

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Erotustekniikan laboratorio
Kandidaatintyö

Nauhasuodattimen mitoitus ja toimintaolosuhteiden optimointi

17.2.2010
Janne Kemppainen
0279636

Sisällysluettelo

Symboliluettelo.....	2
1 Johdanto.....	3
Teoriaosa	4
2 Suodatus	4
2.1 Suodatuksen mekanismit	4
2.2 Darcyn laki.....	5
2.3 Darcyn laki suodatuksessa	6
2.4 Permeabiliteetti	7
2.5 Vakiopainesuodatus	8
2.6 Suodatuksen energiankulutus	9
3 Suodatinväliaineet	10
4 Nauhasuodatus.....	12
4.1 Imumattosuodatin	13
4.2 Moduulityyppiset suodattimet	15
4.2.1 Kiinteä suodatuskaukalo.....	15
4.2.2 Palautuva kaukalo.....	16
4.2.3 Jatkuvasti kiertävä kaukalo ja kangas.....	17
4.3 Olosuhteiden vaikutus nauhasuodatuksen	18
4.4 Vakuumisuodatuksen etuja ja rajoituksia	19
4.5 Käyttö.....	20
5 Pesu.....	21
5.1 Pesutehokkuus	23
Kokeellinen osa	24
6 Työn tarkoitus.....	24
7 Koelaitteisto ja mittausten suoritus	24
7.1 Mittausten suoritus.....	26
8 Koesuunnitelmat.....	28
9 Materiaalit.....	32
10 Mittaustulokset	34
11 Nauhasuodattimen mitoitus	45
12 Yhteenveto ja johtopäätökset.....	46
Lähteet	48
LIITTEET	

Symboliluettelo

A	suodatuspinta-ala	m^2
C_w	epäpuhtauden pitoisuus pesunesteessä	kg/m^3
C_1	epäpuhtauden pitoisuus pesemättömässä kakussa	kg/m^3
C_2	epäpuhtauden pitoisuus pestyssä kakussa	kg/m^3
c	muodostuneen kuivan kakun massa / suodoksen tilavuus	kg_{ka}/m^3_{suodos}
k	materiaalin permeabiliteetti	m^2
L	kakun paksuus	m
Δp	paine-ero kakun eri puolilla	Pa
R	kankaan vastus	$1/m$
S_0	partikkeleiden ominaispinta-ala	m^2/m^3
t	aika	s
t_1	vakiopaineen saavuttamiseen kulunut aika	s
u	nesteen virtausnopeus materiaalin läpi	m/s
V	suodoksen tilavuus	m^3
V_h	huokostilavuus	m^3
V_k	suodinkakun tilavuus	m^3
V_{ka}	kiintoaineen tilavuus kakussa	m^3
V_1	suodostilavuus ajanhetkellä t_1	m^3
v_B	nauhan nopeus	m/s
W	pesusuhde	-
W_R	suodattimen tuotanto	kg/s
w	kuivan kakun massa / suodatusala	kg/m^2
x	partikkelikoko	m
z	suodattimen nauhan pituus	m
α	keskimääräinen kakun ominaisvastus	m/kg
ε	huokoisuus	-
η_w	pesutehokkuus	-
μ	suodoksen viskositeetti	$Pa \cdot s$
ρ	nesteen tiheys	kg/m^3
ρ_s	kiintoaineen tiheys	kg/m^3

1 Johdanto

Suodatuksen tarkoituksena on erottaa kiintoaine ja neste toisistaan suodatinväliaineen avulla. Tehokas ja yleinen tapa on käyttää suodatinväliaineena suodatinkangasta. Tällöin kiintoaine kasaantuu kankaan päälle ja neste valuu suodoksena kankaan lävitse. Erotettu kiintoaine tulee usein pestä, jotta liuenneet epäpuhtaudet saadaan poistettua. Viimeisenä vaiheena suodatuksessa on monesti kakun kuivaus.

Suodatuksen toteuttamiseen on useita laiteratkaisuja, mutta tässä työssä perehdytään vain horisontaali nauhavakuumsuodattimien toimintaan. Työssä käydään tarkemmin läpi neljä erilaista nauhasuodatintyyppiä.

Nauhasuodattimessa syöttö tapahtuu suodattimen toisessa päässä nauhan päälle, jossa kiintoaine muodostaa kakun kankaan päälle ja neste valuu kankaan läpi kankaan alapuolelle muodostetun alipaineen avustuksella. Kakun muodostuttua nauhasuodattimessa on pesuvyöhyke, jossa kakku pestään tietyllä määrällä pesunestettä. Pesuneste imetään kakun läpi alipaineen avulla. Pesunesteen poistuttua kakusta voidaan alipainetta pitää yhä yllä kakun kuivattamiseksi. Horisontaali nauhasuodattimet soveltuvat hyvin sekä nopeasti että hitaasti kuivuvan kiintoaineen erotukseen, erityisesti silloin kun pesuvaatimukset ovat prosessin kriittinen osa.

Kokeellisessa osassa tutkittiin Büchner-koelaitteiston avulla horisontaali nauhavakuumsuodattimen toimintaparametrien vaikutusta saadun kakun kosteuspitoisuuteen ja kapasiteettiin. Myös laitteiston pesutehokkuutta tutkittiin. Saatujen mittaustulosten perusteella mitoitettiin teollisen mittakaavan vakuuminauhasuodatin.

Teoriaosa

2 Suodatus

Kiintoaineen ja nesteen suodatuksen tarkoituksena on erottaa kiintoaine ja neste toisistaan mahdollisimman hyvin ja edullisesti. Täydellinen erotus ei ole mahdollista. Aina osa nesteestä jää kiintoaineeseen ja vastaavasti osa kiintoaineesta menee nesteen mukaan. Tästä johtuen erotuksen onnistumista kuvataan monilla eri tavoilla, kuten talteenotetulla kiintoaineen massaosuudella ja kosteuspitoisuudella. [1, 2]

Kiintoaineen ja nesteen erotus voidaan jakaa esikäsitteilyyn, kiintoaineen konsentroiintiin, kiintoaineen erotukseen ja jälkikäsitteilyyn. Esikäsitteily vaaditaan lietteen ollessa vaikeasti erotettavissa. Esikäsitteily voidaan tehdä esimerkiksi erotettavien partikkeleiden ollessa niin hienoja, että niillä on taipumus tukkia suodatinväliaineen huokokset tai kiintoaineen konsentraation ollessa matala ja aiheuttaen näin suodatinväliaineen pinnan tukkeutumisen. Partikkelien pintakemia saattaa aiheuttaa myös geelin muodostumista suodatinväliaineen pinnalle. [1, 2 ja 3]

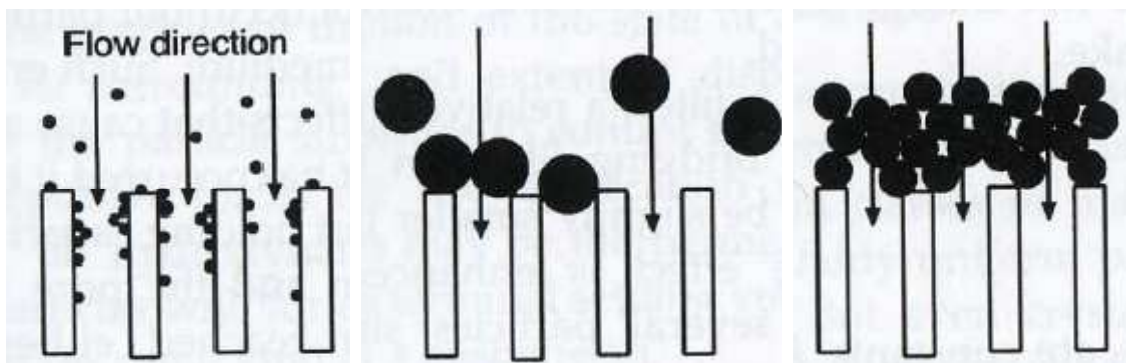
Kiintoaineen konsentroiinti vähentää nesteen määrää syötössä ja tämä nopeuttaa kakun muodostumista suodattimen pinnalle. Jälkikäsitteily parantaa tuotteen laatua. Tuotteen ollessa suodosta eli nestettä, kirkastetaan suodos poistamalla pieniä hiukkasia käyttämällä esimerkiksi suodattimia puhdistukseen. Jatkopuhdistus voidaan tehdä käyttämällä käänteisosmoosia, ioninvaihtoa tai adsorptiota. Kakku voidaan pestä, jotta liuenneet epäpuhtaudet saadaan poistettua. Viimeisenä vaiheena on usein kakun kuivaus. Kakun kuivaus voidaan tehdä esimerkiksi alipaineen tai puristuksen avulla. [1, 2 ja 3]

2.1 Suodatuksen mekanismit

Partikkelit käyttäytyvät kahdella tapaa suodatinväliaineessa. Partikkeleiden ollessa suurempia kuin itse suodatinväliaineen huokoskoko, ne jäävät suodatinväliaineen pinnalle kakuksi. Tällöin puhutaan kakkusuodatuksesta. Partikkeleiden ollessa vastaavasti pienempiä kuin suodatinväliaineen huokoskoko ne menevät läpi suodokseen tai vaihtoehtoisesti jäävät suodatinväliaineeseen. Partikkeleiden jäädessä suodatinväliaineeseen puhutaan

rakeissuodatuksesta (depth filtration). Esimerkki rakeissuodatuksesta on hiekkapetisuodatus. Tässä kirjallisuusosassa keskitytään pääasiassa kakkusuodatukseen. [1 ja 2]

Kuvassa 1 on esitetty suodatuksen mekanismi partikkelikoon mukaan. Kuvan 1 vasemmanpuoleisessa tapauksessa on esitetty rakeissuodatuksen periaate. Siinä partikkelikoko on pienempi kuin suodatinväliaineen huokoskoko sekä syöttökonsentraatio on alhainen. Keskimmäisessä tapauksessa partikkelikoko on suurempi kuin huokoskoko ja tällöin tapahtuu täydellinen huokosten tukkeutuminen. Kuvan 1 oikeanpuoleisessa tapauksessa on kyse silloittumisesta. Silloittumista ilmenee silloin, kun partikkelikoko on pienempi kuin huokoskoko ja syötön konsentraatio on suuri. Tällöin useat partikkelit yrittävät mennä samanaikaisesti huokosiin ja tukkivat näin ollen huokosen silloittuneella rakenteella. Tällainen rakenne voidaan murtaa muuttamalla virtausnopeutta ja virtauksen suuntaa. Usein kuitenkin pyritään muodostamaan silloittuneita rakenteita, jotta suodatinväliainetta pienemmät partikkelitkin jäisivät kakuksi suodattimen päälle. Näiden lisäksi on tapauksia joissa osa partikkeleista saattaa tukkia huokosia ja näin ollen pienemmät partikkelit kasaantuvat suodattimen päälle, vaikka kokonsa puolesta muuten menisivät läpi. [1, 2 ja 3]



Kuva 1. Suodatuksen mekanismit partikkelikoon vaihdellessa. [1]

2.2 Darcyn laki

Kakun muodostuksen mallit perustuvat Darcyn lakiin, joka alun perin kehitettiin kuvaamaan veden virtausta huokoisen hiekkapedin läpi. Darcyn laki kirjoitetaan yleisesti seuraavasti

$$u = \frac{-k \Delta p}{\mu L} \quad (1)$$

jossa	u	nesteen virtausnopeus materiaalin läpi, m/s
	k	materiaalin permeabiliteetti, m^2
	μ	suodoksen viskositeetti, Pa s
	Δp	paine-ero kakun eri puolilla, Pa
	L	kakun paksuus, m

Darcyn laki pätee hyvin varsinkin pienillä virtausnopeuksilla eli virtauksen tulee olla laminaaria. Tämän takia virtauksen Reynoldsin luku (Re) on hyvä tuntea. Virtaus on täysin laminaaria Reynoldsin luvun ollessa alle 0,2. Reynoldsin luku määritetään seuraavasti

$$Re = \frac{\rho u x}{\mu} \quad (2)$$

jossa	ρ	nesteen tiheys, kg/m^3
	x	partikkelikoko, m

2.3 Darcyn laki suodatuksessa

Wakemanin ja Tarletonin [1] mukaan suodatuksessa Darcyn lakia käytetään usein hieman muokatussa muodossa. Tällöin permeabiliteetti k korvataan ominaisvastuksella (specific resistance) α ja painegradientti ($\Delta p/L$) korvataan painehäviöllä suodatinväliaineen pinnalle kertyneen kiintoaineen massan yli ($\Delta p/w$). Tällöin suodatuksen Darcyn laki voidaan kirjoittaa

$$u = -\frac{1}{\mu \alpha} \frac{\Delta p}{w} \quad (3)$$

jossa	w	kuivan kakun massa / suodatusala, kg/m^2
-------	-----	--

Parametrit w ja L ovat verrannollisia keskenään seuraavasti

$$w = \rho_s(1 - \varepsilon)L \quad (4)$$

jossa ρ_s kiintoaineen tiheys, kg/m³
 ε huokoisuus, -

Laskuissa tarvittava huokoisuus voidaan Rushtonin [3] mukaan laskea seuraavasti

$$\varepsilon = \frac{V_h}{V_k} = \frac{V_k - V_{ka}}{V_k} \quad (5)$$

jossa V_h huokostilavuus, m³
 V_k suodinkakun tilavuus, m³
 V_{ka} kiintoaineen tilavuus kakussa, m³

Wakemanin ja Tarletonin [2] mukaan permeabiliteetti k ja ominaisvastus α ovat verrannollisia seuraavasti

$$k = \frac{1}{\rho_s(1-\varepsilon)\alpha} \quad (6)$$

Wakemanin ja Tarletonin [1] mukaan ominaisvastus vaihtelee yleensä vähemmän paineen vaikutuksesta kuin permeabiliteetti ja tämän vuoksi ominaisvastusta käytetään useasti suodatuslaskuissa ja mitoituksissa.

2.4 Permeabiliteetti

Suodinkakun huokoskoko saattaa vaihdella huomattavasti eri kohdissa kakkua. Tästä johtuen pelkkä läpäisevyys eli permeabiliteetti ei kerro juuri mitään materiaalin suotautumisominaisuuksista, vaan kakun huokoisuus on tunnettava. Suodinkakun huokoisuutta on vaikea kuvailla matemaattisesti. Yleisin ja helpoin tapa on verrata permeabiliteettia kakun huokoisuuteen sekä muodostuneiden partikkeleiden keskipitkyyteen. Tunnetuin yhtälö lienee Kozeny-Carmanin yhtälö

$$u = \frac{\varepsilon^3}{5\mu S_0^2(1-\varepsilon)^2} \frac{\Delta p}{L} \quad (7)$$

jossa S_0 partikkeleiden ominaispinta-ala, m^2/m^3

Kozeny-Carmanin yhtälön tärkeä sovellus on selvittäessä jauhemaisten näytteiden ominaispinta-alaa permeabiliteetti mittaustuloksista sekä resistanssin riippuvuutta nestevirtaukseen huokosen aineen läpi. Partikkeleiden poiketessa merkittävästi pallomaisesta muodosta ja partikkeleiden kokojakauman ollessa laaja Kozeny-Carmanin yhtälö ei ole enää käypä ja tuloksiin on suhtauduttava varauksella. [1 ja 2]

Laskettaessa permeabiliteetti teoreettisista yhtälöistä tulee tulosta pitää vain suuntaa-antavana arviona mittausdatan puuttuessa. Mitattu permeabiliteetti saattaa olla yli kaksi kertaa alhaisempi kuin mitä teoreettiset yhtälöt antavat. Tämä johtuu monista tekijöistä joita yhtälöt eivät huomioi. Yleisenä totuutena Rushtonin [3] mukaan pidetään sitä, että mitä hienompia partikkelit ja laajempi kokojakauma on, sitä suurempi ero mitatun ja teoreettisten permeabiliteetti tulosten kanssa on. [3]

2.5 Vakiopainesuodatus

Vakiopainesuodatuksessa paine-ero kakun läpi pidetään vakiona. Rushtonin [3] mukaan vakiopainesuodatuksessa voidaan käyttää seuraavaa yleistä suodatusyhtälöä

$$\int_0^t dt = \frac{\mu c \alpha}{A^2 \Delta p} \int_0^V V dV + \frac{\mu R}{A} \int_0^V dV \quad (8)$$

jossa t aika, s
 V suodoksen tilavuus, m^3
 c muodostuneen kuivan kakun massa/suodoksen tilavuus, $\text{kg}_{\text{ka}}/\text{m}^3_{\text{suodos}}$
 A suodatuspinta-ala, m^2
 R kankaan vastus, $1/\text{m}$

Rushtonin [3] mukaan integroimalla yhtälö (8) ja järjestämällä termejä saadaan vakiopainesuodatuksen yhtälö

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu c \alpha}{2A^2 \Delta p} V + \frac{\mu R}{A \Delta p} \quad (9)$$

Keskimääräinen kakun ominaisvastus ja kankaan vastus lasketaan mittaustuloksia hyväksi käyttäen piirtämällä yhtälöstä (9) suora. Tällöin V asetetaan x-akselille ja t/V y-akselille. Yhtälön (9) oikeanpuolen ensimmäinen termi saadaan piirretyn kuvaajan kulmakertoimesta ja vastaavasti toinen termi y-akselin leikkauskohdasta seuraavasti

$$\text{kulmakerroin} = \frac{\mu c \alpha}{2A^2 \Delta p} \quad (10)$$

ja

$$y - \text{akselin leikkauskohta} = \frac{\mu R}{A \Delta p} \quad (11)$$

Rushtonin [3] mukaan vakioainesuodatuksen yhtälölle on monia variaatioita. Eräs sellainen on tilanteille, joissa vakioaineen nousun saavuttaminen kestää kauan. Tällöin tulee yhtälön (8) integrointi aloittaa hetkestä, jolloin paine-ero on saavuttanut vakioarvon. Yhtälö (8) muokkautuu silloin seuraavasti

$$\int_{t_1}^t dt = \frac{\mu c \alpha}{A^2 \Delta p} \int_{V_1}^V V dV + \frac{\mu R}{A} \int_{V_1}^V dV \quad (12)$$

jossa t_1 vakioaineen saavuttamiseen kulunut aika, s
 V_1 suodostilavuus ajanhetkellä t_1 , m³

Integroitaessa yhtälö (12) vakioainesuodatuksen yhtälö saa muodon

$$\frac{t-t_1}{V-V_1} = \frac{\mu c \alpha}{2A^2 \Delta p} (V + V_1) + \frac{\mu R}{A \Delta p} \quad (13)$$

2.6 Suodatuksen energiankulutus

Sutherlandin [5] mukaan viimeaikoina suodattimien valmistajat ovat heränneet energian hinnan nousun myötä tarkastelemaan laitteidensa energiatehokkuutta. Valmistajat ovat huomanneet energiatehokkuuden olevan myyntivaltti muuten tiukasti kilpaillulla alalla. Näin ollen suodattimien energiankulutus onkin laskenut tutkijoiden kiinnitettyä siihen entistä enemmän huomiota.

Suodatuksessa kuluu energiaa itse suodatuksen läpiajamiseen, nesteiden ja kiintoaineen liikuttamiseen, vakuumin muodostamiseen, syöttöliuoksen ja suodoksen liikuttamiseen prosessissa eteenpäin, kakun liikuttamiseen ja irrottamiseen suodattimesta, mekaanisten osien liikuttamiseen kuten suodatinkankaan pyörittämiseen nauhasuodattimessa sekä mahdollisiin puhdistus- ja pesutoimenpiteisiin. Suodattimien energiankulutus riippuu tietenkin suodatintyypistä.

Sutherlandin [5] mukaan tärkeä osa energiatehokkuutta on oikean suodattimen ja suodatinväliaineen valinta. Yleensä kannattaa valita niin yksinkertainen suodatin kuin mahdollista. Suodatinväliaineen materiaalin vastus on usein mitättömän pieni kakun vastukseen verrattuna kakun ollessa hyvin paksu. Tällöin huomio tulee kiinnittää kakun muodostukseen. Kakun ollessa ohut tai muuten hyvin huokoinen suodatinväliaineen valinta on entistä tärkeämmässä roolissa.

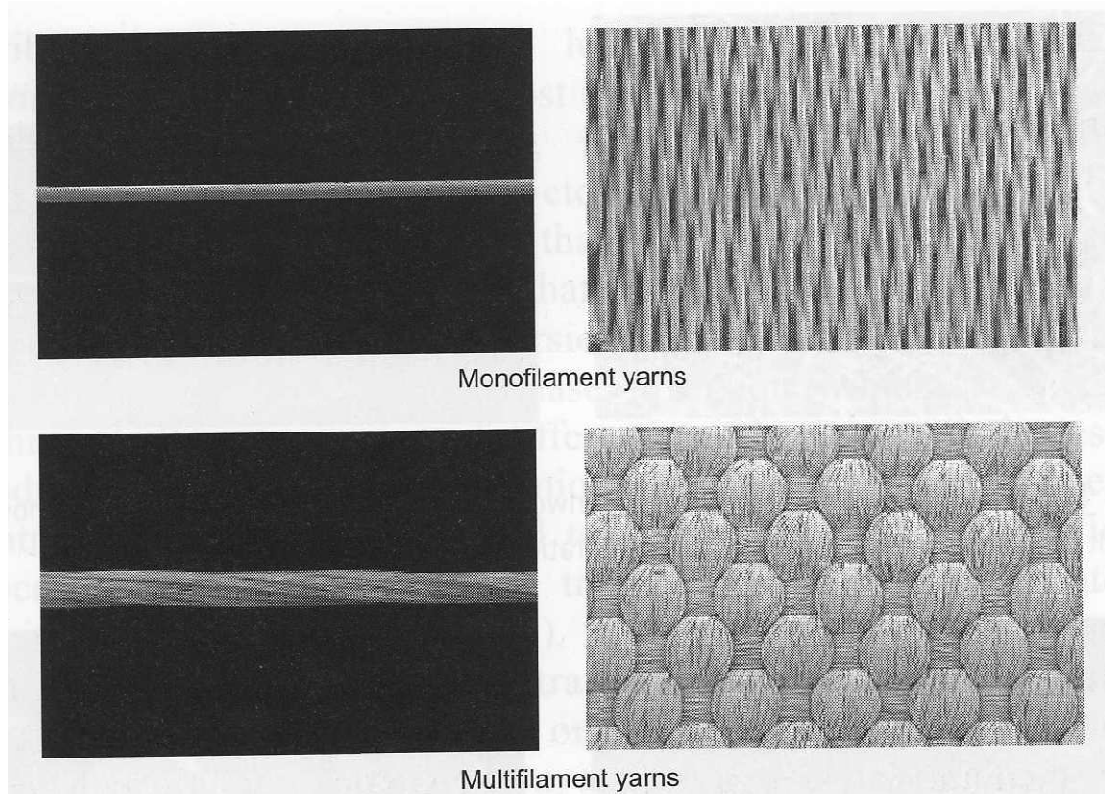
Sutherlandin [5] mukaan suodatinväliaineen materiaalin vastuksen valinta on aina kompromissi käytön ja energiatehokkuuden välillä. Mitä alhaisempi kankaanvastus, sitä alhaisempi on energian kulutus. Toisaalta kangas ei voi olla liian läpäisevä, muuten suodatuksen tehokkuus kärsii. Päätöksiä tehdessä tulee huomioida, että suodattimen energiakustannus on jokavuotinen kustannus, kun taas suodattimen energiatehokkuuden parantaminen nostaa vain hankintahintaa.

3 Suodatinväliaineet

Suodatinväliaineen (filter media) tulee olla läpäisevää materiaalia, joka päästää nesteen lävitseen, mutta estää kiintoaineen läpäisyn. Suodatinväliaineen päätarkoitus on partikkelien erotus nesteestä mahdollisimman pienin energiakustannuksin. Suodatinväliaineiden kirjo on laaja, on kudottuja kankaita, kuitukankaita, kuitumateriaaleja, polymeerisiä ja keraamisia levyjä, sintrattuja metalleja ja rei'itettyjä levyjä. [1 ja 2]

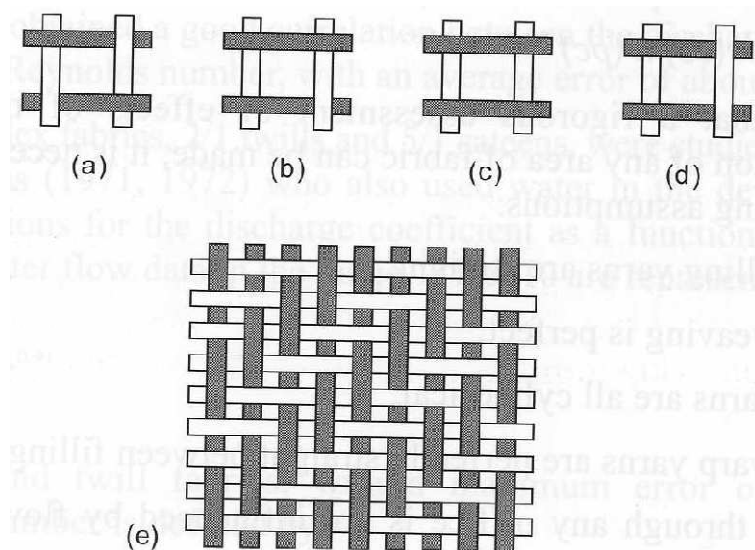
Kudokset ovat kaikkein yleisimmin käytettyjä suodatinväliaineita. Kudokset voidaan tehdä luonnonmateriaaleista, kuten puuvillasta ja villasta, tai synteettisistä materiaaleista, esimerkiksi polymeereistä. Kudoksissa yksittäiset kuidut sidotaan yhteen tietyn kaavan mukaan yksi- tai monikerroksellisiksi kankaiksi. Kankaan materiaalin ja sidontatyylin vaihtaminen antaa jokaiselle kankaalle omat ominaisuutensa. Kankaiden ominaisuuksien kirjoa laajentaa entisestään yhdistelmäkankaat, joissa kudoksien välissä on polymeerikuituja, jolloin muodostuu

todella tiivis huokosrakenne. Huokoskoko voi tällöin olla mikrometriluokkaa. Jokaiselle suodatusprosessille sopii omanlaisensa kangas. Kuvassa 2 on esitetty yksi- ja monikuitukangas. [2]



Kuva 2. Yläkuvassa vasemmalla yksikuitulanka ja oikealla siitä tehty kangas sekä vastaavasti alakuvassa monikuitulanka ja -kangas. [2]

Kuvassa 3 esitetään lankojen sidontatapoja.



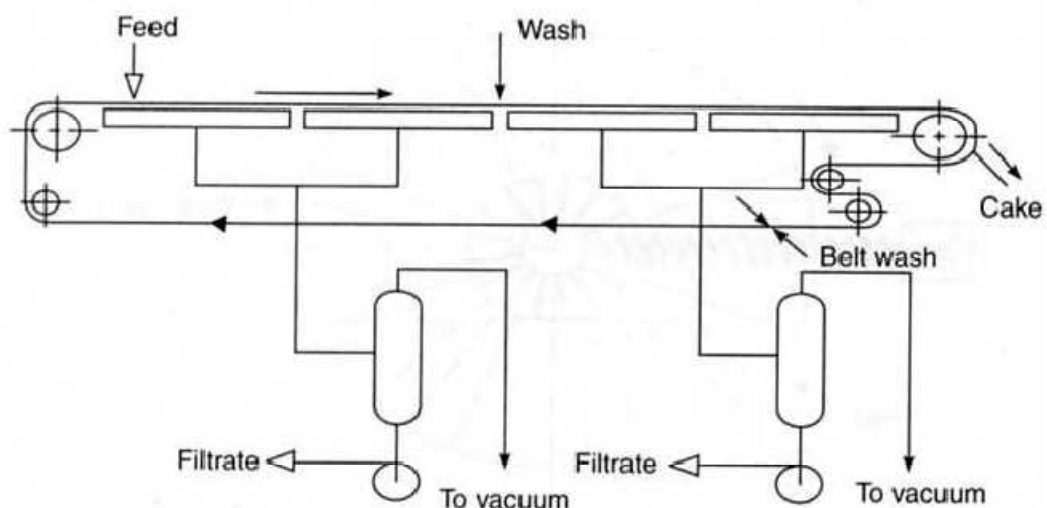
Kuva 3. Lankojen sidontatapoja. [2]

4 Nauhasuodatus

Nauhasuodattimien yhteisenä piirteenä on suodatustapa, jossa kangasmainen nauha erottaa kiintoaineen nesteestä. Kiintoaine jää kankaan päälle ja neste menee kankaan läpi. Erotus tapahtuu alipaineen avulla, mutta usein käytetään apuna myös puristusta. Seuraavaksi käydään läpi yleisimpiä nauhasuodattimien laiteratkaisuja. Tässä kirjallisuusosassa keskitytään vain horisontaali nauhavakuumisuoatimiin (horizontal belt vacuum filter) ja nauhapainesuodattimet (belt press) jätetään huomiotta.

Nauhasuodattimessa syöttö tapahtuu suodattimen toisessa päässä nauhan päälle, jossa kiintoaine muodostaa kakun kankaan päälle ja neste valuu kankaan läpi kankaan alapuolelle muodostetun alipaineen avustuksella. Kakun muodostuttua nauhasuodattimessa on pesuvyöhyke, jossa kakku pestään tietyllä määrällä pesunestettä. Pesuvyöhykkeeseen voi kuulua useita kakun pesuja. Pesuneste imetään kakun läpi alipaineen avulla. Pesunesteen poistuttua kakusta voidaan alipainetta pitää yhä yllä kakun kuivattamiseksi.

Nauhasuodattimessa yläpuolella tapahtuu itse suodatus, pesu ja kuivaus ja vastaavasti alapuolella nauhan palatessa alkuun kangas puhdistetaan ja pestään. Tämän jälkeen uusi kierros voi alkaa. Nauhasuodattimet ovatkin jatkuvatoimisia eikä joutokäyntiä ole. Haitallisia ja korrodoivia höyryjä käsiteltäessä suodatin voidaan sulkea höyrynpitävään koteloon.

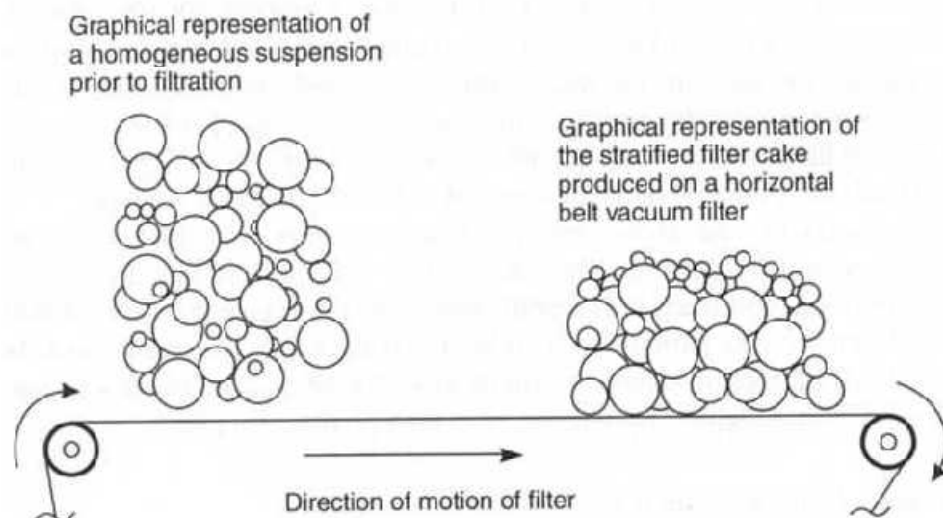


Kuva 4. Horisontaali nauhavakuumisuoatatin. [4]

Svarovskyn [4] mukaan horisontaali nauhasuodattimet soveltuvat hyvin sekä nopeasti että hitaasti kuivuvan kiintoaineen erotukseen, erityisesti silloin kun pesuvaatimukset ovat prosessin

kriittinen osa. Osassa horisontaali nauhavakuumisuodattimissa viimeisenä vaiheena on mekaaninen puristus telalla tai kankaalla, jotta kakku saataisiin mahdollisimman kuivaksi. Vaahtoinen kakku voidaan siloittaa painamalla sitä polyteenikalvolla. Kakun pinnan halkeilua ja kanavoita voidaan tasoittaa myös puristamalla kakkua. [4 ja 6]

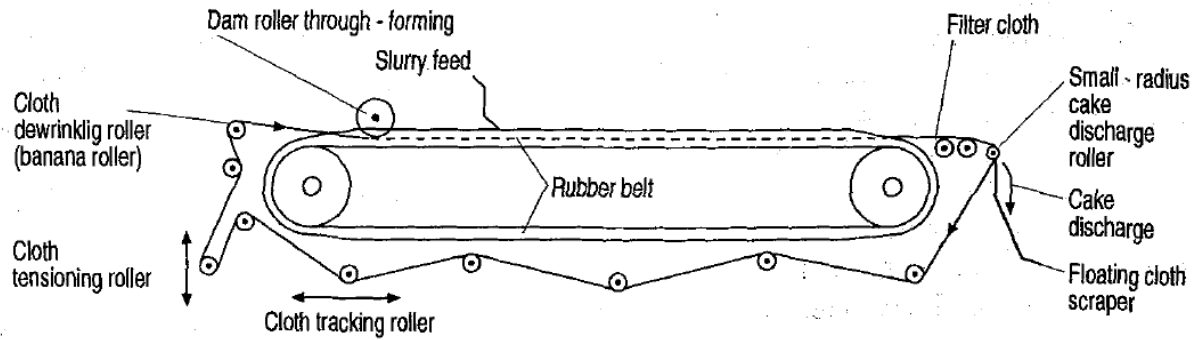
Kuvassa 5 on esitetty horisontaali nauhavakuumisuodatin, jossa suuremmat partikkelit menevät lähemmäs kangasta ja pienet partikkelit jäävät niiden päälle. Partikkeleiden erottuminen johtuu painovoiman aiheuttamasta jakautumisesta. [4]



Kuva 5. Partikkeleiden erottuminen horisontaali nauhavakuumisuodattimessa painovoiman vaikutuksesta. [4]

4.1 Imumattosuodatin

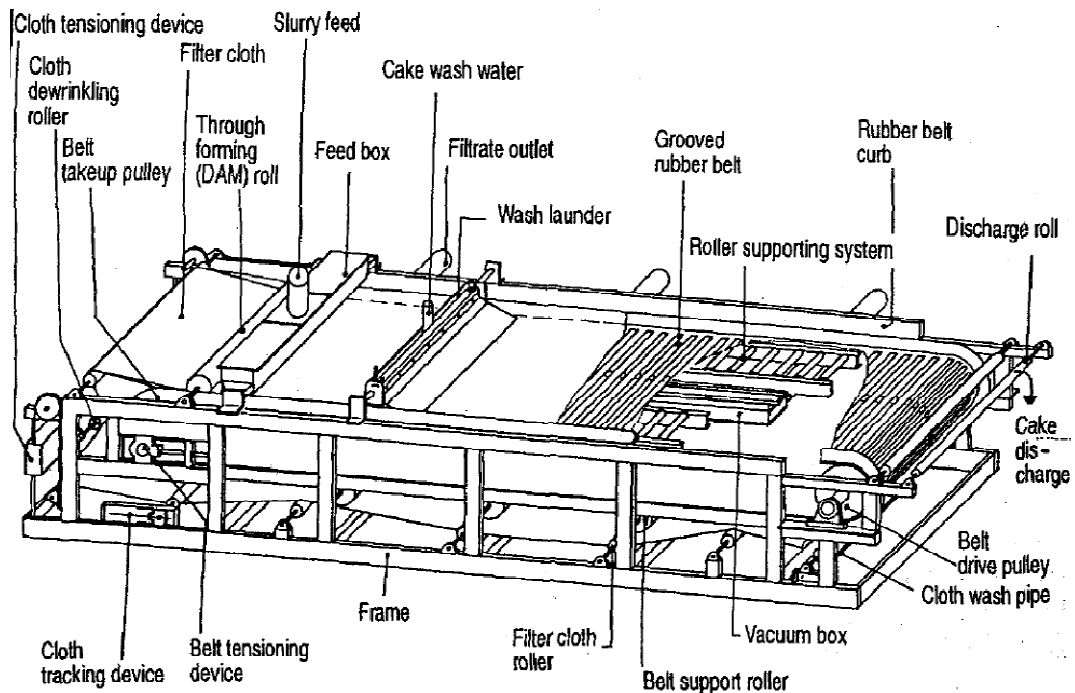
Kuvassa 6 oleva imumattosuodatin (rubber belt filter) on yleisesti käytetty nauhasuodatin malli. Imumattosuodattimen imumatto suojelee varsinaista suodatusnauhaa kulumiselta. Imumatto on uritettu edistääkseen kuivausta keskellä nauhaa. Imumatto on kohotettu nurkistaan ja sitä vedetään keskellä mattoa paikallaan olevan alipainelaatikon yli. Kuluminen johtuu kitkasta maton ja alipainelaatikon välillä. Kulumista pyritään vähentämään käyttämällä vaihdettavaa sekundääristä kulumaa mattoa, joka on tehty kestävästä materiaalista, kuten PTFE:stä tai teryleenistä. Kakun irtoamista kankaasta voidaan tehostaa erottamalla matto kankaasta ja ohjaamalla kangas jyrkästi takaisin päin pienen halkaisijan omaavan erotustelan kautta. Tällöin kakku halkeilee ja irtoaa kankaasta. [4 ja 6]



Kuva 6. Horisontaali nauhasuodin imumaton kuljettaessa suodinkangasta. [4]

Svarovskyn [4] mukaan imumattosuodattimia on saatavilla hyvinkin suurille kapasiteeteille suodatusalan ollessa jopa yli 200 neliometriä. Maton nopeus voi olla korkea aina 30 m/min käsiteltäessä nopeasti suotautuvia materiaaleja, kuten mineraalilietettä. Suurimpina haittapuolina imumattosuodattimissa on korkea mattojen jälleenhankintakustannus, alhainen alipainetaso sekä kumimateriaalien liuotinkestävyys voi olla ongelma. Purchasin [6] mukaan kunnossapitokustannukset ovat 3,5 – 5 %:a suodattimen vuotuisista kustannuksista.

Alipainepumput mitoitetaan usein antamaan ilmaa $2 - 20 \text{ m}^3/\text{min}$ suodatuspinta-alan yli. Kiintoaineen kapasiteetti vaihtelee 10:stä 500 kg/m^2 kakun paksuuden ollessa kolmesta 150 mm:n. Kuvassa 7 on esitetty imumattosuodatin yksityiskohtaisesti. [4 ja 6]



Kuva 7. Imumattovakuumisuoatatin (Rubber horizontal vacuum belt filter). [3]

Jatkuvatoimisten imumattosuodattimien toimittajia on useita. Rushtonin [3] mukaan laitteiden eroavaisuudet liittyvät lähinnä kitkan vähentämiseen imumaton ja vakuumilaatikon välillä. Huomiota on kiinnitetty erityisesti matalan kitkan omaaviin materiaaleihin, kuten PTFE:hen, kontaktipinnoilla. Myös ilmaa tai vettä saatetaan suunnata liukuvien pintojen ja laatikon väliin pyrittäessä vähentämään kitkaa.

Maton standardileveydet ovat 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 ja 4.0 m pituus-leveys-suhteen ollessa välillä 4 – 15. Korkea maton nopeus aiheuttaa maton kulumista ja matala nopeus lisää maton kustannuksia. Maton nopeuden säätöön voidaan käyttää tyristorisäätöisiä ohjainyksiköitä. Maton nopeus on yleensä välillä 3 – 30 m/min. [3]

Rushtonin [3] mukaan imumaton leveyden kasvattaminen kasvattaa mattokustannuksia, jotka voivat olla 22 – 40 %:a koko suodattimen kustannuksista. Imumaton kustannukset sekä joidenkin liuottimien tuottamat ongelmat imumaton kanssa ovat johtaneet moduulityyppisen horisontaali nauhasuodattimen kehittämiseen. Imumatto korvataan tällöin ruostumattomasta teräksestä tai kumista valmistetulla kaukalolla.

4.2 Moduulityyppiset suodattimet

Moduulityyppisiä suodattimia on kolmea tyyppiä. Suodattimet eroavat toisistaan erilaisilla kaukaloratkaisuilla. Moduulityyppiset suodatinmallit ovat kiinteä suodatuskaukalo (Stationary Filter Tray), palautuva kaukalo (Reversible Tray) sekä jatkuvasti kiertävä kaukalo ja kangas (Continuous Circulation Trays and Cloth). Moduulityyppisissä suodattimissa suodatuskankaan tulee olla kestävämpää ja vankempaa kuin imumattosuodattimessa, koska rullat pyörittävät suoraan itse suodatusnauhaa. [3 ja 6]

4.2.1 Kiinteä suodatuskaukalo

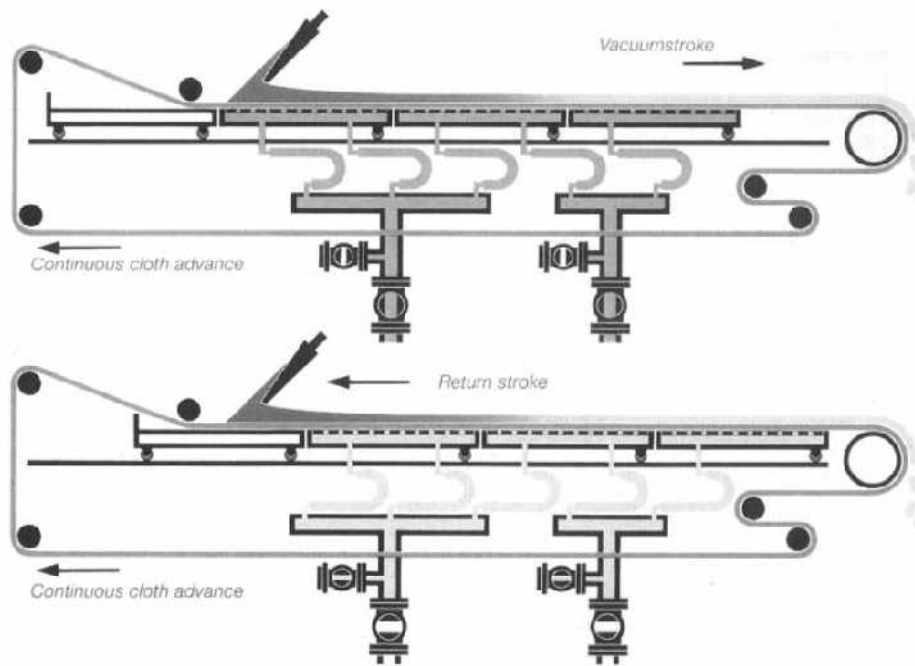
Syöttökouru liikkuu edestakaisin paikallaan olevan kankaan päällä vakuumin ollessa toiminnassa kaukalon alla. Kakun muodostuttua halutunlaiseksi vakuumi pysäytetään ja kangasta siirretään eteenpäin suodattimen loppua kohden kakun erotuskohtaan. Kankaan alla sijaitsee useita vakuumikaukaloita siten, että kakun mennessä yhden kaukalon ohi toinen kaukalo on jo kosketuksissa kakkuun esimerkiksi pesua tai kuivausta varten. Käsittelyä toistetaan niin kauan

kuin suodatus, pesu sekä kuivatus vaativat. Kaukalot ovat siis kokoajan paikallaan ja nauha liikkuu aina vakuumin ollessa pois päältä. Näin vältetään kitkan syntyminen nauhan ja vakuumilaatikon välille, joka kuluttaa nauhaa. Suodatuskakun halkeilua voidaan estää käyttämällä kumilevyjä liikkuvan kakun yläpuolella etenkin kuivausosassa. [3 ja 4]

Kakku irtoaa painovoiman vaikutuksesta nauhasuodattimen loppupäässä nauhan kääntyttyä takaisin alkua kohden. Tämän suodattimen suurimmat hyödyt ovat yksinkertainen malli sekä alhaiset kunnossapitokustannukset. Asennuskustannukset ovat myös Svarovskyn [4] mukaan noin 30 % halvemmat kuin palautuvassa kaukalossa johtuen halvemmasta rakennusmateriaalista (muovi) sekä siitä, että vankkaa perustusta ei tarvita. Huonona puolena on nopeasti suodautuvien materiaalien vaikea käsittely suuressa mittakaavassa. Pinta-alaltaan tämän kaltaiset suodattimet ovat 93 m². [4]

4.2.2 *Palautuva kaukalo*

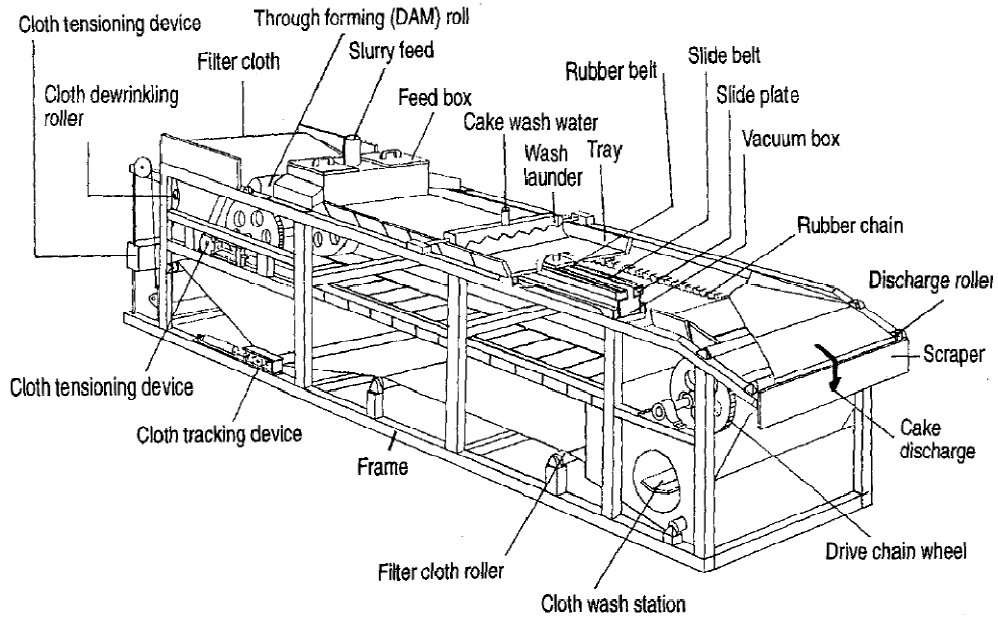
Suodatuskangas liikkuu jatkuvatoimisesti paikallaan olevan syöttöputken alla. Suodatuskaukalot liikkuvat eteenpäin kankaalla niin kauan kun vakuumi on toiminnassa ja tämän jälkeen palaavat nopeasti lähtöpaikkaansa vakuumin loputtua. Tämä ratkaisee kitkasta aiheutuvan ongelman nauhan ja imulaatikon välillä, koska vakuumin ollessa toiminnassa nauhan ja imulaatikon välillä ei ole liikettä. Vakuumi saa aikaan kankaan ja kourun kiinnittymisen toisiinsa. Ilman poisto on ajoitettu kaukalon paluuseen. Syöttökohta on tuettu kokoajan kourulla, kuten kuvasta 8 nähdään. Muita hyötyjä muihin kiintoaine-neste-erotussysteemeihin on kakun halkeilun hallittavuus minimoimalla pinta-ala määrän kakun ja pesualueen välissä. Suodattimen leveys voi olla 3 m ja pinta-ala 75 m². [3, 4 ja 6]



Kuva 8. Nauhasuodatin palautuvalla kaukalolla. [3]

4.2.3 Jatkovasti kiertävä kaukalo ja kangas

Kaukalot on suunniteltu ketjumaisiksi rakenteiksi, jotta ne olisivat mahdollisimman tiiviitä ylittäessään vakuumilaatikon. Vaihdeettavat kumitiivisteet on sovitettu kaukaloiden takanurkkiin estämään ilmavuodot kaukalosta vakuumisysteemiin. Kaukalot sijaitsee suodattimen päällä ja ne on kiinnitetty kahdella kumiketjulla, jotka sijaitsevat vakuumilaatikon molemmin puolin. Tämän suodattimen hyödyt verrattuna imumattosuodattimeen ovat alhaisemmat kustannukset etenkin suuressa mittakaavassa, lyhyempi seisokkiaika huollossa sekä alemmat asennuskustannukset. Myös muita hyötyjä on lueteltu liittyen pääasiassa jatkuvatoimisuuteen ja vakuumin yhtäjaksoisuuteen. Kuvassa 9 on esitetty nauhasuodatin jatkuvasti kiertävillä kaukaloilla ja nauhalla. [3]



Kuva 9. Nauhasuodin, jossa kaukalo ja nauha kiertävät yhtäjaksoisesti. [3]

4.3 Olosuhteiden vaikutus nauhasuodatukseen

Tarleton ja Wakeman [7] ovat käsitelleet nauhan nopeuden, alipaineen, lämpötilan sekä partikkelikoon vaikutuksia nauhasuodatuksessa. Heidän mukaansa nauhan nopeuden ollessa alhainen muodostuu paksumpi kakku ja sen pesuominaisuudet ovat paremmat verrattuna korkeaan nauhan nopeuteen. Myös ilmavirtaus kuivausvaiheessa pienenee ja näin ollen puretun kakun kosteussisältö kasvaa hieman.

Nauhan nopeuden ollessa suuri nousee samalla kiintoaineen tuotantoaste. Tällöin muodostunut kakku on tosin ohuempi ja riski kanavoitumiseen kasvaa. Suurempi kankaan nopeus kuluttaa enemmän sähköä ja sillä on haitallisia vaikutuksia suodinkankaan ikään. Alipaineen nosto lisää kiintoaineen tuotantoa. Tällöin kakun paksuus kasvaa ja ilmavirtaus kakun läpi on suurempi ja näin ollen kakun kosteus alenee. [1 ja 7]

Lämpötilan vaikutukset nauhasuodatukseen on Tarletonin ja Wakemanin [7] mukaan monimutkaisia. Lämpötila vaikuttaa aineiden fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten tiheyteen ja viskositeettiin. Lämpötilan noustessa kakun paksuus kasvaa, koska tällöin viskositeetti laskee.

Lietteen syöttölämpötilan noustessa pesutehokkuus paranee hieman, kakun kosteus nousee purkuvaiheessa ja kokonaisilmavirta kakun läpi pienenee. Pesuvien lämpötilan nosto vaikuttaa vain vedenpoistovaiheeseen. Pesulämpötilan nosto laskee kakun kosteuspitoisuutta

poistovaiheessa ja kokonaisilmavirta nousee. Pesulämpötilan vaikutukset kakun kosteuteen ja ilmavirtaan on vastakkainen kuin lietteen syöttölämpötilan nostossa. Molempien virtojen esilämmitys ei johda parempaan pesutulokseen tai vähennä kakun kosteussisältöä. Nostamalla lietteen syöttölämpötilaa nousee kiintoaineen tuotanto ja nesteen määrä kakussa sekä pesunesteen käyttö. Edellä olevat vaikutukset ovat vain suuntaa antavia ja ne riippuvat paljolti käytettävästä kiintoaineesta, nesteestä ja muista liuoksen ominaisuuksista. [1 ja 7]

Partikkelikoon kaksinkertaistuu myös kakun paksuus kaksinkertaistuu. Samoin ilman läpäisy kasvaa samassa suhteessa kuin partikkelikoko. Partikkelikoon kasvulla on kakun kosteuteen pienentävä vaikutus. [7]

4.4 Vakuumisuodatuksen etuja ja rajoituksia

Suodatuksen päämääränä on erottaa kiintoaine nesteestä mahdollisimman tehokkaasti ja taloudellisesti kuin mahdollista. Laiteratkaisujen valinta liittyykin vahvasti liuoksen suodatusominaisuuksiin ja systeemin prosessirajoituksiin. [8]

Vakuumisuodatuksessa imu toimii ajavana voimana kakun muodostuksessa ja kuivauksessa. Wakemanin ja Tarletonin [8] mukaan käytännössä vakuumi ei ole suurempi kuin 0,25 bar (0,75 bar ilmanpainetta alempana). Vakuumisuodattimia ei yleensä käytetä, jos suurin osa partikkeleista on alle 5 mikrometriä. Tämä johtuu kakun vastuksesta, joka on kääntäen verrannollinen partikkelin halkaisijan neliöön. Yleisesti on huomattu 5 mikronia olevan alin raja suodatuksen onnistumiselle. Kaava toimii tarkalleen ottaen vain tasarakenteisissa pallonmuotoisissa partikkeleissa, joita ei todellisissa prosesseissa ole, mutta kaava toimii hyvänä nyrkkisääntönä tehtäessä alkuselvittelyä suodatustyyppien kesken. Partikkelien muoto ja pedin huokoisuus sekä monet muut tekijät voivat vaikuttaa vastukseen, joten kakkupetivastuksen kaavaa voi käyttää vain pitämällä muut muuttujat vakioina.

Painesuodattimissa ajavavoima on paljon suurempi esimerkiksi syöttöpumppujen vuoksi, joten niitä käytetään yleisesti partikkeleiden ollessa alle 5 mikronia. Vakuumisuodattimien alhaisempi ajavavoima aiheuttaa alhaisemman suodatusnopeuden kuin vastaavan pinta-alan omaavalla painesuodattimella. Esimerkiksi nauhavakuumisuodattimet tarvitsevat suuren lattiapinta-alan toimiakseen teollisessa mittakaavassa, mutta niiden korkea kapasiteetti ja suhteellisen nopea käyttö puoltavat niiden käyttöä. [7 ja 8]

Liuottimien tai liettävien nesteiden läsnä ollessa vakuumin käyttö ei ole suotavaa, varsinkin jos aineilla on alhainen höyrynpaine vallitsevassa lämpötilassa. Myöskään helposti hapettavat aineet eivät ole suositeltavia vakuumisuodatukseen, koska suurin osa vakuumisuodattimista käyttää ilmavirtaa kuivaamaan suodatuskakkua. Kokoonpuristuvat partikkelit tai korkean vastuksen suodoskakat ovat myös epäsoivia vakuumisuodatukseen. [8]

Suodoksen purkautuminen painesuodattimissa on yleensä ilmanpaineessa, monesti suoraan suodoskeräilytankkiin. Vakuumisuodatuksessa suodoksesta tulee erottaa liukenematon ilma ennen suodoksen poistoa. Tämä tehdään sopivan kokoisella suodoksen keräilysäiliöllä tai vakuumisäiliöllä suodos-ilma-seoksen vapauttamiseksi. Suodos täytyy jatkuvasti tai jaksoittain purkaa suodoksen keräilysäiliöön. [3 ja 8]

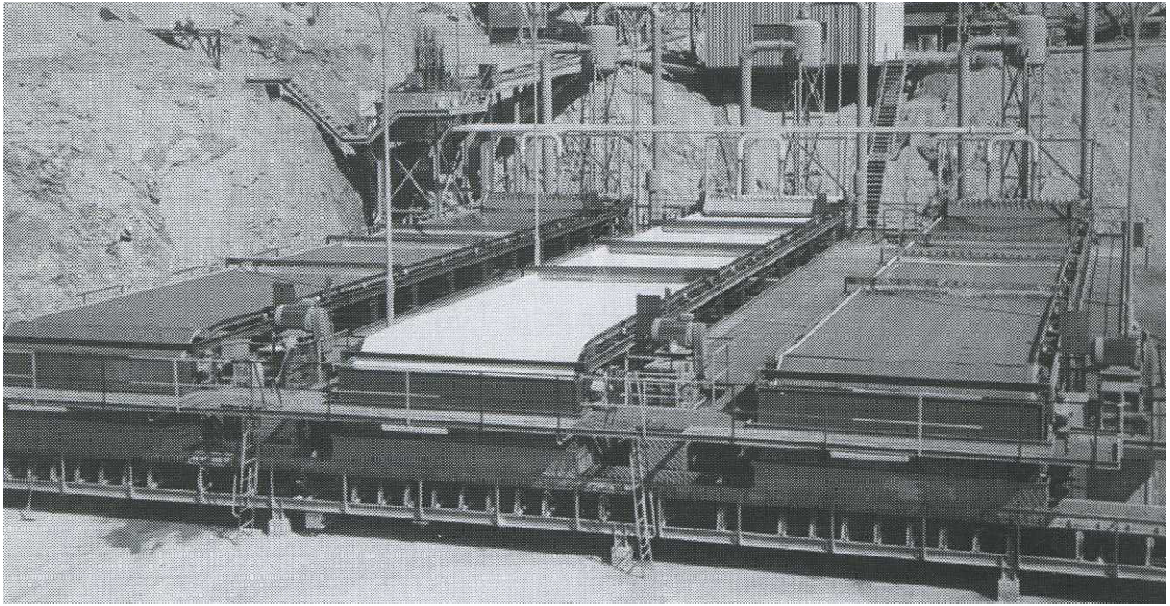
Vakuumisuodattimet ovat jatkuvatoimisia ja eivät tarvitse käyttäjää toimiessaan normaalisti. Alhainen ajavavoima kiintoaineen ja nesteen erotuksessa on hyödyksi, kun partikkelit ovat herkkiä ulkoisille voimille. Painesuodattimissa kakun irrotus on vaikeampaa kuin vakuumisuodattimissa. Vakuumisuodattimissa kakun muodostumista ja kakun irrotusta on myös helpompi valvoa. [8]

4.5 Käyttö

Paperiteollisuudessa on käytetty useita vuosia horisontaali tyyppisiä suodattimia, joten peruseriaate ei ole uusi. Suodatettava materiaali on vain hyvin huokoista ja muodostaa näin vain pienen vastuksen suodatuksessa ja kuivauksessa. Tämän takia nopeat paperikoneet tarvitsevat vain pienen paine-eron kuitujen erotukseen nesteestä. Mineraaleja suodatettaessa tarvitaan paljon suurempi paine-ero. Suurempi paine-ero johtaa suurempaan kitkaan kumikankaan ja vakuumilaatikon välillä. [3]

Tällaiset laitteet vaativat nauhan ja suodatinkankaan tarkkaa valvontaa sekä rypistymistä estävät laitteet. Uudet laitteet takaavat vain 0,5 cm sivuttaissiirron. Kankaan valintaan tulee myös kiinnittää huomiota. Väärä kankaan valinta tulee kalliiksi, jos kangas tukkeutuu helposti tai se on mekaanisesti heikkoa. Horisontaaleja nauhayksiköitä on aina 200 neliometriin asti. Nämä ovat suuren mittakaavan kaivosteollisuudessa käytettäviä laitteita, joissa väärä kangasvalinta johtaa nopeasti kankaan vaihtoon. Horisontaali nauhasuodattimia käytetään laajasti kaivos- sekä

kemianteollisuudessa. Kuvassa 10 on esitetty kolme 100 m² nauhasuodatinta, jotka erottavat kuparia lietteestä. [3 ja 7]



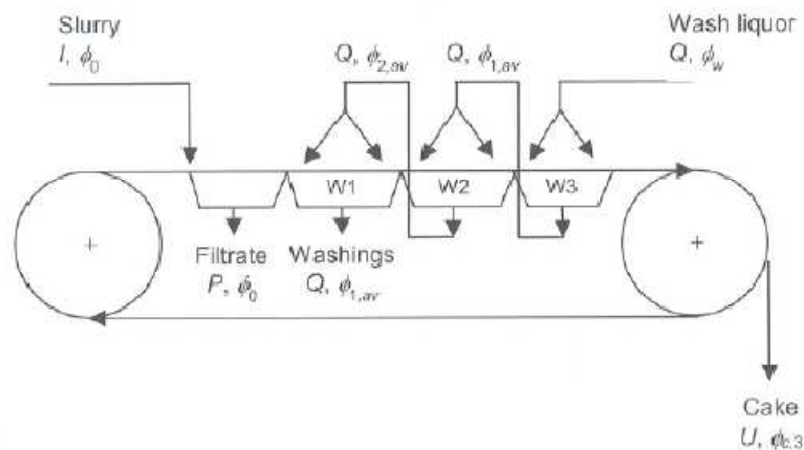
Kuva 10. Nauhasuodattimia kuparin erotuksessa Chilessä. [9]

5 Pesu

Suodatuksessa muodostuneen kakun pesu on erityisen tärkeä vaihe, kun kiintoaineen tulee olla puhdasta tai suodos halutaan saada tarkasti talteen. Pesunesteen määrä ja käyttötapa tulee tarkkaan määrittää, jotta vältetään pesemästä kakkua liikaa tai liian vähän. Suodatuslaitteiston tulee pystyä poistamaan käytetty pesunestemäärä sekä vähentämään kakun kosteutta hyväksyttävälle tasolle ennen kakun poistoa. Tämä tulee voida tehdä normaalin nesteen poiston ja kuivauksen aikana. [8]

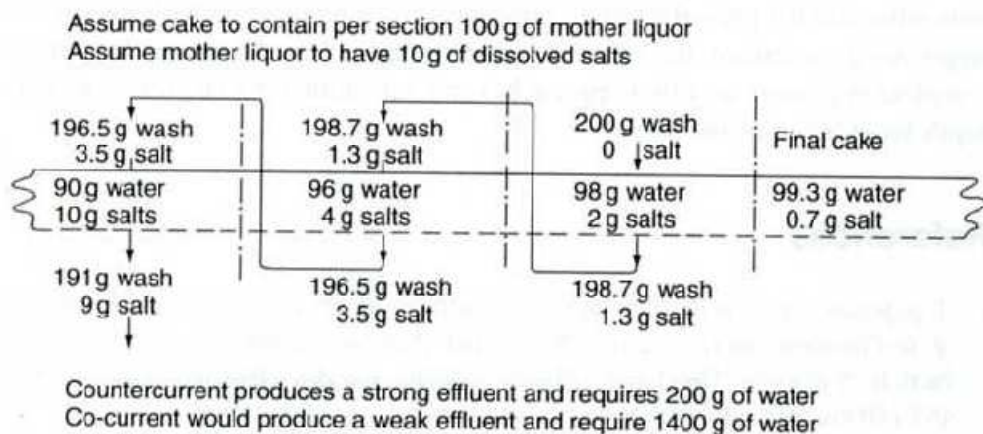
Pesussa kakun sisäinen neste korvataan puhtaalla pesunesteellä. Tällöin saadaan enemmän mahdollisesti haluttua suodosta ja kakun puhtaus paranee. Kakun halkeillessa pesuneste valuu halkeamista kakun läpi ja pesu ei ole enää tehokas ja pesunestettä kuluu hukkaan eikä kakku puhdistu kunnolla. Tämän vuoksi kakun halkeilua pyritään estämään kaikin keinoin. Nauhasuodattimissa pesu alkaa, kun kakun pinta alkaa näkyä. Kakkua ei juuri halkeilun pelossa anneta kuivua ennen pesun alkua. Nauhasuodattimissa voidaan tehdä virranmukainen, vastavirta- tai palautuspesu (reflux). [2 ja 8]

Kuvassa 11 on esitetty nauhasuodattimen vastavirtapesu. Nauha ja täten myös kakku liikkuu vasemmalta oikealle ja pesuneste vastaavasti oikealta vasemmalle. Puhtain pesuneste syötetään puhtaimman kakun pesuun ja tästä tullut suodos ohjataan vastaavasti edelliseen vaiheeseen. Likaisimmalla pesunesteellä pestään pesemätön kakku ja tästä tuleva suodos ohjataan ulos prosessista. Kakun muodostuksessa tuleva suodos kerätään kuvan mukaisesti talteen ennen pesuvaihetta. Kakun pesun jälkeen usein on myös kakun kuivausvyöhyke, jota ei kuvaan ole piirretty. [2]



Kuva 11. Nauhasuodattimen 3-vaiheinen vastavirtapesu. [2]

Kuvassa 12 on esitetty tapaus, jossa liuos sisältää liuennutta suolaa, jota nauhasuodattimen kolmevaiheisella vastavirtapesulla poistetaan. Kuvan laitteisto kykenee poistamaan alkutilanteen 10 grammasta suolaa 9,3 grammaa veden kulutuksen ollessa tällöin 200 grammaa. Vastaava virranmukainen pesu kuluttaisi vettä seitsemän kertaa enemmän pesutuloksen pysyessä samana. Palautuspesussa pesunesteen suodoksesta osa palautetaan takaisin pesunesteen joukkoon, muuten pesu noudattaa virranmukaista pesua. [4]



Kuva 12. Nauhasuodattimen vastavirtapesu. [4]

5.1 Pesutehokkuus

Tilanteissa joissa liuoksessa on suolaa, voidaan pesutehokkuutta mitata vertaamalla kakun jäännössuolapitoisuutta alkuperäiseen liuoksen suolapitoisuuteen. Tämä voidaan tehdä liuottamalla muodostunut kakku uudelleen ja mittaamalla siitä johtokyky ja tätä verrataan alkuperäisen liuoksen johtokykyyn. [8]

Tehokas pesu ei ole vain tietyn pesunestemäärän käyttämistä tietyn puhtauden saavuttamiseksi. Tehokkaassa pesussa saavutetaan haluttu puhtausaste suhteellisen pienellä pesunestemäärällä mahdollisimman lyhyessä ajassa. Tulee huomata, että saavutettu pesutehokkuus on usein suurempi laboratorio- ja koetehdasmittakaavan kokeissa kuin varsinaisessa tehdasmittakaavan suodattimessa. [8]

Pesutehokkuus on jäännösliuoksen eli epäpuhtauden määrä kakussa pesun jälkeen verrattuna pesemättömään kakkuun. Pesutehokkuus määritellään seuraavasti

$$\eta_w = \frac{c_2 - c_w}{c_1 - c_w} \cdot 100 \quad (14)$$

jossa	η_w	pesutehokkuus, -
	c_1	epäpuhtauden pitoisuus pesemättömässä kakussa, kg/m^3
	c_2	epäpuhtauden pitoisuus pestyssä kakussa, kg/m^3
	c_w	epäpuhtauden pitoisuus pesunesteessä, kg/m^3

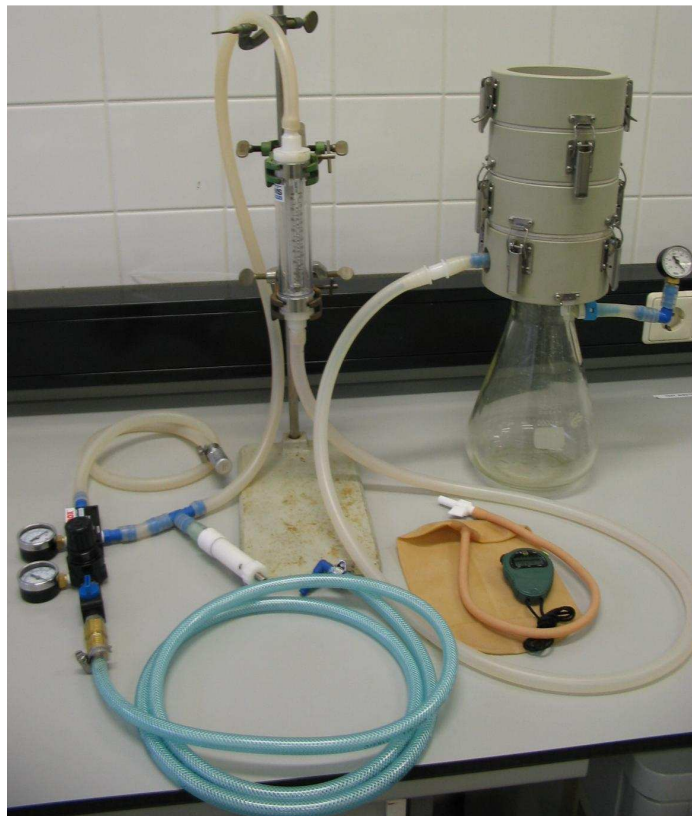
Kokeellinen osa

6 Työn tarkoitus

Työssä tutkittiin syöttöliuoksen tilavuuden, pesunestemäärän, kuivausajan ja liuoksen kiintoainepitoisuuden vaikutusta nauhavakuumisodatuksessa saadun kakun kosteuspitoisuuteen ja kapasiteettiin. Kakusta ja suodoksesta mitattiin myös johtokyky pesutehokkuuden selvittämiseksi. Saatujen mittaustulosten perusteella mitoitettiin teollisen mittakaavan vakuuminauhasuodatin.

7 Koelaitteisto ja mittausten suoritus

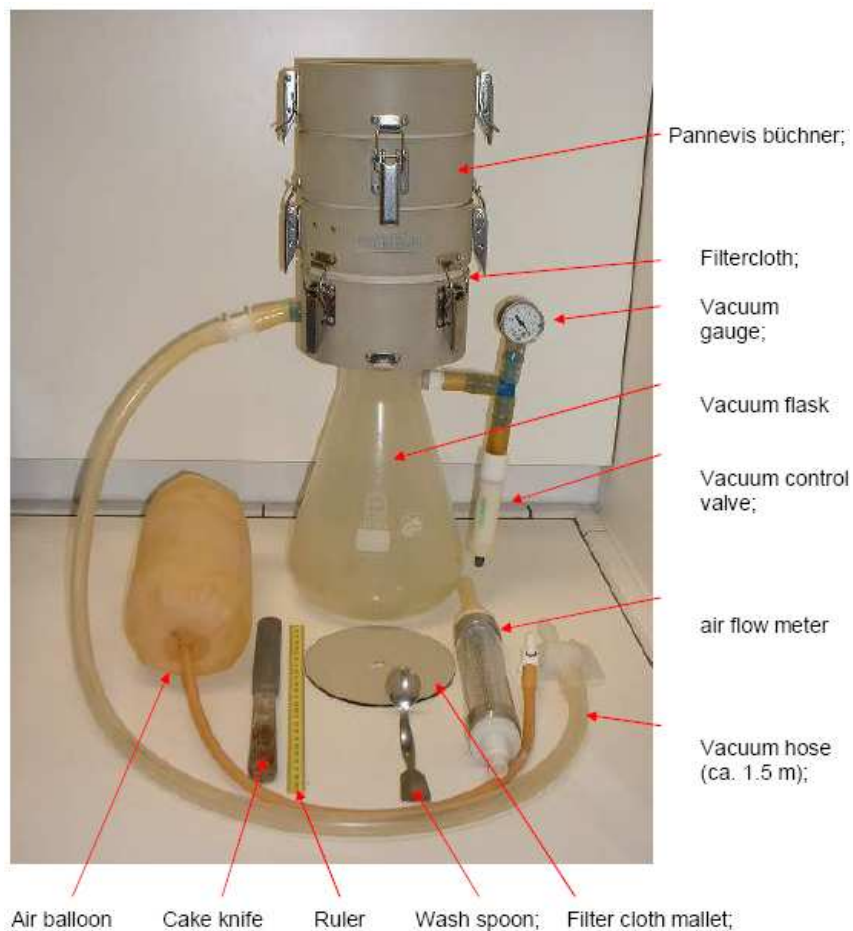
Kokeet suoritettiin Larox Büchner-koevälineistöllä. Laitteisto on suunniteltu horisontaali vakuuminauhasuodattimien mitoitukseen. Kuvassa 13 on esitetty koelaitteisto mittausvalmiudessa.



Kuva 13. Büchner-testilaitteisto. [10]

Kuvassa 14 on esitetty Büchner-koelaitteiston osat. Kahden litran imupullon päällä on büchner-renkaat, joiden sisähalkaisija on 11,2 cm. Alimmaisrenkaan päällä on suodatinkangas. Toinen renkas on lietteen kaatoa varten ja tämän päällä olevat renkaat tuovat tarvittaessa lisätilavuutta lietteen kaatoon. Alimmaisessa renkaassa on liitos vakuumiletkulle alipaineen muodostamiseksi. Lietteestä tuleva suodos valuu imupulloon. Pullossa olevasta painemittarista voi tarkkailla alipaineen suuruutta. Ilmanvirtausmittarista näkyy kakun läpi virtaava ilmamäärä. Käytännössä mittauksissa ilmavirtaus on nolla, sillä kakun ollessa nesteen alla ilma ei pääse virtaamaan kakun läpi. Mittari on kuitenkin hyvä olla liitettynä laitteistoon, sillä se ilmaisee jos laitteistossa on ilmapuotoa.

Kuvassa 14 pöydällä olevan suodinkangasmuotin avulla leikattiin suodinkankaat sopivan kokoisiksi laitteistoon. Imupullon vasemmalla puolella olevaa ilmapalloa ei käytetty mittauksissa, mutta se on tarkoitettu tiivistämään kakun pinta ilman virratessa sen läpi esimerkiksi halkeilun seurauksesta.



Kuva 16. Büchner-koelaitteiston osat. [11]

7.1 Mittausten suoritus

Ennen mittauksia tehtiin koesuunnitelma, jonka perusteella mittaukset suoritettiin. Koesuunnitelma esitetään seuraavassa luvussa. Mittauksissa käytettyä vehnätärkkelyslietettä sekoitettiin ämpärissä sekoittimen pyöriessä taukoamatta. Mittauksissa käytetyt materiaalit esitetään tarkemmin kappaleessa 9. Kuvassa 15 on lietteen sekoituslaitteisto. Lietettä sekoitettiin aina yön yli ennen mittausten aloittamista.



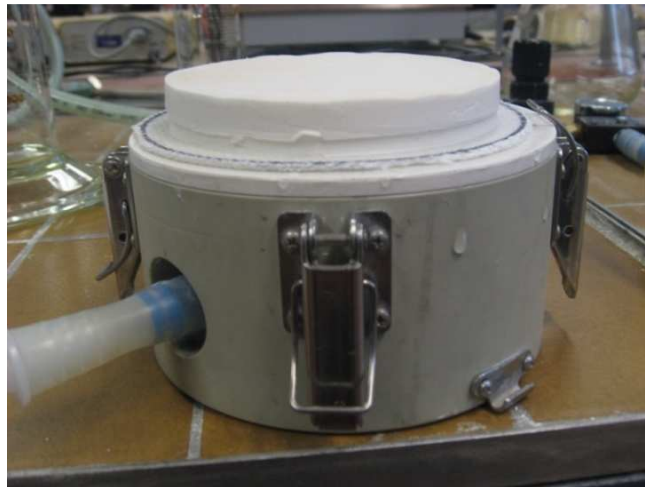
Kuva 15. Lietteen sekoituslaitteisto.

Lietettä imettiin ämpäristä mittauksia varten alipaineletkun avulla. Lietteen tilavuus määritettiin mittalasilla, jonka jälkeen liete kaadettiin mahdollisimman nopeasti büchner-laitteistoon suodatuskankaan päälle, jotta kiintoaine ei laskeutuisi mittalasin pohjalle. Lietteen kaatamisen jälkeen kytkettiin vakuumi päälle. Alipaine pyrittiin pitämään mahdollisimman tarkasti tasaisena tarkkailemalla kuvassa 16 näkyvää oikeanpuoleista mittaria.



Kuva 16. Büchner-laitteiston alipainemittaristo.

Lietettä suodatettiin niin kauan kunnes kakun pinta tuli kokonaisuudessa näkyviin. Tämän jälkeen vakuumi kytkettiin pois päältä ja otettiin suodatusaika ylös. Tärkeää on huomioida, että kakkua ei tule kuivattaa tässä vaiheessa, joten vakuumin kytkemisessä päältä pois tulee olla tarkkana. Imupulloon kertynyt suodoksen määrä mitattiin ja tyhjä imupullo laitettiin takaisin paikoilleen. Tämän jälkeen kakun päälle kaadettiin pesuneste varovasti rikkomatta kakun pintaa. Pesunestelisäyksen jälkeen vakuumi kytkettiin uudelleen päälle. Pesuaika otettiin myös ylös samalla periaatteella kuin suodatusaika. Pesunesteen loppuessa ja kakun pinnan kuivuessa alkaa kuivausaika. Pesty ja kuivattu kakku on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Büchner-suodatuslaitteistolla pesty ja kuivattu kakku.

Pestyn ja kuivatun kakun paksuus mitattiin sekä siitä otettiin näytteet uunikuivatusta ja johtokykymittausta varten. Kakku paloitteltiin kuvan 18 mukaisesti. Keskimmäiset palat laitettiin uuniin kuivumaan kosteuspitoisuusmittausta varten ja nurkkapalat johtokykymittauspurkkiin. Nurkkapalojen massa mitattiin ja johtokykypurkkiin laitettiin yhdeksän kertaa kakun palasten massan verran ionivaihdettua vettä.



Kuva 18. Kakun paloittelu johtokyky- ja kosteuspitoisuusmittauksia varten.

Suodatuksissa käytettiin Tamfeltin S2102-L1K3 kangasta. Mittauksissa käytettiin useita samanlaisia kankaita, jotta kankaat varmasti ehtivät puhdistua ennen seuraavaa mittausta. Kankaita pestiin harjalla heti suodatuksen jälkeen ja laitettiin likoamaan veteen seuraavaan suodatukseen asti.

8 Koesuunnitelmat

Lämpötila ja paine-ero eli vakuumi olivat vakioita koko mittauksen ajan. Lämpötilana oli huoneenlämpötila noin 20 °C ja paine-erona käytettiin 0,5 barin alipainetta. Muuttujina käytettiin lietteen tilavuutta, pesusuhdetta eli pesunesteen määrää, kuivausaikaa ja lietteen kiintoainepitoisuutta. Kaikille muuttujille määritettiin kolme arvoa, joista kaikista tehtiin kokeet keskenään.

Lietteen tilavuuksina käytettiin 100, 200 ja 300 ml. Pesusuhteena käytettiin 2, 5 ja 10. Kuivausaikana oli 0, 30 ja 60 sekuntia sekä lietteen kiintoainepitoisuutena 35, 40 ja 45 massaprosenttia. Kaikkiaan kokeita muodostui näin 81 kappaletta. Näiden lisäksi tehtiin 14 uusintamittausta ja 18 mittausta ilman pesua.

Kiintoaineena käytettiin vehnätärkkelystä ja nesteenä vettä. Veden ja tärkkelyksen sekaan laitettiin suolaa 3,33 %:a kiintoaineen määrästä. Suolan avulla mitattiin kakun jäännössuolapitoisuutta johtokyvyn kautta ja näin saatiin käsitys pesun onnistumisesta.

Koesuunnitelma tulee tehdä siten, että kaikki halutut mittaukset suoritetaan satunnaisessa järjestyksessä, jotta olosuhteiden takia syntyneet virheet eivät painottuisi liikaa samaan kohtaan. Käytännön syistä koesuunnitelma tehtiin siten, että jokaiselle kiintoainepitoisuudelle tulevat kokeet tehtiin aina peräkkäin satunnaisessa järjestyksessä. Tällöin samalla lietteellä pystyttiin tekemään perättäin useita kokeita eikä lietettä mennyt hukkaan. Taulukoissa I - IV on esitetty mittauksissa käytetyt koesuunnitelmat. Taulukossa I on esitetty koesuunnitelma 40 massaprosenttiselle lietteelle. Uusinta mittauksissa toistettiin 40 massaprosenttisen lietteen koesuunnitelman 14 ensimmäistä koetta.

Taulukko I Koesuunnitelma 40 m-%:lle lietteelle.

Lietteen kiintoainepitoisuus 40 m-%			
Näytteen nro	Kuivausaika [s]	Lietteen tilavuus [ml]	Pesusuhde [-]
1	0	200	2
2	60	200	5
3	30	200	10
4	60	200	10
5	60	100	2
6	60	100	5
7	30	100	2
8	30	300	10
9	0	200	10
10	30	300	5
11	60	300	2
12	60	100	10
13	60	200	2
14	30	300	2
15	0	100	10
16	30	100	5
17	60	300	10
18	0	100	2
19	0	200	5
20	0	300	5
21	0	300	10
22	30	100	10
23	30	200	2
24	60	300	5
25	30	200	5
26	0	100	5
27	0	300	2

Taulukossa II on esitetty koesuunnitelma 45 massaprosenttiselle lietteelle.

Taulukko II Koesuunnitelma 45 m-%:lle lietteelle.

Lietteen kiintoainepitoisuus 45 m-%			
Näytteen nro	Kuivausaika [s]	Lietteen tilavuus [ml]	Pesusuhde [-]
28	0	100	2
29	30	200	5
30	60	300	5
31	60	200	5
32	0	200	5
33	60	100	10
34	60	100	2
35	60	200	10
36	0	300	2
37	0	300	5
38	30	200	10
39	30	100	10
40	60	200	2
41	30	300	10
42	0	100	5
43	60	100	5
44	0	300	10
45	30	100	2
46	0	200	10
47	30	300	5
48	60	300	10
49	30	100	5
50	60	300	2
51	0	100	10
52	30	200	2
53	0	200	2
54	30	300	2

Taulukossa III on esitetty koesuunnitelma 35 massaprosenttiselle lietteelle.

Taulukko III Koesuunnitelma 35 m-%:lle lietteelle.

Lietteen kiintoainepitoisuus 35 m-%			
Näytteen nro	Kuivausaika [s]	Lietteen tilavuus [ml]	Pesusuhde [-]
55	60	200	10
56	30	300	2
57	60	100	10
58	0	300	10
59	60	200	5
60	60	300	10
61	30	300	10
62	30	100	2
63	0	200	10
64	0	300	5
65	0	100	10
66	0	100	5
67	0	300	2
68	0	200	2
69	60	100	2
70	30	100	5
71	30	200	5
72	60	200	2
73	60	100	5
74	30	200	10
75	60	300	2
76	30	200	2
77	30	100	10
78	60	300	5
79	0	200	5
80	30	300	5
81	0	100	2

Taulukossa IV on esitetty koesuunnitelma pesemättömille kakuille. Pesemättömien kakkujen mittaustuloksia voidaan käyttää vertailupohjana pestyille kakuille.

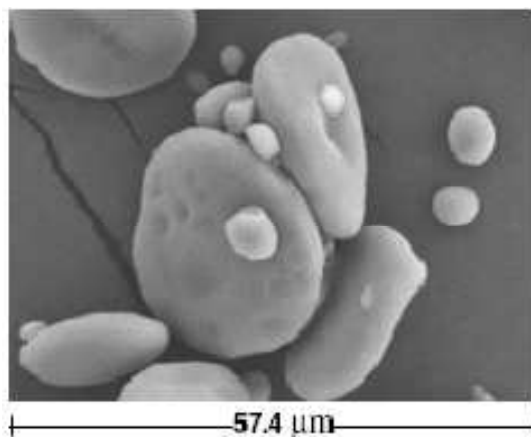
Taulukko IV Koesuunnitelma pesemättömille kakuille.

Ilman pesua			
Näytteen nro	Kuivausaika [s]	Lietteen tilavuus [ml]	Kiintoainepitoisuus [m-%]
K1	0	300	40
K2	60	100	40
K3	60	300	40
K4	0	100	40
K5	60	200	40
K6	0	200	40
K7	0	200	45
K8	60	200	45
K9	60	100	45
K10	60	300	45
K11	0	100	45
K12	0	300	45
K13	60	100	35
K14	60	200	35
K15	0	200	35
K16	60	300	35
K17	0	300	35
K18	0	100	35

9 Materiaalit

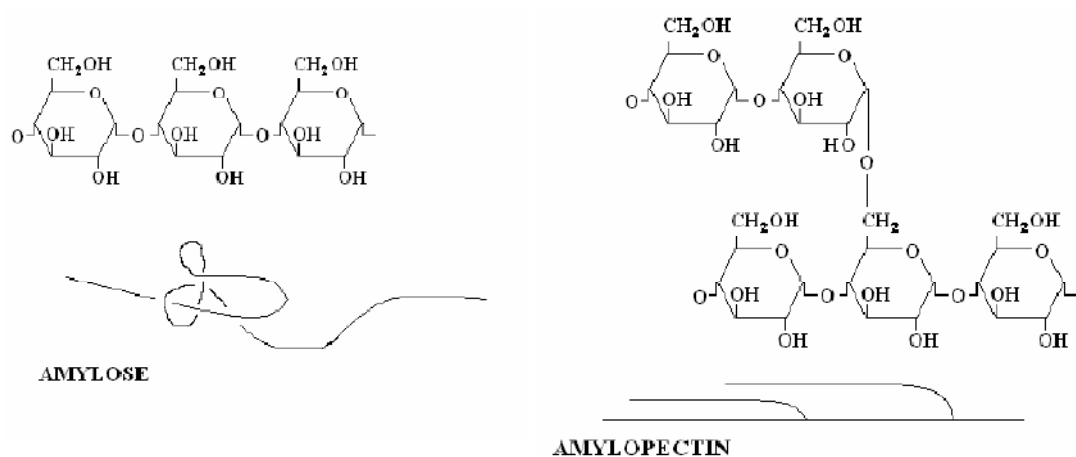
Mittauksissa käytetty liete koostui vedestä, vehnätärkkelyksestä sekä merisuolasta (NaCl). Käytetyn veden johtokyky oli 106 μS ja lämpötila noin 20 °C. Vehnätärkkelys oli muokkaamatonta (native) kuivaa valkoista jauhetta, jonka kemiallinen kaava on $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$. Jauhemaisen vehnätärkkelyksen tiheys on 1498 kg/m^3 sekä keskimääräinen partikkelikoko Salmelan [12] mittauksien mukaan 17 - 18 μm . Tulee huomata, että Salmelan [12] mittauksissa käyttämä vehnätärkkelys oli eri erää kuin tässä työssä käytetty vehnätärkkelys. Kuvassa 19 on esitetty elektronimikroskoopilla otettu kuva vehnätärkkelyspartikkeleista. Vehnätärkkelyksen partikkelikokojakauma on laaja, sillä se sisältää suuren määrän erittäin hienojakoista tärkkelystä.

[12]



Kuva 19. Elektronimikroskooppikuva vehnätärkkelyspartikkeleista. [12]

Tärkkelys koostuu pääasiassa kahdesta erilaisesti polysakkaridiketjusta; amyloosista ja amylopektiinistä. Amyloosi on suoraketjuinen polysakkaridi ja sen moolimassa on 10^6 kg/kmol. Amylopektiini on puolestaan haaroittunut polysakkaridi ja sen moolimassa on 10^7 - 10^9 kg/kmol. Amyloosi ja amylopektiini tuottavat 98 -99 %:a tärkkelyksen kuivamassasta. Vehnätärkkelys sisältää tyypillisesti 26 prosenttia amyloosia. Kuvassa 20 on esitetty amyloosin ja amylopektiinin rakennekaavat. [12]



Kuva 20. Tärkkelyksen pääkomponenttien amyloosin ja amylopektiinin rakennekaavat. [12]

Koelietteet valmistettiin mittaamalla ensin tarvittava vesimäärä sekoitusastiaan, jonka jälkeen tärkkelystä lisättiin veden sekaan hiljalleen sekoituksen ollessa päällä. Lietteiden kiintoainepitoisuudet olivat 35, 40 ja 45 massaprosenttia. Tärkkelys paakkuuntuu erittäin helposti, joten sen lisäämisessä veden joukkoon ei tule pitää kiirettä. Tämän huomaa varsin selkeästi 45 m-%:n lietteessä, joka on hyvin sakeaa.

Vehnätärkkelyksen ja veden sekoituttua lisättiin lietteeseen 3,3 massaprosenttia suolaa kiintoaineen määrästä. Suola liukenee varsin nopeasti lietteen sekaan. Lietteen annettiin

sekoittua aina vähintään 12 tuntia ennen mittausten aloittamista. Sekoittimen kierrosnopeus säädettiin kullekin lietteelle aina siten, että liete sekoittui tehokkaasti roiskumatta kuitenkaan astiasta ympäristöön.

Suodatuksessa käytettiin Tamfeltin S2102-L1K3 kangasta. Kuvassa 21 on esitetty puhdas suodatuskangas vasemmalla ja suodatuksen jälkeinen kangas oikealla.



Kuva 21. Tamfeltin S2102-L1K3 suodinkankaita. Vasemmalla käyttämätön ja oikealla suodatuksen jälkeinen kangas.

10 Mittaustulokset

Mittauksissa saadut tulokset kosteuspitoisuudelle, kapasiteetille ja skaalatulle pesutulokselle eri muuttujien arvoilla on esitetty taulukoissa V – VIII. Taulukossa V on esitetty mittaustulokset lietteen kiintoainepitoisuuden ollessa 35 massaprosenttia.

Taulukko V Büchner-testilaitteistolla suoritettujen mittausten tulokset kiintoainepitoisuuden ollessa 35 massaprosenttia.

Lietteen kiintoainepitoisuus 35 m-%						
Näyte nro	Kuivausaika [s]	Lietteen tilavuus [ml]	Pesusuhde [-]	Kosteus [%]	Kapasiteetti [kg/m ² h]	Skaalattu pesutulos [-]
55	60	200	10	58,7	9,8	0,013
56	30	300	2	58,6	27,4	0,024
57	60	100	10	57,5	17,4	0,024
58	0	300	10	58,9	6,6	0,007
59	60	200	5	58,7	18,0	0,019
60	60	300	10	59,6	5,8	0,011
61	30	300	10	62,6	5,5	0,007
62	30	100	2	57,6	70,8	0,032
63	0	200	10	57,0	10,8	0,013
64	0	300	5	58,4	13,0	0,023
65	0	100	10	56,9	22,7	0,024
66	0	100	5	56,7	41,2	0,025
67	0	300	2	58,4	26,4	0,024
68	0	200	2	58,9	44,8	0,033
69	60	100	2	57,5	57,0	0,032
70	30	100	5	57,5	36,7	0,030
71	30	200	5	58,4	20,4	0,022
72	60	200	2	57,3	35,4	0,049
73	60	100	5	56,5	26,6	0,040
74	30	200	10	58,5	10,4	0,015
75	60	300	2	57,7	26,6	0,040
76	30	200	2	57,4	36,4	0,037
77	30	100	10	56,5	17,8	0,030
78	60	300	5	58,5	13,1	0,014
79	0	200	5	58,2	17,7	0,026
80	30	300	5	57,2	13,2	0,021
81	0	100	2	56,3	70,5	0,046

Taulukossa VI on esitetty mittaustulokset lietteen kiintoainepitoisuuden ollessa 40 massaprosenttia. Tuloksia tarkastellessa tulee huomioida, että mittauksissa käytetyt pesusuhteet eivät olleet mittausvirheen vuoksi 2, 5 ja 10, vaan 1,9; 4,6 ja 9,3.

Taulukko VI Mittaustulokset lietteen kiintoainepitoisuuden ollessa 40 massaprosenttia.

Lietteen kiintoainepitoisuus 40 m-%						
Näyte nro	Kuivausaika [s]	Lietteen tilavuus [ml]	Pesusuhde [-]	Kosteus [%]	Kapasiteetti [kg/m ² h]	Skaalattu pesutulos [-]
1	0	200	2	56,9	39,1	0,0368
2	60	200	5	57,9	15,4	0,0206
3	30	200	10	57,5	7,2	0,0066
4	60	200	10	57,7	5,6	0,0085
5	60	100	2	57,2	47,2	0,0221
6	60	100	5	56,7	23,7	0,0220
7	30	100	2	56,5	53,4	0,0199
8	30	300	10	60,0	5,6	0,0053
9	0	200	10	57,0	8,7	0,0129
10	30	300	5	57,9	11,6	0,0117
11	60	300	2	58,2	25,1	0,0255
12	60	100	10	57,0	13,7	0,0170
13	60	200	2	58,0	33,5	0,0499
14	30	300	2	58,2	24,2	0,0268
15	0	100	10	56,5	14,7	0,0205
16	30	100	5	57,2	27,7	0,0209
17	60	300	10	57,9	6,5	0,0064
18	0	100	2	55,9	82,0	0,0332
19	0	200	5	58,2	19,1	0,0166
20	0	300	5	60,9	12,4	0,0143
21	0	300	10	60,7	6,2	0,0077
22	30	100	10	57,7	17,4	0,0175
23	30	200	2	58,3	37,2	0,0261
24	60	300	5	58,3	11,7	0,0106
25	30	200	5	58,4	17,4	0,0206
26	0	100	5	57,1	34,0	0,0243
27	0	300	2	62,5	25,8	0,0169

Taulukossa VII on esitetty mittaustulokset lietteen kiintoainepitoisuuden ollessa 45 massaprosenttia.

Taulukko VII Mittaustulokset lietteen kiintoainepitoisuuden ollessa 45 massaprosenttia.

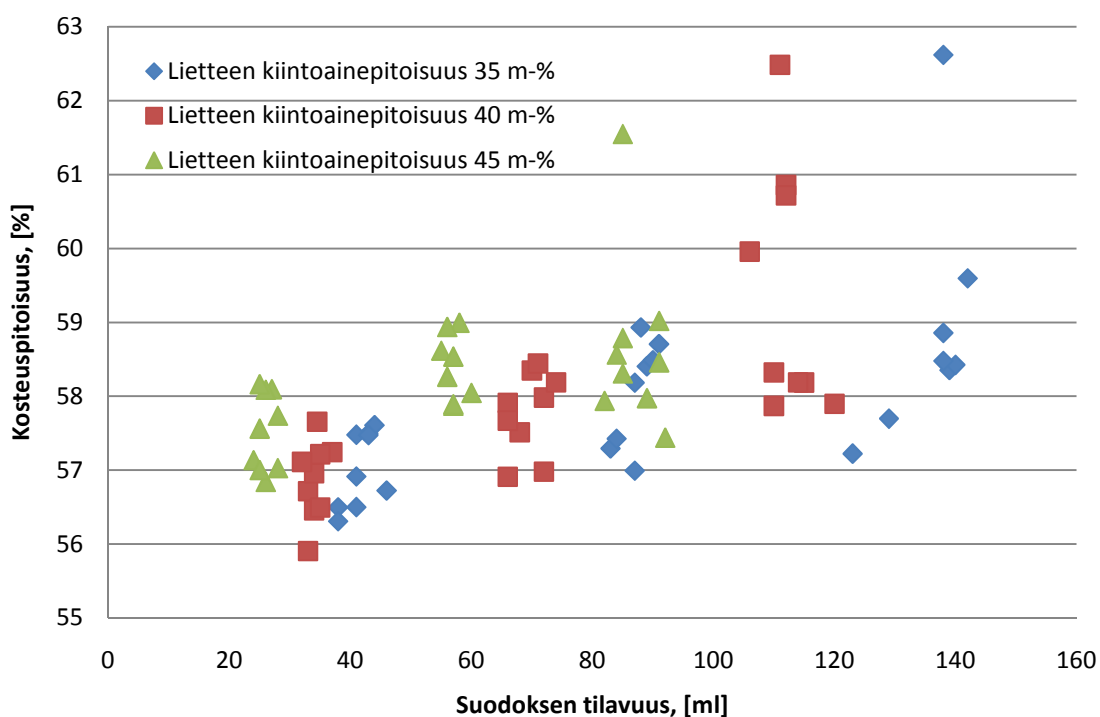
Lietteen kiintoainepitoisuus 45 m-%						
Näyte nro	Kuivausaika [s]	Lietteen tilavuus [ml]	Pesusuhde [-]	Kosteus [%]	Kapasiteetti [kg/m ² h]	Skaalattu pesutulos [-]
28	0	100	2	57,0	69,7	0,0196
29	30	200	5	58,0	15,0	0,0094
30	60	300	5	59,0	10,1	0,0067
31	60	200	5	58,6	14,3	0,0102
32	0	200	5	59,0	14,3	0,0094
33	60	100	10	58,1	13,7	0,0106
34	60	100	2	57,7	56,8	0,0225
35	60	200	10	57,9	8,0	0,0115
36	0	300	2	57,4	23,8	0,0170
37	0	300	5	58,0	9,8	0,0136
38	30	200	10	57,9	7,3	0,0108
39	30	100	10	57,6	14,4	0,0187
40	60	200	2	58,5	14,9	0,0136
41	30	300	10	58,8	5,5	0,0084
42	0	100	5	57,1	33,0	0,0175
43	60	100	5	58,1	26,2	0,0177
44	0	300	10	61,6	5,2	0,0039
45	30	100	2	58,2	63,4	0,0225
46	0	200	10	67,4	7,5	0,0052
47	30	300	5	57,9	11,0	0,0098
48	60	300	10	58,5	5,4	0,0051
49	30	100	5	56,8	31,5	0,0182
50	60	300	2	58,3	24,2	0,0193
51	0	100	10	57,0	15,9	0,0116
52	30	200	2	58,3	34,2	0,0184
53	0	200	2	58,9	36,3	0,0245
54	30	300	2	58,6	23,2	0,0135

Taulukossa VIII on esitetty mittaustulokset uusinta mittauksista 40 massaprosenttiselle lietteelle pesusuhteiden ollessa 2, 5 ja 10.

Taulukko VIII Uusinta mittauksissa saadut mittaustulokset 40 massaprosenttiselle lietteelle.

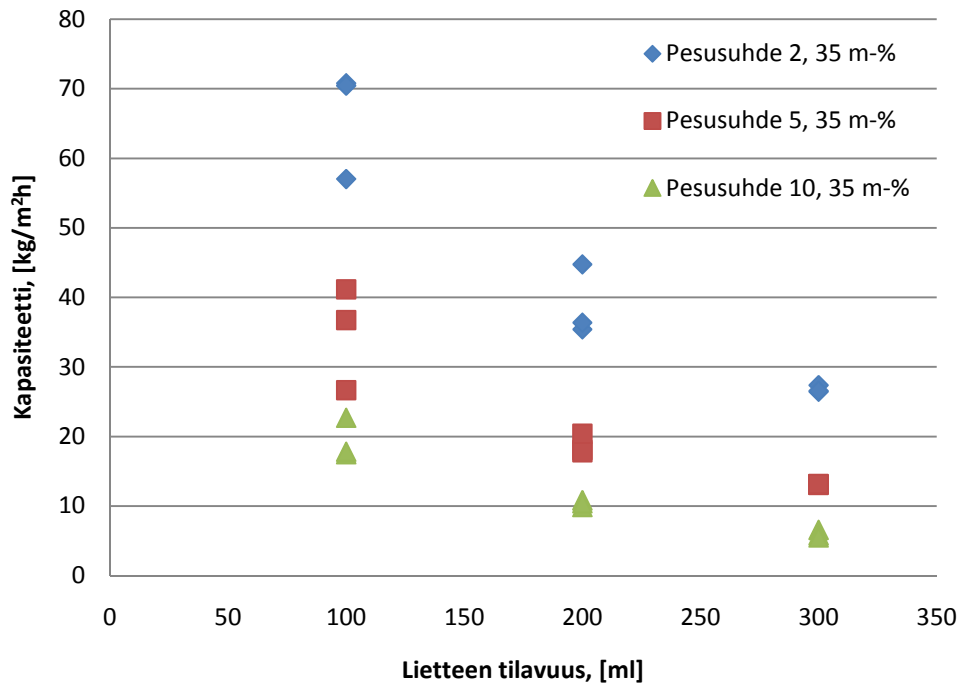
Uusintamittaukset, lietteen kiintoainepitoisuus 40 m-%						
Näyte nro	Kuivausaika [s]	Lietteen tilavuus [ml]	Pesusuhte [-]	Kosteus [%]	Kapasiteetti [kg/m ² h]	Skaalattu pesutulos [-]
1u	0	200	2	56,9	40,2	0,0325
2u	60	200	5	57,4	17,6	0,0227
3u	30	200	10	57,2	9,2	0,0117
4u	60	200	10	57,6	9,0	0,0136
5u	60	100	2	57,1	61,2	0,0325
6u	60	100	5	56,9	31,7	0,0268
7u	30	100	2	56,2	66,7	0,0393
8u	30	300	10	57,3	5,9	0,0084
9u	0	200	10	57,0	8,9	0,0112
10u	30	300	5	57,5	11,8	0,0151
11u	60	300	2	57,8	35,5	0,0332
12u	60	100	10	56,7	17,6	0,0253
13u	60	200	2	57,7	36,6	0,0374
14u	30	300	2	57,5	25,8	0,0278

Kuvassa 22 on esitetty kakkujen kosteuspitoisuuden muutos eri suodoksien tilavuuksilla. Kuvan tarkoitus on havainnollistaa lietteiden tilavuuksien vaihtelun vaikutuksia kakun kosteuspitoisuuteen, mutta kosteuspitoisuutta ei ole tietoisesti piirretty lietteen tilavuuden funktiona, koska tällöin mittauspisteet menisivät kuvassa tiiviisti päällekkäin eikä kuvasta saisi näin ollen selvää.



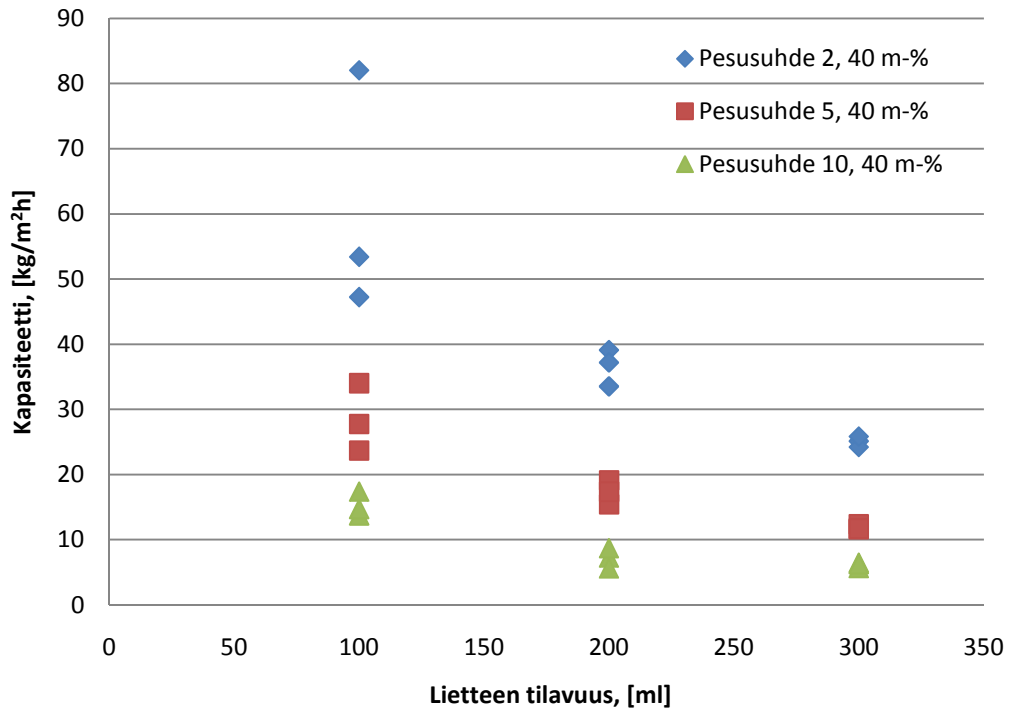
Kuva 22. Büchner-testilaitteistolla suodatettujen vehnätärkkelyskakkujen kosteuspitoisuudet lietteiden tilavuuksien ollessa 100, 200 ja 300 ml.

Kuvasta 22 nähdään, että lietteiden tilavuuksilla ja kiintoainepitoisuuksilla on vaikutusta kakun kosteuspitoisuuteen. Lietteen kiintoainepitoisuuden noustessa nousee myös kosteuspitoisuus. Kakun ollessa paksumpi sen kuivuminen vie pidempään kuin ohkaisemman kakun. Kosteuspitoisuudet vaihtelevat pääsääntöisesti 56 – 59 prosentin välillä, joten vaihtelut ovat pieniä, mutta havaittavissa. 300 ml lietteillä kosteuspitoisuuksien hajonta on huomattavan suurta, varsinkin 35 ja 40 massaprosenttisilla lietteillä. Kuvissa 23 - 26 on esitetty kapasiteetti lietteen tilavuuden funktiona. Kuvassa 23 on esitetty kapasiteetit eri lietteen tilavuuksille kiintoainepitoisuuden ollessa 35 massaprosenttia.



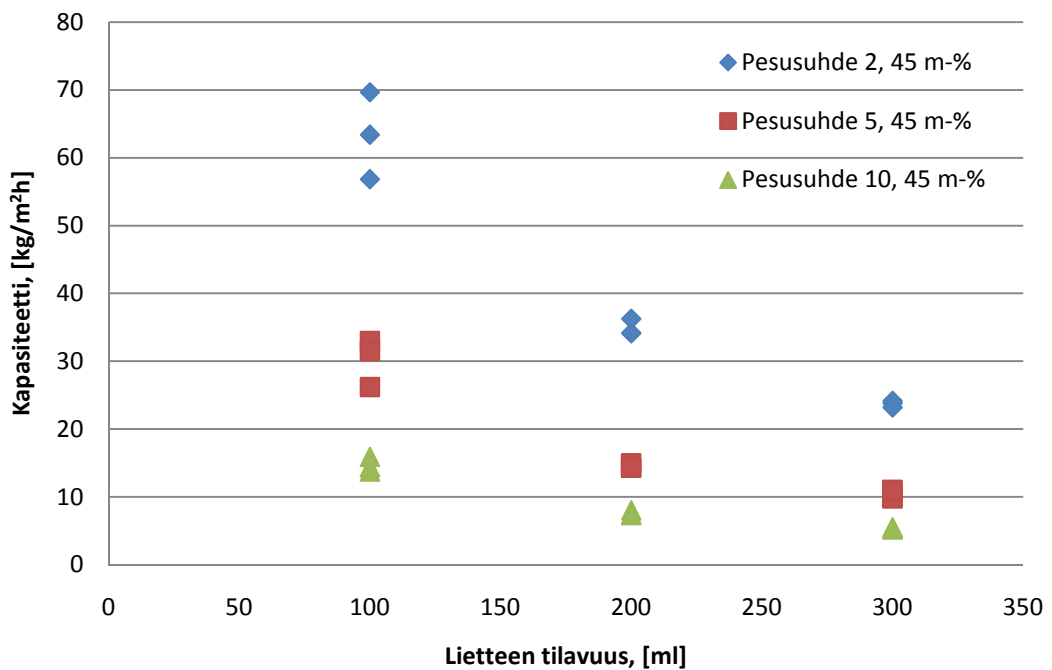
Kuva 23. Büchner-koelaitteistolla saadut kapasiteetit lietteiden tilavuuksien ollessa 100, 200 ja 300 ml sekä kiintoainepitoisuuden 35 m-%:a.

Kuvassa 24 on esitetty 40 massaprosenttisen lietteen kapasiteetit lietteen tilavuuden funktiona.



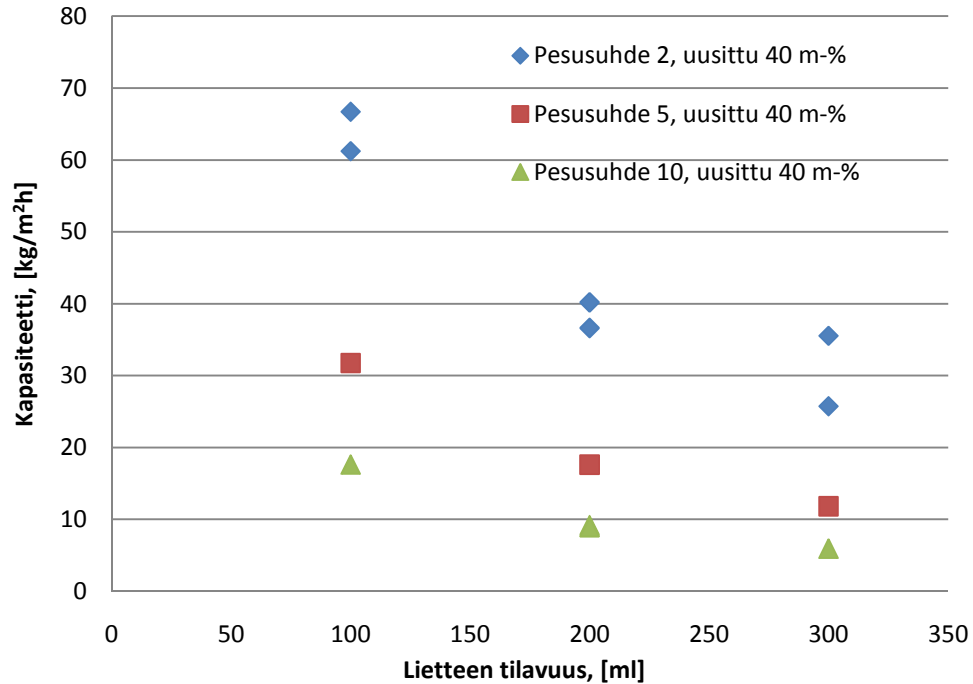
Kuva 24. Büchner-koelaitteistolla saadut kapasiteetit lietteiden tilavuuksien ollessa 100, 200 ja 300 ml sekä kiintoainepitoisuuden 40 m-%:a.

Kuvassa 25 on esitetty 45 massaprosenttisen lietteen kapasiteetit lietteen tilavuuksien vaihdellessa.



Kuva 25. Büchner-testilaitteistolla saadut kapasiteetit lietteiden tilavuuksien ollessa 100, 200 ja 300 ml sekä kiintoainepitoisuuden 45 m-%:a

Kuvassa 26 on esitetty kapasiteetit lietteen tilavuuden funktiona uusintamitatulle 40 massaprosenttiselle lietteelle.

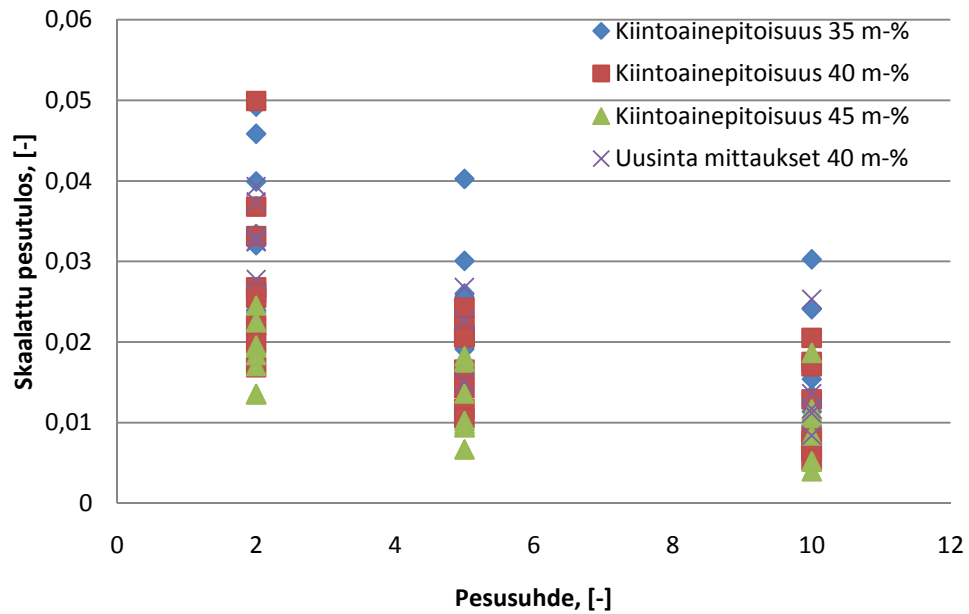


Kuva 26. Uusintamitatulle 40 m-%:lle lietteelle saadut kapasiteetit lietteiden tilavuuksien ollessa 100, 200 ja 300 ml.

Kuvista 23 - 26 nähdään, että pesusuhteiden ja lietteen tilavuuden kasvaessa laskee suodattimen kapasiteetti voimakkaasti. Myös lietteen kiintoainepitoisuuden noustessa suodattimen kapasiteetti laskee. Kiintoainepitoisuuden vaikutus kapasiteettiin ei ole yhtä merkittävä kuin pesuveden määrällä ja lietteen tilavuudella.

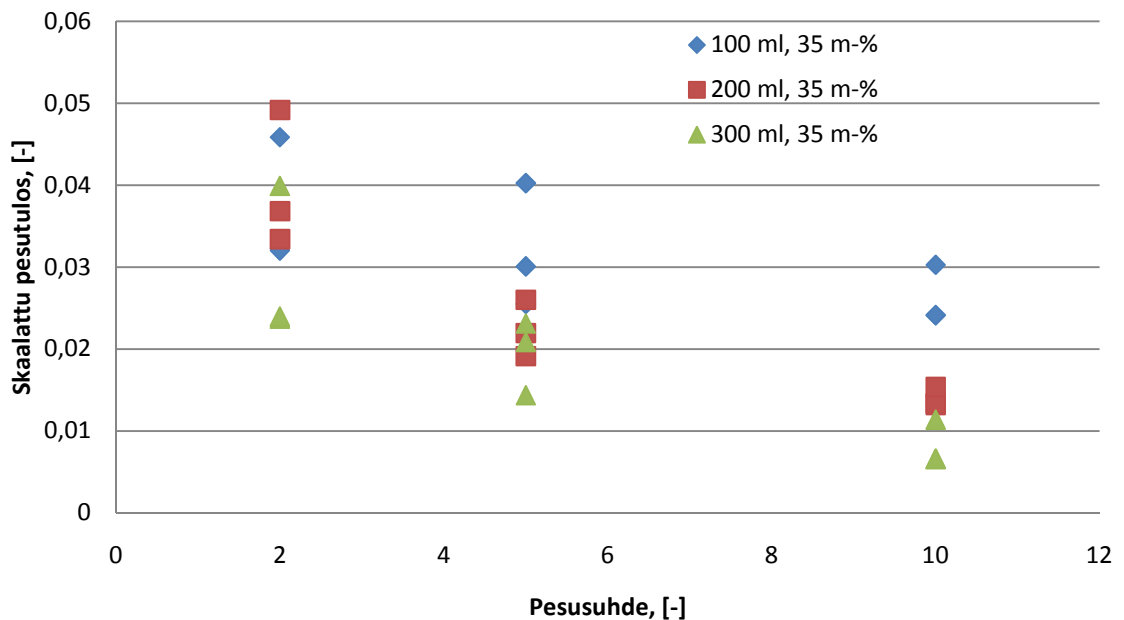
Kiintoainepitoisuuden ollessa 45 massaprosenttia ja lietteen tilavuuden laskiessa 300 ml:sta 100 ml:n nousee kapasiteetti 23:sta reiluun 60 kg/m²h:ssa pesusuhteen ollessa 2. Kiintoainepitoisuuden sekä lietteen tilavuuden noustessa muodostuu suodatuksessa paksumpi kakku ja näin ollen kakun vastus kasvaa, joka hidastaa suodatusta ja laskee kapasiteettia. Lietteen tilavuuden nousulla on suurempi vaikutus kakun paksuuteen, joten se vaikuttaa enemmän kapasiteettiin.

Kuvassa 27 on esitetty skaalatut pesutulokset pesusuhteiden muuttuessa eri kiintoainepitoisuuksille.



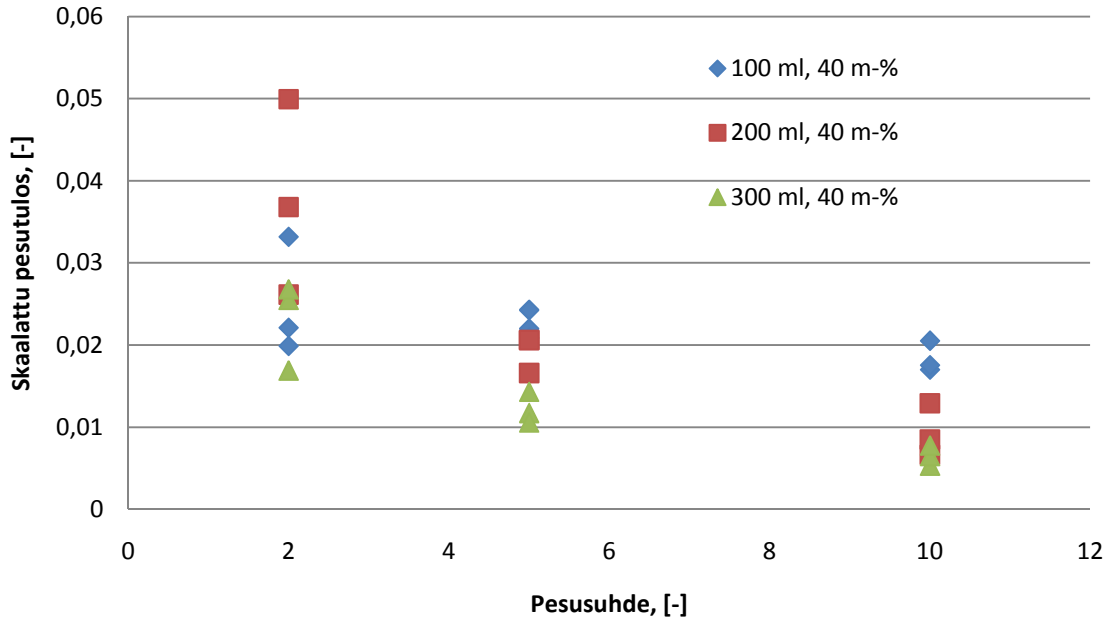
Kuva 27. Johtokykymittauksista saadut skaalatut pesutulokset pesusuhteiden vaihdellessa.

Kuvissa 28 – 31 on esitetty skaalattu pesutulos pesusuhteen funktiona kiintoainepitoisuuksien ja lietteen tilavuuksien vaihdellessa. Kuvassa 28 on esitetty tapaus, jossa lietteen kiintoainepitoisuus on 35 massaprosenttia.



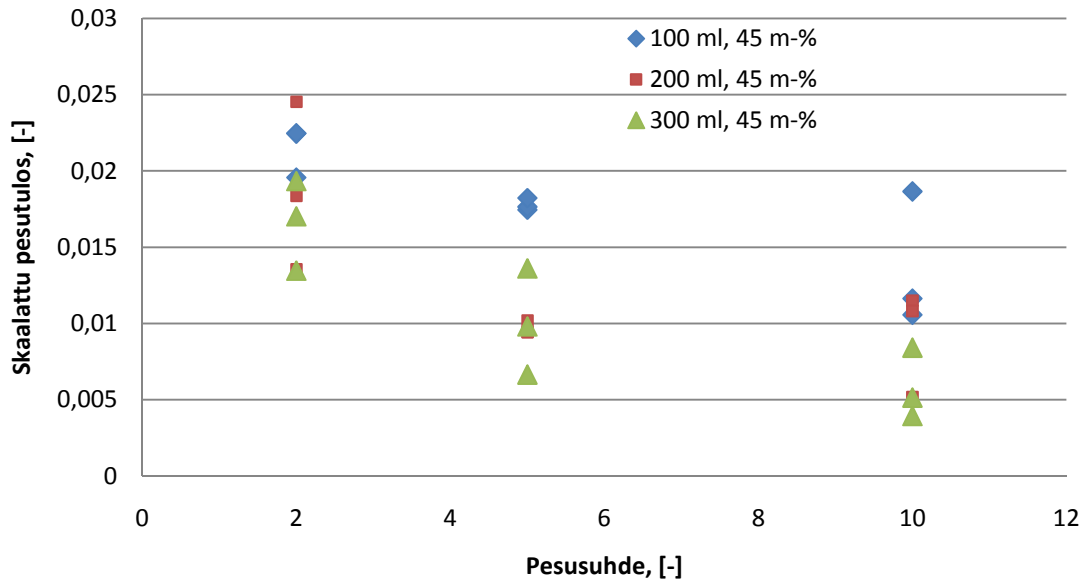
Kuva 28. Vehnätärkkelyslietteen skaalatut pesutulokset kiintoainepitoisuuden ollessa 35 massaprosenttia.

Kuvassa 29 on esitetty skaalattu pesutulos kiintoainepitoisuuden ollessa 40 massaprosenttia.



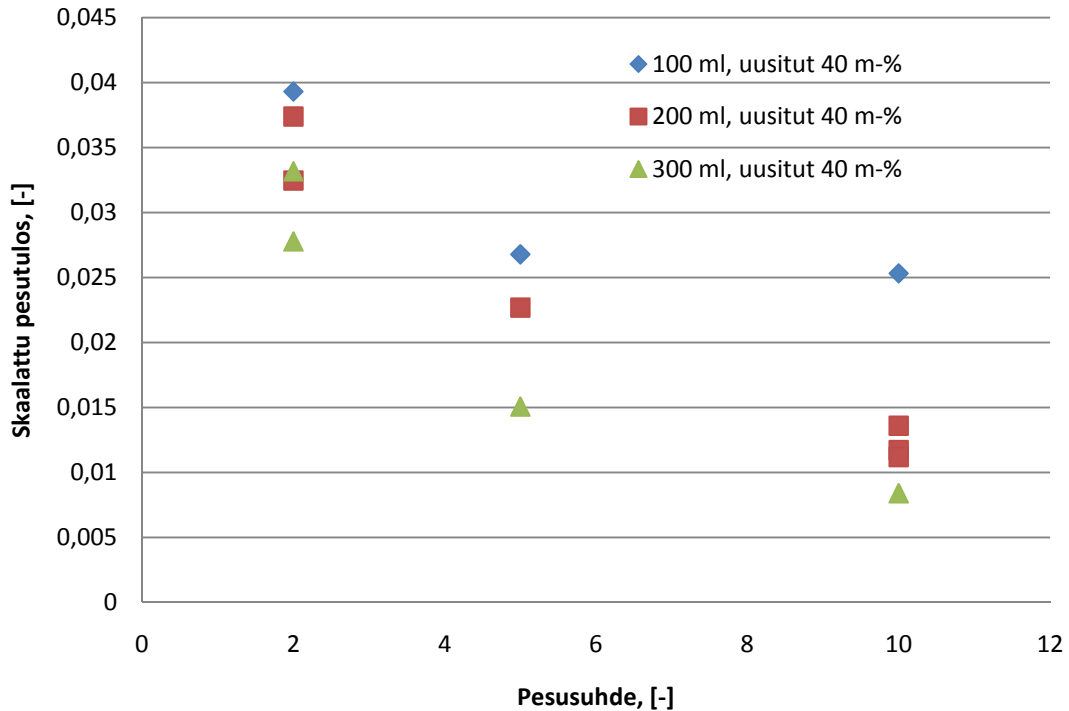
Kuva 29. Vehnätärkkelyslietteen skaalatut pesutulokset kiintoainepitoisuuden ollessa 40 massaprosenttia.

Kuvassa 30 on esitetty skaalattu pesutulos kiintoainepitoisuuden ollessa 45 massaprosenttia.



Kuva 30. Vehnätärkkelys lietteen skaalatut pesutulokset kiintoainepitoisuuden ollessa 45 massaprosenttia.

Kuvassa 31 on esitetty skaalattu pesutulos uusintamitatulle 40 massaprosenttiselle lietteelle.



Kuva 31. Vehnätrökkelylietteen skaalatut pesutulokset uusintamitatuille 40 massaprosenttisille näytteille.

Kuvat 27 - 31 kuvaavat kakkujen peseytymistä. Kakut peseytyivät hyvin, sillä huonoiten peseytynyt kakku (35 m-%, 100ml ja pesusuhte 2) sisälsi 5 %:a lisätystä suolasta ja parhaiten peseytynyt kakku (45 m-%, 300 ml ja pesusuhte 10) sisälsi 0,5 %:a suolaa. Kakut peseytyivät sitä paremmin, mitä suurempi kiintoainepitoisuus ja lietteen tilavuus oli. Tietenkin pesusuhteella on suurin merkitys pesutulokseen, sillä pesusuhteen nousu lisää eniten pesuveden määrää.

40 m-%:n lietteen pesutuloksia pitää tarkastella kriittisesti, sillä pesusuhteet eivät olleet mittausrvirheen vuoksi 2, 5 ja 10, vaan 1,9; 4,6 ja 9,3. Uusintamitatuuissa 40 massaprosentin lietteillä pesusuhteet olivat 2, 5 ja 10. Alkuperäisten ja uusintamitatattujen 40 m-%:sten lietteiden välillä ei ole selkeää eroa pesutuloksissa. Alkuperäisissä mittauksissa pesutulokset ovat jopa pienempiä kuin uusinta mittauksissa, vaikka uusinta mittauksissa pesunestemäärät ovat hivenen suurempia.

Tarvittavat lietemäärät mitattiin mittalasilta käsin. Tällöin lietteen tilavuudet saattoivat vaihdella 100 ml:lla 5 ml suuntaansa ja 200 ja 300 ml:lla 10 ml suuntaansa. Lietettä sekoitettiin ämpärissä aina vähintään 12 tuntia ennen mittauksen aloittamista. Tehtäessä useita mittauksia samasta lietteestä kerkesi liete sakeutua. Liete oli ajoittain jopa 10 g/l sakeampaa mittauksen lopettamishetkellä kuin aloittamishetkellä. Nämä aiheuttavat tuloksiin mittausrvirheitä, jotka näkyvät varsinkin kosteuspitoisuusmittauksissa mittaustulosten vaihteluina.

11 Nauhasuodattimen mitoitus

Horisontaali vakuuminauhasuodatin mitoitettiin mittaustulosten perusteella Wakemanin ja Tarletonin [1] esittämien yhtälöiden avulla. Mitoitusolosuhteiksi valittiin 35 massaprosenttinen liete, kakun paksuudeksi 5 cm, kuivausajaksi 30 sekuntia sekä pesusuhteiksi 2 ja 5. Kyseisten olosuhteiden lisäksi suodattimen leveydeksi päätettiin 4 metriä ja nauhan nopeudeksi 0,1 m/s. Kaikki mitoitusparametrit ja -laskut ovat liitteessä I.

Mitoituksen tarkoituksena oli tutkia pesusuhteen noston vaikutusta suodattimen pituuteen ja kapasiteettiin. Taulukossa VIII on esitetty mitoitettun nauhasuodattimen pituus sekä kapasiteetti pesusuhteilla 2 ja 5 sekä suoraan mittaustuloksista saatu kapasiteetti vastaavissa olosuhteissa.

Taulukko VIII Mitoitettu nauhavakuumisuodatin.

Pesusuhde	Suodattimen pituus	Suodattimen pinta-ala	Kapasiteetti [kg/m ² h]	
			Mitoitettu	Mittaustuloksista
[-]	[m]	[m ²]		
2	19	77	70	71
5	32	129	42	37

Taulukosta VIII havaitaan, että pesusuhteen nosto lisää huomattavasti suodattimen pituutta sekä laskee kapasiteettia. Tämä on ilmeistä, sillä suurempi pesunestemäärä vaatii pidemmän pesuajan ja tämä vaikuttaa suoraan suodattimen pituuteen ja kapasiteettiin. Wakemanin ja Tarletonin [1] esittämien yhtälöiden avulla mitoitettut kapasiteetit ovat suhteellisen lähellä mittaustuloksista laskettuja arvoja, joten yhtälöiden voidaan todeta toimivan varsin hyvin kyseisissä olosuhteissa.

12 Yhteenveto ja johtopäätökset

Teoriaosassa perehdyttiin kiintoaine-neste suodatuksen mekanismeihin ja lakeihin sekä tutkittiin tarkemmin horisontaali nauhavakuumsuodattimien toimintaa sekä erilaisia laiteratkaisuja. Suodatinväliaineita käytiin pääpiirteittäin läpi ja keskityttiin tarkemmin kangaisiin, jotka ovat yleisimpiä suodatinväliaineita.

Työssä tutkittiin syöttöliuoksen tilavuuden, pesunestemäärän, kuivausajan ja liuoksen kiintoainepitoisuuden vaikutusta horisontaali nauhavakuumsuodatuksessa saadun kakun kosteuspitoisuuteen ja kapasiteettiin. Kakusta ja suodoksesta mitattiin myös johtokyky pesutehokkuuden selvittämiseksi. Saatujen mittaustulosten perusteella mitoitettiin teollisen mittakaavan vakuuminauhasuodatin. Kokeet suoritettiin Larox Büchner-koevälineistöllä, joka on suunniteltu erityisesti mallintamaan horisontaali nauhavakuumsuodattimen toimintaa. Suodatuksessa käytettiin Tamfeltin S2102-L1K3 kangasta.

Lämpötila ja paine-ero eli vakuumi olivat vakioita koko mittauksen ajan. Lämpötilana oli huoneenlämpötila noin 20 °C ja paine-erona käytettiin 0,5 barin alipainetta. Muuttujina käytettiin lietteen tilavuutta, pesusuhdetta eli pesunesteen määrää, kuivausaikaa ja lietteen kiintoainepitoisuutta. Kaikille muuttujille määritettiin kolme arvoa, joista kaikista tehtiin kokeet keskenään.

Lietteen tilavuuksina käytettiin 100, 200 ja 300 ml. Pesusuhteena käytettiin 2, 5 ja 10. Kuivausaikana oli 0, 30 ja 60 sekuntia sekä lietteen kiintoainepitoisuutena 35, 40 ja 45 massaprosenttia. Kaikkiaan kokeita muodostui näin 81 kappaletta. Näiden lisäksi tehtiin 14 uusintamittausta ja 18 mittausta ilman pesua.

Mittauksissa käytettiin kiintoaineena vehnätärkkelystä ja nesteinä vettä. Veden ja tärkkelyksen sekaan laitettiin suolaa 3,33 %:a kiintoaineen määrästä. Suolan avulla mitattiin kakun jäännössuolapitoisuutta johtokyvyn kautta ja näin saatiin käsitys pesun onnistumisesta.

Mittaustuloksista voidaan havaita, että lietteiden tilavuuksilla ja kiintoainepitoisuuksilla on vaikutusta kakun kosteuspitoisuuteen ja suodattimen kapasiteettiin. Lietteen kiintoainepitoisuuden ja tilavuuden noustessa muodostuu paksumpi kakku. Kakun ollessa paksumpi sen kuivuminen vie pidempään kuin ohkaisemman kakun ja kakun kosteuspitoisuus nousee. Mitä paksumpi kakku on, sitä suurempi on myös kakun vastus, joka hidastaa suodatusta

ja laskee kapasiteettia. Lietteen tilavuuden nousulla on suurempi vaikutus kakun paksuuteen, joten se vaikuttaa enemmän myös kapasiteettiin ja kosteuspitoisuuteen.

Pesusuhde vaikuttaa myös kapasiteettiin. Pesusuhteiden kasvaessa laskee suodattimen kapasiteetti voimakkaasti. Kiintoainepitoisuuden vaikutus kapasiteettiin ei ole yhtä merkittävä kuin pesuveden määrällä ja lietteen tilavuudella.

Kakut peseytyivät erittäin hyvin, sillä huonoiten peseytynyt kakku (35 m-% ,100ml ja pesusuhde 2) sisälsi 5 %:a lisätystä suolasta ja parhaiten peseytynyt kakku (45 m-%, 300 ml ja pesusuhde 10) sisälsi 0,5 %:a suolaa. Kakut peseytyivät sitä paremmin, mitä suurempi kiintoainepitoisuus ja lietteen tilavuus oli. Tietenkin pesusuhteella on suurin merkitys pesutulokseen, sillä pesusuhteen nousu lisää eniten pesuveden määrää.

Nauhasuodattimen mitoitus suoritettiin Wakemanin ja Tarletonin [1] esittämien yhtälöiden avulla. Nauhasuodattimen pituudeksi pesusuhteella kaksi saatiin 19 m, kun leveydeksi päätettiin 4 m. Pesusuhteen noustessa viiteen suodattimen pituus kasvoi 32 metriin. Suodattimen kapasiteetti määritettiin yhtälöistä laskemalla ja tätä arvoa verrattiin suoraan mittaustuloksiin. Kapasiteetin mitoitettut ja mitatut arvot ovat lähellä toisiaan, joten voidaan todeta yhtälöiden korreloivan hyvin kyseistä tapausta.

Yleisesti voidaan todeta, että nauhasuodatuksen optimaaliset toimintaparametrit ovat tapauskohtaisia ja riippuvat suuresti suodatettavan aineen ominaisuuksista, halutusta kakun puhtausasteesta ja itse suodattimen ominaisuuksista. Suodatettavan materiaalin muodostaessa huokoisen kakun on itse suodatus ja pesu nopeaa ja tämä nostaa suodattimen kapasiteettia. Haluttaessa muodostuneesta kakusta puhdasta tulee se pestä suurella määrällä pesunestettä ja tämä tietenkin laskee kapasiteettia. Suodattimen valinta lienee kuitenkin tärkein vaihe suodatusprosessia suunniteltaessa. Toimintaolosuhteita muuttamalla voidaan tehdä toimivaan prosessiin hienosäätöä kulloistenkin tarpeiden mukaan.

Lähteet

1. Wakeman, R.J., Tarleton, E.S, *Filtration: equipment selection, modelling and process simulation*, first edition, Elsevier Advanced Technology, Great Britain, 1999, p. 1-17, 412 – 422
2. Wakeman, R.J., Tarleton, E.S, *Solid/Liquid Separation: Principles of Industrial Filtration*, 1. edition, Elsevier Advanced Technology, Great Britain, 2005, p 1-28, 222 – 228, 236
3. Rushton, A., Ward, A.S, Holdich, R.G, *Solid-Liquid Filtration and Separation Technology*, 2. edition, WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany, 2000, p. 2 – 6, 38, 47 – 50, 467 - 472
4. Svarovsky, L., *Solid-Liquid Separation*, fourth edition, Butterworth-Heinemann, Great Britain, 2000, p. 303 – 305, 309, 416 – 418, 427, 523
5. Sutherland, K., *Filtration+Separation*, Energy efficiency: Filter media and energy efficiency January/February 2009, Volume **46**, Number 1, p. 16-19
6. Purchas D., *Solid/Liquid Separation Technology*, 1. edition, Uplands Press Ltd, Great Britain, 1981, p. 296 – 301
7. Tarleton, E.S, Wakeman, R.J, *Solid/Liquid Separation: Equipment Selection and Process Design*, 1. edition, Elsevier Ltd, 2007, Oxford, Great Britain, p. 49, 330 – 331, 372 – 382
8. Wakeman, R.J., Tarleton, E.S, *Solid/Liquid Separation: Scale-up of Industrial Equipment*, 1. edition, Elsevier Advanced Technology, Oxford, Great Britain, 2005, p. 239-241, 291-293
9. Dickenson C., *Filters and Filtration Handbook*, 4. Ed., Elsevier Advanced Technology, Oxford, U.K, 1997, p. 280

10. *Operational manual : Bench Test Unit For Vacuum Belt Filter*, Larox, October 2004, p. 4
11. *Instruction manual for büchner tests*, October 2006, p. 5, 6
12. Salmela, N., *Washing and Dewatering of Differential Starches in Pressure Filters*, Thesis for the degree of Doctor of Science, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2006, p. 24 – 41, 105, 107, 110

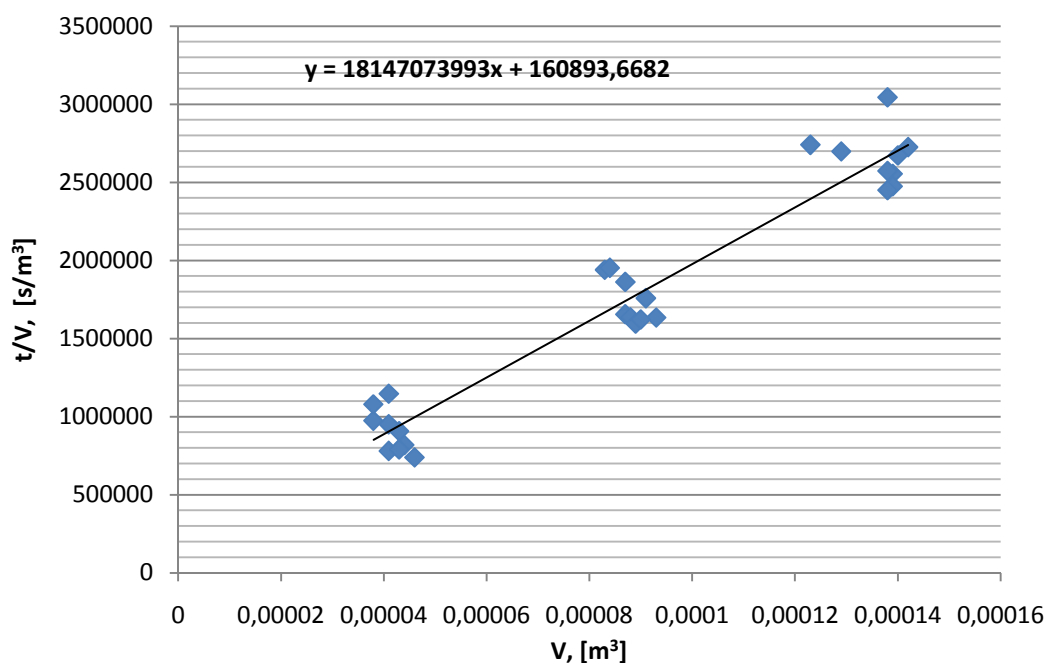
NAUHASUODATTIMEN MITOITUKSEN ESIMERKKILASKUT

Nauhasuodattimen mitoitus suoritettiin Wakemanin ja Tarletonin [1] esittämien yhtälöiden avulla. Hakasuluissa olevat yhtälönumerot viittaavat Wakemanin ja Tarletonin käyttämiin yhtälönumeroihin. Näin yhtälöiden etsiminen on helppoa tarvittaessa. Esimerkkilaskut ovat pesusuhteen ollessa 2. Taulukossa X on esitetty nauhasuodattimen mitoituksessa käytetyt parametrien arvot.

Taulukko X Mitoituksessa käytetyt parametrien arvot.

Suure	Yksikkö	Mitoitusarvo
μ	Pa s	0,001
A	m ²	0,009852
Δp	Pa	50000
c	kg/m ³	538,5
v_B	m/s	0,001
L	m	0,005
ρ_s	kg/m ³	1500
ϵ	-	0,5

Keskimääräinen kakun ominaisvastus α ja kankaan vastus R on määritetty kappaleessa 2.5 Vakiopainesuodatus esitetyn tavan mukaan. Kuvassa 32 on esitetty kuvaaja, josta R ja α ratkaistaan yhtälöiden (10) ja (11) avulla.



Kuva 32. Kankaan vastuksen ja keskimääräisen kakun ominaisvastuksen määrittämiseen käytettävä kuvaaja kiintoainepitoisuuden ollessa 35 massaprosenttia.

Keskimääräinen kakun ominaisvastus ratkaistuna yhtälöstä (10)

$$\alpha = \frac{\text{kulmakerroin } 2A^2\Delta p}{\mu c} = \frac{1,81 \cdot 10^{10} \text{ s} / \text{m}^6 \cdot 2 \cdot (0,009852 \text{ m}^2)^2 \cdot 50000 \text{ Pa}}{0,001 \text{ Pa s} \cdot 538,5 \text{ kg} / \text{m}^3} = 3,27 \cdot 10^{11} \text{ m} / \text{kg}$$

Kankaan vastus ratkaistuna yhtälöstä (11)

$$R = \frac{\text{y-akselin leikkauskohta } A\Delta p}{\mu} = \frac{160894 \text{ s} / \text{m}^3 \cdot 0,009852 \text{ m}^2 \cdot 50000 \text{ Pa}}{0,001 \text{ Pa s}} = 7,93 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{m}}$$

Suodatusaika [11.26]

$$\begin{aligned} t_f &= \frac{\mu L \rho_s (1-\varepsilon)}{2c\Delta p} (\alpha L \rho_s (1-\varepsilon) + 2R) \\ &= \frac{0,001 \text{ Pa s} \cdot 0,005 \text{ m} \cdot 1500 \text{ kg} / \text{l} \cdot (1-0,5)}{2 \cdot 538,5 \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot 50000 \text{ Pa}} \cdot \left(3,27 \cdot 10^{11} \cdot 0,005 \text{ m} \cdot 1500 \text{ kg} / \text{l} \cdot \right. \\ &\quad \left. 1-0,5 + 2 \cdot 7,93 \cdot 10^{10} = 96,5 \text{ s} \right) \end{aligned}$$

Suodatusosan nauhanpituus [11.28]

$$z_f = t_f v_B = 96,5 \text{ s} \cdot 0,1 \text{ m} / \text{s} = 9,65 \text{ m}$$

Pesunesteen nopeus huokosessa [11.14]

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{\varepsilon} \frac{\Delta p_w}{\mu (\alpha \rho_s L (1-\varepsilon) + R)} \\ &= \frac{1}{0,5} \frac{50000 \text{ Pa}}{0,001 \text{ Pa s} (3,27 \cdot 10^{11} \cdot 1500 \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot 0,005 \text{ m} (1-0,5) + 7,93 \cdot 10^{10})} \\ &= 7,66 \cdot 10^{-5} \text{ m} / \text{s} \end{aligned}$$

Pesuaika [11.105]

$$t_w = \frac{WL}{v} = \frac{1 \cdot 0,005 \text{ m}}{7,66 \cdot 10^{-5} \text{ m} / \text{s}} = 65,3 \text{ s}$$

Suodattimen kokonaispituus [11.20]

$$z_t = z_f + z_w + z_d = 9,65m + 65,3s \cdot 0,1 \text{ m/s} + 30s \cdot 0,1 \text{ m/s} = 19,2m$$

Suodattimen tuotanto [11.24]

$$\begin{aligned} W_R &= v_B h_B L_f \rho_s (1 - \varepsilon) = 0,1 \text{ m/s} \cdot 4m \cdot 0,005m \cdot 1500 \text{ kg/m}^3 \cdot (1 - 0,5) \\ &= 1,5 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Suodatus pinta-ala

$$A = 4m \cdot 19,2m = 76,7m^2$$

Suodattimen kapasiteetti

$$\frac{3600 \cdot 1,5 \text{ kg/h}}{76,7 \text{ m}^2} = 70,4 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

MITTAUSTULOKSET

Näyte nro	Suodatusaika	Suodos	Pesuaika	Pesusuodos	Kakun paksaus	Märkä uuninäyte	Kuiva uuninäyte	Johtokyky-näyte	Johtokyky-purkkiin laitettu vesimäärä	Johtokyky
	min:s	ml	h:min:s	ml	mm	g	g	g	g	μS
55	2:32	93	0:46:07	815	9,5	62,08	25,65	28,44	255,93	20,4
56	5:55	139	0:20:22	249	14,5	82,22	34,01	41,02	369,18	36,8
57	0:39	43	0:12:21	408	4,5	34,02	14,46	16,15	145,34	37,4
58	5:55	138	1:45:56	1215	14,5	82,64	34	44,2	397,82	10,16
59	2:40	91	0:23:24	409	9,5	56,86	23,48	30,6	275,41	29,7
60	6:27	142	1:59:20	1221	15,5	78,95	31,9	43,03	387,33	17,64
61	7:00	138	2:06:18	1220	15	81,08	30,31	45,12	406,02	10,28
62	0:36	44	0:02:21	85	5	30,03	12,73	16,69	150,22	50,1
63	2:24	87	0:42:45	812	9,5	61,71	26,54	26,09	234,78	20,8
64	5:44	139	0:50:32	612	14,5	80,8	33,65	40,7	266,27	35,9
65	0:32	41	0:10:14	405	4,5	37,53	16,17	14,49	130,12	37,5
66	0:34	46	0:05:22	204	4,5	38,22	16,54	13,63	122,64	39,6
67	6:14	140	0:21:30	248	14,5	81,13	33,73	40,44	363,96	37,2
68	2:24	88	0:08:31	166	9,5	68,47	28,12	27,56	248,03	51,9
69	0:39	41	0:02:38	87	4,5	40,31	17,14	22,15	199,3	49,7
70	0:34	43	0:05:35	208	5	35,25	14,99	18,71	168,42	46,7
71	2:22	89	0:21:04	409	10	59,91	24,92	31,41	282,64	34,1
72	2:41	83	0:10:07	170	10	60,53	25,85	30,55	274,95	76,4
73	0:47	41	0:07:23	207	5	37,38	16,26	17,61	158,44	62,5
74	2:26	90	0:44:06	815	9,5	66,29	27,52	34,69	312,23	23,9
75	5:48	129	0:20:48	252	15,5	87,82	37,15	45,19	106,71	62
76	2:44	84	0:10:12	168	10,5	71,24	30,33	27,28	245,5	57,2
77	0:37	38	0:12:36	408	5	40,94	17,81	14,08	126,68	47
78	5:38	138	0:49:16	611	14,5	77,21	32,06	45,43	408,89	22,3
79	2:42	87	0:24:52	408	10	70,07	29,3	23	206,99	40,4
80	5:37	123	0:49:33	610	15	93,37	39,94	44,19	397,74	32,4
81	0:41	38	0:02:47	83	5	40,81	17,83	16,88	151,88	71,2
1	2:31	66	0:12:06	178	12	78,81	33,96	41,85	376,62	62,8
2	2:42	66	0:33:20	446	12	61,87	26,04	48,45	436,07	35,2
3	3:00	68	1:15:34	884	12	68,63	29,16	49,06	441,58	11,3
4	3:21	66	1:38:04	884	11,5	61,21	25,91	44,25	398,3	14,5
5	0:56	37	0:04:07	91	5,5	31,62	13,52	22,02	198,14	37,7
6	0:52	33	0:10:12	222	6	30,08	13,02	20,48	184,42	37,5
7	0:52	34	0:03:59	91	6	31,6	13,76	22,44	201,96	33,9
8	5:58	106	2:26:03	1315	18	93,45	37,42	71,91	647,28	9,03
9	2:51	72	1:02:59	883	11,5	61,39	26,41	35,59	320,38	22
10	6:06	120	1:07:25	658	17	82,42	34,7	56,34	507,09	19,98
11	6:08	115	0:27:00	269	17	88,32	36,93	51,13	460,05	43,5
12	0:48	34	0:19:03	440	6	29,9	12,87	17,82	160,38	29
13	2:54	72	0:13:09	182	11,5	59,26	24,9	37,55	337,85	85,2
14	6:39	114	0:28:15	268	17,5	89,66	37,49	45,83	412,34	45,7
15	0:47	35	0:18:41	438	5,5	35,49	15,44	15,53	139,81	35
16	0:47	35	0:09:01	221	6	33,4	14,29	23,29	209,37	35,6
17	5:51	110	2:05:59	1320	17	87,8	36,99	42,59	383,3	11
18	0:35	33	0:02:54	90	5,5	32,34	14,26	21,29	191,53	56,6

Näyte nro	Suodatusaika	Suodos	Pesuaika	Pesusuodos	Kakun paksuus	Märkä uuninäyte	Kuiva uuninäyte	Johtokyky-näyte	Johtokyky-purkkiin laitettu vesimäärä	Johtokyky
	min:s	ml	h:min:s	ml	mm	g	g	g	g	μS
19	2:33	74	0:27:22	438	11	71,58	29,93	33,58	302,3	28,3
20	5:55	112	1:03:21	657	17,5	92	36,01	52,87	475,82	24,4
21	6:01	112	2:11:22	1313	17,5	89,2	35,04	44,12	497,18	13,2
22	0:39	34,5	0:15:19	440	6	29,26	12,39	21,79	196,08	29,9
23	2:44	70	0:12:08	182	11,5	56,3	23,45	42,34	380,94	44,6
24	6:19	110	1:05:52	661	17,5	79,3	33,05	50,52	454,78	18,01
25	2:43	71	0:29:43	440	12	54	22,44	33,13	298,22	35,1
26	0:40	32	0:07:44	221	5,5	32,2	13,81	23,23	209,07	41,4
27	6:22	111	0:26:50	260	18	89,03	33,4	49,09	441,86	28,8
28	0:33	28	0:04:11	110	6	38	16,33	21,91	197,25	40,7
29	2:26	60	0:41:09	547	12,5	66,38	27,85	43,12	388,07	19,58
30	5:32	91	1:31:52	820	19,5	98,73	40,46	53,14	478,28	13,84
31	2:34	55	0:42:28	548	12,5	65,46	27,09	40,04	360,45	21,2
32	2:33	58	0:43:25	542	13	65,43	26,83	42,16	379,72	19,63
33	0:35	27	0:22:25	545	6,5	37,99	15,92	23,99	215,97	22
34	0:36	28	0:04:12	112	6,5	37,81	15,98	22,31	200,69	46,7
35	2:16	57	1:18:41	1092	12,5	65,68	27,67	36,85	331,51	23,9
36	5:30	92	0:36:00	327	19,5	101,9	43,37	49,65	446,79	35,4
37	5:50	89	1:35:11	817	19,5	102,91	43,25	56,97	512,79	28,3
38	2:28	57	1:27:00	1091	13	69,32	29,19	37,92	341,2	22,5
39	0:33	25	0:21:52	548	6,5	40,6	17,23	22,24	200,09	38,8
40	2:20	57	0:40:56	549	13	71,34	29,58	37,68	339,07	28,2
41	4:59	85	2:53:06	1625	19	99,97	41,2	57,77	264,39	17,5
42	0:29	24	0:09:31	275	6	45,91	19,68	19,46	175,16	36,3
43	0:35	26	0:11:00	277	6,5	38,27	16,04	21,23	191,15	36,7
44	5:16	85	3:03:53	1634	19,5	102,55	39,43	49,47	445,18	8,2
45	0:29	25	0:04:13	112	6,5	39,51	16,53	23,72	213,54	46,7
46	2:14	52	1:26:16	1085	13	76,38	24,91	41,83	376,41	10,76
47	5:03	82	1:24:09	923	19	105,01	44,17	58,06	522,58	20,4
48	5:15	91	2:55:50	1636	19,5	106,35	44,18	51,96	467,43	10,7
49	0:32	26	0:09:26	276	6	43,42	18,74	18,54	166,96	37,9
50	4:59	85	0:34:56	332	19,5	104,12	43,41	52,09	468,7	40,2
51	0:33	25	0:20:11	542	6	43,28	18,61	28,06	252,46	24,2
52	2:21	56	0:16:27	223	13	68,43	28,56	42,76	384,86	38,2
53	2:17	56	0:15:54	219	13	77,37	31,77	32,11	292,63	51
54	5:27	84	0:36:39	332	19,5	108,19	44,83	62,56	562,94	28

Näyte nro	Suodatusaika	Suodos	Pesuaika	Pesusuodos	Kakun paksuus	Märkä uuninäyte	Kuiva uuninäyte	Johtokyky-näyte	Johtokyky-purkkiin laitettu vesimäärä	Johtokyky
	min:s	ml	h:min:s	ml	mm	g	g	g	g	μS
1u	2:24	72	0:11:49	194	11	68,72	29,63	33,43	300,88	55,4
2u	2:22	73	0:29:05	460	11	66,4	28,26	40,66	365,93	38,7
3u	2:22	72	0:59:16	950	11	61,41	26,29	41,42	372,82	20
4u	2:24	71	1:00:25	953	11	63,34	26,85	38,44	395,96	23,2
5u	0:35	34	0:03:05	101	5,5	34,17	14,67	19,3	173,69	55,5
6u	0:34	34	0:07:26	242	5,5	33,08	14,25	19,08	171,76	45,7
7u	0:35	32	0:03:12	98	5,5	35,88	15,7	21,69	195,22	67,1
8u	5:40	112	2:18:42	1422	17	104,37	44,59	50,53	454,77	14,33
9u	2:23	70	1:01:42	944	11,5	68,75	29,54	36,11	324,97	19,09
10u	5:39	118	1:06:20	716	16,5	93,71	39,82	53,21	478,89	25,7
11u	5:42	115	0:17:25	192	17	98,41	41,49	46,86	421,76	56,6
12u	0:33	34	0:14:39	475	5,5	38,58	16,71	21,37	192,35	43,2
13u	2:33	72	0:12:03	198	11,5	68,56	29,01	41,42	372,76	63,8
14u	5:49		0:26:58	401	17	98,67	41,89	42,74	384,67	47,4

PESEMÄTTÖMÄT KAKUT							
Näyte nro	Suodatusaika	Suodos	Kakun paksuus	Märkä uuninäyte	Kuiva uuninäyte	Kakun johtokyky	Suodoksen johtokyky
	min:s	ml	mm	g	g	mS	mS
K1	6:15	118	17	103,8	43,62	1,695	32,4
K2	0:46	40	5,5	36,78	15,49	1,709	29,5
K3	6:25	122	17	101,28	42,28	1,669	33
K4	0:45	38	5,5	35,47	15,24	1,734	29,5
K5	2:47	80	11,5	76,81	32,17	1,695	32,1
K6	2:43	74	10,5	61,2	26,34	1,74	31,5
K7	2:40	64	12,5	75,31	31,87	2,06	35,3
K8	2:42	63	13	73,71	30,87	2,05	37,8
K9	0:41	32	6	47,12	19,72	2,07	35,6
K10	5:55	92	20	103,89	43,18	2,03	40
K11	0:43	27	6,5	48,15	20,57	2,18	34,3
K12	6:23	92	19,5	99,42	41,48	2,09	38,9
K13	1:35	45	5	34,52	14,86	1,587	26,1
K14	3:51	92	10,5	78,56	33,19	1,53	29
K15	3:45	91	10,5	63,34	26,81	1,516	28,9
K16	7:55	138	15,5	92,3	39,03	1,542	29,6
K17	8:12	134	15,5	104,19	44,48	1,563	30
K18	0:57	43	5	42,61	18,46	1,585	27,3