja, pesuja ja täyttöjä. Nykyisessä toimipisteessä yritys on ollut noin neljä vuotta. Vuonna 2001 nimi vaihtui nykyiseksi Tampereen Prosessi-insinööreistä.

Nanosuodatus (NF) on erotusprosessi, jossa ajavana voimana on paine-ero. Luonteeltaan nanosuodatuksen ominaisuudet ovat käänteisosmoosin ja ultrasuodatuksen välistä. Tyypillisesti nanosuodatuskalvot voivat poistaa liuoksesta moniarvoiset ionit ja orgaaniset molekyylit, jotka ovat suurempia kuin 200–1000 g/mol. Tämän vuoksi nanosuodatus on potentiaalinen erotusmenetelmä useissa sovelluksissa. Jopa saman molekyyli-massaisten aineiden erotus on mahdollista tietyissä tapauksissa. Nanosuodatusta hyödynnetään jäte- ja prosessivesien puhdistuksessa teollisuuden eri aloilla, kuten sellu- ja paperiteollisuudessa, metalli- sekä meijeriteollisuudessa.

Yrityksellä oli nanosuodatuksen perustuva lämmönsiirtonesteen puhdistuslaite, jota ei ollut testattu. Opinnäytetyössä testattiin kolmen eri kalvovalmistajan kalvoja kahdella eri glykoliliuoksella ja kolmella eri painealueella. Testeissä selvisi, että yksi kalvoista oli hieman muita parempi tuotoltaan ja optimaalisin painealue oli noin 20 bar. Pesuainetta sisältävä glykoliseos oli helppo puhdistettavissa ja kalvot eivät tukkeutuneet lainkaan kyseisellä nesteellä. Glykoli ei konsentroitunut juurikaan prosessissa, mutta kaikilla kalvoilla rauta ja kupari jäivät retentaattiin. Erisuodatus oli tärkeää kalvon toiminnan kannalta, mutta kalvon puhdistus onnistui pesuaineliuoksella. Tuottoa täytyisi saada enemmän, joka onnistuu suuremmilla kalvoilla tai lisäämällä kalvojen määrää.

TAMPERE UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Chemical Engineering

Chemical Engineering

Koppanen, Mikko

Engineering thesis

Thesis supervisor

Comissing Company

Running parameters of nanofiltration

27 pages, 25 appendices

Lic. Sc. Torolf Öhman

TPI Control Oy, Myllyhaantie 2 33960 Pirkkala <http://www.tpi.fi/>,
Supervisor Chemist Karin Paavilainen

September 2008

Keywords

nanofiltration, membrane filtration, glycol purification, test drives

ABSTRACT

TPI Control Oy is a small company which is located in Pirkkala and has specialised in maintenance of the heat transmission liquids and systems which are used in HVAC and industry. The company makes the condition chartings, among other things, maintenance plans, maintenances, washes and fillings of heat transmission systems. In 2001 the name changed to the present from Tampereen prosessi-insinöörit.

The nanofiltration (NF) is a separation process in which the driving force is a pressure difference. The properties of the nanofiltration are between reverse osmosis and ultrafiltration. The nanofiltration membrane can remove the pluralistic ions and organic molecules which are bigger than 200-1000 g/mol from solution. Because of this the nanofiltration is a potential separation method for several applications. The separation of the materials which even have the same molecule mass is possible in certain cases. The nanofiltration is utilised in cleaning of waste and process waters in different fields of the industry, such as in chemical pulp and paper industry, metal industry and dairy industry.

The company has a cleaning device for the heat transmission liquids which is uses nanofiltration and had not been tested. Purpose of this thesis is to find the driving parameters suitable to the cleaning device. There were three different membranes and two different glycol solutions to test. The tests showed that one of the membranes has slightly better yield than others. On other matters the membranes were quite similar. The best pressure to drive was 20 bars and best solution was the one with washing agent in it. All membranes filtered copper and iron sufficiently and there were only a little concentration of glycol. Prefiltration of the liquid was extremely important, but cleaning of the membrane was also effective. Higher yield is needed; possibly more membranes or larger ones are needed.

ALKUSANAT

Tämän opinnäytetyö on tehty TPI Control Oy:lle ja sen tarkoituksena on selvittää kuinka pakkasnesteen puhdistus onnistuu nanosuodatuslaitteistolla. Koeajojen suorittaminen oli mielenkiintoista, sillä lopputuloksista ei ollut läheskään aina varmuutta. Kokeitten aikana saatiin rikottu monen monta muoviosaa laitteesta ja ihmeteltyä useasti miksi tämä tärkeä laite käyttäytyy näin. Kaikki tarvittava saatiin kuitenkin tehtyä ja tuloksista voi lukea tuonnempana. Koeajot ja mittaukset suoritettiin kesän ja alkusyksyn aikana Pirkkalassa TPI:n tiloissa. Työ hankittiin puhelinsoittojen ja ystävällismielisen suosittelun avulla.

TPI Control Oy:n toimitusjohtaja Jorma Koskista haluan kiittää tämän opinnäytetyön tekemisen mahdollistamisesta. Tutkimus- ja tuotekehityspäällikkö Karin Paavilaista haluan kiittää työn ohjaamisesta, viisaista ohjeista. Laborantti Satu Taipaleta haluan kiittää laboratorion ja kaluston lainaamisesta ja Ville Niemistä laitteen käytön opettamisesta ja sen korjaamisesta. Yliopettaja Torolf Öhmania kiitän työn ohjaamisesta ja tarkastamisesta. Suurkiitokset kuuluvat myös yrityksen muulle henkilökunnalle hyvästä ilmapiiristä. Haluan kiittää Jussi Koppasta suositteluista ja yleensä koko yrityksen olemassaolon kertomisesta. Kiitokset kuuluvat myös muille työn tekemiseen jotenkin osallistuneille. Erityisesti haluan kiittää puolisoani Tanjaa, joka on urheasti auttanut minua tämänkin työn kanssa.

Tampereella 3. lokakuuta 2008

Mikko Koppanen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT.....	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
SANASTO.....	6
1 JOHDANTO.....	7
2 NANOSUODATUS	8
2.1 Nanosuodatus verrattuna muihin kalvomenetelmiin	8
2.2 Käyttökohteet teollisuudessa	9
2.3 Nanosuodatuskalvot.....	9
2.4 Kalvojen käyttö.....	11
2.5 Kalvojen likaantuminen ja puhdistus.....	12
3 SUODATUSLAITTEISTO	14
3.1 Esisuodatus	14
3.2 Käyttö	15
3.3 Työssä käytetty laitteisto	16
4 KOEAJOT	18
4.1 Yleistä	18
4.2 Koenesteet.....	18
4.3 Mittaukset	18
4.4 Ajojen suoritus.....	19
5 KOEAJOJEN TULOKSET	21
5.1 Laitteiston operointi.....	21
5.2 Kalvojen erot	22
5.2.1 Kalvo 1.....	23
5.2.2 Kalvo 2.....	24
5.2.3 Kalvo 3.....	24
6 AJON TARKKAILU JA SÄÄTELY	25
6.1 Tarkkailtavat parametrit.....	25
6.2 Kalvon puhdistus	26
7 PÄÄTELMÄT JA JATKOSUUNNITELMAT	27
LÄHTEET	29
LIITTEET	

SANASTO

Vuo =	Kalvon läpi virtaavan nesteen virtaus tilavuudenyksikköä per kalvoneliometri tunnissa. Yleensä $(\text{m}^3/\text{m}^2)*\text{h}$ tai $(\text{dm}^3/\text{m}^2)*\text{h}$. Englanniksi flux.
Permeaatti =	Kalvon läpi suodattunut neste.
Retentaatti =	Neste, joka ei ole suodattunut kalvon läpi. Käytetään myös nimeä konsentraatti ja rejekti.
Sähkönjohtokyky =	Ilmaisee aineen kykyä johtaa sähköä. Tässä työssä ominaisuudesta käytetään lyhyesti ilmaisua johtokyky. Vedessä ilmiön aiheuttavat erilaiset suolat, joiden ionit nostavat johtokykyä. Mittayksikkönä on tässä työssä käytetty millisiemensia metriä kohti (mS/m). Tislattulla vedellä arvo on noin 0,2 mS/m ja vesijohtovedellä Suomessa noin 20 mS/m.
Freezium =	Kaliumformiaattipohjainen pakkasneste, Kemiran tuotemerkki.

1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena on löytää TPI Control Oy:n nanosuodatuslaitteistolle sopivat ajoparametrit ja selvittää laitteiston toimintaa suodatuskäytössä. Suodatuslaitteiston suunniteltu käyttötarkoitus on puhdistaa lämmönsiirtonesteitä sivuvirrassa, eli nestettä otetaan puhdistettavan järjestelmän kierrosta, puhdistetaan se ja palautetaan takaisin kiertoon. Kyseisen menetelmän avulla järjestelmä välttyisi täydelliseltä tyhjennykseltä, säästäisi aikaa ja vähentäisi glykolijärjestelmistä tulevaa jätteen määrää. Lisäksi lämmönsiirtojärjestelmän toimintaan ei tulisi katkoksia tällä menetelmällä ja pesuja voitaisiin suorittaa myös pakkasaikana. Toinen mahdollisuus on puhdistaa verkostoista tyhjennettyjä glykoleita TPI:n tiloissa.

Nanosuodatuslaitteisto on ollut olemassa TPI:llä, mutta sitä ei ole testattu yrityksessä. Laitteisto on rakennettu yhteistyössä teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskuksen kanssa.

Kalvosuodatus, johon nanosuodatus kuuluu, on varsin hyvin tutkittu alue erityisesti vedenpuhdistuksen osalta. Tästä syystä teoretietoa ja aikaisempia tutkimuksia löytyy riittävästi ja niistä oli suurta hyötyä varsinkin teoriapuolen kokoamisessa. Toisaalta glykoli-vesiseosten puhdistuksesta kalvosuodattimilla ei löydy juurikaan tietoa ja nanosuodatus on kalvosuodatuksen tuoreimpia ja nopeimmin kehittyviä suuntia. TPI Control oli teettänyt Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla glykolin suodattamisesta kalvomenetelmällä tutkimuksen, josta saatiin tietoa menetelmän toimivuudesta ja puhdistuskyvystä.

2 NANOSUODATUS

2.1 Nanosuodatus verrattuna muihin kalvomenetelmiin

Nanosuodatus kuuluu kalvosuodattimiin. Siinä liuotin, yleensä vesi, ajetaan puoliläpäisevän kalvon läpi. Kalvo on normaalisti polymeerinen tai keraaminen. Kalvosuodatusmenetelmät ovat mikro(MF)-, ultra(UF)-, nanosuodatus(NF) ja käänteisosmoosi(RO), mikrosuodatuksen ollessa harvin ja käänteisosmoosin tiukin. Nanosuodatus sijoittuu suodatuskyvyltään ultrasuodatuksen ja käänteisosmoosin väliin, tosin huomattavasti lähemmäksi käänteisosmoosia. Nanosuodatusta on joskus sanottu löysäksi käänteisosmoosiksi, mikä ei ole kovinkaan kaukana totuudesta. /3/

Nanosuodatuksen periaate on käytännössä sama kuin käänteisosmoosilla: pakotetaan suodatettava aine, yleensä neste, suurella paineella puoliläpäisevän kalvon läpi. Karkeasti arvioiden käänteisosmoosin ja nanosuodatuksen erot ovat käytettävissä paineissa ja kalvojen huokoskoossa. Käänteisosmoosin suodattaessa lähes kaiken päästää nanosuodatus läpi enemmän yhdenarvoisia suoloja. Molekyylin koon, muodon ja varauksen vaikutus on myös suuri, kuten taulukosta 1 näkee.

Taulukko 1 Eri kalvotyyppien pidätyskykyjä /3, s. 2/

AINE	RO	NF	UF
NaCl	99 %	0-70 %	0 %
NaSO ₄	99 %	99 %	0 %
CaCl	99 %	0-90 %	0 %
MgSO ₄	>99 %	>99 %	0 %
H ₂ SO ₄	98 %	0-5 %	0 %
HCl	90 %	0-5 %	0 %
Fruktoosi	>99 %	20-99 %	0 %
Sakkaroosi	>99 %	>99 %	0 %
Humushappo	>99 %	>99 %	30 %
Virukset	99,99 %	99,99 %	99 %
Proteiinit	99,99 %	99,99 %	99 %
Bakteerit	99,99 %	99,99 %	99 %

2.2 Käyttökohteet teollisuudessa

Nanosuodatusta käytetään monissa prosesseissa kemianteollisuudessa. Ilmeisimmässä eli veden suodatuksessa sitä on käytetty pitkään. Nanosuodatuksella saadaan erotettua prosesseissa veteen päässeitä haitallisia aineita ennen veden päästämistä esimerkiksi viemäriin tai vesistöön. Lisäksi nanosuodatuksella voidaan valmistaa juomavettä likaisesta makeasta vedestä, mihin se sopii käänteisosmoosia paremmin (käänteisosmoosi poistaa vedestä myös tarvittavat suolat). Vedenpehmennys on myös yksi käyttökohde. /3, s. 264/

Muita käyttökohteita nanosuodatukselle on teollisuudessa paljon ja uusia tutkitaan jatkuvasti. Lääketeollisuudessa nanosuodatusta käytetään muun muassa antibioottien erottamiseen ja konsentroimiseen. Petrokemian teollisuudessa on kokeiltu esimerkiksi raakaöljyn hapon poistoon, voiteluaineiden vahanpoistoon ja epäpuhtauksien poistoon tuotteista. Meijereissä heran erotus ja suolojen poisto tehdään myös nanosuodatuksella. Väriteollisuudessa nanosuodatusta käytetään paljon suolojen poistoon väriaineista, konsentroiintiin ja epäorgaanisen aineen vähentämiseen. Selu- ja paperiteollisuudessa on myös muutama nanosuodatusta hyödyntävä laitos. Haluttu tuote nanosuodatuksessa voi olla retentaatti, permeaatti tai jopa kumpikin. /3; 6, s. 9/

Edellisten kohteiden lisäksi nanosuodatusta käytetään myös esikäsitteilynä ennen toista suodatusta, esimerkiksi käänteisosmoosia tai haihdutusta. Nanosuodatusta on käytetty etyleeniglykolin ja propyleeniglykolin puhdistukseen. Käyttökohteet ovat olleet lähinnä käytetyn auton pakkasnesteen kierrätys ja regenerointi sekä lentokennillä jäänestoaineen puhdistus ennen konsentroiintiä. /3, s.339/

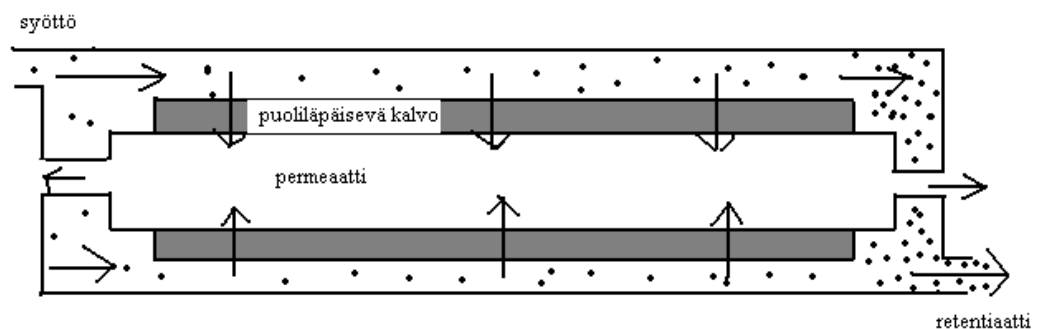
2.3 Nanosuodatuskalvot

Nanosuodatuksessa käytettävissä kalvoissa olevat huokoset ovat noin yhden nanometrin luokkaa. Perinteisellä mikroskoopilla ei nanosuodatuskalvossa näy huokosia, mutta elektronimikroskoopilla on havaittu aukkoja, jotka mahdollisesti ovat

tyhjiä kohtia polymeeriketjujen (esimerkiksi selluloosa asetaatti) välissä. Lisäksi kalvon pinnassa käytettävän materiaalin ominaisuuksilla voidaan vaikuttaa suodatuskykyyn. Muun muassa kalvon pinnan sähkövarauksella ja hydrofobisuudella tai -fiilisytydellä on vaikutusta. /3, s. 1–2/

Rakenteellisesti nanosuodatuskalvot ovat epäsymmetrisiä, eli niiden ulkopuoli (suodatettavaa ainetta kohti oleva) on erilainen kuin sisäpuoli. Käytännössä kalvon ulkopuoli on tiukempi ja sisäpuoli löyhempi, mikä estää huokosia tukkeutumasta. Kalvon ulkopuolella on ohut ulkokerros, iho, jossa varsinainen suodatus tapahtuu. Tämän ihon paksuus on vain pieni osa koko kalvon paksuudesta lopun kalvon ollessa pääasiassa tukirankaa. /6, s.13–14/

Markkinoilla on monentyypisiä nanosuodatuskalvoja eri valmistajilta. Yleisin kalvotyyppi on spiraalimoduuli. Spiraalimoduulin toimintaperiaatetta on hahmotettu kuvassa 1. Kalvo on kierretty permeaatin keräysputken ympärille spiraalin muotoon ja on läpivirtaustyyppinen. Kalvotyyppi on suunniteltu alun perin vedenpuhdistukseen, mutta nykyään se on käytössä monilla teollisuudenaloilla. Hyvä tuotto, kompakti koko, monta eri valmistajaa, standardointi ja suuri valikoima erilaisia kalvoja ovat taanneet suosion. TPI Controlin nanosuodatuslaitteisto käyttää myös spiraalimoduuleja. /6, s. 16/



Kuva 1. Esimerkki spiraalimoduulin toiminnasta

Spiraalimoduulin lisäksi käytössä olevia moduulityyppejä ovat taso-, putki-, onttoputki-, ja kapillaarijärjestelmät. Näillä järjestelmillä on omat hyvät puolensa ja käyttötarkoituksensa, mutta tässä työssä on keskitytty spiraalimoduuleihin, sillä suodatuslaitteisto on suunniteltu niille.

2.4 Kalvojen käyttö

Spiraalimoduulit ovat melko samanlaisia eri valmistajilla. Tästä on etuna se, että ei tarvitse käyttää vain yhden valmistajan kalvoja. Markkinoilla on erikokoisia kalvoja, ja fyysisen koon lisäksi eroja on kalvon pinta-alan ja materiaalien lisäksi muissa ominaisuuksissa, esimerkiksi käärintätavassa. Löysästi käärittyjen kalvojen ei pitäisi tukkeutua niin helposti ja tuoton pitäisi olla niissä parempi, mutta ne painuvat kaasaan suuremmilla paineilla. Kalvojen toimintaa ja elinikää voi parantaa myös esikäsittelemällä syöttöliuosta kemikaaleilla, jos syöttöliuoksessa on kalvon tukkeutumista aiheuttavia komponentteja. /8/

Kalvon käyttöönoton yhteydessä kalvoja tulisi huuhdella vedellä. Jotkin kalvovalmistajat kehottavat jopa kierrättämään emäksistä vesiliuosta kalvon läpi hetken. Kalvon vesivuo tulisi myös mitata ennen käyttöönottoa, jotta myöhemmin siihen voidaan verrata vuonarvoja likaantumisen määrittämiseksi. Kastuttuaan kalvo ei saa kuivua. Jos se poistetaan prosessista, se tulisi säilöä happamassa natriummetabisulfiittiliuoksessa, mikä estää biokontaminaation. Kuivunutta kalvoa voi yrittää elvyttää esimerkiksi upottamalla se muutamaksi tunniksi isopropanoliin. /1; 2; 9/

Kalvot ovat melko herkkiä laitteita ja kalliita suodattimia, minkä vuoksi niiden käyttöohjeita ja annettuja arvoja on noudatettava. Lämpötilan ja pH:n tulee olla annetulla alueella tai kalvo saattaa pahimmassa tapauksessa tuhoutua. TPI:llä olleissa kalvoissa pH tuli pysyä alueella 3–10 ja lämpötilan maksimi oli noin 45 °C. Käyttöpaineen noustessa oli muiden arvojen pysyminen sallituissa rajoissa entistä tärkeämpää. /1; 2; 6/

2.5 Kalvojen likaantuminen ja puhdistus

Nanosuodatuskalvot vaativat aina jonkinlaista esisuodatusta, jos sille syötettävän liuoksen puhtaudesta on epäilyjä. Suodatus voi olla perinteistä mekaanista tai hienompaa ultra- tai mikrosuodatusta. Kemiallinen puhdistus on myös mahdollista. Yleisesti kiintoaine ja kaikki kalvolle vaarallinen tulisi poistaa ennen nanosuodatusta. Rasvat ja öljyt heikentävät kalvon tuottoa tukkimalla sen ja vahvat hapettimet tuhoavat kalvon rakenteita ja kalvoa itseään. Äärimmäiset pH-arvot ovat kalvon käyttöikää laskevia. Biologinen aines voi muodostaa kalvon päälle kerroksen ja tukkia sen täysin (biofouling), kuten myös kiintoaine. Mikro-organismit voivat myös kasvaa kalvon pinnalla. Suolat voivat kerrostua kalvolle. Kalvon tukkeutumisen huomaa helposti heikentyneestä tuotosta eli permeaattivirran laskusta. /3; 8/

Kalvon tuotto heikkenee jossain vaiheessa esisuodatukselta riippumatta, viimeistään vedessä olevista suoloista. Kalvosuodatuslaitteisto huuhdellaan vedellä tasaisin väliajoin, jolloin järjestelmä puhdistuu hiukan ja samalla saadaan vesivuo selville, millä tarkoitetaan kalvon tuottoa pelkällä vedellä. Käyttötarkoituksen mukaan teollisuudessa olevat nanosuodatuslaitteistot pestään tietyin väliajoin, alkaen kerran päivässä pestävistä usean viikon pesuväleihin. Pesut aiheuttavat luonnollisesti taloudellisia ja ympäristöhaittoja, sillä laitteisto tuottaa tuolloin vain jätevettä. Siksi laitteistoja ei pestä heti, kun tuotto laskee hiukan, vaan laskua saa tulla jopa kymmeniä prosentteja. /3, s. 219; 6, s. 56–57; 8/

Nanosuodatuslaitteistoissa pesut suoritetaan yleensä paikallaan, CIP-pesuina (cleaning in place). Järjestelmää ei siis pureta lainkaan. Pesuajossa järjestelmä huuhdellaan ensin hyvin vedellä, jonka jälkeen järjestelmässä kierrätetään alhaisella paineella (2–8 bar) lämmitettyä vettä johon, on lisätty emästä, jotta pH olisi noin 10. Emäs voi olla jotakin kalvovalmistajan omia pesuaineita tai vain natriumhydroksidia, määrän ollessa noin 1 % tilavuudesta. Puolen tunnin kierrätyksen jälkeen huuhdellaan emäs vedellä pois niin pitkään kunnes poistuvat nesteet ovat neutraaleja. Tämän jälkeen pestään puoli tuntia hapolla, pH 2. Happo voi olla esimerkiksi laimea typpihappoa tai jokin kaupallinen pesuaine, määrä noin prosentti tilavuudes-

ta. Tämän jälkeen järjestelmä huuhdellaan vedellä puhtaaksi. Lopuksi katsotaan puhdistetun kalvon tuotto vedellä ja verrataan sitä puhtaan kalvon arvoon, jolloin voidaan päätellä kalvon kunto ja vaihtotarve. Muita pesuaineita happo-emäs-pesun lisäksi ovat esimerkiksi kompleksinmuodostajat (kelatointiaine), fosfaatit (dispergointi) ja pinta-aktiiviset aineet (anioniset ja varauksettomat). Taulukossa 2 on lueteltuna eri pesutapoja ja -prosesseja. /1; 2; 3, s. 219–222; 6, s. 84–85; 8/

Biosidipesun tarpeesta ollaan monta mieltä, sillä osa biosideistä saattaa vahingoittaa kalvoa, erityisesti klooripohjaiset biosidit. Otsonin käyttö saattaa vahingoittaa myös kalvoa. Jos järjestelmässä on paha biologisten saastuttajien ongelma, on tehokas puhdistus silloin tarpeen. /3, s. 221/

Mekaanisia puhdistusmenetelmiä ovat esimerkiksi vastavirtahuuhtelu, ilmakuplat veden seassa, värinä ja ultraäänipesu. Lian laadusta ja järjestelmän rakenteesta riippuen saattavat nämä olla tehokkaita menetelmiä, varsinkin yhdistettynä pesuaineeseen (taulukko 2). /3, s. 220–221/

Taulukko 2. Eri puhdistusmenetelmiä /3, s. 220; 6, s. 84–85; 8/

Mekaaniset puhdistusmenetelmät

virtaussuunnan muutos
vaahto
ilmapurkaukset
hiilidioksidin virtaus kalvon läpi
ääniaallot
värinä

Kemiallinen puhdistus

happo-emäs
hydrolyysi
tensidit
dispergointi
peptisaatio
saippuoituminen
entsyymit

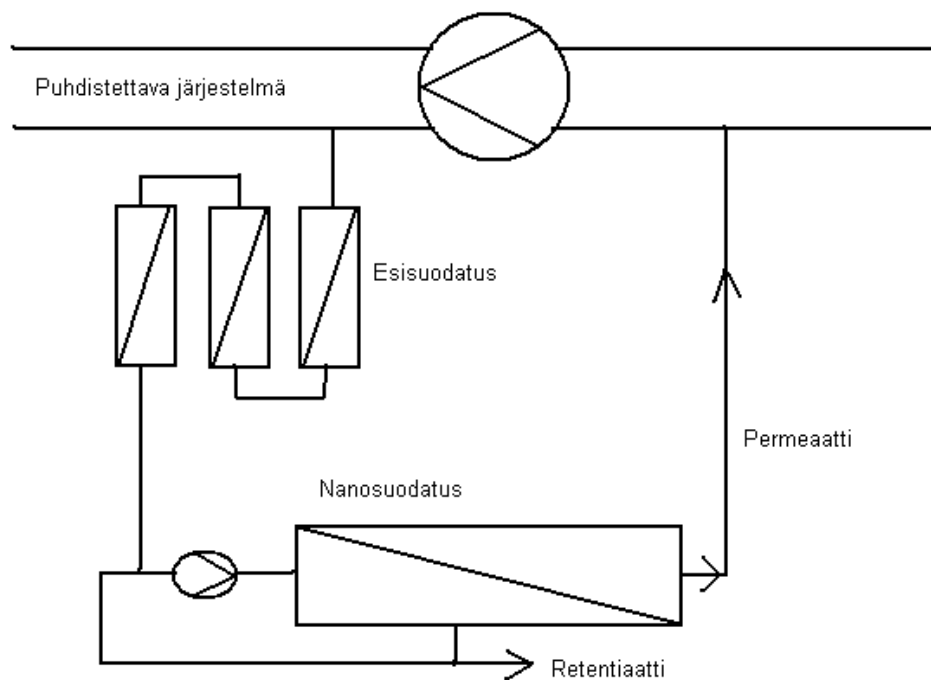
Nanosuodatusjärjestelmän puhdistuksessa on tärkeää muistaa käytetyn menetelmän soveltuvuus kyseiselle kalvolle ja sille kertyneelle lialle.

3 SUODATUSLAITTEISTO

3.1 Esisuodatus

Nanosuodatuslaitteisto on ensijaisesti tarkoitettu puhdistamaan glykolia liuenneista metalleista ja pesuaineesta. Puhdistus voidaan suorittaa suoraan pestävässä järjestelmässä asiakkaan luona tai puhdistaa talteenotettua käytettyä glykolia yrityksen tiloissa. /4/

Ennen glykolin syöttöä nanosuodattimelle tulee se puhdistaa suurimmista kiintoainepartikkeleista sekä öljyistä ja rasvoista. Kiintoaine voidaan poistaa perinteisillä mekaanisilla suodattimilla ja rasvat, öljyt ja muu kalvolle haitallinen orgaaninen aines esimerkiksi aktiivihieillä. Suoraan kohteessa tapahtuvassa pesussa on ennen kalvoa esisuodatus, kuten kuvassa 2, ja säilötyn glykolin tapauksessa voidaan puhdistettava neste suodattaa etukäteen ennen säilöntää.



Kuva 2. Nanosuodatuslaitteisto kytkettynä puhdistettavaan järjestelmään

3.2 Käyttö

Suodatuslaitteiston käyttö aloitetaan täyttämällä se nesteellä. Tämä suoritetaan syöttöpumpun tai puhdistettavan verkoston kiertopumpun avulla. Sama pumppu huolehtii nesteen syötöstä korkeapainepumpulle, jottei tapahtuisi kavitaatiota. Syöttöpuolella on myös suuntaventtiili estämässä korkeapaineisen nesteen paluun esikäsitteilyyn. Laitteiston ilmaus suoritetaan päästämällä retentaattiventtiilistä nestettä pois, kunnes ilmaa ei enää tule. /4/

Kun laitteistoon tulee nestettä ja ilmaus on suoritettu, voidaan korkeapainepainepumppu käynnistää. Kyseisellä kalvopumpulla tuotetaan paine nanosuodatuskalvoa vasten./4/

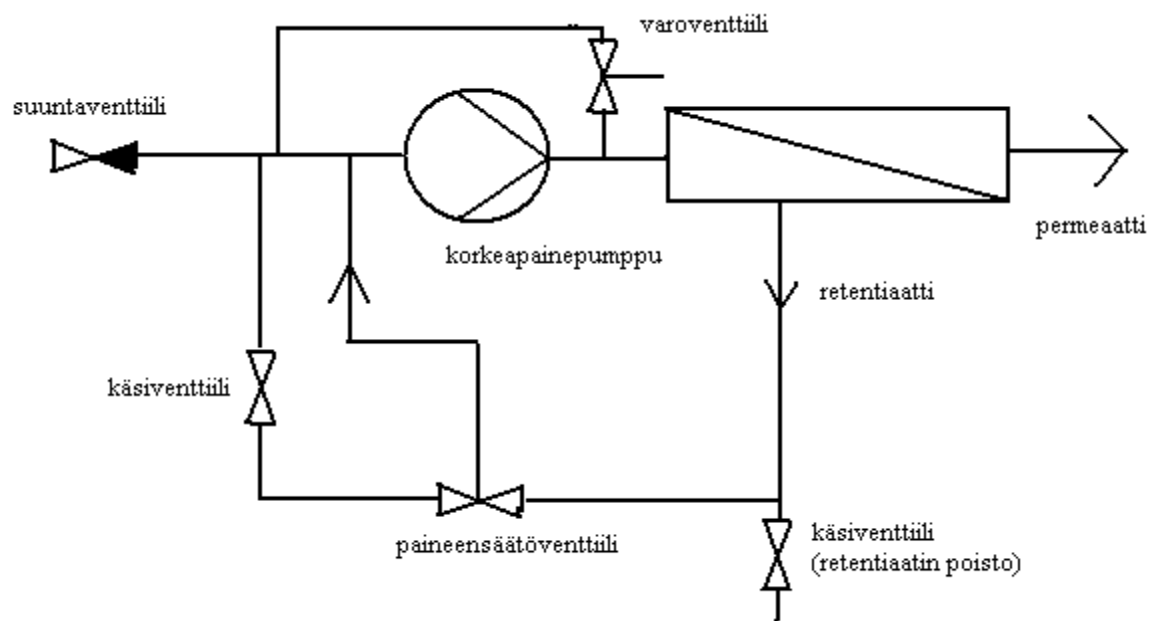
Laitteiston käynnistyessä poistuu permeaattipuolella ollut ilma. TPI Controlilla olevassa laitteessa ei ole taajuusmuuntajaa korkeapainepumpun sähkömoottorille, joten suodatuslaitteen paine nostetaan paineensäätösäätöventtiilin ja käsiventtiilien avulla (kuva 3). Aluksi laitetta ajetaan alhaisella paineella ja vältetään äkillisiä paineen ja virtaaman muutoksia, jotta kalvo ei kärsisi vaurioita.

Ajon aikana laitteen toimintaa tarkkaillaan siinä olevien mittareiden avulla. TPI Controlilla olevassa laitteessa on lämpötila-, paine- ja virtausmittareita, joista korkeapainepuolella olevien mittareiden avulla valvotaan laitteen toimintaa. Tärkeimpiä tietoja ovat paine, lämpötila ja permeaattivirta. Laitteesta tulisi ottaa ulos retentaattia noin 10 prosenttia permeaatin virtauksesta.

Paineen nostot ja laskut tulee tehdä asteittain. Kun haluttu painealue on saavutettu, tulee painetta ja tuottoa tarkkailla, jottei kumpikaan arvo lähtisi muuttumaan arvaamattomasti. Lisäksi korkeapainepumpun imupuolella tulee olla riittävä paine myös korkeammilla paine- ja tuottomäärillä. Permeaatilla ja retentaatilla on laitteessa näytteenottoventtiilit, joista voidaan valvoa suodatuksen kulkua ja onnistumista.

Laitteistolla haetaan glykoli-vesiseoksen puhdistamista metalleista, suoiloista ja vanhoista suoja-aineista. Tämä onnistumista tarkkaillaan johtokyvyn ja metallien pitoisuuksien mittauksilla. Lisäksi permeaatin ja retentaatin eroa tarkkaillaan myös silmämääräisesti. Kun puhdistettava liuos on riittävän puhdasta, voidaan ajo lopettaa. Vaikka liuos puhdistuu aina lisää ajon jatkuessa, kasvaa myös retentaatin eli jätteen määrä samalla.

Suodatuksen saavuttaessa loppunsa aletaan laitetta ajaa alas. Tämä tehdään kuten ylösajo, mutta päinvastoin. Asteittain lasketaan painetta, kunnes tuotto loppuu, ja sammutetaan pumput. Lopuksi järjestelmästä päästetään paine pois.



Kuva 3. Nanosuodatuslaitteiston kaaviokuva /5/

3.3 Työssä käytetty laitteisto

Nanosuodatuslaite on ollut valmiina TPI:llä jo puoli vuotta, mutta sitä ei ole käytetty paljoa. Laitteisto on hyvin paljon edellä kuvaillun kaltainen. Järjestelmän ydin on kuvassa 4 oikealla näkyvä pyörien päällä oleva laitteisto. Siinä korkeapainepumppu (mäntäpumppu) ja paineastia, jonka sisällä kalvo on, ovat saman rungon sisällä. Myös kaikki mittarit ovat siinä: virtausmittari laitteen sisäisen virtauksen mittaamiseen, lämpömittari putken pintaan kiinnitettynä, painemittarit järjestelmän korkea-

painepuolelle, pumpun imupuolelle ja syötettävän nesteen paineelle. Lisäksi permeaatti- ja retentaattivirtaamia mitattiin Kytölän valmistamilla rotametreillä. Järjestelmän varoventtiilit avautuvat 36 bar paineessa.

Kokeissa puhdistettavaa nestettä säilytettiin kuvassa 4 vasemmalla puolella näkyvässä kahdensadan litran astiassa. Nestettä syötettiin järjestelmään omalla pumpulla. Lisäksi neste ajettiin ennen järjestelmää sijoitettujen 50 mikronin, 10 mikronin ja aktiivihiilisuodattimien kautta.

Kastellut kalvot säilytettiin laitteen ulkopuolella natrium metabisulfiittiliuoksessa, jotta ne pysyisivät kunnossa ja jottei niihin tulisi mikrobikasvustoa.



Kuva 4. Nanosuodatuslaitteisto TPI Controlin tiloissa

4 KOEAJOT

4.1 Yleistä

Koeajot suoritettiin TPI Controlin tiloissa Pirkkalassa kesän 2008 aikana. Kokeissa käytettiin kolmea eri kalvoa, jotka olivat kaikki eri valmistajilta. Kaikilla kalvoilla ajettiin likaista glykolia ja glykoli-pesuaine-yhdistelmää sisältävät nesteet. Eri nesteillä ajettiin kolmella eri painealueella: 10, 20 ja 30 bar.

4.2 Koenesteet

Laitteistoa päädyttiin testaamaan kahdella eri liuksella: glykoli-vesiseoksella, joka oli sekoitettu monista vanhoista jäteglykoleista (likainen glykoli), ja pesuliuksen ja tuoreglykolin seoksella (pesuaineglykoli). Jälkimmäinen liuos tehtiin erään lämmitysverkoston pesusta talteen kerätyllä vedellä, jossa oli liuennutta rautaa ja pesuainetta. Lisäksi kuparisulfaattia (II) lisättiin kuparipitoisuuden nostamiseksi.

Kokeissa pyrittiin käyttämään samaa liuosta kaikille kalvoille ja puhdistettu liuos liattiin palauttamalla retentaatti säiliöön. Käytännössä tämä ei onnistunut, sillä metalleista osa hävisi johonkin: todennäköisesti esisuodattimiin, tai ne kiinnittyivät kalvon pintaa. Lisäksi laiterikko likaisen glykolin ensimmäisten ajojen aikana hävitti suuren osan kyseisen liuksen metalleista. Kyseinen liuos tehtiin uudestaan, ja pesuaineglykoliseokseen lisättiin myös kalvojen vaihtojen yhteydessä pesuainevettä ja kuparisuolaa. Liuoksissa oli yleensä rautaa useita satoja milligrammoja litrassa ja kuparia alle kymmenen. Tarkat mitatut arvot ovat liitteessä 4.

4.3 Mittaukset

Puhdistettavista nesteistä mitattiin sähkönjohtokyky (mS/m), pH, jähmepiste (celsiusasteina) ja kuparin ja raudan pitoisuudet milligrammoina litrassa. Sähkönjohto-

kyky mitattiin Hannahin johtokykymitattarilla (tarkkuus +/- 2 % tuloksesta), pH WTW:n pH 330 pH-mittarilla (tarkkuus +/- 0,01), jähmepiste Mettler Toledon refraktometrillä (tarkkuus +/- 0,2 % tuloksesta) ja raudan ja kuparin määrät AAS:llä TPI:n laboratoriossa. Ajon aikana mitattiin ja kirjattiin muistiin virtaamat, järjestelmän lämpötila, paine ja retentaatin ja permeaatin sähkönjohtokyvyt. Virtaamissa permeaatin tarkkuus oli +/- 0,2 l/min, retentiaatin +/- 0,02 l/min ja laitteen sisäisellä virtauksella +/- 0,05 m³/h. Mittaukset pyrittiin suorittamaan tunnin välein. Sähkönjohtokyvyn tuloksissa saattaa esiintyä eniten poikkeamia, mutta johtokyvyn suuruusluokka on tärkeämpi kuin absoluuttisen tarkka arvo.

Kaikista ajoista otettiin myös nestenäytteitä laboratoriossa tehtäviä kokeita varten. Varsinkin puhdistetusta liuoksesta, kertyneestä retentaatista ja permeaatista pyrittiin ottamaan näytteet. Lisäksi permeaatista ja retentaatista otettiin näytteet tunnin välein jos kyseessä oli uusi kalvo. Näin saatiin tietoa mahdollisista muutoksista ja pystyttiin vertailemaan eri kalvoja.

4.4 Ajojen suoritus

Koska laitteen käytöstä ja sen ominaisuuksista ei ollut juurikaan tietoa, jouduttiin osa asioista oppimaan yrityksen ja erehdyksen kautta. Varma tieto oli kuitenkin siitä, että nanosuodatuskalvot todella puhdistavat glykoli-vesiseoksia. /6/

Laitteen koekäytössä vedellä huomattiin, että laite tärisee ja pitää melko kovaa ääntä, joka on lähes suoraan suhteessa käyttöpaineeseen. Tärinä johtui pumpusta. Sitä oli yritetty vaimentaa asentamalla pumpun ja sähkömoottorin alle kumieristeet, mutta eristeiden paksuus oli ilmeisesti riittämätön. Lisäksi pumppu oli kiinni järjestelmässä kiinteillä putkilla, ja nämä välittivät värähtelyt koko laitteeseen. Tärinä aiheutti todennäköisesti painemittareiden ja paineastian permeaattiportin hajoamiset. Pitkäaikainen oleskelu laitteen läheisyydessä sen ollessa päällä oli myös epämuksua melun vuoksi.

Kalvojen vaihtojen yhteydessä huomattiin kyseisen toimenpiteen hankaluus ja eri kalvonvalmistajien kalvojen yhteensopimattomuus. Paineastian PVC-osat hajosivat varsin herkästi ja paineastian aukaisu ei ollut nopeaa ja helppoa. Eri valmistajien kalvot olivat kaikki erilaisia pituuksiltaan. Yksi kalvo erosi myös permeaattipuolen kiinnikkeiden osalta muista. Johtuen näistä syistä kalvot vaativat sovituskappaleita, jotta ne saataisiin kiinni paineastiaan.

Laitteen lämpötilan nousu oli myös ongelma. Koska puhdistettavat nestemäärät olivat pieniä, alle kaksisataa litraa, lämpeni neste nopeasti pumppujen vaikutuksesta, sillä permeaatti palautettiin takaisin kiertoastiaan. Retentaatti ei myöskään väkevöitynyt niin nopeasti, että sitä olisi tarvinnut laskea jatkuvasti pois laitteen kierrosta, mikä ei poistanut lämpöä laitteesta. Korkea lämpötila oli haitallista kalvolle ja se lyhentää käyttöikää. Lisäksi kalvon pidätyskyky laski lämpötilan kohotessa. Samalla tosin nousi tuotto. Ongelma ratkaistiin kierrättämällä puhdistettava neste lämmönvaihtimen läpi, jota jäähdytettiin viileällä vesijohtovedellä.

Ensimmäisissä ajoissa käyttöajat vaihtelivat, mutta ne vakiintuivat kolmeen tuntiin. Tässä ajassa neste kiersi laitteen kautta riittävän paljon, jotta suurin osa epäpuhtauksista ehti poistua.

Puhdistettaessa todella likaista glykolia tukkeutuivat alussa käytössä olleet esisuodattimet lähes täysin, ja ne olivat korvattava suuremmilla suodattimilla. Samojen ajojen aikana myös kalvo osoitti tukkeutumisen merkkejä, mikä mahdollisti kalvon pesun kokeilun.

Glykoli-pesuaineliuosta puhdistettaessa huomattiin myös retentaatin tyhjentämisen tärkeys suodatustapahtuman onnistumisen kannalta.

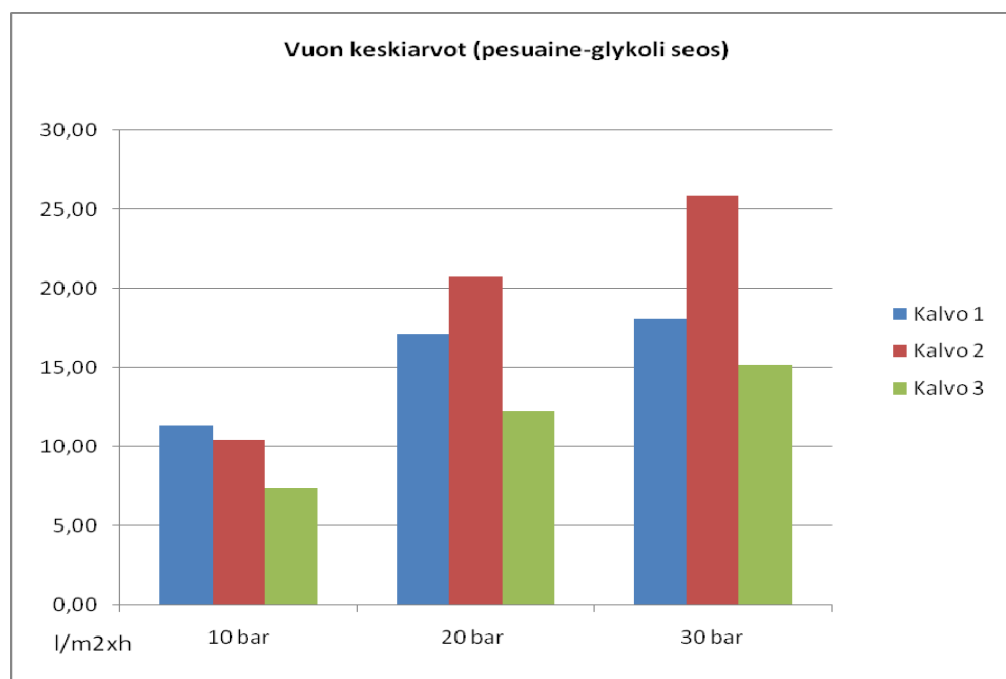
Kalvojen läpi ajettiin myös pelkkää vesijohtovettä, jotta nähtiin muutoksia tuotossa esimerkiksi tukkeutumisen vuoksi.

5 KOEAJOJEN TULOKSET

5.1 Laitteiston operointi

Suodatuslaite toimii parhaiten, kun sitä käytetään kuten ohjeissa neuvotaan, eli rauhallisesti painetasoja nostamalla ja ilmaamalla laitteisto hyvin. Esisuodatus oli myös välttämätöntä, sillä kiintoaines ja varsinkin rasvat ja öljyt ovat tukkivat kalvon pinnan helposti. Kaikilla kolmella kalvolla veden läpäisy kalvosta heikkeni huomattavasti likaisen glykolin jälkeen, yleensä yli 50 %.

Eri käyttöpaineissa olevat erot samalla kalvolla rajoittuivat lähinnä tuoton muutokseen. 10 ja 20 bar:n välillä tapahtui suuri hyppäys permeaatin tuotossa, mutta 20 ja 30 bar:n välillä muutos ei ollut kovinkaan radikaali, kuten kuvasta 5 näkyy. 30 barin paineessa laitteisto muuttui epävarmaksi, sillä oltiin melko lähellä varoventtiilin aukeamisrajoja. 20 bar oli kaikille kalvoille optimaalisin ajoalue, sillä likaantuminen (fouling) tapahtuu myös nopeasti korkeassa paineessa.



Kuva 5. Kalvojen vuot eri paineissa

Suodatuksen aikana retentaattia ei kannattanut päästää jatkuvasti pois, vaan sen annettiin kiertää järjestelmän sisällä ja väkevöityä. Tämä on tärkeää varsinkin suodatusprosessin alussa, jolloin retentaatin annetaan väkevöityä. Väkevöityminen tapahtui sitä nopeammin, mitä suurempi permeaattivirta oli. Retentaattia poistettiin koeajoissa järjestelmästä tunnin välein noin kolmen litran verran. Retentaattia kertyi noin 7 % alkuperäisen suodatettavan liuoksen tilavuudesta. Liitteissä olevista tuloksista ilmenee (kalvon numero 1), että puhdistettaessa pesuaine-glykoliseosta retentaatin poisto on erityisen tärkeää, sillä muuten metallien konsentraatiot nousevat liian suuriksi ja niitä pääsee permeaattiin.

Pesuaine-glykoliseosta puhdistettaessa kalvoissa ei ilmennyt likaantumisen merkkejä ja mitattaessa kalvon tuottoa pelkällä vedellä (vesivuo) pesuaine-glykoli seosajojen jälkeen olivat tuoton arvot nousseet. Parhaimmillaan tuotto kasvoi jopa 2,5 litraa minuutissa. Tämä on positiivista kalvon eliniän ja tehon kannalta, mikäli pitkäaikainen altistus pesuaineille ei vahingoita kalvoa.

5.2 Kalvojen erot

Koeajojen aikana huomattiin, että kalvot olivat ominaisuuksiltaan hyvin lähellä toisiaan. Paperilla kalvo 1 oli suodatuspinta-alaltaan pienempi kuin toiset kalvot ja kalvo 2 oli permeaattituotoltaan parempi kuin kaksi muuta kalvoa. Kalvo 3 oli ominaisuuksiltaan näiden välissä. Paineen-, lämmön- ja kemikaalienkestot olivat muuten hyvin lähellä toisiaan. Tosin valmistajat ilmoittivat jopa 50 %:n eroista permeaattivirroissa samanlaisten kalvojen välillä. Kaikkien ajojen ja puhdistusten tarkat tulokset löytyvät liitteistä.

Metallien pidätyskyvyissä ei ollut juuri eroja: Kuparia permeaatissa oli kaikilla alle 0,5 mg/l ja rautaa alle 10 mg/l. Glykolia väkevöityy myös retentaattiin hiukan, mutta erot suodatetun ja suodattamattoman liuoksen välillä jähmepisteissä ovat noin 0,5 °C eli noin prosentti massasta.

Kaikilla kalvoilla permeaatti oli väritöntä, riippumatta puhdistettavasta liuksesta. Retentaatti puolestaan värjäytyy vahvemmaksi, varsinkin jos liuksessa on pesuainetta.

Tuotoissa ilmeni jonkin verran eroja ja kalvo 2 oli paras pesuaine-glykoliseoksen puhdistamisessa, kuten kuvasta 5 selviää. Kalvot 1 ja 3 olivat tuotoltaan melko lähellä toisiaan, mutta koska kalvolla 3 on suurempi pinta-ala, sen vuoarvot ovat alhaisemmat. Likaista glykolia puhdistettaessa eroja ei juuri muodostunut, sillä kalvot tukkeutuivat nopeasti ja tuotot putosivat. Kaikilla kalvoilla ja nesteillä permeaattituotot pysyivät melko pienessä haarukassa, sillä parhaimmillaan kalvo 2 pystyi hiukan yli kolmeen litraan minuutissa permeaattia ja heikoimmat tulokset olivat alle litraa minuutissa. Suhteessa erot ovat toki moninkertaisia. Tuotto vaikutti luonnollisesti puhdistettavan liuksen puhdistumisnopeuteen ja laitteen tehokkuuteen.

5.2.1 Kalvo 1

Pesuaine-glykoliseoksella kalvon tuotto ja vuo korkeita ja kalvo ei likaantunut. Paineen nosto 30 bar ei parantanut tuottoa, kalvo painui mahdollisesti kasaan. Permeaatin ja retentaatin johtokyvyissä oli suuret erot, permeaatti alle 90 mS/m ja retentaatti yli 500. Kupari ja rauta jäivät myös tehokkaasti retentaatin puolelle, eli kalvon pidätyskyky on hyvä (liite 1). Glykolia kalvo päästää läpi kuten toiset kalvot, ero jähmepisteissä 0,5 °C. Retentaattiin jää hiukan enemmän glykolia, jolloin retentaatin jähmepiste noin kolme astetta korkeampi kuin permeaatin.

Likaisella glykolilla kalvo 1 antoi suurempia arvoja tuotolle ja huonompaa metallien pidätyskykyä. Tämä johtui siitä, että sopivia ajomenetelmiä ei ollut vielä löydetty eikä puhdistettavaa nestettä jäädytetty. Retentaattia ei myöskään päästetty ajon aikana pois järjestelmästä. Lisäksi neste oli eri kuin muilla kalvoilla. Myöhemmin kalvolla ajettiin samaa nestettä kuin toisillakin ja samoissa olosuhteissa. Tällöin kalvo käyttäytyi kuten toiset kalvot. Pidättäen metallit, ja tuotto oli alhainen. Johtokyky oli permeaatilla noin 250 mS/m ja retentaatilla 350 mS/m. Syy permeaatin korkeaan johtokykyyn oli todennäköisesti glykoleissa olevat suoja-aineet, jotka ovat yhdenarvoisia sähkövaraukseltaan (esim. nitriitti).

Kummallakaan nesteellä pH:ssa ei tapahtunut merkittäviä muutoksia retentaatin pH:n ollessa hieman alempi kuin permeaatilla tai puhdistettavalla liuoksella.

5.2.2 Kalvo 2

Kalvo 2 sai pesuaine-glykoliseoksella parhaan tuoton kaikista kolmesta kalvosta. Kalvon tuotto parani aina, kun painetta nostettiin ja merkkejä tukkeutumisesta ei ollut, kuten liitteestä 2 selviää. Kalvon pidätyskyky oli hyvä. Johtokyky permeaatissa oli noin 80 mS/m ja retentaatissa 800 mS/m. Glykolin pidätyskyky oli samaa tasoa kuin muilla. Puhdistettavassa liuoksessa jähmepiste oli laskenut 0,5 °C ja retentaatissa jähmepiste oli yli kolme astetta korkeampi kuin permeaatissa.

Likaisen glykolin kanssa kalvo toimi yhtä huonosti kuin muutkin, tuoton käytännössä huonontuessa paineen noston myötä. Kuparia kalvo pidättää hyvin, mutta sitä ei ollut liuoksessa paljoa alun perinkään. Jostain syystä rautaa pääsi permeaattiin enemmän, yli 50 mg/l. Johtokyvyt retentaatissa olivat noin 400 mS/m ja permeaatissa noin 250 mS/m. Permeaatin johtokyky oli samaa luokkaa kaikilla kalvoilla, joten raudan määrä nesteessä ei siihen juurikaan vaikuta.

Kalvo ei aiheuttanut suuria muutoksia pH-arvoihin kummallakaan nesteellä.

5.2.3 Kalvo 3

Pesuaine-glykoliseoksella kalvon tuotto oli huonompi kuin kahdella muulla kalvolla. Kalvon tuotto ei ylittänyt 30 bar paineella toisten kalvojen 20 bar paineiden tuottoa. Lisäksi kalvo päästi kuparia läpi 10 bar paineessa enemmän kuin toiset kalvot. Korkeammilla paineilla pidätyskyky oli vastaava kuin muissa kalvoissa. Johtokyky oli permeaatissa noin 80 mS/m ja retentaatissa yli 800 mS/m. Jähmepisteiden erot olivat alku- ja lopputilanteen välillä 0,5 °C ja permeaatin ja retentaatin välillä 3,5 °C.

Likaisen glykolin kanssa kalvon tuotto oli varsin alhainen, noin litra minuutissa. Paineen nosto ei juuri vaikuttanut tilanteeseen, vaan kalvo tuntuu likaantuvan jo en-

simmäisellä ajolla. Kalvon pidätyskyky oli hyvä, tosin metalleja ei ollut suuresti lähtöliuoksessa. Johtokyky permeaatissa oli noin 230 mS/m ja retentaatissa noin 400 mS/m. Jähmepiste laski liuoksella noin 0,5 °C ja permeaatin. Retentaatin välillä eroa oli muutama aste, jollaisia eroja oli myös muillakin kalvoilla.

Liuoksen pH laski noin 0,2:lla puhdistuksen jälkeen, mutta eroja oli eri painealueilla. Muuten pH arvojen muutokset olivat melko pieniä. Tarkat arvot ovat liitteessä 3.

6 AJON TARKKAILU JA SÄÄTELY

6.1 Tarkkailtavat parametrit

Järjestelmän ollessa käynnissä siitä tulisi pystyä päättämään puhdistuksen onnistuminen ja järjestelmän kunnan tarkkailu. Alla on esitetty kohteita joihin koeajoissa kiinnitettiin huomiota.

Lämpötila: Ei saisi ylittää kalvonvalmistajan suosituksia, yleensä 40 °C. 35 °C on normaalissa käytössä turvallinen raja eivätkä kalvon ominaisuudet eivät vielä muutu.

Paine: Alun jälkeen paine ei saisi muuttua. Paineennousu kertoo yleensä kalvon tukkeutumisesta ja lasku mahdollisesta laiterikosta.

Nesteen väri: Mikäli puhdistetaan väriaine- tai pesuainepitoista glykolia, voidaan liuosten väreistä päätellä esimerkiksi, jos retentaattia vuotaa permeaattipuolelle. Lisäksi retentaatin väkevöitymistä voidaan seurata värinmuutoksen avulla.

Nesteiden johtokyky: Jos pesuainetta on glykolin seassa, voidaan johtokykyä mitataamalla päätellä esimerkiksi, milloin retentaattia täytyy päästää laitteen kierrosta pois ja onko permeaatti riittävän puhdasta. Johtokykyjen suhde riippuu kalvosta, mutta kokeissa retentaatin johtokyky oli vähintään viisinkertainen permeaattiin verrattuna. Suure on helposti ja nopeasti mitattavissa.

Metallien pitoisuudet: Varmin keino permeaatin puhtauden tarkkailuun ja retentaatin poistotarpeen arviointiin, varsinkin jos johtokyvystä ei voi päätellä asiaa. Tarkka mittaaminen vaatii tosin aikaa ja laitteiston. Kenttäolosuhteisiin tarkoitettujen mittavälineiden ovat taas melko karkeita ja epäluotettavia.

Jähmepiste ja pH ovat myös helposti mitattavissa, mutta glykolin puhdistustarkoituksissa niiden muutoksista ei voi päätellä paljoa.

6.2 Kalvon puhdistus

Puhdistettaessa todella likaista glykolia kaikki kalvot osoittivat tukkeentumisen merkkejä. Syy oli todennäköisemmin nesteessä olleessa rasvassa tai öljyssä sekä mahdollisesti kalvon pintaan jääneistä metalleista. Rasvat olisi voitu poistaa aktiiviviili-suodattimella, mutta alussa käytössä olleet pienet suodattimet tukkeutuivat liian määrästä ja suuremmissa suodattimissa ei ollut aktiiviviiliä. Tämä mahdollisti kuitenkin kalvojen pesun kokeilun.

Laitteen läpi ajettiin aluksi runsaasti vettä, kunnes permeaatti ja retentaatti olivat puhtaat. Tämän jälkeen vettä alettiin kierrättää laitteessa, niin että permeaatti ja retentaatti palasivat kierrätysastiaan. Veteen lisättiin tällöin noin prosentin verran TPI:n omaa pesuainetta, ja laitteen annettiin käydä 45 minuuttia alhaisella paineella retentaatin poisto täysin auki.

Puhdistuksen päätyttyä mitattiin pesunesteen johtokyky ja raudan ja kuparin määrät. Johtokyky oli noussut pesuaineen vaikutuksesta noin 200:aan ja kuparia oli kalvokohtaisesti vaihdellen yli milligramma litrassa ja rautaa useita satoja milligrammoja litrassa. Tämän jälkeen pesuvesi huuhdeltiin pois ja mitattiin kalvon vesituotto. Kaikilla kalvoilla veden läpäisy palautui lähes samoille tasoille, kuin ne olivat ennen likaisen glykolin puhdistusta. Pidätyskyky oli ennallaan. Laskua oli 0,2 litrasta minuutissa lähes litraan minuutissa. Kalvolla 1 oli ajettu vain yksi ajo

ennen pesua, mikä selittää vähäisiä metallipitoisuuksia. Tarkat arvot ovat liitteessä 5.

Kalvon puhdistus laitteen sisällä onnistui ja sitä kannattaa käyttää, mikäli ilmenee laskua tuotossa. Kalvonvalmistajat ja kirjallisuus ehdottavat pesua miedoilla hapoilla ja emäksillä. Niitä voi käyttää, mikäli pelkkä pesuaineliuos ei puhdistaa kalvoa riittävästi. /1; 2; 6; 8; 9/

7 PÄÄTELMÄT JA JATKOSUUNNITELMAT

Glykoli-vesiseoksen puhdistaminen nanosuodatustekniikalla onnistuu käytetyllä laitteistolla. Kokeilluista kalvoista numero 2 oli paras tuotoltaan ja yleiseltä toimivuudeltaan. Todella likaista glykolia puhdistettaessa täytyy neste esisuodattaa hyvin ja rasvat ja öljyt tulee poistaa. Pesuaineen lisääminen puhdistettavaan glykoliin kannattaa, sillä se pitää kalvon puhtaana ja parantaa suodatustulosta. Tällöin suodatusprosessia on myös helpompi valvoa sähkönjohtokykyä mittaamalla. Tukkeutunut kalvoa voi puhdistaa pesuaineliuksella.

Seuraavaksi pitäisi selvittää, kuinka laitteisto toimii kenttäolosuhteissa jonkin piirin puhdistamisessa. Tällöin pitäisi selvittää, tarvitseeko laite syöttöpumppua vai riittääkö puhdistettavan verkoston oma pumppu. Laite tarvitsee joka tapauksessa jonkin astian, johon puhdistettu neste kerätään ja pumpataan siitä omalla pumpulla takaisin verkostoon. Nesteiden johtokyvyt ja retentaatin värin tarkkailu ovat helpoiten tarkkailtavat parametrit. Niiden avulla laitteen automatisointi olisi myös yksinkertaisimmin toteutettavissa. Laitteisto on mahdollisesti jaettava eri kokonaisuuksiin (pumppu ja kalvot erilleen), jotta sen siirtäminen oli mahdollista kahden henkilön voimin.

Laitteen tuotto on yhdellä kokeilluilla kalvoilla parhaimmillaan noin 1,5 kuutiometriä kahdeksassa tunnissa, mikä ei riitä isojen glykoliverkkojen puhdistukseen. Tuottoa täytyy nostaa. Tällöin joudutaan joko hankkimaan parempituottoisia kalvoja tai lisäämään kalvoja enemmän rinnakkain. Kalvomäärän kasvattaminen saattaa olla

parempi ratkaisu, sillä suurempituottoiset kalvot ovat yleensä löysempiä tai suurempia fyysiseltä kooltaan. Laitteistossa käytössä ollut pumppu saattaa käydä joka tapauksessa liian pieneksi tuotoltaan.

Suodatuksesta jäävälle retentaatille täytyy tehdä myös jotain. Ekokem hävittää sen maksua vastaan, mutta retentaatin nanosuodatusta tulisi kokeilla. Varsinkin suurista verkostoista tulevan retentaatin määrä voi olla valtava, jopa 10 kuutiometriä. Glykolin konsentroitua tulisi myös kokeilla. Nanosuodatusta voisi myös kokeilla suolapohjaisille pakkasnesteeille, esimerkiksi Freeziumille. Tulevaisuudessa spesifisemmät kalvot saattavat auttaa näissä ongelmissa.

LÄHTEET

Painetut lähteet

- 1 Alfa Laval, Kalvon käyttöönotto ja puhdistusohjeet. 2008.
- 2 Koch membrane systems, Kalvon käyttöönotto ja puhdistusohjeet. USA 2005.
- 3 Schäfer, A – Fane, A– Waite, T, Nanofiltration- Principles and Applications. Elsevier Ltd. Cornwall, Iso-Britannia 2005.
- 4 NF-laitteiston käyttöohje. Suomi 2007.
- 5 NF-laitteiston piirustukset. Suomi 2007.
- 6 Wagner, Membrane filtration handbook- Practical tips and hints. Osmonics. USA 2001.

Painamattomat lähteet

- 7 Hovila – Mänttari, TPI-Controlin tilaama tutkimus jäädytysnesteen kalvoteknisestä puhdistamisesta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Suomi 2006.
- 8 Liikanen, Marko, Kalvosuodatusprosessin tehostaminen paperiteollisuuden sovelluksissa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Kemiantekniikan osasto. Imatra 2000.

Sähköiset lähteet

- 9 Membrane Technical Information, DOW water solutions. [www-sivu]. [luettu 2.6.2008]
http://www.dow.com/liquidseps/service/lm_techinfo.htm

LIITTEET

- 1 Kalvon 1 koeajot (9 sivua)
- 2 Kalvon 2 koeajot (6 sivua)
- 3 Kalvon 3 koeajot (6 sivua)
- 4 Lähtöliuokset (2 sivua)
- 5 Vesivuot/tuotot ja kalvojen pesujen rauta ja kuparimäärät (2 sivua)

Kalvo 1: Likainen glykoli 1, 20 bar

Likainen pakkasneeste
Kalvo 1
ei valutusta välissä
ei jäähdtyvystä

aika/h	0	0,5	1	2	2,75	3,5
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
permeaatti virta l/min	2,5	2,5	2,5	2,8	3	3
retentiaattivirta l/min	0	0	0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C	25	32	36	40	42	45
järjestelmän paine bar	20	20	20	20	20	20
Permeaatin pakkaskesto C						
Retentiaatin pakkaskesto C						
Permeaatin johtokyky mS/m	115	140	145	145		145
Retentiaatin johtokyky mS/m	200	280	300	300		290
Permeaatin Fe mg/l						
Retentiaatin Fe mg/l						
Permeaatin Cu mg/l						
Retentiaatin Cu mg/l						
Vuo dm ³ /m ² *h	27,78	27,78	27,78	31,11	33,33	33,33
glyk. Pakkaskesto						
	-14,1					
	-13,6					
johtokyky	280	15	2,3	8,04		
Cu	138	3,3	2,3	8,11		
Fe						
pH						
keskiarvo						30,19

lopussa:
retentiaatti
puhd. Liuos

Kalvo 1: Likainen glykoli 1, 20 bar, jäädytetty

Likainen pakkasneste
Kalvo 1
jäädytys

aika/h	0	1	2	3	
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,85	1,85	1,8	1,8	
permeaatti virta l/min	1,8	2	1,8	1,8	
retentiaattivirta l/min	0	0	0	0	
lämpötila (järjestelmä) C	22	28	25	26	
järjestelmän paine bar	20	20	20	20	
Permeaatin pakkaskesto C					
Retentiaatin pakkaskesto C					
Permeaatin johtokyky mS/m	81	120	116	115	
Retentiaatin johtokyky mS/m	236	420	441	400	
Permeaatin Fe mg/l		0,1	0,1	0,1	
Retentiaatin Fe mg/l		3,9	3,5	2,6	
Permeaatin Cu mg/l		0,6	0,6	0,6	
Retentiaatin Cu mg/l		47	55	42	
Vuo dm ³ /m ² *h	20,00	22,22	20,00	20,00	
glyk. Pakkaskesto					
		johtokyky	Cu	Fe	pH
	-12,9	400	42	2,6	7,94
retentiaatti	-11,6	115	0,7	0,3	8,01
puhd. Liuos	-11,6	115	0,6	0,1	8,01
permeaatti					
					keskiarvo
					20,56

lopussa:

retentiaatti
puhd. Liuos
permeaatti

Kalvo 1: Likainen glykoli 2, 20 bar, jäädytetty ja retentaatin poisto, eri liuos

aika/h	0	1	2	3
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,85	1,85	1,85	1,8
permeaatti virta l/min	1,2	1,2	1,2	1,2
retentaattivirta l/min	0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C	18	24	24	25
järjestelmän paine bar	20	20	20	20
Permeaatin pakkaskesto C				
Retentaatin pakkaskesto C				
Permeaatin johtokyky mS/m	145	220	211	200
Retentiaatin johtokyky mS/m	280	390	365	361
Permeaatin Fe mg/l				2
Retentaatin Fe mg/l				132
Permeaatin Cu mg/l				0
Retentaatin Cu mg/l				keskiarvo
Vuo dm ³ /m ² *h	13,33	13,33	13,33	13,33
glyk. Pakkaskesto	johtokyky	Cu	Fe	pH
	-15,2	350	0,6	148
	-13,7	200	0	5,3
	-13,7	194	0	2
				5,45
				5,52
				5,54

Likainen glykoli (eri liuos)
 Kalvo 1
 jäädytys+valutus 3l/ 1h

lopussa:
 retentaatti
 puhd. Liuos
 permeaatti

Kalvo 1: Glykoli+pesuaine, 10 bar, jäähdytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

Tuore glyk.+ pesuaineliuos	aika/h	0	1	1,75	3
Kalvo 1	Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,9	1,9	2	2,05
jäähdytys	permeaatti virta l/min	1,1	0,9	0,9	0,9
ei valutusta välissä	retentaattivirta l/min	0	0	0	0
	lämpötila (järjestelmä) C	22	34	34	34
	järjestelmän paine bar	10	10	10	10
	Permeaatin pakkaskesto C	-11	-11	-11	
	Retentaatin pakkaskesto C	-12	-14	-14	
	Permeaatin johtokyky mS/m	68	105	125	145
	Retentiaatin johtokyky mS/m	255	585	695	778
	Permeaatin Fe mg/l		47,2		
	Retentaatin Fe mg/l		2250		
	Permeaatin Cu mg/l		0,3		
	Retentaatin Cu mg/l		13		
	Vuo dm ³ /m ² *h	12,22	10,00	10,00	10,00
lopussa:	glyk. Pakkaskesto	johtokyky	Cu	Fe	pH
retentaatti		-16,6	755	21	2870
puhd. Liuos		-13	126	1	99
permeaatti		-13	139	1,2	170,5
					keskiarvo
					10,56

Kalvo 1: Glykoli+pesuaine, 10 bar, jäädytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

aika/h	0	1	1,25	2	2,25	3	3,35	4,5	4,75
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,9	1,95	2,15	2,1	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
permeaatti virta l/min	1,2	1	1	1	1	1	1	1	1
retentaattivirta l/min	0	0	0	0	0	0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C	18	26	24	27	24	26	24	26	24
järjestelmän paine bar	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Permeaatin pakkaskesto C									
Retentaatin pakkaskesto C									
Permeaatin johtokyky mS/m	69	100	87	104	85	95	83	90	75
Retentiaatin johtokyky mS/m	280	552	464	622	456	560	463	550	400
Permeaatin Fe mg/l	19,7	46,9	30,7	45,9	22,6	34	22,2	24,9	13,3
Retentaatin Fe mg/l		6500		1900		7200		2020	
Permeaatin Cu mg/l	0,1	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2
Retentaatin Cu mg/l		8,6		9,3		8,8		8,4	
Vuo dm ³ /m ² *h	13,33	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11
glyk. Pakkaskesto		johtokyky	Cu	Fe	pH				
retentaatti	-15	510	7,2	1890	5,9				
puhd. Liuos	-12,9	91	0,4	37,2	6,15				
permeaatti	-12,7	73	0,2	13,3	6,08				
									keskiarvo
									11,36

Tuore glyk. + pesuaineliuos

Kalvo 1

jäädytys+valutus 3l/ 1h

lopussa:

retentaatti

puhd. Liuos

permeaatti

Kalvo 1: Glykoli+pesuaine, 20 bar, jäädytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

aika/h	0	1	2	3	4
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85
permeaatti virta l/min	2	1,2	1,5	1,5	1,5
retentaattivirta l/min	0	0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C	18	27	29	25	25
järjestelmän paine bar	20	20	20	20	20
Permeaatin pakkaskesto C					
Retentaatin pakkaskesto C					
Permeaatin johtokyky mS/m	62	95	89	78	74
Retentiaatin johtokyky mS/m	224	776	757	545	443
Permeaatin Fe mg/l			19,8		6,8
Retentaatin Fe mg/l		3390	4100	2030	1470
Permeaatin Cu mg/l			0,4		0,2
Retentaatin Cu mg/l		17	17	10,3	9,3
Vuo dm ³ /m ² *h	22,22	13,33	16,67	16,67	16,67
glyk. Pakkaskesto					
	johtokyky	Cu	Fe	pH	
	-15,5	588	13	2210	5,77
	-12,8	77	0,2	12,3	6,33
	-12,8	74	0,2	6,8	6,4

Tuore glyk.+ pesuaineliuos
Kalvo 1
jäädytys+valutus 3/ 1h

lopussa:
retentaatti
puhd. Liuos
permeaatti

keskiarvo
17,11

Kalvo 1: Glykoli+pesuaine, 30 bar, jäädytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

aika/h	0	0,5	1	2	2,5	3
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
permeaatti virta l/min	2	1,8	1,5	1,5	1,5	1,5
retentaattivirta l/min	0	0	0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C	22	28	28	29	26	26
järjestelmän paine bar	30	30	30	30	30	30
Permeaatin pakkaskesto C						
Retentaatin pakkaskesto C						
Permeaatin johtokyky mS/m	68	85	90	83	74	75
Retentaatin johtokyky mS/m	312	636	755	705	542	562
Permeaatin Fe mg/l						
Retentaatin Fe mg/l						
Permeaatin Cu mg/l						
Retentaatin Cu mg/l						
Vuo dm ³ /m ² *h	22,22	20,00	16,67	16,67	16,67	16,67
glyk. Pakkaskesto						
						keskiarvo
						18,15

Tuore glyk.+ pesuaineliuos
Kalvo 1
jäädytys+valutus 3l/ 1h

lopussa:
retentaatti yht. -15,7 johtokyky 602 Fe 32 Cu 20,00 pH 16,67 16,67 16,67 5,54
puhd. Liuos -12,6 78 0,7 15,7 6,16
permeaatti -12,6 72 0,5 9,3 6,26

Kalvo 2: Likainen glykoli 2, 10 bar, jäädytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

Likainen glykoli 2
Kalvo 2
jäädytys+valutus 3l/ 1h

aika/h	0	1	2	3
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,9	1,9	1,9	1,9
permeaatti virta l/min	1,8	1,4	1,4	1,4
retentaattivirta l/min	0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C	22	23	24	25
järjestelmän paine bar	10	10	10	10
Permeaatin pakkaskesto C				
Retentaatin pakkaskesto C				
Permeaatin johtokyky mS/m	202	240	235	234
Retentaatin johtokyky mS/m	320	407	396	388
Permeaatin Fe mg/l		91		72
Retentaatin Fe mg/l		1020		790
Permeaatin Cu mg/l		0		0
Retentaatin Cu mg/l		2,2		0,3
Vuo dm ³ /m ² *h	14,21	11,05	11,05	11,05
glyk. Pakkaskesto				
	-17,2			
	-15,7			
	-15,8			
lopussa:				
retentaatti yhd.	367	1	800	5,97
puhd. Liuos	233	1,1	110	5,91
perm	234	0	72	5,88
				11,84

Kalvo 2: Likainen glykoli 2, 20 bar, jäädytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

Likainen glykoli 2 Kalvo 2 jäädytys+valutus 3l/ 1h		0	1	2	3
aika/h					
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h		1,85	1,85	1,85	1,85
permeaatti virta l/min		2,2	1,5	1,5	1,5
retentaattivirta l/min		0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C		21	25	27	28
järjestelmän paine bar		20	20	20	20
Permeaatin pakkasesto C					
Retentaatin pakkasesto C					
Permeaatin johtokyky mS/m		201	238	241	236
Retentaatin johtokyky mS/m		335	438	425	401
Permeaatin Fe mg/l					60
Retentaatin Fe mg/l					710
Permeaatin Cu mg/l					0
Retentaatin Cu mg/l					0,8 k-a
Vuo dm ³ /m ² *h		17,37	11,84	11,84	11,84
glyk. Pakkasesto		johtokyky	Cu	Fe	pH
lopussa:					
retentaatti	-17,5	391	1,3	800	5,9
puhd. Liuos	-15,6	226	0,2	67	5,76
perm	-15,6	236	0	60	5,78

Kalvo 2: Likainen glykoli 2, 30 bar, jäädytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

Likainen glykoli 2 Kalvo 2 jäähdytys+valutus 3l/ 1h		aika/h	0	1	2	3
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h			1,85	1,8	1,8	1,8
permeaatti virta l/min			2,5	1,5	1,2	1,2
retentaattivirta l/min			0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C			26	30	32	32
järjestelmän paine bar			30	30	30	30
Permeaatin pakkaskesto C						
Retentaatin pakkaskesto C						
Permeaatin johtokyky mS/m			217	250	245	240
Retentaatin johtokyky mS/m			348	430	429	415
Permeaatin Fe mg/l						50,3
Retentaatin Fe mg/l						520
Permeaatin Cu mg/l						0
Retentaatin Cu mg/l						0,3 k-a
Vuo dm ³ /m ² *h			19,74	11,84	9,47	12,63
glyk. Pakkaskesto			johtokyky	Cu	Fe	pH
retentaatti		-17,6	381	0,6	600	5,81
puhd. Liuos		-15,6	226	0	53,3	5,74
permeaatti		-15,6	240	0	50,3	5,73

Kalvo 2: Glykoli+pesuaine, 20 bar, jäädytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

Glykoli+pesuaineliuos						
Kalvo 2						
jäädytys+valutus 3l/ 1h						
aika/h		0	1,25	2	3	4
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h		1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
permeaatti virta l/min		1,8	1,1	1,1	1,1	1,5
retentaattivirta l/min		0	0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C		20	25	26	23	26
järjestelmän paine bar		10	10	10	10	10
Permeaatin pakkaskesto C		-	-13	-13	-13	-13
Retentaatin pakkaskesto C		-	-17,5	-17,5	-16,8	-16,1
Permeaatin johtokyky mS/m		60	83	78	71	68
Retentaatin johtokyky mS/m		385	830	850	752	651
Permeaatin Fe mg/l			12,4	9,8	5,9	3,7
Retentaatin Fe mg/l			4430	4410	3730	2840
Permeaatin Cu mg/l			1,4	1,2	0,7	0,4
Retentaatin Cu mg/l			141	128	115	107
Vuo dm ³ /m ² *h		14,21	8,68	8,68	8,68	10,42
glyk. Pakkaskesto						
lopussa:						
retentaatti	-16,1	johtokyky	Cu	Fe	pH	
puhd. Liuos	-13	651	107	2840	5,74	
permeaatti	-13	71	0,8	7,8	6,08	
		68	0,4	3,7	6,08	

Kalvo 2: Glykoli+pesuaine, 20 bar, jäähdytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

aika/h	0	1	2	3
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,85	1,85	1,85	1,85
permeaatti virta l/min	3,5	1,9	2,2	2,9
retentaattivirta l/min	0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C	22	24	23	22
järjestelmän paine bar	20	20+	20	20
Permeaatin pakkaskesto C				
Retentaatin pakkaskesto C				
Permeaatin johtokyky mS/m	61	78	69	64
Retentaatin johtokyky mS/m	481	1023	746	575
Permeaatin Fe mg/l				1,5
Retentaatin Fe mg/l				1425
Permeaatin Cu mg/l				0,2
Retentaatin Cu mg/l				60 k-a
Vuo dm ³ /m ² *h	27,63	15,00	17,37	22,89
glyk. Pakkaskesto				
retentaatti	-16,5	86	2050	5,6
puhd. Liuos	-12,8	0,5	7,7	6,24
permeaatti	-12,8	0,2	1,5	6,34
	johtokyky	Cu	Fe	pH

Kalvo 3: Likainen glykoli 2, 10 bar, jäädytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

Likainen glykoli 2 Kalvo 3 jäähdytys+valutus 3l/ 1h		0	1	2	3
aika/h					
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h		1,85	1,9	1,9	1,9
permeaatti virta l/min		1	0,9	0,9	0,9
retentaattivirta l/min		0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C		23	27	27	27
järjestelmän paine bar		10	10	10	10
Permeaatin pakkaskesto C					
Retentaatin pakkaskesto C					
Permeaatin johtokyky mS/m		184	230	221	225
Retentaatin johtokyky mS/m		274	350	353	350
Permeaatin Fe mg/l					5
Retentaatin Fe mg/l					151
Permeaatin Cu mg/l					0
Retentaatin Cu mg/l					0,3 k-a
Vuo dm ³ /m ² *h		8,45	7,61	7,61	7,61
glyk. Pakkaskesto		johtokyky	Cu	Fe	pH
retentaatti yhd.	-15,9	325	0,8	231	5,63
puhd. Liuos	-14,9	219	0,2	8,5	5,51
permeaatti	-14,9	218	0	5	5,52
lopussa:					7,82

Kalvo 3: Likainen glykoli 2, 20 bar, jäädytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

Likainen glykoli 2
Kalvo 3
jäädytys+valutus 3l/ 1h

aika/h	0	1	2	3
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,85	1,8	1,8	1,8
permeaatti virta l/min	1,4	1,2	1,1	1
retentaattivirta l/min	0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C	22	30	32	29
järjestelmän paine bar	20	20	20	20
Permeaatin pakkaskesto C				
Retentaatin pakkaskesto C				
Permeaatin johtokyky mS/m	170	225	228	220
Retentaatin johtokyky mS/m	274	407	393	397
Permeaatin Fe mg/l				3,6
Retentaatin Fe mg/l				251
Permeaatin Cu mg/l				0
Retentaatin Cu mg/l				0,2 k-a
Vuo dm ³ /m ² *h	11,83	10,14	9,30	8,45
glyk. Pakkaskesto				
lopusa:				
retentaatti	-16,4	johtokyky	Fe	pH
puhd. Liuos	356	0,3	348	5,64
perm	-14,8	214	0,1	5,47
	-14,8	210	0	5,44

lopusa:

retentaatti

puhd. Liuos

perm

Kalvo 3: Likainen glykoli 2, 30 bar, jäädytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

Likainen glykoli 2
Kalvo 3
jäädytys+valutus 3l/ 1h

aika/h	0	1	2	3
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,8	1,8	1,8	1,8
permeaatti virta l/min	1,4	1	1	1
retentaattivirta l/min	0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C	19	32	35	36
järjestelmän paine bar	30	30	30	30
Permeaatin pakkaskesto C				
Retentaatin pakkaskesto C				
Permeaatin johtokyky mS/m	157	238	231	224
Retentaatin johtokyky mS/m	281	431	420	404
Permeaatin Fe mg/l				3,4
Retentaatin Fe mg/l				45,8
Permeaatin Cu mg/l				0
Retentaatin Cu mg/l				0,3
Vuo dm ³ /m ² *h	11,83	8,45	8,45	8,45
glyk. Pakkaskesto				
lopussa:				
yhd. retentaatti	-16,7	0,2	239	5,6
puhd. Liuos	-14,7	0	5,4	5,4
permeaatti	-14,8	0	3,4	5,37
				9,30
	johtokyky	Cu	Fe	pH

Kalvo 3: Glykoli+pesuaine, 10 bar, jäähdytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

Glykoli+pesuliuos
Kalvo 3
jäähdytys+valutus 3l/ 1h

aika/h	0	1	2	3
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,9	1,9	1,9	1,9
permeaatti virta l/min	1	0,9	0,8	0,8
retentaattivirta l/min	0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C	25	39	32	33
järjestelmän paine bar	10	10	10	10
Permeaatin pakkaskesto C				
Retentaatin pakkaskesto C				
Permeaatin johtokyky mS/m	67	90	91	85
Retentaatin johtokyky mS/m	367	790	860	814
Permeaatin Fe mg/l		6,3	7	5,2
Retentaatin Fe mg/l		2900	2530	2220
Permeaatin Cu mg/l		1,7	1,9	1,5
Retentaatin Cu mg/l		290	350	410
Vuo dm ³ /m ² *h	8,45	7,61	6,76	6,76
glyk. Pakkaskesto				
johtokyky	639	280	1910	5,65
pH	-15			
retentaatti				
puhd. Liuos	-11,6	6,3	39,4	5,95
permeaatti	-11,6	1,5	5,2	6,17
				7,39

lopussa:

retentaatti

puhd. Liuos

permeaatti

Kalvo 3: Glykoli+pesuaine, 20 bar, jäädytetty ja 3 l retentaatin valutus tunnin välein

aika/h	0	1	2	3
Sisäinen til. Virtaus m ³ /h	1,85	1,85	1,85	1,8
permeaatti virta l/min	2	1,1	1,2	1,5
retentaattivirta l/min	0	0	0	0
lämpötila (järjestelmä) C	23	31	31	29
järjestelmän paine bar	20	20	20	20
Permeaatin pakkaskesto C				
Retentaatin pakkaskesto C				
Permeaatin johtokyky mS/m	63	79	75	72
Retentaatin johtokyky mS/m	260	938	890	700
Permeaatin Fe mg/l				1,7
Retentaatin Fe mg/l				1740
Permeaatin Cu mg/l				0,5
Retentaatin Cu mg/l				200 k-a
Vuo dm ³ /m ² *h	16,90	9,30	10,14	12,68
glyk. Pakkaskesto				
	johtokyky	Cu	Fe	pH
	-15	692	200	2050
yhd. retentaatti				5,74
puhd. Liuos	-11,6	73	2,1	14,1
permeaatti	-11,6	65	0,5	1,7
				6,04

Glykoli+pesuliuos
Kalvo 3
jäädytys+valutus 3l/ 1h

lopussa:

yhd. retentaatti
puhd. Liuos
permeaatti

Lähtöliuokset

Kalvo 1**Glykoli+pesuliuos**

Painealue bar	10	10	20	30
johtokyky mS/m	171	169	149	164
Cu mg/l	2,6	1,7	1,6	5
Fe mg/l	182,5	252	227	275
pH	5,99	6,03	6,03	5,83
Jähmepiste C	-12,7	13,2	-13,1	-13,1

Likainen glykoli

Painealue bar	10	20	20	30
johtokyky mS/m	140	142	144	142
Cu mg/l	4,1	3,5	3,8	2,7
Fe mg/l	16,6	3,2	1,4	2,3
pH	8,1	8,1	7,99	8,1
Jähmepiste C	-13,6	-13,6	-12,1	-12,5

Likainen glykoli 2

Painealue bar	20
johtokyky mS/m	221
Cu mg/l	0
Fe mg/l	31,4
pH	5,49
Jähmepiste C	-14,2

Kalvo 2**Glykoli+pesuliuos**

Painealue bar	10	20	30
johtokyky mS/m	175	157	164
Cu mg/l	10	8,5	8,8
Fe mg/l	287	251	238
pH	5,9	5,9	5,9
Jähmepiste C	-13,3	-13,3	-13,2

Likainen glykoli

Painealue bar	10	20	30
johtokyky mS/m	287	287	251
Cu mg/l	0,2	0,2	0,8
Fe mg/l	250	250	170
pH	5,81	5,81	5,8
Jähmepiste C	-14,6	-14,6	-16

Lähtöliuokset

Kalvo 3**Glykoli+pesuliuos**

Painealue bar	10	20	30
johtokyky mS/m	175	165	165
Cu mg/l	40	28	28
Fe mg/l	249	217	217
pH	5,7	5,98	5,98
Jähmepiste C	-11,9	-12	-12

Likainen glykoli

Painealue bar	10	20	30
johtokyky mS/m	236	236	232
Cu mg/l	0,7	0,7	0,1
Fe mg/l	123	123	60
pH	5,65	5,65	5,42
Jähmepiste C	-15,1	-15,1	-14,9

Vesivuot/tuotot

Kalvo 1**Veden johtokyky**

20 mS/m

likaisen glykolin jälkeen**10 bar**

l/min

mS/m

Permeaatti

3,8

16

Sisäinen virtausnopeus

31

20 bar

Permeaatti

6,8

25

Sisäinen virtausnopeus

30

Pesuaine/glykolin jälkeen**10 bar**

l/min

mS/m

Permeaatti

4,2

16

Sisäinen virtausnopeus

31

20 bar

Permeaatti

8,2

20

Sisäinen virtausnopeus

30

ennen likaista glykolia**10 bar**

l/min

mS/m

Permeaatti

3

6

Sisäinen virtausnopeus

31

20 bar

Permeaatti

5

10

Sisäinen virtausnopeus

30

likaisen glykolin jälkeen**10 bar**

l/min

mS/m

Permeaatti

3

6

Sisäinen virtausnopeus

31

20 bar

Permeaatti

5,5

8

Sisäinen virtausnopeus

30

Pesun jälkeen**10 bar**

l/min

mS/m

permeaatti

3,2

5

sis virtausnopeus

31

20 bar

permeaatti

5,5

10

sis virtausnopeus

30

Kalvo 2**Veden johtokyky**

20 mS/m

alku**10 bar**

l/min

mS/m

Permeaatti

7,5

6

Sisäinen virtausnopeus

31

20 bar yli asteikon**Pesuaine/glykolin****jälkeen****10 bar**

l/min

mS/m

Permeaatti

10

16

Sisäinen virtausnopeus

30

Likaisen glykolin jälkeen**10 bar**

l/min

mS/m

permeaatti

5,5

15

sis virtausnopeus

31

Pesun jälkeen**10 bar**

l/min

mS/m

permeaatti

9,2

16

sis virtausnopeus

31

Vesivuot/tuotot ja kalvojen pesujen rauta ja kuparimäärät

Kalvo 3

Veden johtokyky alku 20 mS/m

10 bar l/min mS/m
permeaatti 4,2 11

sis virtausnopeus 33

20 bar l/min mS/m

permeaatti 7 9

sis virtausnopeus 30

Pesuaine/glykolin jälkeen

10 bar l/min mS/m
permeaatti 5 9

sis virtausnopeus 32

20 bar l/min mS/m

permeaatti 8,2 10

sis virtausnopeus 30

Likaisen glykolin jälkeen

10 bar l/min mS/m
permeaatti 1,5 6

sis virtausnopeus 31

20 bar l/min mS/m

permeaatti 3 4

sis virtausnopeus 30

Pesun jälkeen

10 bar l/min mS/m
permeaatti 4,8 7

sis virtausnopeus 31

20 bar l/min mS/m

permeaatti 8 8

sis virtausnopeus 31

Kalvo 1

likaisen glykolin jälkeen

Pesuainetta n. 2%

pesuaika 45 min

Cu 0,7 mg/l

Fe 30 mg/l

Kalvo 2

likaisen glykolin jälkeen

Pesuainetta n. 2%

pesuaika 45 min

Cu 1,4 mg/l

Fe 350 mg/l

Kalvo 3

likaisen glykolin jälkeen

Pesuainetta n. 2%

pesuaika 45 min

Cu 1,1 mg/l

Fe 138 mg/l