

Marja Korhonen

**SYRJÄYTYSPEBURIN
KÄYTTÖÖNOTTO**
Muokatun selluloosan pesuun

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Biotuotetekniikan koulutus

2023



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

| | |
|----------------|---|
| Tutkintonimike | Insinööri (AMK) |
| Tekijä | Marja Korhonen |
| Työn nimi | Syrjäytyspesurin käyttöönotto – muokatun selluloosan pesuun |
| Toimeksiantaja | UPM Tutkimuskeskus |
| Vuosi | 2023 |
| Sivut | 79 sivua, liitteitä 2 sivua |
| Työn ohjaajat | Jarkko Männynsalo Pasi Virtanen |

TIIVISTELMÄ

Selluloosamassan muokkauksessa syntyy jatkokäsittelyä haittaavia hajoamistuotteita ja massaan jää muokkauksessa käytettyjä kemikaaleja. Muokkauksen jälkeen massa tulisi saada pestyä jatkokäsittelyä haittaavista komponenteista. Pesun jälkeen massa tulisi sakeuttaa, säilytyksen ja mahdollisen kuivauksen helpottamiseksi. Opinnäytetyön tavoitteena oli ottaa käyttöön jatkuva-toiminen indeksoiva tasoviirasyrjäytyspesuri muokatun selluloosan pesuun.

Kirjallisuusosassa perehdyttiin sellumassan pesuun ja suotautumiseen. Pesun onnistumisen kannalta suotautumisella on oleellinen merkitys. Lisäksi käytiin läpi tasoviirapesurin toimintaperiaate ja suotautumiseen vaikuttavat asiat.

Kokeellisessa osassa muokatun selluloosan pesua testattiin BHS-Sonthofen Groupin jatkuvatoimisella tasoviirasyrjäytyspesurilla yhteistyökumppanin koelaitoksella. Käytössä oli kolme muokattua selluloosaa, joista yksi saatiin pestyä toivotusti. Kahdella muulla selluloosalla suotautuvuus osoittautui haasteelliseksi. Koelaitoksen ajot tarjosivat hyvät lähtökohdat UPM:n Tutkimuskeskuksen pilotoinnin laboratoriossa tehdyille kokeille, suotautuvuuden haasteiden ratkaisemiseksi. Laboratoriomittakaavassa eri muuttujien testaaminen oli mahdollista. Laboratoriokokeissa testattiin lämpötilan, viiran, sakeuden sekä suotautumisapuaineen vaikutusta suotautumiseen.

Pilot-kokeet osoittivat, minkälaista muokattua selluloosaa voidaan pestä käytössä olleella pesurilla tarjolla olevissa olosuhteissa. Pilot-kokeissa suotautuvuus osoittautui suurimmaksi haasteeksi, joka täytyy ratkaista, jotta pesu onnistuu. Laboratoriokokeissa suotautuvuuden merkittävimmäksi muuttujaksi osoittautui lämpötila. Suotautuvuus parani kaikilla massoilla lämpötilan nousun seurauksena. Suotautumisaikaan ja sameuteen voitiin vaikuttaa erilaisilla viiravalinnoilla. Testatuilla suodatusapuaineilla saatiin laskettua suodoksen sameutta ja nostettua retentiota, yhdellä aineella suotautumisaika nopeutui.

Muokatun selluloosan tiedetään olevan haasteellista pestä ja sakeuttaa, muokkauksen aiheuttamien muutosten vuoksi. Pilot-kokeissa pystyttiin kuitenkin pesemään yksi massoista onnistuneesti. Laboratoriokokeissa löydettiin muuttujia, joiden avulla saatiin suotautuvuutta parannettua laboratorio-olosuhteissa ja joita voidaan hyödyntää jatkossa massan pesussa indeksoivalla tasoviirasyrjäytyspesurilla. Lisäksi laboratoriokokeiden avulla pystytään ennustamaan erilaisten muuttujien vaikutus isossa mittakaavassa.

Asiasanat: syrjäytyspesu, muokattu selluloosa, suotautuvuus

| | |
|-----------------|--|
| Degree title | Bachelor of Engineering |
| Author | Marja Korhonen |
| Thesis title | Introducing of Continuous-Indexing Vacuum Belt Filter for washing modified cellulose |
| Commissioned by | UPM Research Center |
| Time | 2023 |
| Pages | 79 pages, 2 pages of appendices |
| Supervisors | Jarkko Männynsalo Pasi Virtanen |

ABSTRACT

In the modification of cellulose pulp, decomposition products are formed, and leftover chemicals occurs. These components cause inconvenience to further processing of the pulp. The modified cellulose should be washed before further processing. After washing, the pulp should be thickened to facilitate storage. One opportunity is displacement washing with Continuous-Indexing Vacuum Belt Filter. The objective of the thesis was an introduction of Continuous-Indexing Vacuum Belt Filter for washing of modified cellulose.

The literature section focused on the washing and filtration of cellulose pulp. Filtration is essential for the success of washing. In addition, the operating principle of the Continuous-Indexing Vacuum Belt Filter and factors affecting filtration were reviewed.

Pilot trials were performed with BHS Sonthofen Group's Continuous-Indexing Vacuum Belt Filter in partner's piloting plant. Trials were made with three different modified pulps. There were differences in CED viscosity and fines content in washable celluloses. One of these celluloses was successfully processed. Poor filtration was a problem in the other two celluloses.

The pilot trials provided a good starting point for laboratory experiments. The target of the laboratory experiment was better filtration. In a laboratory environment in UPM Research Center- piloting, we can more easily evaluate variables that could help improve filtration. Variable values in the laboratory experiments were the temperature, wire, dry content, and additives.

The pilot trials showed what kind of modified cellulose can be washed under the conditions provided. In pilot trials filtration proved to be the biggest problem and filtration must be successful to perform the washing. In laboratory tests was shown that the temperature was the most significant variable in filtration. Filtration time and turbidity could be influenced with different wires. By using additives turbidity could be decreased and wire retention increased. Filtration time was decrease in one additive.

Modified cellulose is known to be challenging to wash and thicken, because of its characteristics. However, one cellulose pulp was successfully washed in pilot trials. In the laboratory tests, variables were found that can be used to improve filtration for washing in Continuous Indexing Vacuum Belt Filter.

Keywords: displacement washing, modified cellulose, filtration

ALKUSANAT

Seitsemän vuotta sitten, työuralleni uutta suuntaa etsiessäni, törmäsin uusiin, innovatiivisiin, puupohjaisiin tuotteisiin, jotka herättivät halun oppia aiheesta lisää. Tämä opinnäytetyö on yksi etappi tällä edelleen jatkuvalla oppimisen polulla. Opinnäytetyön tekemiseen on sisällynyt niin onnistumisen riemua kuin epäonnistumisen tuskaa, kuten uusien asioiden oppimiseen ja tekemiseen kuuluukin.

Iso kiitos ohjaajalleni Pasi Virtaselle mielenkiintoisesta, käytännönläheisestä ja opettavaisesta aiheesta. Toiveeni oli, että pääsen tekemään ja oppimaan asioita käytännössä ja toive toteutui, yli odotusten. Kun nyt mietin itseäni pilotajojen alkaessa, seisomassa hämmentyneenä ison pesurin vieressä, niin voin sanoa, että tänään tiedän jo paljon enemmän.

Kiitos UPM Tutkimuskeskuksen pilotoinnin esihenkilöille joustavasta suhtautumisesta työn toteuttamiseen. Sain tehdä tätä opinnäytetyötä työajallani, hyödyntäen tutun pilotointiyksikön laboratoriota. Kiitos työkavereille tuesta ja ongelmien ”pallotteluavusta”, sekä Holapan Jannelle kiitokset rakentavista kommentteista kirjallisen työn osalta.

Kiitokset hyvin sujuneista pilot-ajoista yhteistyökumppaniyrityksen henkilökunnalle. Mikko Ruuskalle kiitokset alkuvaiheen ajatustenvaihdosta ja vinkeistä aiheen tiimoilta.

Kirjoitustyön osalta hikeä ja kyyneleitä vuodatin myös kotona perheen ”riemuksi”. Iso kiitos heille sietokyvystä ja joustavuudesta.

SISÄLLYS

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 8 |
| 2 | MASSAN PESU..... | 9 |
| 2.1 | Laimennus-sakeutuspesu..... | 11 |
| 2.2 | Syrjäytyspesu..... | 12 |
| 2.3 | Vastavirtapesu..... | 13 |
| 2.4 | Pesutehokkuus..... | 14 |
| 2.4.1 | Pesutehokkuuden tunnusluvut..... | 14 |
| 2.4.2 | Syrjäytyspesun tehokkuus..... | 19 |
| 2.5 | Tasoviirapesuri..... | 19 |
| 2.5.1 | Indeksoiva tasoviirapesuri..... | 20 |
| 2.5.2 | Tasoviirapesuri selluloosamassan pesussa..... | 21 |
| 3 | SUOTAUTUMINEN..... | 22 |
| 3.1 | Kakun muodostava suodatus..... | 22 |
| 3.2 | Kakkua muodostamaton ja syväkerrossuodatus..... | 24 |
| 3.3 | Suotautumiseen vaikuttavat suodatettavan suspension ominaisuudet..... | 24 |
| 3.3.1 | Partikkelien koko ja muoto..... | 24 |
| 3.3.2 | Partikkelikokojakauma..... | 26 |
| 3.3.3 | Kokoonpuristuvuus..... | 27 |
| 3.3.4 | Suspension viskositeetti ja lämpötila..... | 28 |
| 3.3.5 | Kiintoainepitoisuus..... | 29 |
| 3.3.6 | Zeta-potentiaali..... | 29 |
| 3.4 | Suotautumiseen vaikuttavat laiteominaisuudet..... | 30 |
| 3.4.1 | Suodatinmateriaali..... | 30 |
| 3.4.2 | Paine..... | 31 |
| 3.5 | Suotautumisen tehostaminen apuaineilla..... | 32 |
| 3.5.1 | Koagulaatio ja flokkulaatio..... | 33 |
| 3.5.2 | Koagulantit..... | 33 |
| 3.5.3 | Suodatusapuaineen valinta..... | 36 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4 | SUOTAUTUMISEN JA PESUN TESTAUS..... | 36 |
| 5 | PILOT-MITTAKAAVAN KOKEET | 40 |
| 5.1 | Lähtömassat | 40 |
| 5.2 | Laitteiston esittely | 42 |
| 5.3 | Koejärjestelyt | 43 |
| 5.4 | Näytteet ja niiden analysointi | 44 |
| 5.5 | Pilot-koeajojen yhteenveto..... | 45 |
| 6 | LABORATORIOMITTAKAAVAN KOKEET | 46 |
| 6.1 | Laitteiston esittely | 46 |
| 6.2 | Koejärjestelyt | 47 |
| 6.2.1 | Lämpötilan vaikutus suotutumiseen | 47 |
| 6.2.2 | Viiran vaikutus suotautumiseen | 47 |
| 6.2.3 | Sakeuden vaikutus suotautuvuuteen | 47 |
| 6.2.4 | Suotautumisapuaineen vaikutus suotautuvuuteen..... | 48 |
| 6.3 | Näytteet ja niiden analysointi | 49 |
| 7 | TULOKSET JA POHDINTAA..... | 49 |
| 7.1 | Pilot-kokeet..... | 49 |
| 7.1.1 | P4-massa..... | 50 |
| 7.1.2 | P6-massa..... | 51 |
| 7.1.3 | P11-massa..... | 51 |
| 7.2 | Laboratoriokokeet..... | 55 |
| 7.2.1 | Laboratoriokokeiden lähtömassat | 55 |
| 7.2.2 | Lämpötilan vaikutus suotautumiseen | 57 |
| 7.2.3 | Viiran vaikutus suotautumiseen | 61 |
| 7.2.4 | Suodatettavan massan sakeuden vaikutus suotautumiseen | 65 |
| 7.2.5 | Apuaineiden vaikutus suotautumiseen | 66 |
| 7.2.6 | pH-arvon muutos | 68 |
| 8 | JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITYSEHDOTUKSET | 69 |
| 8.1 | Massaan liittyvät asiat, jotka vaikuttavat suotautumiseen | 70 |

| | |
|---|----|
| 8.2 Tasoviirapesuriin liittyvät asiat, jotka vaikuttavat suotautumiseen | 72 |
| 9 YHTEENVETO | 76 |
| LÄHTEET..... | 78 |

LIITTEET

Liite 1. Viirat

Liite 2. Suodatuskokeiden muuttujat

Seuraavat liitteet vain toimeksiantajan versiossa:

Liite 3. Viiravertailu suodosten partikkelikoko analyysien tilavuuden ja pinta-alan differentiaali jakaumat (PSA1190)

Liite 4. Lämpötilavertailu suodosten partikkelikoko analyysien tilavuuden ja pinta-alan differentiaali jakaumat (PSA1190)

Liite 5. Pilot-koeajojen yhteenveto

1 JOHDANTO

Selluloosa on maailman yleisin polymeeri, jonka avulla pystytään valmistamaan ekologisesti kestäviä tuotteita. Selluloosamassalle haetaan jatkuvasti uusia käyttökohteita, perinteisten käyttökohteiden käytön vähentyessä. Esimerkiksi paperinvalmistukseen käytettävää selluloosaa voidaan muokata edelleen, jolloin sille löytyy uusia käyttökohteita. Uudet tavat käsitellä selluloosaa nostaa esiin uusia haasteita, joihin on löydettävä uusia ratkaisuja. UPM:n Tutkimuskeskuksessa Lappeenrannassa tehdään päivittäin työtä uusien ratkaisujen löytymiseksi.

Selluloosamassan muokkauksessa massaan syntyy selluloosan hajoamistuotteita. Lisäksi selluloosamassaan jää muokkauksessa käytettyjä kemikaaleja. Hajoamistuotteet ja jäljelle jääneet kemikaalit haittaavat selluloosan jatkokäsittelyä. Massan pesun avulla näistä hajoamistuotteista pyritään pääsemään eroon, sekä saamaan massa jatkokäsittelyyn paremmin soveltuvaksi. (Tervola ym. 2011, 384.) Muokatun selluloosan pesun tiedetään olevan haasteellista muokkauksessa syntyneiden muutosten vuoksi (Uotinen 2016, 16; Wakeman & Tarleton 1999, 6).

Onnistuneen pesun edellytyksenä on toimiva sakeutus. Selluloosamassan pesu tapahtuu yleensä hyvin alhaisessa sakeudessa. Alhaisessa sakeudessa vesifaasiin siirtyy runsaasti liuenneita, poistettavia komponentteja. Toimivan sakeutuksen avulla pesuveteen liunneet komponentit saadaan poistettua tehokkaasti. (Santos & Hart 2014, 9 – 11.) Tällä on merkitystä myös taloudellisessa mielessä, sillä tarvittavan pesuveden määrää voidaan vähentää. (Alakaila ym. 2005, 784 – 790).

Yhteistyökumppanin koelaitokselle hiljattain käyttöönotettu BHS-Sonthofen Groupin teollisuusmittakaavan indeksoiva tasoviirapesuri tarjosi mielenkiintoisen mahdollisuuden testata muokatun selluloosan pesua jatkuvatoimisella laitteella.

Indeksoivassa tasoviirapesurissa pesutapahtumassa hyödynnetään laimennus-sakeutus sekä syrjäytyspesua. Loppusakeutus tapahtuu puristimen

avulla. (BHS-Sonthofen Group 2018.) Suotautuvuus osoittautui koeajojen suurimmaksi haasteeksi.

Suotautuvuuden haasteisiin lähdettiin hakemaan ratkaisuja laboratorionkokeiden avulla UPM:n Tutkimuskeskuksessa toimivan Biojalostamokehityskeskukseen (BrDC) tiloissa. Muuttujien testaaminen on helpompaa laboratoriomittakaavassa. Vain yhtä muuttujaa vaihdettiin kerrallaan. Muuttujiksi valittiin lämpötila, viira, sakeus ja muutamia apuaineita.

2 MASSAN PESU

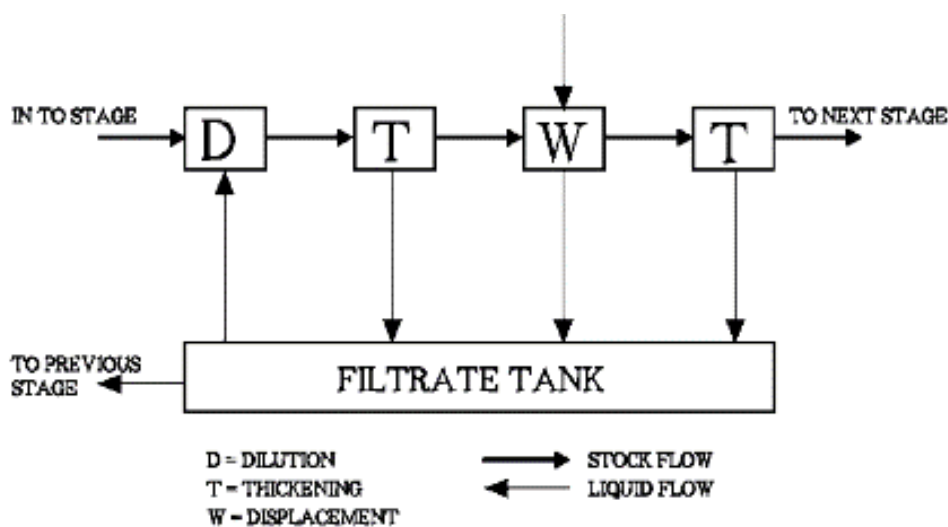
Massan pesu on sellunvalmistuksen yleisin yksikköprosessi. Pesutoimenpiteiden avulla poistetaan liuenneet aineet kuiduista. Tavoitteena on minimoida seuraavaan vaiheeseen siirtyvät prosessia haittaavat aineet, mahdollisimman pienen pesuliuoksen avulla. (Tervola ym. 2011, 384.)

Pesun syynä on yleensä nestemäisen epäpuhtauden poistaminen. Massan pesussa pesuveteen liuenneet aineet poistetaan hyödyntäen pesuliuosta tai liuotinta. Pesuliuoksen tulee olla pestävään massan soveltuva. Pesua jatketaan, kunnes liunneen aineen pitoisuus on laskenut hyväksytylle tasolle tai kun suodoksen suurin sallittu laimennus aste on saavutettu. Pesuliuoksen mukana poistuu viiran huokosten lävitse myös liukenemattomia aineita. (Wakeman & Tarleton 1999 129, 247.)

Pesu voi tapahtua alkalisissa tai happamissa olosuhteissa. Ruskean massan pesussa olosuhteet ovat alkalisia. Suodos on emäksistä, sisältäen runsaasti orgaanista ainesta, jonka molekyylikoko on melko suuri, johtuen ligniinistä. Valkaisussa alkaliset ja happamat olosuhteet vaihtelevat, jolloin myös massan pesu tapahtuu joko alkalisissa tai happamissa olosuhteissa. Valkaisun happaman pesun suodokset sisältävät puolestaan runsaasti epäorgaanista ainesta. (Sillanpää 2005, 20 – 22.)

Panostoimisessa pesussa pesua voidaan jatkaa, kunnes kakussa saavutetaan haluttu puhtaus. Jatkuvatoimisessa pesussa pesuaikaa rajoittavat prosessin muut vaiheet kuten kakun muodostus, puristus, vedenpoisto ja tyhjennys. (Wakeman & Tarleton 1999, 129.)

Kaikissa pesuprosesseissa voidaan havaita neljä vaihetta: laimennus, veden poisto/sakeutus, diffuusio ja syrjäytys (Santos & Hart 2014, 9; Tervola ym. 2011, 391). Kuvassa 1 on esitetty yksinkertaistettu virtauskaavio pesutapahtumasta. Syöttösuspension sakeus säädetään laimennusvyöhykkeellä (D). Tämän jälkeen seuraa kuitupedin muodostus (T) sekä syrjäytysvaihe (W). Joissakin tapauksissa syrjäytysvaihetta seuraa vielä sakeutusyksikkö (T), esimerkiksi puristinnippi tai alipaineen avulla tapahtuva sakeutus. (Tervola ym. 2011, 391.)



Kuva 1. Yksinkertaistettu virtauskaavio pesuprosessissa (Tervola ym. 2011, 391)

Yksinkertaisimmillaan pesu tapahtuu laimentamalla kuitususpensio vedellä tai alkuperäistä puhtaammalla nesteellä. Laimentamisen jälkeen suspensio sekoitetaan ja suodatetaan tai puristetaan ”puhtaaksi”. Tätä pesumenetelmää kutsutaan laimennus-sakeutuspesuksi. Toinen menetelmä on syrjäytyspesu, jossa lika syrjäytetään puhtaalla tai puhtaammalla nesteellä, joka virtaa kakun läpi. Useimmissa teollisissa prosesseissa hyödynnetään molempia pesumenetelmiä. (Tervola ym. 2011, 384.)

Kuitujen sisälle sitoutunutta nestettä ei voida pestä fysikaalisin pesumenetelmin. Kuitujen sisälle sitoutuneet liuenneet aineet saadaan pestyä diffuusion avulla. Diffuusiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa jokin komponentti, tässä tapauksessa kuitujen sisältämät pestävät epäpuhtaudet, liikkuvat suuren pitoisuuden alueelta (kuitujen sisältä) kohti pienemmän pitoisuuden aluetta (vapaata nestettä), jolloin pitoisuuserot tasaantuvat. Diffuusiota nopeuttavat suuri pitoisuusero, pitkä pesuaika, korkea lämpötila ja pieni ionipitoisuus. Diffuusionopeuteen

vaikuttaa myös molekyyli rakenne. Suurilla molekyyileillä diffuusio tapahtuu hitaasti. (Koivula 2014, 12.)

2.1 Laimennus-sakeutuspesu

Laimennus-sakeutus pesu on vanhin ja yksinkertaisin tapa suorittaa massan pesu (Santos & Hart 2014, 9 – 11). Nimensä mukaisesti massa laimennetaan ensin vedellä tai puhtaammalla pesunesteellä. Laimennuksen jälkeen seuraa sekoitus, jonka avulla kuidut saadaan kosketukseen pesuveden kanssa. Epäpuhtauksien poistamiseksi massa tulee sakeuttaa. Sakeutus tapahtuu joko puristamalla tai suodattamalla paineen avulla. (Pesun periaate ja tunnusluvut s.a.)

Laimennus- ja sekoitusvaiheessa kuidut saatetaan kauttaaltaan kosketuksiin pesuveden kanssa. Riittävä sekoitus onkin onnistuneen pesun edellytys. (Santos & Hart 2014, 9 – 11.) Laimennettaessa kuitususpensiota pitoisuuserot tasoittuvat ja kuidut irtoavat toisistaan. Pesevä neste pääsee huuhtomaan kuitujen pintaa. Samalla myös epäpuhtauksien uuttuminen kuitujen sisältä voimistuu. (Pesun periaate ja tunnusluvut s.a.) Laimennusvaihe ei siis vähennä liuenneiden kiintoaineiden määrää kuitususpensiossa, vaan lisää sitä. Samalla lisääntyy kuitususpension määrä. (Santos & Hart 2014, 9 – 11.)

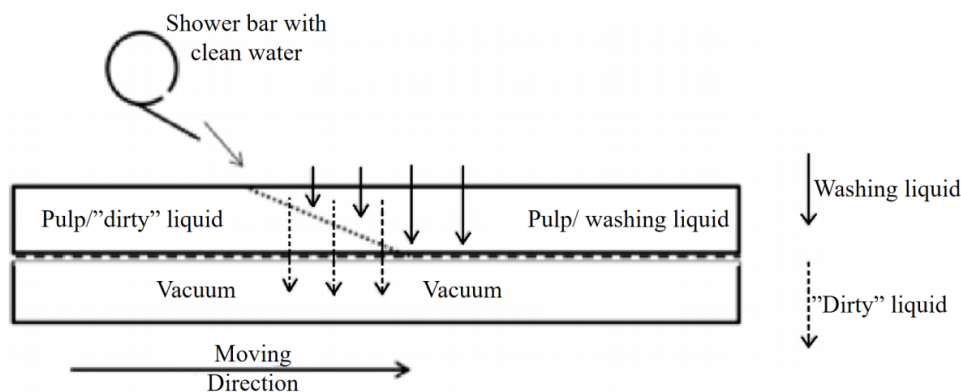
Pesun onnistumisen kannalta sakeutus on tärkeä vaihe massan pesussa. Massa sakeutetaan epäpuhtauksien poistamiseksi ja kiintoainepitoisuuden nostamiseksi. Sakeutus tapahtuu, joko suodattamalla tai puristamalla vesi pois massasta. (Santos & Hart 2014, 9 – 11; Pesun periaate ja tunnusluvut s.a.). Puristus on tehokkaampi tapa sakeuttaa massaa (Pesun periaate ja tunnusluvut s.a.). Pesun tehokkuus riippuu tulevan ja lähtevän massan sakeuden suhteesta. Laimennus-sakeutuspesu on usein pidemmän pesuprosessin ensimmäinen vaihe. (Santos & Hart 2014, 9 – 11.)

Laimennus-sakeutuspesun etuna on se, että sitä voidaan hyödyntää useammille massoille, kuin syrjäytyspesua. Tämä johtuu siitä, että pesunesteen ei tarvitse tunkeutua tiiviiseen massamateriaaliin, kuten syrjäytyspesussa. Laimennus-sakeutuspesu joudutaan usein toistamaan useampaan kertaan

halutun pesutuloksen saavuttamiseksi. Teollisuudessa tämä aiheuttaa taloudellisesti merkittäviä kustannuksia. (Ala-Kaila ym. 2005, 784 – 790.)

2.2 Syrjäytyspesu

Syrjäytyspesu alkaa kakun muodostuksella. Tämän jälkeen pesuneste lisätään muodostuneen kakun päälle (kuva 2). Syrjäytyksessä pesuneste pakotetaan massakakun läpi, jolloin puhdas pesuneste syrjäyttää likaisen nesteen kakusta. Syrjäytykseen voidaan hyödyntää alipainetta, jolloin imun avulla pesuneste imetään kakun läpi. Toisena vaihtoehtona on käyttää painetta, jolloin pesuneste työnnetään paineen avulla kakun lävitse. (Tervola ym. 2011, 391; Santos & Hart 2014, 8 – 19.)

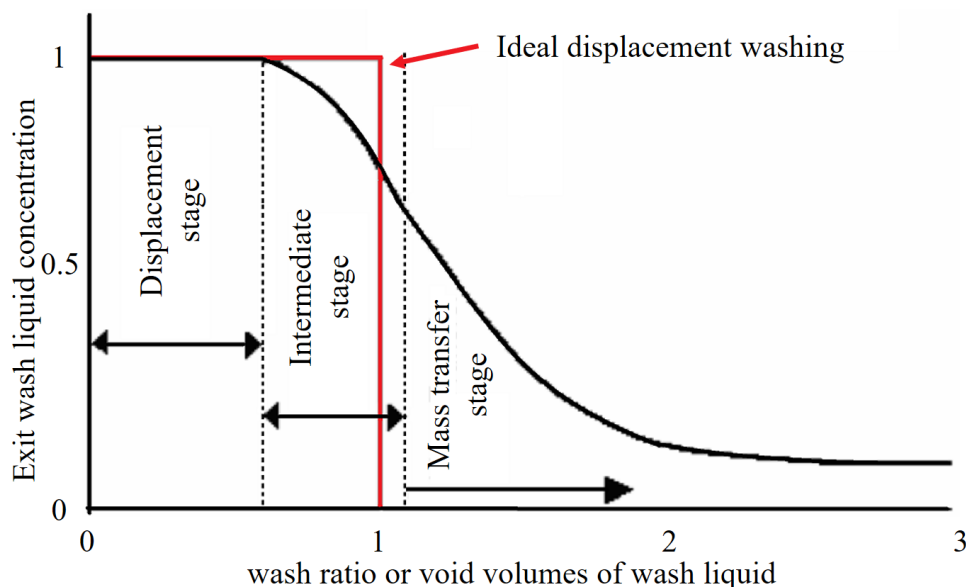


Kuva 2. Syrjäytyspesun periaate (Santos & Hart 2014, 11)

Kakun rakenteen vuoksi pesunesteen virtaus kakun läpi ei ole tasainen kakun kaikissa osissa. Toisissa osissa pesuneste virtaa nopeammin, kuin muissa osissa. Syitä epätasaiselle pesulle ovat mm. ilmakuplat, tukkeutunut viira tai kuitujen heterogeeninen, vaihteleva jakautuminen. (Tervola ym. 2011, 391 – 392; Santos & Hart 2014, 8 – 19.)

Pesun alussa liunneen aineen pitoisuus poistuvassa suodoksessa on sama kuin liunneen aineen pitoisuus pesemättömän kerroksen vapaassa nesteessä. Pesun edetessä suodos poistuu kakusta ja liunneen aineen pitoisuus pienenee. Syrjäytyspesun pesutulos ei käytännössä koskaan ole täydellinen, sillä kakun neste ja pesuneste sekoittuvat jonkin verran pesun aikana. (Tervola ym. 2011, 392.)

Syrjäytyspesussa kakun pesutapahtumaa voidaan kuvata pesukäyrällä. Kuvassa 3 on esitetty syrjäytyspesun todellinen (musta) ja ideaalinen pesukäyrä (punainen). Molemmissa tilanteissa pesun alussa kakku on täysin kyllästynyt (displacement stage) pesusuodoksesta.



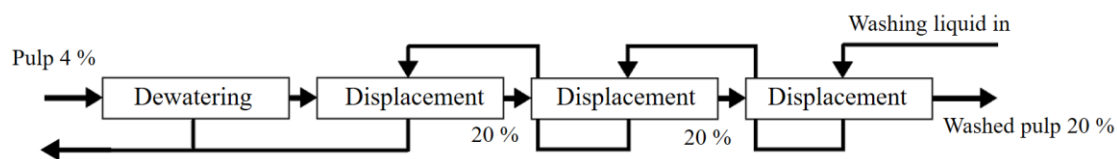
Kuva 3. Ihanteellinen sekä todellinen syrjäytyspesukäyrä (Salmela 2006, 58)

Välivaiheessa (intermediate stage) huomataan, että ideaalitalanteen ja todellisen tilanteen pesukäyrät poikkeavat toisistaan. Todellisessa tilanteessa pesunesteen pitoisuus laskee eksponentiaalisesti. Käyrä havainnollistaa poistuvan pesusuodoksen pitoisuutta syrjäytyspesun aikana. (Salmela 2006, 58 – 59.) Ideaalitalanteessa yhden tai kahden poistuvan tilavuuden pitäisi riittää poistamaan liuenneet aineet (Tervola ym. 2011, 392). Pesukäyrässä havaittava häntä on hyvin yleinen ja se johtuu yleensä hienojakoisesta kakusta. Tällöin pestävään massaan jää liuenneita aineita, eikä saavuteta korkeaa pesutulosta. (Salmela 2006, 59.)

2.3 Vastavirtapesu

Pesujärjestelmä koostuu tavallisesti kahdesta tai useammasta pesuyksiköstä. Pesuyksiköiden määrä vaikuttaa saavutettuun pesutulokseen. Pesujärjestelmissä voidaan hyödyntää muiden pesuyksiköiden käyttämiä pesuvesiä (kuva 4) vastavirtapesuna. Hyödyntämällä käytettyä pesuvettä uudelleen saadaan veden kulutusta pienennettyä, joka parantaa merkittävästi tehtaiden

vesitaloutta ja vähentää ympäristökuormitusta, (Koivula 2014, 11) heikentämättä kuitenkaan pesutulosta. (Sillanpää 2005, 16).



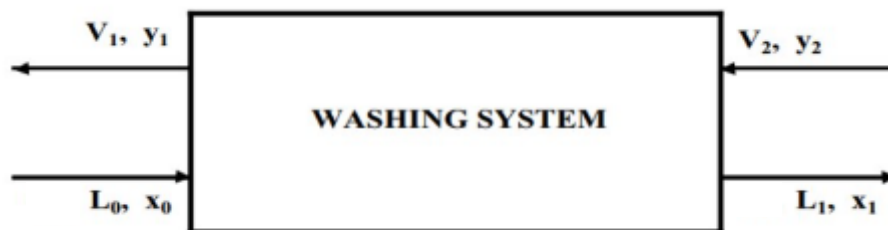
Kuva 4. Esimerkki pesujärjestelmästä, jossa vedenpoistovaihetta seuraa kolme syrjäytysvaihetta, joissa hyödynnetään aiemman pesuvaiheen pesuvettä (mukaillen Tervola et al. 2011, 422).

Vastavirtapesussa puhdas pesuneste syötetään pesulinjan viimeiseen pesuriin kuvan 4 mukaisesti. Puhtaalla, tuoreella pesunesteellä pestään siis puhtain massa. Käytetty pesuneste kierrätetään hyödynnettäväksi edelliseen pesuvaiheeseen, jossa massa ei ole vielä niin puhdasta. Vastavirtapesun ideana on käyttää samaa pesunestettä, niin, että likaisimman massan pesu tapahtuu likaisimmalla nesteellä ja puhtain massa pestään puhtaimmalla nesteellä. (Koivula 2014, 11.)

2.4 Pesutehokkuus

2.4.1 Pesutehokkuuden tunnusluvut

Pesulaitteisto on merkittävin pesutulokseen vaikuttava tekijä (Pesulaitteet s.a.). Pesutehokkuuden arviointiin eniten käytetyt arvot ovat syrjäytysuhde DR (displacement ratio), pesutehokkuus eli E-kerroin ja saanto Y. Laimennuskertoimen DF (dilution factor) avulla kuvataan laimennusveden määrää. Kuvassa 5 nähdään pesun massatase, joiden avulla voidaan laskea pesun tunnuslukuja. (Tervola ym. 2011, 395.) Tunnuslukujen laskennalle on olemassa lukuisia kaavoja, riippuen siitä, mitä arvoja tiedetään. Alla on esitetty vain muutamia kaavoja tulosten laskemiseksi.



Kuva 5. Pesuprosessin vuokaavio (mukailten Tervola ym. 2011, 395; Gullichen & Paulapuro 2000, 314)

| | | | |
|-------|-------|---|---------------|
| jossa | V_1 | pesusuodoksen virtaus ulos | [t/ t kuitua] |
| | V_2 | pesuveden virtaus sisään | [t/ t kuitua] |
| | y_1 | liuenneen pitoisuus pesuvesi | [kg/ t] |
| | y_2 | liuenneen pitoisuus pesusuodos | [kg/ t] |
| | L_0 | pesemättömän massan virtaus | [t/ t kuitua] |
| | L_1 | pestyn massan virtaus | [t/ t kuitua] |
| | x_0 | liuenneen pitoisuus pestävän massan syötön virtauksessa | [kg/ t] |
| | x_1 | liuenneen pitoisuus massan poistuvassa virtauksessa | [kg/ t] |

Syrjäytysuhde määrittää pesussa poistettujen liuenneden kiintoaineiden määrän. Ihannetilanteessa suhde on 1, jolloin kaikki massassa liuenneena ollut kiintoaine on saatu poistettua. Syrjäytysuhde on huono laitteen pesutehokkuuden mittaamiseen, sillä käytettävä pesunestemäärä vaikuttaa arvoon. Huonokin pesulaitteisto voi antaa hyvän syrjäytysuhdearvon, mikäli pesunestettä käytetään runsaasti. Syrjäytysuhteen laskentaan käytetään yhtälöä 1. (Koilu 2014, 14.)

$$DR = \frac{x_0 - x_1}{x_0 - y_2} \quad (1)$$

| | | | |
|-------|-------|---|---------|
| jossa | DR | syrjäytysuhde | [-] |
| | x_0 | liuenneen pitoisuus pestävän massan syötön virtauksessa | [kg/ t] |
| | x_1 | liuenneen pitoisuus massan poistuvassa virtauksessa | [kg/ t] |

y_2 liuenneen pitoisuus pesusuodoksen virtauksessa
[kg/ t]

Syrjäytyssuhde voidaan laskea yhtälön 2 mukaisesti, kun massaa pestään useammassa vaiheessa. Laskennassa verrataan vaiheiden välisiä pesunesteeseen liuenneen aineen pitoisuuksia. (Tervola ym. 2011, 396.)

$$DR = \frac{x_0 - x_1}{x_0 - x_2} \quad (2)$$

| | | | |
|-------|-------|--|---------|
| jossa | DR | syrjäytyssuhde | [-] |
| | x_0 | liuenneen pitoisuus pestävän massan syötön virtauksessa | [kg/ t] |
| | x_1 | liuenneen pitoisuus massan poistuvassa virtauksessa | [kg/ t] |
| | x_2 | liuenneen pitoisuus edellisen vaiheen pesusuodoksen virtauksessa | [kg/ t] |

E-kertoimen avulla voidaan kuvata pesulinjan suorituskykyä käyttäen yhtä arvoa (Tervola ym. 2011). E-kerroin tunnetaan myös Norden-hyötysuhdekertoimenä ja se on pesuveden määrästä riippumaton parametri, kuvaamaan pesutehoa (Miliander 2009, 173).

E-kerroin kuvaa teoreettisesti ihanteellista pesukertojen määrää, jolla päästään tiettyyn massan puhtaustasoon (Miliander 2009, 173). Ihanteellinen pesusuhde on 1. Tämä tarkoittaa, että kaikki liuenneet aineet poistetaan kakusta yhdellä pesukerralla. (Wakeman & Tarleton 1999, 135.) E-kerroin saadaan laskettua esimerkiksi yhtälöiden 3 mukaan (Tervola 2011, 397).

$$E = \frac{L_1(y_1 - y_2)}{L_0(x_0 - y_1)} \quad V_2 = L_1$$

$$E = \frac{\ln\left(\frac{L_0(x_0 - y_1)}{L_1(x_1 - y_2)}\right)}{\ln\left(1 + \frac{DF}{L_1}\right)} \quad V_2 \neq L_1 \quad (3)$$

| | | | |
|-------|-------|--|---------------|
| jossa | E | E-kerroin | [-] |
| | V_2 | pesuveden virtaus sisään | [t/ t kuitua] |
| | y_1 | liuenneen pitoisuus pesuveden virtauksessa | [kg/ t] |
| | y_2 | liuenneen pitoisuus pesusuodoksen virtauksessa | [kg/ t] |
| | L_0 | pesemättömän massan virtaus | [t/ t kuitua] |
| | L_1 | pestyn massan virtaus | [t/ t kuitua] |
| | x_0 | liuenneen aineen pitoisuus pestävän massan syötön virtauksessa | [kg/ t] |

Pesusaanto vertaa pesusuodokseen pesussa liuenneen aineen pitoisuuden muutosta pestävän massan alkuperäiseen pitoisuuteen (Gullichen & Paulapuro 2000, A314). Pesusaanto ilmaisee siis, kuinka suuri osa epäpuhtauksista on saatu poistettua. Pesusaannon laskemiseen voidaan käyttää yhtälöä 4. (Koivula 2014, 15; Tervola ym. 2011, 396).

$$Y = 1 - \frac{L_1 x_1}{L_0 x_0} = \frac{V_1 y_1}{L_0 x_0} \quad (4)$$

| | | | |
|-------|-------|--|---------------|
| jossa | Y | pesusaanto | [%] |
| | V_1 | pesusuodoksen virtaus ulos | [t/ t kuitua] |
| | y_1 | liuenneen pitoisuus pesuveden virtauksessa | [kg/ t] |
| | L_0 | pesemättömän massan virtaus | [t/ t kuitua] |
| | L_1 | pestyn massan virtaus | [t/ t kuitua] |
| | x_0 | liuenneen aineen pitoisuus pestävän massan syötön virtauksessa | [kg/ t] |
| | x_1 | liuenneen aineen pitoisuus massan poistuvassa virtauksessa | [kg/ t] |

Laimennuskertoimella (DF dilution factor) ilmaistaan käytetyn pesuveden määrää suhteessa tuotettuun sellumassaan. Laimennuskertoimien laskemiseen voidaan käyttää joko arvoja pesusuodoksen ulosvirtaus – pestävän massan sisään virtaus tai pesusuodoksen sisään virtaus- pestävän massan ulosvirtaus yhtälön 5 mukaan. Syrjäytyspesussa laimennuskerroin on nolla, kun

sama määrä pesuvettä on käytetty syrjäyttämään epäpuhtaudet massasta.
(Koivula 2014, 15.)

$$DF = V_1 - L_0 = V_2 - L_1 \quad (5)$$

| | | | |
|-------|-------|-----------------------------|---------------|
| jossa | DF | laimennuskerroin | [-] |
| | V_1 | pesusuodoksen virtaus ulos | [t/ t kuitua] |
| | V_2 | pesuveden virtaus sisään | [t/ t kuitua] |
| | L_0 | pesemättömän massan virtaus | [t/ t kuitua] |
| | L_1 | pestyn massan virtaus | [t/ t kuitua] |

Yleisesti ottaen korkeampi laimennuskerroin tarkoittaa parempaa pesutulosta. Samalla kuitenkin veden kulutus kasvaa ja haihdutettavan veden määrä lisääntyy. (Smook 2016, 109.)

Retentio ei kerro pesun tehokkuudesta. Retentio kuvaa massarainaan jäävien massan komponenttien määrää. Viiraretentiolla kuvataan viiraosan tehokkuutta, sitä kuinka hyvin hienoaines jää rainaan. Korkean retentio tiedetään heikentävän vedenpoistoa rainasta. Viiraretentio voidaan laskea Uotisen mukaan yksinkertaisimmillaan alla olevan kaavan kuusi mukaisesti. (2014, 29 – 30.)

$$R = \frac{C_h - C_w}{C_h} * 100\% \quad (6)$$

| | | | |
|-------|-------|-----------------------------|-----|
| jossa | R | viiraretentio | [%] |
| | C_h | (perälaatikon) syöttösakeus | [%] |
| | C_w | viiraveden sakeus | [%] |

2.4.2 Syrjäytyspesun tehokkuus

Syrjäytyspesun tehokkuuteen vaikuttavat pestävän massan huokoisuus, kakun paksuus, massan ja pesuveden viskositeetti, pesunesteen levitystapa ja tasaisuus sekä levitysnopeus (Salmela 2006, 62 – 65).

Pestävän massan huokoisuus vaikuttaa syrjäytyspesun tehokkuuteen. Kun kakulla on alhainen huokoisuus, pesuveden virtaus on hidasta. Tällöin pesun tehokkuus on hyvä, sillä pesutapahtumalla on aikaa tapahtua. (Salmela 2006, 63.)

Suodatinkakun paksuus vaikuttaa kakun peseytymiseen. Paksummat kakut voidaan pestä tehokkaammin, mutta ohuemmat kakut tuottavat korkeamman laadun ja pesukapasiteetin. Ohuella kakulla pesunesteellä on taipumus kanavoitua ja näin huonontaa pesutulosta. (Salmela 2006, 64.)

Nesteiden viskositeetillä on sekä kakun muodostuksessa, että pesuvaiheessa huomattava vaikutus pesussa liunneen aineen pitoisuuteen. Viskositeetin vakioimiseksi tulisi sekä suspension että pesuveden lämpötila ylläpitää optimilämpötilassa. Jos pesunestettä kuumennetaan, sen viskositeetti pienenee. Viskositeetin muutos voi johtaa suurempiin paikallisiin nopeuksiin huokoisissa kakuissa, heikentäen pesutulosta. (Salmela 2006, 64.)

Syrjäytystehokkuuden maksimoimiseksi tulee pesuneste levittää alhaisella nopeudella, tasaisesti massalle kanavoitumisen välttämiseksi (Smook 2016, 110). Monissa tapauksissa on havaittu, että pesunesteen annostelun jaksottaminen ja pesun toistaminen parantavat pesutulosta. Jaksottamisen avulla pesuneste ehtii paremmin imeytyä ja tarvittavan pesuveden määrää voidaan vähentää. Jaksottamisesta on hyötyä erityisesti tilanteissa, joissa kakun halkeilua ei voida estää. (Salmela 2006, 63.)

2.5 Tasoviirapesuri

Tasoviirapesurin rakenne muistuttaa fourdrinier-tyyppisen paperikoneen viiraosaa. Massa, noin 4 %:n sakeudessa, syötetään perälaatikosta tasaisesti

liikkuvalle viiralle. Viiran alla sijaitsevat imukaukalot, jotka pitävät yllä suotautumisen ajavaa voimaa, alipainetta. (Miliander 2009, 185.)

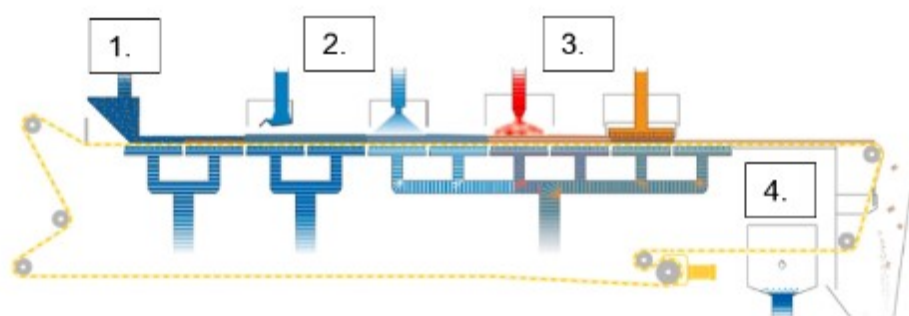
Syrjäytyspesu tapahtuu noin 10 %:n sakeudessa. Pesuvaiheita voi olla useita ja ne voidaan toteuttaa vastavirtamenetelmällä hyödyntäen pesusuodoksia uudelleen. Tasoviirapesurilla saavutetaan korkea pesuteho. (Miliander 2009, 185.) Tasoviirapesurilla syrjäytys on pääasiallinen pesumeکانismi (Smook 2016, 111).

2.5.1 Indeksoiva tasoviirapesuri

Indeksoivassa eli jaksoittain toimivassa pesurissa viira liikkuu alipainekaukaloitten päällä jatkuvatoimisesti, mutta jaksottaisesti. Alipainejakson aikana viira on paikoillaan ja viiran siirron aikana alipaine on kytketty pois. (BHS-Sonthofen Group 2018.)

Indeksoivan tasoviirapesurin sekvenssit voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin, kuvan 6 mukaisesti:

1. Suspension syöttö ja kakun muodostus
2. Pesu
3. Kuivaus
4. Kakun poisto ja viiran pesu



Kuva 6. Indeksoivan tasoviirapesurin havainnekuva (mukaillen BHS-Sonthofen Group 2018)

Suspensio syötetään jatkuvatoimisesti optimoidun jakelulaitteen avulla. Kiintoaine jakautuu tasaisesti viiralle. Suodatus tapahtuu painovoiman suuntaisesti, jolloin paine-ero on tyhjiöjärjestelmän kannalta optimaalinen. (BHS-Sonthofen Group 2018.) Suspension annetaan tavallisesti asettua painovoiman

vaikutuksesta muutamien sekuntien ajan, jolloin karkeat jakeet muodostavat kakun, ennen vakuumin aloitusta (Perlmutter 2015, 44).

Pesu tapahtuu laimennus-sakeutus menetelmällä tai syrjäytysmenetelmällä. Pesualue on jaettu indeksointia vastaaviin erillisiin vyöhykkeisiin. Suodatin-kangas on tuettuna vyöhykkeiden ritilöiden päälle. Pesusuodos voidaan kerätä talteen ja se voidaan hyödyntää vastavirtapesussa uudelleen. (BHS-Sonthofen Group 2018.)

Suodatus ja pesuvaiheen jälkeen seuraa kuivatusvaihe, joka tapahtuu kuumen ilman tai höyryn avulla. Kuivaukseen on mahdollista käyttää myös mekaanista puristinta. (BHS-Sonthofen Group 2018.) Kuivaus mekaanisen puristuksen avulla sopii erityisesti kakuille, jotka ovat huonosti läpäiseviä ja koonpuristuvia sekä huonosti suotautuvia (Svarovsky 2009, 373).

Kakun poisto tapahtuu hinnan loppupäässä. Kakun poiston tehostamiseksi on käytössä kaavari. Viiran pesu tapahtuu ruiskuttamalla vettä korkealla paineella ylä- (kakun puoleiselle), ala- tai molemmille puolille viiraa. (BHS-Sonthofen Group 2018.)

Laitteisto soveltuu mm. farmasiatuotteiden, biopolttoaineiden, mineraalien ja zeoliitin, kemianteollisuudessa, selluloosan, väriaineiden ja pigmenttien, kaivoistuotteiden, elintarviketuotannon käyttöön sekä savukaasujen rikinpoistoon käytettävän kipsin pesuun. (BHS-Sonthofen Group 2018.)

2.5.2 Tasoviirapesuri selluloosamassan pesussa

Tasoviirapesurit eivät ole kovin yleisesti käytössä selluloosan valmistuksessa. Lähinnä niitä voidaan hyödyntää sulfiitti- tai neutraalisulfiittimenetelmässä (NCCS Neutral Sulphite SemiChemical) massan valmistuksessa, kun tuotantomäärät ovat alle 900 täysin kuivaksi laskettua sellutonnia (BDMT)/ päivä. (Tervola ym. 2011, 415.)

Pesurille tuleva massa on tavallisesti noin 3 %:n sakeudessa. Massan tulee levittyä tasaisesti viiralle, jotta syrjäytyspesu onnistuu. Pesuyksiköitä on tavallisesti 3 – 5. Puhdas pesuvesi syötetään viimeiseen pesuvaiheeseen, josta

vastavirtaperiaatteella kunkin aikaisemman pesuvaiheen läpi. Pesty massa on sakeudeltaan 12 – 15 %. Tasoviirapesuriin voidaan lisätä pesuvaiheiden jälkeen puristin. (Tervola ym. 2011, 415.)

3 SUOTAUTUMINEN

Suodatuksella tarkoitetaan kiinteän aineen erottamista nestemäisistä suspensioista. Menetelmässä hyödynnetään läpäisevää väliainetta, joka estää kiinteiden hiukkasten siirtymisen nesteen mukana. Suodatuksen edellytyksenä on painehäviön muodostuminen suodatettavan materiaalin läpi. (Svarovsky 2001, 303.)

Paine-ero (Δp) voidaan saavuttaa painovoiman, tyhjiön, paineen tai keskipakovoiman avulla (Svarovsky 2001, 303). Alipainesuodatukseen soveltuvat suhteellisen nopeasti suodattuvat suspensiot. Huonommin suodattaville suspensioille soveltuu paremmin painesuodatus. Alipainesuodattimilla saavutetaan paras kiintoaineen pesutulos. (Permutter 2015, 33 – 35).

Svarovskyn mukaan suodatustyypit voidaan jakaa pintasuodatukseen sekä syväsuodatukseen (Svarovsky 2001, 303). Pintasuodatusta käytetään yleensä suspensioissa, joiden kiintoainepitoisuus on yli yhden prosentin. Suodatuksessa voidaan käyttää apuna suodatusapuaineita. Apuaineiden avulla kakun läpäisevyys paranee ja mahdollistaa laimeiden ja vaikeasti suodattuvien suspensioiden suotautumisen. (Svarovsky 2001, 304.)

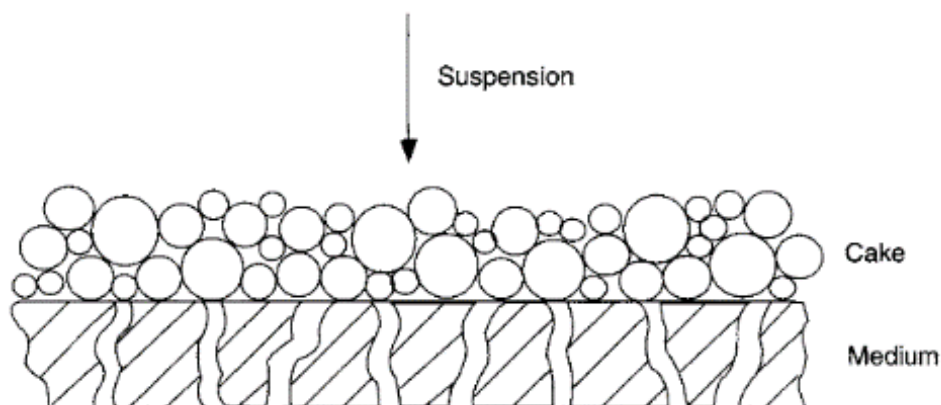
Perlmutter (2015, 22) jakaa kiinteä-nestesuodatustekniikat kolmeen luokkaan: kakun muodostava suodatus, kakkua muodostamaton eli dynaaminen suodatus sekä syväkerrossuodatus. Prosessi voi olla erä- tai jatkuvatoiminen (BHS-Sonthofen Group 2018).

3.1 Kakun muodostava suodatus

Kakun muodostava suodatus on kiintoaineen erottamista suspensiosta hyödyntäen suodatinväliainetta, jonka läpi suodos kulkee. Suodatinväliaine aloittaa kakunmuodostumisprosessin. Kakun kiintoaine itsessään muodostaa myös suodattavan kerroksen. Kakun tulee olla vähintään muutamien

millimetrien paksuinen, jotta se voidaan irrottaa suodatinkankaasta. Suodatettavan suspension tulee olla sellaista, että se pystyy rakentamaan kakun. (Perlmutter 2015, 22.)

Kuvassa 7 on esitetty kakkusuodatuksen periaate. Kiinteä aine kerrostuu kakuksi, suodatinväliaineen pinnalle. Pintasuodatuksessa alussa painehäviö on suhteellisen pieni. Suodatinväliaineen aukkojen kokoiset tai sitä pienemmät hiukkaset kiilautuvat aukkoihin ja muodostavat pienempiä kanavia. Pienemmät kanavat poistavat pienempiä kiintoaine hiukkasia nesteestä. Muodostunut suodatuskakku toimii väliaineena seuraavan syöttösuspension suodatuksessa. (Svarovsky 2001, 303.)



Kuva 7. Kakkusuodatuksen periaate (Svarovsky 2001, 304)

Kun hiukkasten koko on suurempi kuin suodatinväliaineen koko, muodostuu sen pinnalle suodatinkakku (Wakeman & Tarleton 1999, 6). Kakkusuodatuksessa voi tapahtua mikroskooppisessa mielessä täydellinen suodattuminen, jossa kiintoaineen koko on niin suurta, että se ei pääse suodatinväliaineeseen. (Wakeman & Tarleton 1999, 6.)

Partikkelikoon ollessa pienempi, kuin suodatinväliaineen huokoskoko, tapahtuu silloittumista. Pienet partikkelit yrittävät samanaikaisesti suodatinväliaineeseen ja muodostavat sillan huokoisen väliaineen pinnalle (Wakeman & Tarleton 1999, 6). Usein suodatuksessa pyritään muodostamaan silottuneita rakenteita. Tällöin myös pienimmät partikkelit, jotka muuten menisivät suodatinväliaineesta läpi, saadaan jäämään kakkuun. (Kempainen 2010, 5.) Silloittumat ovat herkkiä virtausnopeuksien ja virtaussuuntien muutoksille (Wakeman & Tarleton 1999, 6.)

3.2 Kakkua muodostamaton ja syväkerrossuodatus

Kakkua muodostamaton, dynaaminen suodatus soveltuu lietteille, joilla on matala kiintoainepitoisuus ja/tai runsaasti hienoainesta. Menetelmässä hyödynnetään suodatinväliainetta, kuten kakkusuodatuksessa, mutta heti, kun kakku on muodostunut, se poistetaan nopealla lietteen ristivirtauksella. Menetelmä mahdollistaa puhtaan kiintoainevapaan suodoksen ja sakeutettua kiintoainetta, mutta ei muodosta varsinaista kakkua. (Perlmutter 2015, 22.)

Syväkerrossuodatuksessa suspension kiintoaine kiinnittyy suodatinmateriaalin sisään, niin, että suodatinväliaineen pinnalle ei muodostu kakkua. Suuret kiintoainehiukkaset muodostavat läpäisevän, kiinteä-nestesuodatuskerroksen. (Perlmutter 2015, 22.) Kun hiukkaset ovat pienempiä kuin suodatinväliaineen huokoskoko, väliaineen sisäisessä rakenteessa tapahtuu saostumista. Tällöin osa pienimmistä hiukkasista päätyvät suodokseen. Toimintatapa on mm hiekasuodattimissa ja tietyissä patruunasuodattimissa. Syväsuodatuksessa kiintoainepitoisuus on yleensä hyvin alhainen. (Wakeman & Tarleton 1999, 6.)

3.3 Suotautumiseen vaikuttavat suodatettavan suspension ominaisuudet

Suotautumiseen vaikuttavat monet tekijät. Perlmutterin (2015, 23) mukaan suotautumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat partikkelien muoto ja koko, partikkelikokojakauma (PSD), agglomeraattien rakentuminen, muodonmuuttuvuus, koonpuristuvuus, viskositeetti, kiintoainepitoisuus, zeta-potentiaali sekä paine.

Wakeman & Tarleton (1999, 66) mainitsevat, että hienojakoisten suspensioiden suodatuksen luonne riippuu pH-arvosta, hiukkasten pintavarauksesta (zeta-potentiaali) hiukkaskoosta ja -muodosta, sekä käytetystä paine-erosta. Suspension lämpötilalla on myös vaikutusta suotautumiseen (Wakeman & Tarleton 1999, 303).

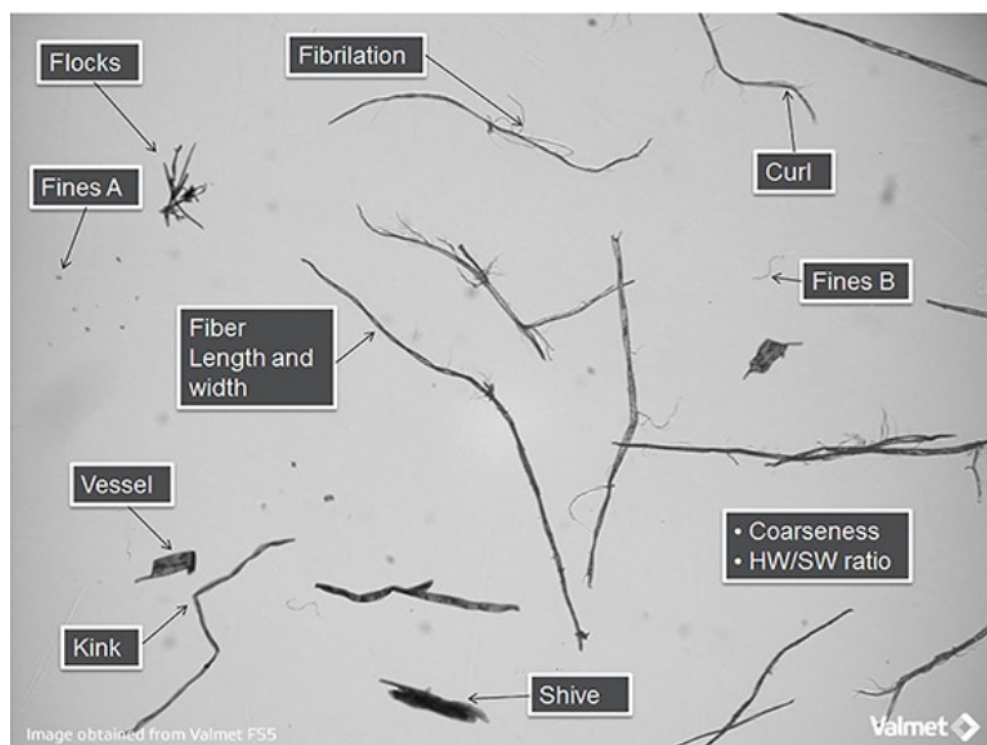
3.3.1 Partikkelien koko ja muoto

Kiintoaineen partikkelikoolle on merkittävä vaikutus kiintoaine-neste suspension erotuskäyttäytymiseen (Wakeman & Tarleton 1999, 9). Kiintoaines voi

olla kiteistä tai amorfista, sinä voi olla orgaanista, kuituista, epäorgaanista aineesta (Perlmutter 2015, 28).

Suotautumisen kannalta ihanteellinen kiintoaine on säännöllisen muotoista, rakenteeltaan pyöreää ja kooltaan saman kokoista. Tällöin kakun rakenne on kaikkialla identtinen koko kakkurakenteen alueella. Haasteita aiheuttavat neulamaiset rakenteet, sillä ne muodostavat epäsäännöllisiä suodatinkakkuja. Hiutaleiset kiintoaineet muodostavat herkästi läpäisemättömiä kakkuja, erityisesti jos suodatuspaine on liian korkea. Orgaaniset rakenteet ovat usein pyöreitä, mutta ne kestävät vähemmän painetta. (Perlmutter 2015, 28.)

Selluloosan partikkelikoon mittaus voidaan tehdä esimerkiksi Valmetin FS5-laboratoriokuituanalysaattorilla (Valmet Oy 2016a). Määrittämisessä käytetään kuva-analyysiä, jossa ultrakorkearesoluutiokameran ottamasta, harmaasävykuvasta määritetään kuitujen ominaisuuksia. Määrittämisessä kuidut kuvataan kyvetissä 0,5 mm:n syvyysterävyydellä standardin ISO 16065 – 2 mukaisesti. (Kuituominaisuuksien määrittäminen FS5-laitteella s.a.) FS5-kuituanalysaattori antaa monipuolista tietoa kuitujen koosta ja rakenteesta sekä erilaisista kuituvaurioista (kuva 8). (Valmet Oy 2016a)



Kuva 8. Valmet FS5-kuituanalysaattorin kuva kuituominaisuuksista (Valmet Oy 2016).

Mikroskoopilla tarkasteltaessa voidaan havaita agglomeroituminen ja partikkelien rakenne (Perlmutter 2015, 28). On kuitenkin harvinaista, että käsiteltävien hiukkasten muoto voidaan määrittää tarkasti (Wakeman & Tarleton 1999, 9).

Kuitujen kokoon vaikuttaa niiden luontainen taipumus sitoa vettä sisäänsä. Vedensitomisoimaisuus on riippuvainen kuitumassan pH-arvosta. pH-arvon nostaminen turvottaa kuituja, sillä selluloosamolekyylien karboksyylihapot disosioituvat ja aiheuttavat prepulsiovoimia kuitujen sisälle. Turpoamista tapahtuu pH-arvon ollessa alle 5. pH-arvoissa 5 – 10 turpoamista ei juurikaan tapahdu. Yli 10 pH-arvossa kuidut alkavat kutistua. Tällöin kuitujen ulkopuolisen veden suurempi ionivahvuus aikaansaa osmoosin, jolloin vettä alkaa siirtyä kuitujen ulkopuolelle. Hienoainekselta tämä vedensitomisoimaisuus puuttuu. (Uotinen 2016, 24 – 30.)

3.3.2 Partikkelikokojakauma

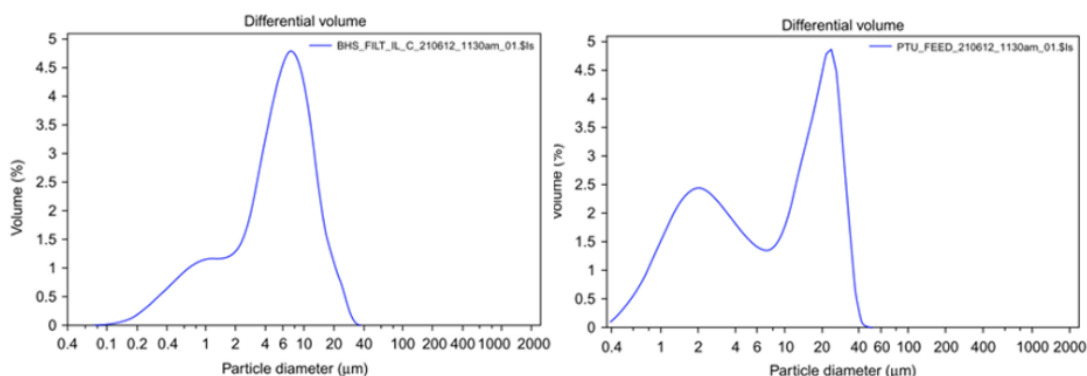
Kakkusuodatuksessa tyypillinen kiintoaineen koko on 1 – 200 μm . Keskipartikkelikoon ollessa 10 – 100 μm . Alle mikrometrin kokoiset kiintoaineet ovat vaikeita suodattaa kakkusuodatustekniikalla. Isot kiintoainepartikkelit (useita mm) voidaan puolestaan käsitellä sentrifuugilla tai laskeutuksella. (Perlmutter 2015, 29.)

Partikkelikoon mittaus voidaan tehdä seula-analyysillä. Tarkempi määrittäminen saadaan laserdiffraktiolla (PSD, particle size distribution) tai optisella laskentamenetelmällä. Suurin osa suodatusongelmista voidaan selittää partikkelikokojakauman eroilla. (Perlmutter 2015, 29.)

Partikkelikokoanalyysi perustuu laserdiffraktioon, eli valon sirontaan partikkeleista. Laite hyödyntää kolmea laseria partikkelikoon mittaukseen. Käytössä on kamera, joka kuvaa live-kuvaa testattavasta näytteestä. Sensorit mittaavat sironneen valon intensiteettiä eri kulmista. Laserin sirontakulma on kääntäen verrannollinen partikkelin kokoon. Sironnakuvioista muodostuu matriisi, jonka avulla yhdessä matemaattisen laskennan avulla laite laskee tilavuuskeskeisen partikkelikokojakauman (PSD) hyödyntäen iterointia sopivan sironnakuvion löytämiseksi. (Partikkelikokoanalyysi PSA1190, märkäpuoli s.a.)

Partikkelikokojakauma ilmoitetaan prosenttiosuutena massasta. Usein raporttiin liittyy myös visuaalinen kuvaaja. Hiukkaskokojakauman muutokset, hienojakoisuus tai huippujen leviäminen vaikuttavat suotautumiseen. (Perlmutter 2015, 31.)

Kuvassa 9 on esitetty kaksi partikkelikokojakaumaa, joissa molemmissa on samanlainen suspensioiden raekoko. Vasemmalla on suodatuksen kannalta ideaalinen partikkelikokojakauma, jolla saavutetaan parempi suotautumisnopeus. Keskellä on korkea, terävä huippu sekä pienempi huippu vasemmalla. Partikkelikokojakauma ei ole kovin laaja, joten suurin osa hienoaineksesta on keskikokoisia, muodostaen melko homogeenisen kakun. (Perlmutter 2015, 31.)



Kuva 9. Suotautumisen kannalta ideaalinen (vasemmalla) ja kaksihuippuinen (oikealla) partikkelikokojakauma. (Perlmutter 2015, 31)

Kuvassa 9 oikealla on nähtävissä kaksihuippuinen partikkelikokojakauma, jonka suotautumisnopeus on hitaampi. Partikkelihuippu on laajempi ja siinä on päähuipun lisäksi selvä toinen huippuja. Kaksoishuippujakauma viittaa epähomogeeniseen kakun, jossa erittäin hienojakoiset hiukkaset jäävät suurempien hiukkasten rakoihin. Kaksihuippuisessa partikkelikokojakaumassa on mahdollista, että kakkuun muodostuu kaksi kerrosta. Hienoaines kulkeutuu suodatinväliaineeseen (kankaaseen) ja suuremmat hiukkaset muodostavat erillisen kakun sen päälle. Rakenne tukkii materiaali, suotautuvuutta heikentäen. (Perlmutter 2015, 31.)

3.3.3 Kokoonpuristuvuus

Kokoonpuristuvuudella tarkoitetaan kakun paineenkestoa. Suodatuksessa kokoon puristumattomilla kakuilla kakun vastus on suoraan verrannollinen kakun

paksuuteen. Useimmat kakut ovat kokoonpuristuvia ja niiden ominaisvastus suodatuksessa muuttuu paineen kasvun myötä. (Svarovsky 2009, 308).

Kokoonpuristuvilla kakuilla paineen kasvattaminen johtaa kakun huokoisuuden pienenemiseen. Huokoisuuden pienenemisen seurauksena kakun läpäisevyys heikkenee ja sen myötä suotautuminen hidastuu. (Svarovsky 2009, 369). Suodatinkakun kokoonpuristuvuus on siis suotautumisen kannalta haitallista (Svarovsky 2009, 387). Etuna kokoonpuristuvilla kakuilla voidaan mainita mekaanisessa puristuksessa saavutettava korkeampi kuiva-ainepitoisuus (Svarovsky 2009, 387 – 388).

3.3.4 Suspension viskositeetti ja lämpötila

Viskositeetti kuvaa nesteen sisäisestä kitkasta johtuvien voimien aiheuttamaa virtausta vastustavaa voimaa. Viskositeetti on termodynaaminen ominaisuus, joka on riippuvainen lämpötilasta ja paineesta. Viskositeetti voidaan mitata esimerkiksi Brookfield viskositeettimittauksella. (FC-Brookfield viskositeettimitaus s.a.)

Suspension viskositeetin vaihtelulla on merkittävä vaikutus suotautuvuuteen. Viskositeetillä on käänteinen vaikutus suodatusnopeuteen: viskositeetin noustessa, suodatusnopeus laskee. Viskositeetti ei vaikuta kakun rakenteeseen, mutta lämpötilan nousu nostaa virtausnopeutta, jolloin nesteen pintajännitys kapillaareissa pienenee ja kakun loppukosteus pienenee. (Perlmutter 2015, 26 – 27).

Viskositeetti on herkkä lämpötilan muutoksille. Lämpötilan nousu laskee suspension viskositeettiä. Suodatusnopeutta voidaan monissa tapauksissa nopeuttaa lämmittämällä suodatettavaa suspensiota. Jo pienillä lämpötilan muutoksilla on vaikutusta suotautumiseen. (Wakeman & Tarleton 1999, 13.) Lämmityksen haittana voidaan mainita lämmitysenergiasta syntyvät kustannukset (Wakeman & Tarleton 1999, 303).

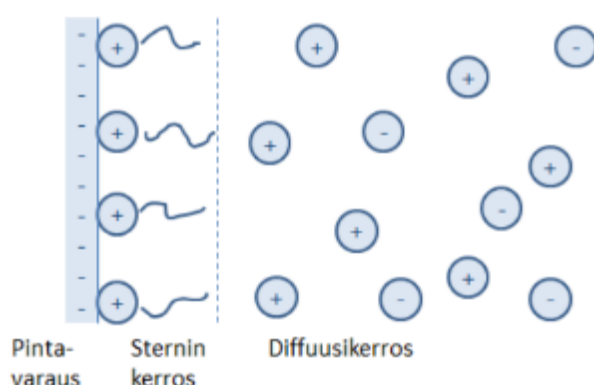
3.3.5 Kiintoainepitoisuus

Kiintoaineella tarkoitetaan nestemäisen näytteen kiinteän aineen osuutta näytteessä. Paperinvalmistusmassassa kiintoaineeksi luetaan kuitu-, hienoaine- ja täyteainemateriaalit. (Uotinen 2016, 28.) Kiintoainepitoisuus vaikuttaa merkittävästi suodatettavuuteen. Tyypillisesti alhaisen kiintoainepitoisuuden omaavat suspensiot eivät mahdollista kakun muodostavaa suodatusta tai kakut ovat hyvin hienojakoisia. (Perlmutter 2015, 20 – 26.)

3.3.6 Zeta-potentiaali

Kiintoainepartikkeleiden varausta voidaan mitata zeta-potentiaalimittauksella. Kuituihin pintavaraukset syntyvät, kun kuidun karboksyyli- ja sulfonihapporyhmät hajoavat. (Uotinen 2016, 26.) Zeta-potentiaali voi vaihdella lietteen pH-arvon ja ionivahvuuden mukaan (Perlmutter 2015, 17) mutta useimpien selluloosamassojen pintavaraukset ovat anionisia, eli negatiivisia (Uotinen 2016, 26).

Useimmat hiukkaset saavat pintavarauksen, kun ne sekoitetaan polaariseen liuottimeen, kuten veteen. Pintavarauksen vuoksi kiinteän ja nesteen välille muodostuu sähköinen kaksoiskerros. (Wakeman & Tarleton 1999, 284.) Kaksoiskerros voidaan jakaa Sternin kerrokseen ja diffuusikerrokseen kuvan 10 mukaisesti. Sähköisen kaksoiskerroksen kokonaisvaraus on siten neutraali. (Uotinen 2016, 19.)



Kuva 10. Kaksoiskerroksen rakenne (Uotinen 2016, 19)

Hiukkasten ja suspension välisellä vuorovaikutuksella on vaikutus suotautumiseen (Wakeman & Tarleton 1999, 11; Perlmutter 2015, 17). Tämä korostuu erityisesti tilanteissa, jossa hiukkaset ovat kooltaan pienempiä kuin

muutaman mikrometrin. Hylkimisvoimien alkuperä on liuosionien jakautumisessa hiukkasen varautuneen pinnan ympärille. (Wakeman & Tarleton 1999, 11.) pH-arvolla on vaikutusta pintavarauksiin, siksi sen hallinta on tärkeä myös suodatuksessa (Svarovsky 2009).

3.4 Suotautumiseen vaikuttavat laiteominaisuudet

Suotautumiseen vaikuttavia laiteominaisuuksia ovat käytetty suodatusväliaine eli suodatinmateriaali sekä käytetty ajava voima (Svarovsky 2009). Tässä työssä perehdytään tilanteeseen, jossa ajavana voimana on alipaine.

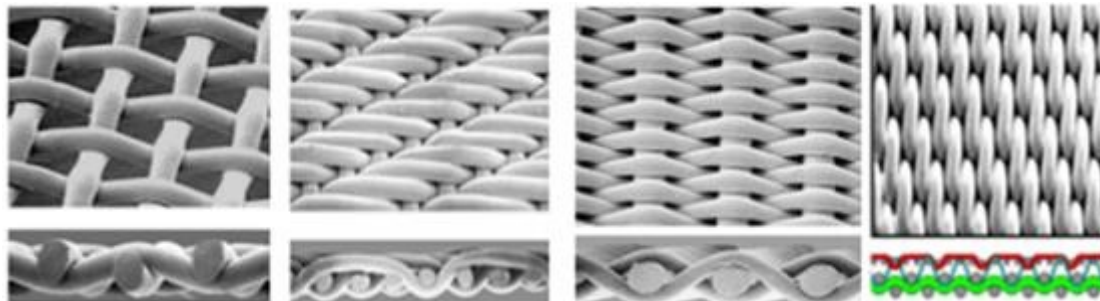
3.4.1 Suodatinmateriaali

Suodatusmateriaali on kriittinen komponentti suodatuksen onnistumiselle (Wakeman & Tarleton 1999, 247; Svarovsky 2009, 296). Suodatinmateriaalin tarkoitus on laskea lävitseen suodos ja pidättää kiintoaine suodatinväliaineen pinnalla (Wakeman & Tarleton 1999, 247). Suodattimen ominaisuuksia ovat kyky pidättää hiukkasia tunkeutumasta väliaineen rakenteeseen, läpäisevyys, valmistusmateriaali sekä kudostyyppi (Wakeman & Tarleton 1999, 5).

Kudotut suodatinkankaat voivat olla valmistettu luonnon- tai synteettisistä materiaaleista. Suodatinkankaiden tyypillisiä synteettisiä materiaaleja ovat nailon, polyesteri, polypropeeni ja polyetyleni. (Svarovsky 2009, 293.) Näiden lisäksi Perlmutter (2009, 10) listaa polyvinyylideenifluoridin (PVDF eli Kynar®), polyeteenieteeniketoni (PEEK) ja fluoripolymeerit kuten ETFE, PTFE ja E-CTFE.

Kudontalangat voivat olla rakenteeltaan kehrättyä katkolankaa, monofilamenttia tai multifilamenttia. Erilaisilla lankarakenteilla saadaan erilaisia ominaisuuksia suodatinkankaaseen. (Svarovsky 2009, 293.) Monofilamentista eli yksisäikeisestä langasta kudotut kankaat ovat tiiviimpiä ja ne on helpompi puhdistaa (Perlmutter 2009, 10). Multifilamenttista langasta, jossa ohuet säikeet on kierretty yhteen, valmistetut kankaat tuottavat usein kirkkaampia suodoksia, mutta niillä on voimakkaampi taipumus likautua (Svarovsky 2009, 296).

Erilaisia peruskudostyyppejä (kuva 11) ovat yksinkertainen kudος, twill-tyyppinen kudος eri versioissa, yksinkertainen käänteinen hollantilainen (PRD) sekä kaksikerroksinen kudος (DLW) (Perlmutter 2009, 10 – 13).



Kuva 11. Yleisimmät kudostyypit vasemmalta oikealle: yksinkertainen kudος, twill-tyyppinen kudος, käänteinen hollantilainen ja kaksikerroksinen kudος (mukaillen Perlmutter 2009, 10-13).

Kudonta vaikuttaa suodoksen kirkkauteen, suodattimen likaantumiseen sekä kakun irtoamiseen kankaasta. Esimerkiksi twill-tyyppiset kudokset soveltuvat usein parhaiten hienojakoisille suspensioille, jossa vaaditaan kirkas suodos. (Svarovsky 2009, 296.)

Suodatinväliaineen valintaan vaikuttavat seuraavat seikat: puhtaan väliaineen läpäisevyys, hiukkasten pidätyskyky sekä likaantuneen väliaineen läpäisevyys. Läpäisevyys ja hiukkasten retentio riippuvat väliaineen rakenteesta, mutta myös väliaineen rakenteen vuorovaikutuksesta hiukkasten muodon ja kokojakauman kanssa. (Wakeman & Tarleton 1999, 247.)

Lisäksi suodatinkankaan valintaan vaikuttaa suodatinkankaan materiaali, lämmön-, kemikaalien- sekä kulutuksen kesto (Svarovsky 2009, 296). Suodatinkankaan valinta on usein kompromissi. Valintaan vaikuttaa se, onko suodatusnopeus, selkeys vai hinta tai käyttöikä tärkein ominaisuus. (Svarovsky 2009, 296.)

3.4.2 Paine

Maan vetovoima saa aikaan painavampien partikkelien laskeutumisen suodoksessa. Ratkaisevana tekijänä on kiintoaineen ja suspensioivan nesteen tiheysero. Mikäli riittävää tiheyseroa ei ole, ja/tai partikkelien hiukkaskoko on

pieni erotteluun kuluva aika, muodostuu liian pitkäksi, suodatuksen kannalta. (Svarovsky 2009, 167.)

Alipainesuodatuksessa kakun läpi imetään ilmaa. Alipainesuodatuksissa tyypilliset alipaineet ovat 0,4 – 0,6 bar. Alipainesuodatusta voidaan käyttää vaarattomilla, nopeasti suotautuvilla suspensiolla sekä nopeasti laskeutuvilla kiinteillä aineilla. (Perlmutter 2015, 33)

Kakun läpi imettävä ilma voi vaikuttaa saostumiseen ja suodoksen likaantumiseen. Erityisesti kylmät ja kuumat suspensiot ovat riskialttiimpia. Likaantumista voidaan seurata tarkkailemalla suodoksia, sekä suodatinkangasta suodatuksen aikana. (Perlmutter 2015, 33.)

3.5 Suotautumisen tehostaminen apuaineilla

Hankalasti suotautuvien suspensioiden (pieni hiukkaskoko ja hidas laskeutuminen) suotautuvuutta voidaan tehostaa keinotekoisesti lisäämällä hiukkaskokoa ja lisäämällä laskeutumisenopeutta (Svarovsky 2009, 167). Tavallisesti muutetaan suspensioituneen kiintoaineen luonnetta joko kemiallisilla tai fysikaalisilla keinoilla tai lisätään suspensioon suodatusapuainetta (Wakeman & Tarleton 1999, 4).

Erityisesti kemialliset esikäsitellyt muuttavat suspensioivan nesteen ominaisuuksia (Wakeman & Tarleton 1999, 4). Kemiallisen aineen avulla voidaan muuttaa joko hiukkasten pintaominaisuuksia, suspensioivan nesteen ominaisuuksia tai tapaa, jossa kiinteä ja neste ovat vuorovaikutuksessa (Wakeman & Tarleton 1999, 283). Kemiallisia esikäsitelyjä ovat koagulointi-flokkulointi sekä pH-arvon säätö. Suspension lämmitys on yksi esimerkki fysikaalisesta esikäsitelystä. (Wakeman & Tarleton 1999, 4.)

Suotautumiseen voidaan vaikuttaa myös pinta-aktiivisten aineiden avulla. Pinta-aktiivisten aineiden avulla saadaan suodatinkakun nestefaasin pintajännitystä vähennettyä, jolloin nesteen poistuminen nopeutuu. (Wakeman & Tarleton 1999, 306.)

3.5.1 Koagulaatio ja flokkulaatio

Koaguloinnissa suodatettavaan liuokseen lisätään koagulantteja, joiden vaikutuksesta suspension varaus muuttuu. Koagulantti valitaan sen mukaan, onko lähtöliuos positiivisesti vai negatiivisesti varautunut. Koagulantiksi valitaan yleensä vastakkaisen varauksen omaava valmiste. (Perlmutter 2015, 17.)

Koaguloitumisen seurauksena hiukkasten väliset sähköiset hylkimisvoimat vähenyvät (Wakeman & Tarleton 1999, 286) ja liuos neutraloituu. Hiukkasten neutraloituminen näkyy suodoksen kirkastumisena. Kun varaus on neutraloitu, pienet suspensoituneet hiukkaset voivat tarttua toisiinsa, muodostaen pieniä mikroflokkeja. Mikäli suodos jää sameaksi, koaguloituminen ei ole täydellistä. (Perlmutter 2015, 17.)

Koagulaatio voidaan saada aikaan useilla menetelmillä, esimerkiksi mekaanisella sekoituksella, elektrolyyttejä lisäämällä, lisäämällä moniarvoisia metallioneita (epäorgaaninen koagulaatio) tai orgaanisia koagulantteja (pienimolekyylipainoisia polymeerejä) (Wakeman & Tarleton 1999, 286 – 291.)

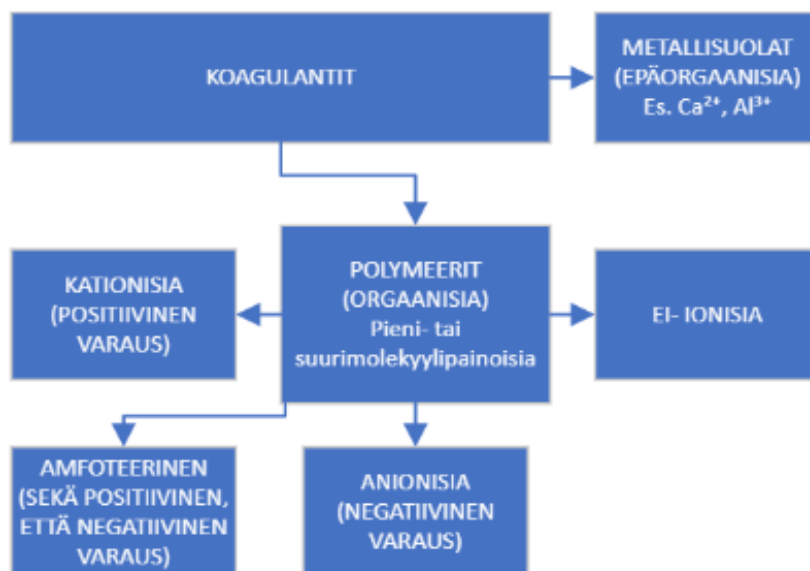
Koagulointia seuraa flokkulaatio. Flokkuloinnissa mikroflokkit muodostavat suurempia, näkyviä hiukkasia. (Perlmutter 2015, 18; Svarovsky 2009, 121.) Flokkulaatiossa pitkäketjuiset polymeerit tai polyelektrolyytit saavat hiukkaset agglomeroitumaan, muodostamalla siltoja hiukkasten välille (Wakeman & Tarleton 1999, 286). Usein prosessiin liittyy myös pintavarauksen neutralointi (Svarovsky 2009, 123).

Flokkulointi tapahtuu usein hitaassa sekoituksessa, jonka avulla mikroflokkit saatetaan kosketuksiin toistensa kanssa. Kun flokit saavuttavat optimaalisen koon ja lujuuden, liete pumpataan suodatusjärjestelmään. Flokkuloituneen lietteen käsittelyyn tulee kiinnittää huomiota, sillä flokit voivat hajota, mikäli siihen kohdistuu liian voimakkaita leikkausvoimia. (Perlmutter 2015, 18.)

3.5.2 Koagulantit

Kuvassa 12 on esitetty koagulanttien karkea jaottelua. Koagulantit voidaan jakaa epäorgaanisiin ja orgaanisiin koagulantteihin. Epäorgaanisia

koagulantteja ovat metallisuolat, kuten aluna (Perlmutter 2015, 17), Wakeman & Tarleton (1999, 297) listaavat tärkeimmiksi epäorgaanisiksi koagulanteiksi seuraavat metalli- ionit: Ca^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} ja Al^{3+} .

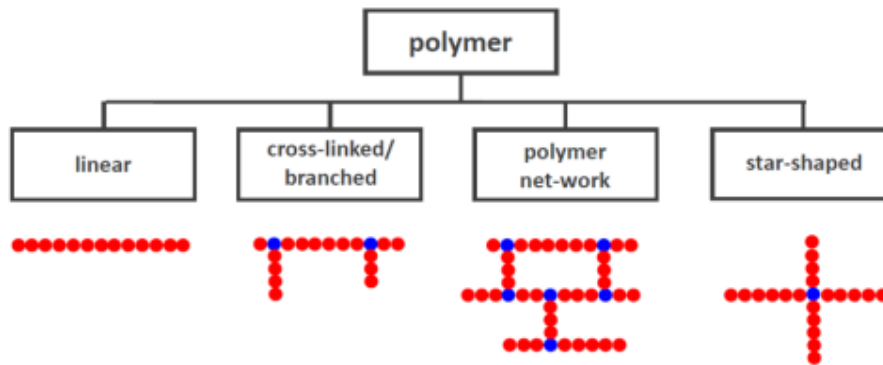


Kuva 12. Koagulanttien karkea jaottelu (mukaillen Wakeman & Tarleton 1999; Perlmutter 2015)

Orgaaniset koagulantit ovat synteettisiä, vesiliuoksia yhdisteitä, polymeerejä. Polymeerit koostuvat pienempien molekyylien muodostamista pitkistä ketjuista. Polymeerit voivat olla varaukseltaan joko kationisia, anionisia tai ei-ioniisia (Perlmutter 2015, 17.) tai amfoteerisia, jolloin ne sisältävät sekä kationisen, että anionisen varauksen (Wakeman & Tarleton 1999, 293 – 295).

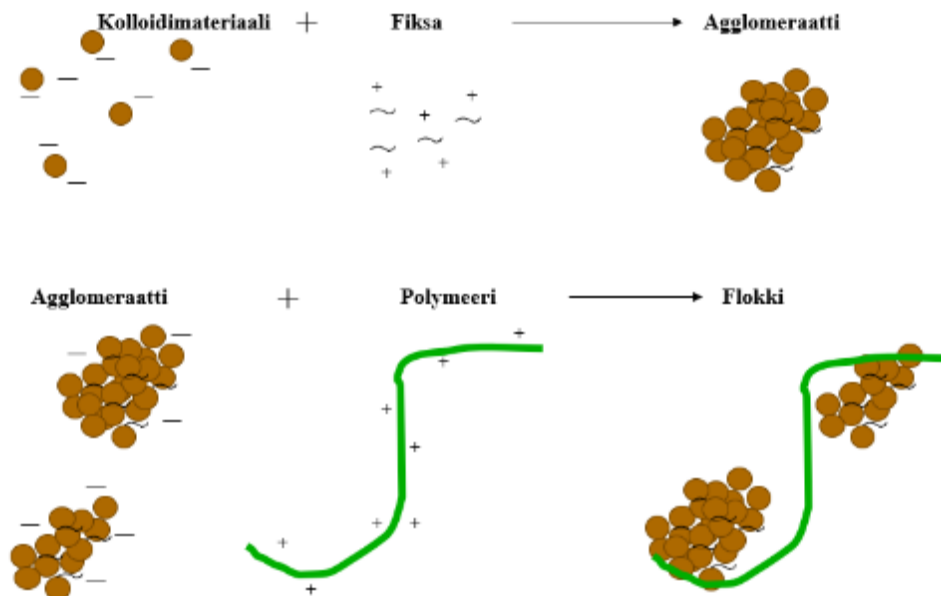
Kemialliselta rakenteeltaan synteettiset orgaaniset polymeerit voivat olla polyakryyliamideja (PAM), polyetyleneimiinejä (PEI), poluvinyyliamiineja (PVAm), polyetyleneioksidiä (PEO) tai poly-DADMAC- rakenteisia. Paperinvalmistuksessa yleisimmin käytössä ovat polyakryyliamidi tai polyetyleneimiini pohjaiset retentiokemikaalit. (Bilitewski ym. 2012.)

Polymeerit voivat olla rakenteeltaan hyvinkin erilaisia. Kuvassa 13 on nähtävissä erilaisia polymeerirakenteita. Rakenne voi olla lineaarinen, monella tapaa haaroittunut tai ristikkomainen.



Kuva 13. Rakenteeltaan erilaisia polymeerejä (Korhonen 2023)

Molekyylipainon mukaan polymeerit voidaan jakaa pienimolekyylipainoisiin tai suurimolekyylipainoisiin polymeereihin (Wakeman & Tarleton 1999, 293 – 295). Pienimolekyylipainoisia polymeerejä kutsutaan myös lyhytketjuisiksi polymeereiksi ja vastaavasti suurimolekyylipainoisia pitkäketjuisiksi polymeereiksi (Korhonen 2023).



Kuva 14. Eri molekyylipainoisten polymeerien toimintatapa (Korhonen 2023)

Pienimolekyylipainoisissa polymeereillä (kuvassa 14 Fiksa) menetelmä perustuu varauksen neutraloimiseen. Monissa sovelluksissa on eduksi, että flokkulantin varaus on päinvastainen hiukkasten varaukseen nähden. Useimmat luonnossa esiintyvät hiukkaset ovat negatiivisesti varautuneita eli anionisia, jolloin niiden koagulointiin käytetään kationisia koaguloitainia. (Wakeman & Tarleton 1999, 294.)

Suurimolekyylipainoisilla polymeereillä menetelmä perustuu synteettisen polymeerin muodostamaan siltaan hiukkasten välille (kuvassa 14 polymeeri). Pitkäketjuiset polymeerimolekyylit adsorboituvat hiukkasten pintoihin. Jotta silloittava flokkulaatio toimisi, on polymeerisilmukat oltava riittävän pitkiä. (Wakeman & Tarleton 1999, 295.)

3.5.3 Suodatusapuaineen valinta

Koagulantin valintaan ja annostelumäärään vaikuttavat monet seikat, kuten kiintoainepitoisuus, hiukkaskokojakauma, pintakemia, pH-arvo sekä elektrolyyttipitoisuus (Svarovsky 2009, 6).

Massan pH-arvo vaikuttaa koagulanttien toimintatehoon (Uotinen 2016, 24). Matalilla pH-arvoilla on todettu ionittomien polymeerien tai vähän ionisoitujen polymeerien toimivan parhaiten. Orgaanisilla suspensioilla kationiset polymeerit ovat osoittautuneet toimivimmiksi. (Wakeman & Tarleton 1999, 296.) Sulfo-nihapporyhmän sisältävät flokkulantit ovat vähemmän herkkiä pH-arvon vaihteluille ja säilyttävät anionisen luonteensa myös alhaisilla pH-tasoilla (Wakeman & Tarleton 1999, 298).

Wakeman & Tarletonin (1999, 296 – 298) mukaan matalan molekyylipainon polymeerit soveltuvat parhaiten vakuumi- ja painesuodatukseen. Korkeamman molekyylipainon polymeerit soveltuvat sedimentointi-, sentrifugointi- ja hihnasuodatukseen. Epäorgaanisessa suspensiossa ei-ioniset ja anioniset flokkulantit toimivat parhaiten. Orgaanisessa suspensiossa kationiset polymeerit ovat yleensä tehokkaimpia.

4 SUOTAUTUMISEN JA PESUN TESTAUS

Suodatuksen testaus on avainasemassa sopivan suodatustekniikan valinnassa. Testauksessa perehdytään suodatettavan lietteen ominaisuuksiin (Perlmutter 2015, 21), suodatinkankaan valintaan (Svarovsky 2009, 296) sekä mahdollisten suodatusapuaineiden testaukseen (Perlmutter 2015, 21).

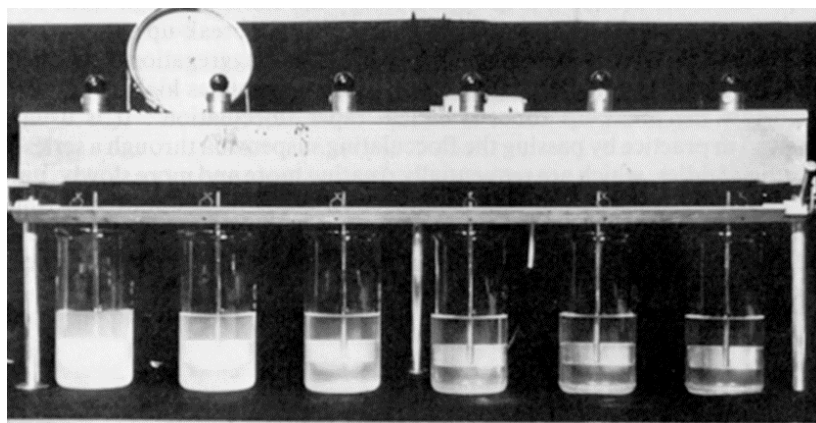
Suodatustestaus on lietteen ominaisuuksiin perehtymistä. Näihin ominaisuuksiin voidaan varautua vain rajallisesti. Niillä on kuitenkin suuri merkitys koko

suotautumisprosessiin. (Perlmutter 2015, 21.) Kaikki tekijät eivät välttämättä ole tiedossa kaikissa suodatussovellutuksissa. Tavoitteena on kuitenkin löytää käytännössä toimiva ja sopiva menetelmä ja testaustapa. (Perlmutter 2015, 21.)

Testattava liete tulisi olla mahdollisimman edustava ja samanlaista kuin todellisessa tilanteessa, tuotanto-olosuhteissa. Mitä enemmän suodatettavasta aineesta on tiedossa, sen parempi. Kiintoainepitoisuus ja viskositeetti ovat ominaisuuksia, jotka olisi hyvä tietää, sillä ne vaikuttavat merkittävästi suotautuvuuteen. Näiden lisäksi suodoksesta on helppo mitata pH-arvo, lämpötila sekä hiukkasten muoto ja kokojakauma. (Perlmutter 2015, 26.)

Suodatinkankaan testausta voidaan tehdä kolmella menetelmällä: laboratorio-kokeilla, pilot-mittakaavassa sekä tuotantomittakaavassa. Laboratoriokokeet tehdään yleensä büchner-suppilolla. Suodatinkangas laitetaan suppiloon ja suodatettava liete kaadetaan suppiloon. Mitattavia ominaisuuksia ovat suodoksen kirkkaus ja suotautumisaika. (Svarovsky 2009, 296.) Pilot-mittakaavan ja erityisesti tuotantomittaluokan testaukset antavat kuitenkin luotettavamman kuvan suotautumisesta. Optimaalisen kankaan valinnassa usein joudutaan turvautumaan yrityksen ja erehdyksen kautta löytyvään ratkaisuun. (Svarovsky 2009, 298.)

Flokkulointiaineen toimintaa voidaan testata kuvan 15 mukaisella purkkitestillä. Testillä voidaan testata samanaikaisesti useampia suodatusapuaineita, niiden annoksia ja erilaisia suodatusolosuhteita, kuten pH-arvon vaikutusta. (Svarovsky 2009, 139 – 140.)



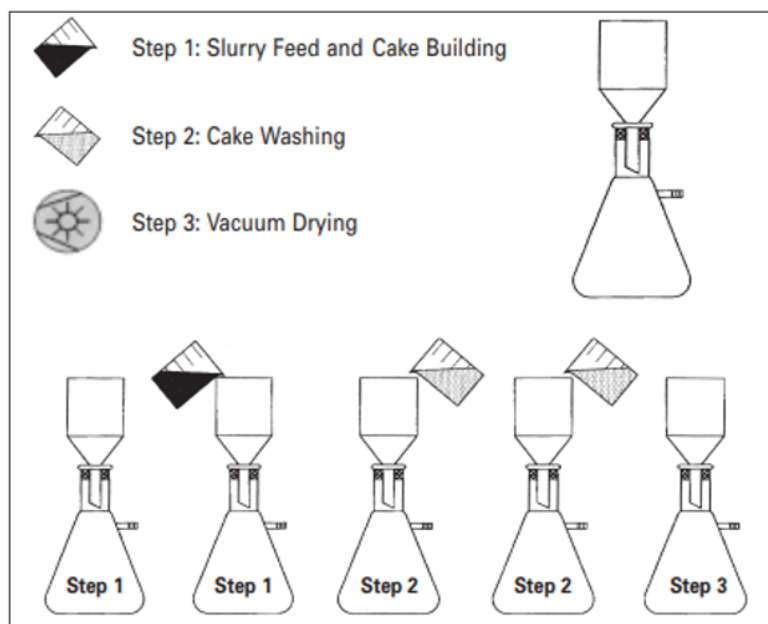
Kuva 15. Purkkitesti (Svarovsky 2001, 139)

Testissä asetetaan 4 – 6 rinnakkaista pyöreä n. 1 l kirkasta dekanterilas, joihin annostellaan suspensiota ja testattavaa kemikaalia. Noin 1 min ajan suspensiota sekoitetaan voimakkaammin, homogeenisen suspension saavuttamiseksi. Sekoitusta voidaan jatkaa hitaammin, kunnes sekoitus pysäytetään. (Svarovsky 2009, 139 – 140.)

Sekoituksen pysäytyksen jälkeen laskeutumisnopeus määritetään visuaalisesti. Laskeutumisnopeutta ja suodoksen sameutta voidaan myös mitata. Laskeutumisnopeudesta voidaan muodostaa taajuusjakauma, jonka avulla voidaan määrittää flokkulointiaineen toimintaa (Svarovsky 2009, 139 – 140.)

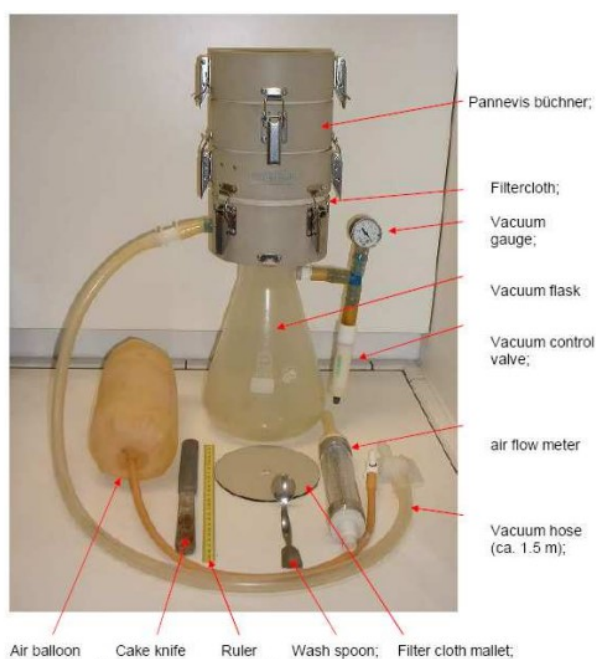
Kiinnitysaineen toimintaa voidaan testata fixing- testillä, jossa kationista fiksatiivia annostellaan näytteeseen ja mitataan sameutta. Kolloidisten hiukkasten kiinnittyessä kuituun sameus pienenee. Sameus kertoo kolloidisten aineiden määrästä liuoksessa. Sameus kasvaa dispergoituneiden kolloidisten aineiden lisääntymisen myötä. Sameuden mittaamiseksi massanäyte suodetaan tai sentrifugoidaan ennen mittausta. (Ahlgren & Lindberg 2020.) Kolloidisilla partikkeleilla on suuri pinta-ala ja ne voivat olla anionisesti varautuneita (Ahlgren & Korhonen 2020).

Indeksoivan syrjäytyspesurin pesua voidaan testata laboratoriomittakaavassa kuvan 16 mukaisella menetelmällä. Testaukseen soveltuu büchner-suodatuslaitteisto. Ensimmäisessä vaiheessa massa kaadetaan suodatinsuppiloon ja annetaan kakun muodostua. Toisessa vaiheessa pesuneste kaadetaan kakun päälle ja imetään kakun läpi suodatinpulloon. Lopuksi kakku kuivataan ime-mällä ilmaa kakun läpi. (Perlmutter 2004.)



Kuva 16. Massan pesun testaaminen büchner-suodatuslaitteiston avulla (Perlmutter 2004)

Ensimmäisen vaiheen testauksen tavoitteena on minimoida suodatusaika ja kiintoaineen menetys suodokseen. Toisessa vaiheessa testataan syrjäytyspesua, tavoitteena minimoida pesusuhde. Indeksoivassa syrjäytyspesurissa on myös puristin, jota voidaan simuloida kaasuavusteisella puristimella (a gas-assisted “pressing-plug.”). Viimeisessä vaiheessa tapahtuu kakun kuivaus vaakuumilla. Läpi virtaavaa ilmaa voidaan haluttaessa lämmittää. Kuivausvaiheessa pyritään optimoimaan kuivausaikaa ja kakun loppukosteutta. (Perlmutter 2004.)



Kuva 17. Larox büchner -laitteisto (Kemppainen 2010)

Vakuumisuodatuksen testaukseen sekä horisontaalivakuumisuodatuslaitteistojen mitoitukseen on myös saatavissa Laroxin valmistama büchner-koelaitteisto (kuva 17). Laitteiston avulla voidaan mallintaa nauhavakuumisuodattimen toimintaa. Sen avulla voidaan myös testata suotautumista ja kakun pesua. (Kemppainen 2010, 24 – 27.)

5 PILOT-MITTAKAAVAN KOKEET

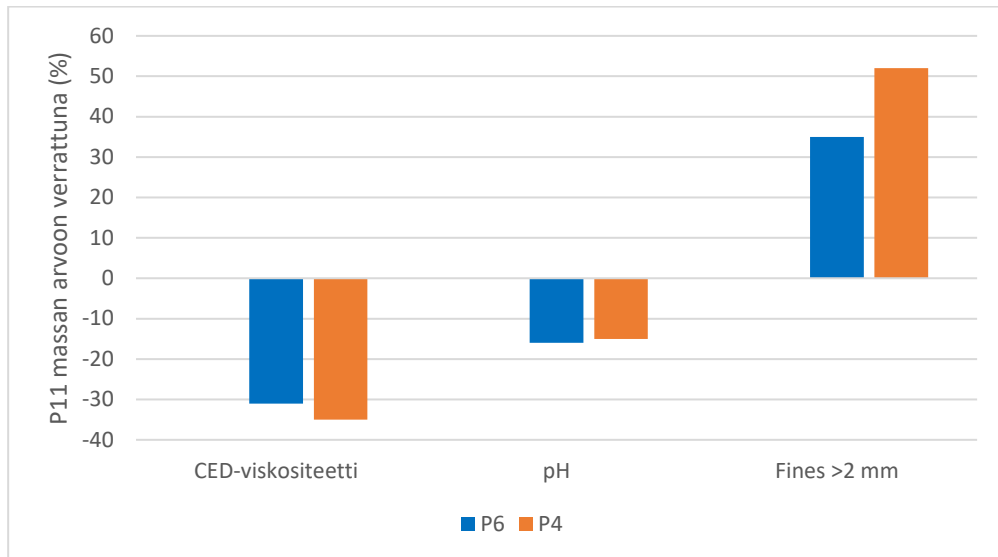
Ensimmäinen osa kokeellisesta osuudesta suoritettiin yhteistyökumppanin koelaitoksella. Käytössä oli juuri käyttöön otettu BHS-Sonthofen Groupin teollisuusmittakaavan indeksoiva jatkuvatoiminentasoviirapesuri.

Lähtömassat ovat muokkauksen jälkeen erittäin happamia. Pesun tavoite on pestä massaa niin, että sen pH-arvo nousee neutraalille tasolle. Massat laimennettiin noin 3 %:n sakeuteen, jolloin hyödynnettiin laimennus-sakeutuspesua. Syrjäytyspesu tapahtui itse laitteella, jolloin suodoskakun päälle annosteltiin pesuvettä suotautumaan kakun läpi. Pesun jälkeen tavoitteena oli saada valmis kakku mahdollisimman kuivaksi.

5.1 Lähtömassat

Pilot-kokeiden lähtömassat on valmistettu kesällä 2022 Xamkin Kuitu-laboratoriossa Savonlinnassa. Lähtömassoista oli tiedossa CED-viskositeetti, hienoaines (Fines < 2 mm %-osuus) sekä pH-arvo. CED-viskositeetti ja hienoaineksen osuus vaikuttavat suotautumiseen ja pH-arvon avulla seurattiin massan peseytyvyyttä.

Lähtömassat erosivat toisistaan hienoaineksen määrän, CED-viskositeetin ja pH-arvon osalta kuvan 18 mukaisesti. Kuvassa erot on esitetty prosentteina P11-massaan verrattuna.



Kuva 18. Lähtömassojen ominaisuuksia verot verrattuna P11-massaan

Lähtötietojen perusteella arvioitiin, että P11-massa olisi helpoiten suotautuvaa suurimman CED-viskositeetin ja pienimmän hienoainesmäärän perusteella. Vaikeimmin suotautuvaksi arvioitiin P4-massa.

CED-viskositeetin mittaaminen lähtömassoille on suoritettu liuottamalla selluloosamassaa kuparietyleenidiamiini-liuokseen (CED-liuos). Liuotuksen jälkeen viskositeetti määritetään kapilaariviskosimetrissä, mittaamalla tietyn suuruisen nestemäärän valumisajan. Määrittäminen on standardin ISO 5351:2010 mukainen ja tulos ilmoitetaan ml/g. (Massan viskositeetti kuparietyleenidiamiiniliuoksella s.a.)

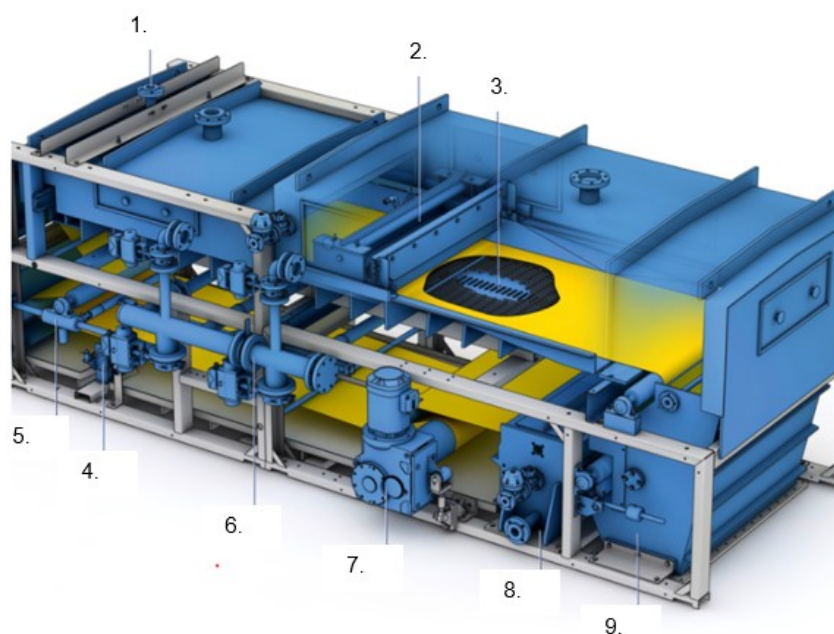
CED-viskositeetin avulla voidaan määrittää selluloosan polymerisoitumisaste (DP I. degree of polymerisation). Polymerisoitumisaste kuvaa selluloosaketjujen pituutta. Esimerkiksi hydrolyysireaktiot aiheuttavat selluloosan molekyyliketjun pilkkoutumista, alentaen CED-viskositeettiarvoa. (Maraghechi ym. 2023.)

Fines <2 mm (%) eli hienoaineksen osuus on määritetty FS5-kuituominaisuuksien määrittämisellä. Hienoaineksen määrä vaikuttaa vedenpoistoon. Hienoaineksen määrän kasvu heikentää vedenpoistoa viiralta. Lisäksi tiedetään, että hienoaines ei sido vettä samalla tavalla kuin kuidut. (Uotinen 2016, 16.)

pH-arvon mittaus on suoritettu pH-mittarilla. Mittaus on potentiometrinen. Mittauksessa määritetään vetyionien aktiivisuutta. Työelektrodin puoliläpäisevä kalvon uloin kerros vaihtaa alkaalimetalli-ioneita vesiliuoksen vetyioneihin, jolloin kalvon sisä- ja ulkoliuoksen välille syntyy jännite-ero. Jännite-ero mitataan referenssielektrodilla. Yhtä pH-yksikköä vastaava jännite muutos on n. 59,2 mV. Vetyioniaktiivisuuden ollessa korkea siihen on liuennut runsaasti happoa ja liuosta kutsutaan happamaksi. (Uotinen 2016, 24.)

5.2 Laitteiston esittely

BHS-Sonthofen Groupin jatkuvatoiminen indeksoiva tasoviirapesuri (kuva 19), jonka avulla voidaan kiinteä aine erottaa nesteestä ja tämän jälkeen suorittaa kakun pesu.



Kuva 19. BHS-Sonthofen Groupin jatkuvatoiminen indeksoiva tasoviirapesuri 1. pestävän massan syöttö, 2. kakun pesuyksikkö/ kaatolaatikko, 3. alipainekaukalo (keltainen suodatinviira), 4. viiran kiristysyksikkö, 5. viiran ohjain, 6. suodoksen poistojärjestelmä, 7. käyttö ja moottori, 8. viiran pesuysikkö, 9. kaavari ja kakun poistolaitteisto (BHS-Sonthofen Group 2018)

Pestävän massan syöttö (1.) viiralle tapahtuu jatkuvatoimisen annostelulaitteen avulla. Annostelulaite levittää massan tasaisesti viiralle, jossa kakun muodostus alkaa. Viira, jolla kakku on, liikkuu vaiheittain alipainekaukaloiden (3.) yli.

Laitteistossa on yhteensä 13 alipainekaukaloa. Aina, kun viira pysähtyy, alipaine kytkeytyy päälle. Alipaineen tasoa voidaan säätää, kuitenkin niin, että alipaine on kaikissa laatikoissa sama. Yhden alipainesequenssin kesto on 45 s, jonka jälkeen viiran siirtymäaika 15 s. Siirtymäaikana alipaine ei ole kytkettynä. Massan läpimenoaika on siis noin 13 minuuttia.

Kakun pesu tapahtuu joko laimennus-sakeutusmenetelmällä tai syrjäytysmenetelmällä. Pesuveden syöttöön voidaan käyttää kahta kaatolaatikkoa (2.), joiden avulla vettä voidaan syöttää pestävälle kakulle. Pesuveden syöttö kaatolaatikosta on jatkuvatoiminen. Kaatolaatikoiden paikkaa voidaan säätää ja ne voidaan haluttaessa kytkeä pois käytöstä. Tehdyissä Pilot-ajoissa ensimmäinen kaatolaatikko oli sijoitettu 3-4-imulaatikoiden rajalle sekä toinen 5-6-imulaatikoiden rajalle.

Suodokset eri lohkoista voidaan kerätä omiksi jakeikseen ja ottaa talteen (6.) tai hyödyntää vastavirtapesussa. Tällä hetkellä suodoksesta ei ole mahdollista saada näytteitä, mutta ne kerätään talteen neutralointia varten.

Kuivaus tapahtuu alipainekaukaloiden (3.) alipaineen ja mekaanisen puristimen avulla (ei kuvassa). Laitteistoon on mahdollista lisätä höyrylaatikko, pesun- ja kuivauksentehostamiseen.

Kakun poiston (9.) jälkeen viira siirtyy pesuun (8.). Pesu tapahtuu ruiskuttamalla samanaikaisesti vettä viiran ylä- ja alapuolelle. Pesusuuttimet ovat viuhkat 45° kulmassa konesuuntaan. Pesusuihkut ovat päällä liikutussequenssin mukaan.

Viiran kiristysyksikön (4.) ja viiranohjaimen (5.) avulla viira saadaan kestämään laitteen moitteettoman toiminnan kannalta vaaditussa kireydessä ja asennossa (BHS-Sonthofen Group 2018).

5.3 Koejärjestelyt

Testit suoritettiin kolmen perättäisen päivän aikana. Massat pulpperoitiin 3 %:n sakeuteen pystypulpperilla. Pulpperointiaika oli 5 min. Osa massoista

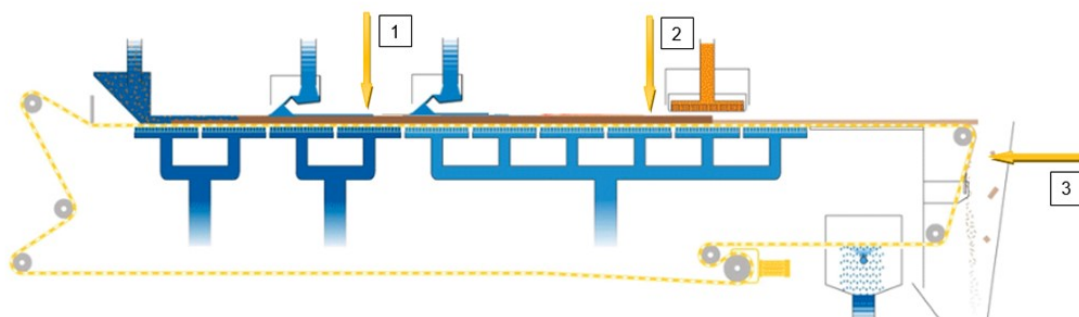
pulpperoitiin useammassa erässä. Massan sakeus tarkistettiin pikakap-mitauksella. Massan lämpötila vaihteli 10 – 16 °C.

Massa ajettiin syöttösäiliöstä viirille 0,4 – 0,6 l/s. Alipaine alipainekaukaloissa säädettiin 0,3 bar. Ajossa olevien alipainekaukaloiden määrä vaihteli, ajon mukaan.

Ajo pyrittiin saamaan tasaiseksi, ennen näytteiden ottoa. Referenssinäytteet otettiin ajosta, jossa pesuvettä ei syötetty. Pesuveden syöttö aloitettiin, kun massa saatiin suotautumaan hyvin sellaisenaan. Pesuveden määrää lisättiin asteittain, kunnes se ei enää pystynyt suotautumaan ja kakku jäi märäksi.

5.4 Näytteet ja niiden analysointi

Näytteet kerättiin ajon aikana muodostuvista kakuista ajon eri vaiheista, yhteensä kolmesta eri kohdasta kuvan 20 mukaisesti. Näytteenottokohdat olivat: 1. ensimmäisen kaatolaatikon jälkeen (imulaatikko 5), 2. ennen puristinta (imulaatikko 11) ja 3. valmiista kakusta (puristimen jälkeen). Suodoksista emme saaneet näytteitä, laiteteknisien ratkaisuitten takia.



Kuva 20. Näytteenottopisteet tasoviirapesurilla (mukaiillen BHS-Sonthofen Group 2018).

Koeajon aikana kakkunäytteistä mitattiin pH-arvo ja kuiva-ainepitoisuus. Kuiva-ainepitoisuus mitattiin pikakuivaimen avulla. Näytteet kerättiin talteen ja säilytettiin jääkaappilämpötilassa.

Näytteet mitattiin uudelleen vakioituissa (mittauslämpötila 24,5 °C) laboratorio-olosuhteissa. pH-arvon mittaus kakuista osoittautui haasteelliseksi, sillä kuiva-ainepitoisuus oli osassa massakakuista melko korkea. Kakuista saatiin

kuitenkin ruuvipenkissä puristamalla suodosta (kuva 21), jonka pH-arvo pysyttiin mittaamaan. pH-mittarina oli Metrohm 013 pH Meter ja se kalibroitiin pH-puskureilla 1 ja 7. Tarkistus suoritettiin pH-liuoksella 4.



Kuva 21. Suodoksen puristaminen korkean kuiva-aineen massasta.

Kuiva-ainepitoisuus mitattiin rinnakkaismittauksella virallisen kuiva-ainemäärityksen mukaan (105 °C, yön yli). Kuiva-ainepitoisuuden ja pH-mittauksen lisäksi näytteistä tehtiin kuituominaisuuksien määrittäminen FS5-kuituanalysaattorilla.

5.5 Pilot-koeajojen yhteenveto

Koeajot aloitettiin P4-massalla, jonka CED-viskositeetti oli matalin ja se sisälsi hienoainesta eniten. Massaa ei saatu suotautumaan lisälaimennuksesta ja referenssipolymeerin (apuaaine 0) lisäyksestä huolimatta. P6-massa oli CED-viskositeettiarvon ja hienoaineksen määrän perusteella P4- ja P11-massojen väliltä. Myöskään P6-massaa ei saatu suotautumaan, eikä peseytymään.

P11-massan CED-viskositeetti oli korkein ja hienoaineksen määrä matalin testatuista massoista. Olettamus oli, että tämä massa olisi todennäköisimmin mahdollista saada suotautumaan ja peseytymään. Massa saatiin suotautumaan ja peseytymään toivotulla tavalla. Lisäksi pääsimme testaamaan pesuveden syöttöä eri vesimäärillä. Pilot-koeajojen yhteenveto on kuvattu tarkemmin liitteessä 5.

6 LABORATORIOMITTAKAAVAN KOKEET

Toisessa osassa testattiin suotautuvuutta laboratorio-olosuhteissa UPM:n Tutkimuskeskuksen pilotoinnin tiloissa. Testit tähtäsivät ensisijaisesti suotautumisen parantamiseen.

Testeissä käytetyt massat olivat pilot-kokeissa käytettyjä massoja. P11-massa oli täysin samaa, alkuperäistä massaa, joka pulperoitui laboratoriossa. P6-massasta ei ollut riittävästi alkuperäistä näytettä suodatuskokeisiin, joten siitä käytettiin pilot-kokeissa pulperoitua massaa. Alkuperäisestä P6-massasta saatiin kuitenkin referenssinäyte vertailuun, joka pulperoitui laboratoriossa. P4-massana kokeissa käytettiin pilot-kokeissa käytettyä, pilot-kokeissa pulperoitua massaa, johon pilot-kokeissa oli lisätty kationista polyakryyliamidia (CPAM).

Suotautumiskokeissa testattiin lämpötilan, viiran, sakeuden vaikutusta suotautumiseen. Lisäksi testattiin neljää erilaista suodatusapuainetta suotautumisen parantamiseksi.

6.1 Laitteiston esittely

Laboratoriokokeet suoritettiin kuvan 22 mukaisella büchner-suodatuksen avulla. Suodatusolosuhteet vakioitiin muiden paitsi kulloinkin tutkittavan ominaisuuden osalta. Alipainelinjaan lisättiin alipainemittari, jonka avulla alipaineen säätö- ja seuranta tapahtui.



Kuva 22. Laboratoriokokeiden suodatusjärjestelmä

Suodattimena toimivaa viiran ja büchnerin välistä tilaa jouduttiin tiivistämään ohivuotojen estämiseksi. Tiivistykseen testattiin erilaisia painoja, huonoin tuloksin. Tiivistykseen soveltui parhaiten viiran ala/sivuun liimattava tiiviste-nauha.

6.2 Koejärjestelyt

Massan kaadettiin büchner-suppiloon alipaineen ollessa pois kytkettynä. Kaadon jälkeen pidettiin 20 s massan laskeutumisaika, jonka jälkeen nostettiin alipaine 0,3 bar. Suodatusta tehtiin jokaisesta näytepisteestä vähintään kaksi. Laboratoriosuodatuksesta testattiin suodatusaika, suodoksen sameus sekä laskettiin viiraretentio-prosentti. Suodatuskokeiden muuttujista kooste liitteessä 2.

6.2.1 Lämpötilan vaikutus suotutumiseen

Lämpötilan vaikutusta suotautuvuuteen testattiin neljällä eri lämpötilalla +15, +25, +40 sekä +60 °C. Suodatettavan suspension lämpötila pidettiin tavoitelämpötilassa lämpökaapin tai lämminvesihauteen avulla. Testaus tehtiin kaikilla testattavilla massoilla (P4, P6 ja P11). Viiroina oli tasoviirapesurilla käytössä oleva viira 1. ja viiratestien perusteella valittu viita 5.

6.2.2 Viiran vaikutus suotautumiseen

Viirujen testaus suoritettiin viidellä kansainvälisen viiratoimittajan toimittamalla erilaisella viiralla. Viirat poikkesivat toisistaan kudontakuvion, painon (g/m²), ilman läpäisevyys (l/dm²/min), paksuuden (µm), loimikuidun ja kudekuidun materiaalin, viiran paksuuden (mm) sekä venymän perusteella. Testit tehtiin P11-massalla 25 °C:n lämpötilassa. Taulukko viirujen ominaisuuksista liitteenä 1.

6.2.3 Sakeuden vaikutus suotautuvuuteen

Sakeuden vaikutusta testattiin P11-massalla. Massa laimennettiin 3, 6,5 ja 10 %:n sakeuteen. Vertailussa käytettiin viiraa 1 ja suodatukset tehtiin + 40 °C:n lämpötilassa.

6.2.4 Suotautumisapuaineen vaikutus suotautuvuuteen

Suotautumisen parantamiseen testattiin erään kansainvälisen kemikaalitoimitajan toimittamaa neljää erilaista suotautumisen apuainetta. Testattavana olivat seuraavan tyyppiset valmisteet:

1. Apuaine 1
Kemialliselta rakenteelta Polyetyleni-imiini (PEI) voimakkaasti kationinen, matala molekyyllipaino, varaustiheys kasvaa pH-arvon laskiessa, verkkopolymeeri-rakenne.
2. Apuaine 2
Koagulantin ja flokkulantin yhdistelmä. Matalakationinen, kemialliselta rakenteeltaan polyakryyliamidi (CPAM), lineaarirakenteinen polymeeri.
3. Apuaine 3
Lujuuspolymeeri, kiinnittää hienoaineksen kuituun ja tehostaa veden poistoa. Rakenteeltaan matalakationinen, lineaarirakenteinen polyvinyyliamiini (PVAm), varaustiheys kasvaa pH-arvon laskiessa.
4. Apuaine 4
Pesuntehostaja. Pinta-aktiivinen aine, joka sisältää nonionisia ja anionisia komponentteja.

Apuaineen annos laskettiin kauppatuotteena suosituksen ylärajan mukaan. Apuaineita laimennettiin ennen annostelua. Taulukossa 1 nähdään apuaineiden laimennokset ja annostelumäärät.

Taulukko 1. Apuaineiden annostelumäärät ja laimennokset

| Apuaine | Annostus (g/ abst) | Laimennos |
|---------|--------------------|-----------|
| 1 | 6 000 | 1:100 |
| 2 | 1 000 | 1:1000 |
| 3 | 10 000 | 1:100 |
| 4 | 1 000 | 1:1000 |

Testit tehtiin büchner-suodatuksella, viiralla 1. Massana oli P6. Suodatuslämpötila oli + 40 °C. Apuaineiden annostelu suoritettiin juuri ennen suodatusta. Sekoitus tapahtui siirtämällä suodosta dekanterilasista toiseen 4x apuaineen annostelun jälkeen. Tässä työssä ei lähdetty testaamaan suodoksen laskeutumisnopeutta.

6.3 Näytteet ja niiden analysointi

Suodatuksissa mitattiin suotautumisaika, suodoksen sameus sekä laskettiin viiraretentio-prosentti. Näiden mittareiden avulla pyrittiin selvittämään suotautumisen mahdollisuutta tasoviirapesurilla sekä menetettävää hienoainesta. Lisäksi mitattiin lähtösuspension, kakun ja suodoksen kuiva-ainepitoisuus, kakun paksuus, viiralle kaadettu massan ja suodoksen määrä, lämpötila.

Valikoiduista kakuista tehtiin kuituominaisuuksien määrittäminen FS5-kuituanalyysimenetelmällä, sekä valikoiduista suodoksista partikkelikokoanalyysi PSA1190-menetelmällä. Suotautumisaika mitattiin sekuntikellolla. Ajanotto aloitettiin heti massan kaadon jälkeen. Tuloksissa suotautumisajasta vähennettiin odotusaika (20 s), jonka aikana ei alipainetta ollut.

Sameus mitattiin suodatuksen suodoksesta. Mittarina käytettiin Turbiquant 1 100 IR sameusmittaria. Sameuden mittauksen aluksi tarkistettiin mittarin toiminta tarkistusliuoksilla 10 NTU sekä 1 000 NTU. Mikäli tulos ylitti mittarin mitausrajan 1 100 NTU, näyte laimennettiin ja mittaus suoritettiin uudelleen. Tulos korjattiin laimennuskertoimen avulla.

Viiraretention laskentaan käytettiin suodosta, jonka kuiva-ainepitoisuus mitattiin suodattamalla suodos punnitulle suodatinpaperille, kuiva-ainemäärityksen mukaan (105 °C, yön yli). pH-arvon mittaus tapahtui 24,5 °C:n lämpötilassa. pH-mittarina oli Metrohm 913 pH Meter ja se kalibroitiin pH-puskureilla 1 ja 7. Tarkistus suoritettiin pH-liuoksella 4.

7 TULOKSET JA POHDINTAA

7.1 Pilot-kokeet

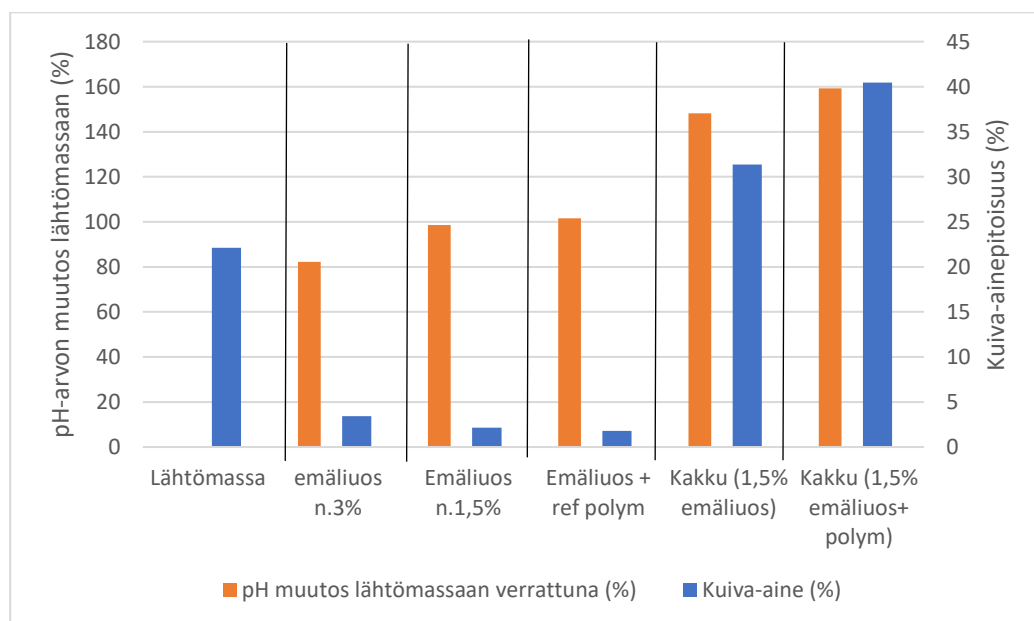
P6- ja P4-massoja ei saatu suotautumaan, eikä peseytyminen onnistunut. P11-massa saatiin suotautumaan ja peseytymään toivotusti. P11-massalla pääsimme testaamaan myös pesuveden syöttöä eri virtausmäärillä. Kakku saatiin alipaineen ja loppupuristuksen avulla riittävän kuivaksi.

Viiran likaantuminen ajojen aikana aiheutti ongelmia massan pesuun ja suotautumiseen. Erityisen hankala tilanne oli massalla P4, jolla viiran

pesulaitteisto ei pystynyt pesemään viiraa, vaan viira tukkeutui massasta kokonaan. Massan laimentaminen puolella näytti silmämääräisesti parantavan suotautumista, samoin polymeerin lisääminen, mutta todellisuudessa suotautumisessa ei havaittu parantumista. P6-massalla havaittiin saman tyyppistä ongelmaa kuin massalla P4. P11-massan kanssa suotautumista haittaavaa, viiran likaantumisongelmaa ei havaittu.

7.1.1 P4-massa

P4-massa osoittautui näissä olosuhteissa suotautumattomaksi. Myöskään syrjäytyspesu ei onnistunut. Kuvassa 23 nähdään pH-arvon muutos esitetynä lähtömassan 0 tasoon verrattuna, sekä kuiva-ainepitoisuuden muutokset. Suurin osa pH-arvon muutoksesta johtuu pulperoinnin yhteydessä tapahtuneesta lähtömassan laimentamisesta. Pieniä määriä massa saatiin puristettua kuivaksi (kakkunäytteet) joka vaikutti pH-arvoon nostavasti.

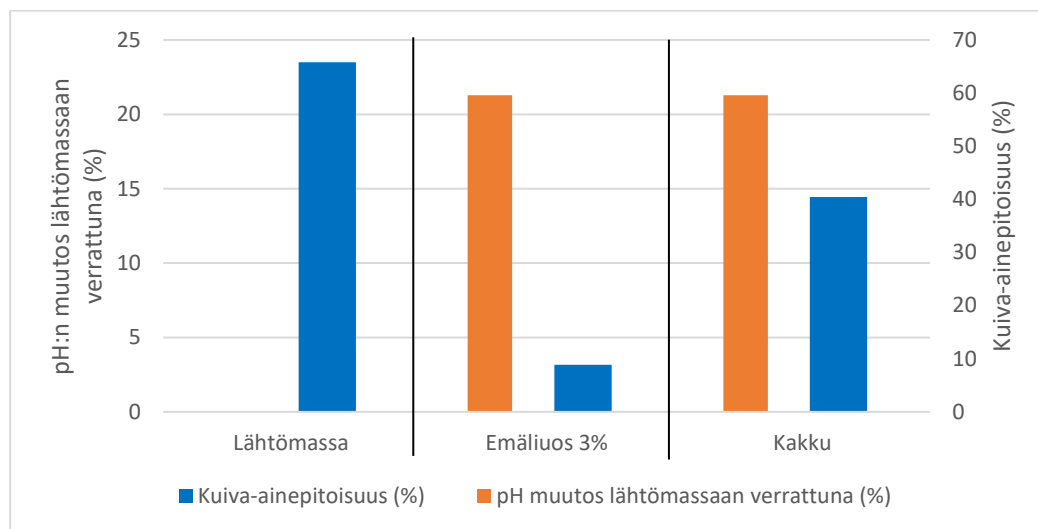


Kuva 23. pH-arvon muutos lähtömassan nolatasoon verrattuna ja kuiva-ainepitoisuudet eri näytepisteillä.

Ajossa ei muodostunut varsinaista kakkua, mutta puristimelta saatiin pieniä määriä kakkupalasia, josta kuiva-ainepitoisuudet on mitattu. Todellinen kuiva-ainepitoisuus ei siis ole näin korkea, sillä suurin osa massasta tuli koneelta vetisenä liuoksena.

7.1.2 P6-massa

P6-massa osoittautui näissä olosuhteissa suotautumattomaksi, eikä syrjäytyspesu onnistunut. pH-arvon muutos lähtömassan nollassa verrattuna on nähtävissä alla olevasta kuvasta 24. Suurin osa muutoksesta johtunee massan laimennoksesta, eikä tällä massalla puristus (kakkunäyte) vaikuttanut pH-arvoon.

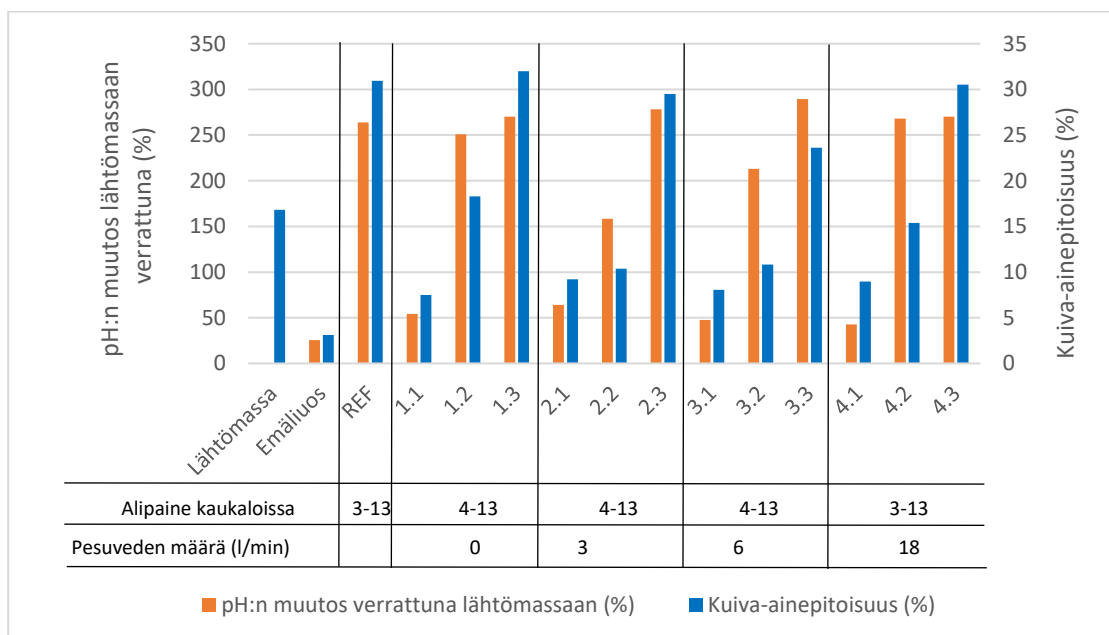


Kuva 24. pH-arvon muutos lähtömassan pH-arvoon verrattuna prosentteina ja kuiva-ainepitoisuudet eri näytepisteille.

Massalla P6 saatiin pieni kakkunäyte, vaikka pääosin massa tuli koneelta vetisenä liuoksena. Myös tässä kuiva-ainepitoisuus ei ole todellinen suotautuvuuden sujuvuuteen nähden.

7.1.3 P11-massa

P11-massa saatiin suotautumaan ja peseytymään toivotulla tavalla. Kuvassa 25 on kuvattu pH-arvon muutos prosentuaalisesti lähtömassan nollassa verrattuna sekä kuiva-ainepitoisuuden muutos. pH-arvon muutos jo ilman pesuveseden syöttöä (koepiste REF) oli tavoitteen mukainen. Todettiin, että pesua edeltävä laimennus oli tehokas.



Kuva 25. P11-massan pH-arvon muutos lähtömassan pH-arvoon verrattuna ja kuiva-ainepitoisuuden muutos pilot- kokeissa.

pH-arvon muutos 3 %:n lähtöliuksesta ensimmäiseen näytepisteeseen on kaikissa koepisteissä maltillinen. Suurempi muutos huomataan ensimmäisen ja toisen näytepisteen välillä. Muutamilla koepisteillä pH-arvo kohoaa jo lähelle tavoitetasoa (koepiste 3).

Näytepisteissä kuiva-ainepitoisuuden nousu on selvästi havaittavissa massan siirtyessä syötöstä puristimen jälkeiseen vaiheeseen. Puristimen ansiosta kuiva-ainepitoisuus kohoaa muutamissa koepisteissä (2 ja 3) jopa kaksi kertaa korkeammaksi, mitä se oli ennen puristinta.

Koepisteellä 3 huomattu puristimen pärskintä näkyy kuiva-ainepitoisuutta laskevasti. Tilanne kuitenkin korjaantui lisäämällä yksi alipainekaukalo ajoon, jonka jälkeen kuiva-ainepitoisuus kohosi jälleen 30 %:n tuntumaan (koepiste 4).

Lisäämällä alipaineessa olevien alipainekaukaloiden määrää, saadaan suotautuvuutta parannettua. Tämän avulla saadaan pesuveden määrää lisättyä, niin, että suotautuminen ja valmiin kakun kuiva-ainepitoisuus säilyy korkealla.

Tuloksista voidaan huomata (kuva 25), että referenssi-koepisteen (pesuveden määrä 0 l/min) ja koepisteen 4 (pesuveden määrä 18 l/min) tulokset

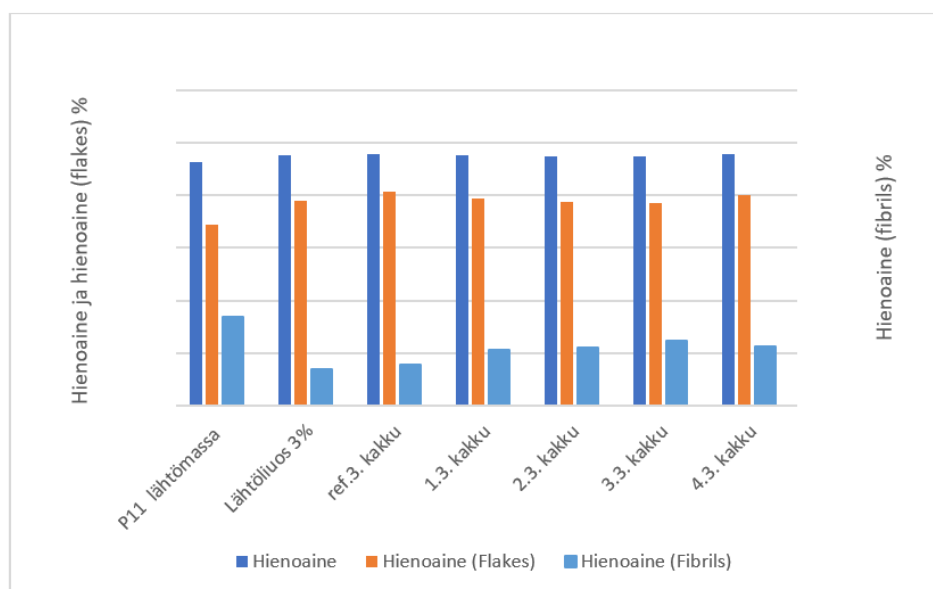
näytepisteellä 3 ovat hyvin lähellä toisiaan pH arvon ja kuiva-ainepitoisuuden osalta. Tämän perusteella voitaisiin sanoa, että pesutulos ei parane pesuveden määrää lisäämällä.

Puristimella on selvä vaikutus pesutulokseen. Puristamalla saadaan vapaata pesunestettä poistettua massasta. Puristin puristaa likaisen veden tehokkaasti pois massasta, parantaen pesutulosta (pH-arvon nousu).

Puristimen avulla massa saatiin hyvin kuivattua. Jatkokäsittelyn kannalta korkea kuiva-ainepitoisuus on toivottu ominaisuus. Massan säilytys on helpompaa ja mikäli massaa kuivataan edelleen, kuivausenergian tarve on pienempi.

Lähtömassasta, 3 %:n lähtöliuoksesta ja eri koepisteiden näytepiste 3. kaikuista tehtiin FS5-kuituanalyysi. Kuvasta 26 nähdään hienoaineksen osuudet eri näytepisteillä. Hienoaineksen kokonaismäärä on kaikissa näytepisteissä suuri. Hienoaineksen kokonaismäärä kasvaa siirryttäessä lähtömassasta lähtöliuokseen ja edelleen kakkuihin. Kaikissa näytepisteissä hiutalemaista hienoainesta on huomattavan suuri verrattuna kuitumaiseen hienoainekseen.

Lähtömassassa on huomattavan isompi osuus kuitumaista hienoainesta muihin näytepisteisiin verrattuna. Vastaavasti lähtömassa sisältää vähemmän hiutalemaista hienoainesta.

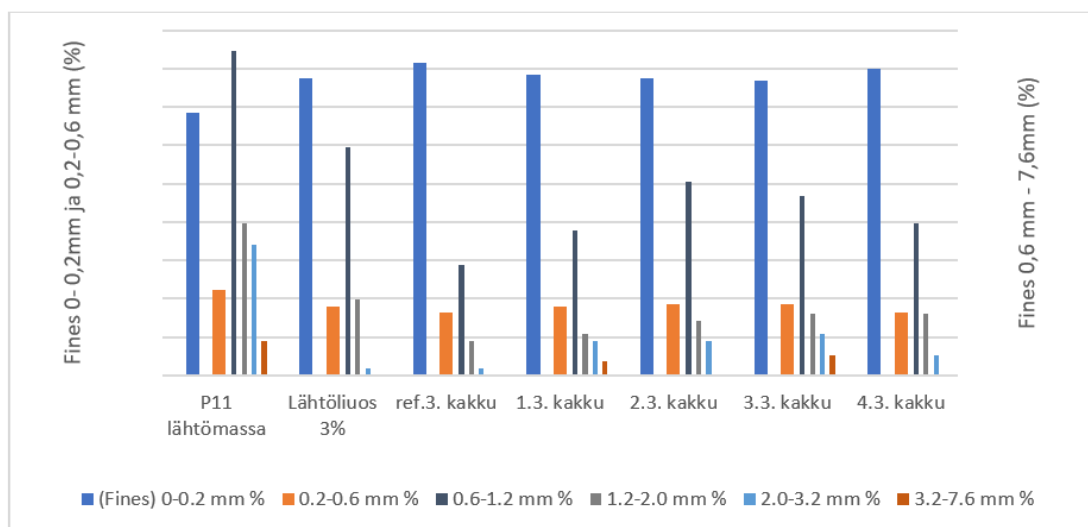


Kuva 26. P11-massan kuituanalyysi (FS5) lähtömassan, lähtöliuoksen ja eri koepisteiden näytepiste 3 hienoainepitoisuudet.

Kuitumaisen hienoaineksen (Fibrils) määrän laskua lähtömassasta lähtöliuokseen verrattuna voisi selittää massan laimentamisella ja mahdollisilla pulperoinnissa tapahtuneilla kuitumuutoksilla.

Pesut (kakut 1.3. – 4.3.) näyttäisivät vaikuttavan hienoainesjakaumaan. Pesutyössä kakuissa kuitumaista hienoainesta on enemmän verrattuna pesemättömään kakkuun (ref.3.) ja hiutalemaista hienoainesta vastaavasti vähemmän. Pesuveden mukana näyttää siis karkaavan hiutalemaista hienoainesta suodokseen.

Kuvasta 27 nähdään hienoaineksen prosentuaalinen kokojakauma eri koepisteillä. Kaikissa koepisteissä huomataan, että hienointa hienoainesta (fines >0,2 mm) on eniten. Seuraavaksi eniten on hienoainesta kokoluokassa 0,2 - 0,6 mm. Yli 0,6 mm kokoluokan hienoaineksen osuus on enää hyvin pieni kaikilla koepisteillä.



Kuva 27. FS5-määrittelyn hienoaineksen prosentuaalinen jakautuminen eri kokofraktioihin (0-7,6 mm)

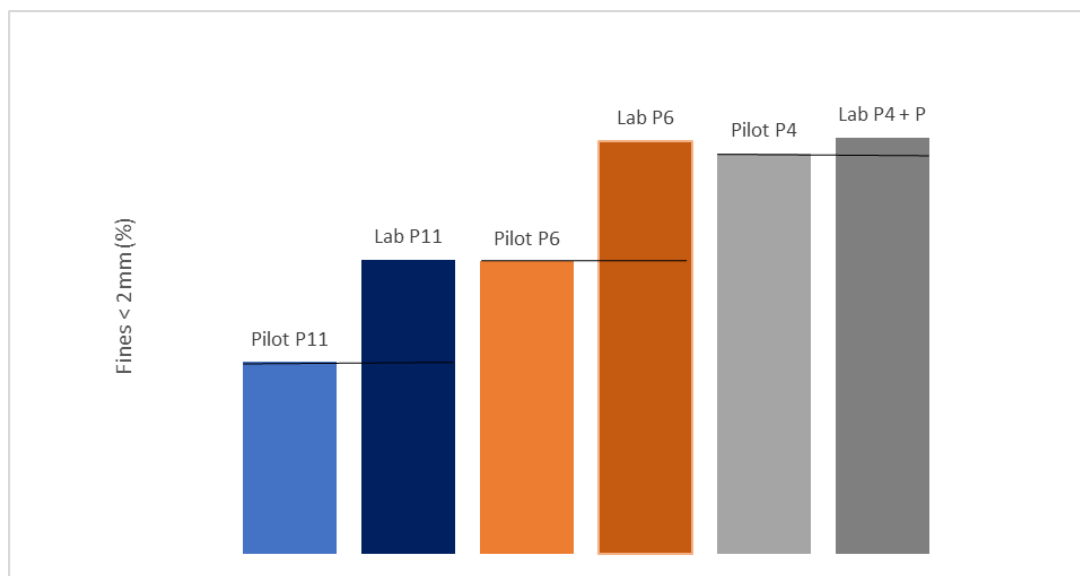
Suurempien kokoluokkien (> 0,6 mm) hienoaineksen määrä vähenee selvästi lähtömassasta lähtöliuokseen ja kakkuihin verrattuna. Syynä on todennäköisesti pulperointi, joka hajottaa hienoainesta edelleen. Pulperoinnin voimakkuutta säätämällä voidaan todennäköisesti vaikuttaa hienoainesjakauman säilymiseen mahdollisimman lähtömassan kaltaisena. Jakauman säilymisen kannalta paras ratkaisu olisi, mikäli massa saataisiin heti muokkauksen jälkeen pestyä.

7.2 Laboratoriokokeet

Pilot-kokeet antoivat hyvän lähtökohdan laboratoriokokeille. Laboratoriokokeiden tavoitteena oli parantaa suotautumista, jotta muokatut massat saataisiin peseytymään tasoviirapesurilla. Laboratorio-olosuhteissa suotautumiseen vaikuttavien parametrien testaaminen on helpompaa, kun isossa mittakaavassa.

7.2.1 Laboratoriokokeiden lähtömassat

Lähtömassoista tehtiin FS5-kuitumääritys. P11-massa oli samaa, alkuperäistä, jolla ajettiin pilot-koeajot. P6-massa oli pilot-ajoissa pulpperoitua, ajettua, valutettua massaa. P4-massa oli käsitelty kuten P6-massa ja siinä oli lisäksi pilot-ajoissa lisätty polymeeri mukana. Alla olevasta kuvasta 28 nähdään vertailu pilot-kokeiden ja laboratoriokokeiden massojen fines <2 mm eroavuudet.



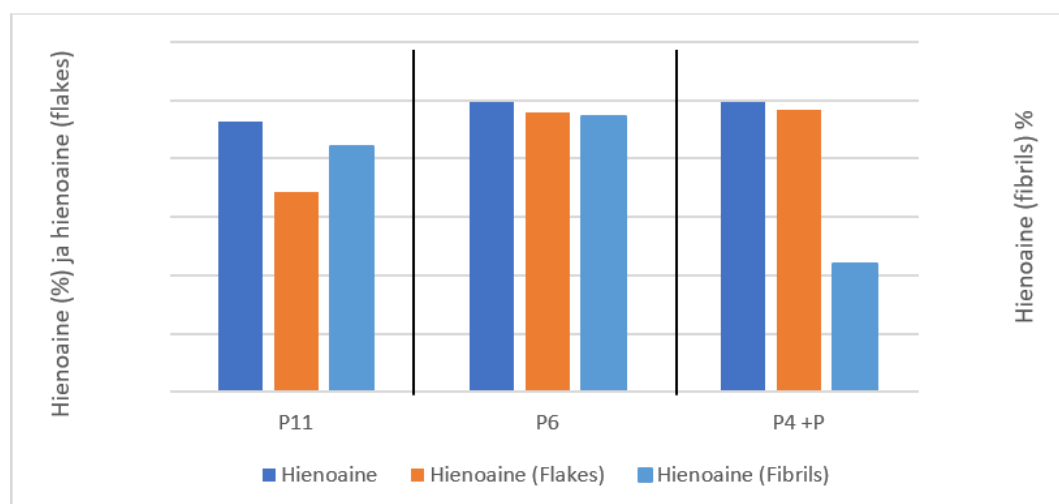
Kuva 28. Pilot- ja laboratoriokokeiden lähtömassojen fines alle 0,2 mm

P11-massa on samaa lähtömassaa molemmissa, sekä pilot- että laboratoriokokeissa. Massassa huomataan kuitenkin, että alle 2 mm:n osuus on laboratoriokokeiden lähtömassassa suurempi, kuin pilot-kokeissa. Tähän voisi olla selityksenä se, että pilot-kokeiden lähtömassojen määritykset on tehty massojen valmistuttua, kesällä 2022. Massa on säilytetty kylmässä, mutta matala pH-arvo on voinut aikaansaanut muutoksia massaan muokkautumista säilytyksen aikana.

P6-massalla on myös eroa pilot- ja laboratoriokokeiden lähtömassoissa fines < 0,2 mm arvoissa. P6-massan laboratoriokokeiden lähtömassa oli pulperoitu pilot-kokeissa, joka osaltaan on lisännyt fines <2 mm arvon nousua, säilytyksen aiheuttamien muutosten lisäksi. Laboratoriokokeiden lähtömassa on jo lähes P4 + P-massan fines < 2 mm arvoa.

P4 +P-massalla fines < 2 mm arvo on korkea jo pilot-kokeiden lähtömassalla. Hienoaineksen osuus on jo lähtötilanteessa niin suuri, että hienoaineksen osuus ei enää voi juurikaan kasvaa säilytyksessä tai pulperoinnissa. Siinäkin on kuitenkin pientä nousua. Lisätyllä polymeerillä ei luultavimmin ole vaikutusta fines < 2 mm arvoon.

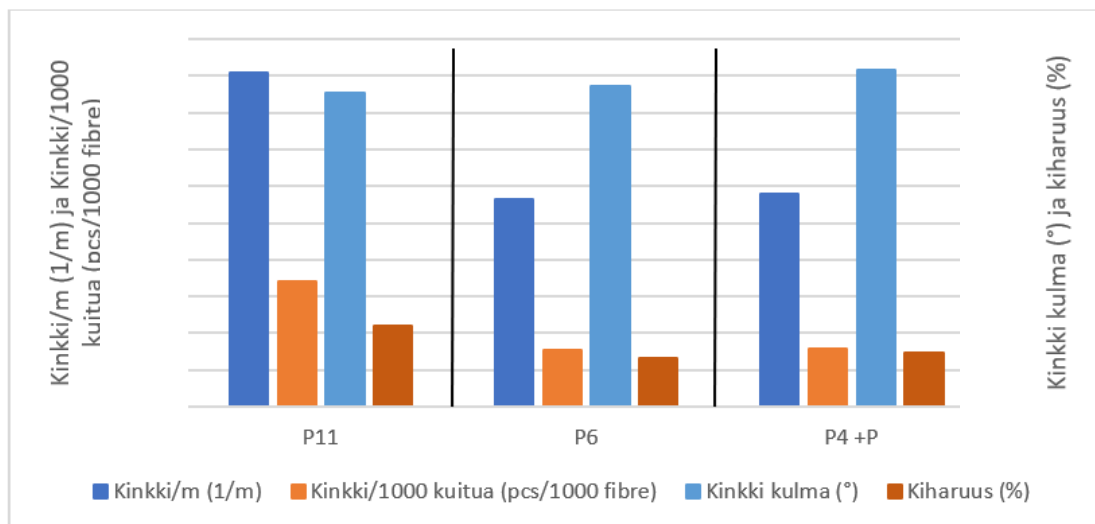
Hienoaines voidaan jakaa hiutalemaiseen ja kuitumaiseen jakeeseen (kuva 29). Hienoaines hiutaleiden määrä on selvästi pienempi P11-massalla verrattuna P6- ja P4-massaan. Vastaavasti hienoaines kuitujen määrä on pienin P4+ P-massalla. Kuitumaisen hienoaineksen määrä P6-massalla on kaikkein suurin, tämä voisi olla yksi syy massan huonoon suotautumiseen.



Kuva 29. Laboratoriokokeiden lähtömassojen hienoaineksen jakautuminen

Perlmutter (2015, 28) mainitsee, että hiutaleiset kiintoaineet muodostavat herkästi läpäisemättömiä kakkuja, erityisesti jos paine on liian korkea. Massojen P6- ja P4+ P-massojen runsaampi hienaineshiutaleiden määrä voi vaikuttaa suotautumiseen heikentävästi.

Kuitujen käsittely aiheuttaa kuituihin erilaisia vaurioita. Kuvassa 30 nähdään lähtömassojen kinkki- ominaisuudet ja kiharuusarvot. Kinkkien määrä näyttää vähenevän massan muokkauksen edetessä. Kinkki-kulma sitä vastoin kasvaa.



Kuva 30. Kuituvauriot lähtömassoilla

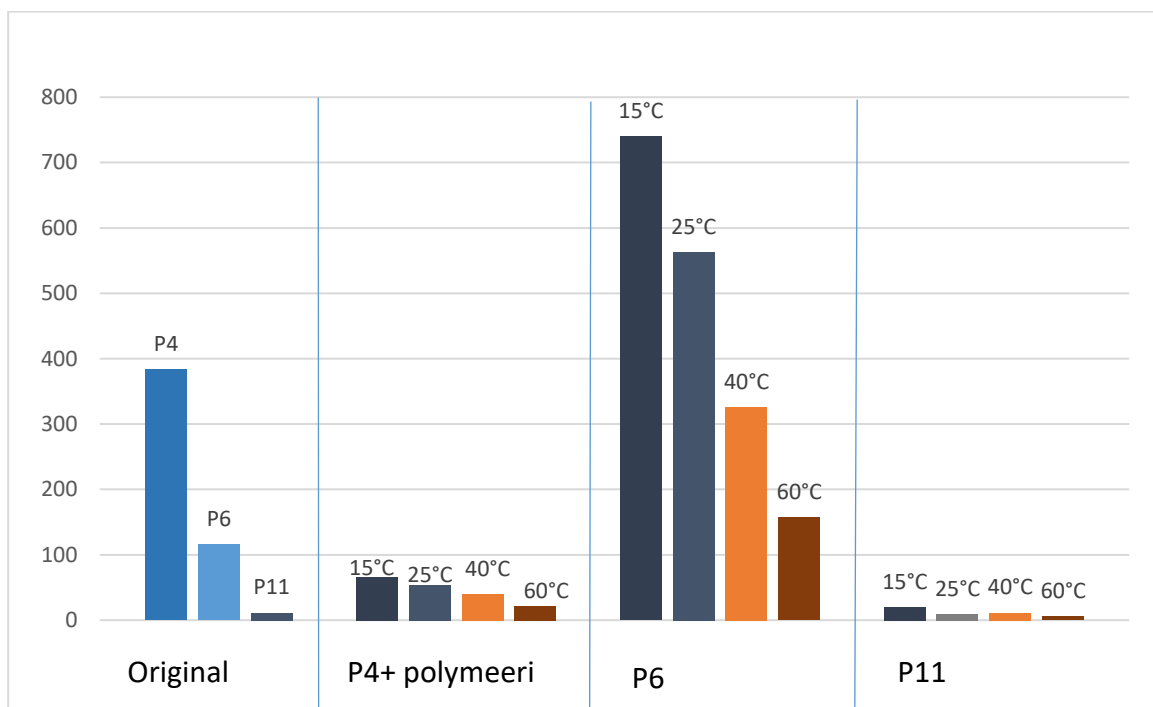
P6- ja P4+ P-massat ovat näiden ominaisuuksien osalta hyvin lähellä toisiaan. P11-massa poikkeaa suuremmalla kinkkien määrällä 1 000 kuitua kohden ja suuremmalla kiharuus prosentilla. Suurin kinkki ja kiharuus sekä pienin kinkki-kulma yhdistyvät tässä tapauksessa parempaan suotautumiseen.

7.2.2 Lämpötilan vaikutus suotautumiseen

Kuten Wakeman & Tarleton on todennut (1999) suotautumisnopeus on selkeästi riippuvainen lämpötilasta. Kuvasta 33 nähdään, että kaikilla massoilla suotautuminen nopeutui lämpötilan noustessa. Tarkemmat suotautumisajat on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Suodatuslämpötilan vaikutus suotautumisaikaan

| Massa P4 +P (ref. polymeeri) | Suotautumisaika (s) | Massa P6 | Suotautumisaika (s) | Massa P11 | Suotautumisaika (s) |
|------------------------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------|---------------------|
| +15 °C | 66 | +15 °C | 740 | +15 °C | 20 |
| +25 °C | 54 | +25 °C | 563 | +25 °C | 9 |
| +40 °C original | 384 | +40 °C original | 116 | | |
| +40 °C | 40 | +40 °C | 326 | +40 °C | 11 |
| +60 °C | 22 | +60 °C | 157 | +60 °C | 5,5 |



Kuva 33. Suodatuslämpötilan vaikutus suotautumisaikaan

P11-massalla, joka saatiin suotautumaan tasoviirapesurilla pilot-kokeissa, suotautumisaika laboratorio-olosuhteissa oli myös nopeinta. Eri lämpötilojen suotautumisajoissa on jopa heiluntaa, niin, että +40 °C:een lämpötilassa suotautuminen olisi aavistuksen hitaampaa, kuin +25 °C:een lämpötilassa. Tässä voi olla kyse koeolosuhteiden aiheuttamasta hajonnasta, sillä kyse on muutamman sekunnin erosta.

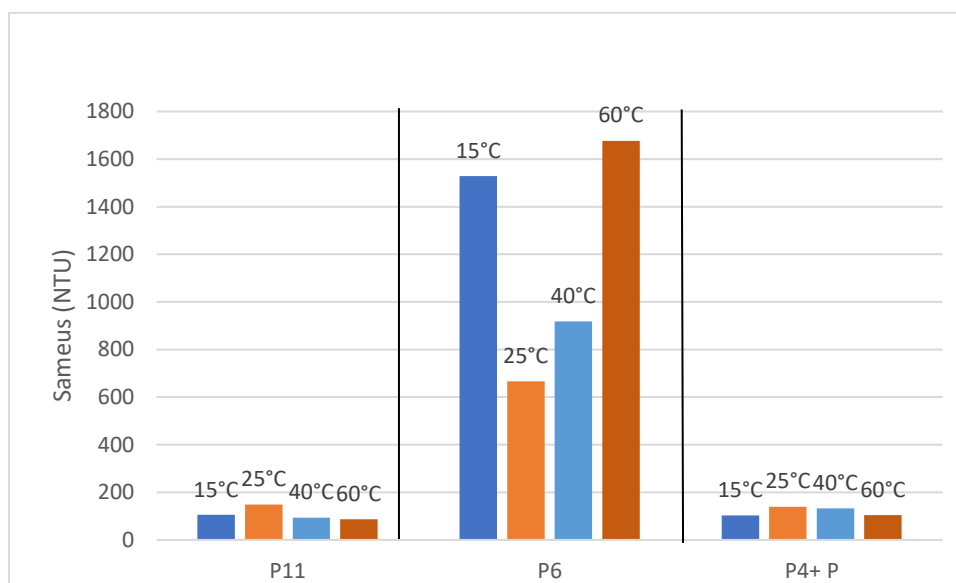
P6-massalla nähdään myös selvä lämpötilan nousun ja suotautumisajan nopeuden yhteys. Lämpötilan noustessa suotautumisaika nopeutuu. Verrattaessa alkuperäistä P6-massaa (P6 original) alkuperäiseen P4-massaan (P4 original), huomataan, että suotautumisaika alkuperäisellä P6-massalla on nopeampi, kuin alkuperäisellä P4-massalla. Tämä oli odotettavissa alkuperäisten CED-viskositeetti ja hienoaines tulosten perusteella.

Verrattaessa P6 original ja laboratoriokokeiden lähtömassan suotautuvuutta +40 °C:ssa huomataan, että original massa suotautuu paremmin. Tämä voisi selittyä laboratoriokokeiden lähtömassan pulperoinnissa tapahtuneesta hienoaineksen määrän kasvusta. Tästä oli viitteitä jo kuvassa 28 sivulla 57 Pilot- ja laboratoriokokeiden lähtömassojen fines alle 0,2 mm vertailu. Pilot-kokeiden alkuperäistä P6-massaa ei valitettavasti ollut enää jäljellä riittävästi, että

olisimme voineet testata sillä eri apuaineet. Todennäköisesti olisimme saaneet P6-massankin suotautumaan kohtuullisessa ajassa.

P4-massaan oli lisätty pilot-ajoissa referenssipolymeeri (apuaine 0), jonka ansiosta suotautumisaika nopeutuu huomattavasti, verrattaessa alkuperäiseen P4-massaan + 40 °C:n lämpötilassa. Polymeerilisäyksellä on siis tässä tapauksessa merkittävä vaikutus.

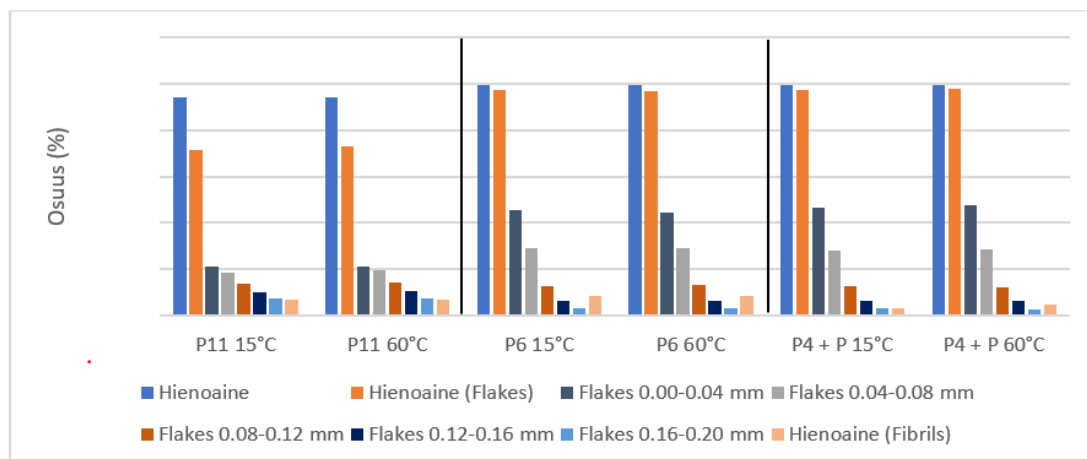
Lämpötila näyttää vaikuttavan myös suodoksen sameuteen, kuten kuvasta 34 voidaan todeta. P11- ja P4 +P-massoilla sameus on maltillista kaikissa lämpötiloissa. Sameudessa on pientä vaihtelua lämpötilan mukaan. P4 +P-massalla syynä matalaan sameuteen on mitä ilmeisimmin massaan lisätty referenssipolymeeri. Sameutta aiheuttava hienoaines on sitoutunut kuituihin. P11-massalla hienoainesta on vähemmän, joten sitä ei myöskään päädy suodokseen.



Kuva 34. Suodatuslämpötilan vaikutus sameuteen

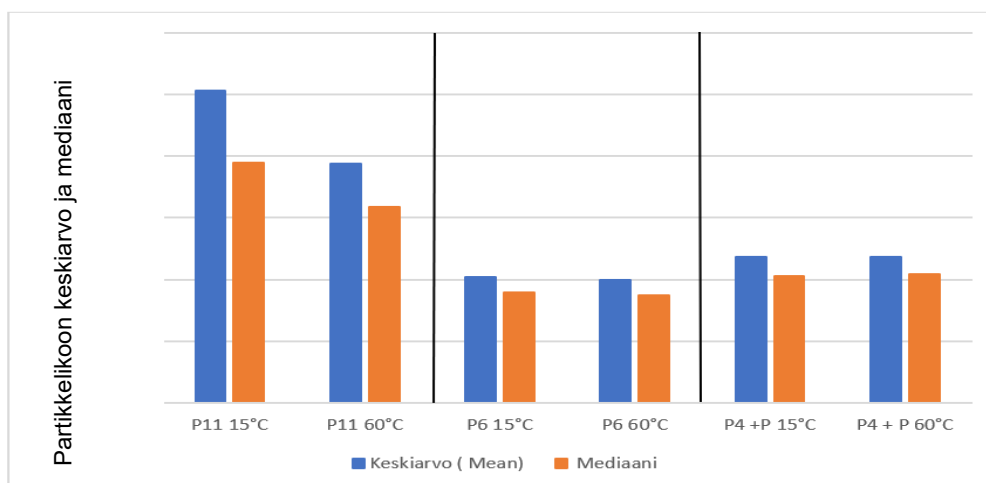
P6-massalla sameus on kaikissa lämpötiloissa huomattavan korkea. P6-massalla havaitaan myös huomattavaa vaihtelua sameudessa lämpötilan mukaan. P6-massan korkeaan sameuteen vaikuttaa todennäköisesti korkea hienoainespitoisuus. Ilman sitovaa polymeeriä hienoaines valuu viiran läpi suodokseen. Lämpötilan nousun aiheuttama sameuden nousu puolestaan voisi selittyä lämpötilan aiheuttamalla viskositeetin laskulla.

Kaikkien massojen suodatuskakuista tehtiin kuitumääritys lämpötiloissa +15 °C ja + 60 °C. Kuvasta 35 nähdään eri massoilla, mainituissa lämpötiloissa tehtyjen suodatuskakkujen hienoaineksen, hiutalemaisen sekä kuitumaisen hienoaineksen määrät sekä hiutalemaisen aineksen kokojakauman. Verrattaessa samalla massalla, eri lämpötilassa tehtyjä suodatuksia, kakkujen hienoaineksen määrissä ei juurikaan ole eroa.



Kuva 35. Suodatuskakkujen hienoaineksen osuus ja jakauma eri massoilla

Kaavoista voidaan kuitenkin huomata, että P11-massalla hienoaineksen kokonaismäärä on suuri, mutta vertailun massoista pienin. P11-massalla hiutalemaista kuituainesta on vertailun massoista vähiten. P6- ja P4 +P-massat poikkeavat toisistaan melko vähän hienoaineksen määrän ja jakauman suhteen. P6-massalla on kuitenkin kuitumaista hienoainesta enemmän kuin P4 +P-massassa. Hienoainesjakauma P11-massalla tukee käsitystä kokeiden parhaista suotautumisominaisuuksista.



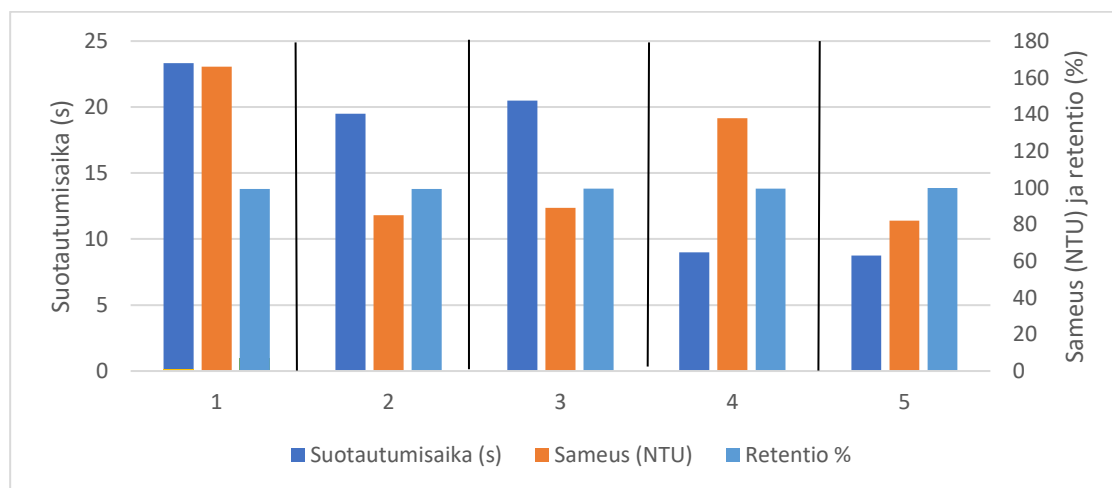
Kuva 36. Partikkelikoon keskiarvo ja mediaani suodatuslämpötilavertailussa eri massoilla

Lämpötilavertailun suodoksista tehtiin partikkelikoko määrittäykset suodatuslämpötiloista +15 ja + 60 °C. Kuvasta 36 nähdään, että suodosten välillä on eroja partikkelikoon keskiarvon ja mediaanin osalta. P11-massalla huomataan, että suodatuslämpötilalla on myös vaikutusta keskiarvoon ja mediaaniin. P6- ja P4-massalla lämpötilalla ei näyttäisi olevan merkitystä näihin arvoihin.

7.2.3 Viiran vaikutus suotautumiseen

Viiravertailun näytteistä mitattiin suotautumisaika ja sameus. Lisäksi suodatukseen kakkunäytteitä tehtiin FS5-kuituanalyysi ja suodoksista PSA1190-partikkelikokoanalyysi. Viiröjen ominaisuuksien vertailu liitteenä 2.

P11-massalla suotautumisajassa ja sameudessa huomattiin eroja viiröjen välillä kuvan 37 mukaisesti. 1 viira näyttäisi olevan suodatusajaltaan hitain muihin testattuihin viiröihin verrattuna. Suodoksen sameudessa viira 1 tuottaa sameimman suodoksen. Viira 1 on kudokseltaan twill-tyyppinen, kun muut testatut viirat olivat kudokseltaan kaksinkertaista (DLW-kudos).

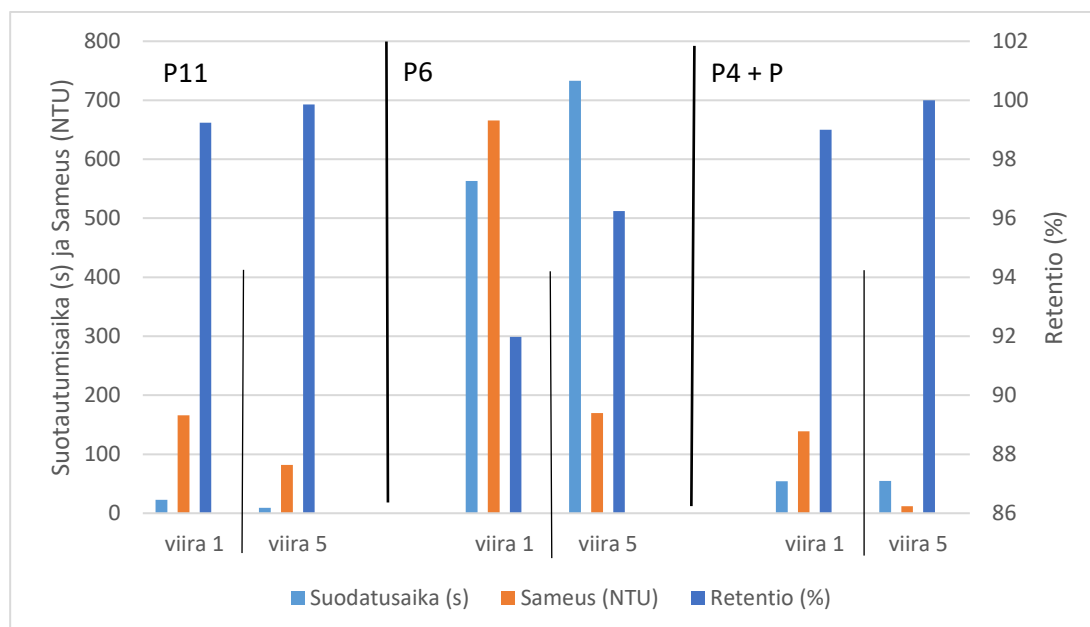


Kuva 37. Viiravertailun P11-massalla suotautumisaika, sameus ja viiraretentio

Viiran kudontamalli vaikuttaa sameuden arvoon. DLW-kudoksista viiralla 4 sameus nousee poikkeuksellisen korkealle. Kude viirassa 4 on monofilamenttia, materiaaliltaan polypropeenaa, kun viirat 3 ja 5 valmistukseen on käytetty multifilamenttia kudetta. Perlmutter mainitsee, että multifilamentista kuteesta valmistetulla kudoksella saadaan kirkkaampi suodos. Tässä kuteen rakenne näyttäisi vaikuttavan suodoksen sameutta nostavasti. Viira 2 on myös monofilamenttikuteesta valmistettua, silti sameus jää multifilamenttikuteesta

valmistettujen viirojen tasolle. Viira 2 ja 4 eroavat toisistaan paksuuden ja ilmanläpäisyn perusteella jonkin verran. Viira 2 on paksumpaa ja sillä on suurempi ilmanläpäisyarvo. Herää myös epäily, että vaikka rinnakkaiset suodatukset ovat olleet tuloksiltaan saman kaltaisia, matala suodatusaika ja korkea sameus voisivat myös viitata vuotoon viiran sivusta.

Verrattaessa suotautumisajan ja sameuden perusteella vertailun parasta (viira 5) ja huonointa (viira 1) suotautumisaika ja sameus on huonoimmalla viiralla yli kaksinkertainen parhaaseen verrattuna. Näillä kahdella viiralla (1 ja 5) tehtiin vielä suodatus vertailu kaikilla massoilla. Tulokset kuvassa 38.

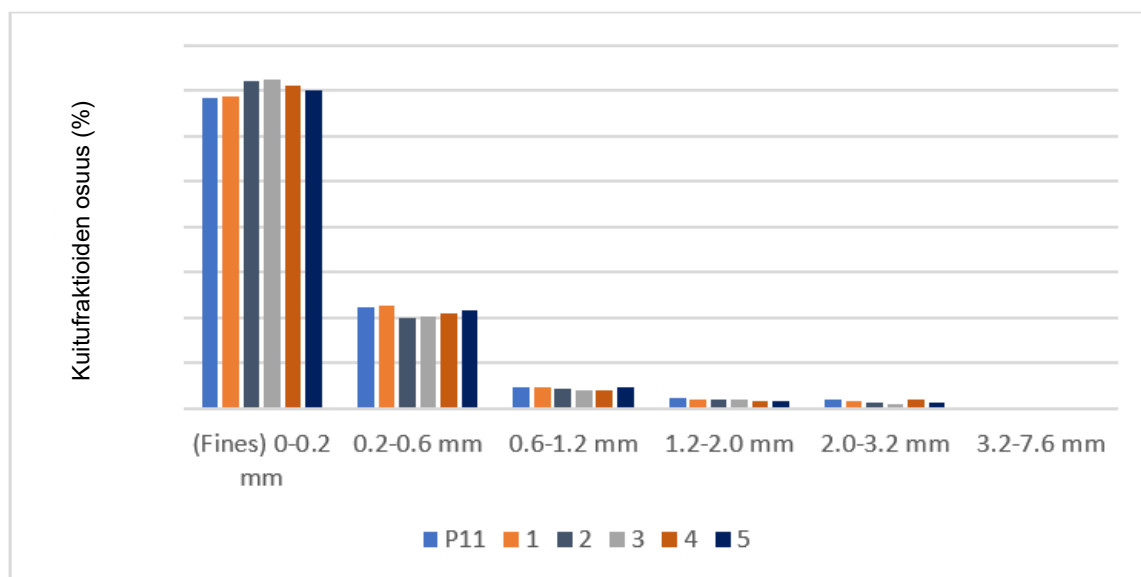


Kuva 38. Viiravertailu (viirat 1 ja 5) kaikilla massoilla +25 °C:n lämpötilassa

Suotautumisajassa P11-massalla viira 5 on hieman nopeampi, kuin viiralla 1. P6-massalla sitä vastoin suodatusaika on hitaampi viiralla 5 ja P4+ P-massalla suodatusaika on käytännössä molemmilla viiroilla sama. Sameus ja viirarentio ovat kaikilla massoilla viiralla 5 pienempi. Tämän perusteella viira 5 näyttää soveltuvan P11- ja P4 +P-(polymerisoidulle) massalle paremmin.

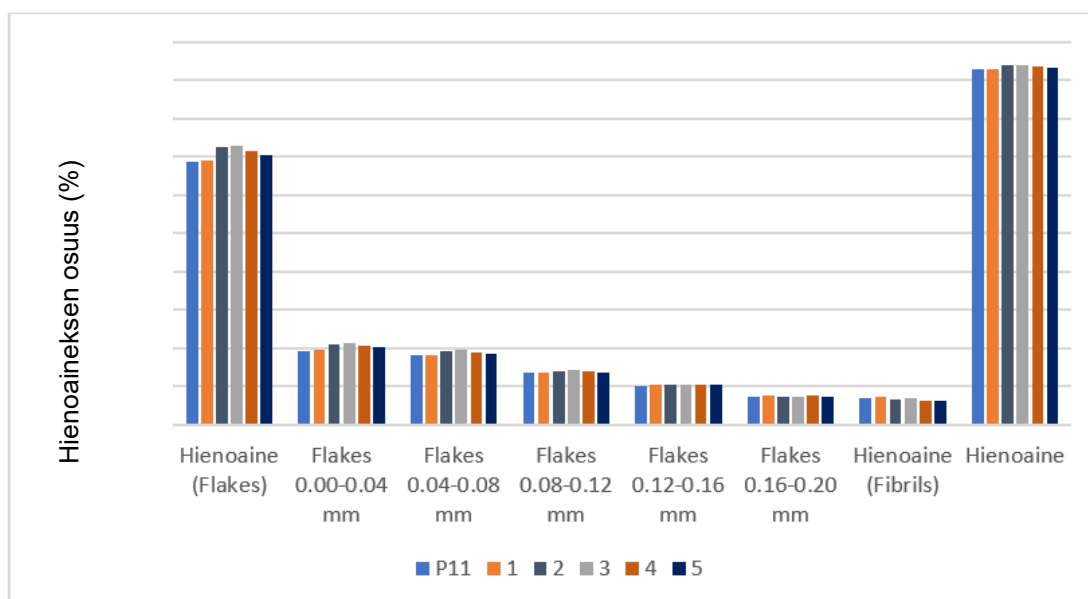
FS5-kuituanalyysissä käytettiin suodatuksissa muodostuneita kakkuja. P11-lähtömassa ei ole suodatettu, analyysi on tehty lähtömassasta. Kuitujen prosentuaaliset kokofraktiot on kuvattu kuvassa 39. Analyysin mukaan selvästi eniten on hienointa osuutta. Suurimassa fraktiossa 3,2 – 7,6 mm määrät

ovat kaikilla viiroilla pienet, alle 0,4 %. P11-massa ja viira 1 ovat hyvin samankaltaisia kuitujen kokofraktioltaan.



Kuva 39. Kuitufraktiot eri viiroilla P11-massalla

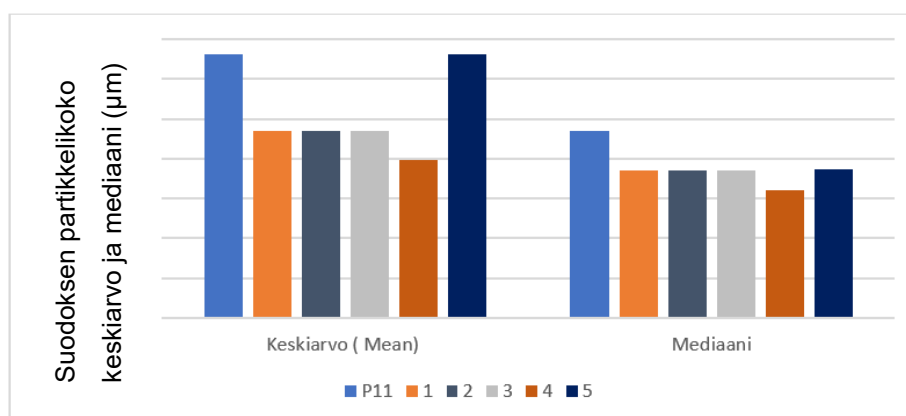
Hienoaineksen määrä on esitetty kuvassa 40. Vertailuksi kuvaajaan on otettu P11-lähtömassan arvot. Kaikissa kakuissa suurin osa on hiutalemaista hienoainesta. Hiutalemainen hienoaines on vielä jaettu koon mukaan eri jakeisiin. Selvästi eniten hienoaineksesta on kahta pienintä kokoluokkaa (0 – 0,08 mm).



Kuva 40. Viiravertailun hienoaineksen osuudet eri viiroilla suodatetuista kakuista

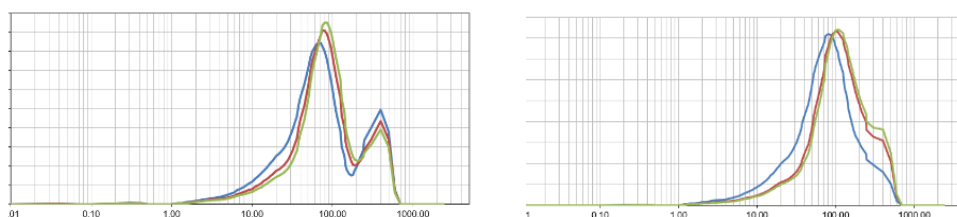
Verrattaessa viiraa 1 muihin testattuihin viiroihin, huomataan, että kakkujen hiutalemaisen hienoineksen määrä on hieman suurempi muilla vertailun viiroilla. Vastaavasti kuitumaisen hienoineksen osalta tilanne on päinvastainen. 1 viira näyttäisi pidättävän paremmin kuitumaista hienoinesta. P11-lähtömassa on suodattamaton näyte. Kuitenkin sen hienoineksen jakauma on hyvin samantyyppinen 1 viiralla nähden. Vertailun perusteella viiralla 1 saadaan massan jakauma säilymään parhaiten lähtömassan kaltaisena.

Partikkelikokoanalyysin perusteella suodoksen partikkelikoon keskiarvossa ja mediaanissa on eroja viirojen välillä (kuva 41). Viiralla 5 partikkelikoon keskiarvon on lähes sama kuin alkuperäisessä, suodattamattomassa massassa. Mediaani on kuitenkin pienempi viiralla 5. Viiralla 5 saavutettiin nopein suotautumisaika ja alhaisin sameus.



Kuva 41. Suodoksen partikkelikoko keskiarvo ja mediaani eri viiroilla

Partikkelikoon jakaumassa on eroja viirojen välillä. Verrattaessa differentiaali-jakauman tilavuuskuvaajia Perlmutterin esittämiin kuvaajiin optimaalisesta ja kaksihuippuisesta jakaumasta huomataan, että viiralla 5 kuvaajassa (kuva 42) on huomattavissa selkeästi kaksi huippua.



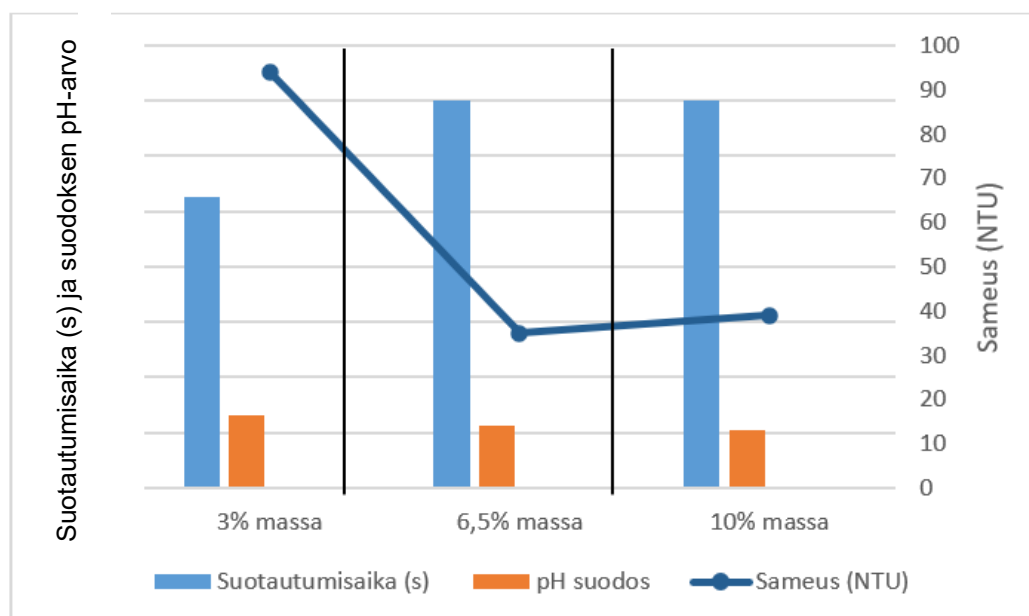
Kuva 42. Esimerkki kahdesta tilavuusosuuden differentiaalijakaumasta, vasemmalla viira 5 ja oikealla viira 1

Muiden viirojen huippu on lähempänä optimaalista jakaumaa. Tässä kyseessä on jo suodos, joka on suotautunut viiran läpi, eli suotautuminen on kahdesta huipusta huolimatta onnistunut, jopa niin, että suotautumisaika on ollut nopein ja sameus pienin.

Viiralla 5 on pienin ilmanläpäisyarvo. Se kuitenkin antaa nopeimman suotautumisajan ja viiran likaantuminen oli laboratorikokeissa vähäisintä. Olisiko pienellä ilmanläpäisyarvolla ja viiran likaantumisen välillä yhteys? Onko pesurin alipaine pestävälle massalle liian iso? Hyvällä ilmanläpäisyllä ja liian isolla alipaineella pestävä hienoaainesta pääsee tunkeutumaan viiran sisään tukkien huokokset, estäen suotautumisen.

7.2.4 Suodatettavan massan sakeuden vaikutus suotautumiseen

Sameuden vaikutusta suotautumiseen testattiin P11-massalla, joka saatiin suotautumaan ja peseytymään pilot-ajoissa. Sameudella on merkitystä pesurin pesukapasiteetin kannalta. Mikäli massa saadaan suotautumaan ja peseytymään sakeampana, saadaan pesukapasiteettiä nostettua.



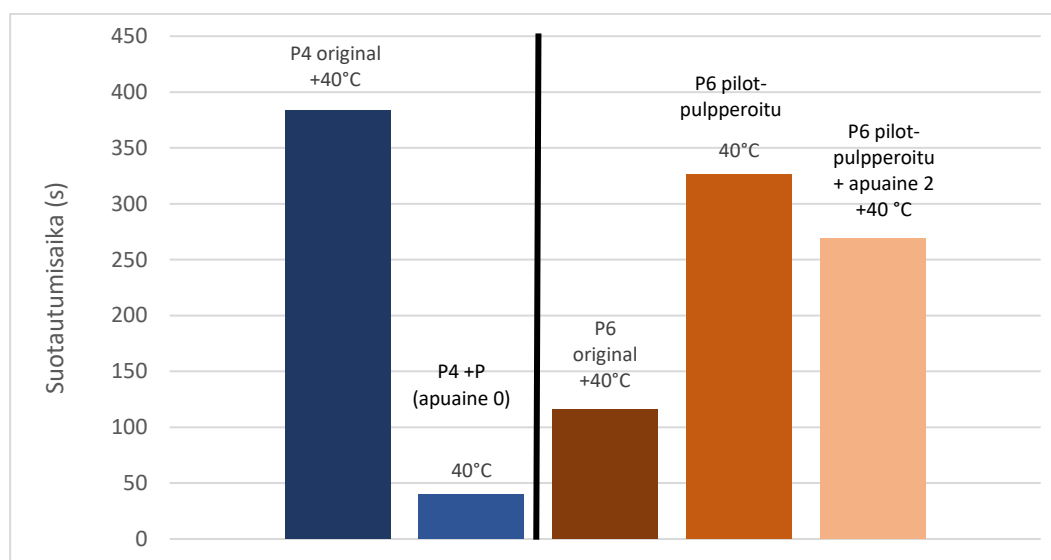
Kuva 43. Massan sakeuden vaikutus suotautumiseen

Kuvassa 43 nähdään P11-massan suodatusten tulokset 3 %:n, 6,5 %:n ja 10 %:n massoilla. 3%:n massa suotautuu odotetusti nopeiten. 6,5 %:n ja 10 %:n massoilla ei suotautumisajassa ole eroa. Sameuden kannalta edullisinta olisi

suodatus hyvä tehdä 6,5 %:n massalla. pH-arvon muutokseen vaikuttaa selvästi lisätyn massan laimennusveden määrä. Mikäli massa saadaan koneelle sakeampana, alkulaimennus ei ole niin suuri ja haluttu pH arvo voi jäädä saavuttamatta . Tällöin päästään hyödyntämään tehokkaammin pesurin lisäpesuveden syöttöä, pesun tavoitteen saavuttamiseen.

7.2.5 Apuaineiden vaikutus suotautumiseen

Apuaineet vaikuttavat suotautumiseen. Kuvassa 44 nähdään massojen P4- ja P6-lähtömassojen (original) ja polymeerilisättyjen P4- ja P6-massojen suotautumisajat + 40 °C:n lämpötilassa. P4-massaan lisättiin referenssipolymeeri (apuaaine 0) jo pilot-kokeissa. Polymeerilisäyksellä nähdään selvä suotautumista parantava vaikutus laboratorikokeissa.

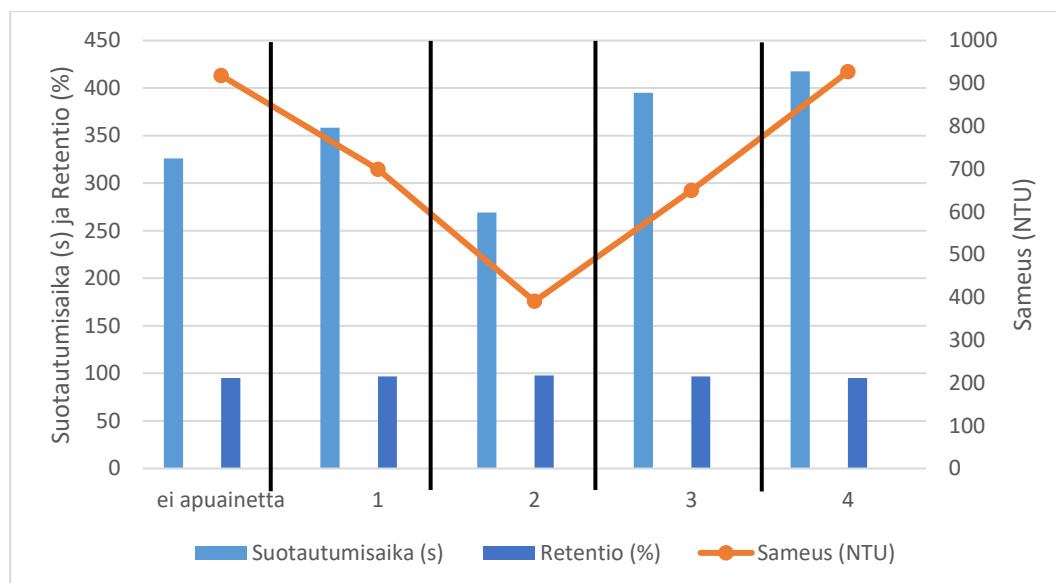


Kuva 44. Suotautumisaika P4 ja P6 alkuperäiset ja polymeerilisätyt massat

P6-massalla kuvassa nähdään lähtömassa (P6 original), P6 pilot- pulpperoitu sekä P6 apuainelisätty massa (P6 pilot-pulpperoitu + apuaaine 2). Kuvaan on valittu testatuista apuaineista parhaiten suotautumista parantanut aine. Nähdään, että apuainelisäyksellä on vaikutusta suotautumiseen myös pilot-kokeissa purppuroituun massa. Valitettavasti alkuperäistä P6-massaa (original) ei ollut riittävästi, jotta apuaineet olisi saatu testattua alkuperäisellä massalla, jonka suotautumisaika on valuttua massaa huomattavasti pienempi.

Kuvassa 45 on esitetty testattujen apuaineiden vaikutus suotautumiseen, sameuteen ja retentioon massalla P6 (pulpperoitu pilot-kokeissa).

Ensimmäisenä vasemmalla, on suodatus ilman apuaineita. Suodatuksissa 1 – 4 on käytetty erityyppisiä apuaineita suotautumisen nopeuttamiseksi.



Kuva 45. Apuaineiden vaikutus suotautumisaikaan, retentioon ja sameuteen

Apuaine 2 on ainoa, jonka avulla suotautumisaikaa saadaan nopeutettua. Muilla aineilla suodatusaika kasvaa ilman apuaineita tehtävään suodatukseen verrattuna.

Suodoksen sameus laskee merkittävästi kaikilla apuaineilla. Aineella 2 sameuden lasku on suurinta (3,5x pienempi sameus) verrattuna ei apuainetta-suodatuksen tulokseen. Myös viiraretentio paranee suodatuksissa käytettäessä apuainetta. Aineilla 1 – 3 on parempi viiraretentio ja aineella 2 viiraretention parannus on suurin. Aineella 4 viiraretentio on samalla tasolla ilman apuainetta-suodatuksen kanssa.

Apuaineella 4 huonoista suotautumistuloksista huolimatta huomattiin, että viira oli erittäin helppo saada puhtaaksi suodatuksen jälkeen, massa ei mennyt viiran rakenteeseen.

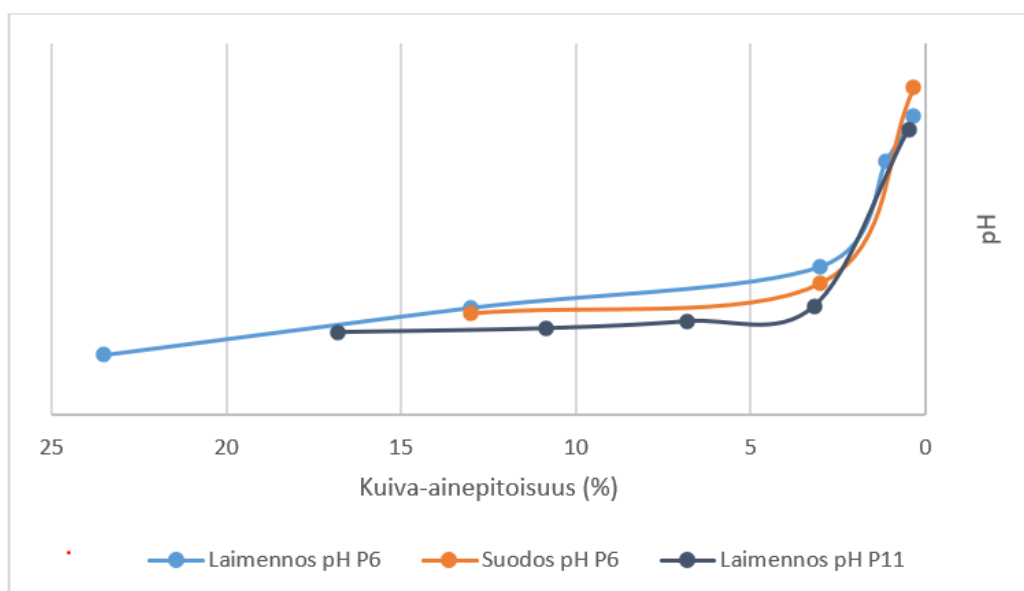
Suodatettava massa poikkeaa perinteisestä selluloosamassasta, jonka ominaisuuksien parantamiseen apuaineet on optimoitu. Suodatettavan massan pH-arvo on melko hapan, eikä apuaineen toiminta pH-arvo välttämättä ole nyt käytetyn massan happamuudessa optimaalinen. Massan kuitukoostumus on

myös poikkeava. Laboratoriomittakaavassa annostelumäärät ovat hyvin pieniä ja optimaalisen annostelun saavuttaminen haastavaa.

Näiden testien perusteella voidaan sanoa, että apuaineilla on parantava vaikutus erityisesti suodoksen sameuteen ja retentio-arvoon. Suodatusaikaan voidaan vaikuttaa apuaineen tyyppin mukaan. Hienoaineksen kiinnittävällä, vedenpoistoa tehostavalla apuaineella näyttää olevan paras vaikutus suotautumiseen. Toisaalta väärin valittu apuaine voi myös hidastaa suotautumista.

7.2.6 pH-arvon muutos

Varsinaista massan pesua ei päästy testaamaan laboratoriomittakaavassa, suotautumishaasteiden vuoksi. pH-arvoja kuitenkin mitattiin suodoksista. Massaa laimentamalla saadaan pH-arvoa nousemaan pesussa tavoitteena olevalle tasolle, kuten kuvassa 46 voidaan nähdä P6-massalla. Käytännössä kuitenkin huomattiin, että suodatettaessa hyvin alhaisen sakeuden massoja kakun muodostuminen jäi huonoksi ja kakun käsittely oli hankalaa. Normaalilla 3 %:n massalla ei kuitenkaan päästä haluttuun pH-arvoon, lähelle neutraalia. Massan pesuun on siis käytettävä muita vaihtoehtoja kuin laimennus.



Kuva 46. Suodatettavan massan laimennoksen ja suodoksen sakeuden vaikutus pH-arvoon P6-massalla sekä P11-massan suodoksen pH-arvoon

Vertailuksi kuvassa 46 on otettu pilot-kokeissa suotautunut massa P11, joka saatiin myös pestyä haluttuun neutraaliin pH-arvoon. Verrattaessa

laimennoksia P6- ja P11-massaa todetaan, että P11-massan pH-arvon nousu noudattaa melko pitkälti P6-massan pH-arvon kuvaajaa. Kun tiedetään, että P11-massa saatiin pestyä pilot-kokeissa, voidaan tämän perusteella olettaa, että pesu onnistuu myös massalla P6, kun suotautuminen saadaan onnistumaan.

pH-arvo vaikuttaa suotautumiseen useiden erilaisten mekanismien kautta. Aineiden liukoisuus on riippuvainen pH-arvosta. Kuitujen ominaisuuksiin pH-arvolla on vaikutusta. Uotinen muistuttaa, että kuidut turpoavat pH-arvon noustessa yli 5. Turpoaminen puolestaan vaikuttaa partikkelikokoon, joka vaikuttaa edelleen suotautumiseen. Näissä kokeissa lähtömassan pH-arvo on matala ja tavoite pH-arvo on neutraalin tuntumassa. Tälläkin on siis vaikutusta suotautumiseen.

Erilaisten apuaineiden optimaalisen toiminnan kannalta pH-arvolla on merkitystä. Sellunvalmistuksen apuaineet eivät välttämättä toimi optimaalisesti lähtömassan matalissa pH-arvoissa.

pH-arvolla ja kuitujen pintavarauksella on yhteys. pH-arvo vaikuttaa pintavarauksiin, siksi sen hallinta on tärkeä myös suodatuksessa Svarovsky (2000) muistuttaa. Muutamilla apuaineilla oleva ominaisuus, jossa varaustila kasvaa pH:n laskun myötä, lisää käyttömahdollisuuksia poikkeavissa oloissa.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITYSEHDOTUKSET

Työssä edettiin hieman poikkeuksellisessa järjestyksessä, perinteiseen tutkimustyöhön verrattuna. Kokeet aloitettiin pilot-ajoilla, massalla, joka ominaisuuksiensa perusteella oli epätodennäköisin pesun onnistumisen kannalta. Ennako-odotukset osoittautuivat oikeiksi. Yksi massa saatiin kuitenkin onnistuneesti suotautumaan ja peseytymään. Pilot-kokeiden perusteella saimme käsityksen siitä, minkä tyyppinen massa peseytyy tasoviirapesurilla, vallitsevissa olosuhteissa ja minkälaista ei pystytä pesemään, ilman suotautumista edistäviä muutoksia.

Pilot-kokeet antoivan hyvät lähtökohdat laboratoriokokeille. Laboratoriokokeiden pääpainona oli suotautumisen parantaminen. Laboratoriossa pääsimme

helpommin muuttamaan suotautumiseen vaikuttavia olosuhteita. Laboratorion kokeet eivät vastaa ison mittakaavan laitteistoa, mutta antaa viitteitä siihen, mitä muutoksia tarvitaan pesun onnistumiselle ja mitä muuttujia olisi syytä testata edelleen.

8.1 Massaan liittyvät asiat, jotka vaikuttavat suotautumiseen

Massan hienoaineksen koostumus vaikuttaa suotautumiseen. Hienoaines voidaan jakaa hiutalemaiseen ja kuitumaiseen jakeeseen. Perlmutter (2015) on todennut, että hiutalemaiset hienoainekset muodostavat herkästi läpäisemättömiä kakkuja. Huonosti suotautuneilla massoilla (P4+P ja P6) todettiin FS5-kuituanalyyssissä selvästi suurempi hiutaleisen hienoaineksen osuus verrattuna hyvin suotautuvaan massaan (P 11). Hiutalemainen hienoaines näyttäisi olevan yksi syy massojen P6 ja P4 heikkoon suotautumiseen. Pienempi hienoaineksen kokonaismäärä ja kuitumaisen hienoaineksen suurempi osuus puolestaan parantaa suotautumista.

Wakeman & Tarleton (1999) on todennut, että lämpötila vaikuttaa suotautumiseen ja jo suhteellisen pienillä lämpötilan muutoksilla voidaan vaikuttaa suodatusnopeuteen. Pilot-kokeissa massan pulperoinnin ja pesuveden lämpötila oli kohtuullisen matala, alle 15 °C. Laboratoriokokeissa testattiin suotautumista eri lämpötiloissa. Kokeissa huomattiin, että lämpötilan nousu parantaa suotautumista kaikilla massoilla. Suotautumisen paraneminen johtuu lämpötilan nousun aiheuttamasta viskositeetin laskusta. Viskositeetin lasku puolestaan parantaa suotautumista.

Pilot-kokeissa suotautuneella (P11) massalla suotautumisajat laboratorion kokeissa olivat vertailun nopeimpia. Pilot-kokeissa polymeerilisätyllä massalla (P4+P) ja massalla P6 nähdään myös lämpötilan noususta johtuvaa suotautumisajan nopeutumista. Tulosten perusteella voidaan arvioida, että mikäli massan lämpötila olisi pilot-ajoissa ollut korkeampi, olisi polymeerilisätyllä massalla (P4+P) ollut mahdollisuus suotautua onnistuneesti.

Pilot-kokeissa testattiin P4-massalla kationista polyakryyliamidia suotautumisen parantamiseksi. Suotautumisessa ei havaittu silmämääräisesti parantamista. Polymeerilisätyä P4-massaa käytettiin laboratorion suodatuskokeissa.

Huomattiin, että suotautuminen oli huomattavan paljon parempaa polymeerili-sätyllä massalla verrattuna P4-alkuperäismassaan (original), myös kylmässä (+ 15 °C) suodatuksessa. Tämän perusteella heräsi epäily pilot-laiteen viiran likaantumisen aiheuttamasta viiran tukkeutumisesta, joka esti normaalin suo-tautumisen.

Laboratoriokokeissa testattiin P6-massalla muutamia erilaisia apuaineita suo-tautumisen parantamiseksi. Kaikilla testatuilla apuaineilla on selvimmin vai-kutusta suodoksen sameuteen laskevasti ja viiraretentioon nostavasti. Suotau-tumisaikaan nopeutti yksi aine, muilla suotautumisaika jopa hidastui. Labora-toriotesteissä testatuista parhaiten toimivaksi apuaineeksi todettiin kationinen polyakryyliamidi, joka on rakenteeltaan lineaarinen polymeeri. Huomion ar-voista on myös se, että P6-alkuperäismassan suotautumisaika on laboratorio-kokeiden P6-lähtömassan suotautumisaikaa huomattavan paljon pidempi. Mi-käli nämä apuaineet olisi päästy testaamaan alkuperäisellä (original) mas-salla, suotautumisajat olisivat olleet todennäköisesti nopeampia.

Kationinen polyakryyliamidi näyttäisi parantavan parhaiten suotautumista tä-män tyyppisillä massoilla. Apuaineiden jatkotestauksessa olisi syytä keskittyä nimenomaan kationisiin polyakryyliamideihin, paneutuen erityisesti oikean an-noksen löytymiseen. Lisäksi suodatettavien massojen varaustilaa ja zeta-po-tentiaalia olisi mielenkiintoista testata. Varaustila ja zeta-potentiaali-arvojen avulla voitaisiin optimoida apuaineen annostelua.

Sivulöydöksenä huomattiin, että massan koostumukseen näyttää laboratorio-tulosten perusteella tulevan muutoksia, pidemmän säilytyksen aikana. Happa-man massan säilytys viileissä olosuhteissa ei estä kuitujen muokkautumisen etenemistä. Hienoaineksen määrä massassa kasvaa. Parhaiten alkuperäiset kuituominaisuudet säilyttää massa, jonka hienoainespitoisuus on jo lähtötilan-teessa hyvin korkea.

Muutoksia kuituominaisuuksiin tapahtuu myös pesua ennen tapahtuvassa pulpperoinnissa. Hienoaineksen määrä kasvaa ja kuitumaisen hienoaineksen määrä vähenee, hiutalemaisena lisääntyessä. Pulpperoinnin voimakkuutta sää-tämällä voidaan todennäköisesti vaikuttaa hienoainesjakauman säilymiseen

mahdollisimman lähtömassan kaltaisena. Jakauman säilymisen kannalta paras ratkaisu olisi, mikäli massa saataisiin pestyä heti muokkauksen jälkeen.

Säilytyksen ja pulpperoinnin aiheuttamat massan muutokset vaikuttivat myös laboratoriokokeiden suodatustuloksiin. Alkuperäisellä, pilot-kokeiden P6-massalla tehty suodatus antoi kohtuullisen suotautumisajan, kun laboratoriokokeiden pilot-kokeissa pulpperoidulla massalla suotautumisaika +40 °C:n lämpötilassa oli lähes kolminkertainen alkuperäiseen verrattuna. Alkuperäismassoja (P6 ja P4) verrattaessa P6-massan suotautumisaika oli yli kolme kertaa nopeampi verrattuna P4-massaan. Polymeerilisätty P4-massa saatiin suotautumaan laboratoriokokeissa onnistuneesti, joten voidaan olettaa, että sopivalla polymeerilisäyksellä myös P6-massa saadaan suotautumaan sekä laboratoriossa, että tasoviirapesurilla.

Pesun onnistumisen yhtenä mittarina oli massan pH-arvon muutos happamasta lähelle neutraalia. pH-arvo tavoite saavutettiin P11-massalla pilotajoissa. Tässä työssä pesua ei laboratoriossa päästy testaamaan, sillä testeissä keskityttiin ensisijaisesti suotautumisen parantamiseen. Laboratoriokokeiden lähtömassojen ja suodosten pH-arvojen vertailun perusteella kuitenkin näyttäisi mahdolliselle, että myös P6- ja P4-massojen pH-arvo saadaan nostettua lähelle neutraalia.

Pesun testaus Perlmutterin kuvaamalla büchner- pesutestausmenetelmällä tai Laroxin valmistamalla laitteistolla toisivat lisävarmuutta pesun onnistumisesta. Perlmutterin menetelmä on yksinkertainen büchner-imulaitteisto, jonka kaltaista käytettiin jo nyt suotautumisen testaukseen. Kakun muodostuksen jälkeen suodatetun kakun päälle kaadetaan pesuvesi, joka imetään kakun läpi alipaineella. Pesu voidaan toistaa, kuten tasoviirapesurilla. Pesun jälkeen seuraa kakun kuivaus, jossa voidaan hyödyntää myös puristusta. Vaihtoehtoisesti pesua voidaan testata Laroxin valmistamalla laitteistolla. Lisätestaus antaisi varmuutta halutun pesutuloksen saavuttamisesta myös tasoviirapesurilla.

8.2 Tasoviirapesuriin liittyvät asiat, jotka vaikuttavat suotautumiseen

Lämpötilalla on oleellinen merkitys suotautumiseen, kuten jo aiemmin todettiin. Suotautuminen nopeutui kaikilla testatuilla massoilla lämpötilan nousun

myötä. Suotautumisen nopeutuminen lämpötilan noustessa perustuu viskositeetin laskuun. Viskositeetin lasku puolestaan parantaa suotautumista. Pesurilla tulisi olla mahdollisuus lämpimän veden käyttöön pulpperoinnissa, jolloin massa saataisiin pesurille lämpimänä. Myös massan pesuvesi tulisi saada koneelle massan kanssa samassa lämpötilassa, sillä Salmela (2006) muistuttaa, että pestävän massan ja pesuveden lämpötilaero voi johtaa kakussa epätasaiseen peseytymiseen.

Tasoviirapesurilla oli pilot-kokeissa käytössä polyeteenitereftalaatti (PET) monofilamenttilangalla kudottu viira, joka oli kudonnaltaan twill-tyyppinen. Perlmutterin (2009) mukaan monofilamentista kuteesta olevat viirat ovat tiiviimpiä ja ne on helpompi puhdistaa. Lisäksi Svarovskyn (1999) mukaan twill-tyyppiset kudokset soveltuvat usein parhaiten hienojakoisille suspensioille, jossa vaaditaan kirkas suodos. Perlmutterin ja Svarovskyn näkemykset tukevat tasoviirapesurin tämänhetkistä viiravalintaa, mutta laboratoriokokeiden tulokset poikkeava tästä.

Pilot-ajoista emme saaneet suodoksista näytteitä, joiden perusteella olisimme voineet koneella olleen viiran ominaisuuksia arvioida suodoksen perusteella. Viirojen vaikutusta suotautumiseen ja viiran likaantumiseen testattiin laboratoriossa viidellä erilaisella viiralla, joista yksi oli tasoviirapesurilla ollut twill-tyyppinen PET-materiaalista valmistettu viira. Testauksen muut viirat olivat kudontatyyppiltään kaksinkertaista kudosta (DLW) ja niiden materiaali oli polypropeeni (PP).

Laboratoriokokeissa kaikki DLW-kudontamallilla testatut viirat osoittautuivat paremmiksi suotautumisajan, sameuden ja viiran puhtauden suhteen massalla P11, jolla varsinainen viirojen testaus suoritettiin. P11-massan viiratestien perusteella parhaaksi (suotautumisen ja sameuden kannalta) viiraksi todettu viirassa oli käytetty sekä mono- että multifilamenttia polypropeenikudetta/loimea. Viiran ilmanläpäisyarvo oli testatusta pienin.

Viiratestejä jatkettiin vertaamalla tasoviirapesurilla olevaa ja laboratoriotesteissä parhaaksi todettua viiraa vielä kaikilla kolmella massalla. Sameus oli kaikilla massoilla DLW-viiralla pienempi. Suotautumisajassa oli jonkin verran

eroa eri massoilla. P11- ja P4+P-massoilla DLW-viiralla suotautuminen oli nopeampaa. P6-massalla suotautuminen oli nopeampaa twill-tyypin viiralla, vaikkakin molemmilla viiroilla hidasta kahteen muuhun massaan verrattuna. Testatuista viiroista DLW-tyypin, pienimmällä ilmanläpäisyarvolla oleva viira näyttäisi toimivan testautusta viiroista parhaiten tämän tyyppisillä massoilla.

Massojen välillä todettiin olevan eroa viiran likaantumisessa. P11-massa, jonka hienoainepitoisuus oli pienin, huomattiin vähiten viiran likaantumista. P6- ja P4-massalla hienoaineksen määrä oli suurempi ja likaantuminen oli voimakkaampaa. Runsaampi hienoainemäärä likaa viiraa enemmän. Laboratoriotestin parhaalla DLW-viiralla likaantuminen oli vähäisintä. Tämä voisi johtua pienimmästä ilmanläpäisyarvosta. Pienellä ilmanläpäisyarvolla olevalla viiralla hienoaines ei pääse tunkeutumaan viiran sisälle, tiiviin rakenteen vuoksi.

Viirroilla on vaikutusta kakkujen ja suodosten kuitu ja partikkelikokojakaumiin. Mikäli suotautuminen onnistuu, viiran valinnalla voidaan muokata kakun koostumusta halutunlaiseksi. Massakakku on usein varsinainen tuote, jota käytetään jatkojalostukseen. Suodokseen menetetään tietty partikkelijakauma, jonka hyödyntämistä voisi tutkia.

P11-massaa päästiin pesemään pilot-kokeissa. Pesu näyttää vaikuttavan kakun hienoainesjakaumaan. Pestyissä kakuissa kuitumaista hienoainesta on enemmän verrattuna pesemättömään kakkuun ja hiutalemaista hienoainesta vastaavasti vähemmän. Pesuveden mukana näyttää siis karkaavan hiutalemaista hienoainesta suodokseen.

Pesurin viiran pesulaitteiston on toimittava moitteettomasti ja oltava riittävän tehokas, jotta likaantunut viira saadaan puhdistettua ajon aikana. Laboratoriotesteissa huomattiin, että erityisesti P4+ P- ja P6-massat tukkivat pilot-laitteella käytössä olevaa viiraa huomattavasti. Tukkimisen syynä todennäköisesti massan sisältämä hienoaines. Laboratoriomittakaavassa huomattiin, että viiran pesu oli tehokkaampaa tapahtuessaan viiran alapuolelta pintaan päin. Laboratoriossa viiran pesua tehostettiin paineilmahuuhtelulla, jonka avulla viiran huokokset saatiin puhdistettua.

Santos ja Hart (2014) ovat todenneet, että massan sakeutus on tärkeä vaihe pesun onnistumisen kannalta. Sakeutus voidaan tehdä suodattamalla ja/tai puristamalla. Pesurilla sakeutus tapahtuu suodattamalla alipainekaukaloiden avulla, sekä puristamalla. Tasoviirapesurilla on käytössä 13 alipainekaukaloa. Jokaisen kaukalon alipaine voidaan kytkeä päälle/ pois. Pilot-kokeissa huomattiin, että alipaineessa olevien alipainekaukaloiden määrää säätämällä voidaan vaikuttaa suotautumiseen/ massan sakeutumiseen. Suotautuvuus paranee alipaineessa olevien kaukaloiden määrää lisäämällä. Pilot-kokeissa huomattiin myös, että puristimella on selvä vaikutus pesutulokseen, sekä kuiva-ainepitoisuuteen. Korkea kuiva-ainepitoisuus on jatkokäsittelyn kannalta toivottavaa. Massan säilytys helpottuu ja mikäli massaa kuivataan edelleen, kuivausenergian tarve on pienempi.

Tasoviirapesurilla pystytään ottamaan näytteitä lähtömassasta sekä halutuista kohdista pesuviiralta. Näytteenoton turvallisuutta saataisiin parannettua kiinteällä huolto/ näytteenottotasolla. Suodosten arviointiin tai mittaukseen ei kokeiden tekohetkellä ollut mahdollisuutta. Pesun yhteydessä suodoksen määrää ja laatua olisi hyvä pystyä arvioimaan ja mittaamaan. Suodoksen mittauservojen (esimerkiksi sameus ja pH-arvo) perusteella pystytään arvioimaan nopeasti pesutulosta ja tarvittavaa pesunestemäärää. Suodosten näytteenottoaikojen rakentaminen palvelisi jatkossa myös pesuveden arvioinnissa vastavirtapesua hyödynnettäessä.

Tasoviirapesurin kapasiteetin kasvattaminen olisi mahdollista lisäämällä pesurille ajettavan massan sakeutta. Laboratoriosuodatusten perusteella (P11-massalla) sakeutta voisi lisätä 3 %:sta ainakin 10 %:iin suotautumisen merkittävästi hidastumatta. Sakeuden noston vaikutusta peseytyvyyteen ei kuitenkaan ole testattu, joten ennen muutosta pesun syöttösakeudessa, tulisi laboratoriossa testata myös sakeamman massan peseytyvyyttä bühner-pesutes-teillä tai Laroxin nauhavakuusuoatuksen mallinnuslaitteella.

Tasoviirapesurin pesulaitteisto mahdollistaa pesusuodoksen kierrätyksen vastavirtapesumenetelmällä. Vastavirtapesun hyödyntäminen säästää tuoreveden käyttöä ja samalla kustannuksia. Suotautuneen ja peseytyneen massan P11 pesussa huomattiin, että jo ilman pesuveden syöttöä saadaan massa pestyä

halutusti. Mahdollisen sakeuden noston tuoma pesutehokkuuden heikkene-
mistä voitaisiin joissain tilanteissa kompensoida lisäämällä pesuveden kierrä-
tystä.

9 YHTEENVETO

Uuden menetelmän testaus lähtee perinteisesti käyntiin laboratoriokokeista,
edeten pilot-mittakaavan kokeisiin. Tässä työssä edettiin päinvastaisessa jär-
jestyksessä. Järjestys osoittautui toimivaksi. Pilot-ajojen jälkeen meillä oli käsi-
tys siitä, minkälainen massa suotautui ja peseytyi koneella vallinneissa olo-
suhteissa. Laboratoriokokeilla saimme käsityksen siitä, mitä tulisi muuttaa,
jotta myös nyt suotautumattomat, runsaasti hienoainesta sisältävät, massat
saadaan suotautumaan ja peseytymään.

Syrjäytyspesuri soveltuu muokatun selluloosan pesuun, kun suotautuminen
saadaan onnistumaan. Laboratoriotesteissä testattiin ja löydettiin useampia
muuttujia, joiden avulla pystytään massan peseytymistä edellyttävää suotautu-
mista parantamaan. Riittävä lämpötila on näistä muuttujista merkittävin. Läm-
pötilaa nostamalla saadaan massan viskositeettiä nostettua ja suotautuvuutta
parannettua.

Toisena muuttujana voidaan mainita viira. Viiran tulee olla sellainen, että se ei
päästä hienoainesta sisään ja sen on oltava helposti puhdistettavissa. Run-
saasti hienoainesta sisältävillä massoilla näyttää parhaiten toimivan DLW-tyy-
pin viira, jossa on pieni ilmanläpäisyarvo. Viiran pesulaitteiston on myös toimit-
tava moitteettomasti.

Suotautumista voidaan parantaa oikein valitun apuaineen avulla. Parhaiten
tämäntyyppisille massoille näyttää soveltuvan kationiset polyakryyliamidit. So-
pivalla apuaineella voidaan vähentää hienoaineksen karkaamista suodokseen
ja hienoaineksen aiheuttamaa viiran likaantumista.

Laboratoriokokeiden tulokset eivät suoraan vastaa teollisuusmittakaavan syr-
jäytyspesurin toimintaa. Seuraavassa vaiheessa olisi mielenkiintoista testata
massojen pesua uudelleen, nyt saatujen tulosten valossa.

LÄHTEET

- Ahlgren, J. & Korhonen, M. 2020. Paper machine water chemistry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/natural-fibre-products/paper-making-chemistry/paper-machine-water-chemistry/> [viitattu 22.6.2023].
- Ahlgren, J. & Lindberg, L. 2020. Testing of deposit control chemicals for broke in laboratory. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/natural-fibre-products/papermaking-chemistry/influence-of-broke-on-wet-end-chemistry/testing-of-deposit-control-chemicals-for-broke-in-laboratory/> [viitattu 22.6.2023].
- Ala-Kaila, K., Poukka, O. & Tervola, P. 2005. Challenging the Traditional Counter-Current Water Circulation System Case: Washing of Soap in a Kraft Pulp Fibreline. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 83, no. 4, pp. 784-790.
- Bilitewski, B., Darbra, R.M. & Barcelo, D. 2012. Global Risk-Based Management of Chemical Additives I Production, Usage and Environmental Occurrence. Germany, Berlin: Springer Heidelberg Dordrecht.
- BHS-Sonthofen Group. 2018. BF Indexing Belt Filter- Gentle filtration of sedimenting media. PDF-dokumentti. Julkaistu 1.10.2018. Saatavissa: https://static.bhs-sonthofen.com/BHS-Prospekt-Taktbandfilter-BF-EN_102018-web_12.pdf [viitattu 15.3.2023].
- FC-Brookfield viskositeettimittaus s.a. UPM Pohjois-Euroopan Tutkimuskeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: UPM Pohjois-Euroopan Tutkimuskeskus, intranet [viitattu 10.7.2023].
- Gullichen, J. & Paulapuro, H. 2000. Papermaking science and technology. Chemical Pulping Book 6A. Jyväskylä, Suomi: Fapet Oy.
- Kemppainen, J. 2010. Nauhasuodattimen mitoitus ja toimintaolosuhteiden optimointi. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. Kemiantekniikka. Kandidaattityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/63335/nbnfi-fe201008112306.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [viitattu 14.7.2023].
- Koivula, K. 2014. Improving the efficiency of a brown stock line. Aalto Yliopisto. Kemian tekniikan korkeakoulu. Diplomityön tiivistelmä. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/14489/master_Koivula_Kimmo_2014.pdf?sequence=1 [viitattu 15.5.2023].
- Korhonen, M. 2023. Business Development Manager. Haastattelu ja materiaali. Solenis Finland Oy.
- Kuituominaisuuksien määrittäminen FS5-laitteella s.a. UPM Pohjois-Euroopan Tutkimuskeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: UPM Pohjois-Euroopan Tutkimuskeskus, intranet. [viitattu 22.6.2023].
- Maraghe, S. Dupont, A-L. Cardinaels, R. Paris-Lacombe, S. Hoefnagels, J.P.M. Suiker, A.S.J & Bosco, E. 2023. Assessing rheometry for measuring

the viscosity- average degree of polymerization of cellulose in paper degradation studies. *Heritage Science*. 11:15. Verkkoletti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00855-7> [viitattu 10.7.2023].

Massan viskositeetti kuparietyleenidiamiiniliuoksella s.a. UPM Pohjois-Euroopan Tutkimuskeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: UPM Pohjois-Euroopan Tutkimuskeskus, intranet. [viitattu 18.6.2023].

Miliander, L. 2009. *Pulping Chemistry and Technology*. Volume 2, Pulping chemistry and technology. 8 Pulp Washing 165-200. Germany, Berliini: De Gruyter Inc.

Partikkelikokoanalyysi PSA1190, märkäpuoli s.a. UPM Pohjois-Euroopan Tutkimuskeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: UPM Pohjois-Euroopan Tutkimuskeskus, intranet. [viitattu 22.6.2023].

Perlmutter, B. 2004. Evaluation of a Continuous-Indexing Vacuum Belt Filter as a Replacement for Filter Presses for the Manufacture of a High-Value Specialty Chemical Product. BHS-Filtration Inc. PDF-dokumentti. 17.5.2004. Saatavissa: <https://bhs-filtration.com/wp-content/documents/Article304.pdf> [viitattu 1.7.2023].

Perlmutter, B. 2015. *Solid-Liquid Filtration Practical Guides in Chemical Engineering*. 1. painos. Great Britain: Butterworth-Heinemann.

Pesulaitteet s.a. Know Pulp/ AEL ja Prowledge Oy. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/pulping/washing/4_equipment/frame.htm?zoom_highlightsub=pesulaitteisto [viitattu 22.5.2023].

Pesun periaate ja tunnusluvut s.a. Know Pulp/ AEL ja Prowledge Oy. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/pulping/washing/2_washing_theory/frame.htm?zoom_highlightsub=laimennus [viitattu 14.7.2023].

Salmela, N. 2006. Washing and Dewatering of Different Starches in Pressure Filters. Lappeenrannan Tekninen Yliopisto. Kemiantekniikka. Väitöskirja. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/31120/TMP.objres.423.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 30.5.2023].

Santos, R. & Hart, P. 2014, Brown Stock Washing – A Review of the Literature. *Tappi Journal Yearbook*, vol. 13, ss. 9-18. United States of America.

Sillanpää, M. 2005. Studies on washing in kraft pulp bleaching. Oulun Yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Väitöskirja. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514278771.pdf> [viitattu 18.6.2023].

Smook, G. 2016. *Handbook for pulp & paper technologists*. 4. painos (Kocurek M.). United States of America. Tappi Press.

Svarovsky, L. 2001. *Solid-Liquid Separation*. 4. painos. United Kingdom: Butterworth Heinemann.

Tervola, P., Andersson, R., Danielsson, M., Engelfeldt, A., Kiero, S., Olsson, K., Pikka, O., Samuelsson, A. & Siik, S. 2011. Washing, screening and cleaning of pulp. Teoksessa Papermaking science and technology- Volume 6 – Chemical Pulping Part 1, Fibre Chemistry and Technology. Toinen painos. Helsinki, Finland: Paper Engineers' Association/ Paperi ja Puu Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/papermaking-science-and-technology-books/volume-6-chemical-pulping-part-1/> [viitattu 20.5.2023].

Uotinen, H. 2016. Saostumat kartonkikoneen märkápäässä sekä kemikaalierossa. Jyväskylän Yliopisto. Fysiikan laitos. Pro gradu -tutkielma. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-201607013425> [viitattu 18.6.2023].

Wakeman, R.J. & Tarleton, E.S. 1999. Filtration Equipment Selection Modelling and Process Simulation. Ensimmäinen painos. Great Britain: Elsevier Advanced Technology.

Valmet Oy. 2016. Valmet lisää laboratoriokuituanalysaattoriinsa uusia ominaisuuksia. Lehdistötiedote. Julkaistu 18.5.2016. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.valmet.com/fi/media/uutiset/lehdistotiedotteet/2016/valmet-lisaa-laboratoriokuituanalysaattoriinsa-uusia-ominaisuuksia/> [viitattu 15.7.2023].

Valmet Oy. 2016a. Valmet Fiber Image Analyzer. YouTube. Julkaistu 26.4.2016. Videoleike. Saatavissa: <https://youtu.be/zGa0ojez-ww> [viitattu 15.7.2023].

| Viira nro | product code | loimikuitu (mm) | kudekuitu (mm) | paino (g/m ²) | paksuus (µm) | kudontakuutio (l/dm ² /min) | ilman läpäisevyys |
|-----------|--------------|-----------------|-------------------|---------------------------|--------------|--|-------------------|
| 1 | | PET/0,3 | PET/0,3 | 640 | 800 | twill 2/2 | 400 |
| 2 | | PP/ 0,2+0,4 | PP/ 0,2+0,3 | 470 | 1100 | DLW | 350 |
| 3 | | PP/ 0,2+0,3 | PP/multi +0,2+0,3 | 430 | 1100 | DLW | 200 |
| 4 | | PP/ 0,2+0,3 | PP/ 0,2+0,3 | 410 | 800 | DLW | 180 |
| 5 | | PP/ 0,2+0,3 | PP/multi +0,4 | 460 | 950 | DLW | 50 |

Suodatuskokeiden muuttujat
Lämpötilan vaikutus suotautumiseen

Liite 2/2

| Massat | P4 +P | P6 | P11 |
|-----------------|----------------------|----|-----|
| Lämpötilat (°C) | +15, +25, +40, +60 | | |
| viirat | 1 ja 5 | | |
| sakeus (%) | 3 | | |
| apuaineet | referenssi polymeeri | - | - |

Viiran vaikutus suotautumiseen

| Massat | P11 | | | | |
|-----------------|-------------|---|---|---|---|
| Lämpötilat (°C) | +25 | | | | |
| Viirat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Sakeus (%) | 3 | | | | |
| Apuaineet | ei käytössä | | | | |

Viiran vaikutus suotautumiseen jatkotestaus

| Massat | P4+ P | | P6 | |
|-----------------|----------------|---|-------------|---|
| Lämpötilat (°C) | +25 | | | |
| Viirat | 1 | 5 | 1 | 5 |
| Sakeus (%) | 3 | | | |
| Apuaineet | ref. polymeeri | | ei käytössä | |

Sakeuden vaikutus suotautumiseen

| Massa | P11 | | |
|-----------------|-------------|-----|----|
| Lämpötilat (°C) | 40 | | |
| Viirat | 1 | | |
| Sakeus (%) | 3 | 6,5 | 10 |
| Apuaineet | ei käytössä | | |

Apuaineiden vaikutus suotautumiseen

| Massat | P6 |
|-----------------|----------------------------|
| Lämpötilat (°C) | 40 |
| Viirat | 1 |
| Sakeus (%) | 3 |
| Apuaineet | neljä erilaista apuainetta |