

SAIMAAN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikka, Imatra  
Paperi- ja kuidutustekniikan koulutusohjelma

Matti Horttanainen

# **TÄYTEAINEEN SYÖTTÖPAIKAN VAIKUTUS PYÖRREPUHDISTUSLAITOKSEN TOIMINTAAN**

Opinnäytetyö 2010

## TIIVISTELMÄ

Matti Horttanainen

Täyteaineen syöttöpaikan vaikutus pyörrepuhdistuslaitoksen toimintaan, 61 sivua, 5 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu, Imatra

Paperitekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyö 2010

Ohjaajat: Lehtori Jarkko Männynsalo, Saimaan AMK, DI Jenni Ukkonen, Stora Enso Oyj

Työ tehtiin Stora Enso Oyj:n Imatran tehtaiden PK 8:lle. Työn tavoitteena oli selvittää täyteaineen rejektoitumista pyörrepuhdistuslaitoksen eri portaissa sekä mitata energiankulutus pyörrepuhdistuslaitoksen laimennusvesipumpuilta. Lähtökohtana oli selvittää, kumpi kahdesta eri täyteaineen syöttöpaikasta on edullisempi täyteainehäviöiden ja energiankulutuksen kannalta.

Työn teoriaosassa perehdyttiin paperikoneen lyhyeen kiertoon ja sen toimintaan. Laajemmin teoriaosassa perehdyttiin pyörrepuhdistuslaitoksen toimintaperiaatteisiin. Lisäksi teoriaosassa käsiteltiin täyteaineita ja niiden ominaisuuksia.

Kokeellisessa osassa säädettiin pyörrepuhdistuslaitoksen eri portaiden paineita ja mitattiin paineiden vaikutusta laimennusvesipumppujen energiankulutukseen. Täyteaineen syöttöpaikan vaihtamisen vaikutusta pyörrepuhdistuslaitoksen toimintaan tutkittiin ottamalla näytteet jokaisen portaan virroista ennen ja jälkeen täyteaineen syöttöpaikan vaihtamisen.

Pyörrepuhdistuslaitoksen paineiden säädön osalta ei saatu puutteellisten näytteidenottopisteiden takia tarkkoja tuloksia laitoksen toimintaan. Energiankulutuksen suhteen paineiden muutoksella ei ollut merkittävää vaikutusta. Täyteaineen syöttöpaikan vaikutus pyörrepuhdistuslaitoksen sakeuksiin ja tuhkapitoisuuksiin oli selvästi havaittavissa. Täyteaineen syöttöpaikan vaihtamisella oli myös havaittava vaikutus pyörrepuhdistuslaitoksen eri portaiden rejektisuhteisiin. Laimennusvesipumppujen energiankulutukseen täyteaineen syöttöpaikan vaihtamisella ei kuitenkaan ollut merkittävää vaikutusta.

Avainsanat: Pyörrepuhdistus, täyteaineet, rejekti

## ABSTRACT

Matti Horttanainen

The Effect of the Filler's Feed Point on the Operations in the Hydrocyclone Cleaning Plant, 61 pages, 5 appendices

Saimaa University of Applied Sciences, Imatra

Degree Programme in Paper Technology

Final year Project 2010

Tutors: Mr Jarkko Männynsalo, M.Sc, Senior Lecturer, Saimaa UAS, Ms Jenni Ukkonen, M.Sc, Operating Engineer, Stora Enso Plc

This final year project was made in Stora Enso Plc Imatra mills for the paper-machine 8. The purpose of the project was to analyse the amount of the filler in different stages of hydrocyclone cleaning rejects, and measure the energy consumption of dilution water pumps. The basis was to find out which one of the two different filler's feed point is better from the point of view of filler loss and energy consumption.

In the theoretical part of the study, the focus was on operating principle of hydrocyclone cleaning. In addition, the theoretical part also focused on the short circulation of the paper machine and most commonly used fillers in papermaking.

In the experimental part the pressures of hydrocyclone cleaning plant were adjusted and the effects of the pressure changes were measured in energy consumption of dilution water pumps. Effects of the change in filler's feed point in operation of hydrocyclone cleaning plant were analysed by taking the samples from each flow of hydrocyclone cleaning plant.

Because of missing sampling points, there were no accurate results about the pressure changes' effects on hydrocyclone cleaning. There were no significant changes in the energy consumption caused by pressure adjustments. Effects of the filler's feed point on the consistency and the ash content of hydrocyclone cleaning were clearly noticeable. The change in filler's feed point also caused changes in the reject ratio on all the stages of hydrocyclone cleaning. In the energy consumption of dilution water pumps there was no difference between two different filler's feed points.

Key Words: Hydrocyclone Cleaning, Fillers, Reject

# SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
2	STORA ENSON IMATTRAN TEHTAAT .....	7
3	LYHYT KIERTO .....	8
3.1	Lyhyen kierron tehtävät .....	8
3.1.1	Massan laimennus.....	9
3.1.2	Kiintoaineen talteenotto .....	9
3.1.3	Massan puhdistus ja ilmanpoisto.....	10
3.1.4	Virtauksen tasaaminen .....	11
3.2	Lyhyen kierron kytkentä.....	12
4	TÄYTEAINEET .....	14
4.1	Kaoliini .....	14
4.2	Talkki .....	15
4.3	Kalsiumkarbonaatit .....	16
4.4	Erikoispigmentit .....	18
4.4.1	Kalsinoitu kaoliini .....	19
4.4.2	Na-Al-silikaatti.....	19
4.4.3	Titaanioksidi .....	19
4.4.4	Alumiinitrihydraatti .....	20
4.4.5	Muovipigmentit .....	20
5	PYÖRREPUHDISTUS .....	21
5.1	Toimintaperiaate .....	21
5.2	Keskeiskiihtyvyys.....	22
5.3	Pyörrepuhdistimen virtaukset .....	24
5.4	Hiukkasiin vaikuttavat voimat.....	26
5.5	Lajittumiseen vaikuttavat tekijät .....	27
5.6	Pyörrepuhdistimen hallintasuureet .....	29
5.7	Pyörrepuhdistuslaitoksen kytkennät .....	32
5.8	Pyörrepuhdistin tyypit .....	34
5.9	Täyteaineen rejektoituminen pyörrepuhdistuksessa .....	35
5.10	Pyörrepuhdistuksen pumppauksen energiankulutus .....	36
6	KOKEELLINEN OSA .....	38
6.1	Kokeellisen osan tavoitteet .....	38
6.2	Kokeellisen osan suoritus .....	39
7	TULOKSET .....	40
7.1	PP-laitoksen paineiden säätö .....	40
7.2	PP-laitoksen sakeus- ja tuhkamittaukset .....	41
8	TULOSTEN TARKASTELU .....	45
8.1	Paineiden säätö .....	45
8.1.1	Paineiden muutoksen vaikutus energiankulutukseen .....	48
8.1.2	Paineiden säädön vaikutus 6-vaiheen rejektiin.....	49
8.2	Täyteaineannostelupaikan vaihtaminen.....	50
8.2.1	Pyörrepuhdistuslaitoksen sakeudet .....	50
8.2.2	Pyörrepuhdistuslaitoksen tuhkapitoisuudet .....	51
8.2.3	Pyörrepuhdistuslaitoksen rejektisuhteet .....	52
8.2.4	6-portaan rejektivirran mukana poistuva kiintoaine.....	53
9	YHTEENVETO .....	55
	KUVAT .....	57

KUVIOT .....	58
TAULUKOT .....	59
LÄHTEET .....	60

#### LIITTEET

LIITE 1 Q:n korjauskertoimet

LIITE 2 PK 8:n prosessikaavio

LIITE 3 PK 8:n PP-laitoksen kytkentä

LIITE 4 PP-laitoksen paineet 19.2.2009

LIITE 5 PP-laitoksen 6-portaan rejektin virtaus 27.8.2009

# 1 JOHDANTO

Tämä päättötyö on tehty Stora Enso Oyj:n Imatran tehtaan paperikone 8:lle, joka valmistaa puuvapaita hienopapereita. Paperikone 8 valmistamien paperien pääraaka-aineina käytetään oman sellutehtaan lyhyt- ja pitkäkuituista sellua. Lisäksi valmistuksessa käytetään täyteaineina kalsiumkarbonaatteja.

Täyteaineet ovat raaka-aineina selvästi kuituja edullisempia käyttää paperinvalmistusprosessissa ja lisäksi niiden avulla saadaan painettavuutta ja optisia ominaisuuksia parantavia vaikutuksia. Täyteaineilla on kuitenkin tiettyjen ominaisuuksien takia taipumus ajautua rejektiin paperikoneen pyörrepuhdistuksessa. Täyteaineen syöttöpaikka paperikoneen lyhyeen kiertoan voi olla joko ennen tai jälkeen pyörrepuhdistuslaitosta. Tämän työn tarkoituksena on tutkia täyteaineen rejektoitumista pyörrepuhdistuslaitoksen eri portaissa sekä mitata energiankulutus pyörrepuhdistuslaitoksen laimennusvesipumpuilta. Lähtökohtana on saada selville, kumpi täyteaineen syöttöpaikka on edullisempi täyteainehäviöiden ja energiankulutuksen kannalta.

Työn kirjallisessa osassa perehdytään paperikoneen lyhyen kierron toimintaan ja sen osiin. Tähän työhön oleellisesti liittyvä pyörrepuhdistuslaitos on osa paperikoneen lyhyttä kiertoa. Teoriaosassa se on siksi esitetty omassa osassaan. Lisäksi teoriaosassa on käsitelty yleisimmin käytettyjen täyteaineiden ominaisuuksia sekä pumppauksen energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä.

Kokeellisessa osassa pyrittiin säätämään pyörrepuhdistuslaitoksen paineet laitevalmistajan ohjeiden mukaiselle tasolle. Täyteaineen syöttöpaikan vaikutusta pyörrepuhdistuslaitoksen toimintaan tutkittiin määrittämällä virtojen tuhkapitoisuudet ja sakeudet. Sakeuksien ja tuhkapitoisuuksien perusteella saatiin selville rejekti-suhteet ja rejektoituvan kiintoaineen määrä. Laimennusvesipumppujen energiankulutus mitattiin kunkin muutoksen osalta.

## **2 STORA ENSON IMATRAN TEHTAAT**

Imatran tehtaat ovat osa maailmanlaajuisesti toimivaa Stora Enso Oyj:tä. Imatran tehtaiden tehdaskokonaisuus koostuu Kaukopään ja Tainionkosken yksiköistä. Lisäksi Kotkan seudulla sijaitseva Karhulan yksikkö kuuluu Imatran tehtaisiin. Yhteensä nämä yksiköt työllistävät tällä hetkellä noin 2000 henkeä. Imatran tehtaiden kapasiteetti on yli miljoona tonnia paperia ja kartonkia vuodessa, josta yli 90 % menee vientiin pääasiassa Eurooppaan. Myös Kaakkois-Aasia on osuudeltaan merkittävä vientialue. (Stora Enso.)

Imatran tehtailla valmistetaan nestepakkauskartonkeja kaikkiin nestepakkausjärjestelmiin ja lopputuotteita ovat muun muassa maito- ja mehutölkit. Elintarvikkartonkien käyttökohteita ovat juomakupit ja erilaiset elintarvikepakkaukset. Pakkauskartonkien käyttökohteita ovat elintarvike-, makeis- ja savukepakkaukset. Graafiset kartongit sopivat käytettäväksi korteissa, kansissa ja luksuspakkausissa. Imatran tehtailla valmistetaan myös pakkaus- ja graafisia papereita sekä toimistopapereita ja erikoispapereita. Tainionkoskella valmistetaan huonekaluteollisuuden laminaatteihin käyttämää Absorbex-paperia. (Stora Enso 2009.)

### **Paperikone 8**

Kaukopään tehdasyksikössä sijaitseva paperikone 8 kuuluu Stora Enson hienopaperiyksikköön ja valmistaa pääasiassa jatkolomake- ja kouluvihkopapereita. Kone on rakennettu käytöstä poistetun kartonkikone 3:n tilalle vuonna 1982. Myöhemmin koneeseen on tehty modernisointeja ja uusintoja, joista esimerkeinä viiraosa (1990), pintaliimaus (1991), pituusleikkuri (1996), pakkaamo (2001) ja osittainen koneen modernisointi vuonna 2005. Koneen nykyinen kapasiteetti on 215000 t/a puuvapaata hienopaperia. Koneella valmistettavien tuotteiden raaka-aineina käytetään Kaukopään sellutehtaan havu- ja lehtipuu-sellua, jotka toimitetaan koneelle niin sanottuna putkiselluna. Täyteaineina käytetään kalsiumkarbonaatteja. Käytetyt kalsiumkarbonaattilaadut ovat liitu ja GCC (marmori). (Stora Enso 2009.)

### **3 LYHYT KIERTO**

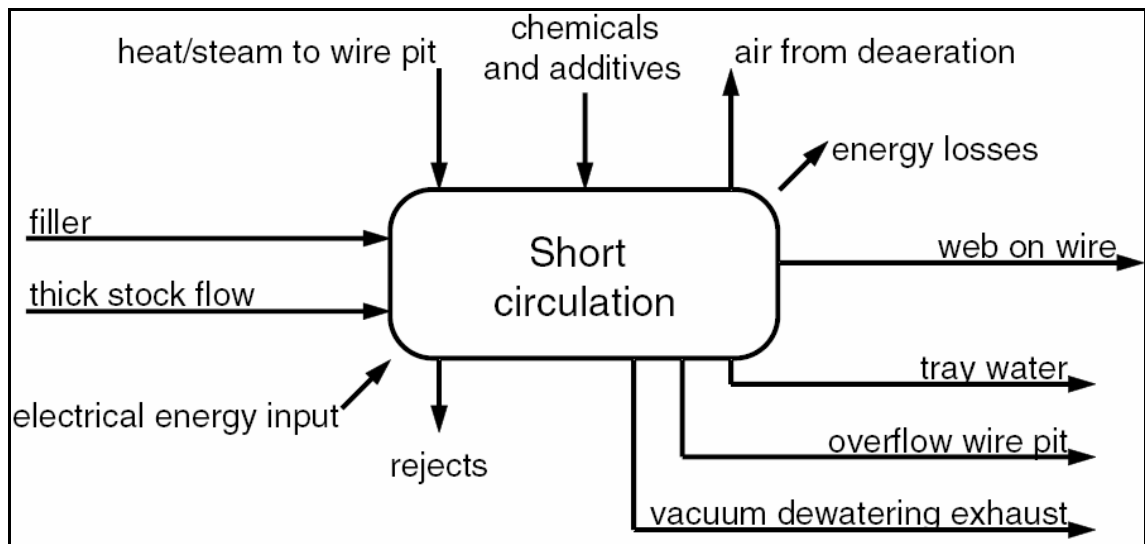
Lyhyen kierron nimitys tulee siitä, että paperikoneen viiraosalta paperirainasta poistuva vesi ohjataan viirakaivoon ja se käytetään konesäiliöstä tulevan sakean massan laimentamiseen perälaatikkosakeuteen. Perälaatikolle tulevasta virtauksesta veden osuus voi olla yli 99 % ja suurilla paperikoneilla perälaatikkovirtaus voi olla jopa 150000 l/min. Lyhyessä kierrossa esiintyvät häiriöt näkyvät suoraan lopputuotteessa. Lyhyttä kiertoa voidaankin hyvällä syyllä sanoa paperinvalmistusprosessin arimmaksi osaksi. (Puusta paperiin M-504 1997, 44.)

#### **3.1 Lyhyen kierron tehtävät**

Lyhyt kierto on osa paperinvalmistusprosessissa käytettävää massa- ja kierto-vesijärjestelmää. Kiertovesijärjestelmän tarkoitus on vähentää energian- ja vedenkulutusta sekä pienentää päästöjä ja raaka-ainekustannuksia. Lyhyen kierron pääasialliset tehtävät ovat sakean massan laimennus perälaatikkosakeuteen, viiraveden ja kiintoaineen talteenotto, massan puhdistus epäpuhtauksista ja ilmasta sekä virtausten tasaaminen ennen perälaatikkoa. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 125.)

Kuvassa 1 on esitetty lyhyenkierron sijoittuminen sitä ympäröiviin raaka- ja lisä-ainevirtoihin. Kuvasta selviävät myös virtojen suunnat lyhyen kierron suhteen. Lämmitysenergia johdetaan viirakaivoon prosessilämpötilan kontrolloimiseksi, ja sen käyttö voi olla rajoitettu pelkästään ylösajotilanteisiin. Kaikki kuvan virtojen määrät muuttuvat joko tarkoituksellisesti tai sattumanvaraisesti virtojen konsentraation, liuenneiden aineiden koostumuksen ja jossakin määrin lämpötilan mukaan. Suurin vaikutus lyhyen kierron järjestelmään on kuitenkin sakean massan virtauksella. (Paulapuro & Terho & Weise 2000, 128.)





Kuva 1. Lyhyen kiertoon liittyvät ulkoiset virrat (Paulapuro ym. 2000)

### 3.1.1 Massan laimennus

Massan syöttösakeus paperikoneen perälaatikolle on paperilajista riippuen 0,2-1,2 %, kun taas konesäiliöstä paperikoneelle tulevan sakean massan sakeus on noin 3 %. Paperikoneen viiraosan jälkeen paperin kuiva-ainepitoisuus on parhaimmillaan yli 20 %. Viiraosalla siis poistuu yli 95 % perälaatikolle syötetystä vedestä. Tällä viirakaivoon johdetulla vedellä laimennetaan konesäiliöstä tuleva sakeamassa perälaatikkosakeuteen. Ylimääräinen vesi johdetaan kiertovesisäiliöön ja sitä käytetään laimennusvetenä massankäsittelyssä ja hylkylinjoissa. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 122.)

### 3.1.2 Kiintoaineen talteenotto

Yksi lyhyen kierron tehtävistä on viiraosalta poistuvan veden sisältämän kiintoaineen palauttaminen takaisin paperirainaan. Perälaatikosta viiralle syötettävän massasulpun viiraretentio on yleensä välillä 50–80 %. Viiran läpäissyt vesi on arvokasta sen sisältämän runsaan kuitu-, täyteaine- ja lämpömäärän takia. Viiraretentiota voidaan oleellisesti parantaa lisäämällä sopivia retentiokemikaaleja, mutta tällöin paperin formaation huononeminen on väistämätöntä. Näin paperin laadun kannalta on oleellista saada viiran läpi päässyt kiintoaine palautettua

takaisin paperirainaan lyhyen kierron kautta. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 125.)

### **3.1.3 Massan puhdistus ja ilmanpoisto**

Eri käsittelyvaiheessa voi paperimassan mukaan joutua epäpuhtauksia kuten kuitukimppuja, pigmenttikasautumia, hiekkaa ja metallisiruja. Epäpuhtaudet paperimassassa heikentävät paperin laatua, aiheuttavat paperikoneen eri osien kulumista ja haittaavat massan prosessoitavuutta paperikoneella. Yleisimmin lyhyt kierto sisältää pyörrepuhdistuslaitoksen, painesihtejä sekä ilmanpoistojärjestelmän. (Gustafsson ym. 1983, 497; Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 125.)

#### **3.1.3.1 Pyörrepuhdistus ja painesihtaus**

Pyörrepuhdistimet erottavat massasta epäpuhtaudet tiheyden, koon ja muodon perusteella. Massa syötetään pyörrepuhdistimeen tangentiaalisesti, jolloin syöttövirtauksen synnyttämä voimakas pyörre saa aikaan keskipakovoiman, joka erottaa tiheydeltään suuremmat ja muodoltaan pyöreämmät kappaleet. Pyörrepuhdistuksessa poistuva rejektin määrä riippuu puhdistettavan massan epäpuhtauksien määrästä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 126.)

Ennen perälaatikkoa sijaitsevien konesihtien tarkoitus on poistaa epäpuhtaudet ja hajottaa kuitukimppuja. Käyttämällä hienojakoisia sihtirumpuja voidaan massasta poistaa pyörrepuhdistuslaitoksen läpäisseitä muoveja ja tikkuja. Koska konesihti sijaitsee paperikoneella juuri ennen perälaatikkoa, sille asetettavia kriittisiä vaatimuksia ovat

- mahdollisimman pieni pulsaatio
- rinnakkain kytkettyjen sihtien kierrostaajuuksien erottuminen toisistaan
- hyvä puhdistuskyky
- kiillotetut sisäpinnat.

Painesihtien rejekti käsitellään jälkisihdeillä kuituhäviöiden minimoimiseksi. (Puusta paperiin M-504 1997, 50.)

### **3.1.3.2 Ilmanpoisto**

Ilma joutuu lyhyeen kiertoon sakean massan mukana tai viirakaivon nollaveden mukana. Sakean massan sisältämä ilma on yleensä peräisin avoimista säiliöistä, sekoituksesta, vuotavista venttiileistä ja turbulenssista. Viiralta viirakaivoon tuleva nollaveden sisältämä ilma poistuu yleensä viirakaivossa, edellyttäen, että viirakaivo on oikein mitoitettu. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 127.) Massassa oleva ilma aiheuttaa vaahtoamista, pulsaatiota ja sakeusvaihteluja. Lisäksi ilma aiheuttaa likaantumista sekä huonontaa formaatiota ja vedenpoistoa viiralta. (Puusta paperiin M-504 1997, 48.)

Ilmanpoisto tapahtuu ilmanpoistosäiliössä kiehumispistettä vastaavassa alipaineessa. Ilma ja kaasu erottuvat nesteestä voimakkaan pisaroinnin, hydraulisen iskun ja kiehumisen vaikutuksesta. Ilmanpoisto ja tyhjiö saadaan aikaan tyhjäpumpun ja lauhduttimen avulla. Ilmanpoistosäiliö voi olla erillinen tai pyörrepuhdistuslaitoksen kanssa yhdistetty yhteinen kokonaisuus. (Puusta paperiin M-504 1997, 48.)

Ilmanpoistosäiliössä pidetään vakio-pinta jatkuvalla ylijouksulla, joka palautetaan viirakaivoon. Normaalisti paluuvirta on 3-5 % syöttövirtauksesta. Ylijouksumäärää muuttamalla on mahdollista säätää koneelle menevää virtausmäärää koskematta pyörrepuhdistuslaitoksen säätöihin. Ilmanpoiston lisäksi ilmanpoistosäiliöllä on merkittävä tehtävä toimia paine- ja sakeushäiriöiden tasaajana. (Puusta paperiin M-504 1997, 48.)

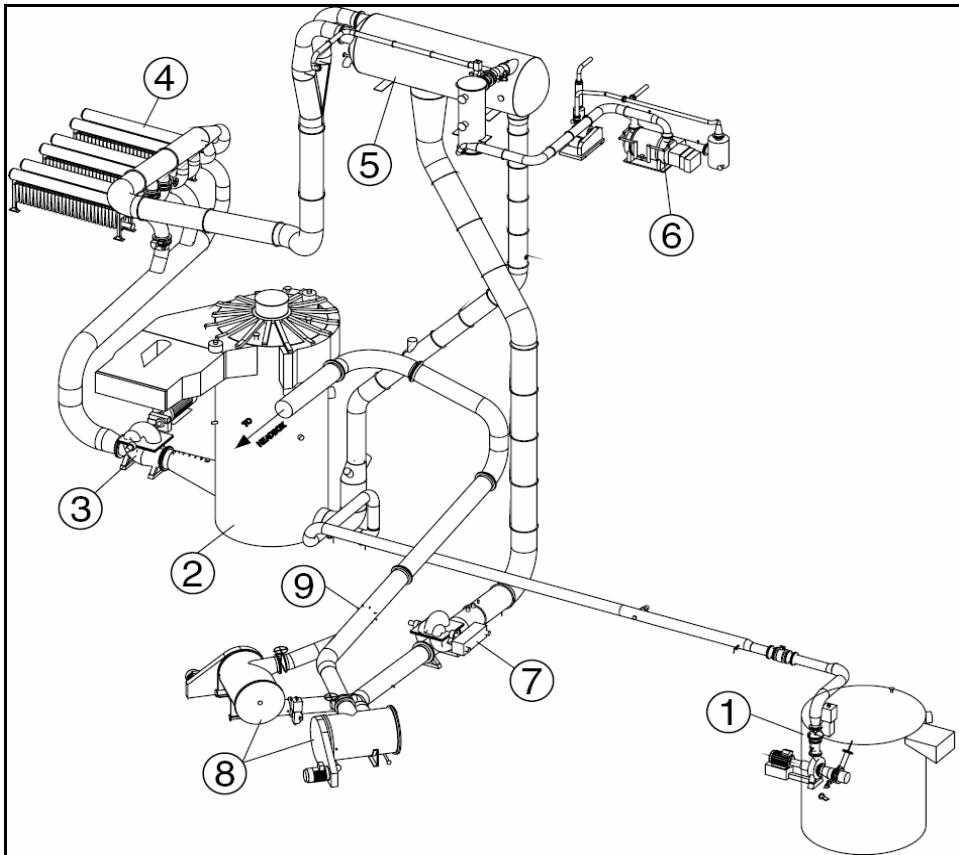
### **3.1.4 Virtauksen tasaaminen**

Paperikoneen perälaatikolta tulevat paperin pituussuuntaiset neliömassan vaihtelut ovat usein peräisin perälaatikkoa edeltävän lyhyen kierron prosesseista.

Neliömassan konesuuntaiseen vaihteluun vaikuttaa lyhyen kierron painevaihtelut. Painevaihtelua aiheuttavat yleisimmin pumput, painesihdit ja mekaaninen värähtely, joka voi pahimmassa tapauksessa kasvaa rakenteiden resonoidessa. Neliömassan vaihtelun välttämiseksi on lyhyen kierron annostelumassan ja viiraveden sekoittamisen tapahduttava tasaisesti. Viirakaivon alapään, syöttömasaputken ja pumpun imuyhteen oikea muoto on tärkeä sekoituksen tasaisuuden varmistamiseksi. Sekoituspumpun ja perälaatikon syöttöpumpun valmistuksessa on kiinnitetty erityistä huomiota mitoittamiseen ja muotoiluun. Pumppujen akselien tulee olla tasapainossa värähtelyiden välttämiseksi, ja siipipyörien tulee olla pyörähdyssymmetriset. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005.)

### **3.2 Lyhyen kierron kytkentä**

Kuvassa 2 on esitetty perinteisen lyhyen kierron kytkentä ja rakenne. Sakeamassa pumpataan konesäiliöstä (1) laimennettavaksi viirakaivon (2). Kuvan järjestelmässä sakeamassa pumpataan sulkuventtiiliin, magneettisen virtausmittarin ja sakeusmittarin läpi viirakaivon, joten neliömassan säätöön käytetään neliömassaventtiiliin sijaan säädettävällä pyörimisnopeudella varustettua pumpua. Sakean massan ja viiraveden sekoituksen jälkeen (2), juuri ennen sekoituspumppua (3) tapahtuu lisäaineen annostelu. Sekoituspumppu syöttää massan pyörrepuhdistuksen (4) ensimmäiseen vaiheeseen, mistä aksepti virtaa ilmanpoistosäiliöön (5). Ilmanpoistosäiliön ilma johdetaan alipainepumpulle (6) ja siitä edelleen vedenerotukseen. Massa virtaa ilmanpoistosäiliöstä perälaatikon syöttöpumpulle (7). Täyte- ja lisäaineet annostellaan ennen perälaatikon syöttöpumppua. Seuraavaksi massa syötetään painesihtien (8) läpi, josta se jatkaa kulkuaan perälaatikolle. Painesihtien rejektit kerätään jatkokäsiteltäviksi. Retentioaineiden annostelupisteessä (9) tapahtuu retentioaineiden syöttö. (Paulapuro ym. 2000, 128.)



Kuva 2. Lyhyt kierto (Paulapuro ym. 2000)

## 4 TÄYTEAINEET

Paperin täyteaineet ovat suoraan luonnon mineraaleista tai synteettisesti eri raaka-aineista valmistettuja hienojakoisia vaaleita pigmenttijauheita. Useimmat paperilaadut sisältävät täyteaineita 20–35 %. Syitä täyteaineiden käyttöön ovat laadun parantaminen ja raaka-ainekustannusten pienentäminen. Täyteaineilla saadaan parannettua paperin optisia ominaisuuksia, painettavuutta ja niillä voidaan vaikuttaa myös paperin rakenteellisiin ominaisuuksiin. Taloudellisesti täyteaineiden käyttö on kuitua edullisemmän hintansa takia hyödyllistä. Tästä kuitenkin tekevät poikkeuksen erikoistäyteaineet, joita käytetään korkeasta hinnasta huolimatta paperille antamiensa ominaisuuksien takia. (Krogerus 1999, 117.)

### 4.1 Kaoliini

Kaoliini on valkoista savea, joka koostuu kaoliiniittiryhmän mineraaleista. Se on tuontiraaka-aine, joka kilpailee muun muassa kotimaisen kalsiumkarbonaatin, talkin ja kalsiumsulfaatin kanssa. Kidemuodoltaan levymäinen kaoliini sisältää noin 47 % piioksidia ( $\text{SiO}_2$ ), 40 % alumiinioksidia ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ja 13 % vettä. Kaoliini-tuotteet valmistetaan luonnon raakakaoliinista puhdistamalla, fraktioimalla ja kevyesti jauhamalla. Tuote voidaan myös valkaista esimerkiksi ditioniitilla tai otsonilla. Paperiteollisuudessa käytettyjen kaoliinien vaaleus on välillä 79–90 %. (Laitinen 2005, 193-194.)

Kaoliinin hienojakoinen ja levymäinen rakenne tukkii ja tasoittaa paperin pintaa, jolloin saadaan hyvä kiilto ja sileys erityisesti kalanteroinnin jälkeen. Kaoliini on suhteellisen hydrofiilisenä helppo liettää ja se reagoi offset-painovärien kanssa. Optisista ominaisuuksista opasiteetti ja vaaleus säilyvät hyvinä jopa superkalanteroinnin jälkeen. Kaoliini soveltuu hyvin syväpaino- ja offsetpainopapereihin. (Hentunen 1998, 5.)

## 4.2 Talkki

Talkki louhitaan avolouhoksissa, joista saadut lohkareet murskataan ja jauheetaan. Jauhetusta talkista poistetaan epäpuhtaudet vaahdottamalla. Rikastettu talkki jauhetaan suihku- tai mekaanisissa myllyissä haluttuun hienouteen. (Hentunen 1998, 5.)

Talkki on kidevedellistä magnesiumsilikaattia,  $3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ . Talkki on kemiallisesti hyvin kestävä ja se on mineraaleista kaikkein pehmein. Pehmeytensä ansiosta talkki kuluttaa viiroja ja koneen osia täyteaineista vähiten. Muodoltaan talkki on kaoliiniakin levymäisempi ja partikkelikokojakauma on varsin karkea. Talkin levymäisyys parantaa paperin sileyttä ja se sopii hyvin SC-syväpainopapereihin. Levymäisyydestä ja karkeudesta johtuen talkin viirarentio on suhteellisen hyvä. (Hentunen 1998, 5.)

Talkki on sähköisesti neutraali ja kemiallisesti inertti. Talkki ei reagoi tavanomaisissa lämpötiloissa minkään kemikaalin kanssa. Tästä johtuen talkki on käyttökelpoinen kaikilla paperinvalmistuksen pH-alueilla. Symmetrisellä talkkikiiteellä on pieni adheesio sekä toiseen talkkikiiteeseen ja kuituihin. Talkki on myös kaikista peruspigmenteistä hydrofobisin ja aerofiilisin. Edellä mainittujen syiden vuoksi talkki on suhteellisen vaikea liettää ja liete vaahtoa helposti. Lisäksi paperin kitka jää muita täyteaineita alhaisemmalle tasolle. Hydrofobisuuden takia talkkihiukkaset saattavat irrota paperin pinnasta offset-painatuksessa ja aiheuttaa pölyämistä. Talkkia käytetään mieluiten päällystetyn paperin täyteaineena, jolloin päällysteen sideaine antaa riittävän pintalujuuden. (Hentunen 1998 6; Lampinen 1996, 58; Häggblom-Ahnger & Komulainen 2005, 39.)

Hydrofobisuudesta johtuen talkki kerää itseensä pihkaa ja muita prosessivesien epäpuhtauksia, jotka poistuvat prosessista retentoitumalla jatkuvasti paperiin. Talkkia käytetään muun muassa LWC-pohjapaperiin päällystyslateksista tulevan niin sanotun valkoisen pihkan poistamiseen. Tällä pyritään välttämään päällystyskonekatkoja ja pohjapaperin reikiä. Varsinaiset pihkantorjuntaan tarkoitetut talkit ovat täyteainetalkkeja hienojakoisempia. (Hentunen 1998, 6; Häggblom-Ahnger & Komulainen 2005, 39.)

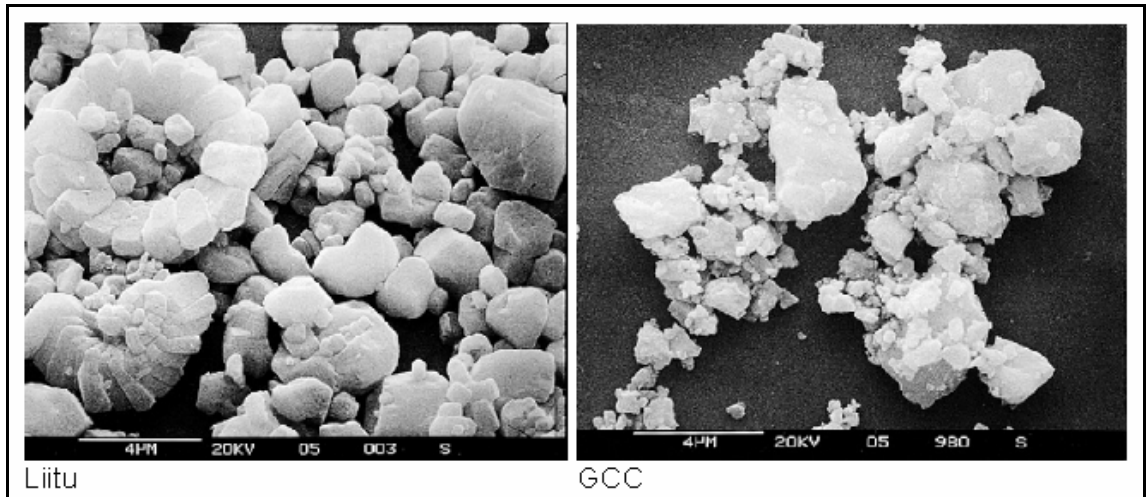
### 4.3 Kalsiumkarbonaatit

Kalsiumkarbonaateilla,  $\text{CaCO}_3$ , tarkoitetaan ryhmää mineraaleja, joilla on samanlainen kemiallinen koostumus, mutta erilaiset fysikaaliset ominaisuudet. Kalsiumkarbonaatit esiintyvät luonnossa liituna, kalkkikivenä ja marmorina. (Hentunen 1998, 6.)

Useimmat kalsiumkarbonaattiesiintymät ovat syntyneet erityisesti koteloiden sedimentoitua tietyissä olosuhteissa meren pohjalle. Liituesiintymät ovat näistä nuorimpia ja karbonaatti on näistä myös epäpuhtainta. Liidun ikä on noin 100 miljoonaa vuotta. Liitu ei ole joutunut kovaan puristukseen maan poimutuksiin, ja on tästä johtuen säilyttänyt pehmeän rakenteensa. Liidusta on elektronimikroskoopilla nähtävissä jopa eliöiden kuorirakenteet. Kalkkikiviesiintymät ovat iältään 150 miljoonaa vuotta. Kalkkikivi on syntynyt puristuksessa maan poimuttuessa, jolloin rakenne on tiivistynyt ja kovettunut. Marmori on iältään 200–600 miljoonaa vuotta. Marmori on syntynyt kalkkisaostumien kiteytyessä maan liikkeen, paineen ja lämmön vaikutuksesta. Kalkkikivi ja marmori sisältävät yli 95 % kalsiumkarbonaattia ja ovat hyvin puhtaita. Ne ovat myös vaa-leudeltaan huomattavasti parempia kuin liitu. (Hentunen 1998, 6; Lampinen 1996, 59.)

Kuvassa 3 on liidun ja jauhetun kalkkikiven elektronimikroskooppikuvat. Karbonaattipartikkelit ovat pääpiirteissään pyöreähköjä, mutta silti särkikkäitä. Ne eivät muotonsa takia pysty sulkemaan paperin pintaa samalla tavalla kuin levymäiset partikkelit. Paperiin muodostuva pinta on karbonaatteja käytettäessä matta tai silkki, jolloin lukemista häiritsevää kiiltoa ei esiinny. Tarvittaessa kuvat saadaan kuitenkin tulostettua riittävän kiiltäviksi. Karbonaatti lisää myös paperin kitkaa, joka parantaa paperin jatkokäsittelyominaisuuksia. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 39-40.) Täyteaineina käytettävät kalsiumkarbonaatit on nykyisin jaettu kahteen pääryhmään, jauhettuun kalsiumkarbonaattiin (GCC) ja saostettuun kalsiumkarbonaattiin (PCC).(OMYA.)





Kuva 3. Liidun ja jauhetun kalsiumkarbonaatin elektronimikroskooppikuvat (Krogerus 1999, 127).

Jauhettu kalsiumkarbonaatti valmistetaan liidusta, kalkkikivestä tai marmorista. GCC:n vaaleus ylittää tai jopa ylittää 95 % riippuen käytetystä raaka-aineen laadusta ja prosessista. Raaka-aine jauhetaan haluttuun partikkelikokoon, jolloin sen sisältämät epäpuhtaudet jäävät myös lopputuotteeseen. Yleisimmin käytössä oleva valmistusmenetelmä on niin sanottu märkjauhatus. Tarvittaessa epäpuhtaudet poistetaan joko mekaanisesti tai fysikaaliskemiallisesti. (Lampinen 1996, 60; Laitinen 2005, 194.)

Paperiteollisuudessa käytetty saostettu kalsiumkarbonaatti on valmistettu poltettusta kalkista. Poltettu kalkki eli kalsiumoksidi sammutetaan vedellä kalsiumhydroksidilietteeksi, joka karbonoidaan esim. hiilidioksidipitoisella savukaasulla kalsiumkarbonaatiksi. Valmistusmenetelmällä voidaan vaikuttaa PCC:n kidemuotoon ja partikkelikokoon. (Nordkalk 2009.) Syntyvien kiteiden muoto ja koko ovat prosessin hallintasuureista riippuen skalenodrista tai romboedrista kalsiittia tai aragoniittia. PCC:n vaaleus on 92–98 % ja puhtaus yli 99 % (Laitinen 2005, 195). Saostetun kalsiumkarbonaatin hinta on jauhettuja korkeampi (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 40). Taulukossa 1 on esitetty yleisimpien täyteainesten tyypillisiä ominaisuuksia.

Taulukko 1. Yleisimpien täyteaineiden ominaisuuksia (Krogerus 1999, 124).

	Kaoliini	Talkki	GCC	PCC
Tiheys, kg/dm <sup>3</sup>	2,7	2,8	2,7	2,7
vaaleus, %	>81	>82	Liitu 80-90 Marmori 85-95	>93
Partikkelikokojakauma alle 10 µm, %	94	84	98	100
< 5 µm, %	75	45	90	100
< 2 µm, %	48	16	40	70
Ominaispinta-ala m <sup>2</sup> /g	10	6	3	10

Kalsiumkarbonaateilla saadaan paperiin puskurivaikutusta, joka parantaa sen kestävyyttä ilman rikkidioksidia vastaan ja parantaa näin arkistointikelpoisuutta. Karbonaateilla on myös kyky puskuroida kiertovedet neutraaleiksi, jolloin kuidut turpoavat ja ovat joustavampia muodostaen enemmän sidoksia. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 40.)

Kalsiumkarbonaatti reagoi happamiin olosuhteisiin hajoten hiilidioksidiksi ja kalkkimaidoksi. Tämä rajoittaa sen käytön neutraaleihin ja alkalisiin prosesseihin. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 40.) Toinen rajoittava tekijä karbonaattien käytössä on sen muodosta ja kovuudesta johtuva taipumus kuluttaa muun muassa muoviviiroja (Hentunen 1998, 7).

#### 4.4 Erikoispigmentit

Erikoistäyteaineiksi kutsutaan sellaisia synteettisiä tai pitkälle jalostettuja pigmenttejä, joita käytetään parantamaan paperin kriittisiä ominaisuuksia, vaikka niiden hinta on huomattavan korkea, usein jopa kuidun hintaa korkeampi. Useimmiten erikoispigmenttejä käytetään pääpigmentin tehosteena, jolloin anostelumäärä on vain 5–25 % pääpigmentin määrästä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 40–41.) Erikoispigmentteihin sisältyvät kalsinoitu kaoliini, synteettiset silikaatit, titaanioksidi, alumiinirihihydraatti ja muovipigmentit (Krogerus 1999, 129).

#### **4.4.1 Kalsinoitu kaoliini**

Kalsinoitu kaoliini on lämpökäsittelyllä valmistettu hienojakoinen ja alhaisen kuluttavuuden omaava täyteaine. Lämpökäsittely tapahtuu noin 1000 °C:n lämpötilassa, jolloin kaoliinin kiderakenne muuttuu ja rakenteesta poistuu kidevesi. Käsittelyssä syntynyt vedetön ja amorfinen pigmentti sisältää runsaasti huokosia, jotka lisäävät valon heijastuspintaa. (Lampinen 1996, 57.) Suuren valonsirontakertoimen takia kalsinoitua kaoliinia käytetään opasiteettipigmenttinä ohuissa papereissa. Avoin huokosrakenne lisää painoväriabsorptiota, jolloin painoväriin tunkeutuminen paperin läpi pienenee. (Hentunen 1998, 8; Häggblom-Ahnger & Komulainen 2005, 41.)

#### **4.4.2 Na-Al-silikaatti**

Na-Al-silikaatti on täyssynteettinen pigmentti, jonka primääripartikkelikoko on hyvin pieni ja ominaispinta suuri. Se nostaa opasiteettia, vaaleutta ja vähentää erityisesti läpipainatusta. Pieni partikkelikoko voi aiheuttaa ongelmia retentoitumisessa. (Hentunen 1998, 8.)

#### **4.4.3 Titaanioksidi**

Titaanioksidi ( $\text{TiO}_2$ ) on täyteaineista kallein. Vastapainona se kuitenkin tarjoaa paperille yliveritaiset optiset ominaisuudet verrattuna muihin täyteaineisiin. Titaanioksidin partikkelikokojakauma on kapea, ja keskimääräinen partikkelikoko on lähellä valon aallonpituuden puolikasta. Synteettisen valmistusmenetelmän puhtaudesta ja pienestä hiukkaskoosta johtuen vaaleus ja valonsironta ovat hyvät. Titaanioksidin jokainen rajapinta taittaa voimakkaasti valoa väliaineesta riippumatta. Tämä mahdollistaa kohtuullisen opasiteetin märkään tai vahattuun paperiin. Titaanioksidilla on kaksi kidemuotoa, anataasi ja rutiili. Titaanioksidin haittapuolena on kalliin aineen pienestä partikkelikoosta johtuva huono retentio. Retentiota voidaan parantaa retentiokemikaalein hiukkasia flokkaamalla, mutta

tällöin menetetään myös optisia ominaisuuksia. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 41.)

#### **4.4.4 Alumiinitrihydraatti**

Alumiinitrihydraatti on bauksiitista ja lipeästä valmistettu syntetettinen tuote ja sitä käytetään täyteaineena ja päällystyspigmenttinä nostamaan vaaleutta, kiiltoa, sileyttä ja painettavuutta korkealaatuisissa papereissa. Sen vaaleus on erittäin korkea ja levymäisen partikkelin koko on erittäin pieni. (Krogerus 1999, 132.)

#### **4.4.5 Muovipigmentit**

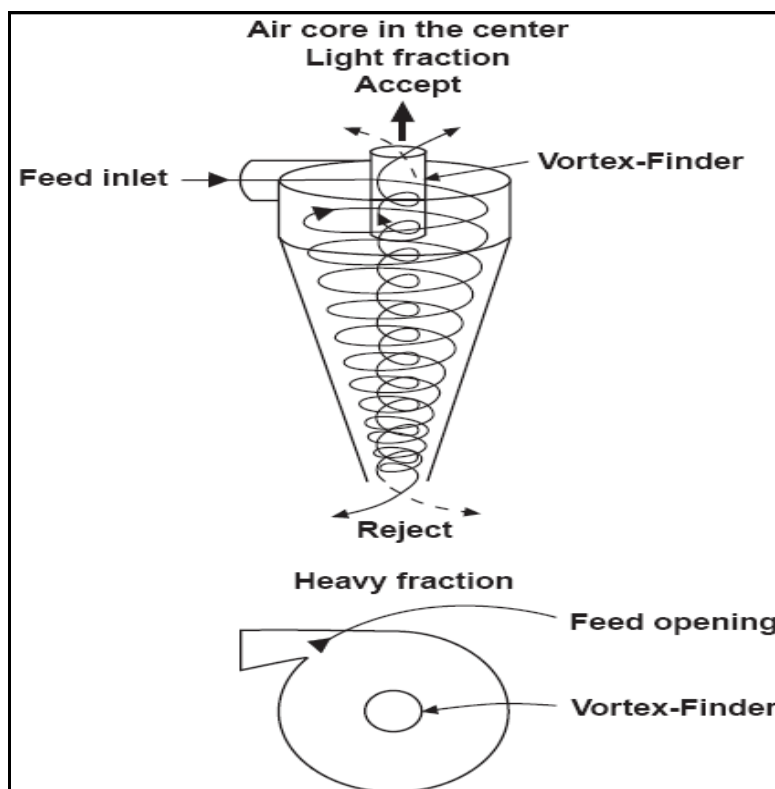
Täyteaineena käytettävän ureaformaldehydikondensaatin primääripartikkelit muodostavat agglomeraatteja, joissa on 0,3–0,4 µm huokosia. Muodostuneiden agglomeraattien huokostilavuus on 86 %. Pigmenttiä käytetään opasiteetti- ja läpipainatusominaisuuksien parantamiseen. Pigmentin teho perustuu optimaalisen huokosrakenteen ja tiheyden myötä saavutettavaan korkeaan valonsiirontakertoimeen. (Hentunen 1998, 8; Hägglom-Ahnger & Komulainen 2005, 9.)

## 5 PYÖRREPUHDISTUS

Pyörrepuhdistin on lajitin, joka poistaa tehokkaasti massassa olevat raskaat tai muodoltaan kuidusta poikkeavat epäpuhtaudet. Se on mekaanisesti luotettava ja käyttövarma, ja siksi se on yleisesti käytetty puhdistusmenetelmä. (Gustafsson ym. 1983, 498) Pyörrepuhdistimia on käytetty jo pitkään paperin- ja sellunvalmistusprosesseissa. Niitä käytetään sekä kuitulinjoilla että ennen paperikooneita. Pyörrepuhdistuksen päätarkoitus on kuoren, hiekan, metallin tai muiden epäpuhtauksien poistaminen massasta. (Hautala & Hourula & Jussila & Pitkänen & 1999, 279.)

### 5.1 Toimintaperiaate

Kuvassa 4 on esitetty pyörrepuhdistimen yleinen rakenne ja päävirtaukset. Puhdistimen pääosan muodostaa lajitinputki, joka koostuu sylinterin muotoisesta osasta ja kartion muotoisesta osasta.



Kuva 4. Pyörrepuhdistimen päävirtaukset (Hautala ym. 1999, 279).

Kuvasta nähdään, kuinka massa syötetään puhdistimen syöttökanavien kautta tangentiaalisesti lajitinputken yläosaan. Massa virtaa lajitinputkessa spiraalirataa kohti kartio-osaa. Kartio-osassa aksiaalivirtaus kääntyy poikkipinnan piene-  
nemisen vaikutuksesta kohti puhdistimen akselia. Tästä edelleen spiraalivirtauksena massa kulkeutuu kohti hyväksytyin jakeen poistoaukkoa. Massan kiertäessä lajitinputkessa pitkin spiraalirataa vaikuttavat siihen keskeiskiihtyvyys ja eri nopeudella kiertävien nestekerrosten väliset leikkausvoimat. Näiden voimien johdosta epäpuhtaudet ajautuvat lajitinputken seinämiä kohti ja eivät pysty seuraamaan akseptin poistoaukkoa kohti kääntyvää virtausta. Seinämävirtaukseen rikastuvat epäpuhtaudet kulkeutuvat kartio-osan kärkeä kohti ja poistuvat hylätyn jakeen poistoaukosta. Massasta irtoavan kaasun ja alipaineesta johtuvan höyrystymisen vuoksi puhdistimen keskiakselille muodostuu kaasusydän eli vortex. Osa syötteestä pyrkii kulkeutumaan suoraan niin sanottuna oikosulkuvirtauksena akseptin jakeen poistoaukkoon. Tätä pyritään estämään esimerkiksi akseptiputken muotoilulla niin, että putki kuorii ylöspäin suuntaavasta spiraalivirrasta osan pois ja kääntää osan takaisin syöttövirtaukseen. (Gustafsson ym. 1983, 498.)

## **5.2 Keskeiskiihtyvyys**

Kuvassa 3 olevan pyörrepuhdistimen kuvasta voi nähdä kaksi eri pyörrevirtausta. Teoriassa nämä virtaukset voidaan jakaa kahteen ääritapaukseen, joista sisempi virtaus on suljettu eli pakotettu pyörre ja ulompi virtaus on avoin eli vapaa pyörre. Käytännössä kumpaakaan pyörrettä ei esiinny puhtaana, sillä nesteen kitkan vuoksi pyörre on aina niiden välimuotoa. Lähellä puhdistimen ajateltua akselia pyörre on lähellä pakotettua pyörrettä ja puhdistimen seinämällä pyörreliike muistuttaa vapaata pyörrettä. (Gustafsson ym. 1883, 499; Penttinen 1990, 11.)

Pyörrevirtauksessa vaikuttaa normaali keskeiskiihtyvyys seuraavan yhtälön mukaisesti

$$a(r) = \frac{v^2(r)}{r} \quad (1)$$

jossa

$r$  = radan kaarevuussäde

$a$  = keskeiskiihtyvyys

$v$  = radan kehänopeus

Yhtälöstä nähdään, että keskeiskiihtyvyys riippuu voimakkaasti kehänopeudesta. Alussa kehänopeus määräytyy tangentialisesta syöttönopeudesta, jonka jälkeen voidaan kehänopeuden muutos spiraaliradalla esittää seuraavasti

$$v_t = r^n K \quad (2)$$

jossa

$v_t$  tangentialinopeus

$r$  etäisyys pyörimiskeskiöstä

$n=1$  vapaa pyörre

$n=-1$  pakotettu pyörre

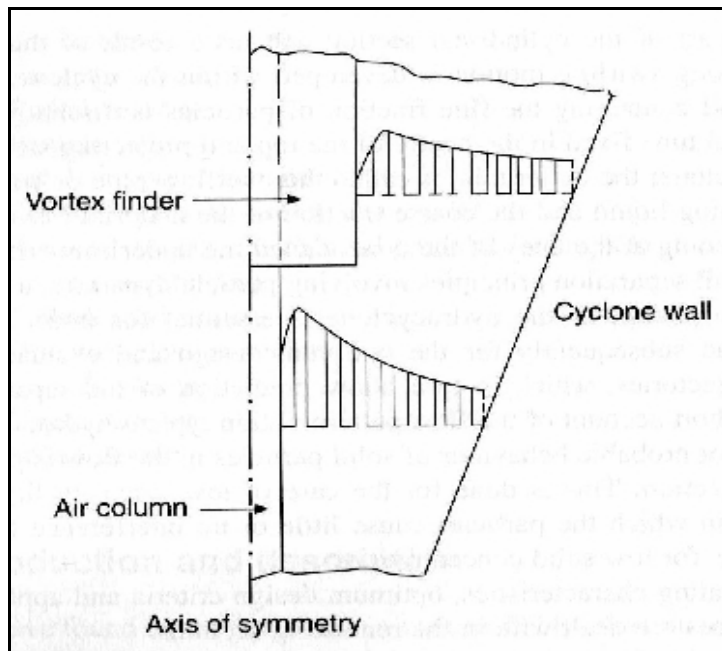
$K$  vakio

Yhtälön 2 mukaan massakerrosten kehänopeus kasvaa kiertosäteen pienentyessä. Lähellä keskiötä se saavuttaa huippunsa, jonka jälkeen se alkaa pienetä lineaarisesti alueella, joka on aivan puhdistimen ajatellun akselin läheisyydessä. Nopeuserosta johtuen massakerrokset liukuvat toistensa suhteen. Tämä on tärkeä efekti, sillä se estää kuitujen verkkoontumista ja varmistaa epäpuhtauksien kulkeutumisen kuitujen välistä lajitinputken seinämille. (Gustafsson ym. 1883, 499-500; Penttinen 1990, 12.)

### 5.3 Pyörrepuhdistimen virtaukset

Pyörrepuhdistimen virtaukset voidaan jakaa niiden suuntausten mukaan tangentialiseen, säteensuuntaiseen ja pystysuoraan virtaan.

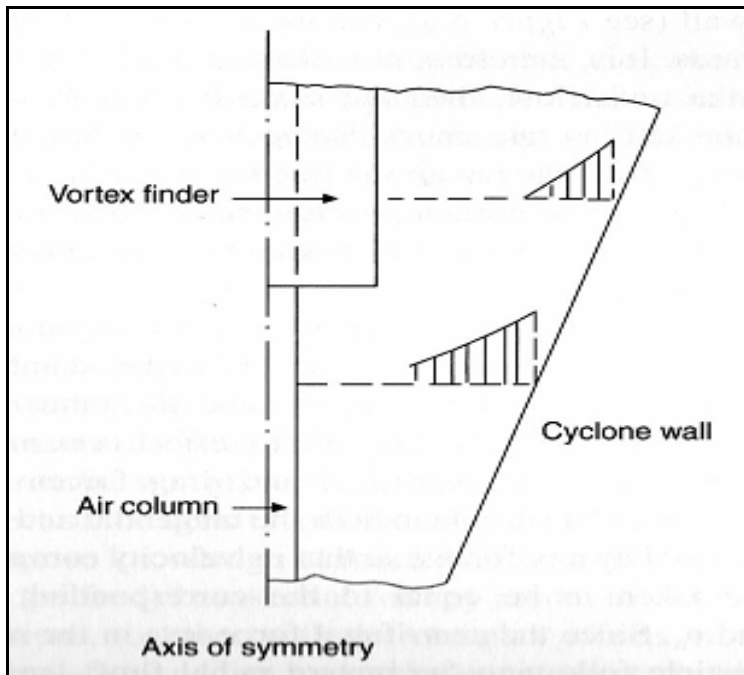
Kuvassa 5 on esitetty tangentialinopeuden muuttuminen pyörrepuhdistimen eri osissa. Kuvasta nähdään miten tangentialinopeus kasvaa keskiöön päin, mutta saavuttaa maksimin vähän ennen ilmasydäntä, jonka jälkeen nopeus alkaa laskea. (Puusta paperiin M-102 1985, 59-60.)



Kuva 5. Tangentialivirtauksen nopeusjakauma (Svarovsky 2000, 194).

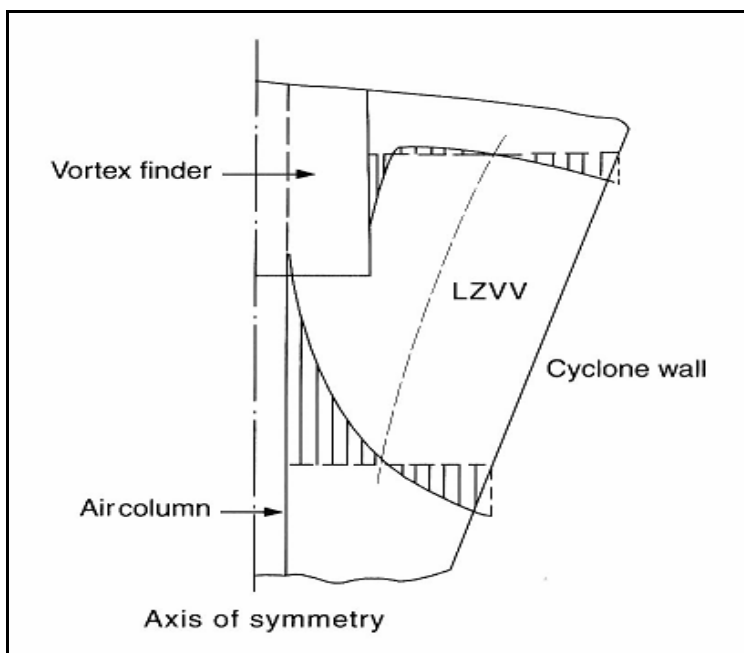
Säteensuuntaisen nopeuden virtausolosuhteet on esitetty kuvassa 6. Säteen suuntainen nopeus pienenee keskiöön päin. Jotta osanen saadaan alaspäin suuntautuvaan virtaukseen, täytyy sen keskipakovoiman ylittää säteensuuntainen nopeus. Tämä selittää sen, että monet kevyet ja pienet osaset eivät ajaudu puhdistimen seinämille asti. (Puusta paperiin M-102 1985, 59-60.)





Kuva 6. Säteensuuntaisen virtauksen nopeusjakauma (Svarovsky 2000, 195).

Pystysuoran nopeuden virtausolosuhteet on esitetty kuvassa 7. Pystysuora nopeus on nolla tietyssä kerroksessa seinämän ja kuvitellun keskiakselin välillä. Tämän kerroksen sisäpuolella virtauksen suunta on ylöspäin kohti akseptinpoistoaukkoa. Kuvasta nähdään, että nopeus kasvaa nopeasti virtauksen siirtyessä kohti keskustaa. (Puusta paperiin M-102 1985, 59-60.)



Kuva 7. Pystysuoran virtauksen nopeusjakauma (Svarovsky 2000, 195).

## 5.4 Hiukkasiin vaikuttavat voimat

Penttinen (1990, 13–14) esittää hiukkasiin vaikuttavan kolme eri voimaa, joilla on lajitteleva vaikutus hiukkaseen.

Hiukkasiin kohdistuu keskipakokentässä voima, joka ajaa niitä kohti puhdistimen seinämää. Tämä voima voidaan esittää yhtälöllä 3

$$F_1 = \frac{V\rho_p v_t^2}{r} \quad (3)$$

jossa	$V$	hiukkasen tilavuus
	$\rho_p$	hiukkasen tiheys
	$r$	keskeisliikkeen säde
	$v_t$	hiukkasen tangentiaalinopeus

Toinen Penttisen (1990, 13–14) mukaan hiukkasiin vaikuttava voima on säteen suunnassa virtaavan väliaineen ja hiukkasten välinen vastus. Tämä keskipakovoiman aiheuttamaa virtausta vastustava virtaus voidaan esittää yhtälöllä 4

$$F_2 = f(\beta, v, \varphi, v_r, \mu) \quad (4)$$

jossa	$\beta$	hiukkasen muototekijä
	$v$	kitkapinta
	$\varphi$	pinnan laatutekijä
	$v_r$	veden radiaalinenopeus
	$\mu$	suspension viskositeetti

Kolmas hiukkasiin vaikuttava voima syntyy, kun vedenpaine kasvaa kohti lajitin-putken seinämää (yhtälö 5).

$$F_3 = A(p_2 - p_1) \quad (5)$$

jossa  $A$  hiukkasen projisoitu pinta-ala  
 $p_1, p_2$  paine

Edellä esitetyistä voimista keskipakovoima vaikuttaa ulospäin, kun taas toiset vaikuttavat sisäänpäin. Voimat asettuvat tasapainotilassa (yhtälö 6)

$$F_1 = F_2 + F_3 \quad (6)$$

Voimien keskinäiset suuruudet määräävät minne pyörrevirtauksessa oleva hiukkanen ajautuu. Yhtälöistä on myös nähtävissä pyörrepuhdistimen kyky erottaa saman tiheyden omaavia kappaleita niiden erilaisen muodon ja koon perusteella.

## 5.5 Lajittumiseen vaikuttavat tekijät

Pyörrepuhdistuksessa tapahtuvaan partikkelin erottumistodennäköisyyteen vaikuttaa oleellisesti partikkelin koko ja tiheys. Vettä raskaammat partikkelit ajautuvat helposti puhdistimen seinämille ja erottuvat rejektin mukana, kun taas vettä kevyemmät partikkelit ajautuvat todennäköisemmin pyörteen keskelle ja siitä edelleen akseptiksi. (Penttinen 1990,14.)

Hiukkasen suuri projektiopinta-ala ja sen muodostama kitka nestettä vastaan voivat aiheuttaa kappaleen kulkeutumisen akseptivirtaukseen suuresta ominaispainosta huolimatta. Tästä johtuen suuren ominaispinta-alan omaavat kuidut kulkeutuvat helpommin akseptiin kuin saman tiheyden omaavat kuoripilkut. Tästä ominaispinta-alan vaikutuksesta johtuen jauhatus vaikuttaa edullisesti erotustehokkuuteen. Mitä enemmän kuitua on jauhettu, sitä suurempi on niiden projektiopinta-ala. (Penttinen 1990,15.)

Partikkelin muoto ja pituus vaikuttavat erotustehokkuuteen taulukon 2 mukaisesti. Partikkelit, joiden tiheys on vettä suurempi, kuten ilmapaapat kuidut, ajautuisivat kokonaan rejektiin, ellei niihin vaikuttaisi kaksi erinopeudella liikkuvaa tangentialista virtausta. Kahden eri nopeudella liikkuvan virtauksen välissä oleva kappale ajautuu helpommin nopeamman virtauksen suuntaan eli akseptiin. Tästä johtuen pitkät kuidut akseptoituvat lyhyitä kuituja todennäköisemmin. (Penttinen 1990, 15; Puusta paperiin M-102 1985, 59.)

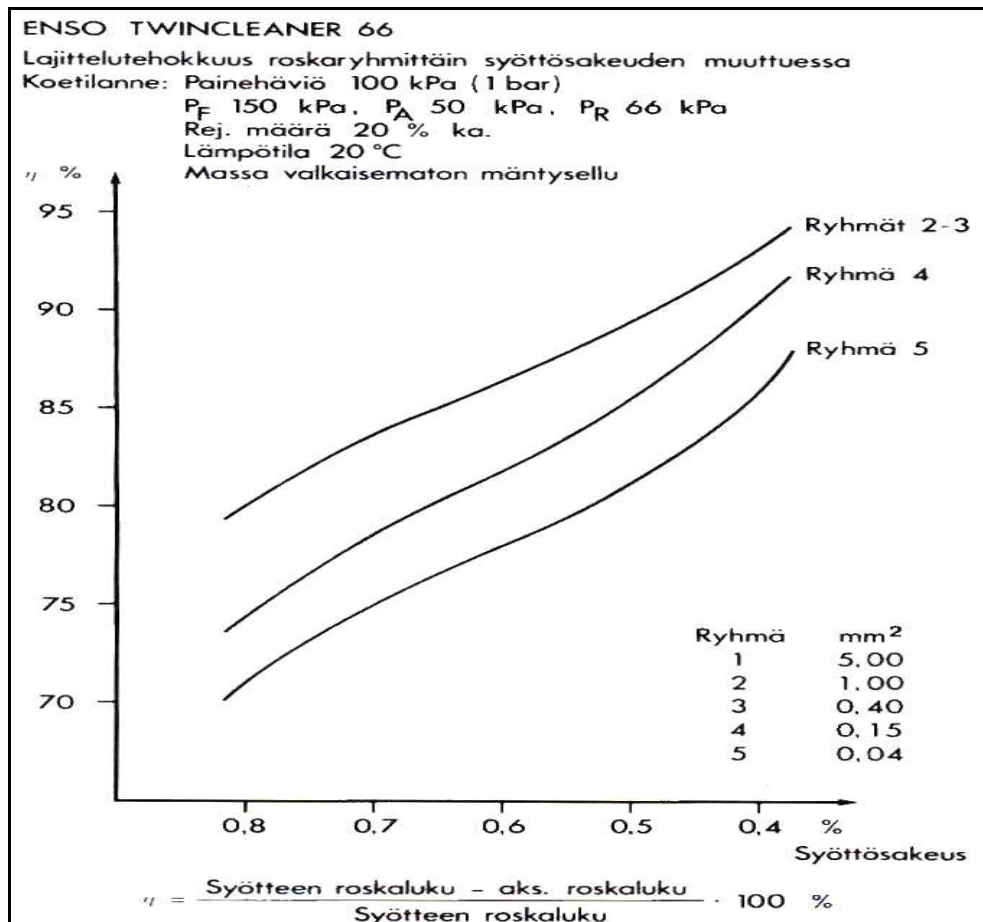
Taulukko 2. Partikkelin ominaisuuksia, joilla on vaikutusta erottumiseen pyörrepuhdistuksessa (Hautala ym. 1999, 280).

<b>Partikkelin ominaisuus</b>	<b>Helpommin akseptiin</b>	<b>Helpommin rejektiin</b>
Ominaispaino	Kevyt	Raskas
Muoto 1	Lyhyt	Pitkä
Muoto 2	Ohut	Paksu
Pinta-ala	Suuri	Pieni
Koko	Pieni	Suuri

Pyörrepuhdistuksessa on kuitenkin yksi lajittumisen kannalta epäsuotuisa ominaisuus. Virtaaman liikkuessa alaspäin kohti rejektinpoistoaukkoa etäisyys seinän ja pystysuoran kerroksen välillä, missä nopeus on nolla, pienenee. Lopulta etäisyys on niin pieni, että tikku tai pitkä roska ei mahdu siihen väliin vaan sen toinen pää joutuu ylösnousevaan virtaukseen. Ylösnousevan virtauksen nopeus on kuitenkin selvästi suurempi, jolloin tämäntyyppinen roska kiskoutuu irti ja ajautuu akseptiin. Tämän takia pyörrepuhdistimella ei voida erottaa suuria osasia, elleivät nämä ole selvästi vettä raskaampia. (Puusta paperiin M-102 1985, 60.)

Kuvasta 8 voidaan nähdä erään pyörrepuhdistimen lajittelutehokkuuden muutos eri roskaryhmillä sakeuden muuttuessa. Kuituverkon tiheys vaikuttaa erotustehokkuuteen vaikeuttamalla spiraalirataa kiertävän virtauksen kehänopeuden kasvua verkon leikkauslujuuden vuoksi. Lisäksi kuituverkko estää epäpuhtauksien ajautumista puhdistimen seinämille. Kuidut alkavat muodostamaan me-

kaanisilla massoilla verkkoa, kun kuitusakeus on >0,9 %, ja havupuusellulla kuitusakeuden ollessa 0,5-0,7 %. (Gustafsson ym. 1883, 501, 504.)



Kuva 8. Sakeuden vaikutus erottelutehokkuuteen.

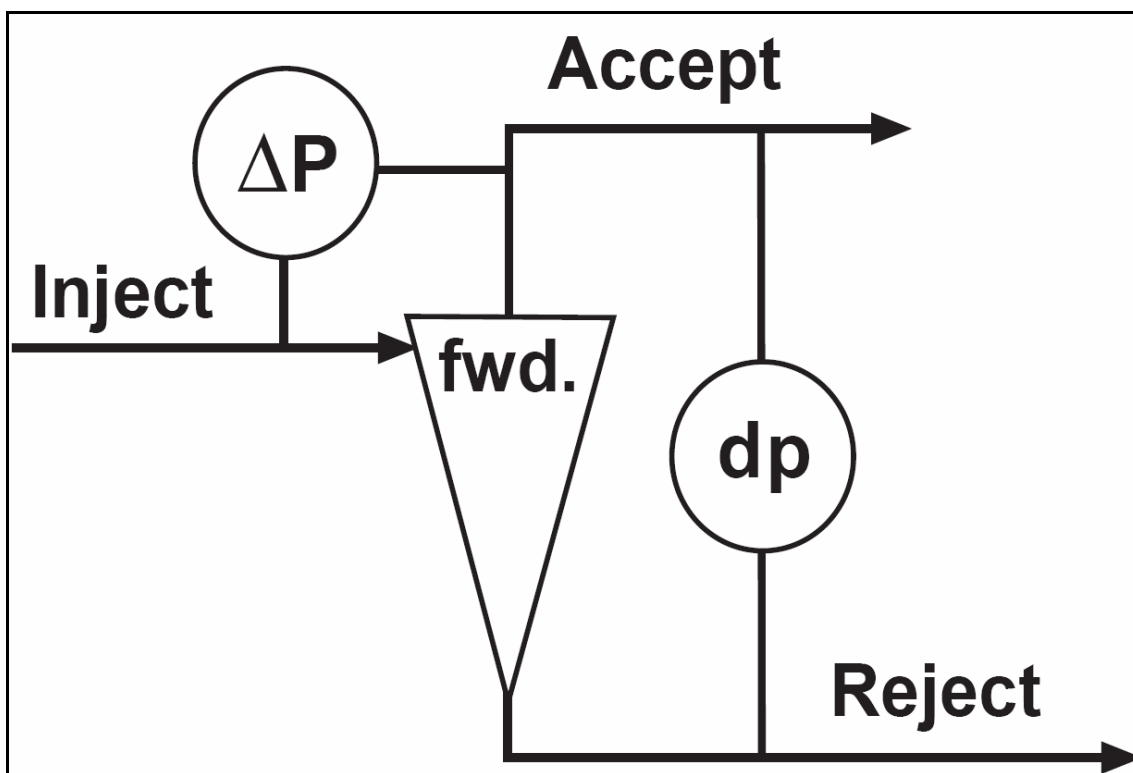
Prosessilämpötila vaikuttaa erotustehokkuuteen viskositeetin kautta. Puhdistettavan massan lämpötila on kuitenkin riippuvainen prosessin lämpötilasta, eikä näin ollen ole helposti säädettävissä. Yleissääntönä voidaan pitää lämpötilan noston parantavan erotustehokkuutta. (Gustafsson ym. 1883, 501; Penttinen 1990, 16.)

## 5.6 Pyörrepuhdistimen hallintasuureet

Penttisen (1990, 16) mukaan pyörrepuhdistimen tärkeimmät hallintasuureet ovat

- syötön ja akseptin välinen paine-ero
- lajittelusakeus
- rejektisuhde.

Kuvassa 9 on esitetty pyörrepuhdistimen paine-erojen mittauspisteet. Syötön ja akseptin välistä paine-eroa nostamalla saavutetaan suurempi läpivirtauskapasiteetti ja massan sisääntulonopeus. Suuremmasta sisääntulonopeudesta johtuen myös pyörteen nopeus on suurempi. Paine-eroa nostamalla saavutetaan erotustehokkuuden kasvua tiettyyn pisteeseen saakka, minkä jälkeen virtaus muuttuu turbulenttiseksi. Normaalisti syötteen ja akseptin välinen paineenpudotus on välillä 100–200 kPa. Pyörrepuhdistimien mitoitusta ja rakennetta parantamalla on mahdollista käyttää pienempää paine-eroa ja näin pienentää energian kuluusta. Akseptin ja rejektin välisen paine-eron kasvaessa rejektivirtaus suurenee ja sakeus seuraavissa vaiheissa kasvaa. (Hautala ym. 1999, 284.)



Kuva 9. Paine-eron mittaukset pyörrepuhdistimessa.

Syöttösakeuden nostaminen heikentää pyörrepuhdistimen puhdistustehokkuutta, mutta pienentää energian kulutusta. Korkea syöttösakeus ja siten kuitujen suuri määrä tekevät poistettavien hiukkasten eteen kulkuesteitä, jolloin puhdis-

tustehokkuus laskee. Syötön tilavuusvirran kasvattaminen lyhentää hiukkasten viipymäaika puhdistimessa ja erotuskyvyn muutos riippuu siitä, ehtiikö hiukka-  
set siirtyä puhdistimen ulkokehälle viipymäajan kuluessa. (Penttinen 1990, 17-  
18.)

Syöttösakeus on yleensä alueella 0,6–1,0 %. Syöttösakeuden nostamisella pyri-  
tään pienentämään paine-eroa syötteen ja akseptin välillä ja näin vähentämään  
energian kulutusta. Sakeuden nostaminen toimii hallintasuureena silloin, kun  
ensimmäisen portaan rejektin säädöllä vaikutetaan jälkiportaiden toimintasake-  
uksiin. Pyörrepuhdistuslaitokselle tulevan sakeuden säätöön voidaan vaikuttaa  
myös sitä edeltävää osaprosessia säätämällä. (Penttinen 1990,17-18.)

Rejektisuhteella tarkoitetaan syötteen ja rejektin massavirtojen suhdetta. Rejek-  
tisuhteeseen voidaan vaikuttaa säätämällä rejektimäärää rejektiaukon koolla,  
rejektinpoistossa olevalla venttiilillä ja puhdistimen paine-erolla. Rejektisuhteen  
nostaminen parantaa epäpuhtauksien erottumista. (Kärkkäinen 2004, 27.)

Rejektimäärät voidaan laitetoimittajan ensovac-pyörrepuhdistuslaitos-ohjeen  
(1981) mukaan laskea riittävällä tarkkuudella sakeuksien perusteella yhtälöllä 7

$$rejeksi\% = \frac{C_r(C_i - C_a)}{C_i(C_r - C_a)} \cdot 100 \quad (7)$$

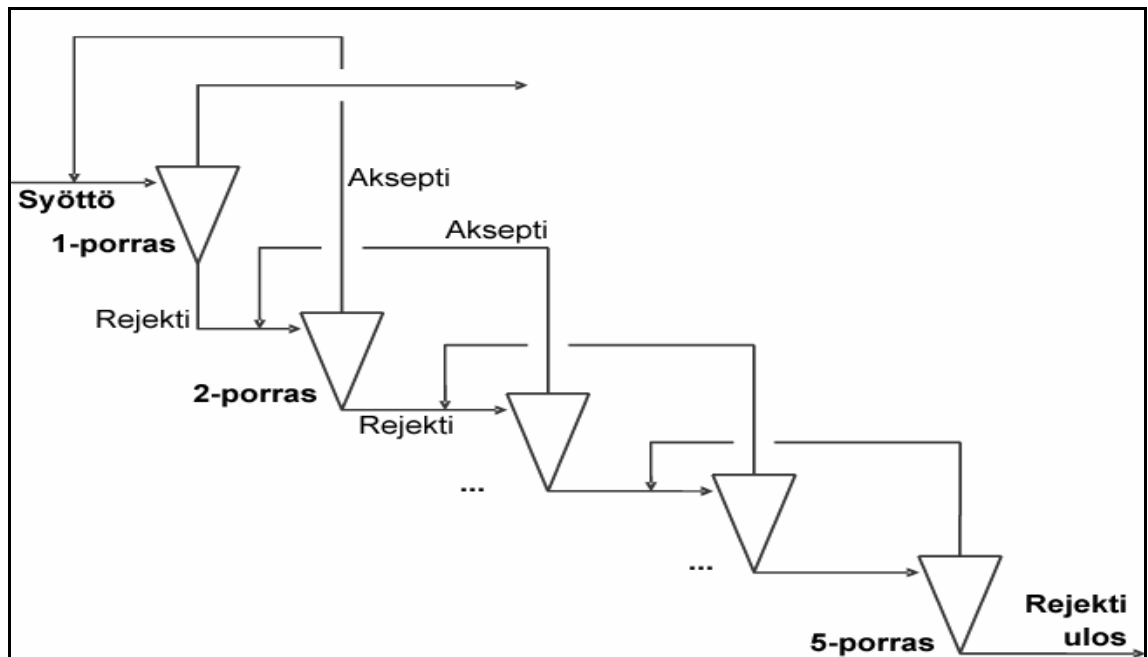
jossa	$C_r$	rejektin sakeus %
	$C_i$	syötön sakeus %
	$C_a$	akseptin sakeus %

Ensimmäisen portaan rejektimäärä virtauksesta on noin 20 %. Rejektimäärä  
yleensä kasvaa jälkimmäisissä portaissa. Rejektimäärällä on selvä taloudellinen  
merkitys. Paperin laadun kannalta pyörrepuhdistuksessa on kuitenkin poistetta-  
va epäpuhtauksia ja tämän vuoksi tietty kiintoainehäviö on hyväksyttävä. Vii-  
meisen vaiheen rejektin kuiva-aineen määrä on paperikoneen popetuotannosta  
tyypillisesti noin 0,2–0,3 %. (Puusta paperiin M-504 1997, 46.)

## 5.7 Pyörrepuhdistuslaitoksen kytkennät

Pyörrepuhdistimesta täytyy poistaa rejektimassaa 15–25 % optimilajittelutehokkuuden saavuttamiseksi. Useimmiten lajiteltava massa sisältää epäpuhtauksia alle 1 %. Näistä seikoista johtuen pyörrepuhdistuslaitos joudutaan rakentamaan monivaiheiseksi kytkennäksi niin, että päästään hyvään puhdistustehokkuuteen mahdollisimman pienin kuituhäviöin. (Gustafsson ym. 1883, 505.) Pyörrepuhdistuslaitoksen kytkennöistä on muutamia yleisesti käytössä olevia malleja.

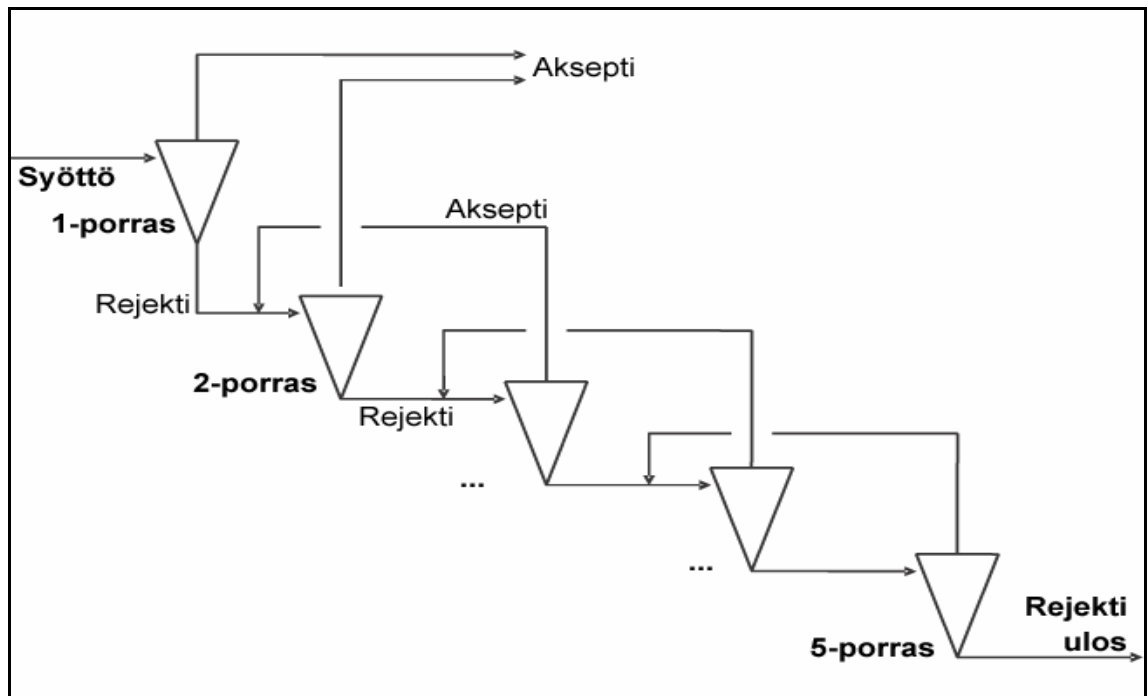
Pyörrepuhdistusvaiheita hienopaperikoneessa on neljästä kuuteen, jolloin viimeinen porrastus on kuiduntalteenottoporttas. Tavallisin pyörrepuhdistuslaitoksen kytkentä on kuvassa 10 esitetty kaskadikytkentä. Kaskadikytkennässä jokaisen vaiheen rejekti ohjataan seuraavan vaiheen syöttöön ja aksepti palautetaan edellisen vaiheen syöttöön. Yleensä vain ensimmäisen vaiheen aksepti ohjataan ilmanpoistosäiliölle. Jokaisen portaan syöttöön ohjataan laimennusvesi. Ensimmäisten portaiden laimennusvesi otetaan viirakaivosta. Viimeisten vaiheiden laimentamiseen käytetään yleensä suodosta. (Puusta paperiin M-504 1997, 46.)



Kuva 10. Kaskadikytketty 5-portainen pp-laitos (KnowPap 2009).



Valmiiksi vähäroskaisen massan puhdistamiseen voidaan käyttää kaksoisakseptikytkentää (kuva11). Tällöin toisen vaiheen akseptivirta johdetaan suoraan ensimmäisen vaiheen akseptivirtaan. Kytkentä kasvattaa hiukan laitosakseptin roskaisuutta, mutta pienentää jälkiportaiden kokoa. Myös pumppauskustannukset vähenevät ja rejektimäärä pienenee. Ratkaisua käytetään myös vanhan pyörrepuhdistuslaitoksen kapasiteetin kasvattamiseen. (Penttinen 1990, 44.)



Kuva 11. 5-portaisen pp-laitoksen kaksoisakseptikytkentä (KnowPap 2009).

Normaali kaskadikytkentä voidaan purkaa pitkäksi kaskadiksi johtamalla kolmannen vaiheen aksepti suoraan ensimmäisen vaiheen syöttöön. Tällä kytkennällä saadaan jälkiportaiden kokoa pienemmäksi, mutta laitosakseptin roskaisuus kasvaa hiukan ja ei näin ollen sovi hyvin roskaiselle massalle. (Penttinen 1990, 45.)

Mikäli massan puhtausvaatimus on korkea voidaan käyttää ensimmäisen vaiheen sarjaankytkentää. Tällöin ensimmäiseen portaaseen kytketään kaksi pyörrepuhdistusyksikköä sarjaan, jolloin ensimmäisen yksikön aksepti pumpataan suoraan toisen yksikön syöttöön. Toisen yksikön aksepti jatkaa tuotantoon. Sarjaankytkennän epäkohtana voidaan pitää ensimmäisen vaiheen lähes kaksinkertaista rejektimäärää perinteiseen kaskadikytkentään verrattuna. Tästä johtu-

en jälkiportaiden koko ja pumppausenergiat kasvavat merkittävästi.(Penttinen 1990, 45.)

## 5.8 Pyörrepuhdistin tyypit

Pyörrepuhdistimia käytetään pääasiassa raskaiden epäpuhtauksien erottamiseen. Taulukossa 3 on esitetty kuinka pyörrepuhdistimen halkaisija ja kapasiteetti määräävät puhdistimen soveltuvuuden käyttötarkoitukseensa. Karkeasti lajiteltuna halkaisijaltaan suuri puhdistin soveltuu paremmin isojen roskien, kuten hiekan, kivien ja paalilankojen erotukseen, kun taas halkaisijaltaan pieni putki soveltuu pienten roskien erotteluun. Pyörrepuhdistimen halkaisija voi vaihdella 50–2500 millimetrin välillä käyttötarkoituksesta riippuen. (Hautala ym. 1999, 281.)

Taulukko 3. Esimerkki eri lajitinputkien halkaisijan vaikutus painehäviöön, kapasiteettiin ja poistettavaan rejektiin (Penttinen 1990, 19).

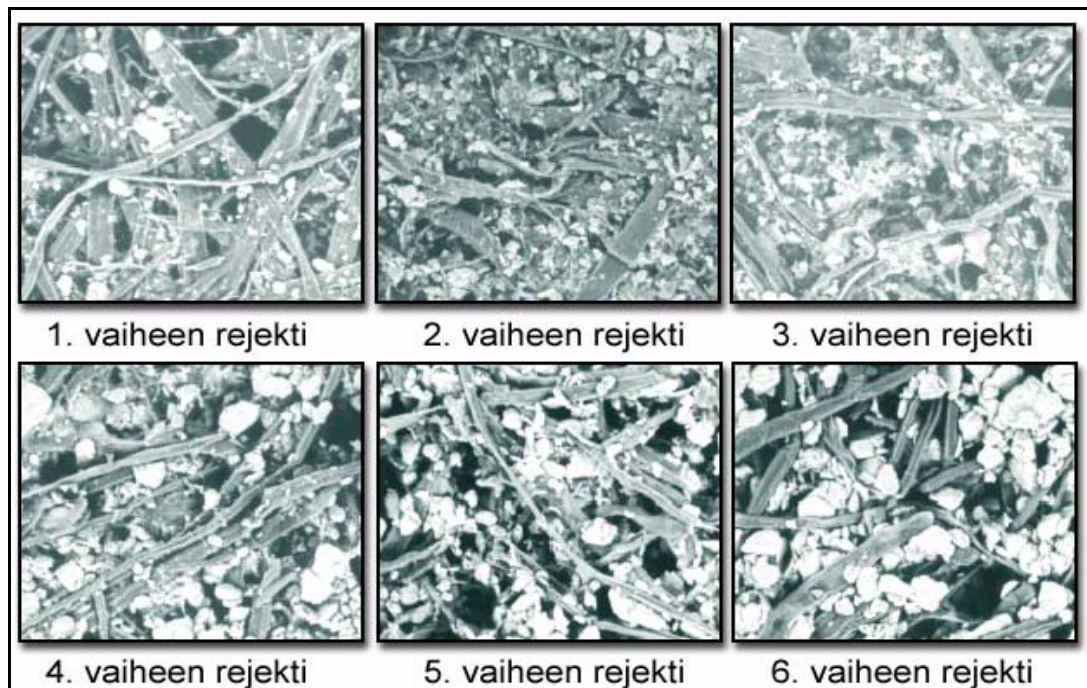
Lajitinputken halkaisija (mm)	Painehäviö (bar)	Kapasiteetti (l/min)	Rejekti
500-1200	0,4-1,0	2500-25000	Kivet, sora, isot epäpuhtaudet, paalilanka, hakepalat
300	1,0-2,0	700-3000	Sora, hiekka, karkeat tikut, roskat
130	1,3	300-400	Roskat, tikut, kuitukimput, hiekka
60-80	1,0	80-100	Pienet roskat, hiekka

Tärkeimmät pyörrepuhdistimen lajittelutehokkuuteen vaikuttavat rakenteelliset tekijät ovat akseptiputken muoto ja mitoitus, syöttökanavat, kartiokulma, rejektipään muoto ja mitoitus, materiaalit ja pintojen sileys, lajitinputken halkaisija ja pituus sekä puhdistimen virtaustekninen muotoilu. Pyörrepuhdistimen mitoitus

tehdään yleensä koesarjojen ja muutosten kautta, koska mitoituksen yksityiskohtainen suunnittelu laskennallisesti on vaikeaa. Mitoitusta vaikeuttaa myös eri massalaatujen erilainen käyttäytyminen puhdistimessa. (Penttinen 1990, 20.)

## 5.9 Täyteaineen rejektoituminen pyörrepuhdistuksessa

Täyteainepitoisilla paperilaaduilla pyörrepuhdistuslaitoksessa poistuu merkittävä määrä täyteainetta (kuva 12). Tämä johtuu pyörrepuhdistimen toimintaperiaatteesta ja täyteaineen suuresta ominaispainosta. (Lampinen 1996, 70-71.)



Kuva 12. Täyteaineen rikastuminen pyörrepuhdistuksen eri vaiheissa (KnowPap 2009).

Pyörrepuhdistimen toiminta perustuu keskipakovoimaan, jolloin raskaammat partikkelit ajautuvat rejektiin. Pyörrepuhdistimen toimintaa voidaan kuvata leikkauskoolla eli  $d_{50}$ -arvolla. Arvolla kuvataan sitä partikkelikokoa jolla on yhtä suuri todennäköisyys joutua rejektiin tai akseptiin. Leikkauskoosta pienemmät partikkelit hakeutuvat todennäköisemmin hyväksytyyn jakeeseen ja suuremmat partikkelit todennäköisemmin rejektoituvat. Tästä syystä varsinkin täyteaineen suurempi jae on alttiina rejektoitumaan, mikäli täyteaineen syöttö tapahtuu ennen

pyörrepuhdistuslaitosta. Puhdistimen leikkauskoon määrää yleensä puhdistimen dimenssiot ja paine-erot. Yleisesti lyhyen kierron pyörrepuhdistimien  $d_{50}$ -arvo on 10-15  $\mu\text{m}$ . (Lampinen 1996, 70-71.)

### 5.10 Pyörrepuhdistuksen pumpkauksen energiankulutus

Pyörrepuhdistuslaitoksen energiankulutusta voidaan pienentää pienentämällä puhdistimen syötön ja akseptin välistä paine-eroa. Energian kulutusta voidaan myös pienentää sakeuksia nostamalla, jolloin pumpattava neste tilavuusvirrat pienenevät (taulukko 4). Massalla on myös nesteen turbulentsuutta pienentävä vaikutus. Esimerkiksi veden pumpppaus kuluttaa energiaa enemmän kuin sakeudeltaan 1–4 % massan pumpppaus. (Hannonen & Jantunen & Lindholm 1993, 43-46.)

Taulukko 4. Pumpattavan veden määrä sakeuden kasvaessa.

<u>Vesimäärän suhde sakeuteen</u>											
Sakeus %	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Vettä $\text{m}^3/\text{t}$	200	166	142	124	110	99	90	82	76	70	66
Sakeus %	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0
Vettä $\text{m}^3/\text{t}$	55	49	39	32	28	24	19	16	12	9	7,3
Sakeus %	17,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	50,0	90,0			
Vettä $\text{m}^3/\text{t}$	4,9	4,0	3,0	2,3	1,9	1,5	1,0	0,1			

Yleisin puunjalostusteollisuudessa käytetty pumpputyyppe on keskipakopumppu. Keskipakopumppu on dynaaminen pumppu, eli sen toiminta perustuu liike-energian muuttumisesta liike- tai paine-energiaksi. Keskipakopumpun nostokorkeus alenee tilavuusvirran kasvaessa. Muita dynaamisia pumppuja ovat aksiaali-, sivukanava-, suihku- ja syrjäytyspumput. Pumpun moottorilta ottama teho voidaan laskea kaavasta 8

$$P = \frac{a \cdot g \cdot Q \cdot H}{b} \quad (8)$$

jossa      a=nesteen tiheys, kg/m<sup>3</sup>  
              g=putoamiskiihtyvyys, m<sup>2</sup>/s  
              Q=tilavuusvirta, m<sup>3</sup>/s  
              H=nostokorkeus, m  
              P=tehontarve, kW  
              b=hyötysuhde

Massa on ei-newtonmainen neste, joten sen tuottoarvojen korjauskertoimet saadaan selville tekemällä tarpeellinen määrä pumppauskokeita eri konsentraatioilla. Liitteessä 1 on esitetty käyrästä, josta saatavat korjauskertoimien arvot ovat osoittautuneet yleisesti luotettaviksi. (Hannonen & Jantunen & Lindholm 1993, 43-46.)

## 6 KOKEELLINEN OSA

### 6.1 Kokeellisen osan tavoitteet

Insinööriyön kokeellinen osa tehtiin Stora Enso Oyj:n Kaukopään tehtaiden paperikone 8:lla 19.2.2009 ja 27.8.2009. Kokeellisen osan tavoitteena oli tutkia pyörrepuhdistuslaitoksen painetasoja ja täyteaineen syöttöpaikan vaihtamisen vaikutusta rejektoituvan täyteaineen määrään. Täyteaineen syöttäminen ennen pyörrepuhdistuslaitosta varmistaa, ettei täyteaineen mukana kulje epäpuhtauksia paperikoneen perälaatikolle. Tämä annostelumalli kuitenkin oletettavasti lisää täyteaineen rejektoitumista pyörrepuhdistuslaitoksella aiheuttaen raaka-aineen hävikistä aiheutuvia kustannuksia.

Kokeellisessa osassa mitattiin pyörrepuhdistuslaitoksen eri portaiden sakeudet ja tuhkapitoisuudet kahdella eri täyteaineen annostelupaikalla. Ensimmäinen mittaus suoritettiin niin, että täyteaine syötettiin ennen pyörrepuhdistuslaitosta. Toiseen mittaukseen täyteaineen annostelupaikka vaihdettiin pyörrepuhdistuslaitoksen jälkeiseen syöttöpaikkaan. Ennen syöttöpaikan kokeilemistä säädettiin pyörrepuhdistuslaitoksen eri portaiden paineita laitevalmistajan ohjeiden suuntaisesti. Lisäksi pyörrepuhdistuslaitoksen eri vaiheiden pumppujen ottamat sähkömoottorien tehot mitattiin ennen ja jälkeen painesäätöä ja täyteaineen syöttöpaikan vaihtoa.

## 6.2 Kokeellisen osan suoritus

Ennen varsinaista kokeellisen osan aloittamista suoritettiin pyörrepuhdistuslaitoksen näytteenottoa paikkojen ja paineenmittauslaitteiston kunnan sekä sijaintien tarkistus. Tarkastaessa selvisi useita puutteita näytteenottoa paikkoihin ja painemittauksiin liittyen. Useammasta vaiheesta puuttui näytteenottoa paikat tai ne olivat vaikeasti tukossa. Myös painemittauksissa oli puutteita. Osa näytteenottoa paikoista saatiin poistamalla paikallisia painemittareita näytteenoton ajaksi. Loput puuttuvat näytepisteet jouduttiin lisäämään seisokin yhteydessä.

Kaikki kokeet tehtiin koneen ollessa normaalisti tuotannossa, koska tehdyssä säätö- ja näytteenottoa toimienpiteistä ei aiheutunut suurta riskiä tuotannon katkeamiselle.

Kokeellisen osan ensimmäinen vaihe oli pyörrepuhdistuslaitoksen eri portaiden paineiden säätäminen. Säätäminen suoritettiin pyörrepuhdistuslaitoksen eri portaiden käsiventtiilejä kääntämällä. Paineiden muutoksia seurattiin paikallismittareista. Säätämishetkellä koneella ajettiin neliömassaltaan 80g paperia tuotant nopeuden ollessa 34,5t/h. Säätöä ennen ja jälkeen mitattiin eri portaiden paineet ja pumppaustehot sekä 6-portaan rejektin sakeus, tuhkapitoisuus ja rejektin virtausmäärä.

Kokeellisen osan toisessa vaiheessa kokeiltiin täyteaineen syöttöa paikan vaihtamista pyörrepuhdistusvaihetta edeltävästä syöttöa paikasta 1 pyörrepuhdistuksen jälkeen sijaitsevaan syöttöa paikkaan 2 (liite 2). Kokeen aikana koneella ajettiin 60 g/m<sup>2</sup> paperia tuotannon ollessa 25,5 t/h. Syöttöa paikat olivat valmiiksi olemassa ja kääntö tehtiin manuaalisesti koneen ollessa normaalisti ajossa. Pyörrepuhdistuslaitoksen jokaisen portaan syötöstä, akseptista ja rejektistä otettiin näytteet sakeuden ja tuhkapitoisuuden määrittämiseksi ennen ja jälkeen syöttöa paikan vaihtamisen. Lisäksi eri portaiden pumppujen ottamat tehot mitattiin ennen ja jälkeen muutoksen.

## 7 TULOKSET

### 7.1 PP-laitoksen paineiden säätö

Taulukossa 5 on esitetty pyörrepuhdistuslaitoksen paineet ja paine-erot portaittain. Taulukon vasemman puoleiset arvot ovat ennen säätämistä ja oikean puoleiset arvot säätämisen jälkeen. Pyörrepuhdistuslaitoksen pumppujen ottamat tehot ennen ja jälkeen muutoksen on esitetty taulukossa 6. Taulukossa 7 on 6-portaan rejektien tuhkapitoisuudet ja sakeudet ennen ja jälkeen paineiden säädön.

Taulukko 5. Pyörrepuhdistuslaitoksen paineet ja paine-erot.

Näyte	Paine kPa	Paine-ero	
		S-A kPa	A-R kPa
1-S	230	140	20
1-A	90		
1-R	70		
2-S	225	128	18
2-A	97		
2-R	79		
3-S	172	146	5
3-A	26		
3-R	21		
4-S	218	189	0
4-A	29		
4-R	29		
5-S	165	86	16
5-A	79		
5-R	63		
6-S	223	118	
6-A	105		
6-R	-		

Näyte	Paine kPa	Paine-ero	
		S-A kPa	A-R kPa
1-S	233	143	19
1-A	90		
1-R	71		
2-S	224	127	12
2-A	97		
2-R	85		
3-S	174	146	6
3-A	28		
3-R	22		
4-S	188	139	21
4-A	49		
4-R	28		
5-S	149	107	10
5-A	42		
5-R	32		
6-S	222	118	
6-A	104		
6-R	-		



Taulukko 6. Laimennusvesipumppujen ottamat tehot.

<b>Pumppu</b>	<b>P/kW 1</b>	<b>P/kW 2</b>	<b>Pn/kW</b>
1-Porras	478	491	880
2-Porras	306	306	315
3-Porras	115	113	132
4-Porras	59	56	75
5-Porras	20	20	30
6-Porras	14	14	22

Taulukko 7. 6-portaan rejektit.

<b>Näyte</b>	<b>Rejektin virtaus l/s</b>	<b>Näytteen sakeus</b>	<b>Tuhkapitoisuus</b>
6-R (1)	5,638	1,60	75,8
6-R (2)	5,668	1,93	73,5

## **7.2 PP-laitoksen sakeus- ja tuhkamittaukset**

Taulukoissa 8 ja 9 on pyörrepuhdistuslaitoksen sakeus ja tuhkapitoisuuden eri portaiden syötöstä, akseptista ja rejektistä. Taulukon 8 arvot on saatu täyteai-  
neen syötön tapahduttua syöttöpisteestä 1 ja taulukon 9 arvot on saatu täyteai-  
neen syötön tapahduttua syöttöpisteestä 2. Lisäksi taulukoista käy ilmi näyt-  
teenottohetkellä vallinneet paineet ja paine-erot. Taulukoissa ilmoitettu rejek-  
tisuhde on sakeuksien perusteella laskettu arvo.

Taulukko 8. PP-laitoksen mittaustulokset täyteaineannostelupaikalla 1.

Näyte	Paine kPa	Paine-ero		Sakeus %	Tuhka- pitoisuus	Rejeki- suhde
		S-A kPa	A-R kPa			
1-S	239	143		0,63	32,1	25,8
1-A	96		15	0,51	34,1	
1-R	81			1,91	22,4	
Näyte	Paine kPa	Paine-ero		Sakeus %	Tuhka- pitoisuus	Rejeki- suhde
		S-A kPa	A-R kPa			
2-S	234	131		0,46	32,7	37,7
2-A	103		20	0,34	34,9	
2-R	83			1,07	27,1	
Näyte	Paine kPa	Paine-ero		Sakeus %	Tuhka- pitoisuus	Rejeki- suhde
		S-A kPa	A-R kPa			
3-S	173	147		0,41	35,3	25,3
3-A	26		5	0,34	35,1	
3-R	21			1,01	32,6	
Näyte	Paine kPa	Paine-ero		Sakeus %	Tuhka- pitoisuus	Rejeki- suhde
		S-A kPa	A-R kPa			
4-S	166	110		0,39	41,1	32,6
4-A	56		26	0,31	42,4	
4-R	30			0,88	40,8	
Näyte	Paine kPa	Paine-ero		Sakeus %	Tuhka- pitoisuus	Rejeki- suhde
		S-A kPa	A-R kPa			
5-S	146	103		0,37	49,8	32,7
5-A	43		10	0,29	45,6	
5-R	33			0,93	52,5	
Näyte	Paine kPa	Paine-ero		Sakeus %	Tuhka- pitoisuus	Rejeki- suhde
		S-A kPa	A-R kPa			
6-S	217	116		0,27	60,5	29,8
6-A	101		-	0,21	55,6	
6-R	-			-	1,19	

Taulukko 9. PP-laitoksen mittaustulokset täyteaineannostelupaikalla 2.

Näyte	Paine kPa	Paine-ero		Sakeus %	Tuhka- pitoisuus	Rejeksi- suhde
		S-A kPa	A-R kPa			
1-S	238	142		0,53	19,1	24,0
1-A	96		15	0,44	21,2	
1-R	81			1,61	13,1	
Näyte	Paine kPa	Paine-ero		Sakeus %	Tuhka- pitoisuus	Rejeksi- suhde
		S-A kPa	A-R kPa			
2-S	233	130		0,38	25,3	34,1
2-A	103		19	0,29	28,4	
2-R	84			0,91	20,8	
Näyte	Paine kPa	Paine-ero		Sakeus %	Tuhka- pitoisuus	Rejeksi- suhde
		S-A kPa	A-R kPa			
3-S	172	146		0,37	31,2	20,5
3-A	26		5	0,32	33,3	
3-R	21			0,89	29,0	
Näyte	Paine kPa	Paine-ero		Sakeus %	Tuhka- pitoisuus	Rejeksi- suhde
		S-A kPa	A-R kPa			
4-S	168	111		0,34	38,9	29,9
4-A	57		27	0,27	39,0	
4-R	30			0,78	36,7	
Näyte	Paine kPa	Paine-ero		Sakeus %	Tuhka- pitoisuus	Rejeksi- suhde
		S-A kPa	A-R kPa			
5-S	146	103		0,32	45,8	31,9
5-A	43		9	0,25	42,8	
5-R	34			0,80	46,2	
Näyte	Paine kPa	Paine-ero		Sakeus %	Tuhka- pitoisuus	Rejeksi- suhde
		S-A kPa	A-R kPa			
6-S	217	115		0,25	53,8	37,9
6-A	102		-	0,17	48,9	
6-R	-			0,90	61,3	

Taulukossa 10 on 6-portaan rejektin sakeus, tuhkapitoisuus, virtaus ja tuotantonopeus. Ylempi rivi 6-R(1) rejektin arvot, kun täyteaine on syötetty enne pyörrepuhdistuslaitosta pisteestä 1 ja alempi rivi 6-R(2) on täyteaineen syötön tapahtuttua pisteestä 2 eli jälkeen pyörrepuhdistuslaitoksen.

Taulukko 10. 6-portaan rejektin arvot ja koneen tuotantonopeus.

Näyte	Sakeus %	Tuhkapitoisuus	Virtaus l/s	Tuotanto t/h
6-R (1)	1,19	66,3	6,839	25,36
6-R (2)	0,90	61,3	6,746	25,43

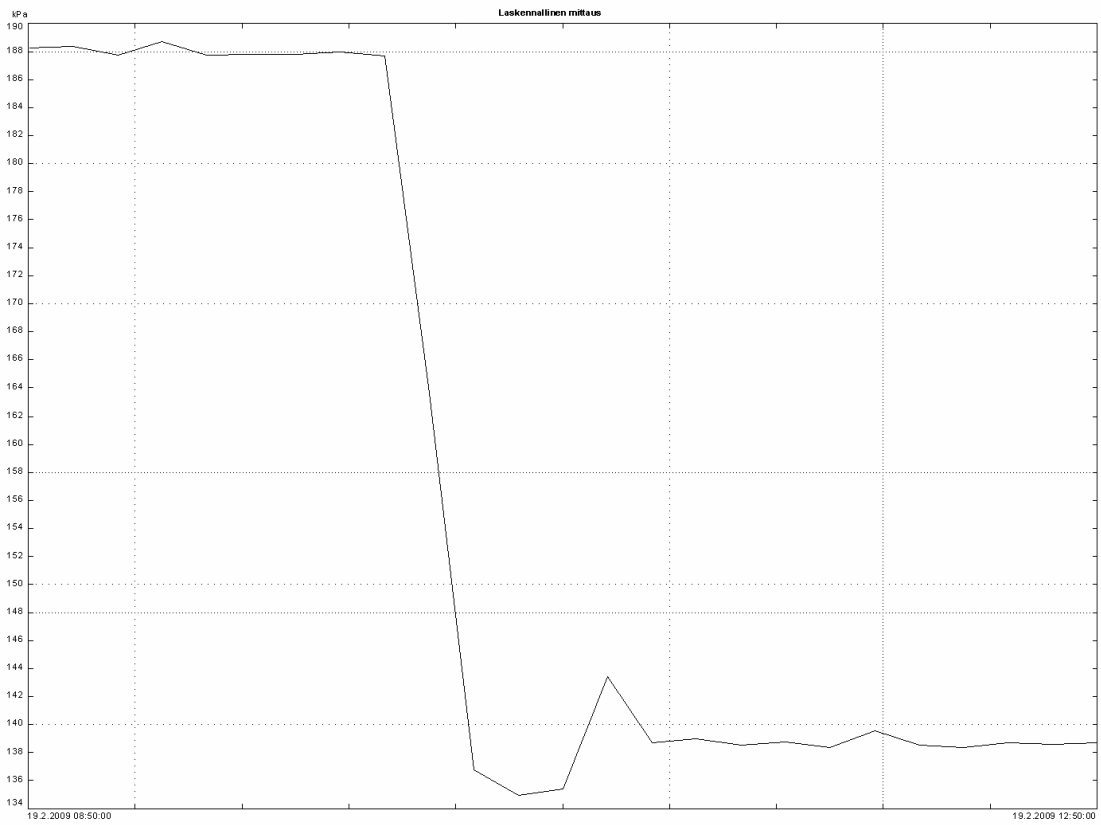
## 8 TULOSEN TARKASTELU

### 8.1 Paineiden säätö

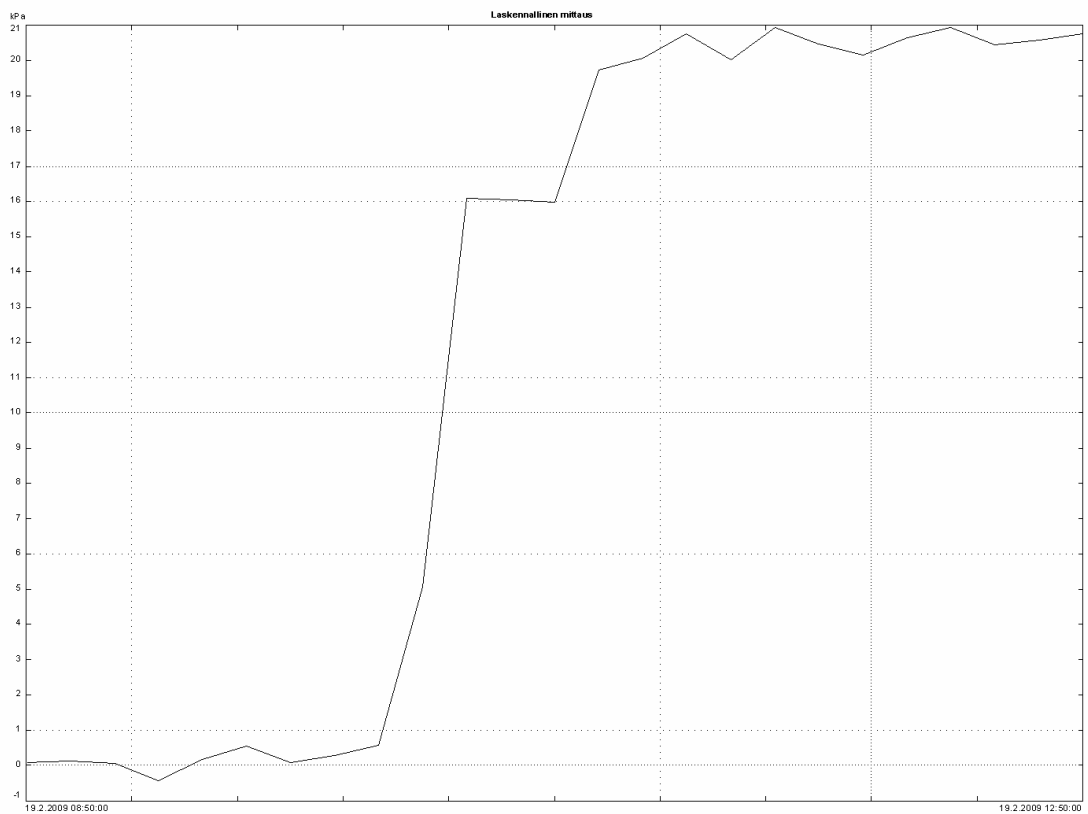
Laitevalmistajan ohjeen mukaan syöttöpaine tulisi säätää pumpun painepuolen venttiileillä 180–200 kPa:ksi. Akseptipaine tulisi säätää 50–60 kPa:ksi ja rejektipaine 30–40 kPa:ksi. Painetasoa voidaan kuitenkin nostaa, jos painehäviöt pidetään muuttumattomina.

Pyörrepuhdistuslaitoksen paineiden säätämisessä keskityttiin lähinnä saamaan paineet lähemmäksi laitevalmistajan suosituksia, koska tarkempaan säätämiseen sakeuksien ja rejektisuhteiden mukaan ei ollut mahdollisuuksia puuttuvien näytteidenottopaikkojen vuoksi. Alkutilanteessa selkeimmät ongelmat paineiden osalta esiintyivät 3-, 4- ja 5-portaissa (liite 4). Portaiden 1 ja 2 paineet olivat hyväksyttävällä tasolla jo entuudestaan. 6-portaan paineet olivat syötön ja akseptin osalta kunnossa, mutta rejektin osalta paineet jäivät arvoitukseksi viallisen painemittauksen takia. Kaikki mittaukset tehtiin niin, että muutosten jälkeen prosessin annettiin tasaantua neljän tunnin ajan ennen uusien mittausten tekemistä.

Kuvioissa 1 ja 2 on nähtävissä 4-portaan syötön ja akseptin sekä akseptin ja rejektin välinen paine-ero ennen ja jälkeen paineiden muutosta. 4-portaan syöttöpaine oli alussa 218 kPa ja rejektin ja akseptin paineet olivat molemmat 29 kPa. Alkutilanteessa syöttö-aksepti paine-eroksi muodostu näin ollen 189 kPa ja aksepti-rejekti paine-eroksi 0 kPa. Säätö tehtiin kuristamalla syötön ja akseptin virtausta käsiventtiilejä sulkemalla. Tällä tavoin saatiin syöttöpainetta pudotettua ja akseptin painetta nostettua, jolloin syöttö-aksepti paine-ero saatiin pudotettua arvoon 139 kPa ja aksepti-rejekti paine-ero saatiin nostettua arvoon 21 kPa. Säätämisen jälkeen syöttöpaine oli 188 kPa, akseptipaine 49 kPa ja rejektipaine oli 28 kPa. Paineet olivat lähellä laitevalmistajan suosituksia.

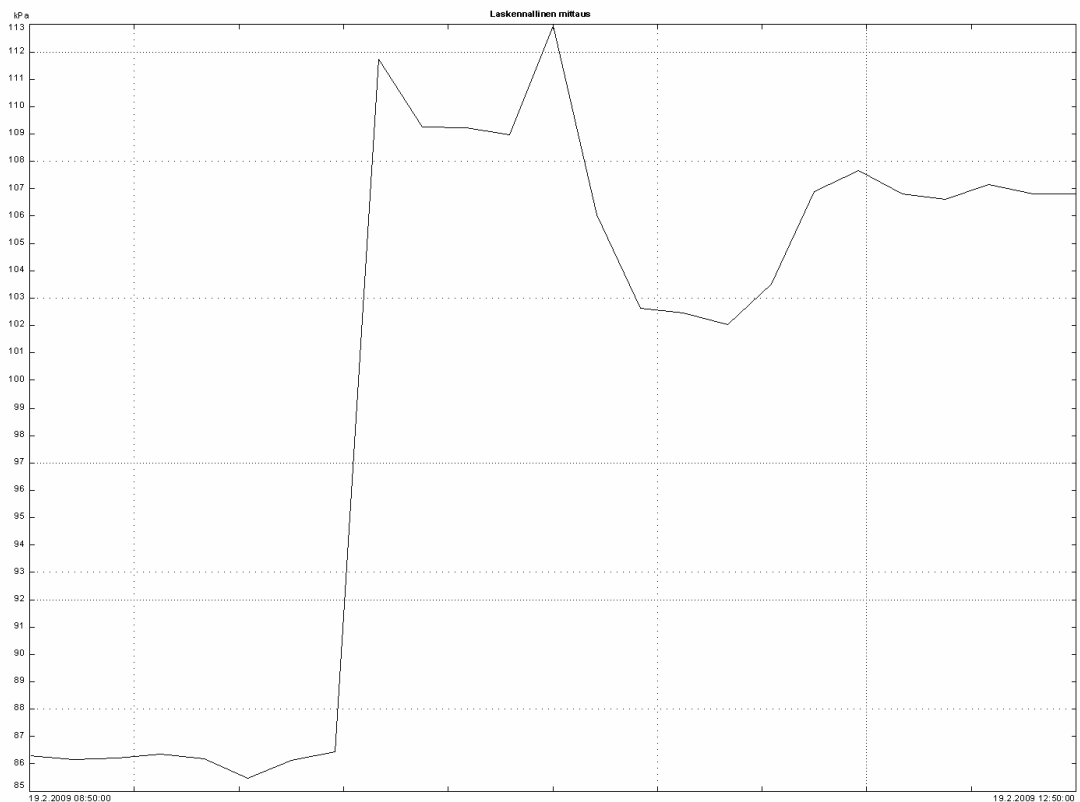


Kuvio 1. 4-portaan syötön ja akseptin välisen paine-eron muutos.

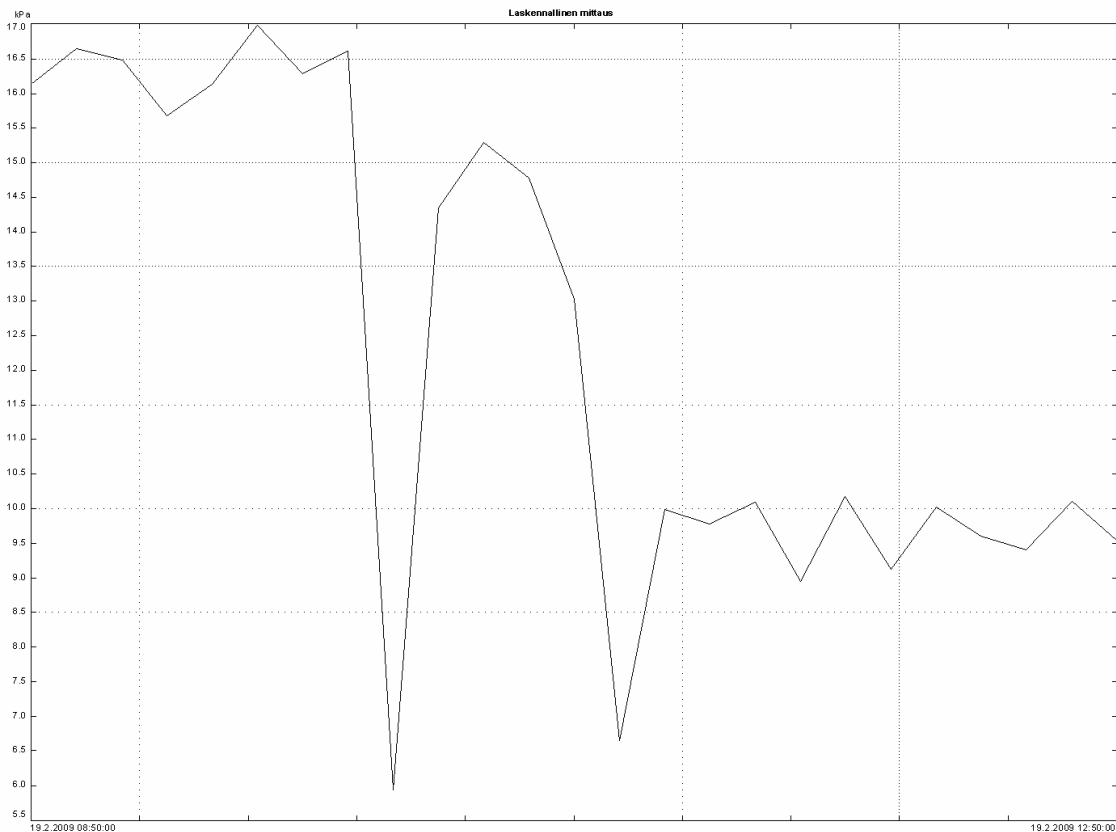


Kuvio 2. 4-portaan akseptin ja rejektin välisen paine-eron muutos.

5-portaan syötön ja akseptin sekä akseptin ja rejekin paine-erot ja niiden muutokset on esitetty kuviossa 3 ja 4. Syöttöpaine ennen muutosta oli 165 kPa. Akseptin paine oli 79 kPa ja paine-ero syötön ja akseptin välillä näin ollen 86 kPa. Rejektipaine ennen muutosta oli 63 kPa ja paine-ero akseptiin oli 16 kPa. Paineiden säädössä ongelmaksi muodostui alhainen syöttöpaine, jota ei saatu nostettua ylemmäksi. Ainoa keino nostaa paine-eroa syötön ja akseptin välillä oli pienentää akseptin ja rejektin paineita. Tällöin kuitenkin myös syötön paine laski, mutta syötön ja akseptin paine-ero saatiin kasvatettua tästä huolimatta 107 kPa:ksi. Rejektin ja akseptin paine-ero muutoksen jälkeen oli 10 kPa. Paineet muutoksen jälkeen olivat: syöttö 149 kPa, aksepti 42 kPa ja rejekti 32 kPa.



Kuvio 3. 5-portaan syötön akseptin välisen paine-eron muutos.



Kuvio 4. 5-portaan akseptin ja rejektin välisen paine-eron muutos.

Kolmannen portaan osalta tilanne jäi säädön suhteen epäselväksi. Mittaukset näyttivät paineiksi syötölle 172 kPa, akseptille 26 kPa ja rejektille 21 kPa. Akseptin ja rejektin välille yritettiin saada suurempaa paine-eroa, mutta yrityksistä huolimatta painemittaukset eivät reagoineet kovin selvästi tehtyihin muutoksiin. Tästä heräsi epäily painemittausten luotettavuudesta, koska kohtuullisella säätämällä ei ollut juuri mitään vaikutusta paineisiin. Lisäksi näytteidenottoapaikkojen puuttumisen vuoksi rejektisuhteen määrittämisen mahdottomuus johti siihen, että 3-portaan venttiilit päätettiin jättää alkuperäisiin asemiinsa.

### 8.1.1 Paineiden muutoksen vaikutus energiankulutukseen

Pyörrepuhdistuslaitoksen paineiden vaikutusta eri portaiden pumppujen ottamaan tehoon mitattiin ennen ja jälkeen paineiden muutoksen. Taulukossa 6 on lueteltu mitatut tehot ennen ja jälkeen säädön. Paineissa ei ole havaittavissa mainittavaa muutosta ennen ja jälkeen. Ainoastaan 4-portaan selvästi pienenty-



nyt syötön ja akseptin välinen paine-ero näkyy aavistuksen pienempänä tehon tarpeena. Taulukosta on myös nähtävissä 1-portaan pumpun tehon lisäys, mutta tämä johtuu lähinnä 1-portaan pumpun mittauspisteiden välillä kasvaneesta nopeudesta, eikä ole lähtöisin tehdyistä säätötoimenpiteistä vaan ”elää” jatkuvasti ajotilanteen mukaan.

### **8.1.2 Paineiden säädön vaikutus 6-vaiheen rejektiin**

Painemuutosten vaikutusta 6-portaan rejektin sakeuteen, tuhkapitoisuuteen ja virtausmäärään tutkittiin ottamalla rejektivirrasta näytteet ennen ja jälkeen muutosten. Taulukossa 7 olevista mittaustuloksista on havaittavissa 6-portaan rejektin sakeuden nousseen 1,60 prosentista 1,93 prosenttiin. Tuhkapitoisuus puolestaan tippui aavistuksen 75,8 prosentista 73,5 prosenttiin. Rejektin virtausmäärissä ei ollut merkittävää muutosta. Rejektin sakeuden nousun syynä on todennäköisesti 4- ja 5-portaan paine-erojen muutos ja tästä johtuva rejektisuhteen muutos. Varsinkin 4-portaan aksepti-rejekti paine-eron muutos 0 kPa:sta 21 kPa aiheuttaa todennäköisesti 5- ja 6-portaiden sakeuden kasvua.

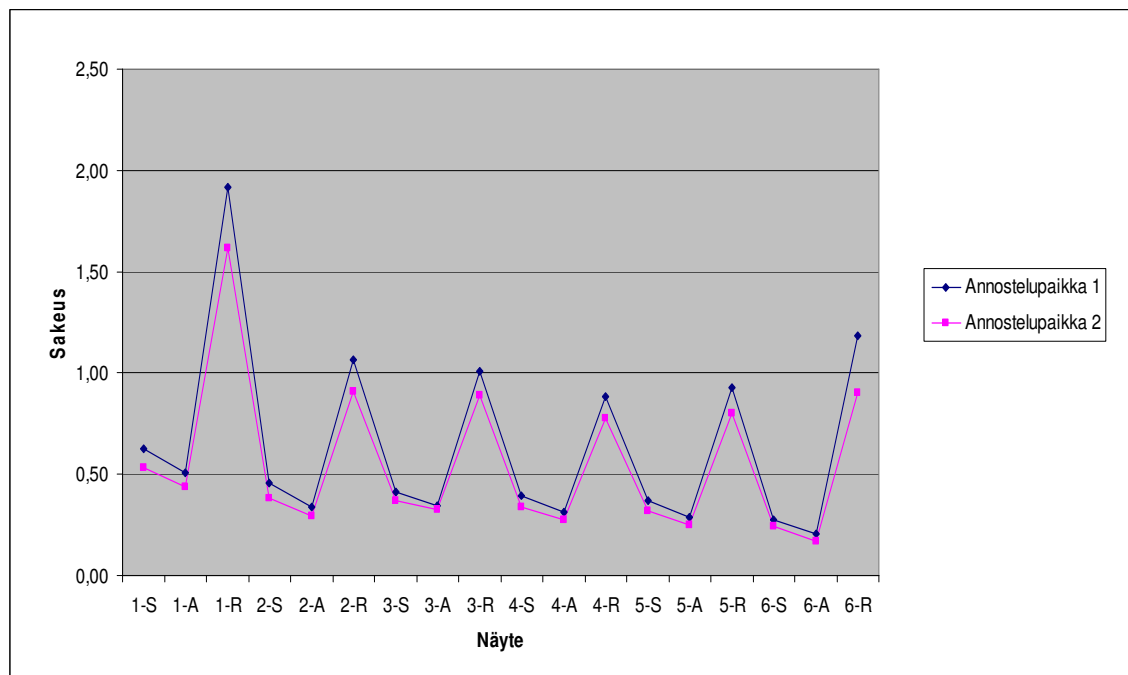
Tuhkapitoisuuden lasku on myös todennäköisesti syynä sakeuden kasvu jälkiportaissa, jolloin pyörrepuhdistimen erotustehokkuus heikkenee ja kiintoaineen määrä rejektissä vähenee.

## 8.2 Täyteaineannostelupaikan vaihtaminen

### 8.2.1 Pyörrepuhdistuslaitoksen sakeudet

Pyörrepuhdistuslaitoksen sakeudet määritettiin jokaisesta portaasta ennen ja jälkeen täyteaineen syöttöpaikan vaihtamisen. Tuloksissa ilmoitetut sakeudet ovat kahden mittauksen keskiarvoja. Tällä pyrittiin sulkemaan pois määrittämisessä mahdollisesti tapahtuvia virheitä. Annostelupaikan vaihdon jälkeen prosessin annettiin tasaantua kolme tuntia ennen seuraavaa näytteenottohetkeä.

Kuviossa 5 on esitetty pyörrepuhdistuslaitoksen sakeudet kahdella eri täyteaineen syöttöpaikalla. Annostelupaikka 1 on ennen pyörrepuhdistuslaitosta ja annostelupaikka 2 on pyörrepuhdistuslaitoksen jälkeen.



Kuvio 5. Pyörrepuhdistuslaitoksen sakeudet.

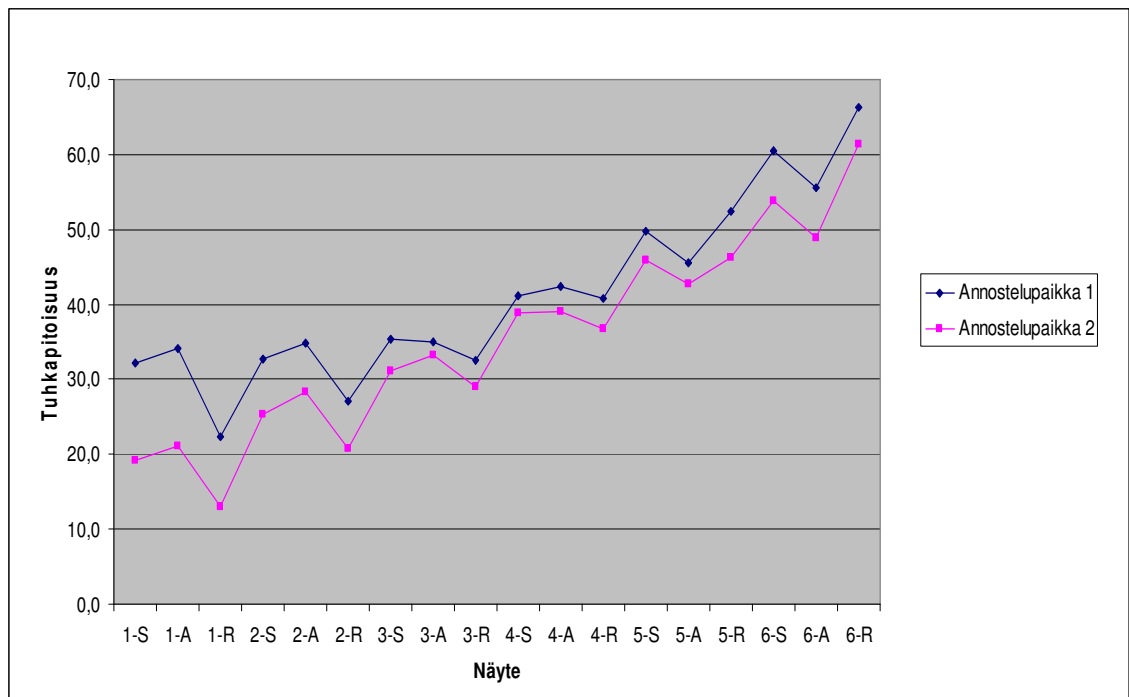
Kuviosta on selkeästi havaittavissa sakeuden laskevan jokaisessa portaassa syöttöpaikan vaihdon jälkeen. Syy sakeuksien tippumiseen on seurausta täyteainepitoisuuden pienenemisestä pyörrepuhdistuslaitoksessa kokonaisuudes-

saan syöttöpaikan vaihduttua. Taulukosta 8 ja 9 on nähtävissä, ettei syöttöpaikan muutoksella ollut vaikutusta pyörrepuhdistuslaitoksen paineisiin eikä näin ollen paineiden kautta sakeuksiin.

## 8.2.2 Pyörrepuhdistuslaitoksen tuhkapitoisuudet

Tuhkapitoisuus määritettiin pyörrepuhdistuslaitoksen jokaisesta portaasta ennen ja jälkeen täyteaineen syöttöpaikan vaihtamisen. Tuloksissa ilmoitetut tuhkapitoisuudet ovat kahden mittauksen keskiarvoja. Tällä pyrittiin sulkemaan pois määrittämisessä mahdollisesti tapahtuvia virheitä. Annostelupaikan vaihdon jälkeen prosessin annettiin tasaantua kolme tuntia ennen seuraava näytteenottohetkeä.

Tuhkapitoisuuden kasvun portaittain voi havaita selvästi kuviosta 6. Täyteaineen syöttöpaikan vaihtaminen nostaa tuhkapitoisuutta läpi koko pyörrepuhdistuslaitoksen, mutta selkeimmin tuhkapitoisuuden nousu näkyy ensimmäisten portaiden kohdalla.

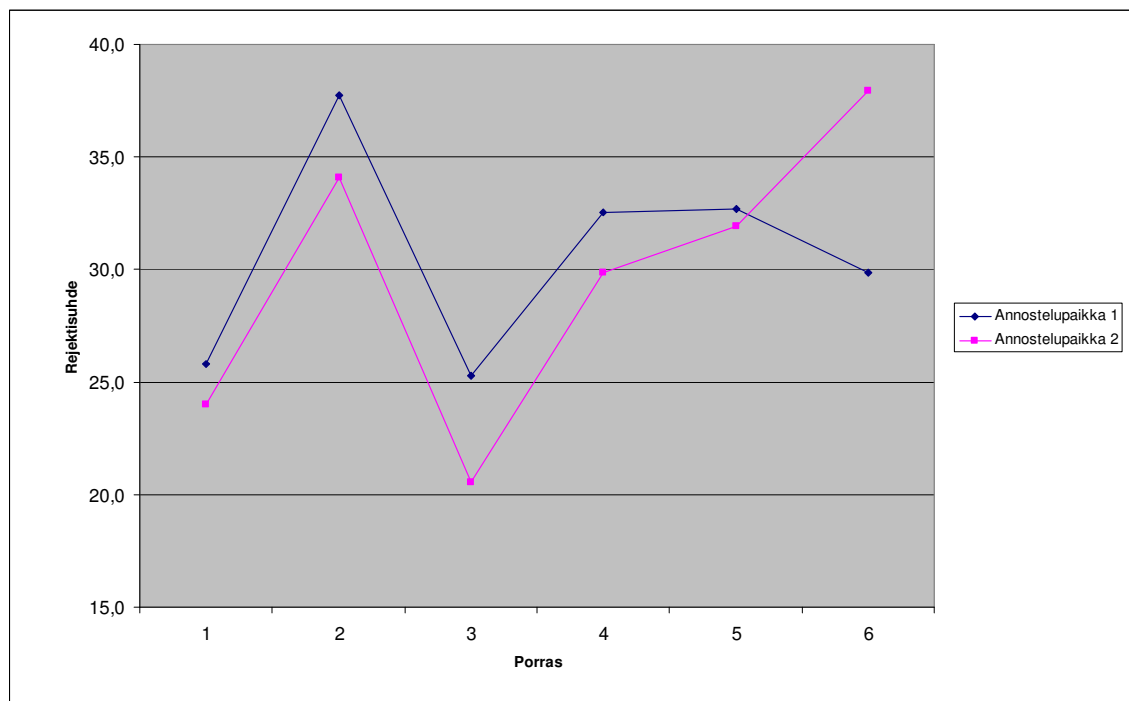


Kuvio 6. Pyörrepuhdistuslaitoksen tuhkapitoisuudet.

Tuhkapitoisuuksien jakautuminen eri portaiden syötön, aksepti- ja rejektivirran suhteen jakautuvat niin, että ensimmäisten portaiden syötön tuhkapitoisuus on hieman pienempi kuin akseptivirran tuhkapitoisuus. Rejektin tuhkapitoisuus etenkin 1- ja 2-portaan osalta on selkeästi akseptia korkeampi. Tuhkapitoisuuksien jakautuminen tasaantuu 3- ja 4-portaan kohdalla ja kääntyy 5- ja 6-portaiden kohdalla niin, että rejektin tuhkapitoisuus on korkeampi kuin syötön ja akseptin. Syynä tuhkapitoisuuden kasvamiseen jälkiportaiden rejektivirroissa voidaan pitää suuremman täyteainejakeen rikastumista siirryttäessä pyörrepuhdistuslaitoksen jälkimmäisiin vaiheisiin.

### 8.2.3 Pyörrepuhdistuslaitoksen rejektisuhteet

Pp-laitoksen rejektisuhteet laskettiin syöttö-, aksepti- ja rejektivirtojen sakeuksien avulla. Kuvio 7 on nähtävissä rejektisuhteiden muutos eri portaissa kun täyteaineen annostelupaikka on vaihdettu.



Kuvio 7. Pyörrepuhdistuslaitoksen rejektisuhteet.

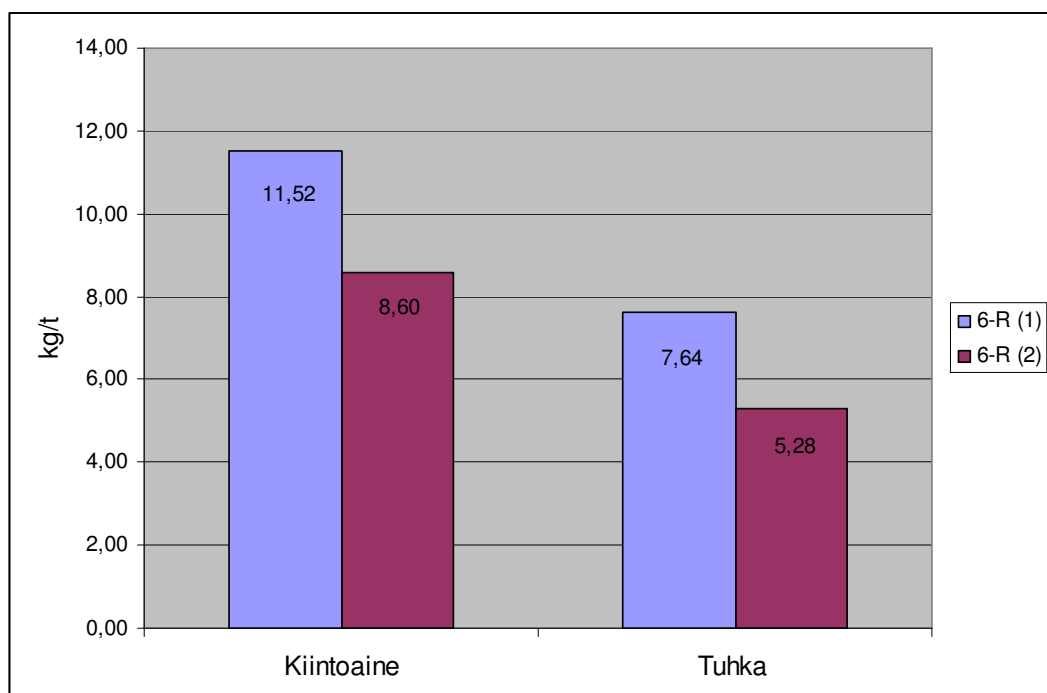
Rejektisuhteet pienenevät lukuun ottamatta 6-porrasta annostelupaikan vaihdon jälkeen. 6-portaan rejektisuhteen kasvu on huomattava. Myös 5-portaan rejek-

tisuhteen ero eri täyteaineen annostelupaikalla ei ole niin selvä kuin edeltävissä portaissa. Osaltaan 6-portaan rejektisuhteen selvää kasvua selittää syöttö- ja akseptivirtojen matalat sakeudet. Tällöin pienikin virhe sakeuden määrittämisessä näkyy selvänä muutoksena rejektisuhteen arvossa.

Teorian mukaan rejektisuhteen tulisi nousta ensimmäisestä portaasta siirryttäessä seuraaviin portaisiin. Määritetyt rejektisuhteet osoittivat varsinkin 2-portaan rejektisuhteen olevan erityisen korkea, kun taas 3-portaan rejektisuhte oli kaikista alhaisin. 2-portaan aksepti johdetaan 1-portaan akseptin kanssa yhdessä eteenpäin prosessiin (liite 3). Tämä osaltaan puoltaa 2-portaan korkeaa rejektisuhdetta korkeamman puhdistustehon saavuttamiseksi. 3-portaan rejektisuhteen matala taso johtuu todennäköisesti akseptin ja rejektin välisestä pienestä paine-erosta.

#### 8.2.4 6-portaan rejektivirran mukana poistuva kiintoaine

Täyteaineen syöttöpaikan muutoksesta 6-portaan rejektin kiintoaineen määrä muuttui odotetusti. Kuviosta 8 on nähtävissä kiintoaineen määrä rejektissä ennen ja jälkeen täyteainesyöttöpaikan vaihdon.



Kuvio 8. 6-portaan rejektin kiintoainepitoisuus tuotettua paperitonnia kohti. Kiintoaineen arvo on laskettu kilogrammoina paperikoneen tuottamaa paperitonnia kohti. 6-R(1) palkki on kiintoaineen määrä, kun täyteaine annosteltiin ennen pp-laitosta ja 6-R(2) palkki, kun täyteaine annosteltiin pp-laitoksen jälkeen.

Poistuvan kiintoaineen määrän pienentyminen on selvästi havaittavissa. Käytännössä kiintoaineen määrän putoaminen tulee täyteaineen määrän vähene- misestä. Käytettyjen täyteaineiden, GCC:n (marmori) ja liidun, suhteellista osuutta kiintoaineesta ei käytettävissä olleilla menetelmillä voitu erotella. Teo- riaosassa mainittiin, että viimeisen vaiheen rejektin kiintoaineen määrä on pape- rikoneen popetuotannosta tyypillisesti noin 0,2–0,3 %. Nyt kiintoaineen määrä on pienemmässäkin tapauksessa kolminkertainen.

## 9 YHTEENVETO

PK-8:lla käytetään raaka-aineina Kaukopään omaa valkaistua havu- ja lehtipuu-sellua ja kalsiumkarbonaatteja. Käytetyt kalsiumkarbonaattilaadut ovat GCC (marmori) ja liitu. Koneen ajettavuusongelmien takia täyteaineen annostelupiste oli vaihdettu sijaitsemaan ennen pyörrepuhdistuslaitosta. Tästä kuitenkin seurasi epäily täyteaineen kasvavasta ajautumisesta pyörrepuhdistuslaitoksen rejektiin.

Työn tarkoitus oli perehtyä pyörrepuhdistuslaitoksen toimintakuntoon ja täyteaineen syöttöpisteen paikan vaikutukseen laitoksen toimintaan sekä laitoksesta poistuvaan rejektimäärään. Lisäksi seurattiin pyörrepuhdistuslaitokselle tehtävien muutosten vaikutusta energiankulutukseen.

Pyörrepuhdistuslaitoksen paineiden säätämällä ei pystytty saavuttamaan merkittävää parannusta laitoksen toimintaan puuttuvien näytteenottoaikkujen takia. Näytteenottoaikat olisivat olleet välttämättömät säätämiseen tarvittavien rejektisuhteiden määrittämiseksi. Paineiden säätö jäi näin ollen puutteelliseksi. Näytteenottoaikat saatiin myöhemmin valmiiksi, mutta tässä vaiheessa työn viivästyksen takia päädyttiin määrittämään ainoastaan pyörrepuhdistuslaitoksen virroista sakeudet ja tuhkapitoisuudet puuttumatta sen enempää laitoksen säätämiseen.

Täyteaineen syöttöpaikan vaihtaminen pyörrepuhdistuslaitoksen jälkeen sijaitsevaan pisteeseen näkyi selvästi virtojen kokonaissakeuksien laskuna. Sakeuksien pieneneminen korreloi pyörrepuhdistuslaitoksen virtojen tuhkapitoisuuksien kanssa. Tästä voidaan päätellä sakeuden laskun tulevan täyteaineen määrän vähenemisenä pyörrepuhdistuslaitoksessa. Pyörrepuhdistuslaitoksen roskapitoisuuksia ja erotustehokkuutta ei määritetty, mutta teorian mukaan sakeuden laskua voidaan pitää pyörrepuhdistuslaitoksen erottelutehokkuutta parantavana tekijänä.

6-portaan rejektin mukana poistuva kiintoaineen määrä putosi selvästi täyteaineen syöttöpisteen vaihtamisen jälkeen. Kiintoaineen pudotus johtui lähes kokonaan tuhkapitoisuuden pienenemisestä. Kiintoaineen määrä oli kuitenkin syöttöpisteen vaihtamisen jälkeenkin melko suuri. 6-portaan rejektin osalta painetietoa ei ollut käytettävissä, joten paineiden säätövaiheessa 6-portaan toimintaan ei kiinnitetty huomiota.

Rejektisuhteiden tulisi teoriaosan mukaan kasvaa kohti jälkimmäisiä portaita. Määritetyissä pyörrepuhdistuslaitoksen rejektisuhteissa oli kuitenkin merkittävä ero eri portaiden kesken. Etenkin 2- ja 3-porras vaatisivat tulevaisuudessa huomiota osakseen. Tämän työn puitteissa pyörrepuhdistuslaitoksen säätämiseen ja rejektisuhteiden muuttamiseen ei kuitenkaan ollut aikaa. Rejektisuhteiden muuttaminen vaatisi useamman säätö- ja mittauskierroksen hyvän tuloksen saavuttamiseksi.

Tehdyillä paineensäädöillä ei todettu olevan merkittävää vaikutusta energian kulutukseen. Paineensäädöillä olisi mahdollisesti pystytty vaikuttamaan energian kulutukseen huomattavasti enemmän ensimmäisten portaiden paine-eroja muuttamalla, koska tällöin virtausmäärät olisivat olleet huomattavasti suuremmat ja siten energiankulutuksen osuus merkittävämpi. Energiankulutus mitattiin myös täyteaineen syöttöpaikan vaihtamisen yhteydessä. Mittaustuloksia ei työssä esitetä, koska dokumentti saaduista mittaustuloksista katosi. Täyteaineen syöttöpisteen vaihdon yhteydessä energiankulutusta pohdittiin kuitenkin yhdessä PK 8:n käyttöinsinöörin kanssa ja todettiin, ettei täyteaineen syöttöpaikan vaihdolla ollut merkittävää vaikutusta laimennusvesipumppujen energiankulutukseen.



## KUVAT

Kuva 1. Lyhyen kiertoon liittyvät ulkoiset virrat.

Kuva 2. Lyhyt kierto.

Kuva 3. Liidun ja jauhetun kalsiumkarbonaatin elektronimikroskooppikuvat.

Kuva 4. Pyörrepuhdistimen päävirtaukset.

Kuva 5. Tangentiaalivirtauksen nopeusjakauma.

Kuva 6. Säteensuuntaisen virtauksen nopeusjakauma.

Kuva 7. Pystysuoran virtauksen nopeusjakauma.

Kuva 8. Sakeuden vaikutus erottelutehokkuuteen.

Kuva 9. Paine-eron mittaukset pyörrepuhdistimessa

Kuva 10. Kaskadikytketty 5-portainen pp-laitos.

Kuva 11. 5-portaisen pp-laitoksen kaksoisakseptikytkentä.

Kuva 12. Täyteaineen rikastuminen pyörrepuhdistuksen eri vaiheissa.

## KUVIOT

Kuvio 1. 4-portaan syötön ja akseptin välisen paine-eron muutos.

Kuvio 2. 4-portaan akseptin ja rejektin välisen paine-eron muutos.

Kuvio 3. 5-portaan syötön akseptin välisen paine-eron muutos.

Kuvio 4. 5-portaan akseptin ja rejektin välisen paine-eron muutos.

Kuvio 5. Pyörrepuhdistuslaitoksen sakeudet.

Kuvio 6. Pyörrepuhdistuslaitoksen tuhkapitoisuudet.

Kuvio 7. Pyörrepuhdistuslaitoksen rejektisuhteet.

Kuvio 8. 6-Portaan rejektin kiintoainepitoisuus tuotettua paperitonnaa kohti.

## TAULUKOT

Taulukko 1. Yleisimpien täyteaineiden ominaisuuksia.

Taulukko 2. Partikkelin ominaisuuksia, joilla on vaikutusta erottumiseen pyörrepuhdistuksessa.

Taulukko 3. Esimerkki eri lajitinputkien halkaisijan vaikutus painehäviöön, kapasiteettiin ja poistettavaan rejektiin.

Taulukko 4. Pumpattavan veden määrä sakeuden kasvaessa.

Taulukko 5. Pyörrepuhdistuslaitoksen paineet ja paine- erot.

Taulukko 6. Laimennusvesipumppujen ottamat tehot

Taulukko 7. 6-portaan rejektit.

Taulukko 8. PP-laitoksen mittaustulokset täyteaineannostelupaikalla 1.

Taulukko 9. PP-laitoksen mittaustulokset täyteaineannostelupaikalla 2.

Taulukko 10. 6-portaan rejektin arvot ja koneen tuotantonopeus

## LÄHTEET

Ensovac-pyörrepuhdistuslaitos. Enso-Guzeit Oy. 1981. Prosessi- ja toimintaselostus. PK-8, Stora Enso Oy. Kaukopään tehtaat.

Gustafsson, H. Surakka, J. Huuskonen, J. Lankinen, M. Matula, J. 1983. Massan puhdistus ja ilmanpoisto. Teoksessa Arjas, A. (toim.) Paperin valmistus, Suomen paperi-insinöörien yhdistyksen oppi- ja käsikirja III, osa I. Toinen painos. Turku: Oy Turun Sanomat

Hannonen, L. Jantunen, E. Lindholm, G. 1993 Energian säästämismahdollisuudet tehdassuunnittelun avulla. Espoo: KCL

Hautala, J. Hourula, I. Jussila, T. Pitkänen, M. 1999 Screening and cleaning. Teoksessa Sundholm, J. (toim.) Mechanical pulping. Jyväskylä: Fabet Oy

Hentunen, P. 1998. Paperikoneen kemia 18. – 19.11.1998 Jämsänkoski, kurssimateriaali. Jämsänkoski: AEL/METSKO

Hägglom-Ahnger, U & Komulainen, P. 2005. Kemiallinen metsäteollisuus II, Paperin ja kartongin valmistus. Kolmas painos. Jyväskylä: Opetushallitus

KnowPap.7.0. Paperiteknikan ja automaation oppimisympäristö. VTT, 2005

Krogerus, B. 1999. Fillers and pigments. Teoksessa Neimo, L. (toim.) Papermaking chemistry. Jyväskylä Fabet Oy

Kärkkäinen, M. 2004. Lajittelun ajo-olosuhteiden optimointi. Etelä-Karjalan ammattikorkeakoulu. Prosessitekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.

Laitinen, J. 2005. Paperikemikaalit. Teoksessa Laitinen, J. Riistama, K. Vuori, M. Suomen kemianteollisuus. Tampere: Chemas Oy

Lampinen, P. 1996. Paperikoneiden pyörrepuhdistusrejektien fraktiointi ja akseptin käyttö paperikoneen täyteaineena. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Kemianteknikan osasto. Diplomityö.

Nordkalk. <http://www.nordkalk.com> (Luettu 30.1.2009)

Omya Oy. <http://omya.fi> (Luettu 26.1.2009)

Paulapuro, H. Terho, J. Weise, U. 2000. Stock and water systems of the paper machine. Teoksessa Paulapuro, H. (toim.) Papermaking part I, Stock preparation and Wet End. Jyväskylä: Fabet Oy

Penttinen, K. 1990. Kartonkikoneen hylkymassan lajittelun optimointi. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Kemianteknikan osasto. Diplomityö.

Puusta paperiin M-102. Lajittelu. 1985. Helsinki: Suomen paperi- ja puutavara-lehti Oy.

Puusta paperiin M-504. Hienopaperin valmistus. 1997. 2. muunnettu painos. Saarijärvi: Sepsilva Ltd Oy

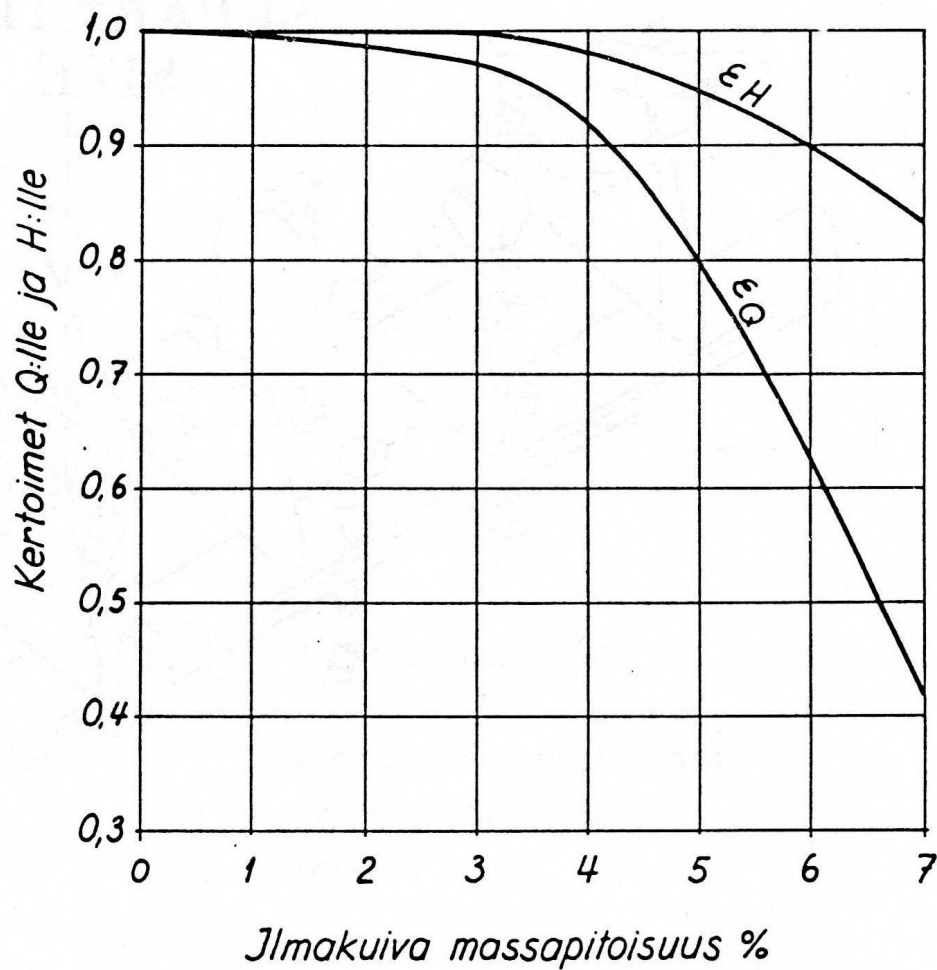
Stora Enso intranet.  
<http://imatramills/> (luettu 16.2.2009)

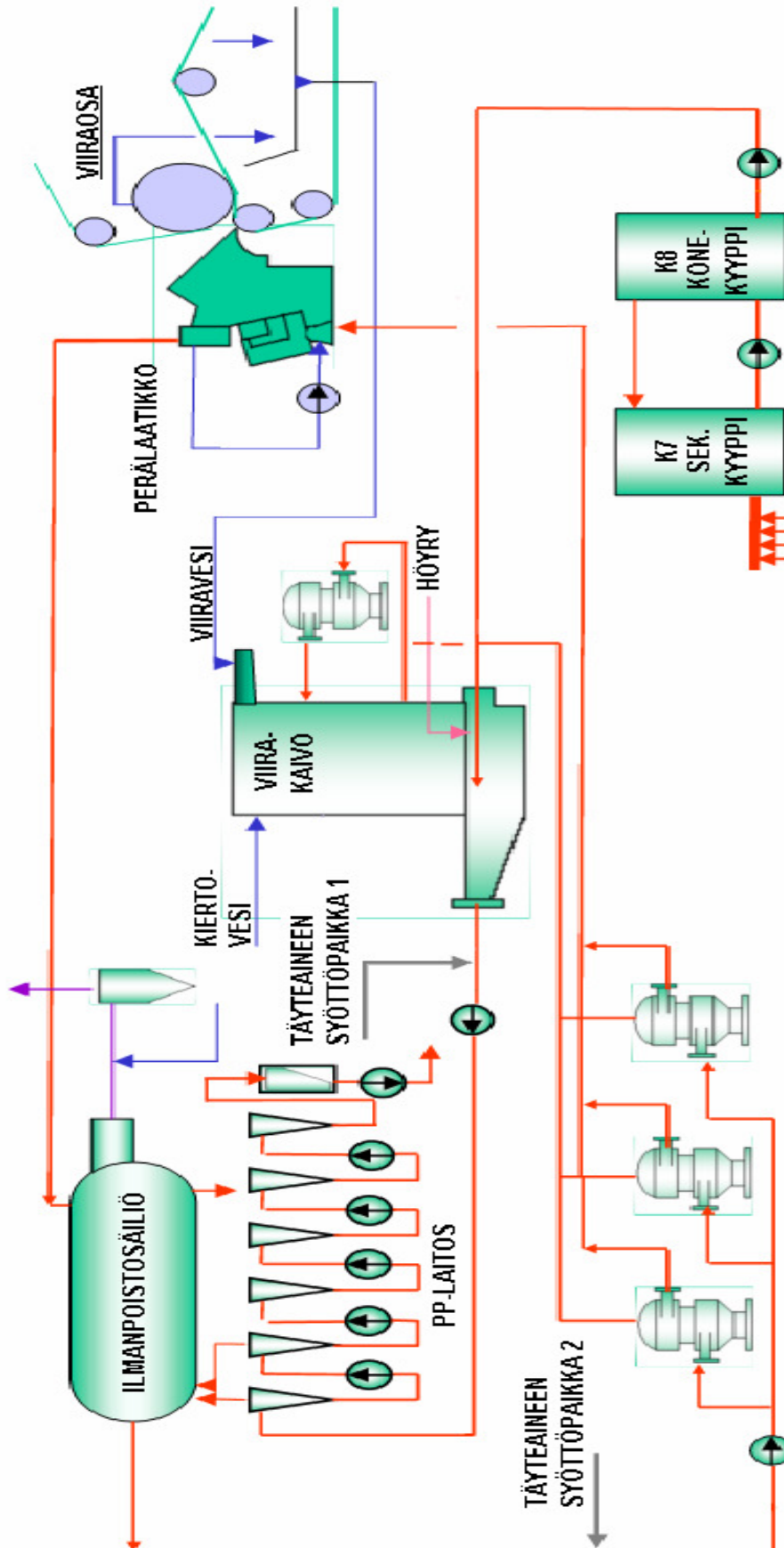
Svarovsky, L. 2000. Solid-liquid separation. Fourth edition. Oxford: Butterworth-Heinemann

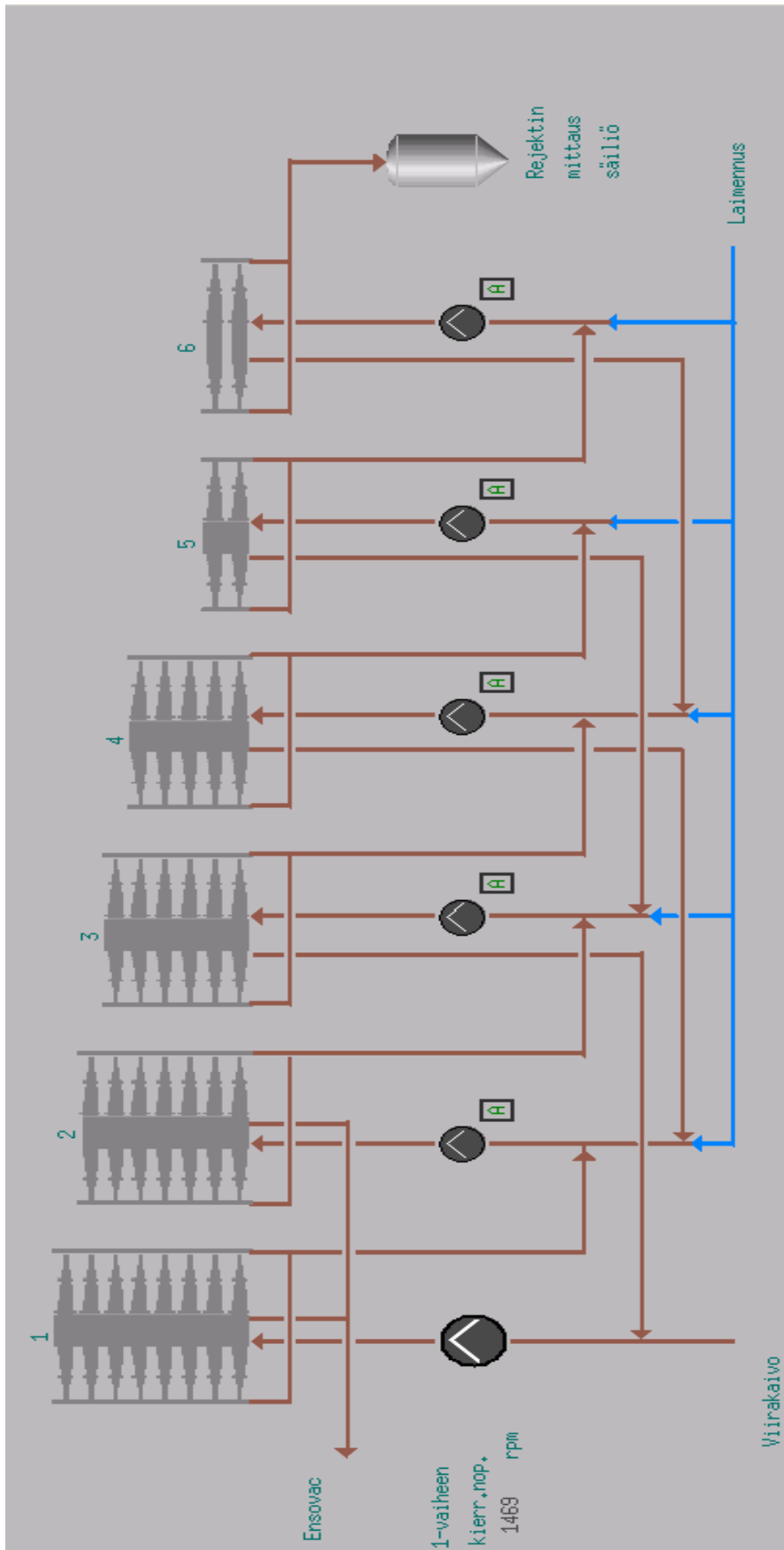
Keskipakopumpun vesi- ja massa-arvojen väliset kertoimet eri massasakeuksilla.

$$Q_{\text{massa}} = \epsilon_Q \cdot Q_{\text{vesi}}$$

$$H_{\text{massa}} = \epsilon_H \cdot H_{\text{vesi}}$$

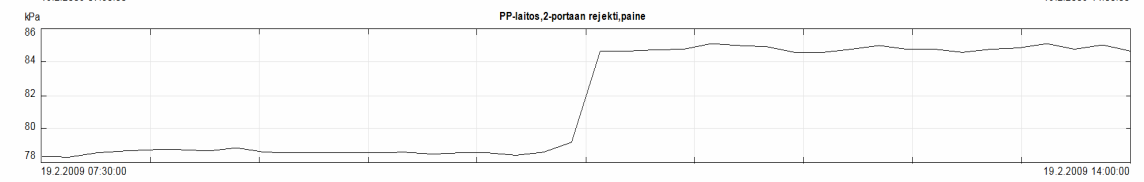
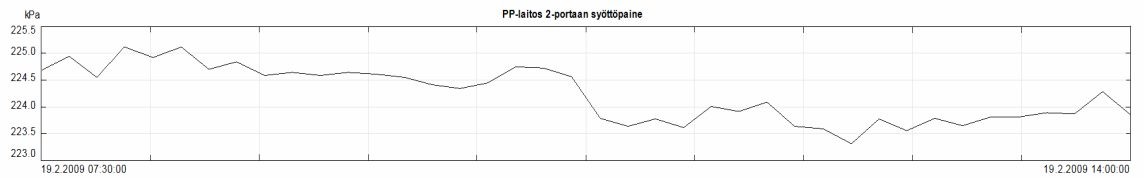
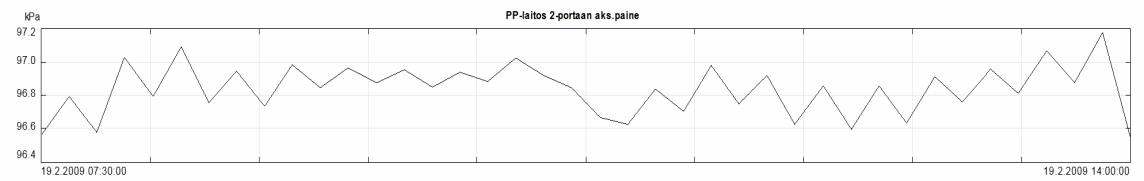
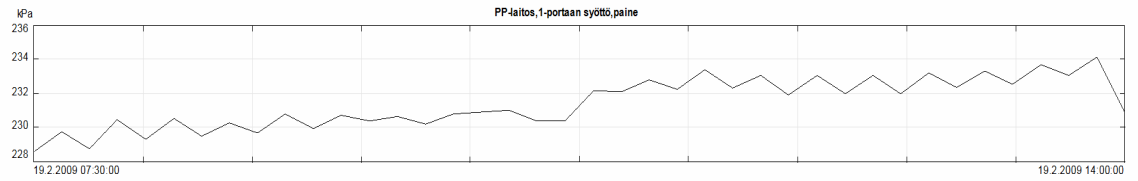
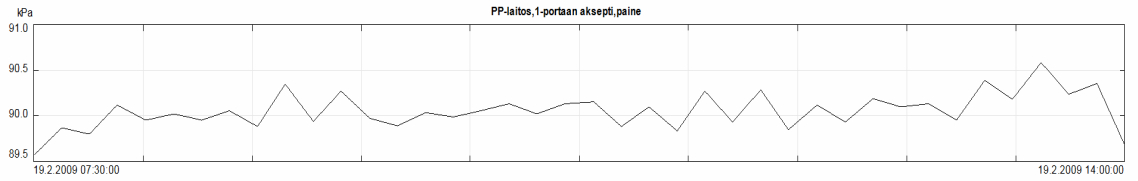
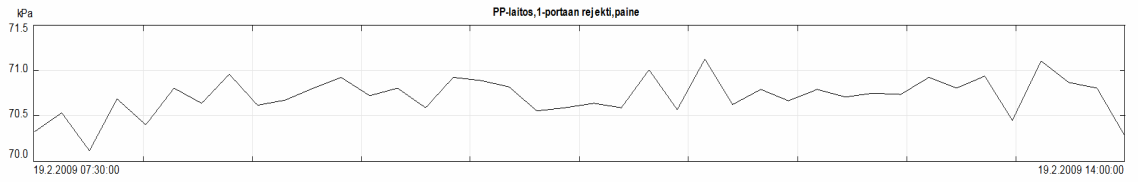






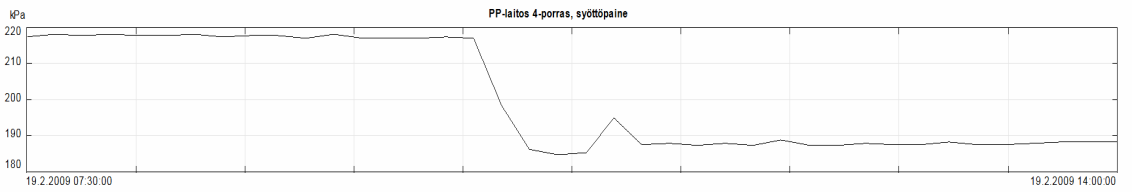
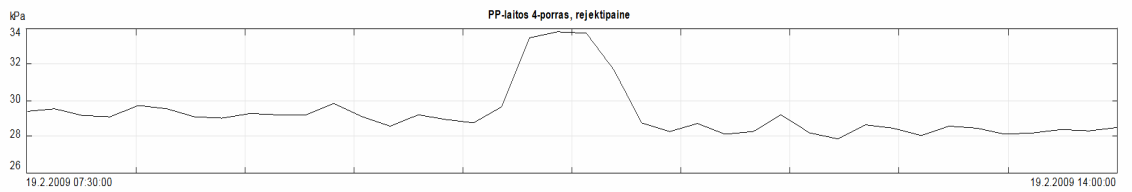
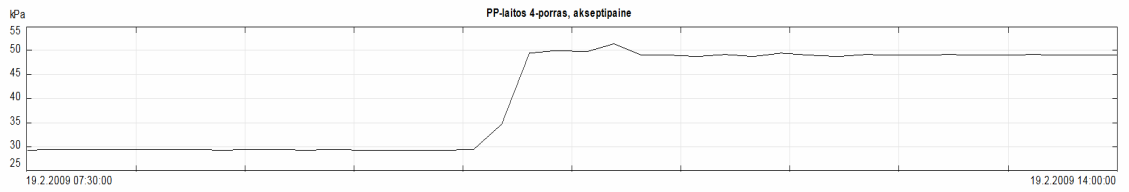
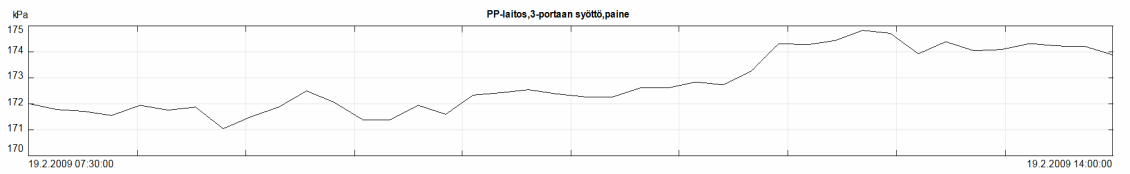
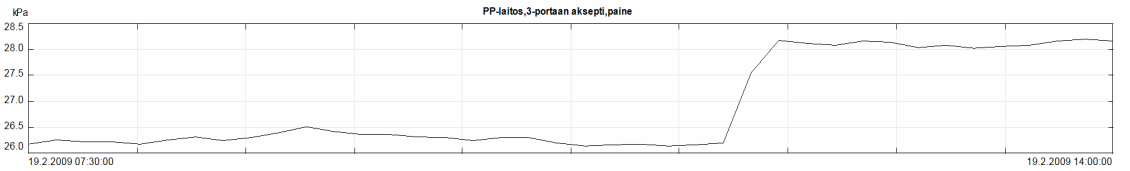
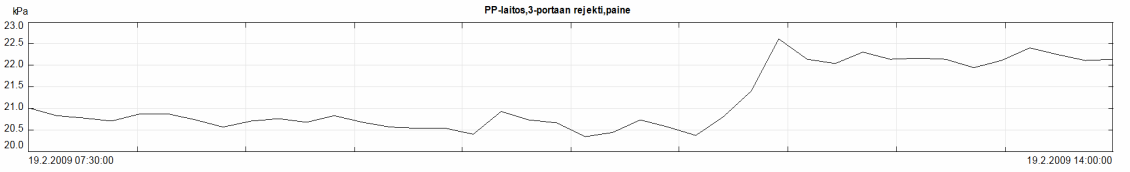


# LIITE 4 1(3)



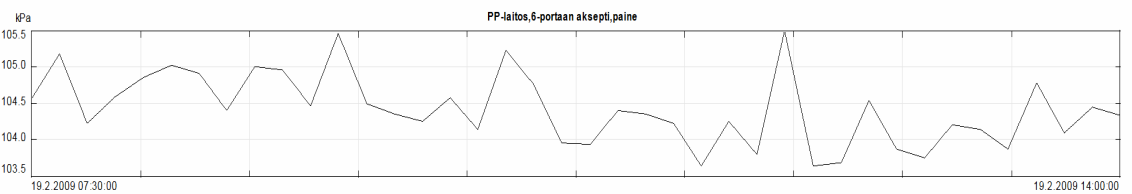
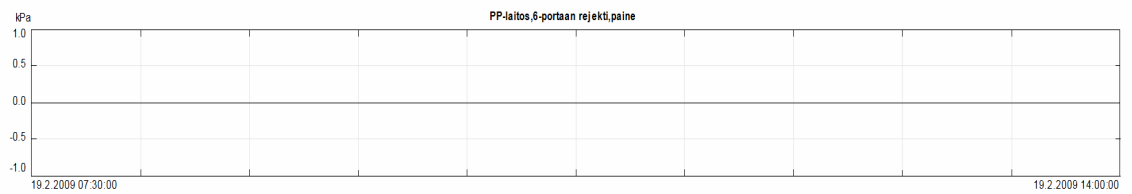
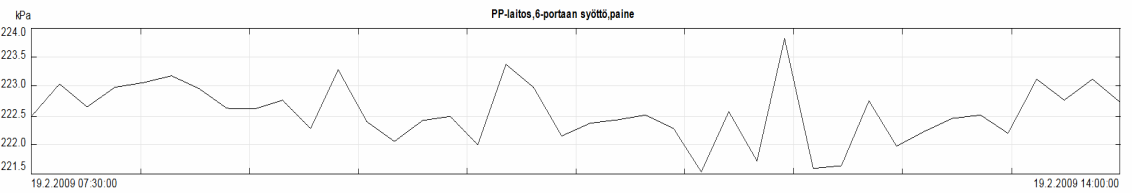
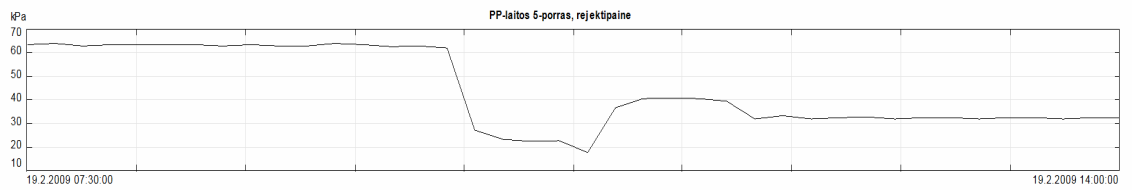
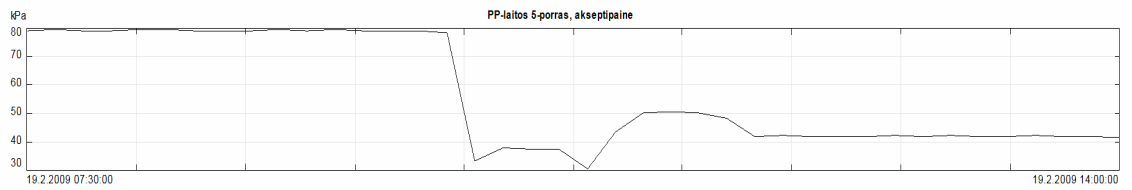
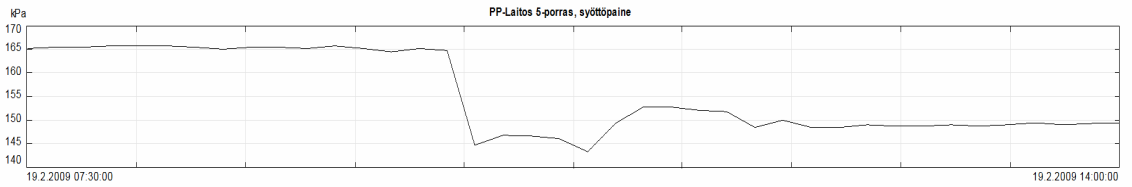
# LIITE 4

## 2(3)



# LIITE 4

## 3(3)



# LIITE 5

