



Ville Isotalus

IMURUMPUSUOTIMIEN TOIMINNAN KEHITTÄMINEN

IMURUMPUSUOTIMIEN TOIMINNAN KEHITTÄMINEN

Ville Isotalus
Opinnäytetyö
Syksy 2012
Automaatiotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Automaatiotekniikan koulutusohjelma

Tekijä(t): Ville Isotalus

Opinnäytetyön nimi: Imurumpusuotimien toiminnan kehittäminen

Työn ohjaaja(t): Heikki Kurki

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2012

Sivumäärä: 41 + 5 liitettä

Tämä opinnäytetyö tehtiin Stora Enso Oy:lle. Opinnäytetyön aiheena oli kahden sellun pesussa käytettävän imurumpusuotimen tutkiminen ja toiminnan parantaminen. Sellun pesun tarkoituksena on poistaa sellusta liuennut puuaines eli ligniini ja keittokemikaalit. Työn tavoitteena on selvittää imurumpusuotimien tämän hetkinen pesutehokkuus ja etsiä niille ajomalleja, joilla pesutehokkuutta saataisiin paremmaksi.

Pesutehokkuus selvitettiin keräämällä suotimilta massa- ja lipeänäytteitä, joista tehtaan laboratorio määrittä sakeuden ja Natrium-pitoisuuden sekä pesuhäviön. Näiden tietojen perusteella laskettiin pesutehokkuutta kuvaava E-arvo. Imurumpusuotimilla tehtiin koeajoja parempien ajomallien löytämiseksi. Koeajoissa kokeiltiin eri ajoparametrien vaikutusta pesutehokkuuteen.

Työn tuloksena saatiin selville suotimien pesutehokkuus nykyisellä tuotantovauhdilla. Tulosten perusteella voidaan arvioida onko nykyiset pesurit tarpeen korvata uudella erityyppisellä ja tehokkaammalla pesurilla. Tutkittujen suotimien pesutehokkuutta voidaan parhaiten parantaa panostamalla niiden kunnossapitoon.

Asiasanat: sellun pesu, imurumpusuodin, pesutehokkuus

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 SULFAATTISELLUN PESU	9
2.1 Pesun tarkoitus	9
2.2 Pesumenetelmät	9
2.2.1 Syrjäytys	10
2.2.2 Laimennus – sakeutus	10
2.2.3 Diffuusio	10
3 IMURUMPUSUODIN	12
3.1 Rakenne ja toiminta	13
3.2 Säädot	15
3.2.1 Laimennuskertoimen säätö	15
3.2.2 Pyörimisnopeuden ja vaahdonestoaineen säätö	16
3.3 Suotimen toimintaan vaikuttavat tekijät	16
3.3.1 Pesuveden määrä, puhtaus ja lämpötila	16
3.3.2 Syöttö- ja poistosakeus	17
3.3.3 Massan ilmapitoisuus	17
4 PESUTEHOKKUUDEN TUNNUSLUVUT	19
4.1 Laimennuskerroin	19
4.2 E-arvo	20
4.3 Pesuhäviö ja sen määrittäminen	22
4.3.1 Na-pesuhäviö	23
4.3.2 COD-pesuhäviö	23
5 PESUTEHOKKUUDEN SEURANTA	25
5.1 Näytteenotto	25
5.2 Pesutehokkuuden laskenta	27
5.3 Näytteenotto WinGEMS-simulointia varten	27
6 KOEAJOT JA TULOKSET	28
6.1 Kuumen ja lämpimän pesunesteen suhde	28

6.1.1 Testi 1	29
6.1.2 Testi 2	29
6.1.3 Koeajon näytteiden tulokset	29
6.2 Etulaimennukset	31
6.3 Pinnankorkeuden vaikutus	34
6.4 Pesutehokkuus kevään aikana	36
6.5 WinGEMS-simulointi	37
7 POHDINTA	39
LÄHTEET	41
Liite 1. Kuitulinjan prosessikaavio	
Liite 2. Näytteenottoaikat	
Liite 3. Laboratorio tulokset	
Liite 4. Laskennalliset tulokset	
Liite 5. Esimerkkilaskut	

SANASTO

Adt	Air dry ton, tonni 90 prosenttisesti kuivaa sellua
Bdt	Bone dry ton, tonni absoluuttisen kuivaa sellua
Diffuusio	Ilmiö, missä jonkin aineen atomit, molekyylit tai ionit kulkevat toisen aineen lävitse
Huuva	Suojavaippa
Kuitu	Puusolu, paperin tärkein raaka-aine
Ligniini	Puun sideaine, joka sitoo puun kuidut toisiinsa; pyritään poistamaan keitossa
Massa	Mekaanisesti tai kemiallisesti valmistettu kuituseos, paperin tai kartongin raaka-aine
Sulppu	Kuitujen ja muiden paperin raaka-aineiden vesiliete
Viira	Tasomainen muovi- tai metallikudos

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tilaajana toimi Stora Enson Oyj Fine Paper Oulun tehdas, joka on yksi suurimmista ja nykyaikaisemmista puuvapaiden taidepainopapereiden valmistajista. Oulun tehtaiden tehdasintegraatio koostuu sellutehtaasta, voimalaitoksesta sekä kahdesta paperikoneesta. Lisäksi alueella toimii useita muita yrityksiä ja kiinteästi tehdasalueeseen liitetty satama.

Oulun sellutehdas valmistaa noin 370 000 tonnia täysvalkaistua sellua vuodessa. Sellusta noin puolet menee sellutehtaan yhteydessä oleville paperikoneille ja loput myydään paalattuna muualle. Sellun raaka-aineena käytetään mäntyhaketta.

Oulun sellutehtaalla sellua valmistetaan jatkuvatoimisella sulfaattikeittoprosessilla. Keiton tehtävänä on kemikaalien ja lämmön avulla poistaa puun kuituja sitovaa ligniiniä. Tavoitteena on säilyttää kuidut mahdollisimman pitkinä ja ehjinä, jolloin paperiin saadaan mahdollisimmat hyvät laatuominaisuudet. (1.)

Sellun pesu on yksi sellun valmistuksen tärkeimmistä prosesseista. Pesussa erotetaan sellusta siihen keitossa jäänyt jäteliemi, joka koostuu keittokemikaaleista ja liuenneesta puuaineksesta eli ligniinistä. Pesun tavoitteena on sellun puhdistaminen jatkokäsittelyä varten ja jäteliuoksen talteenottaminen, joka mahdollistaa arvokkaiden kemikaalien talteenoton ja liuenneen puuaineksen käyttämisen polttoaineena. Huonosti onnistunut pesu muun muassa nostaa keiton ja valkaisun kemikaalikustannuksia. Pesu on tarpeellinen myös vesistönsuojelun vuoksi. (7, s. 683.)

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin kahta sellutehtaan ruskeanmassan pesemään kuuluvaa imurumpusuodinta, jotka ovat tyypiltään Wärtsilän WIS-imurumpusuotimia. Työn lähtökohtana oli se, että rumpusuotimet eivät pese massaa riittävän tehokkaasti. Työn tavoitteena oli selvittää rumpusuotimien pesutehokkuus nykyisellä tuotantovauhdilla ja etsiä ajomalleja, joilla suotimien pesutehokkuutta saataisiin paremmaksi.

Pesutehokkuutta seurattiin keräämällä kevään 2012 aikana suotimilta massa- ja lipeänäytteitä. Näytteistä saatujen laboratoriotulosten perusteella saatiin laskettua suotimille pesutehokkuusarvo. Parempien ajomallien löytämiseksi järjestettiin suotimilla koeajoja, joissa testattiin eri ajoparametrien vaikutusta pesutulokseen.

2 SULFAATTISELLUN PESU

Stora Enson Oulun sellutehtaalla sellua valmistetaan jatkuvatoimisella sulfaattikeittoprosessilla, mikä on selvästi yleisin sellun valmistustapa. Sulfaattikeitossa käytetään keittokemikaaleina natriumhydroksidin (NaOH) ja natriumsulfidin (Na_2S) seosta. Keittokemikaalit imeytetään sellun raaka-aineena käytettävään mäntyhakkeeseen imetystornissa ennen keittoa. Keiton tehtävänä on lämmön ja kemikaalien avulla poistaa kuituja sitovaa puuainesta eli ligniiniä. Keittolämpötila on sulfaattikeitossa noin 160 °C (1.)

Tässä luvussa keskitytään ruskean massan pesuun, joka on keiton jälkeinen pesuvaihe, jossa erotetaan sellusta liennut puuaines ja keittokemikaalit. Pesuvaiheesta sellu jatkaa happidelignifointiin ja valkaisuun. Sellua pestään myös happivaiheen jälkeen ja valkaisun eri vaiheissa. Valkaistu sellu pumpataan paperikoneille tai kuivataan ja paalataan. Liitteessä 1 on esitetty Oulun sellutehtaan kuitulinja, josta nähdään sellun valmistuksen eri vaiheet.

2.1 Pesun tarkoitus

Sellun pesun tarkoituksena on erottaa ja ottaa talteen keitossa massasulppuun liennut orgaaninen aines sekä epäorgaaniset keittokemikaalit. Keiton jälkeiset happidelignifointi ja valkaisu vaativat massalta riittävän puhtausasteen toimiakseen taloudellisesti. (2, s. 4.)

Pesussa erotettu mustalipeä jatkokäsitellään haihduttamalla ja polttamalla. Mustalipeästä haihdutetaan vettä, jotta kuiva-ainepitoisuus saadaan riittävän korkeaksi ja lipeä voidaan polttaa soodakattilassa. Orgaanisen aineksen polttamisesta saadaan energiaa sellutehtaan käyttöön ja samalla soodakattilassa saadaan erotettua epäorgaaniset keittokemikaalit, jotta ne voidaan regeneroida käytettäväksi uudelleen keitossa. (2, s. 4.)

2.2 Pesumenetelmät

Keittolientä on sellussa vapaana ja sidottuna. Kuituihin ja kuitukimppuihin sekoittunut mustalipeä on vapaata nestettä. Kuitujen pinnoille sitoutunut ja niiden sisällä oleva mustalipeä on sidottua nestettä. Vapaana oleva neste on helposti

poistettavissa. Sen poisto tapahtuu laimentamalla sitä pesunesteellä, saostamalla ja syrjäyttämällä se pois massasta. Sitoutunut neste on vaikeampi poistaa ja se onnistuu vain diffuusion ja kapillaarivirtauksien avulla, jotka ovat hyvin hitaita ilmiöitä ja vaativat pitkiä käsittelyaikoja. (3, s.8.)

2.2.1 Syrjäytys

Syrjäytyksellä tarkoitetaan tapahtumaa, jossa pesuneste työntää väkevemmän liemen pois sellukerroksesta. Tapahtuma on periaatteessa samanlainen kuin männän työntäessä kaasua tai nestettä edellään sylinterissä. Sen edellytyksenä on, että nesteiden rajapinnassa ei tapahdu sekoittumista. Käytännössä sekoittumista kuitenkin tapahtuu, koska massa ei ole tasalaatuista.

Jotta päästäisiin mahdollisimman hyvään pesutulokseen, tulee pesuliemen tiheys olla pienempi kuin syrjäytettävän nesteen tiheys. Pesuliemen tiheyttä saadaan pienemmäksi esimerkiksi nostamalla sen lämpötilaa. (3, s. 8.)

Syrjäytyksessä saadaan paras pesutulos kun virtausnopeus on mahdollisimman alhainen. Alhainen virtausnopeus tosin pienentää pesukapasiteettia. (3, s. 8.)

2.2.2 Laimennus – sakeutus

Massaan liuenneiden aineiden pitoisuutta saadaan laskettua laimentamalla massaa pesunesteellä ja saostamalla massa korkeampaan sakeuteen. Saostus voidaan tehdä mekaanisesti puristamalla tai saostamalla massa paineen avulla viiralle. Pesutulos riippuu pesunesteen väkevyydestä ja määrästä sekä massan sakeudesta saostuksen jälkeen. (1.)

2.2.3 Diffuusio

Kuten edellä on todettu, kuituihin sitoutunutta nestettä ei voida poistaa mekaanisilla menetelmillä. Diffuusiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa kuidun ympärillä olevan nesteen ja kuidun sisällä olevan nesteen pitoisuuserot pyrkivät tasoittumaan. Kun massassa olevaa vapaata nestettä korvataan puhtaammalla nesteellä, vapaan nesteen ja kuidun sisällä olevan väkevämmän nesteen välille muodostuu pitoisuusero, jolloin kuidun sisällä oleva neste lähtee laimenemaan

tasapainoon vapaan nesteen kanssa. Diffuusio on hyvin hidas ilmiö, ja sen merkitys pesussa on vähäinen. (3, s. 10.)

3 IMURUMPUSUODIN

Sellun pesemiseen on kehitelty erilaisia pesulaitteita, joita ovat keitinpesu, diffusööripesurit eli säteispesurit, rumpusuotimet, DD-pesurit (Drum Displacer) ja pesupuristimet.

Tässä työssä tutkittiin Oulun sellutehtaalla kahta rinnakkain toimivaa pesusuodinta, jotka ovat tyypiltään Wärtsilän WIS-imurumpusuotimia (kuva 1). Suotimet on otettu käyttöön vuonna 1984. Suotimet sijaitsevat kuitulinjassa lajit-
tamon ja happidelignifioinnin eli niin sanotun happivaiheen välissä. (Liite 1.)



KUVA 1. Oulun sellutehtaan imurumpusuotimet

Pesusuotimesta voidaan käyttää myös nimitystä pesusaostin. Koska kyseessä on kaksi samanlaista rinnakkain toimivaa pesuria, niistä käytetään tehtaalla myös nimitystä kaksoset.

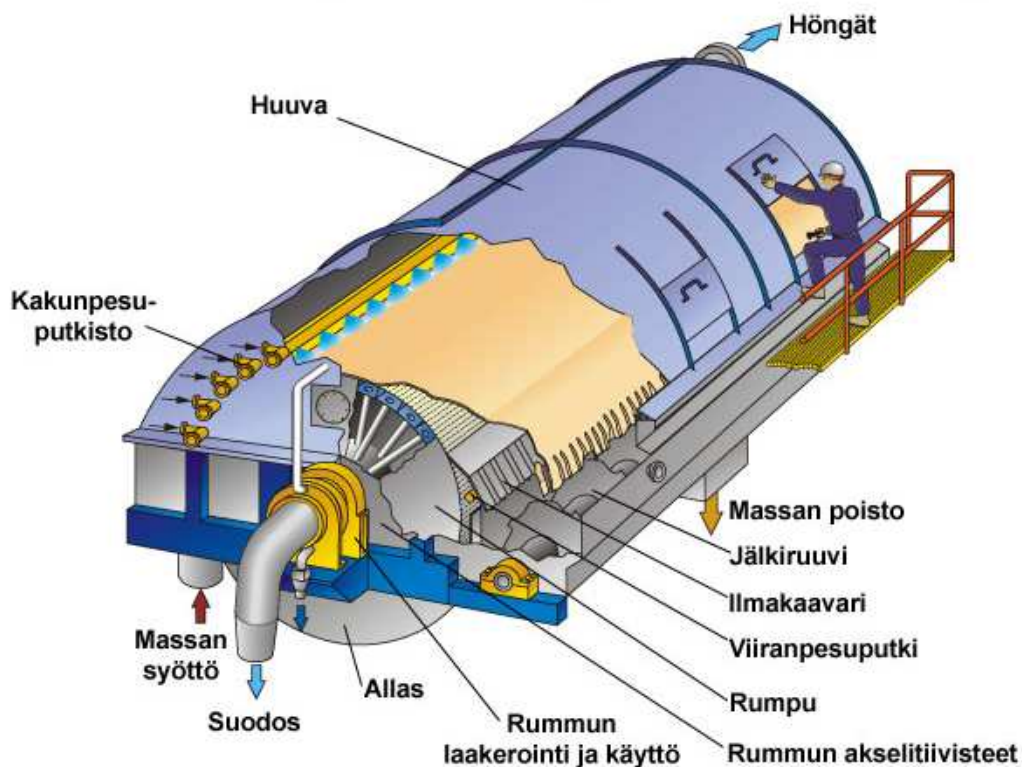
Imurumpusuodin on eniten käytetty pesuryyppi ruskeanmassan pesussa. Uusiin tehtaisiin niitä ei kuitenkaan enää asenneta, koska niiden ominaiskapasiteetti on varsin pieni ja pesuteho jää usein huonommaksi verrattuna toisiin pe-

surityyppeihin. Vanhoissa tehtaissa imurumpusuotimia on kuitenkin edelleen käytössä runsaasti. (2, s. 21–22.)

Imurumpusuotimelle tulevaa massaa laimennetaan ja massa saostuu viiralla päällystetyn rummun pinnalle imun tehostamana. Lisäksi saostetun massan päälle suihkutetaan pesunestettä, joka syrjäyttää massan sisältämän nesteen rummun sisälle. Imurumpusuotimella tapahtuu siis sekä syrjäytyspesua että laimennus – sakeutuspesua. (1.)

3.1 Rakenne ja toiminta

Imurumpusuotimen rakenne ja toiminta tulevat hyvin esille kuvasta 2, jossa on esitetty erään imurumpusuotimen rakenne. Kuvan 2 imurumpusuodin vastaa rakenteeltaan melko tarkasti työssä tutkittuja suotimia.



KUVA 2. Imurumpusuotimen rakenne (1)

Imurumpusuotimelle ensiölajittimilta tuotavan massan sekaan syötetään vaahdonestoainetta ja massa laimennetaan lipeällä noin 1–2 %:n sakeuteen ennen kuin se pumpataan suotimen perälaatikkoon. Perälaatikosta massa valuu altaaseen, jossa suotimen viiralla päällystetty rumpu pyörii. (8.)

Viiralle saostuu rummun sisällä olevan alipaineen (imun) vaikutuksesta massa-kerros, jota kutsutaan kakuksi. Massasta viiran läpi rummun sisälle menevä suodos poistuu rummun toisesta päästä suodosputkea pitkin pari kerrosta alemmas sijoitettuun suodossäiliöön. Suodoksen virtaus suodosputkessa eli ns. imujalassa saa aikaan tarvittavan alipaineen, joten tyhjiöpumppua ei tarvita. (3, s. 23.)

Massaradalle johdetaan pesunestettä mahdollisimman tasaisesti viiden suihkuputken kautta. Käytettävän pesunesteen lämpötila on noin 90 °C ja on vaarana, että suodos kiehuu alipaineessa imujalassa. Tästä syystä osa pesunesteestä jäähdytetään noin 85 °C:een lämpötilaan. Tämä ”lämmin” pesuneste johdetaan ensimmäisille eli alemmille suihkuputkille ja jäähdyttämätön eli kuuma pesuneste johdetaan ylemmille putkille. (8.)

Rummun sisällä oleva alipaine saa aikaan sen, että pesuneste syrjäyttää massan sisältämän nesteen, joka imeytyy rummun sisälle. Pesuneste imetään mahdollisimman tarkoin pois ja massa saostuu noin 12–14 %:n sakeuteen ennen kuin se poistetaan viiralta. (2, s. 21.)

Rummun ulkokehä on jaettu lokeroryhmiin, joista suodos kulkee putkia pitkin rummun päähän. Rummun päässä oleva jakoventtiili säättää alipainetta ja ohjaa suodoksen imujalkaan. Jakoventtiilillä rumpu on jaettu imu- ja irrotusvyöhykkeeseen. Imuvyöhyke alkaa rummun ollessa altaan pinnan alapuolella ja jatkuu lähes ilmakaavarille, mistä alkaa irrotusvyöhyke. Irrotusvyöhykkeen aikana yhteys imujalkaan sulkeutuu ja massa saadaan ilmakaavarin avulla irrotettua viiralta. Irrotusvyöhykkeen lokeroryhmiin on myös mahdollista ohjata paineilmaa helpottamaan massan irrotusta viiralta. (3, s. 31.)

Massa poistetaan viiralta ilmakaavarilla, josta se putoaa repijäruuville. Repijäruuvi hajottaa massaradan ja pesty massa putoaa pudotusputkeen, josta se

pumpataan happivaiheeseen. Repijäruuville syötetään jonkin verran laimennuslipeää. (2, s. 21.)

Viiraa estetään tukkeutumasta puhdistamalla sitä ilmakaavarin jälkeen viiranpesuputkesta suihkutettavalla lipeällä. Lisäksi viira puhdistetaan ajastetusti toimivalla harjalla.

3.2 Säädot

Pesulinjan perustason säädot on toteutettu Ahlström Automationin (nyk. Honeywell) valmistamalla Alcont-automaatiojärjestelmällä. Alcont-järjestelmä on liitetty MetsoDNA-automaatiojärjestelmään, joka toimii ylätason säätimenä. MetsoDNA-järjestelmään ei ole kytketty omia kenttäliityntöjä vaan se hakee tarvittavat tiedot Alcont-järjestelmästä. (6, s. 5.)

MetsoDNA-järjestelmä laskee asetusarvoja pesulaitteiden perustason säädöille ja tuottaa informaatiota operaattoreille. Ylätason laskentatietoja viedään myös ABB-Info-historiatietokantaan, johon tallennettuja tietoja voidaan hyödyntää prosessin analysoinnissa ja raportoinnissa. (6, s. 5.)

Pesusuotimille ylätason säädin laskee asetusarvot kokonaispesunesteen säädöille ja molempien suotimien kuuma- ja lämminvesisäädöille. Suotimien rumpujen pyörimisnopeutta ja vaahdonestoaineen määrää ohjataan perustason Alcont-järjestelmällä. (6, s. 13.)

3.2.1 Laimennuskertoimen säätö

MetsoDNA-järjestelmä laskee ja optimoi koko pesulinjan pesunesteiden virtaukset pesulaitteille. Laimennuskertoimen säädön tavoitteena on annostella suotimille tiettyä laimennuskerrointa vastaava määrä pesunestettä. Suotimien pesunestemäärää ohjataan tuotannon ja suotimien poistosakeuden mukaan. Pesunesteiden säätö saa tiedon pesulinjan aiempien pesulaitteiden pesunestevirtauksista myötäkytkentänä. Laimennuskertoimen asetusarvo saadaan säteispesuri 2:n suodossäiliön pintasäätimeltä. (6, s. 13.)

3.2.2 Pyörimisnopeuden ja vaahdonestoaineen säätö

Suotimien rumpujen pyörimisnopeutta ohjataan altaiden pinnakorkeuksien perusteella. Vastaavasti pinnankorkeuden asetusarvoa muuttamalla saadaan tarvittaessa pienennettyä tai kasvatettua rumpujen pyörimisnopeutta. Tämä säätö toimii perustasolla Alcontissa. (5.)

Rumpujen pyörimisnopeus on suotimen tärkein säätökohde pesunestemäärän jälkeen. Pyörimisnopeus halutaan pitää mahdollisimman hitaana, jotta massan viipymäaika rummun pesuvyöhykkeessä olisi mahdollisimman pitkä. (1.)

Rumpujen pyörimisnopeuden perusteella syötetään vaahdonestoainetta pesureille tulevan massan sekaan. Vaahdonestoaineen säätö toimii normaalisti kaskadi-moodissa. Säättöpiirille annetaan ulkoiseksi asetusarvoksi syötettävä annostavoite, joka riippuu happivaiheen tuotannosta. (5.)

Asetusarvoa hienosäädetään pesusuotimien kierrosohjauksen lisää/vähentää-rajoiden mukaan. Eli mikäli pesusuotimen pyörimisnopeus nousee yli lisää-ajan, vaahdonestoaineen annosta kasvatetaan hitaasti ja mikäli pyörimisnopeus laskee alle vähentää-ajan, annosta pienennetään hitaasti. Rajat voidaan asettaa käsin tai automaattisesti tuotantomäärän mukaan. (5.)

3.3 Suotimen toimintaan vaikuttavat tekijät

Vaikka rumpusuodin on toimintaperiaatteeltaan melko yksinkertainen laite, sen toimintaan ja pesutulokseen vaikuttaa useita eri tekijöitä. Näitä ovat esimerkiksi pesunestemäärä, syöttösakeus, poistosakeus ja massan ilmapitoisuus.

3.3.1 Pesuveden määrä, puhtaus ja lämpötila

Pesunesteen määrä vaikuttaa oleellisesti pesutulokseen. Suuremmalla pesunestemäärällä päästään parempaan pesutulokseen, mutta sen käyttöä rajoittaa syrjäytetyn mustalipeän haihduttamiskustannukset. (3, s. 24.)

Pesunesteen puhtaudella on luonnollisesti iso merkitys pesutulokseen. Optimaalisinta olisi käyttää pesunesteenä puhdasta vettä, mutta se ei ole taloudellisesti järkevää. Pesunesteet on kytketty pesemöllä vastavirtaan eli puhdas vesi

tuodaan viimeiseen pesuvaiheeseen, jonka suodos käytetään pesunesteenä seuraavassa pesuvaiheessa ja niin edelleen. (2, s. 6.)

Korkea lämpötila alentaa nesteiden viskositeettiä, jolloin suotautuminen paranee. Pesunesteen lämpötilaa kuitenkin rajoittaa imurumpusuotimessa imujalka, jossa alipaineesta johtuen nesteen kiehumispiste alenee. Jos neste pääsee kiehumaan imujalassa, suotaumista tehostava imu heikkenee. (3, s. 27.)

Alipaineen eli imun voimakkuus vaikuttaa pesutehoon. Suurempi paine-ero imee voimakkaammin pesunestettä, mutta samalla sellukerros tiivistyy ja pesuneste läpäisee sellukerroksen huonommin eli pesu heikkenee. Paine-eroa ei kannata siis lisätä tietyn rajan yli. Imuun ei tutkituilla suotimilla voida juurikaan vaikuttaa muuten kuin varmistamalla ettei pesuneste ole liian kuumaa. (3, s. 24.)

3.3.2 Syöttö- ja poistosakeus

Imusuotimen syöttösakeus on tavallisesti 1–2 % ja poistosakeus 12–15 %. Liian alhainen syöttösakeus pienentää suotimen kapasiteettia ja se näkyy rummun kierrosnopeuden kasvuna. Alhainen syöttösakeus myös lisää suodoksen määrää ja ohentaa rummulle saostuvaa sellukerrosta. Liian korkea sakeus puolestaan aiheuttaa liian paksun sellukerroksen ja syrjäytyspesu ei onnistu kunnolla. (3, s. 24.)

Alhainen syöttösakeus parantaa massaradan muodostumista ja mahdollistaa yhtenäisemmän ja tasaisemman massaradan. Tämä tuottaa parhaan pesutuloksen. Epätasaisessa massaradassa tiheimmät kohdat jäävät peseytymättä, koska pesuneste kulkee luonnollisesti sieltä, missä vastus on pienin. Alhainen sakeus myös pienentää massaan sekoittuneen ilman määrää. (4, s. 63.)

3.3.3 Massan ilmapitoisuus

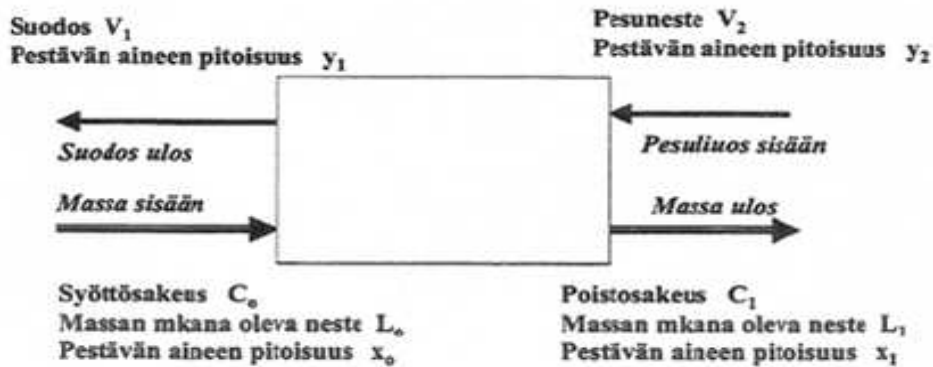
Massaan jääneellä ilmalla on suuri vaikutus syrjäytyspesun onnistumiseen suotimessa. Massakakkuun jääneet ilmakuplat estävät pesunestettä läpäisemästä massaa tasaisesti. Seurauksena on pesunesteen kanavoituminen, huonontunut

vedenpoisto ja alentunut pesutehokkuus. Huonontuneen vedenpoiston takia rumpun pyörimisnopeutta joudutaan nostamaan. (4, s. 66.)

Näistä syistä on alettu käyttää vaahdonestoaineita mukana pesussa. Vaahdonestoaineet parantavat vedenpoistoa vähentämällä ilmakehien määrää tai pienentämällä niiden kokoa. (4, s. 74.)

4 PESUTEHOKKUUDEN TUNNUSLUVUT

Yksittäisen pesuvaiheen tai koko pesemön toimintaa voidaan kuvata kuvan 3 mukaisella kaaviokuvalla. Pesulaitteeseen tulee kaksi sisääntulovirtausta, jotka ovat syöttömassa ja pesuneste. Vastaavasti pesulaitteelta lähtee kaksi ulostulovirtausta, jotka ovat poistomassa ja pesusuodos. (2, s. 10.)



KUVA 3. Massan pesuvaiheen kaaviokuva (2, s. 10)

Hyvällä pesutuloksella tarkoitetaan sitä, että saadaan pesulaitteen poistomassassa olevan pestävän aineen pitoisuus mahdollisimman lähelle pesunesteen pitoisuutta. Samalla kuitenkin pesusuodos halutaan pitää mahdollisimman väkevä, jotta saadaan haihdutuskustannukset mahdollisimman alas. (2, s. 11.)

4.1 Laimennuskerroin

Laimennuskerroin (kaava 1) kertoo käytetyn pesunesteen ja massan mukana poistuvan nesteen erotuksen kuivaa massatonna kohti. Pesuveden määrä on tärkein pesuprosessin ohjaussuure. Mitä suurempi laimennuskerroin on, sitä enemmän pesuvesi on laimentanut haihduttamolle menevää suodosta. Koska suodos joudutaan haihduttamaan, on tarpeettoman suuren pesunestemäärän käyttö epätaloudellista. (1.)

$$DF = V_2 - L_1$$

KAAVA 1

DF = Laimennuskerroin

V_2 = pesunesteen määrä

L_1 = poistomassan mukana olevan nesteen määrä

4.2 E-arvo

Pesulaitteiston tehokkuutta voidaan mitata erilaisilla tunnusluvuilla, joista ehkä yksiselitteisin on pesun tehokkuuskerroin eli E-arvo (1). E-arvo kuvaa pesulaitteen tehokkuutta hyvin, koska se riippuu vain vähän pesunestemäärästä ja pesunestesuhteesta (7, s. 695). Kun E-arvo on 1, on kyseessä ideaalinen pesuvaihe, jossa massasulppu ja pesuneste sekoittuvat täydellisesti ja epäpuhtauksien pitoisuuserot tasoittuvat. Poistuvan pesusuodoksen epäpuhtauspitoisuus on siis sama kuin massan mukana lähtevän veden. E-arvo kuvaa, montako tällaista täydellistä sekoitusta pesulaitteessa tapahtuu. (1.)

E-arvon laskentaa varten mitataan syöttö- ja poistomassoista sekä pesunesteestä ja suodoksesta epäpuhtauspitoisuus. Lisäksi tarvitaan syöttö- ja poistomassojen sakeus sekä pesunestemäärä. E-arvon perusmuoto on esitetty kaavassa 2. (1.)

$$E = \frac{\ln \left[\frac{L_0(x_0 - y_1)}{L_1(x_1 - y_2)} \right]}{\ln \left[\frac{V_2}{L_1} \right]}$$

KAAVA 2

L_0 = syöttömassan mukana olevan nesteen määrä

L_1 = poistomassan mukana olevan nesteen määrä

V_2 = pesunesteen määrä

x_0 = pestävän aineen pitoisuus syöttömassassa

x_1 = pestävän aineen pitoisuus poistomassassa

y_1 = pestävän aineen pitoisuus suodoksessa

y_2 = pestävän aineen pitoisuus pesunesteessä

E-arvosta on olemassa erilaisia modifikaatioita, jotka on johdettu käyttämällä ainetaseita hyväksi. Kaavassa 3 on esitetty E-arvon modifikaatio, jossa pesurin syöttömassan tiedot on eliminoitu pois. Luotettavan syöttösakeuden saaminen

tehdasmittakaavassa on yleensä hankalaa, joten pesutehokkuus saadaan määritettyä luotettavammin silloin, kun syöttösakeutta ei oteta laskentaan mukaan. Tämä modifikaatio sopii erityisen hyvin pesurikohtaiseen pesutehokkuuden laskentaan. (2, s. 13.)

$$E = \frac{\ln \left[1 + \frac{DF(y_1 - y_2)}{L_1(x_1 - y_2)} \right]}{\ln \left[1 + \frac{DF}{L_1} \right]}$$

KAAVA 3

Eri tyyppisten pesulaitteiden E-arvoja ei voida suoraan verrata toisiinsa, koska poistosakeuksissa voi olla suuriakin eroja. Tästä syystä todellisen sakeuden sijasta E-arvo muutetaan vastaamaan jotain vakiosakeustasoa, joka on yleensä 10 %. Kaavassa 4 on esitetty kaava 3 muutettuna vastaamaan E-arvoa 10 %:n sakeudessa. (2, s. 15.)

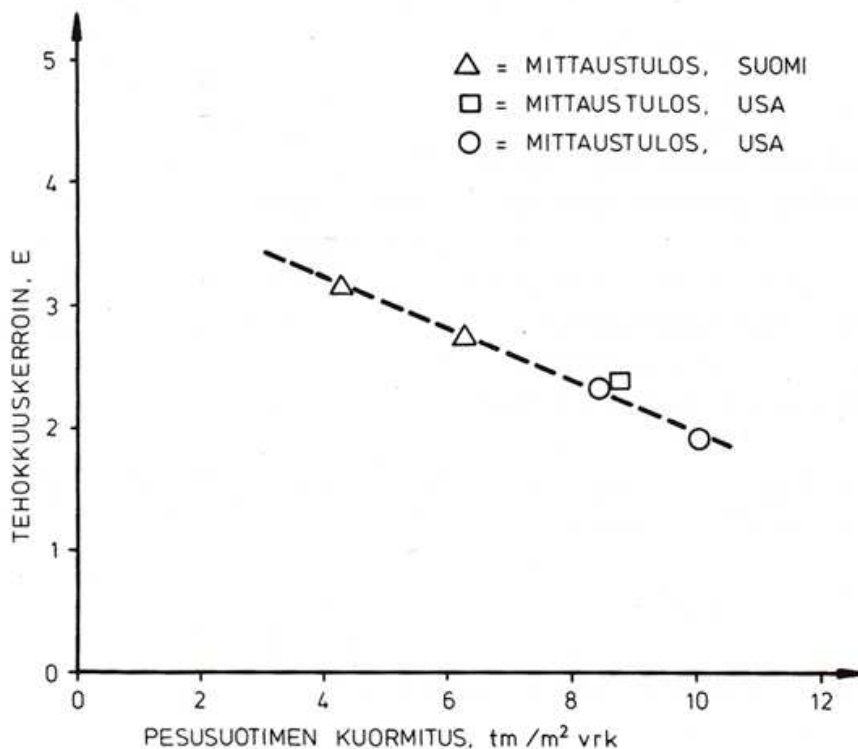
$$E_{10} = \frac{\ln \left[1 + \frac{DF(y_1 - y_2)}{L_1(x_1 - y_2)} \right]}{\ln \left[1 + \frac{DF}{9} \right]}$$

KAAVA 4

Kaavan 4 nimittäjän sulkulausekkeessa oleva lukuarvo 9 saadaan seuraavasti:

$$L = \frac{100 - 10}{10} = 9$$

E-arvo ei ole täysin riippumaton pesun ajo-olosuhteista. Suodinpesurin E-arvoon vaikuttavat pesurin kuormitus ja laimennuskerroin. Tehokkuuskerroin voi vaihdella huomattavasti myös pestävän massalajin ja -määrän sekä varsinkin laitteen kunnon ja ajotavan mukaan. (7, s. 695.)



KUVA 4. Kuormituksen vaikutus pesusuotimen tehokkuuteen (7, s.694)

Kuvassa 4 on esitetty eräitä mittaustuloksia kuormituksen vaikutuksesta pesusuotimen E-arvoon. Suotimen kuormitus ilmaistaan tonneina massaa suotimen pinta-alan m^2 kohti vuorokaudessa. Kuten kuvasta ilmenee, pesutehokkuus laskee kuormituksen kasvaessa. (7, s. 694) Työssä tutkituilla suotimilla kuormitus korkealla tuotannolla on noin $7,3 \text{ tm} / \text{m}^2 \text{ vrk}$ (8).

4.3 Pesuhäviö ja sen määrittäminen

Pesutulosta kuvataan yleisesti pesuhäviöllä, joka ilmaistaan pestyn massan sisältämien ainesosien määrällä. Sulfaattikeiton ja muiden natriumpohjaisten keittomenetelmien yhteydessä pesuhäviö voidaan määrittää mittaamalla pestyn massan sisältämä natriumpitoisuus. Natriumin määrä ei kuitenkaan kerro massan sisältämän orgaanisen aineksen määrää, joka vaikuttaa valkaisukemikaalien kulutukseen. Tästä syystä on ryhdytty käyttämään pesuhäviön mittana myös COD:tä eli kemiallista hapen kulutusta. (4, s. 58.)

Natrium- ja COD-pesuhäviöiden suhde on yleensä samassa tehtaassa melko vakio, joten toinen pesuhäviö tiedetään melko tarkkaan kun toinen on mitattu.

Prosessin ajotapa, esimerkiksi keittokemikaaliannoksen muutos, voi kuitenkin vaikuttaa pesuhäviöiden suhteeseen. (1.)

4.3.1 Na-pesuhäviö

Na-pesuhäviöllä tarkoitetaan massan mukana pesemöltä valkaisuun menevien natrium-ionien määrää ja se on tavallisesti ilmoitettu yksikössä $\text{kgNa}_2\text{SO}_4/\text{Bdt}$. Natrium poistuu kemikaalikierrosta ja se joudutaan korvaamaan. Na-pesuhäviöllä voidaankin siis kuvata kemikaalien käyttötaloutta. Nykyisin se on kuitenkin menettänyt merkitystään, kun pääpaino on siirtynyt ympäristöllisiin näkökohtiin, mihin tarkoitukseen COD-pesuhäviö soveltuu paremmin. (4, s. 58–59.)

Natriumin käyttöä pesuhäviön mittana vaikeuttaa sen kyky adsorboitua sellulosaan ja muidenkin massassa mukana olevien suurien molekyylien pintaan. Pesuhäviöanalyysiä tehtäessä massanäytettä pestäänkin hapotetulla vedellä, jotta adsorboitunut natrium saataisiin irtoamaan kuiduista. Massasta erotetusta nesteestä mitataan natriumpitoisuus liekkifotometrillä ja muutetaan se laskennallisesti vastaavaksi määräksi natriumsulfaattia (Na_2SO_4). (1.)

4.3.2 COD-pesuhäviö

COD eli kemiallinen hapenkulutus kuvaa valkaisukemikaaleja kuluttavien ja ympäristöä kuormittavien yhdisteiden määrää. Hapenkulutuksella tarkoitetaan sitä happimäärää, joka kuluu hapettaessa näytteessä olevat orgaaniset yhdisteet epäorgaanisiksi (7, s. 59). COD-analyysi tehdäänkin lisäämällä massanäytteesä erotettuun suodokseen jotain hapettavaa kemikaalia ja mittaamalla sen kulutus (1).

COD-pesuhäviön käyttö pesutehokkuuden mittana on voimakkaasti yleistynyt, mutta sitä kohtaan on esitetty myös kritiikkiä. On esitetty, että sitä ei tulisi käyttää laitteistojen välisiin pesutehokkuuksien vertailuun, koska orgaanisen aineksen määrä vaihtelee sellukohtaisesti. Kemiallinen hapenkulutus ei myöskään kerro epäorgaanisen aineksen määrää. (7, s. 60.)

COD:n määrittämisessä tulee ottaa huomioon, että se on hyvin riippuvainen näytteenoton ja analyysin välisestä ajasta uuttumisilmiöstä johtuen. Uuttuminen nostaa näytteen kemiallista hapenkulutusta ja vaikuttaa siten tuloksiin. COD:n määrittämisessä on myös ongelmana sen heikko toistettavuus ja määrittäminen on työläämpi tehdä kuin Na-pesuhäviölle. COD-pesuhäviö ilmoitetaan tavallisesti yksikössä kgCOD/Bdt. (7, s. 61.)

5 PESUTEHOKKUUDEN SEURANTA

Työn yhtenä tavoitteena oli selvittää suotimien nykyinen pesutehokkuus, jotta tiedetään, kannattaako ne korvata toisentyyppisellä pesurilla paremman pesutuloksen saamiseksi. Suotimilta otettiin massa- ja lipeänäytteitä, joiden perusteella määritettiin pesutehokkuuskerroin ja natriumpesuhäviö. Näytteenottopaikat on esitetty liitteessä 2.

5.1 Näytteenotto

Näytteiden kerääminen pesureilta ei ole tehtaalla jokapäiväistä rutiinia. Pesusuotimilta otetaan todella harvoin näytteitä, joten mitään selkeää ohjetta näytteiden ottamiseen ei ollut. Suotimilta kerättiin pesuhäviön ja E-arvon laskemista varten näytteet syöttömassata, poistomassasta, pesunesteestä ja suodoksesta.

Syöttömassanäyte otettiin suotimen perälaatikosta. Näyte otettiin kauhomalla perälaatikosta massaa 1 litran näytepurkkiin.

Poistomassanäyte otettiin rummulta kaavarille tulevasta massaradasta näytteenottolapiolla. Ensimmäisillä näytekierroksilla otettiin vain yksi pistonäyte massaradasta, mutta todettiin, että niin ei saada tarpeeksi luotettavaa näytettä. Jatkossa näytteitä kerättiin yksi lapiollinen jokaisesta neljästä suotimen huuvas-
sa olevasta luukusta ämpäriin, jossa näytteet sekoitettiin. Sekoitetusta massasta otettiin sitten näyte 1 litran näytepurkkiin. Näin saatiin eliminointua massaradassa mahdollisesti olevat erot massan sakeudessa ja pitoisuuksissa. Kuvassa 5 näkyy repijäruuvien yläpuolella oleva kulkutaso ja huuvas-
sa olevat luukut, joiden kautta otettiin näytteet pestystä eli poistomassasta.



KUVA 5. Pestyn massan näytteenottopaikat

Massanäytteitä otettaessa piti ottaa huomioon, että osa pesuvesisuihkuista on tukossa. Massaradalle ei tule tasaisesti pesuvettä, eikä se ole siten tasalaatuista joka kohdasta. Näytteet pyrittiin ottamaan viiralta sellaisista kohdista, missä pesunestesuihkut olivat kunnossa.

Pesunestenäytettä ei ollut tarpeen ottaa molemmille pesureille erikseen, koska sama pesuneste jaetaan molemmille pesureille. Näyte saatiin suotimen pesunestesuihkuille menevästä putkesta, johon oli näytteenottamista varten asennettu hana. Pesunestettä otettiin pieneen pulloon.

Suodosnäytettä ei saada molemmilta suotimilta erikseen, koska suodokset menevät yhteiseen suodossäiliöön. Näyte joudutaan ottamaan suodossäiliöstä lähtevästä putkesta. Tämä on ongelma pesutehokkuuden määrittämisen kannalta, koska säiliön jälkeen otettu suodosnäyte ei edusta sitä tilannetta, joka on suotimilla näytteenottohetkellä. Suodos viipyy suodossäiliössä useamman tunnin ja se myös sekoittuu säiliössä. Tästä syystä pesusuotimia tulisi ajaa mahdollisimman pitkään mahdollisimman tasaisesti ennen näytteenottoa. Varsinkin pesuveden määrän tulisi pysyä vakiona.

5.2 Pesutehokkuuden laskenta

Tehtaan laboratorio määrittä näyttöistä natriumpitoisuuden ja lisäksi massanäytteistä sakeuden. Laboratoriotulokset on esitetty liitteessä 3. Saatujen tulosten perusteella laskettiin natriumpesuhäviö ja E-arvo.

E-arvon laskemiseen tarvitaan Na-pitoisuuksien lisäksi pesunestevirtaus ja massan mukana kulkevan nesteen virtaus. Suotimille menevä pesunestevirtaus tiedetään, mutta massan mukana kulkeva nestemäärä pitää selvittää laskemalla. Laskemiseen käytettiin happivaiheen syöttövirtaus- ja sakeusmittauksia. Nämä tiedot saatiin ABB-info-historiatietokannasta.

E-arvon laskemiseen käytettiin kaavaa 3, joka jättää syöttömassan tiedot pois. Kaavalla 2 eli E-arvon peruskaavalla ei saatu kunnollisia tuloksia, koska usein syöttömassan Na-pitoisuus ei ollut järkevä. Muidenkin näyttöiden pitoisuudet olivat välillä poikkeavia. Esimerkiksi pesunesteen Na-pitoisuus oli muutamassa näyte-erässä suurempi kuin pestyssä massassa. Lisäksi laskettiin E_{10} -arvot kaavaa 4 käyttämällä. Liitteessä 5 on esitetty laimennuskertoimen ja E-arvon laskeminen.

5.3 Näytteenotto WinGEMS-simulointia varten

Työn yhteydessä kerättiin kuitulinjalta kaksi näytekierrosta WinGEMS-simulointia varten. Näytteenottopäivät olivat 16.4. ja 2.5., jolloin keittotuotannot olivat 1100 t/d ja 1000 t/d. Liitteessä 2 on esitetty näytteenottopaikat. WinGEMS-simulointiin palataan tarkemmin luvussa 6.

6 KOEAJOT JA TULOKSET

Tehtaalla on ollut jo pitkään tiedossa, että pesusuotimien pesuteho on varsin heikko. Suotimet on alun perin suunniteltu nykyistä pienemmälle tuotannolle ja niiden kapasiteetin yläraja alkaa tulla vastaan. Käyttöhenkilöstön mukaan suotimilla on aiemmin keskitytty vain löytämään ajomalleja, joilla saadaan niistä läpi riittävästi massaa, jotta ne eivät olisi pesulinjastossa pullonkaulana.

Tavoitteena oli löytää ajoparametreja, joilla saataisiin suotimien pesutehokkuutta paremmaksi. Hyvän pesutuloksen lisäksi massa on tärkeää saada saostettua riittävän korkeaan sakeuteen, jotta sakeus saadaan laimentamalla säädettyä sopivaksi ennen happivaihetta.

Parempien ajomallien löytämiseksi pesusuotimilla tehtiin koeajoja, joissa testattiin kuuman ja lämpimän pesunesteen suhteen, etulaimennusten ja altaan pinnankorkeuden vaikutuksia pesutehokkuuteen.

Koeajot pyrittiin tekemään mahdollisimman korkean keittotuotannon aikana, koska tavoitteena oli saada pesutulosta paremmaksi silloin, kun suotimia kuorimitetaan eniten.

6.1 Kuuman ja lämpimän pesunesteen suhde

Kuten edellä on kerrottu, suotimille syötetään erikseen kuumaa ja lämmintä pesunestettä. Lämmin pesuneste ohjataan alasuihkuille ja kuuma yläsuihkuille. Pitkään lämpimän pesunesteen osuus kokonaispesunestemäärästä on pidetty noin 55 %:ssa. Ennen koeajon alkua se oli 54 %.

Koeajo tehtiin 17.4. aamuvuoron aikana, jolloin keittotuotanto oli 1100 t/d. Pesunestemäärää olisi voitu ajaa käsiajolla, jotta se olisi pysynyt varmasti vakiona. Ylätason säädin kuitenkin toimi sillä hetkellä hyvin ja tasaisesti, joten sen annettiin ohjata pesureille menevää kokonaispesunestemäärää. Kokonaispesunestevirtaus pesureille oli koeajon aikana noin 108 l/s.

6.1.1 Testi 1

Koeajo aloitettiin muuttamalla lämpimän pesunesteen osuuden asetusarvo 54 %:sta 40 %:iin. Muutoksen vaikutuksia voitiin seurata happivaiheen syöttösakeuden perusteella. Pesureilta lähtevän massan sakeus pieneni niin paljon, että happivaiheen sakeus ei ollut enää säädettävissä. Molempien pesurien rumpujen kierrosnopeudet nousivat hieman.

Tilanteen annettiin tasaantua noin 2 tuntia. Rumpujen kierrosnopeudet palasivat lähes samalle tasolle missä ne olivat ennen muutosta. Suotimilta lähtevän massan sakeus nousi hieman, mutta jäi kuitenkin alle sen mitä se oli ennen muutosta ja oli edelleen liian alhainen happivaiheen sakeussäädölle.

Alhaisempi sakeus voidaan selittää sillä, että yläsuihkuille ajettiin nyt enemmän pesuvettä. Yläsuihkut ovat lähempänä kaavaria, joten massa jää enemmän nestettä, koska se ei ehdi suotautua rummun sisälle ennen kuin massa poistuu viiralta.

6.1.2 Testi 2

Koeajoa jatkettiin muuttamalla pesunesteiden suhde toisinpäin. Lämpimän pesunesteen osuus nostettiin 40 %:sta 60 %:iin. Jälleen happivaiheen syöttösakeutta seuraamalla voitiin päätellä, että suotimilta lähtevän massan sakeus nousi selvästi muutoksen jälkeen. Happivaiheen sakeussäätö pääsi takaisin säätöalueelle. Voidaan siis melko varmasti todeta, että yläsuihkulle ajettava pesunestemäärä vaikuttaa pesurilta lähtevän massan sakeuteen.

Ainakin poistosakeuden osalta suotimet toimivat tällä pesunestesuhteella paljon paremmin. Kun kuumaa pesunestettä ajetaan vähemmän, pienenee myös riski sille, että suodos kiehuu imujalassa. Lämpimän pesunesteen osuus on pidetty koeajosta lähtien 60 %:ssa.

6.1.3 Koeajon näytteiden tulokset

Suotimilta kerättiin yksi näytekierros molempien testien jälkeen. Ensimmäiset näytteet otettiin klo 8.30 ja toiset klo 11.00. Näytteiden perusteella saadut tulokset kahdella eri pesunestesuhteella on koottu taulukoihin 1, 2 ja 3.

TAULUKKO 1. Massojen sakeuksien muutokset lämpimän ja kuuman pesunesteen suhteen muuttuessa

	Testi 1 (pesunestesuhde 40 %)	Testi 2 (pesunestesuhde 60 %)
Pesusuodin 1		
Syöttömassan sakeus [%]	2,0	2,5
Poistomassan sakeus [%]	13,5	14,3
Pesusuodin 2		
Syöttömassan sakeus [%]	2,2	2,5
Poistomassan Sakeus [%]	13,4	14,3

Taulukosta 1 nähdään, että poistomassan sakeus parani molemmilla suotimilla noin prosenttia, kun lämpimän pesunesteen suhde nostettiin 40 %:sta 60 %:iin. Myös syöttömassan sakeus on jostain syystä noussut noin puoli prosenttia koeajon aikana, ja sillä on voinut olla hieman vaikutusta poistomassan sakeuteen.

TAULUKKO 2. Pesuhäviöt eri pesunestesuhdeilla

Pesuhäviöt [kg Na₂SO₄/ADt]		
	Testi 1 (pesunestesuhde 40 %)	Testi 2 (pesunestesuhde 60 %)
Pesusuodin 1		
Syöttömassa	1532	1111
Poistomassa	215	200
Pesusuodin 2		
Syöttömassa	1366	1190
Poistomassa	200	188

Taulukko 3. E-arvot eri pesunestesuhdeilla

	Testi 1 (pesunestesuhde 40 %)	Testi 2 (pesunestesuhde 60 %)	Muutos
Suotimen 1 E-arvo	1,3	1,8	0,5
Suotimen 2 E-arvo	-	2,4	-

Taulukoissa 2 ja 3 on esitetty saman koeajon yhteydessä määritetyt pesuhäviöt ja E-arvot. Niiden perusteella myös pesutulokset parani hieman toisen testin aika-

na verrattuna ensimmäiseen. Syöttömassan pesuhäviöt ovat todella suuria molemmilla pesureilla ja erot näytekierrosten välillä ovat myös aika suuret. Tärkeämpää on tarkastella poistomassojen pesuhäviöissä tapahtuneita muutoksia. Suotimella 1 pesuhäviö oli toisen testin aikana 7 % pienempi ja suotimella 2 noin 6 % pienempi.

Suotimella 1 E-arvo on hieman parempi toisen testin jälkeen. Ero tosin johtui lähes pelkästään suodosnäytteiden pitoisuuksien eroista. Koska suodosnäytettä ei saada suoraan pesureilta, sen pitoisuuden muutokset eivät johdu koeajon aikana tehdyistä muutoksista. Jos E-arvot laskemiseen käytetään suodosnäytteiden pitoisuuksien keskiarvoa, saadaan suotimen 1 E-arvoiksi 1,5 ja 1,6. Eli käytännössä ei ole mitään eroa pesutehokkuudessa testien välillä E-arvojen perusteella.

E-arvoa ei valitettavasti suodin 2:lle saatu ensimmäisen testin näytteiden tuloksista määritettyä, koska poistomassanäytteen Na-pitoisuus oli pienempi kuin pesunesteen Na-pitoisuus.

6.2 Etulaimennukset

Kuten edellä on mainittu, pesureille tulevaa massaa laimennetaan laimennuslipeällä ennen kuin se pumpataan perälaatikkoon. Syötettävän laimennuslipeän määrää ei tarkkaan tiedetä, koska sitä ei mitata mitenkään. Laimennuslipeän määrää ohjataan muuttamalla venttiilin asentoa. Voidaan olettaa, että venttiilin asentoa muuttamalla alueella 20 % – 80 % virtaus muuttuu melko lineaarisesti.

Koeajo aloitettiin 23.4. iltavuoron aikana ja sitä jatkettiin seuraavaan aamuun. Ennen koeajon aloitusta laimennuslipeän asetusarvo suotimella 1 oli 20 % ja 25 % suotimella 2. Suodin 2 on vähän paremmassa kunnossa ja sille syötetäänkin vähän enemmän massaa, joten laimennustakin on ajettava hieman enemmän.

Laimennuslipeän ohjaukset nostettiin arvoihin 35 % ja 40 %. Nämä olivat käyttökäytännön kokemusten perusteella jo aika lähellä sitä maksimia, millä pesurit vielä toimivat. Odotusten vastaisesti suotimien rumpujen kierrosnopeudet eivät kuitenkaan nousseet kuin hetkellisesti kun laimennusta lisättiin. Laimennuslipe-

än määrää olisi voinut vielä kokeilla nostaa ja katsoa, missä vaiheessa se alkaa kunnolla nostaa rumpujen kierrosnopeuksia.

Koeajon aikana tapahtui jonkin verran muutoksia. Keittotuotanto oli koeajon alkaessa 1050 t/d, mutta se oli nostettu koeajon aikana yövuoron alussa arvoon 1075 t/d. Kokonaispesunestemäärän ohjaus laitettiin koeajon ajaksi käsiajolle, jotta siinä tapahtuvat muutokset eivät sotkisi koeajoa. Koeajon alussa pesuvettä meni pesureille 110 l/s, mutta vielä iltavuoron aikana virtaus oli jouduttu pudottamaan 100 l:aan/s.

Pesureilta otettiin näytteet ennen koeajon aloitusta ja koeajon lopuksi. Tuotantovauhdin nostaminen ja pesunestevirtauksen muutos varmasti vaikuttavat pesutulokseen, joten laimennuksen lisäämisen vaikutusta on vaikea luotettavasti näytteiden perusteella nähdä.

Taulukosta 4 nähdään, että suotimella 2 syöttömassan sakeus odotetusti laski kun laimennusta lisättiin. Suotimella 1 syöttömassan sakeus puolestaan yllättäen nousi, mutta se voi johtua epäonnistuneesta näytteestäkin. Poistomassojen sakeuksien muutokset seuraavat syöttömassan sakeuden muutoksia, mutta muutokset ovat niin pieniä, että käytännössä sakeudet pysyivät samalla tasolla.

TAULUKKO 4. Massojen sakeudet koeajossa eri etulaimennuksilla

Pesusuodin 1	Etulaimennuksen asetusarvo 20 %	Etulaimennuksen asetusarvo 35 %
Syöttömassan sakeus [%]	2,6	3,0
Poistomassan sakeus [%]	13,8	14,1
Pesusuodin 2		
Syöttömassan sakeus [%]	2,8	2,2
Poistomassan sakeus [%]	14,1	13,9

Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty pesuhäviöt ja E-arvot ennen koeajon alkua ja sen lopussa. Taulukosta 5 nähdään, että molemmilla suotimilla pestyn massan pesuhäviöt hieman kasvoivat kun laimennusta lisättiin, mutta samalla toisella suotimella syöttömassan pesuhäviö kasvoi ja toisella pieneni. Taulukosta 6 näh-

dään, että suotimella 2 E-arvo parani selvästi kun taas suotimella 1 se pysyi samana.

TAULUKKO 5. Pesutehokkuus tulokset koeajossa eri etulaimennuksilla

Pesusuodin 1	Etulaimennuksen asetusarvo 20 %	Etulaimennuksen asetusarvo 35 %
Syöttömassa	1207	788
Poistomassa	164	186
Pesusuodin 2		
Syöttömassa	943	1261
Poistomassa	172	179

TAULUKKO 6. E-arvot koeajossa eri etulaimennuksilla

	Etulaimennuksen asetusarvo 20 %	Etulaimennuksen asetusarvo 35 %	Muutos
Suotimen 1 E-arvo	1,5	1,5	0
Suotimen 2 E-arvo	0,9	3,5	2,6

Näiden tulosten perusteella on kuitenkin hankala kunnolla nähdä syöttömassan laimennuksen vaikutusta pesutehokkuuteen, koska koko kuitulinjalla tapahtui muutoksia lähes vuorokauden mittaisen koeajon aikana. Esimerkiksi pesunesteiden Na-pitoisuus oli toisessa näyte-erässä huomattavasti suurempi verrattuna ensimmäiseen, mikä varmasti näkyy suurempana pesuhäviönä.

Tämän koeajon perusteella ei siis saatu luotettavasti selville miten syöttömassan laimentaminen vaikuttaa pesutulokseen. Suotimet kuitenkin näyttäisivät toimivan aiempaa isommalla laimennuksella lähes yhtä hyvin kuin pienemmälläkin.

Kuten teoriaosuudessa on todettu, pienellä syöttösakeudella on useita positiivisia vaikutuksia pesun kannalta. Ainoa rajoittava tekijä on pesureiden kapasiteetti. Teoriassa syöttömassaa kannattaa laimentaa niin paljon kuin vain mahdollista ilman, että rumpujen kierrosnopeudet liiaksi kasvavat.

6.3 Pinnankorkeuden vaikutus

Suotimen altaan pinnankorkeuden asetusarvolla voidaan vaikuttaa rummun kierrosnopeuteen ja massaradan muodostumiseen viiralle. Altaan pinnankorkeudelle on määritetty rajat, joiden välillä pintaa voidaan säätää asteikoilla 0 - 100 %. Käyttöhenkilöstön aikaisempien kokemusten perusteella pinnankorkeuden asetusarvoa ei kannata nostaa yli 60 prosentin, koska viira alkaa silloin mennä tukkoon. Asetusarvon laskeminen 50 prosenttiin taas nostaa rumpujen kierrosnopeutta ja massaradan muodostuminen ei kunnolla onnistu.

Koeajo tehtiin 7.—8.5. Ennen koeajon aloitusta keittotuotanto oli 1000 t/d ja pinnankorkeuden asetusarvo molemmilla suotimilla 57 %. Tässä tilanteessa otettiin ensimmäiset näytteet.

Koeajo aloitettiin klo 13.00 laittamalla pesunestevirtaus jälleen käsiajolle ja laskemalla pinnankorkeudet vähän kerrallaan 52 %:iin. Pinnankorkeuden muuttaminen odotetusti nosti rumpujen kierrosnopeuksia. Noin 6 tuntia pinnankorkeuden muuttamisen jälkeen rumpujen kierrosnopeudet kuitenkin laskivat selvästi. Mitään selkeää muutosta prosessissa ei tapahtunut, joten ainoaksi selitykseksi jää, että suotimet vain lähtivät vetämään massaa paremmin. Suotimet siis toimivat alemmallakin altaan pinnalla niin, että rumpujen kierrosnopeudet pysyvät hyvällä tasolla.

Seuraavana aamuna (8.5.) otettiin toinen näytekierros pesureilta. Koeajoa jatkettiin näytteenoton jälkeen nostamalla pinnan asetusarvo molemmilla pesureilla 60 %:iin. Rumpujen kierrosnopeudet laskivat heti huomattavasti. Kahden tunnin päästä otettiin jälleen näytteet.

Näytteiden tulosten perusteella ei voida varmasti sanoa miten altaan pinnankorkeus vaikuttaa pesutehokkuuteen. Taulukosta 7 nähdään, että sekä syöttömassan että poistomassan pesuhäviöt ovat kasvaneet vajaan vuorokauden kestäneen koeajon aikana. Poistomassan pesuhäviöitä ei siis voida verrata suoraan, mutta jos vertaa syöttö- ja poistomassojen suhdetta, niin huomataan, että pesu on onnistunut kummallakin suotimella hieman paremmin alemmalla pinnalla.

TAULUKKO 7. Pesuhäviöt eri pinnankorkeuden arvoilla

Pesuhäviöt [kgNa ₂ SO ₄ /Adt]					
		Pesusuodin 1		Pesusuodin 2	
pvm	Pinta	Syöttömassa	Poistomassa	Syöttömassa	Poistomassa
7.5	57 %	288	172	203	153
8.5	52 %	363	200	363	190
8.5	60 %	417	207	334	213

Taulukossa 8 on esitetty massojen sakeudet koeajossa eri pinnankorkeuden arvoilla. Pinnankorkeuden asetusarvolla 52 % on poistomassan sakeudet kummallakin pesurilla parhaimmat, mutta erot ovat aika pieniä.

TAULUKKO 8. Massojen sakeudet eri pinnankorkeuden arvoilla

	Pinnankorkeuden asetusarvo 57%	Pinnankorkeuden asetusarvo 52%	Pinnankorkeuden asetusarvo 60%
Pesusuodin 1			
Syöttömässän sakeus [%]	2,2	2,1	1,9
Poistomässän sakeus [%]	13,1	13,7	13,7
Pesusuodin 2			
Syöttömässän sakeus [%]	2,2	2,2	1,7
Poistomässän sakeus [%]	13,5	13,9	13,7

Kuten taulukosta 9 nähdään, pesutehokkuuden muutoksia tässä koeajossa on vaikea vertailla. E-arvon laskeminen ei onnistunut kunnolla kaikista näyte-eristä. Yhtenä syynä tähän oli pesunesteen suuri Na-pitoisuus verrattuna poistomassan pitoisuuteen.

TAULUKKO 9. E-arvot koeajossa eri pinnankorkeuden arvoilla

	Pinnankorkeuden asetusarvo 57%	Pinnankorkeuden asetusarvo 52%	Pinnankorkeuden asetusarvo 60%
Suotimen 1 E-arvo	1,8	0,21	1,68
Suotimen 2 E-arvo	-	0,086	3,05

6.4 Pesutehokkuus kevään aikana

Näytteitä kerättiin kevään aikana kaikkiaan 12 kappaletta, joista 6 koeajojen yhteydessä ja 2 WinGEMS-simulointia varten. Taulukossa 10 on esitetty sakeuden, pesuhäviöiden ja E-arvojen keskiarvot. Keskiarvot on laskettu kaikkien kerättyjen näytteiden tuloksista pois lukien selvästi virheelliset tulokset. Kaikki kerätyt tulokset on esitetty liitteissä 3 ja 4. Tuloksissa on suurta vaihtelua eri näyteerien välillä, joten niistä lasketut keskiarvot eivät kerro ihan koko totuutta. Keskiarvo kertoo kuitenkin millä tasolla pesutehokkuus suunnilleen on.

TAULUKKO 10. Pesusuotimien massojen sakeuden, pesuhäviöiden ja pesutehokkuuden keskiarvot

Pesusuodin 1				
	sakeus [%]	pesuhäviö [kgNa ₂ SO ₄ /Adt]	E-arvo	E ₁₀ -arvo
Syöttömassa	2,3	878,3	1,6	2,1
Poistomassa	13,8	192,7		
Pesusuodin 2				
	sakeus [%]	pesuhäviö [kgNa ₂ SO ₄ /Adt]	E-arvo	E ₁₀ -arvo
Syöttömassa	2,4	819,8	1,5	2,0
Poistomassa	14,0	185,0		

Taulukosta 10 nähdään, että pesutehokkuutta kuvaava E₁₀-arvo on molemmilla pesureilla noin 2. Tyypillisesti imurumpusuotimen E₁₀-arvo on 2,5-3,5 (2, s. 22). Tutkituilla suotimilla pesutehokkuus jää siis hieman heikommaksi kuin sen tulisi kyseisellä pesurityypillä olla. Tulos vahvistaa sen tehtaalla olleen käsityksen, että suotimien pesutehokkuudessa olisi parantamisen varaa.

Toukokuun lopussa sellutehtaalla oli iso seisakki, jonka aikana huollettiin mm. keitintä, jossa oli ollut ongelmia kevään aikana. Pesusuotimien viirat ja pesunesteputkien suuttimet puhdistettiin ja suotimen 1 imupää huollettiin. Seisakin jälkeen otettiin vielä kaksi näytekierrosta. Pesutulokset paranivat seisakin jälkeen selvästi. Taulukossa 2 on 7.6. otettujen näytteiden tulokset. Kummankin pesurin poistomassan sakeus ja pesuhäviö ovat erittäin hyvällä tasolla. E-arvot

ovat myös selvästi aiempaa paremmat, jos tuloksia vertaa taulukon 10 keskiarvoihin.

TAULUKKO 11. Seisakin jälkeen (7.6.) otettujen näytteiden tulokset

Pesusuodin 1				
	sakeus [%]	pesuhäviö [kgNa ₂ SO ₄ /Adt]	E-arvo	E ₁₀ -arvo
Syöttömassa	2,0	1024	2,6	3,9
Poistomassa	15,8	137		
Pesusuodin 2				
	sakeus [%]	pesuhäviö [kgNa ₂ SO ₄ /Adt]	E-arvo	E ₁₀ -arvo
Syöttömassa	2,1	1087	2,4	3,5
Poistomassa	15,3	143		

Parempi pesutulos voi osaltaan johtua myös muualla prosessissa tapahtuneista muutoksista ja luotettavia päätelmiä on vaikea tehdä yhden näytekierroksen perusteella. Näyttäisi kuitenkin siltä, että suotimien pesutehokkuutta pystyy parantamaan huoltamalla niitä.

6.5 WinGEMS-simulointi

WinGEMS on Metson kehittämä prosessisimulaattori, joka on tarkoitettu selluja ja paperiteollisuuden käyttöön helpottamaan suunnittelua ja ongelmien ratkaisua. WinGEMS-simuloinnilla saadaan nopeasti arvioitua prosessiin tehtävien muutosten vaikutusta lopputulokseen. (9.)

WinGEMS-simuloinnilla haluttiin vertailla eri vaihtoehtoja rumpusuotimien korvaamiseksi toisen tyyppisellä pesurilla. Itse en päässyt simulointiin tutustumaan vaan sen teki Stora Enson työntekijä, joka toimitti simuloinnin tulokset minulle sähköpostilla.

Simulointia varten kerättyjen näytteiden tuloksista käy ilmi, että rumpusuotimet ja pesupuristin toimivat hyvin, mutta kaikkien kolmen säteispesurin pesuteho on heikko. Raportissa kehoitetaan etsimään keinoja säteispesureiden pesutehon parantamiseksi. Tehtaalla on ollut vastakkainen käsitys, että säteispesurit toimivat hyvin ja rumpusuotimet huonosti.

Simuloinnissa löytyi kaksi päivitysmahdollisuutta, joilla pesuhäviöt happivaiheen jälkeen saataisiin nykyistä paremmiksi. Ensimmäisessä vaihtoehdossa rumpusuotimet säilytetään nykyisellään ja niiden perään ennen happivaihetta liitetään pesupuristin. Lisäksi happivaiheen säteispesurit kytketään rinnakkain. Tällä kokoonpanolla saataisiin happivaiheen jälkeiset pesuhäviöt arvoihin 10 kg COD/Adt ja 10 kg Na₂SO₄/Adt. Nykyisellä kokoonpanolla päästään (talvella) arvoihin 15 kg COD/Adt ja 15 kg Na₂SO₄/Adt.

Toinen vaihtoehto on korvata rumpusuotimet kaksivaiheisella DD-pesurilla, jonka E-arvo on 7. Säteispesurit ovat tässäkin mallissa kytkettynä rinnakkain. Tällä kokoonpanolla päästäisiin samaan 10 kg COD/Adt ja 10 kg Na₂SO₄/Adt pesuhäviöihin kuin edellä esitetyllä kokoonpanolla, laimennuskerrointa kasvattamalla jopa hieman parempiin arvoihin.

7 POHDINTA

Työn tavoitteena oli selvittää kahden imurumpusuotimen pesutehokkuus ja etsiä ajomalleja, joilla pesutehokkuus saataisiin paremmaksi. Tavoitteena oli saada laskettua pesutehokkuutta kuvaava E-arvo rumpusuotimille, mikä oli aiemmissa tutkimuksissa osoittautunut todella haasteelliseksi. Kaikilla näytekierroksilla pesutehokkuuden määrittäminen ei onnistunutkaan ja tuloksissa oli isoja heittoja eri syistä, mutta mielestäni saatiin myös luotettavia tuloksia.

Toisena haasteena oli koeajojen järjestäminen rumpusuotimilla parempien ajomallien löytämiseksi. Aluksi selvitettiin mitä ajoparametrejä suotimilla voidaan muuttaa ja miten ne teoriassa vaikuttavat sen toimintaan. Näiden tietojen pohjalta laadittiin koeajosuunnitelma.

Suunnitelmana oli muuttaa yhtä ajoparametriä johonkin suuntaan ja selvittää sen vaikutus pesutehokkuuteen. Tämä osoittautui haasteelliseksi, koska prosessissa tapahtui muutoksia koeajon aikana, joten tiettyyn ajoparametriin tehdyn muutoksen vaikutukset oli vaikea erottaa. Näytteitä olisi ollut hyvä kerätä enemmän, jotta niissä mahdollisesti olevat virheet olisi saatu eliminoitua. Sille oli kuitenkin esteenä tehtaan laboratorion kiireet muiden tutkimusten parissa.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin tietoa pesusuotimien pesutehokkuudesta. Tulosten perusteella voidaan lähteä arvioimaan kuinka paljon parannusta pesuun saataisiin jos suotimet korvattaisiin toisen tyyppisellä pesurilla. Kerätyn aineiston perusteella voidaan laskea kuinka paljon säästöä valkaisukemikaaleissa saataisiin tehokkaammalla pesurilla verrattuna nykyiseen tilanteeseen ja siten voidaan perustella mahdollista tarvetta uuden pesurin hankinnalle.

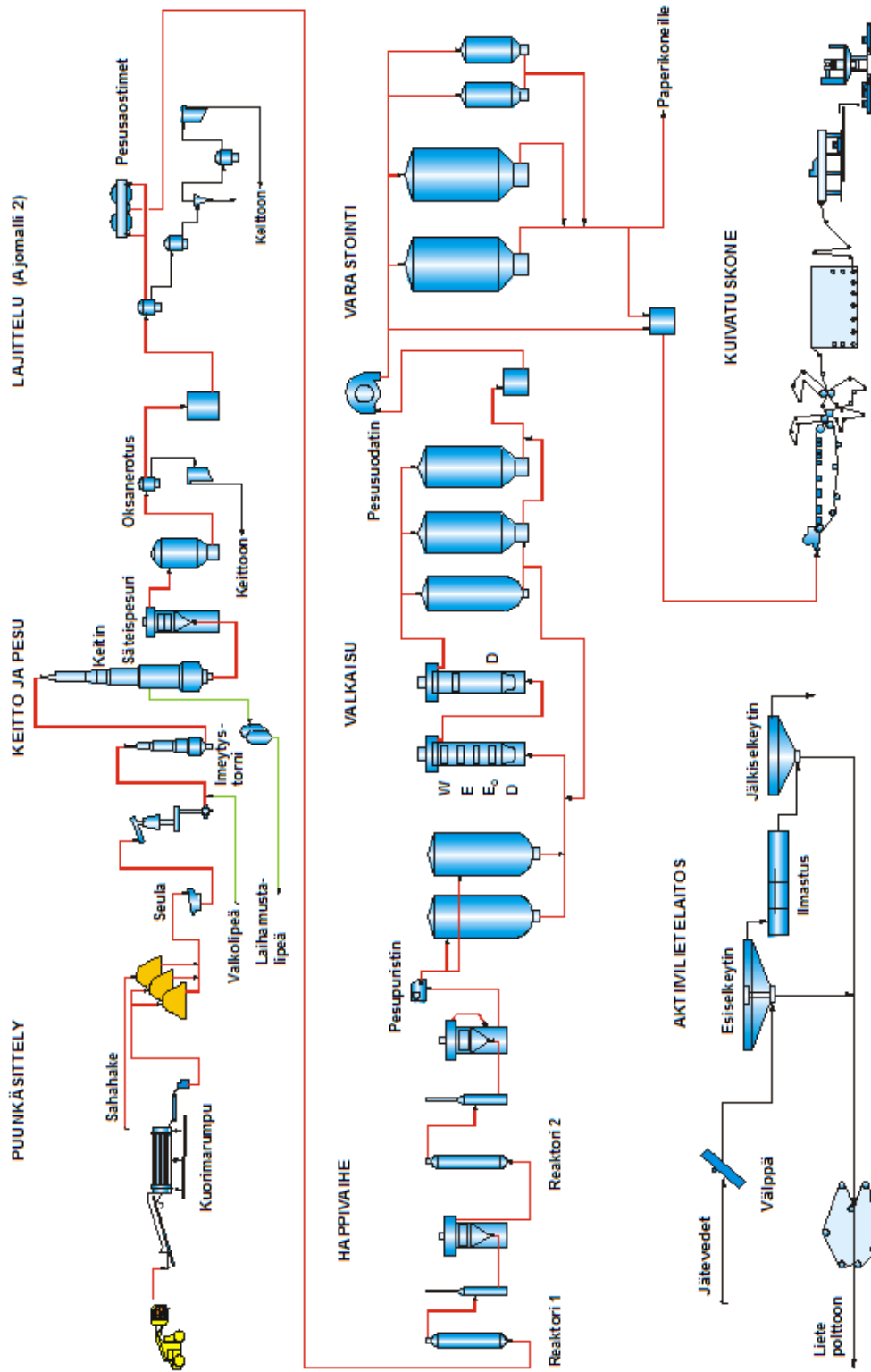
Tehtyjen koeajojen perusteella ei löytynyt merkittäviä parannuksia ajomalleihin ja niitä voi olla vaikea löytää vaikka koeajoja tehtäisiin lisää. Suotimien toimintaa voitaisiin kuitenkin varmasti parantaa lisäämällä niiden kunnossapitoa. Viiran ja pesunestesuihkujen tukkeutuminen heikentää pesua ja niitä olisi varmaankin mahdollista puhdistaa tuotantokatkosten aikana.

Opinnäytetyö oli laajuudeltaan mielestäni sopiva, koska aihe oli rajattu kahden pesurin tutkimiseen. Ennen työn aloittamista en tuntenut sellun valmistusprosessia kovin hyvin, mutta perehtyminen aiheeseen ei ollut vaikeaa, koska siihen liittyvää aineistoa ja aiempia tutkimustuloksia oli paljon käytettävissä. Työtä tehdessä sai hyvän kuvan siitä, millaista kehitystyötä varsinkin vanhojen prosessilaitteiden parissa täytyy tehdä, kun tavoitteena on kasvattaa tuotantoa ja pienentää kustannuksia.

LÄHTEET

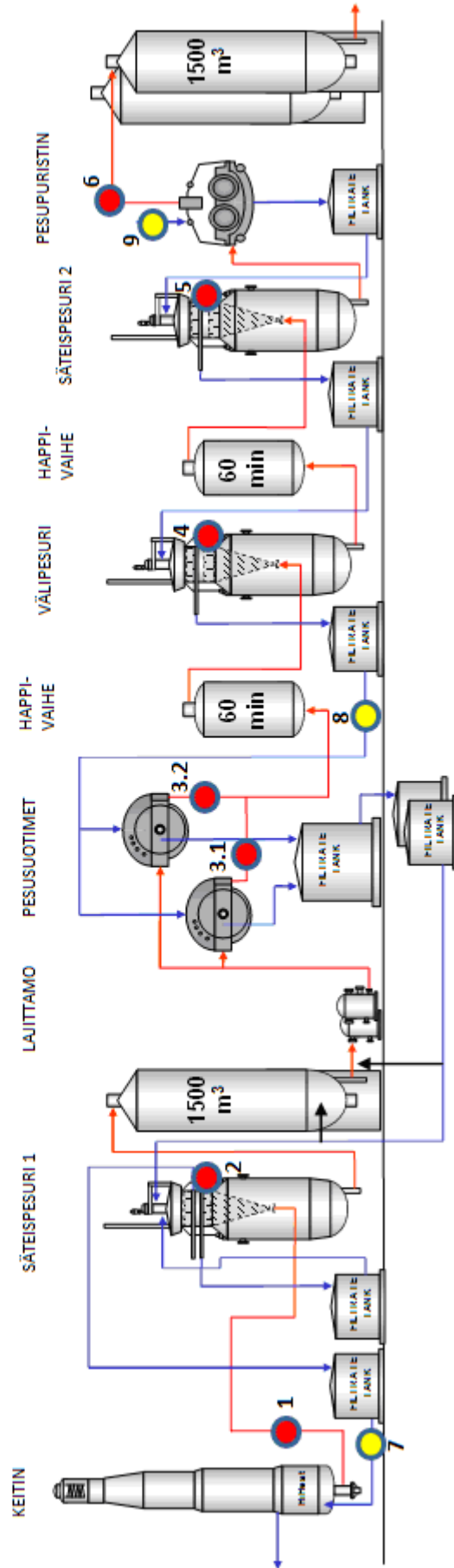
1. KnowPulp 10.0 2011. Sellutekniikan ja automaation oppimisympäristö.
2. Kovasin, Kari 2002. Puu-23.112 Sellun pesun ja kemikaalikierron laskenta. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan osasto, sellutekniikan laboratorio. Espoo.
3. Metsäteollisuuden työnantajaliitto 1984. Puusta paperiin M-404 Sellun pesu. Lappeenranta: Etelä-Saimaan Kustannus Oy.
4. Sillanpää, Mervi - Saari, Johanna - Dahl, Olli 1999. Report 236 Sellun pesun perusmekanismit. Department of process engineering, University of Oulu, Oulu, Finland. Oulu: Oulun yliopistopaino.
5. Sellutehtaan käyttöohjeet. 2012. Stora Enso Fine Paper, Oulun tehtaat.
6. Pesulinjan kokonaislaimennuskertoimen optimointi. Käyttöohje. 2005. Stora Enso Fine Paper, Oulun tehtaat.
7. Virkola, N-E (toim.) 1983. Suomen Paperi-insinöörien yhdistyksen oppi- ja käsikirja: Puumassan valmistus II, osa 1. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Oy Turun Sanomat/ Serioffset.
8. Metso Process Simulator. 2012. Saatavissa:
http://www.metso.com/automation/pp_prod.nsf/WebWID/WTB-050701-2256F-46EA1 Hakupäivä: 24.9.2012.

**Stora Enso Fine Paper
OULUN SELLUTEHDAS
Kuitulinja**





RUSKEAN MASSAN PESULINJA



Näytteenottoaikat

	Massanäytteet (punainen pallo kuvassa)
1	Puskumassa
2	Säteispesuri 1
3.1	Pesusuodin 1
3.2	Pesusuodin 2
4	Välipesuri
5	Säteispesuri 2
6	Pesupuristin
	Pesulipeänäytteet (keltainen pallo kuvassa)
7	Keittimelle menevä lipeä
8	Pesusaostimille menevä lipeä
9	Pesupuristimelle menevä lipeä

Natrium-pitoisuudet

pvm	Keitto- tuotanto [t/d]	Na-pitoisuudet [mg/L]					
		Pesusuodin 1		Pesusuodin 2		Yhteiset	
		Syöttömässä	Poistomassa	Syöttömässä	Poistomassa	Pesuneste	Suodos
4.4	850	14573	14396	11501	13912	12310	13861
17.4 A *	1100	12137	12027	13476	11082	11428	12271
17.4 B *	1100	11892	11967	12285	11749	11458	12638
23.4 *	1050	11330	9462	9474	10152	8783	9935
24.4 *	1075	10777	11017	12683	10406	10225	11653
7.5	1000	8393	9355	6489	8577	8880	9943
8.5 A *	1025	10983	11440	11669	10997	11738	11689
8.5 B *	1025	12159	11861	9844	12159	12327	11376
7.6 **	1050	10031	9202	10842	9308	8700	10871
11.6 **	1100	12366	10202	10278	9840	10207	12098

* = koeajo

** = seisakin jälkeen

Massojen sakeudet

pvm	Keittotuotanto [t/d]	Pesusuodin 1		Pesusuodin 2	
		Tulevan mas- san sakeus [%]	Lähtevän mas- san sakeus [%]	Tulevan mas- san sakeus [%]	Lähtevän mas- san sakeus [%]
4.4	850	2,2	11,9	2,4	13,1
16.4 (W)	1100	-	12,5	-	12,6
17.4 A *	1100	2,0	13,5	2,2	13,4
17.4 B *	1100	2,5	14,3	2,6	14,6
23.4 *	1050	2,6	13,8	2,8	14,1
24.4 *	1075	3,0	14,1	2,2	13,9
2.5 (W)	1000	-	13,4	-	13,4
7.5	1000	2,1	13,1	2,2	13,5
8.5 A *	1025	2,2	13,7	2,2	13,9
8.5 B *	1025	1,9	13,7	1,7	13,7
7.6 **	1050	2,0	15,8	2,1	15,3
11.6 **	1100	2,1	14,5	3,2	15,0

* = koeajo

** = seisakin jälkeen

W = näyte Wingems-simulointiin

E-arvot

pvm	Keittotuotanto [t/d]	Pesusuodin 1		Pesusuodin 2	
		E	E ₁₀	E	E ₁₀
4.4	850	0,78	0,92	0,97	1,25
17.4 A *	1100	1,29	1,68	-	-
17.4 B *	1100	1,77	2,42	2,40	3,34
23.4 *	1050	1,45	1,93	0,88	1,18
24.4 *	1075	1,54	2,10	3,55	4,80
7.5	1000	1,80	2,31	-	-
8.5 A *	1025	0,21	0,27	0,09	0,12
8.5 B *	1025	1,68	2,24	3,05	4,07
7.6 **	1050	2,59	3,94	2,38	3,53
11.6 **	1100	-	-	-	-

* = koeajo

** = seisakin jälkeen

Pesuhäviöt

pvm	Keittotuotanto [t/d]	Pesuhäviöt [kgNa ₂ SO ₄ /Adt]			
		Pesusuodin 1		Pesusuodin 2	
		Tuleva massa	Lähtevä massa	Tuleva massa	Lähtevä massa
4.4	850	740	297	501	256
16.4 (W)	1100	-	194	-	195
17.4 A *	1100	1531	215	1366	200
17.4 B *	1100	1111	200	1190	188
23.4 *	1050	1207	164	943	172
24.4 *	1075	788	186	1261	179
2.5 (W)	1000	-	172	-	176
7.5	1000	288	172	203	153
8.5 A *	1025	363	200	363	190
8.5 B *	1025	417	207	334	213
7.6 **	1050	1024	137	1087	143
11.6 **	1100	1314	168	950	155

* = koeajo

** = seisakin jälkeen

W = näyte Wingems-simulointiin

Esimerkki laimennuskertoimen ja E-arvon laskemiseksi 4.4. kerättyjen näytteiden perusteella suotimelle 1:**Laimennuskerroin**

ABB-Info -tietokannasta saadaan seuraavat tiedot:

- Ensiölajittimien syöttösakeus 1,6 %
- Ensiölajittimien syöttövirtaus 540,6 L/s \approx 540,6 kg/s
- Pesunestevirtaus pesusuotimille 80,6 L/s

Pesusuotimille tuleva (kuivan) massan määrä:

$$540,6\text{L/s} \cdot 0,016 = 8,9\text{L/s}$$

Massa jaetaan tasan suotimille, joten yhdelle suotimelle massaa virtaa 4,45 L/s.

Suotimen 1 poistomassan sakeus on 11,9 % (laboratoriosta).

Poistomassan sisältämä nesteen määrä:

$$\frac{4,45\text{L/s}}{0,0119} - 4,45\text{L/s} = 33,0\text{L/s}$$

Suotimen 1 laimennuskerroin:

$$DF = \frac{40,3\text{L/s} - 33,0\text{L/s}}{4,45\text{kg/s}} = 1,65\text{m}^3/\text{bdt}$$

E-arvo

Laboratorion määrittämät Na-pitoisuudet:

- poistomassa = 14396 mg/L
- pesuneste = 12310 mg/L
- suodos = 13861 mg/L

Lasketaan pestyn massan mukana olevan nesteen määrä L_1 :

$$L_1 = \frac{100\% - 11,9\%}{11,9\%} = 6,67 \text{ m}^3/\text{bdt}$$

$$DF = 1,65 \text{ m}^3/\text{bdt}$$

Lasketaan E-arvo kaavalla 3:

$$E = \frac{\ln \left[1 + \frac{DF(y_1 - y_2)}{L_1(x_1 - y_2)} \right]}{\ln \left[1 + \frac{DF}{L_1} \right]}$$

$$E = \frac{\ln \left[1 + \frac{1,65 \text{ m}^3/\text{bdt}(13861 \text{ mg/L} - 12310 \text{ mg/L})}{6,67 \text{ m}^3/\text{bdt} \cdot (14396 \text{ mg/L} - 12310 \text{ mg/L})} \right]}{\ln \left[1 + \frac{1,65 \text{ m}^3/\text{bdt}}{6,67 \text{ m}^3/\text{bdt}} \right]} = 0,76$$