

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Erotustekniikan laboratorio
Kandidaatintyö

LÄMPÖTILAN VAIKUTUS RAUTALIIETTEEN SUODATUKSEEN

Harri Halinen

10.12.2008

SYMBOLILUETTELO

A	suodatuspinta-ala, m^2
c	kiintoaineen massa / nesteen tilavuus, kg/m^3
g	gravitaatiovakio, m/s^2
k	kakun läpäisevyys, m^2
M	ilman moolimassa, kg/mol
p_0	ilmanpaine merenpinnan korkeudella, Pa
p_h	ilmanpaine korkeudella h , Pa
Q	suodoksen tilavuusvirta, m^3/s
R	kaasuvakio, $J/mol K$
r	kapillaariputken säde, m
R_c	kakun vastus
R_f	suodatinväliaineen vastus
T	lämpötila, K
V	suodoksen tilavuus, m^3
x_{sv}	partikkelin halkaisija, m
α	kakun ominaisvastus, m/kg
Δp	paine-ero, Pa
Δp_c	kapillaaripaine, Pa
ε	kakun huokoisuus
μ	viskositeetti, Pa s
ρ_s	kiintoaineen tiheys, kg/m^3
σ	nesteen pintajännitys, N/m
Φ	kulma nestepinnan ja kapillaariputken välillä, $^\circ$

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Suodatus yleisesti.....	1
2.1 Suodatusmenetelmien jaottelu	1
2.2 Partikkelien ja liuoksen ominaisuuksien vaikutus suodatukseen	2
2.3 Kiintoainepartikkelien muodon ja koon vaikutus suodatukseen	2
2.4 Suodatuksen teoria	4
2.5 Kapillaari-ilmio.....	4
3. Kiekkosuodatin.....	5
3.1 Suodatinväliaineet kiekkosuodattimissa	6
3.2 Keraamisen kiekkosuodattimen toimintavaiheet.....	6
4. Lämpötilan vaikutus suodatukseen suodatusteorian perusteella	9
5. Paine-eron vaikutus suodatukseen suodatusteorian perusteella	13
6. Mittaukset laboratoriosuodattimella	16
6.1 Koelaitteisto.....	16
6.2 Mittausten suoritus.....	18
7 Tulokset.....	19
7.1 Lämpötilan vaikutus suodatukseen laboratoriosuodattimessa.....	19
7.2 Paineen vaikutus suodatukseen laboratoriosuodattimessa	24
8. Johtopäätökset	28
Lähteet.....	30

1. Johdanto

Kaivosteollisuudessa käytetään kiekkosuodattimia raudan erottamiseen vedestä. Usein teollisuudessa on käytettävissä lämpöä, jolla voitaisiin lämmittää suodatettavaa lietettä. Tarkoitus on selvittää, miten lämpötilan muutos vaikuttaa suodattamiseen. Osa teollisuuslaitoksista sijaitsee korkealla merenpinnan yläpuolella, jossa ilmanpaine on normaalia ilmanpainetta pienempi. Kiekkosuodattimen toiminta perustuu siihen, että suodattimen sisälle imetään alipaine ja paine-ero aiheuttaa nesteen virtauksen suodatinväliaineen läpi. Pienemmän ilmanpaineen takia paine-ero jää pienemmäksi. Työssä tutkitaan myös paine-eron vaikutusta suodatukseen.

2. Suodatus yleisesti

Kiintoaineen ja nesteen mekaaniset erotusmenetelmät jaetaan laskeutukseen ja suodatukseen.¹ Suodatuksessa neste kulkee väliaineen läpi. Väliaine on huokoista materiaalia, jota kiintoainepartikkelit eivät läpäise, mutta neste läpäisee sen. Suodatusta voidaan käyttää nesteen, kiintoaineen tai molempien talteenotossa.

2.1 Suodatusmenetelmien jaottelu

Suodatusmenetelmät voidaan jaotella mekanismin, ajavan voiman tai prosessin mukaan.¹ Mekanismin mukaan jaoteltuja suodatusmenetelmiä ovat siivilöinti, kakkusuodatus, rakeissuodatus ja crossflow-suodatus. Riippuen partikkeleiden ja huokosten koosta partikkelit voivat kerääntyä joko suodatinväliaineen pinnalle tai sen sisään. Kakkusuodatuksessa väliaineen päälle muodostuu kiintoainepartikkeleista kakku, joka toimii suodatinväliaineena. Kakkusuodatuksen alussa väliaineen huokosia pienempiä partikkeleita saattaa päästä läpi mutta kakun kasvaessa pienetkin partikkelit tarttuvat kakkuun. Siivilöinnissä kiintoainepartikkelit ovat suurempia kuin huokoset ja partikkelit kerääntyvät väliaineen pinnalle. Siivilöintiä käytetään, kun lietteen kiintoainepitoisuus on pieni ja partikkelit ovat suhteellisen suuria. Rakeissuodatuksessa partikkelit ovat suodatinväliaineen huokosia pienempiä ja ne kerääntyvät väliaineen sisään. Suodatettaessa vettä hiekan läpi

kiintoainepartikkelit kerääntyvät hiekkakerrokseen. Crossflow-suodatuksessa liete pumpataan suodatinväliaineen yli eikä kakkua pääse muodostumaan. Ajavana voimana suodatuksessa voidaan käyttää ylipainetta, alipainetta imupuolella, keskipakovoimaa tai painovoimaa.

2.2 Partikkelien ja liuoksen ominaisuuksien vaikutus suodatukseen

Kiintoaine-nesteseoksen kuvaamiseen käytetyt parametrit voidaan jakaa kolmeen ryhmään: primääriset ominaisuudet, systeemin tilaa kuvaavat parametrit ja makroskooppiset parametrit.² Primääriset ominaisuudet ovat mitattavia suureita, kuten kiintoaineen ja nesteen fysikaaliset ominaisuudet, partikkelien koko, muoto ja kokojakauma, partikkelien pinnan ominaisuudet ja niiden vuorovaikutukset liuoksen kanssa. Alle 20 µm partikkeleiden vuorovaikutukset ympäröivän fluidin kanssa on otettava huomioon suodatuksessa. Systeemin tilaa kuvaavia suureita ovat huokoisuus tai lietteen konsentraatio, homogeenisuus ja partikkelien hajaantuminen. Makroskooppisia parametreja ovat läpäisevyys ja kakun ominaisvastus.

2.3 Kiintoainepartikkelien muodon ja koon vaikutus suodatukseen

Kiinteät partikkelit ovat yleensä epäsäännöllisen muotoisia eikä niiden muotoa pystytä määrittämään tarkasti. Partikkeleiden koolla on suuri vaikutus lietteen ominaisuuksiin.² Suuret pallonmuotoiset partikkelit, jotka ovat yhtä suuria, suodattuvat parhaiten.³

Partikkelikoko vaikuttaa suodatinkakun ominaisvastukseen. Kakun ominaisvastus on kääntäen verrannollinen läpäisevyyteen (yhtälö (1)).

$$\alpha = \frac{1}{\rho_s(1-\varepsilon)k} \quad (1)$$

jossa α	kakun ominaisvastus, m/kg
ρ_s	kiintoaineen tiheys, kg/m ³
ε	kakun huokoisuus
k	kakun läpäisevyys, m ²

Kakun ominaisvastus on kääntäen verrannollinen partikkelikoon neliöön. Mitä suurempi partikkelikoko, sitä pienempi on kakun ominaisvastus.

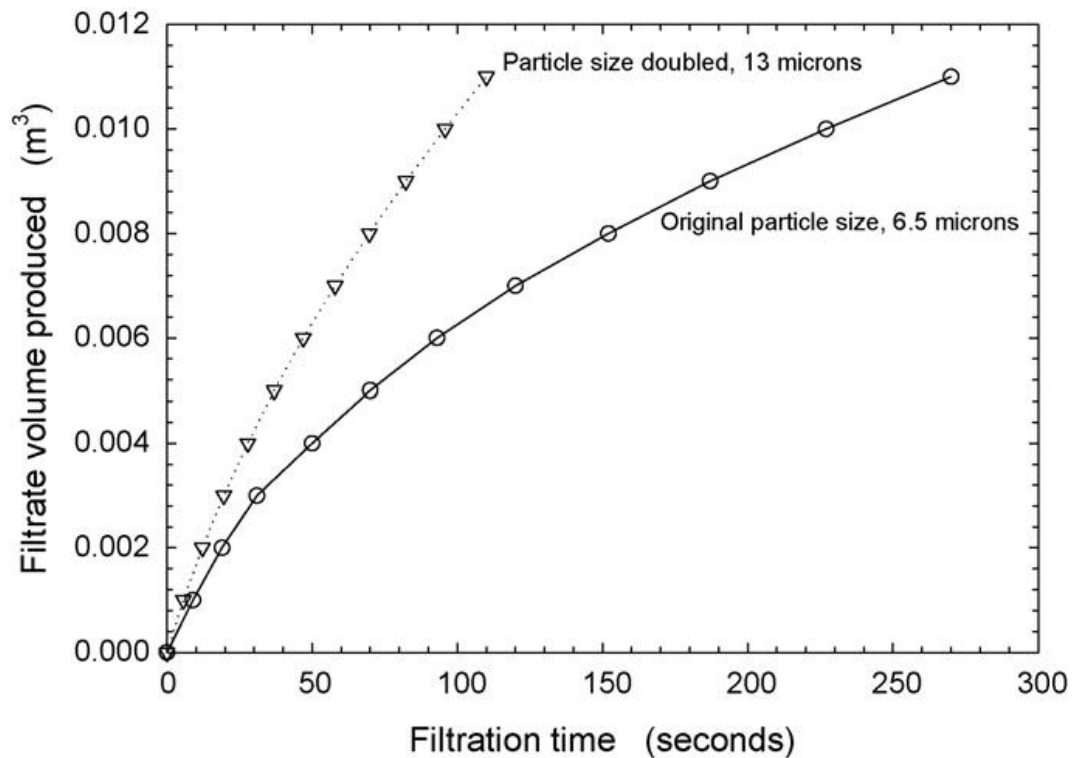
$$\alpha \propto \frac{1}{x_{sv}^2} \quad (2)$$

jossa x_{sv} partikkelin halkaisija, m

Carman-Kozenyn yhtälö (3) kuvaa ominaisvastuksen riippuvuutta partikkelikoosta ja huokoisuudesta. Huokoisuus ei riipu partikkelikoosta vaan kokojakaumasta. Jos partikkelien koko vaihtelee paljon, kakusta tulee tiiviimpi, jolloin pienet partikkelit täyttävät raot isompien partikkelien väleissä.³

$$\alpha = \frac{180}{\rho_s x_{av}^2} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (3)$$

Kuvassa 1 on esitetty suodoksen tilavuusvirta ajan funktiona kahdella partikkelikoolla.³ Kaksi kertaa suuremmat partikkelit suurentavat tilavuusvirtaa, koska suodinkakun vastus on pienempi.



Kuva 1. Suodoksen tilavuusvirta ajan funktiona.³

2.4 Suodatuksen teoria

Virtaus huokoisen suodatinväliaineen läpi on laminaaria ja sitä voidaan kuvata yhtälöllä⁴

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{A\Delta p}{\mu(R_f + R_c)} = \frac{A\Delta p}{\mu(R_f + \alpha c V / A)}, \quad (4)$$

jossa α	kakun ominaisvastus, m/kg
c	kiintoaineen massa / nesteen tilavuus, kg/m ³
μ	viskositeetti, Pa s
Δp	paine-ero, Pa
A	suodatuspinta-ala, m ²
V	suodoksen tilavuus, m ³
Q	suodoksen tilavuusvirta, m ³ /s
R_f	suodatinväliaineen vastus
R_c	kakun vastus

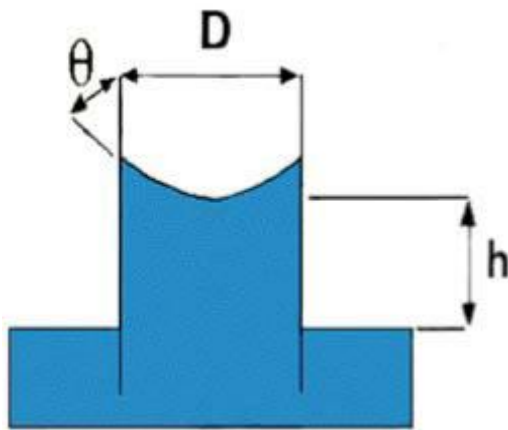
R_f ja α ovat kokeellisesti määritettäviä vakioita.

2.5 Kapillaari-ilmiö

Kapillaari-ilmiö tarkoittaa nesteen nousemista ylöspäin painovoimaa vastaan putkessa.^{5,6} Ilmiö johtuu siitä, että nesteen ja kiinteän aineen väliset adheesiovoimat ovat voimakkaampia kuin nesteen koheesiovoimat. Ilmiötä esiintyy mm. kasveissa, jotka imevät vettä maaperästä. Ilmiötä esiintyy myös keraamisessa kiekkosuodattimessa, mutta ei käytettäessä suodatinkangasta. Ilmiön ansiosta ilma ei läpäise keraamista kiekkosuodatinta toisin kuin perinteinen suodinkankaalla varustettu kiekkosuodatin.⁷ Kapillaaripaine tarkoittaa painetta, joka tarvitaan poistamaan neste kapillaariputkesta ja sitä voidaan kuvata yhtälöllä (5)⁷. Kuvassa 2 on esitetty kapillaari-ilmiö.

$$\Delta p_c = 2 \frac{\sigma}{r} \cos \Phi, \quad (5)$$

- jossa Δp_c kapillaaripaine, Pa
 σ nesteen pintajännitys, N/m
 r kapillaariputken säde, m
 Φ kulma nestepinnan ja kapillaariputken välillä, °



Kuva 2. Kapillaari-ilmiö⁷

3. Kiekkosuodatin

Kiekkosuodatin koostuu akseliin kiinnitetyistä pyöreistä levyistä, jotka on upotettu osittain altaaseen.⁷ Suodatettava liete on altaassa. Kiekkosuodattimen akseli pyörii ja täyden kierroksen aikana kiekon pinta uppoaa altaaseen ja nousee sitten nestepinnan yläpuolelle. Suodatinväliaineena levyjen pinnalla käytetään joko keraamista materiaalia tai suodatinkangasta. Levyjen sisälle imetään alipaine tyhjiöpumpulla, joten kyseessä on vakuumisuoatus. Lietteen kiintoaine tarttuu kiekkoon kiekon pinnan ollessa altaassa ja muodostunut kakku kaavitaan pois kiekon ollessa ilmassa.

3.1 Suodatinväliaineet kiekkosuodattimissa

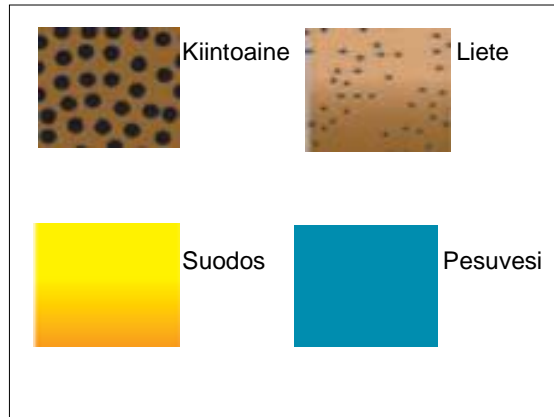
Ilma ei läpäise keraamista suodatinväliainetta ja siksi alipaineen aikaansaamiseksi riittää pienempitehoinen pumppu kuin suodatinkangasta käytettäessä. Keraamisen kiekkosuodattimen pumpun tehontarve voi olla jopa 90 % pienempi kuin kangassuodattimen.⁸ Myös suodos on erittäin puhdasta, koska kiintoainepartikkelit eivät läpäise suodatinväliainetta. Kuvassa 3 on keraaminen kiekkosuodatin.



Kuva 3. Keraaminen kiekkosuodatin⁹

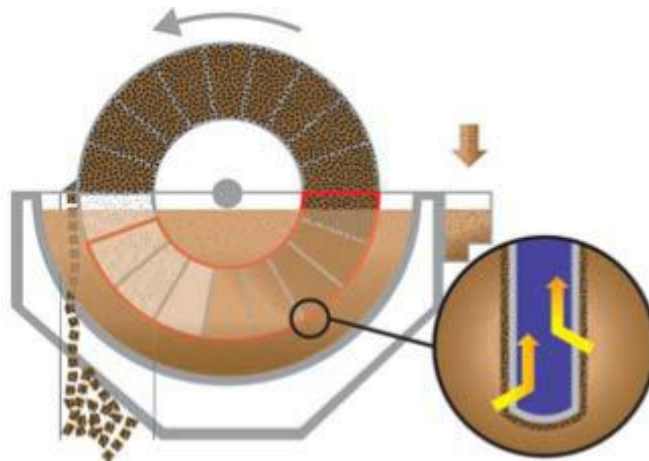
3.2 Keraamisen kiekkosuodattimen toimintavaiheet

Keraamisen kiekkosuodattimen toiminta koostuu neljästä vaiheesta.⁷ Ensimmäisessä vaiheessa kiintoaine tarttuu kiekon pintaan ja toisessa vaiheessa kakku kuivataan. Kolmannessa vaiheessa kakku kaavitaan kiekosta ja viimeisessä vaiheessa kiekon huokoset puhdistetaan. Kuvassa 4 on esitetty käytetyt värisymbolit.



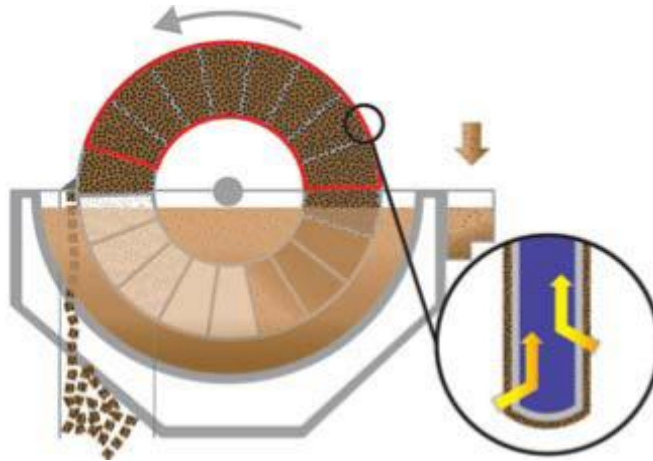
Kuva 4. Kuvissa käytetyt värisymbolit

Ensimmäisessä vaiheessa kiekon sisällä olevan tyhjiön vaikutuksesta kiintoaine kerääntyy kiekon pintaan, kun kiekon pinta käy lietealtaassa (kuva 5).



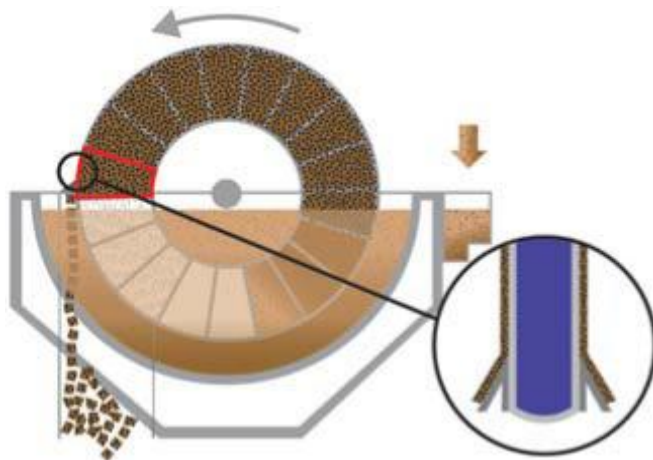
Kuva 5. Kakun muodostuminen kiekon pinnalle

Kiekon pinnan noustessa ylös altaasta imu jatkuu ja kakkuun jäänyt ylimääräinen vesi imetään pois. Ilma ei läpäise keraamista materiaalia, joten vakuumpumpun tehoa ei kulu ilman imemiseen suodatinväliaineen läpi (kuva 6). Tarvittaessa kakku voidaan myös pestä suihkuttamalla vettä kiekon pinnalle ylimääräisen suodoksen ja epäpuhtauksien poistamiseksi.



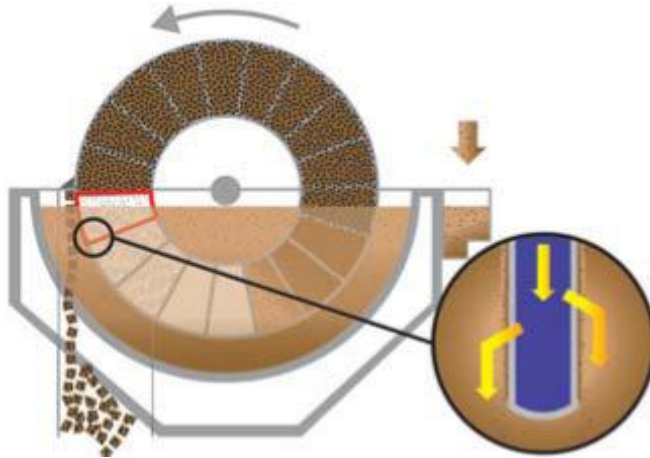
Kuva 6. Kakun kuivaus ilmassa

Kolmannessa vaiheessa kiekon pinnalla oleva kakku kaavitaan pois. Kiekkojen käyttöään pidentämiseksi kiekkoa ei raavita vaan kiekon pinnalle jätetään ohut kerros kiintoainetta (kuva 7).



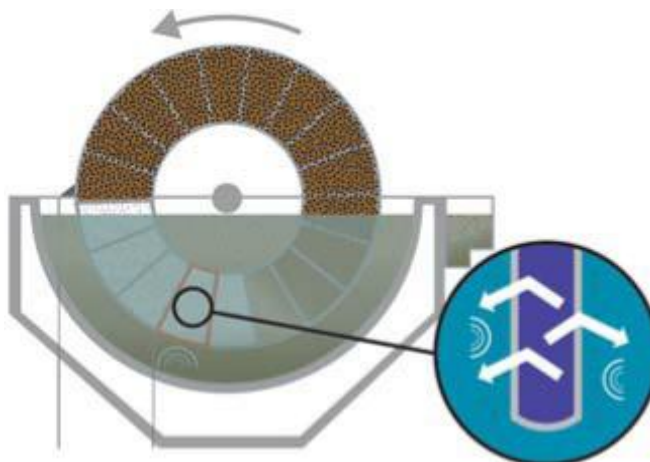
Kuva 7. Kakun kaapiminen kiekon pinnasta

Neljännessä vaiheessa suodos pumpataan kiekon sisältä ulos, jotta kiekon pinnalla oleva kiintoaine poistuu ja suodatinväliaineen huokokset saadaan puhdistettua (kuva 8).



Kuva 8. Suodatinväliaineen pesu

Käytön aikana huokokset tukkeutuvat ja suodosvirta pienenee. Kiekon keraamiset levyt voidaan regeneroida ja suodatusominaisuudet voidaan palauttaa ennalleen (kuva 9). Kiekkojen regenerointi on suoritettava ajoittain upottamalla kiekot puhtaaseen veteen ja pumpaamalla happoa kiekkojen sisältä ulos. Huokosten puhdistamiseen käytetään myös ultraääntä.



Kuva 9. Kiekon regenerointi

4. Lämpötilan vaikutus suodatuksen suodatusteorian perusteella

Suodatuksen kannalta nesteen tärkeä ominaisuus on sen viskositeetti. Veden viskositeetti voidaan laskea yhtälöllä¹

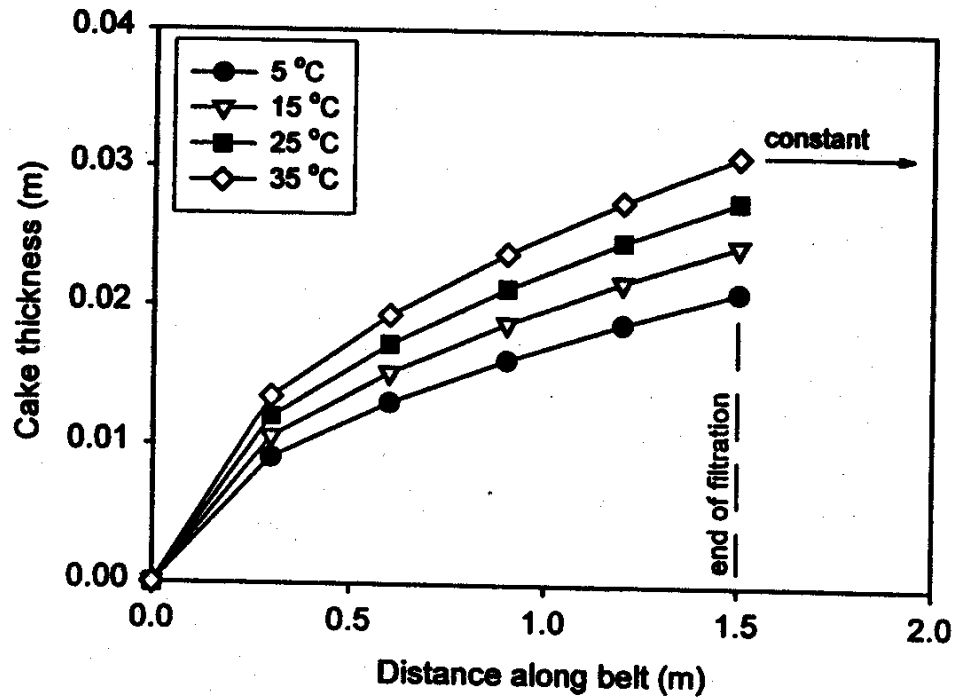
$$\frac{\mu}{[Pas]} = 10^{\left(-4,5318 - \frac{220,57}{149,39 - T/[K]}\right)}, \quad (6)$$

Lämpötilan nosto alentaa viskositeettia. Tarkoitus on selvittää, voidaanko rautamalmin erotusta tehostaa lämpötilaa nostamalla. Yhtälön (4) mukaan pienempi viskositeetti lisää suodoksen tilavuusvirtaa ja näin myös kiintoainetta saataisiin talteen enemmän.

Lämpötila vaikuttaa myös nesteen pintajännitykseen ja siten myös kakun kuivaukseen.² Lisäksi lämpötila vaikuttaa nesteen tiheyteen, mutta pienellä lämpötilavälillä tiheyden muutos on mitättömän pieni. Wakeman ja Tarleton² ovat esittäneet suodatusteorian avulla simuloituja kuvaajia lämpötilan vaikutuksesta. Simuloinnit on tehty nauhasuodattimella, joka on alipaineella toimiva kakkusuodatin, kuten kiekkosuodatinkin. Simuloinneissa tehtiin seuraavat oletukset:

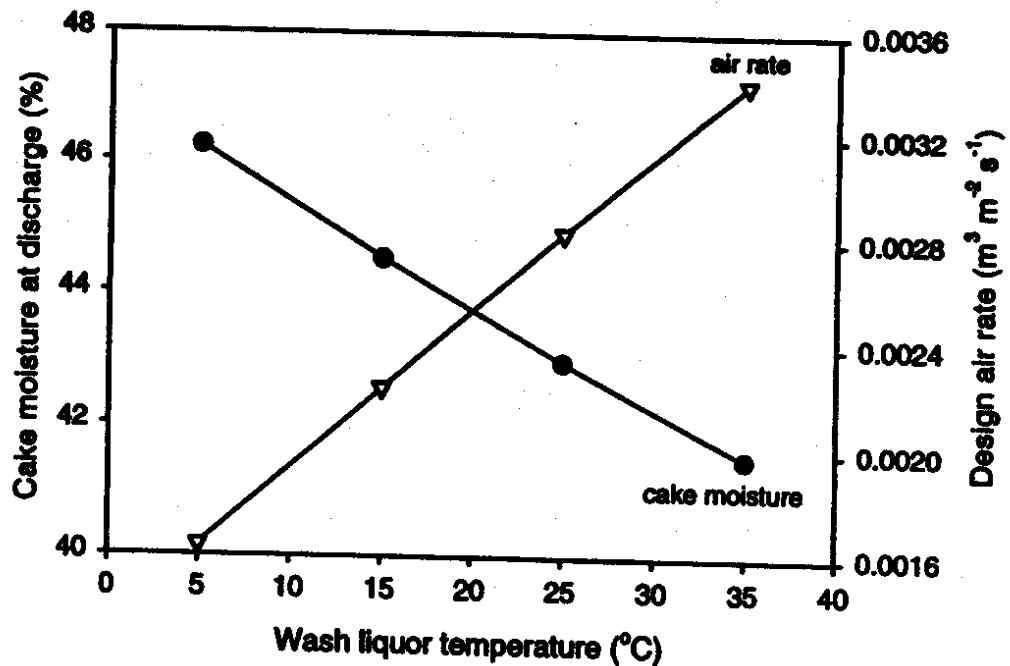
1. Lämpötila ei vaikuta kakun ominaisvastukseen eikä huokoisuuteen.
2. Kakun pesu tapahtuu samassa lämpötilassa kuin syötettävä liete eikä lämpötila vaikuta kiintoaineen diffundoituvuuteen.
3. Kakun kuivaus suoritetaan samassa lämpötilassa kuin kakun pesu.
4. Jos lietteen ja pesuveden lämpötilat eivät riipu toisistaan, niin toisen näistä lämpötiloista oletetaan olevan 25 °C.

Kuvassa 10 nauhasuodattimelle kertyvän kakun paksuus on esitetty hihnan paikan funktiona. Kuvaajasta nähdään, että lämpötilaa nostamalla hihnasuodattimella saadaan paksumpi kakku eli saadaan enemmän kiintoainetta talteen. Tämä johtuu suodoksen viskositeetin alenemisesta.



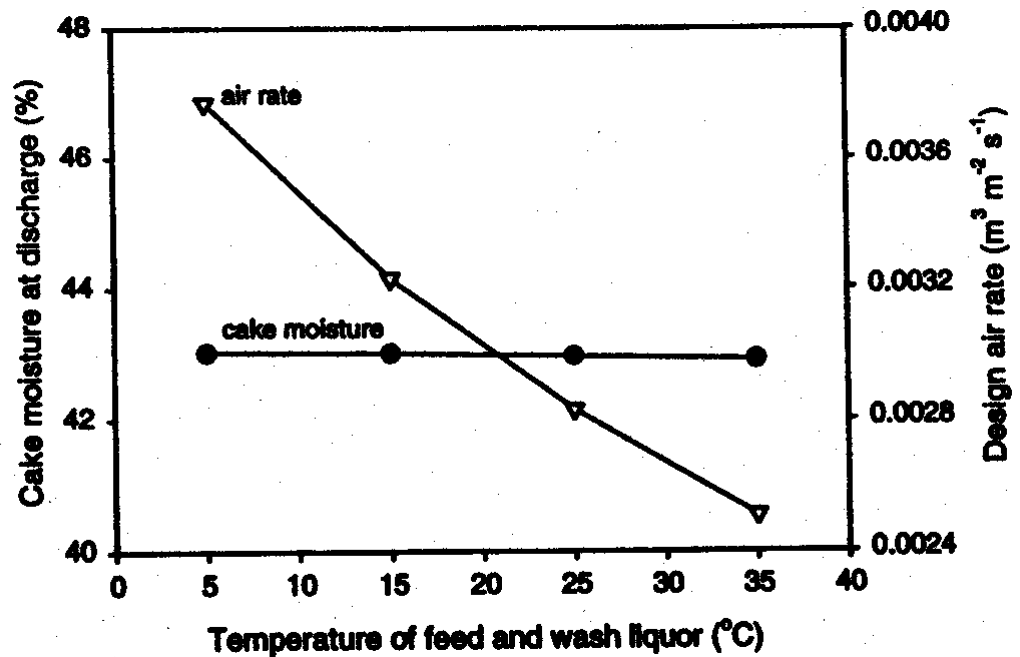
Kuva 10. Lämpötilan vaikutus kakun paksuuteen hihnasuodattimessa.²

Pesuveden lämpötilan nostaminen vaikuttaa kakun kuivaukseen, mutta ei suodatukseen. Kuvasta 11 nähdään, että pesuveden lämpötilan nosto vaikuttaa kakun kosteuspitoisuuteen. Ilma läpäisee paremmin kuivemman kakun ja siksi pesuveden lämpötilan nosto lisää ilman tilavuusvirtaa kuivauksen aikana silloin kun suodattimessa käytetään suodinkangasta. Nostamalla pesuveden lämpötilaa viidestä asteesta 35 asteeseen kakun kosteuspitoisuus laskee 44,3 prosentista 39,7 prosenttiin.



Kuva 11. Kakun kosteuspitoisuuden riippuvuus pesuveden lämpötilasta.²

Kuvassa 12 esitetään tilanne jossa sekä lietteen että pesuveden lämpötilaa nostetaan yhtä aikaa. Suodatusvaiheessa ainoastaan lietteen lämpötilalla on merkitystä eikä pesuveden lämpötila vaikuta suodattamiseen. Näin ollen lietteen ja pesuveden lämpötilan nostaminen samanaikaisesti nopeuttaa suodattamista ja suodatustehon paraneminen johtuu lietteen lämpötilan nostosta. Sen sijaan kakun pesun tehokkuuteen tai kakun kosteuspitoisuuteen molempien nesteiden kuumentaminen ei juuri vaikuta. Lietteiden lämpötilan nosto lisää pesuveden kulutusta. Kuvasta 12 nähdään, että kakun kosteuspitoisuus ei juuri muutu silloin, kun lietteen ja pesuveden lämpötilaa muutetaan yhtä aikaa.



Kuva 12. Kakun kosteuspuoisuuden riippuvuus lietteen ja pesuveden lämpötilasta.²

5. Paine-eron vaikutus suodatukseen suodatusteorian perusteella

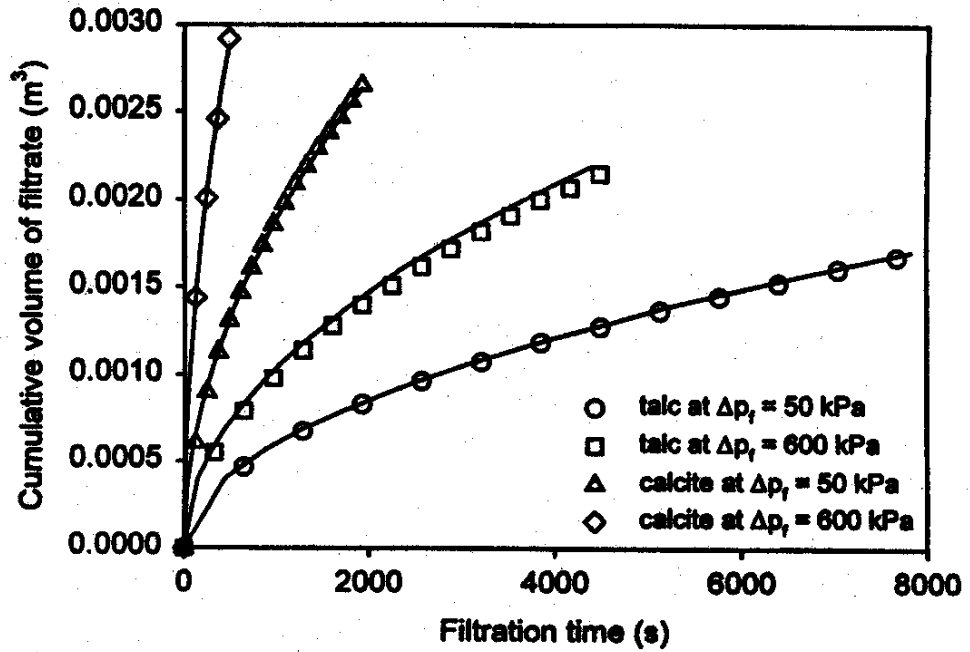
Ilmanpaine maanpinnalla noudattaa barometrista jakautumislakia.¹⁰ Ilmanpaine p_h korkeudella h voidaan laskea yhtälöllä

$$p_h = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}, \quad (7)$$

- jossa p_h ilmanpaine korkeudella h , Pa
 p_0 ilmanpaine merenpinnan korkeudella, Pa
 M ilman moolimassa, kg/mol
 g putoamiskiihtyvyys, m/s²
 R kaasuvakio, J/mol K
 T lämpötila, K

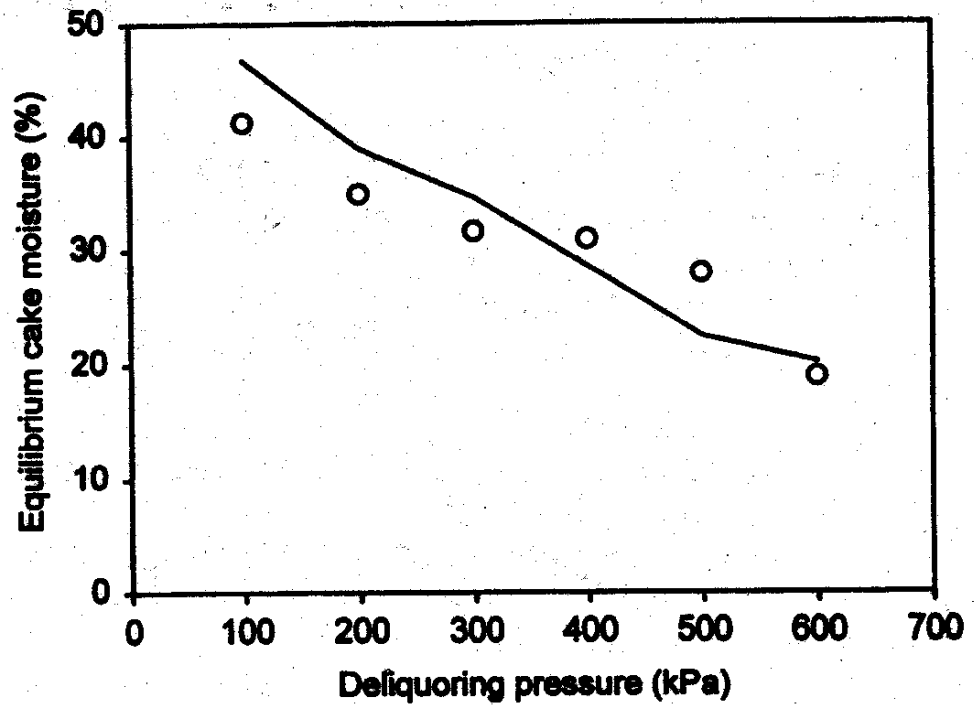
Suodattimessa liete imetään tyhjiön avulla suodatinväliaineen läpi. Korkealla merenpinnasta ilmanpaine on pienempi ja myös paine-ero suodatuksessa on silloin pienempi. Tarkoitus on selvittää vaikuttaako paine-ero suodatukseen. Teoriassa paine-erolla on vaikutusta. Yhtälön (4) mukaan pienempi paine-ero heikentää suodatuksen tehokkuutta pienentämällä suodoksen tilavuusvirtaa.

Tarletonin ja Wakemanin² mukaan paine vaikuttaa suodatukseen. Kuvassa 13 suodoksen tilavuus on esitetty ajan funktiona. Tilavuusvirtaa on mitattu nauhasuodattimella talkilla ja kalsiumkarbonaatilla. Mittaustulokset on esitetty kuvaajissa pisteinä ja teoreettinen malli viivana. Kalsiumkarbonaatti on lähes kokoonpuristumatonta, kun taas talkki on kokoonpuristuvaa.



Kuva 13. Suodoksen tilavuus ajan funktiona.²

Paineella on vaikutusta myös kakun kuivaukseen. Mitä suurempi paine, sitä paremmin kakku kuivuu. Kuvassa 14 on esitetty kalsiumkarbonaattikakun kosteuspitoisuus prosentteina kuivaukseen käytetyn paineen funktiona.²



Kuva 14. Kakun kosteuspitoisuus paineen funktiona.²

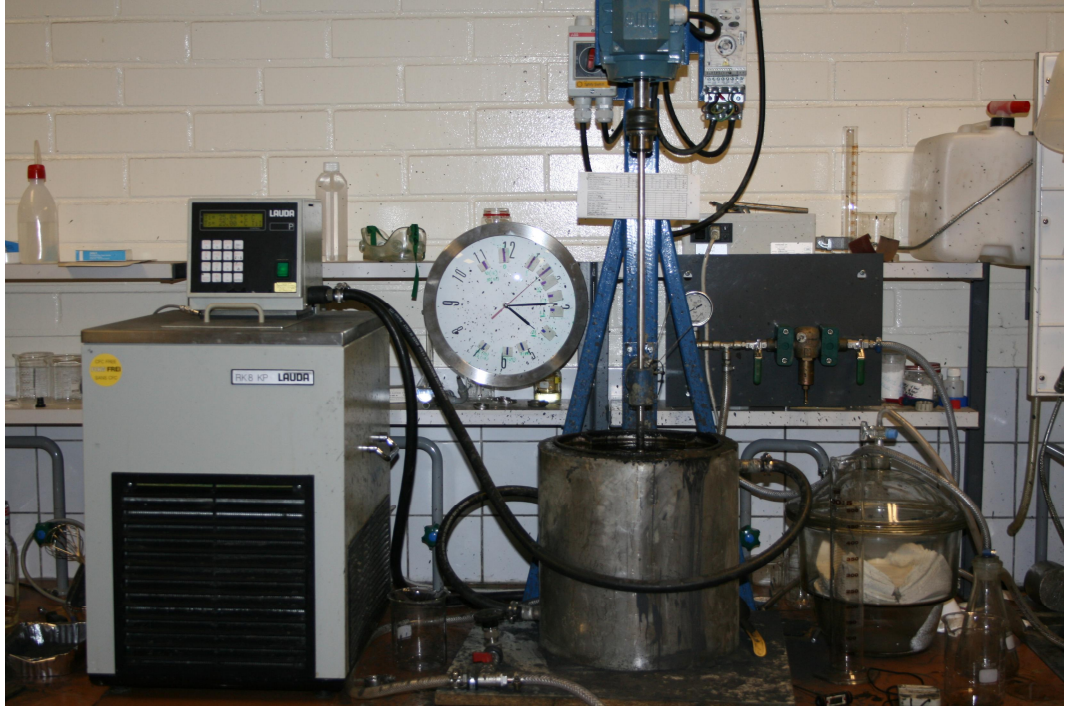
Tarletonin ja Wakemanin² esittämien simulointien ja suodatusteorian perusteella on syytä olettaa että suodatettaessa rautalietettä kiekkosuodattimella lämpötilan nosto lisää kakun paksuutta ja suodoksen määrää. Paine-eron pienentäminen oletettavasti ohentaa kakkua ja vähentää suodosta.

6. Mittaukset laboratoriosuodattimella

6.1 Koelaitteisto

Mittaukset tehtiin upottamalla imuletkuun kiinnitetty keraaminen laatta rautalietettä sisältävään säiliöön. Laatan paksuus oli 24 mm ja yhden puolen pinta-ala oli 135 cm². Säiliön tilavuus oli noin 16 litraa ja sekoitus oli jatkuvasti päällä, jotta rautamalmi ei laskeutuisi säiliön pohjalle. Mittaukset tehtiin rautalietteen massapitoisuuksilla 50 %, 60 % ja 70 % lämpötiloissa 20 °C, 40 °C ja 60 °C. Koesuunnitelma oli täysfaktorikoesuunnitelma, johon kuului yhdeksän mittaussarjaa ja jokaisessa sarjassa oli yhdeksän koetta. Koesuunnitelma on liitteessä I. Tarkoituksena oli tutkia, miten lämpötila ja paine-ero vaikuttavat suodattimen kapasiteettiin ja kakkujen kosteuspitoisuuksiin. Mittauksia tehtiin eri lietteen pitoisuuksissa, jotta nähdään vaikuttavatko lämpötila ja paine-ero yhtä merkittävästi kaikissa sakeuksissa. Kokeet tehtiin satunnaisessa järjestyksessä, jotta virheiden vaikutus olisi mahdollisimman pieni.

Laitteisto koostui vaipallisesta säiliöstä, jota sekoitettiin koko ajan. Säiliön lämpötilaa säädettiin kierrättämällä vettä vaipassa. Letkuun saatiin alipaine vesihanaan asennetun ejektorin avulla. Suurimmillaan paine-ero oli 0,95 bar ja pienemmät paine-erot saatiin aikaan avaamalla imuletkun venttiiliä.



Kuva 15. Työpiste.



Kuva 16. Työssä käytetty keraaminen laatta pidikkeeseensä kiinnitettynä

6.2 Mittausten suoritus

Ilma läpäisee kuivan keraamisen laatan ja laattaan saadaan alipaine vasta kun pinnan huokokset ovat täyttyneet vedellä. Siksi kuivaa laattaa on liotettava vedessä useita tunteja ennen laatan käyttöönottoa. Ennen jokaista mittausta laatassa mahdollisesti oleva ilma imettiin pois ja laatan läpäisevyys mitattiin. Läpäisevyys mitattiin laskemalla letkusta vettä laattaan paineella 0,95 bar ja pitämällä laattaa mittalasin päällä. Mittaamalla sekuntikellolla 500 ml mittalasin täyttymiseen kulunut aika saatiin selville onko laatan läpäisevyys pysynyt ennallaan. Mikäli laatan huokokset ovat tukkeutuneet, läpäisykykyä voi yrittää palauttaa liottamalla laattaa typpihapossa tai typpihapon ja oksaalihapon seoksessa.

Kun laatan läpäisevyys oli todettu riittäväksi, aloitettiin suodatuskoe. Laatta imettiin tyhjäksi vedestä ja imupullo tyhjennettiin. Vesihana ja venttiilit avattiin, jotta letkuun saatiin 0,95 bar alipaine. 0,5 bar ja 0,725 bar alipaineet saatiin avaamalla hieman letkussa olevaa venttiiliä. Sekuntikellolla mitattiin aikaa ja laatta upotettiin pystysuorassa lietteeseen. Kun koesuunnitelman mukainen upotusaika oli kulunut, laatta nostettiin ylös ja kakun annettiin kuivua kuivausajan verran. Sen jälkeen laatan toisen puolen kakku kaavittiin punnittuun folioastiaan (kuva 17) ja laatan toiselta puolelta mitattiin kakun paksuus työntömitalla. Folioastiaan kaavittiin näyte aina laatan samalta puolelta. Kakun paksuus mitattiin viidestä kohtaa ja näistä laskettiin keskiarvo. Folioastia punnittiin ja laitettiin 105 °C lämpötilaan uuniin kuivumaan vuorokaudeksi, jonka jälkeen astia punnittiin uudelleen. Näin saatiin selville kakun kosteuspitoisuus ja suodatuksessa erottuneen kiinteän rautamalmin massa. Mittauksen jälkeen laatta puhdistettiin katkaisemalla imu ja pumppaamalla vettä laattaan. Laatta upotettiin vesiämpäriin ja ultraäänivärähtelijöitä kuljetettiin laatan pinnalla. Lopuksi laatan läpäisevyys mitattiin. Mikäli se oli pysynyt ennallaan, aloitettiin seuraava mittaus.

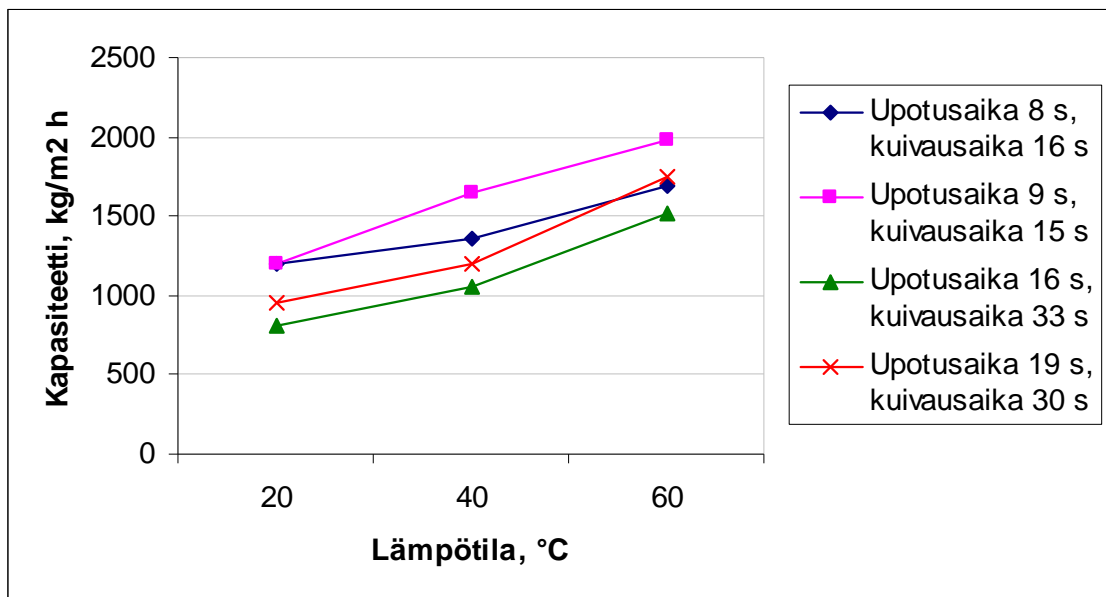


Kuva 17. Uunista otettu kakkunäyte

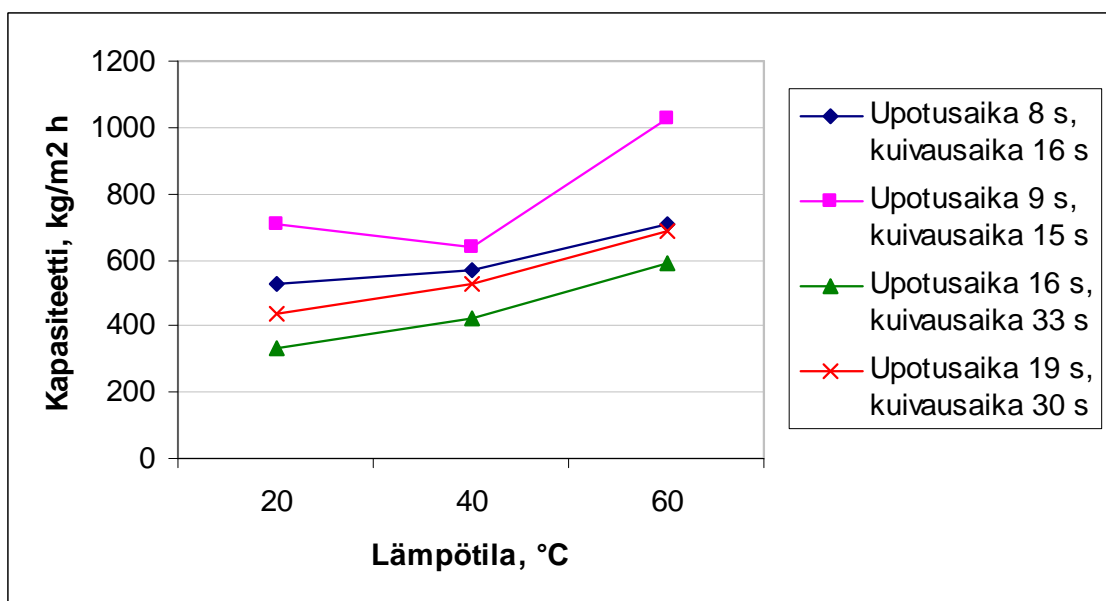
7 Tulokset

7.1 Lämpötilan vaikutus suodatukseen laboratoriosuodattimessa

Tarkoituksena oli tutkia, miten lietteen lämpötilan nosto vaikuttaa suodattimen kapasiteettiin ja suodinkakkujen kosteuspitoisuuksiin. Laatan pinta-alan ja upotusajan avulla laskettiin suodattimen kapasiteetti yksikkönä $\text{kg/m}^2 \text{h}$. Lämpötilan vaikutus suodattimen kapasiteettiin on esitetty kuvissa 18 – 23 ja tulokset löytyvät taulukoituna liitteestä II. Kuvasta 18 nähdään, että suodatettaessa 50 % lietettä paine-erolla 0,95 bar suodattimen kapasiteetti nousee lämpötilan kasvaessa. Myös paine-erolla 0,5 bar lämpötilan nosto parantaa kapasiteettia selvästi (kuva 19). Kuvassa 19 mittauspisteessä $40\text{ }^\circ\text{C}$ lienee sattunut mittausvirhe.

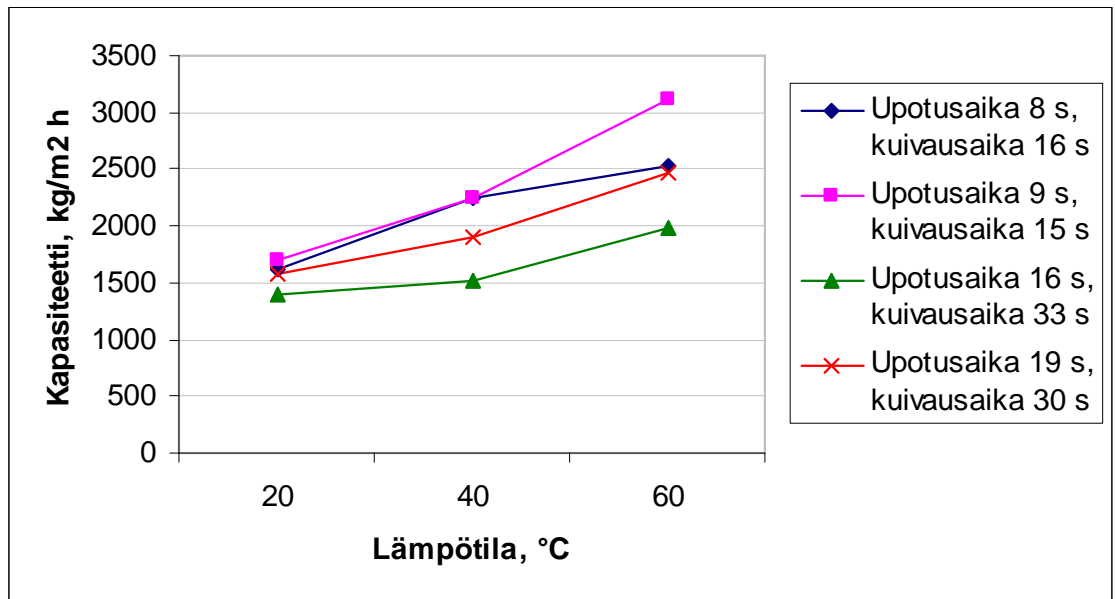


Kuva 18. Suodattimen kapasiteetti. Lietteen pitoisuus on 50 % ja paine-ero 0,95 bar.

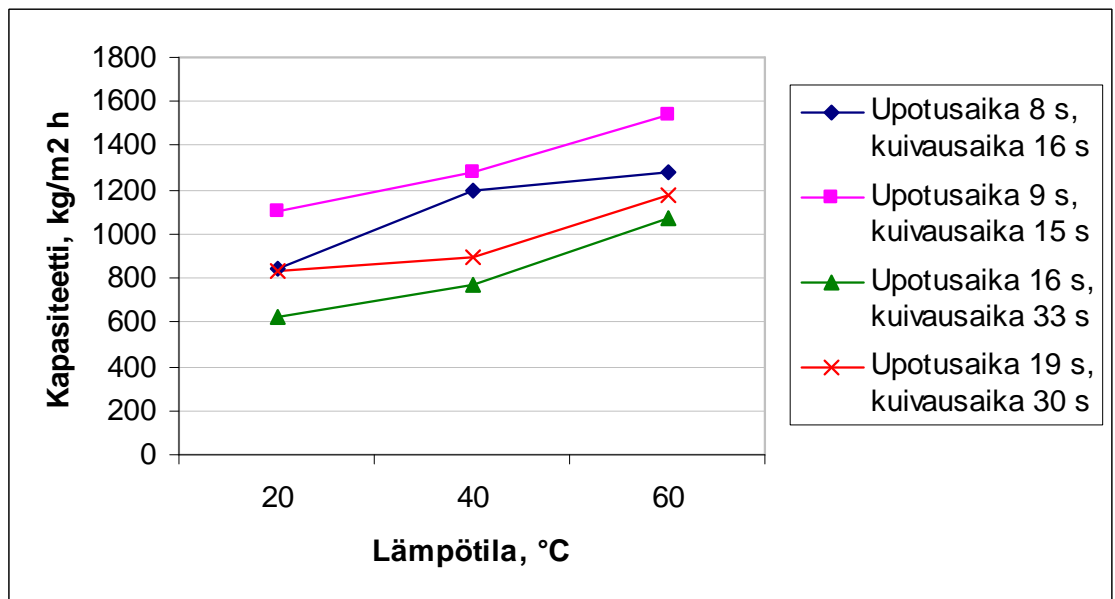


Kuva 19. Suodattimen kapasiteetti. Lietteen pitoisuus on 50 % ja paine-ero 0,5 bar.

Kuvissa 20 ja 21 lietteen pitoisuus on 60 %. Sakeammalla lietteellä lämpötilan nosto lisää myös selvästi kapasiteettia.

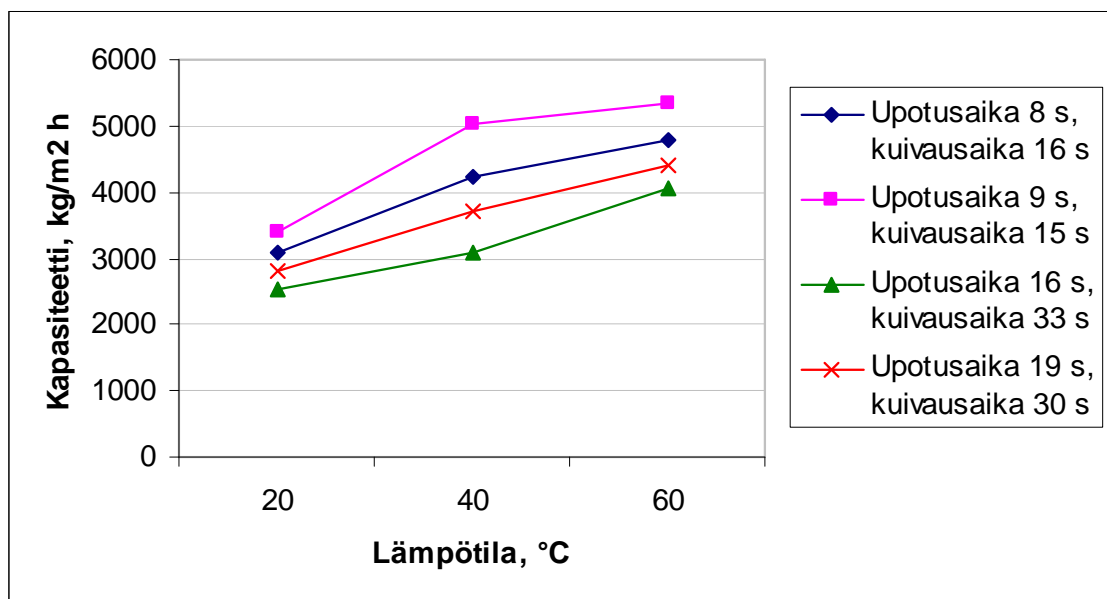


Kuva 20. Suodattimen kapasiteetti. Lietteen pitoisuus on 60 % ja paine-ero 0,95 bar.

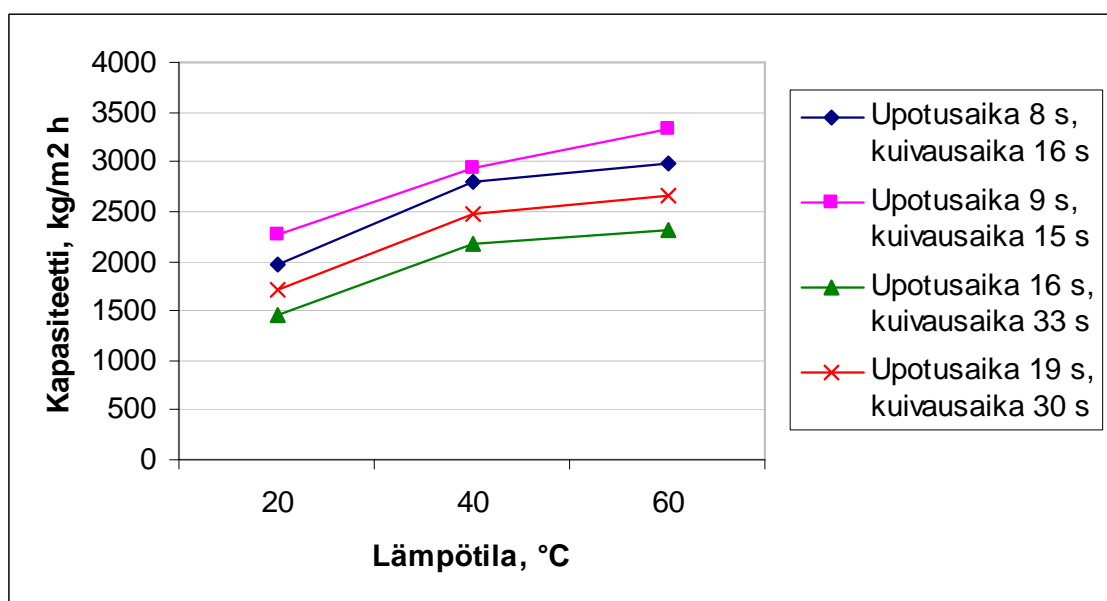


Kuva 21. Suodattimen kapasiteetti. Lietteen pitoisuus on 60 % ja paine-ero 0,5 bar.

Lämpötilan nosto 20 asteesta 40 asteeseen suodatettaessa 70 % lietettä lisää myös selvästi kapasiteettia (kuvat 22 ja 23). Lämpötilan nosto 60 asteeseen parantaa vielä kapasiteettia mutta vaikutus ei ole niin suuri koska kakun vastus kasvaa.

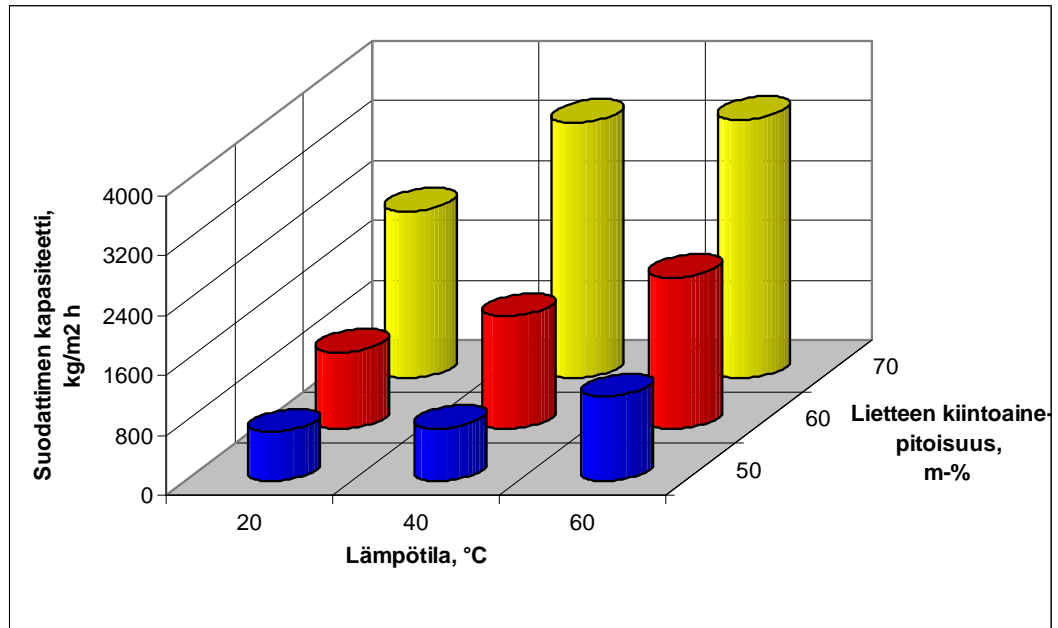


Kuva 22. Suodattimen kapasiteetti. Lietteen pitoisuus on 70 % ja paine-ero 0,95 bar.



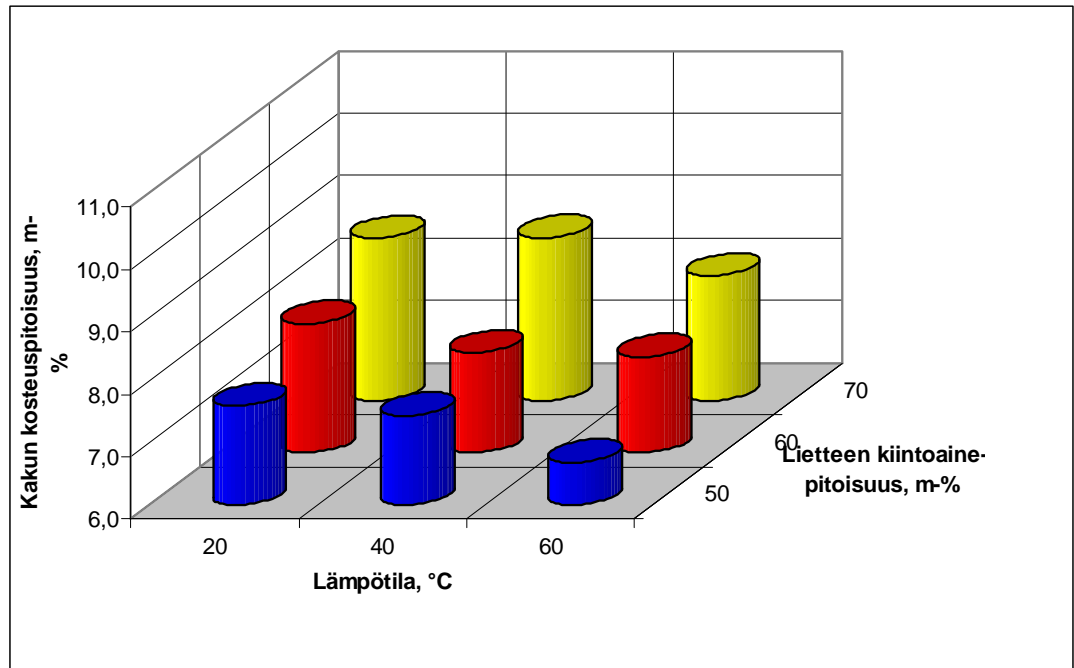
Kuva 23. Suodattimen kapasiteetti. Lietteen pitoisuus on 70 % ja paine-ero 0,5 bar.

Kuva 24 esittää kolmen lietteen suodatusta samalla paine-erolla ja upotusajalla. Kaikilla pitoisuuksilla lämpötilan nosto parantaa kapasiteettia. 60 % lietteellä lämpötilan nosto 20 asteesta 60 asteeseen nostaa kapasiteetin lähes kaksinkertaiseksi. 70 % lietteellä lämpötilan muutos 20 asteesta 40 °C:een nostaa kapasiteettia puolella, mutta lämpötilan nosto edelleen 60 asteeseen parantaa kapasiteettia vain noin prosentin verran.



Kuva 24. Suodattimen kapasiteetti. Suodatuspaine on 0,725 bar, upotusaika 13 s ja kuivausaika 23 s.

Lietteen lämpötilan nosto alentaa hieman kakun kosteuspitoisuutta. 50 % lietteellä lämpötilan nostaminen 40 asteella alentaa kosteuspitoisuutta 2,2 % suodatettaessa 0,95 bar paine-erolla ja 10,0 % suodatettaessa 0,5 bar paine-erolla. 60 % lietteellä muutos on suuremmalla paine-erolla 2,6 % ja pienemmällä paine-erolla 8,6 %. Lietteen sakeuden ollessa 70 %, lämpötilan nosto 40 asteella alentaa kosteuspitoisuutta 5,3 % 0,95 bar paine-erolla ja 8,5 % 0,5 bar paine-erolla. Pienemmällä paine-erolla lämpötilan vaikutus kosteuteen on suurempi kuin suuremmalla paine-erolla. Kuvassa 25 kakun kosteuspitoisuuden riippuvuus lämpötilasta on esitetty eri lietteissä vakiopaineessa. Kuvasta nähdään että kosteuspitoisuus laskee hieman lämpötilaa nostettaessa. Kaikki kakkujen kosteuspitoisuudet on esitetty liitteessä II.

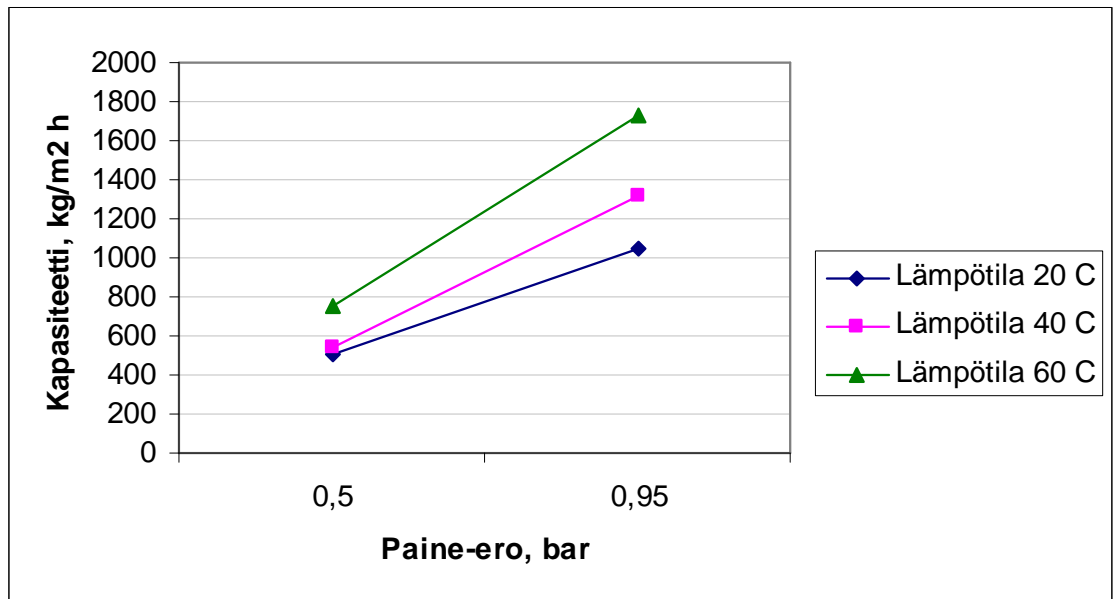


Kuva 25. Kakun kosteuspitoisuuden riippuvuus lämpötilasta. Suodatuspaine on 0,725 bar, upotusaika 13 s ja kuivausaika 23 s.

Lietteen lämpötilan nosto lisää myös laatan pintaan kerääntyvän kiintoainekerroksen paksuutta. Nämä tulokset on esitetty liitteessä II.

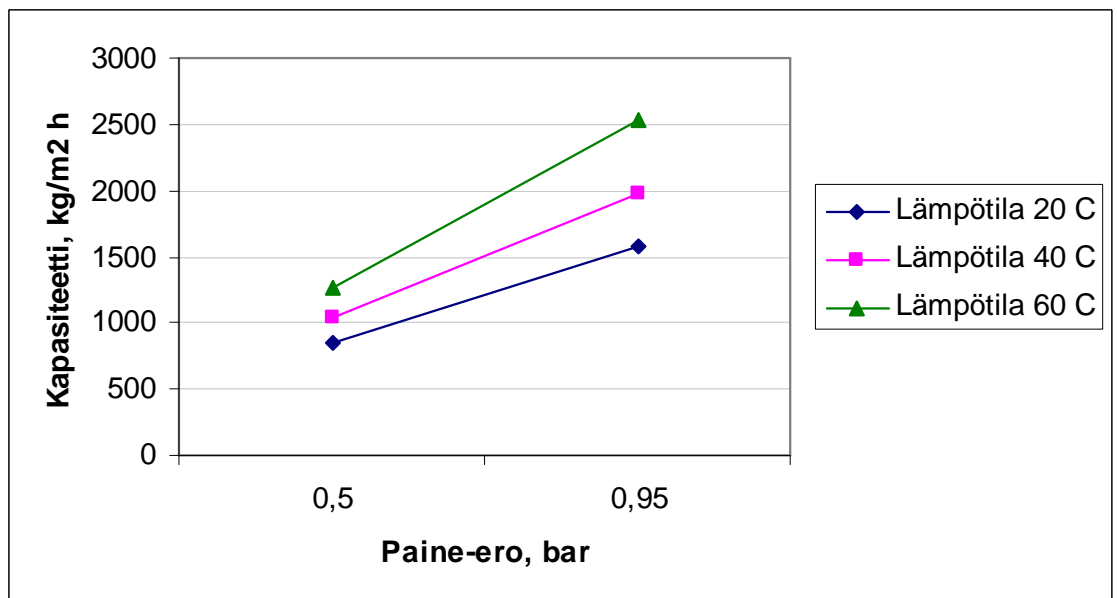
7.2 Paineen vaikutus suodatukseen laboratoriosuodattimessa

Mittauksissa tutkittiin myös paine-eron vaikutusta suodattimen kapasiteettiin. Paine-eron vaikutusta tarkasteltaessa lämpötila pidettiin vakiona. Mittaukset tehtiin neljällä upotusajalla mutta kuvissa 26 - 28 suorat esittävät upotusaikojen keskiarvojen perusteella saatuja kapasiteetteja. Lietteen pitoisuudella 50 % paine-eron kasvattaminen 0,5 baarista 0,95 baariin parantaa kapasiteettia keskimäärin 108 prosenttia 20 °C lämpötilassa, 143 prosenttia 40 °C lämpötilassa ja 131 prosenttia lämpötilassa 60 °C (kuva 26).



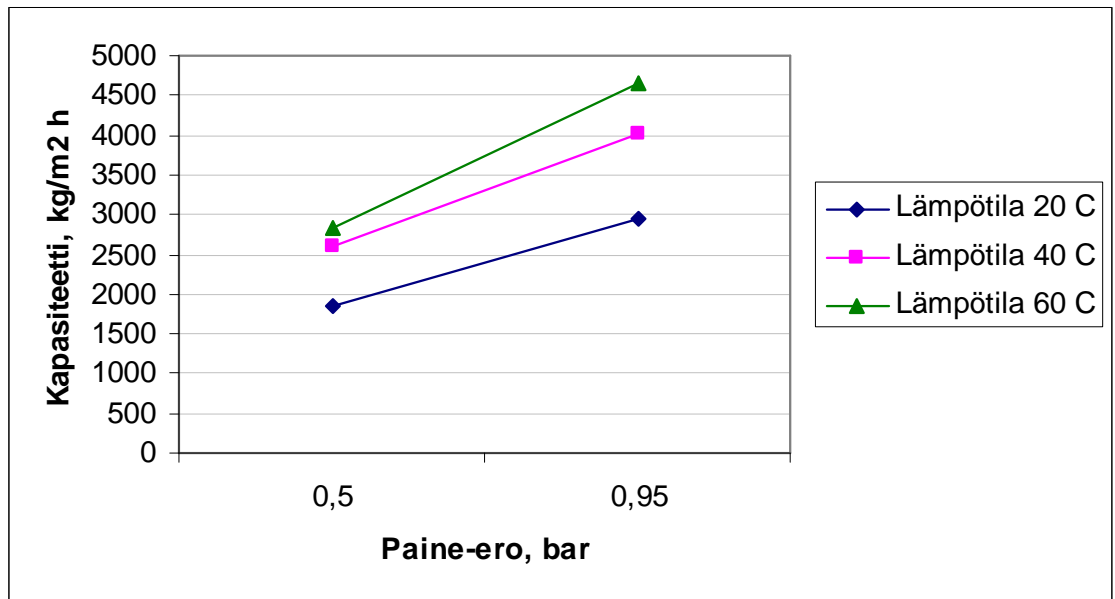
Kuva 26. Kapasiteetin riippuvuus paine-erosta. Lietteen pitoisuus on 50 %

Suodatettaessa 60 % lietettä kapasiteetti paranee 85-100 prosenttia lämpötilasta riippuen (kuva 27).



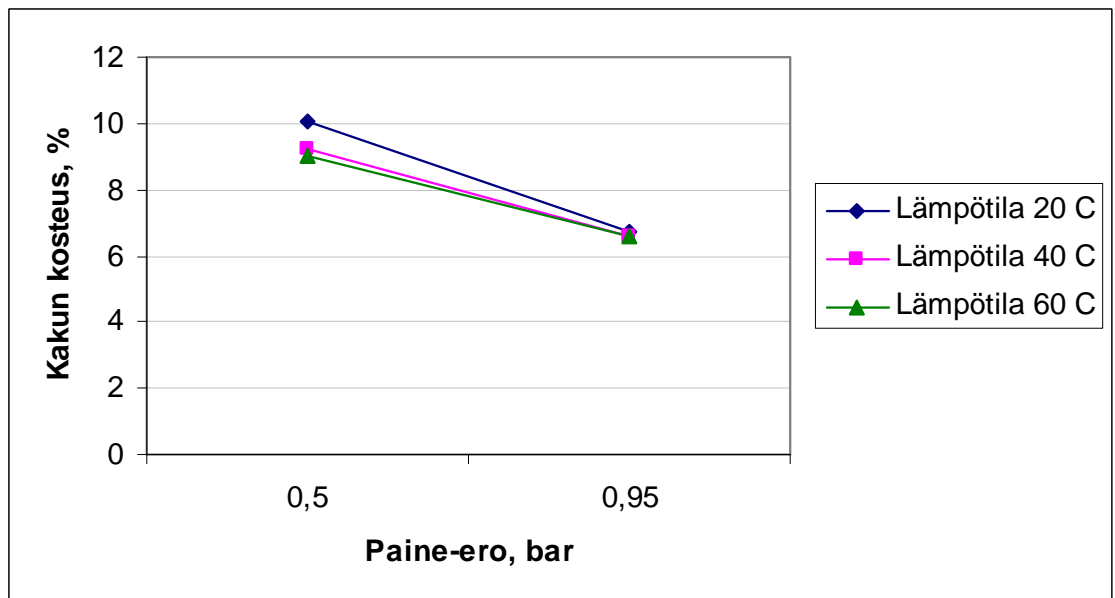
Kuva 27. Kapasiteetin riippuvuus paine-erosta. Lietteen pitoisuus on 60 %

Lietteen pitoisuudella 70 % paine-eron vaikutus on enää 54-64 prosenttia (kuva 28). Kuitenkin sakealla lietteelläkin kapasiteetti paranee puolella suurennettaessa paine-eroa 0,5 baarista 0,95 baariin.



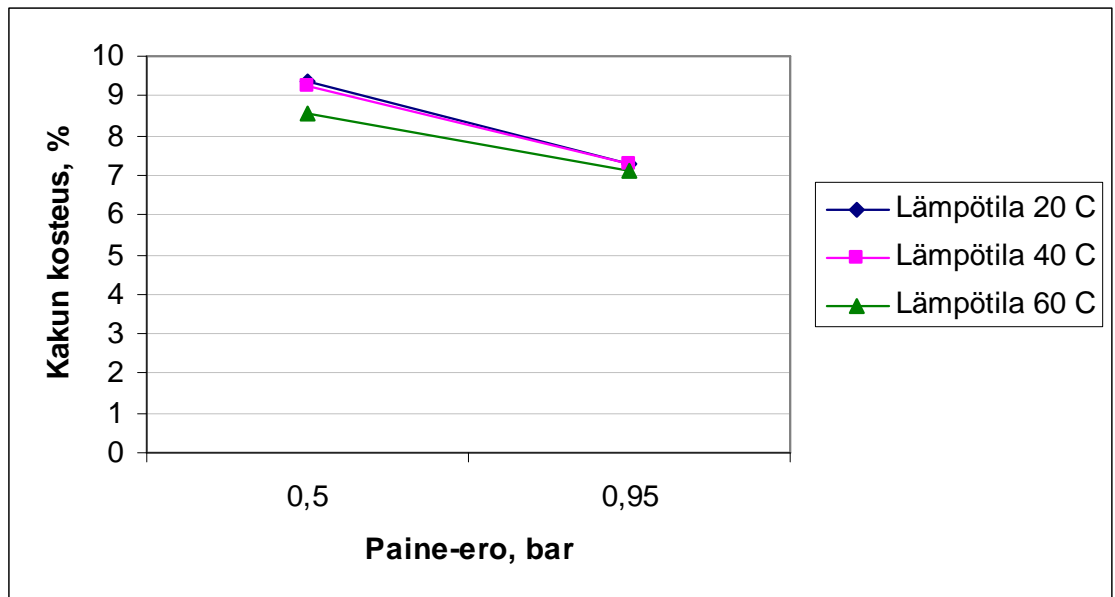
Kuva 28. Kapasiteetin riippuvuus paine-erosta. Lietteen pitoisuus on 70 %

Paine-eron vaikutusta kakkujen kosteuspitoisuuksiin on tarkasteltu kuvissa 29 - 32. 50 % lietteellä paine-eron kasvattaminen 0,5 baarista 0,95 baariin vähentää kakun kosteuspitoisuutta 27 prosenttia 60 °C lietteellä, 28 prosenttia 40 °C lietteellä ja 33 prosenttia 20 °C lietteellä (kuva 29).



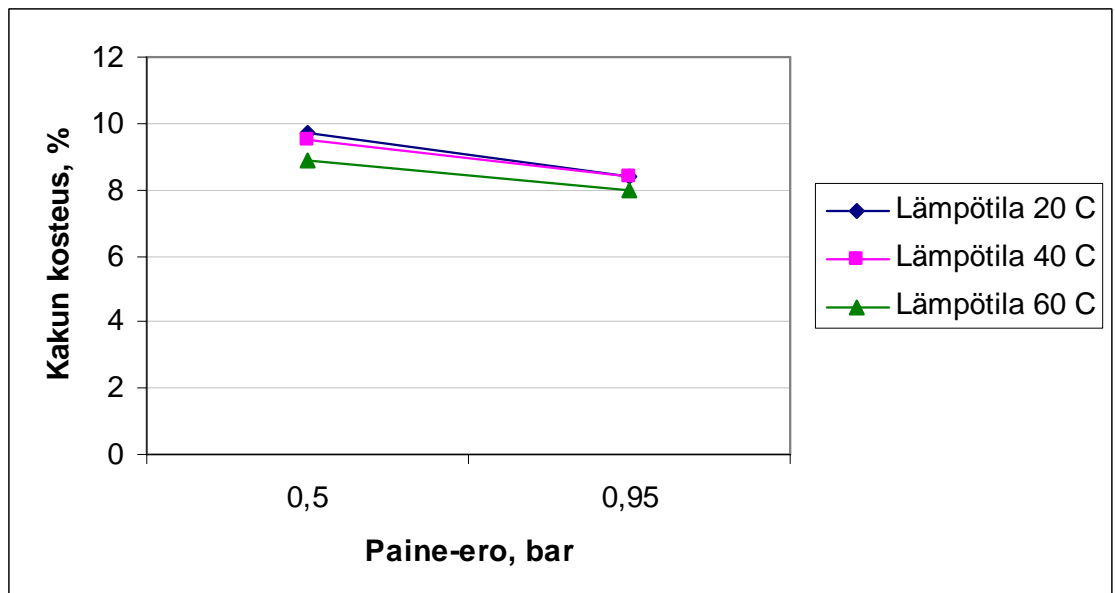
Kuva 29. Kakun kosteuspitoisuuden riippuvuus paine-erosta. Lietteen pitoisuus on 50 %

60 % lietteellä paine-eron kasvattaminen vähentää kosteuspitoisuutta 17-22 prosenttia (kuva 30).



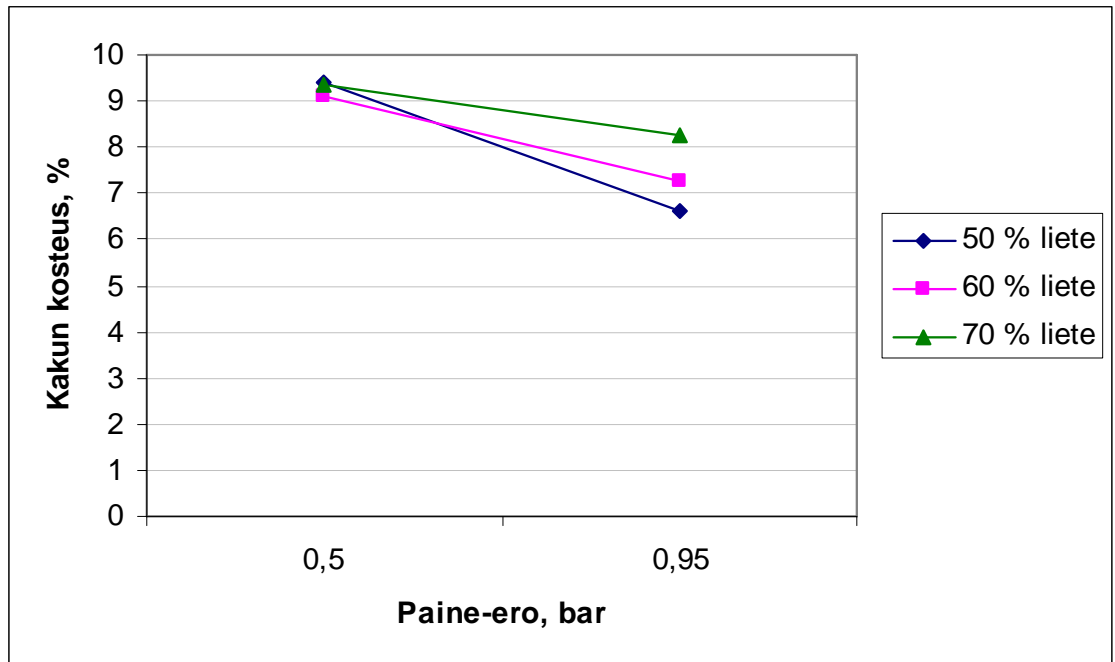
Kuva 30. Kakun kosteuspitoisuuden riippuvuus paine-erosta. Lietteen pitoisuus on 60 %

70 % lietteellä paine-eron kasvattaminen vähentää kosteuspitoisuutta 10-13 prosenttia. Sakeammalla lietteellä paine-eron vaikutus kakun kosteuspitoisuuteen on siis pienempi. Paine-eron vaikutus kakun kosteuspitoisuuteen on suurempi viileässä lietteessä.



Kuva 31. Kakun kosteuspitoisuuden riippuvuus paine-erosta. Lietteen pitoisuus on 70 %

Kuvassa 32 kakun kosteuspitoisuus on esitetty eri lietteen pitoisuuksissa. Kakun kosteus mitattiin kolmessa lämpötilassa ja kuvassa on esitetty lämpötilojen keskiarvojen perusteella saadut kosteuspitoisuudet. Myös tästä kuvasta nähdään, että sakeammalla lietteellä paine-eron vaikutus kakun kosteuspitoisuuteen on pienempi.



Kuva 32. Kakun kosteuspitoisuuden riippuvuus paine-erosta.

8. Johtopäätökset

Lämpötilan nosto lisää kakun paksuutta, kakun massaa ja suodattimen kapasiteettia. Tämä johtuu nesteen viskositeetin pienemisestä. Lämpötilan nosto 20 asteella parantaa kapasiteettia 21-33 prosenttia eli lämpötilan vaikutus on samanlainen mittausten ja Tarletonin & Wakemanin² tekemien simulointien perusteella (kuvat 10, 18 - 23). Lämpötilan nosto 40 asteella parantaa kapasiteettia 51-69 prosenttia. Lietteiden pitoisuuden ollessa 70 % saadaan kuitenkin erilaiset tulokset, kun paine-ero on 0,5 bar. Tässä tapauksessa lämpötilan nosto 20:sta 40:een parantaa kapasiteettia 40 prosenttia, mutta lämpötilan nosto 40:sta 60:een lisää kapasiteettia vain 8 prosenttia (kuva 23). Lämpötilan nostolla voidaan siis lisätä kapasiteettia, mutta pienellä paine-erolla sakeaa liettä suodatettaessa parannus ei välttämättä ole suuri, koska kakun vastus kasvaa niin suureksi, ettei pieni paine-ero riitä imemään vettä kakun läpi.

Lämpötilan nosto alentaa hieman kakun kosteuspitoisuutta. Kokeissa kakkua ei pesty lainkaan ja kuivausvaiheen aikana kuumemmasta kakusta haihtuu enemmän vettä. Lämpötilan vaikutus on melko pieni ja yksittäisissä mittauksissa lämpötilan nosto saattaa jopa lisätä kakun kosteuspitoisuutta. Useiden mittausten keskiarvoista havaitaan, että lämpötilan nosto hieman alentaa kakun kosteuspitoisuutta. Lämpötilan vaikutus kosteuspitoisuuteen on suurempi pienemmällä paine-erolla suodatettaessa.

Suurempi paine-ero parantaa suodatuksen kapasiteettia. Lietteiden pitoisuuden ollessa 50 % kapasiteetti kasvaa yli kaksinkertaiseksi, kun paine-ero kasvaa 0,5 baarista 0,95 baariin (kuva 26). Pitoisuudella 60 % paine-eron vaikutus on 90-99 prosenttia ja pitoisuudella 70 % vaikutus kapasiteettiin on 53-65 prosenttia (kuvat 27 ja 28). Sakealla lietteellä paine-eron vaikutus on siis pienempi.

Suurempi paine-ero alentaa kakun kosteuspitoisuutta. Tarletonin ja Wakemanin² mukaan paine-erolla on selkeä vaikutus kosteuspitoisuuteen (kuva 14). Suodatuskokeissa paine-eron kasvattaminen 0,5 baarista 0,95 baariin alentaa kosteuspitoisuutta 27-33 % suodatettaessa 50 % lietettä (kuva 29). Lietteiden pitoisuuden ollessa 60 % vaikutus on 17-22 % ja 70 % lietteellä 10-13 % (kuvat 30-31). Paine-eron vaikutus kakun kosteuspitoisuuteen on siis suurempi viileässä kuin lämpimässä lietteessä ja suurempi laimeammassa kuin sakeassa lietteessä.

Lähteet

1. Tuunila, Ritva. Mekaaniset erotusmenetelmät, luentomoniste, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2006. s. 3-4, 34-37, 39.
2. Tarleton, E.S., Wakeman, R.J. *Filtration Equipment selection, modelling and process simulation*, 1st ed., Elsevier Advanced Technology, 1999.
3. Wakeman, Richard. The influence of particle properties on filtration. *Separation and Purification Technology* **58**(2007), 2, 234-241.
4. Walas, S. M., *Chemical Process Equipment - Selection and Design*, Elsevier Advanced Technology, 1990, s. 306.
5. Wikipedia, Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Capillary_action, [viitattu 17.6.2008].
6. Chatterjee, Jaideep. Estimation of size from capillary pressure – A correction factor for a two menisci capillary. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **317**(2008), 1-3, 421-430.
7. Larox, Filtration Solutions For Mining and Metallurgy. Laitevalmistajan esite. 2005. Saatavissa: http://www.larox.com/img/kuvapankki/Documents/pdf/brochures/Ceramec_capillary_action_disc_filters.pdf, [viitattu 17.6.2008].
8. Henriksson, Brandt. Focus on separation in the mining industry. *Filtration & Separation* **37**(2000), 7, 28.
9. Larox, Saatavissa:
http://www.larox.com/img/kuvapankki/MediaCenter/Downloads/product_service/low_res/ceramec_lr.jpg, [viitattu 17.6.2008].
10. Lindström, Matti. Fysikaalinen kemia 2, luentomoniste, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 1997.

Liitteet

LIITE I	Koesuunnitelmat
LIITE II	Mittaustulokset

Koesuunnitelma

Mittaus	Lietteen lämpötila (°C)	Lietteen konsentraatio (m-%)	Suodatus- paine (bar)	Kuivaus- paine (bar)	Kierros- aika (s)	Lietteen pinta (mm)	Upotus- aika (s)	Kuivaus- aika (s)	Kakun pesu ja kiekon puhdistus (s)
HH - 01	40	60	0,95	0,95	60	-200	19	30	11
HH - 02	40	60	0,50	0,50	30	-200	9	15	6
HH - 03	40	60	0,95	0,95	60	-400	16	33	11
HH - 04	40	60	0,50	0,50	60	-200	19	30	11
HH - 05	40	60	0,73	0,73	45	-300	13	23	9
HH - 06	40	60	0,50	0,50	60	-400	16	33	11
HH - 07	40	60	0,95	0,95	30	-200	9	15	6
HH - 08	40	60	0,95	0,95	30	-400	8	16	6
HH - 09	40	60	0,50	0,50	30	-400	8	16	6
HH - 10	20	60	0,95	0,95	60	-200	19	30	11
HH - 11	20	60	0,50	0,50	30	-200	9	15	6
HH - 12	20	60	0,95	0,95	60	-400	16	33	11
HH - 13	20	60	0,50	0,50	60	-200	19	30	11
HH - 14	20	60	0,73	0,73	45	-300	13	23	9
HH - 15	20	60	0,50	0,50	60	-400	16	33	11
HH - 16	20	60	0,95	0,95	30	-200	9	15	6
HH - 17	20	60	0,95	0,95	30	-400	8	16	6
HH - 18	20	60	0,50	0,50	30	-400	8	16	6
HH - 19	60	60	0,95	0,95	60	-200	19	30	11
HH - 20	60	60	0,50	0,50	30	-200	9	15	6
HH - 21	60	60	0,95	0,95	60	-400	16	33	11
HH - 22	60	60	0,50	0,50	60	-200	19	30	11
HH - 23	60	60	0,73	0,73	45	-300	13	23	9
HH - 24	60	60	0,50	0,50	60	-400	16	33	11
HH - 25	60	60	0,95	0,95	30	-200	9	15	6
HH - 26	60	60	0,95	0,95	30	-400	8	16	6
HH - 27	60	60	0,50	0,50	30	-400	8	16	6

Liite I, 2 (3)

Mittaus	Lietteen lämpötila (°C)	Lietteen konsentraatio (m-%)	Suodatus- paine (bar)	Kuivaus- paine (bar)	Kierros- aika (s)	Lietteen pinta (mm)	Upotus- aika (s)	Kuivaus- aika (s)	Kakun pesu ja kiekon puhdistus (s)
HH - 28	60	50	0,95	0,95	60	-200	19	30	11
HH - 29	60	50	0,50	0,50	30	-200	9	15	6
HH - 30	60	50	0,95	0,95	60	-400	16	33	11
HH - 31	60	50	0,50	0,50	60	-200	19	30	11
HH - 32	60	50	0,73	0,73	45	-300	13	23	9
HH - 33	60	50	0,50	0,50	60	-400	16	33	11
HH - 34	60	50	0,95	0,95	30	-200	9	15	6
HH - 35	60	50	0,95	0,95	30	-400	8	16	6
HH - 36	60	50	0,50	0,50	30	-400	8	16	6
HH - 37	20	50	0,95	0,95	60	-200	19	30	11
HH - 38	20	50	0,50	0,50	30	-200	9	15	6
HH - 39	20	50	0,95	0,95	60	-400	16	33	11
HH - 40	20	50	0,50	0,50	60	-200	19	30	11
HH - 41	20	50	0,73	0,73	45	-300	13	23	9
HH - 42	20	50	0,50	0,50	60	-400	16	33	11
HH - 43	20	50	0,95	0,95	30	-200	9	15	6
HH - 44	20	50	0,95	0,95	30	-400	8	16	6
HH - 45	20	50	0,50	0,50	30	-400	8	16	6
HH - 46	40	50	0,95	0,95	60	-200	19	30	11
HH - 47	40	50	0,50	0,50	30	-200	9	15	6
HH - 48	40	50	0,95	0,95	60	-400	16	33	11
HH - 49	40	50	0,50	0,50	60	-200	19	30	11
HH - 50	40	50	0,73	0,73	45	-300	13	23	9
HH - 51	40	50	0,50	0,50	60	-400	16	33	11
HH - 52	40	50	0,95	0,95	30	-200	9	15	6
HH - 53	40	50	0,95	0,95	30	-400	8	16	6
HH - 54	40	50	0,50	0,50	30	-400	8	16	6

Liite I, 3 (3)

Mittaus	Lietteen lämpötila (°C)	Lietteen konsentraatio (m-%)	Suodatus- paine (bar)	Kuivaus- paine (bar)	Kierros- aika (s)	Lietteen pinta (mm)	Upotus- aika (s)	Kuivaus- aika (s)	Kakun pesu ja kiekon puhdistus (s)
HH - 55	40	70	0,95	0,95	60	-200	19	30	11
HH - 56	40	70	0,50	0,50	30	-200	9	15	6
HH - 57	40	70	0,95	0,95	60	-400	16	33	11
HH - 58	40	70	0,50	0,50	60	-200	19	30	11
HH - 59	40	70	0,73	0,73	45	-300	13	23	9
HH - 60	40	70	0,50	0,50	60	-400	16	33	11
HH - 61	40	70	0,95	0,95	30	-200	9	15	6
HH - 62	40	70	0,95	0,95	30	-400	8	16	6
HH - 63	40	70	0,50	0,50	30	-400	8	16	6
HH - 64	60	70	0,95	0,95	60	-200	19	30	11
HH - 65	60	70	0,50	0,50	30	-200	9	15	6
HH - 66	60	70	0,95	0,95	60	-400	16	33	11
HH - 67	60	70	0,50	0,50	60	-200	19	30	11
HH - 68	60	70	0,73	0,73	45	-300	13	23	9
HH - 69	60	70	0,50	0,50	60	-400	16	33	11
HH - 70	60	70	0,95	0,95	30	-200	9	15	6
HH - 71	60	70	0,95	0,95	30	-400	8	16	6
HH - 72	60	70	0,50	0,50	30	-400	8	16	6
HH - 73	20	70	0,95	0,95	60	-200	19	30	11
HH - 74	20	70	0,50	0,50	30	-200	9	15	6
HH - 75	20	70	0,95	0,95	60	-400	16	33	11
HH - 76	20	70	0,50	0,50	60	-200	19	30	11
HH - 77	20	70	0,73	0,73	45	-300	13	23	9
HH - 78	20	70	0,50	0,50	60	-400	16	33	11
HH - 79	20	70	0,95	0,95	30	-200	9	15	6
HH - 80	20	70	0,95	0,95	30	-400	8	16	6
HH - 81	20	70	0,50	0,50	30	-400	8	16	6

Mittaustulokset

TAULUKKO I Suodattimen kapasiteetti, kg/m² h

	Upotusaika 8 s, kuivausaika 16 s	Upotusaika 9 s, kuivausaika 15 s	Upotusaika 16 s, kuivausaika 33 s	Upotusaika 19 s, kuivausaika 30 s
T = 20 °C, Liete 50 %, paine 0,95 bar	1206	1197	806	958
T = 40 °C, Liete 50 %, paine 0,95 bar	1360	1650	1052	1202
T = 60 °C, Liete 50 %, paine 0,95 bar	1687	1984	1523	1746
T = 20 °C, Liete 50 %, paine 0,5 bar	530	706	335	434
T = 40 °C, Liete 50 %, paine 0,5 bar	568	641	426	529
T = 60 °C, Liete 50 %, paine 0,5 bar	706	1026	591	685
T = 20 °C, Liete 60 %, paine 0,95 bar	1618	1702	1391	1573
T = 40 °C, Liete 60 %, paine 0,95 bar	2253	2236	1520	1893
T = 60 °C, Liete 60 %, paine 0,95 bar	2533	3111	1978	2473
T = 20 °C, Liete 60 %, paine 0,5 bar	844	1102	622	829
T = 40 °C, Liete 60 %, paine 0,5 bar	1200	1276	769	898
T = 60 °C, Liete 60 %, paine 0,5 bar	1276	1542	1067	1173
T = 20 °C, Liete 70 %, paine 0,95 bar	3098	3392	2541	2804
T = 40 °C, Liete 70 %, paine 0,95 bar	4242	5026	3088	3696
T = 60 °C, Liete 70 %, paine 0,95 bar	4769	5326	4071	4395
T = 20 °C, Liete 70 %, paine 0,5 bar	1968	2258	1453	1716
T = 40 °C, Liete 70 %, paine 0,5 bar	2793	2947	2169	2481
T = 60 °C, Liete 70 %, paine 0,5 bar	2976	3339	2315	2670

TAULUKKO II Suodattimen kapasiteetti, kg/m² h. Upotusaika on 13 s, kuivausaika 23 s ja paine-ero 0,725 bar.

	Liete 50 %	Liete 60 %	Liete 70 %
T = 20 °C	653	1032	2229
T = 40 °C	707	1513	3408
T = 60 °C	1126	2028	3452

TAULUKKO III Kakun paksuus millimetreinä

	Upotusaika 8 s, kuivausaika 16 s	Upotusaika 9 s, kuivausaika 15 s	Upotusaika 16 s, kuivausaika 33 s	Upotusaika 19 s, kuivausaika 30 s
T = 20 °C, Liete 50 %, paine 0,95 bar	4,6	4,6	5,6	6,6
T = 40 °C, Liete 50 %, paine 0,95 bar	4,8	5,6	7,8	8,4
T = 60 °C, Liete 50 %, paine 0,95 bar	6,2	7,0	10,4	11,0
T = 20 °C, Liete 50 %, paine 0,5 bar	2,8	3,0	2,6	3,4
T = 40 °C, Liete 50 %, paine 0,5 bar	2,6	3,2	3,6	4,4
T = 60 °C, Liete 50 %, paine 0,5 bar	2,6	4,2	5,0	5,4
T = 20 °C, Liete 60 %, paine 0,95 bar	5,4	6,2	9,2	10,4
T = 40 °C, Liete 60 %, paine 0,95 bar	8,0	8,8	10,2	12,4
T = 60 °C, Liete 60 %, paine 0,95 bar	8,6	10,0	13,2	15,8
T = 20 °C, Liete 60 %, paine 0,5 bar	3,2	4,4	4,4	6,2
T = 40 °C, Liete 60 %, paine 0,5 bar	4,8	4,8	6,8	5,8
T = 60 °C, Liete 60 %, paine 0,5 bar	4,8	5,6	7,2	7,6
T = 20 °C, Liete 70 %, paine 0,95 bar	10,3	11,1	15,4	17,0
T = 40 °C, Liete 70 %, paine 0,95 bar	13,1	15,2	19,0	21,0
T = 60 °C, Liete 70 %, paine 0,95 bar	14,9	16,5	22,5	24,7
T = 20 °C, Liete 70 %, paine 0,5 bar	7,0	7,8	10,0	11,8
T = 40 °C, Liete 70 %, paine 0,5 bar	9,6	10,2	13,8	16,4
T = 60 °C, Liete 70 %, paine 0,5 bar	10,2	11,2	15,0	16,6

TAULUKKO IV Kakun paksuus millimetreinä. Upotusaika on 13 s, kuivausaika 23 s ja paine-ero 0,725 bar.

	Liete 50 %	Liete 60 %	Liete 70 %
T = 20 °C	3,6	6,0	11,4
T = 40 °C	5,6	8,0	15,8
T = 60 °C	6,6	10,2	16,6

TAULUKKO V Kakun massa grammoina laatan yhdellä puolella

	Upotusaika 8 s, kuivausaika 16 s	Upotusaika 9 s, kuivausaika 15 s	Upotusaika 16 s, kuivausaika 33 s	Upotusaika 19 s, kuivausaika 30 s
T = 20 °C, Liete 50 %, paine 0,95 bar	136	135	181	216
T = 40 °C, Liete 50 %, paine 0,95 bar	153	186	237	270
T = 60 °C, Liete 50 %, paine 0,95 bar	190	223	343	393
T = 20 °C, Liete 50 %, paine 0,5 bar	60	79	75	98
T = 40 °C, Liete 50 %, paine 0,5 bar	64	72	96	119
T = 60 °C, Liete 50 %, paine 0,5 bar	79	115	133	154
T = 20 °C, Liete 60 %, paine 0,95 bar	182	192	313	354
T = 40 °C, Liete 60 %, paine 0,95 bar	254	252	342	426
T = 60 °C, Liete 60 %, paine 0,95 bar	285	350	445	557
T = 20 °C, Liete 60 %, paine 0,5 bar	95	124	140	187
T = 40 °C, Liete 60 %, paine 0,5 bar	135	144	173	202
T = 60 °C, Liete 60 %, paine 0,5 bar	144	174	240	264
T = 20 °C, Liete 70 %, paine 0,95 bar	349	382	572	631
T = 40 °C, Liete 70 %, paine 0,95 bar	477	565	695	832
T = 60 °C, Liete 70 %, paine 0,95 bar	537	599	916	989
T = 20 °C, Liete 70 %, paine 0,5 bar	221	254	327	386
T = 40 °C, Liete 70 %, paine 0,5 bar	314	332	488	558
T = 60 °C, Liete 70 %, paine 0,5 bar	335	376	521	601

TAULUKKO VI Kakun massa grammoina laatan yhdellä puolella. Upotusaika on 13 s, kuivausaika 23 s ja paine-ero 0,725 bar.

	Liete 50 %	Liete 60 %	Liete 70 %
T = 20 °C	110	174	376
T = 40 °C	119	255	575
T = 60 °C	190	342	583

TAULUKKO VII Kakun kosteuspitöisuus prosentteina

	Upotusaika 8 s, kuivausaika 16 s	Upotusaika 9 s, kuivausaika 15 s	Upotusaika 16 s, kuivausaika 33 s	Upotusaika 19 s, kuivausaika 30 s
T = 20 °C, Liete 50 %, paine 0,95 bar	6,2	6,6	6,9	7,2
T = 40 °C, Liete 50 %, paine 0,95 bar	6,4	6,6	6,6	6,8
T = 60 °C, Liete 50 %, paine 0,95 bar	6,4	6,4	6,5	7
T = 20 °C, Liete 50 %, paine 0,5 bar	9,4	9,3	11,1	10,3
T = 40 °C, Liete 50 %, paine 0,5 bar	9,2	9,1	9,4	9,1
T = 60 °C, Liete 50 %, paine 0,5 bar	9,4	9	8,4	9,3
T = 20 °C, Liete 60 %, paine 0,95 bar	7,1	7,4	7,2	7,7
T = 40 °C, Liete 60 %, paine 0,95 bar	7,1	7,2	7,4	7,6
T = 60 °C, Liete 60 %, paine 0,95 bar	7,0	7,2	6,9	7,4
T = 20 °C, Liete 60 %, paine 0,5 bar	9,4	9,1	9,6	9,4
T = 40 °C, Liete 60 %, paine 0,5 bar	8,9	9,0	9,3	9,9
T = 60 °C, Liete 60 %, paine 0,5 bar	8,8	8,6	8,3	8,5
T = 20 °C, Liete 70 %, paine 0,95 bar	8,2	8,6	8,3	8,6
T = 40 °C, Liete 70 %, paine 0,95 bar	8,1	8,6	8,2	8,6
T = 60 °C, Liete 70 %, paine 0,95 bar	7,5	8	7,9	8,5
T = 20 °C, Liete 70 %, paine 0,5 bar	9,6	9,9	9,5	9,9
T = 40 °C, Liete 70 %, paine 0,5 bar	9,3	9,8	9,2	9,6
T = 60 °C, Liete 70 %, paine 0,5 bar	9	9,2	8,2	9,2

TAULUKKO VIII Kakun kosteuspitöisuus prosentteina. Upotusaika on 13 s, kuivausaika 23 s ja paine-ero 0,725 bar.

	Liete 50 %	Liete 60 %	Liete 70 %
T = 20 °C	7,6	8,1	8,6
T = 40 °C	7,4	7,6	8,6
T = 60 °C	6,7	7,5	8,0