

Saimaan ammattikorkeakoulu
Paperiteknikka Imatra
Prosessi- ja paperiteollisuuden suunnittelu

Toni Karhu

**KEMIKAALISEKOITTIMIEN ENERGIAN
KULUTUKSEN KARTOITUS
SELLUTEHTAAN
HAVUVALKAISULINJALLA**

Opinnäytetyö 2010

TIIVISTELMÄ

Toni Karhu
Kemikaalisekoittimien energian kulutuksen kartoitus
sellutehtaan havuvalkaisulinjalla, 79 sivua, 30 liitettä
Saimaan ammattikorkeakoulu Imatra
Paperi- ja prosessiteknikka
Prosessi- ja paperiteollisuuden suunnittelu
Ohjaajat: lehtori Jarkko Männynsalo, Saimaan
ammattikorkeakoulu
DI Kari Peltonen, Andritz Oy Kotka
DI Markku Kauppinen, UPM-Kymmene Kaukas
DI Timo Perttula, Andritz Oy Kotka

Opinnäytetyö tehtiin Andritzin kemikaali- ja massayksikölle Kotkaan. Tutkimus suoritettiin yhteistyössä UPM-kymmene Oy:n Kaukaan sellutehtaan kanssa Lappeenrannassa. Kaukas valmistaa havu- ja koivusellua Super Batch -eräkeittämöllä. Tuotantokapasiteetti on noin 720 000 tonnia sellua vuodessa.

Työn tarkoituksena oli tutkia, voidaanko Kaukaan sellutehtaan havuvalkaisun kemikaalisekoittimien energian kulutusta alentaa muuttamalla kemikaalisekoittimien kierrosnopeutta. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka kierrosnopeusmuutokset vaikuttavat havuvalkaisun prosessimuuttujiin. Työ suoritettiin seurantatutkimuksena, jossa prosessitietoja kerättiin koeajosuunnitelmaan sekä tehtaan tietokantaa käytettiin hyödyksi. Tutkittiin EOP -vaiheen ja D2-vaiheen kemikaalisekoittimien kierrosnopeusmuutoksien vaikutusta tehon kulutukseen, kemikaalien kulutukseen sekä massan ominaisuuksiin.

Asiasanat: kemikaalisekoitin, energian kulutus, prosessimuuttuja

ABSTRACT

Author: Toni Karhu

Title: The Energy Consumption Analysis of Chemical Mixers at Softwood Bleaching Line of a Pulp Mill

School: Saimaa University of Applied Sciences, Imatra
Process Engineering

Supervisor: Mr Jarkko Männynsalu, MSc, Senior Lecturer, Saimaa UAS

Instructor: Mr Kari Peltonen, MSc, Mr Timo Perttula, MSc, Andritz Ag and Mr Markku Kauppinen, MSc, UPM Kymmene Kaukas

The purpose of this final year project was to study how the rotation speed of chemical mixers affects bleaching process at UPM-Kymmene Kaukas pulp mill. The project was commissioned by pulp and chemical division of Andritz Ag in Kotka and the study was effectuated together with UPM-Kymmene Kaukas pulp mill in Lappeenranta. The Kaukas manufactures softwood and hardwood pulp using Super Batch cooking. Production capacity is about 720,000 tonnes per year.

The purpose of the project was to investigate if the energy consumption of chemical mixers can be reduced by changing the rotation speed of the mixers. Another purpose was to study how the rotation speed changes will affect the process variables at softwood bleaching. The project was carried out as a follow-up study in which the process data were collected to a process test plan and the database of mill was utilized. In the EOP-stage and a D2-stage was studied how the rotation speed changes of the chemical mixers affect power consumption, chemical consumption and the quality properties of pulp.

Keywords: Chemical Mixer, Process Variable, Energy Consumption

1 JOHDANTO.....	5
2 MASSAN VALKAISEMINEN.....	6
2.1 Massan valkaisu.....	6
2.2 VALKAISUSEKVENSSIT.....	10
2.3 Kaukaan sellutehtaan valkaisuusekvenssit.....	12
2.3.1 EOP –vaihe	12
2.3.2 D1vaihe.....	12
2.3.3 PO–vaihe.....	12
2.3.4 D2-vaihe.....	13
2.4 Valkaisun sekoituskemikaalit Kaukaan sellutehtaalla.....	13
2.4.1 Happi.....	13
2.4.2 Klooridioksidi.....	14
2.4.3 Natriumhydroksidi (NaOH).....	14
2.4.4 Hapetettu valkolipeä.....	15
2.4.5 Vetyperoksidi.....	15
2.4.6 Magnesiumsulfaatti.....	15
2.4.7 Natriumbisulfiitti.....	15
2.5 Valkaisulaitteistot ja energian kulutus.....	16
2.5.1 Valkaisun tuotantomäärän vaikutus valkaisulaitteiden valintaan.....	16
2.5.2 MC-pumppu valkaisulinjalla.....	17
2.5.3 Kaukaan sellutehtaan sekvenssin EOP-D1-PO-D2 laitteet.....	20
2.5.4 Sekoittimien energian kulutus.....	23
3 KEMIKAALISEKOITTIMET.....	24
3.1 Sekoittimien toimintaperiaate	25
3.2 Sekoitintyytit	25
3.2.1 Ahlmix(Ahlström).....	26
3.2.2 Kvaerner MC-kemikaalisekoitin (GL&V).....	28
3.2.3 SM - kemikaalisekoitin (Metso).....	28
4 VALKAISUN KEMIKAALISEKOITUS.....	29
4.1 Kemikaalisekoituksen tavoite	29
4.2 Massan homogenisointi kemikaalisekoituksessa	29
4.3 Kuitukäyttäytyminen kemikaalisekoituksessa.....	30
4.4 Sekoitukseen vaikuttavia tekijöitä.....	31
4.5 Kemikaalin kulkeutuminen valkaisu prosessissa.....	32
4.6 Kemikaalisekoituksen vaikutus valkaisu tulokseen	32
LÄHTEET.....	34

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehdään Andritz Oy:n KK-divisionalle Kotkaan. Andritz Oy on itävaltalaisen Andritz Ag:n tytäryhtiö, joka myy ja valmistaa selluteollisuuden prosesseja, ja laitteita ja se on yksi suurimmista massa- ja paperiteollisuuden laitevalmistajista maailmassa.

Työ tehdään asiakasyhteistyönä UPM-kymmene Oyj:n Kaukaan sellutehtaan kanssa Lappeenrannassa. Työn suoritus- ja tutkimuspaikkana on Kaukaan sulfaattisellutehdas Lappeenrannassa. Kaukaan sellutehdas valmistaa valkaistua havupuu- ja koivupuusellua Super Batch -eräkeittämöllä. Havuvalkaisulinja on neljävaiheinen happivalkaus. Happidelignifointi on ennen valkaisua.

Maailman talous elää laskusuhdanne aikaa, joten yritykset tarvitsevat säästöjä ja supistuksia entistä enemmän. Tässä insinööriyössä tutkitaan ja etsitään keinoja säästämiseksi, koska pienistä säästöistä eri osa-alueilla saadaan yhdessä aikaan isoja säästöjä. Työssä tutkitaan laitekohtaista energian säästämismahdollisuutta massan valkaisulinjalla.

Työn tavoitteena on vähentää massan valkaisun kemikaalisekoittimien energian kulutusta, mutta samalla säilyttää haluttu valkaisuulos. Työn tarkoituksena on saada selville, voidaanko valkaisun kemikaalisekoittimien pyörimisnopeutta vähentää, jotta saataisiin säästöjä energian kulutukseen valkaisuolosuhteissa. Tarkoituksena on seurata pyörimisnopeusmuutoksien vaikutusta kemikaalien sekoittumiseen massassa, kemikaalikulutukseen, tehon jakautumiseen valkaisuolosuhteissa ja vaikutusta massan valkaisuominaisuuksiin.

Työ suoritetaan seuranta tutkimuksena, jossa suunnitellaan muutossekvensseille omat koeajoaikataulut, joiden mukaan seurataan pyörimismuutosten vaikutuksia prosessin muuttujiin. Tutkimus tehdään EOP -vaiheen happisekoittimella ja D2-vaiheen kemikaalisekoittimella. Koeajot

suoritetaan sekoitin kerrallaan. Sekoittimien pyörimisnopeutta säädetään siihen asennettavalla taajuusmuuntajalla. Pyörimisnopeutta pudotetaan viikoittain vähintään 100 kierrosta kerrallaan. Työssä seurannassa on kolme pyörimisnopeuden pudotusta EOP:ssa ja neljä D2:ssa, joilla tutkimus suoritetaan. Yhden vaiheen seuranta kestää n. 4 viikkoa mukaan luettuna pyörimisen nollassa eli yhtä pudotusta seurataan noin viikko.

2 MASSAN VALKAISEMINEN

2.1 Massan valkaisu

Massan valkaisu on kemiallinen prosessi, jossa kasvatetaan selluloosamassan vaaleutta. Valkaisu laajentaa massan käyttömahdollisuuksia, ja se mahdollistaa erilaisten paperilaatujen valmistuksen. Massan valkaisuun vaikuttavat esimerkiksi puuraaka-aine, valkaisimon suodosten epäpuhtaudet, vesikiertojen rakenne ja sulkemisaste. Massan mukana kulkee epäpuhtauksia, joten massa pestään ja lajitellaan ennen valkaisua. Kuvassa 1 nähdään esimerkki valkaisimosta.

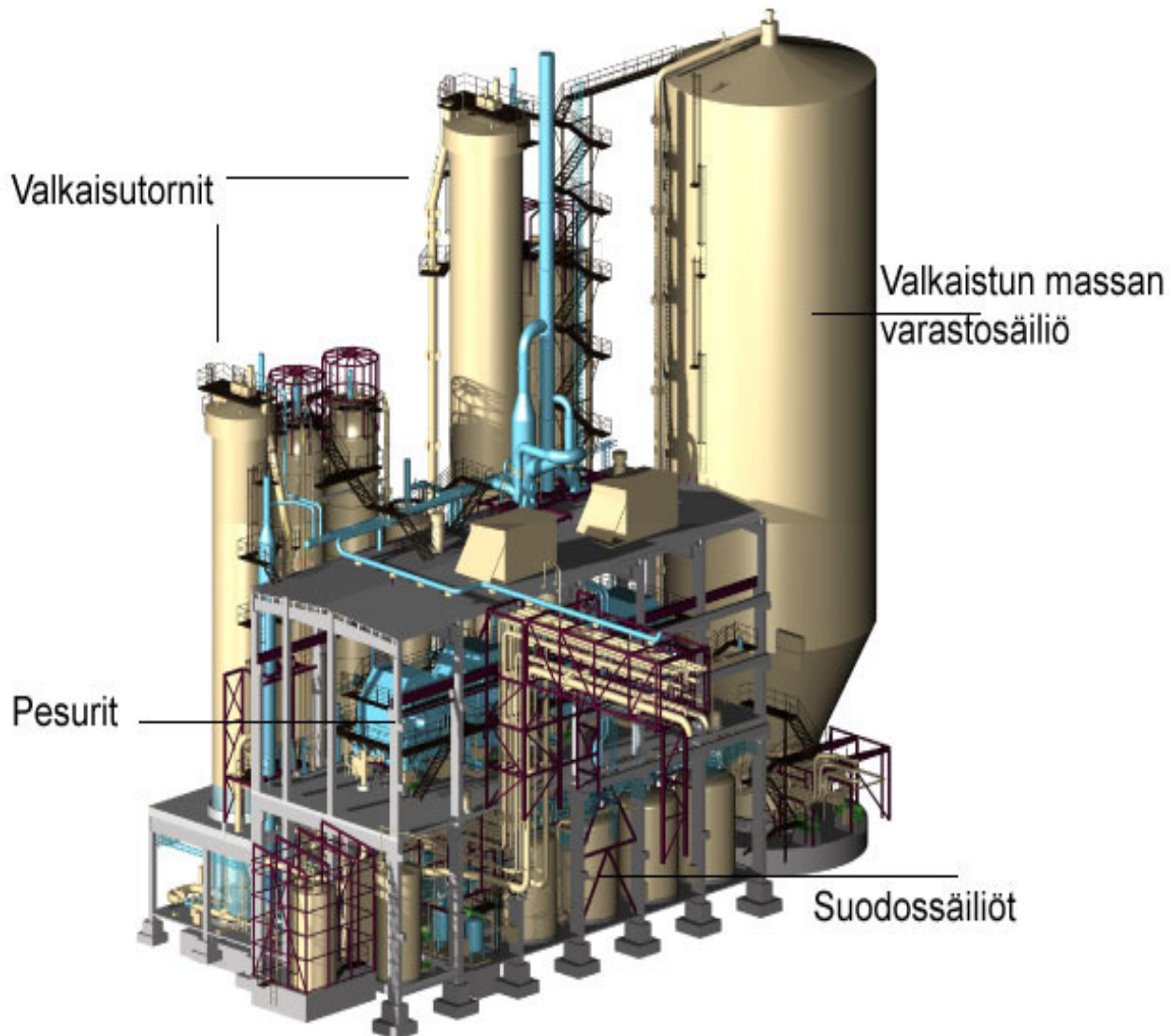
Valkaisun tärkein tavoite on parantaa vaaleutta ja puhtautta poistamalla massan värillisiä aineita. Merkittävin väriä aiheuttava aine on ligniini, joka tulee poistaa tai valkaista mahdollisimman tarkasti ja selektiivisesti. Happi on uuttava ligniiniä poistava kemikaali. Peroksidi on pinta-aktiivinen valkaiseva kemikaali. Klooridioksidilla on molempia ominaisuuksia. Valkaisulle asetetaan aina tavoitteet, jotka näkyvät valkaisun lopputuloksessa. Valkaisu voi olla joko ligniiniä poistava valkaisu tai ligniiniä säästävä valkaisu, se riippuu valkaisun lopputuotteen laatutavoitteista. Kemialliset massat eli sellut valkaistaan useimmiten ligniiniä poistavalla tavalla ja mekaaniset massat ligniiniä säästävällä valkaisulla. [2]

Kemiallisten massojen valkaisun periaatteena on jatkaa massan delignifiointia ja poistaa valkaisukemikaalien avulla massasta ns. jäännösligniini.

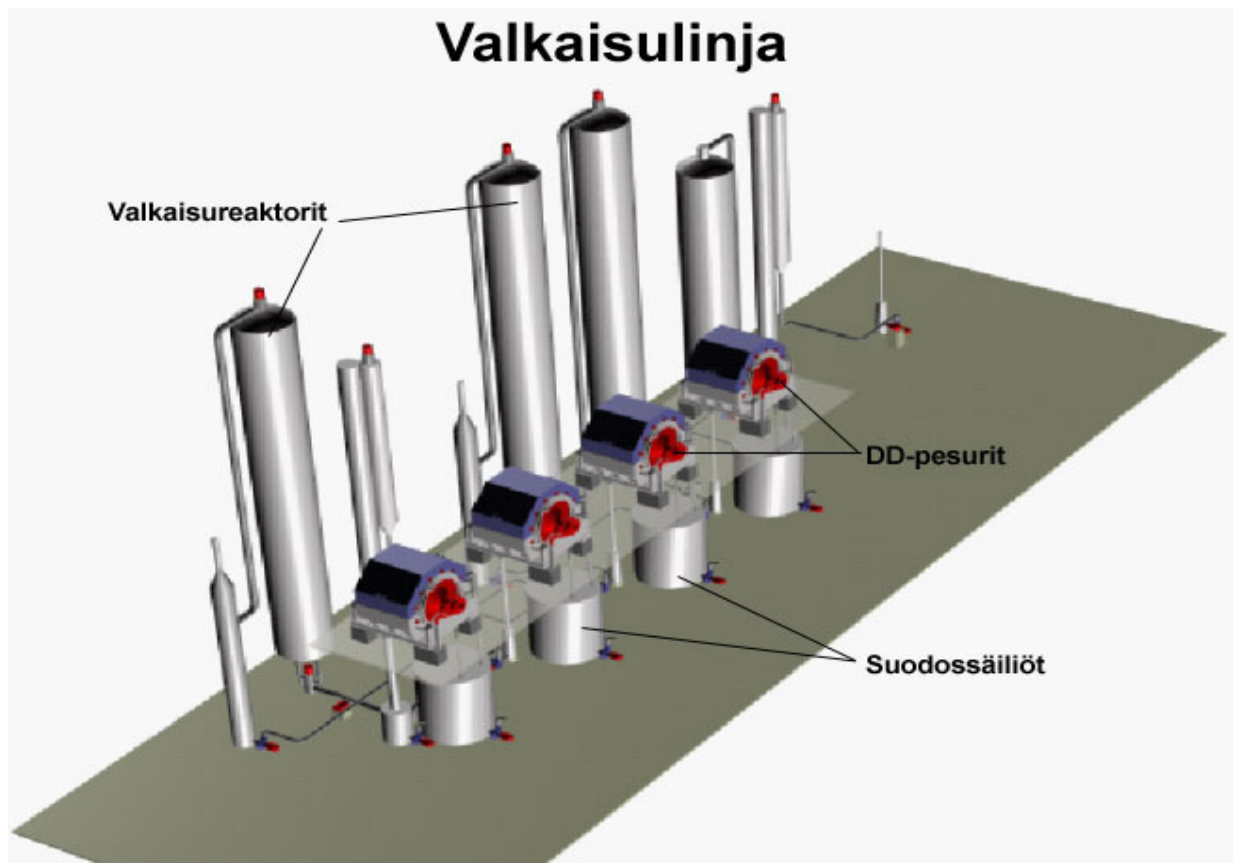
Keittoprosessissa ja sitä seuraavassa happikäsittelyssä on kuitenkin säilytettävä sopiva ligniinitaso, koska muuten kuidun hiilihydraattiosuus alkaisi pilkkoutua ja se aiheuttaisi saannon ja kuituominaisuuksien huonontumista. Tästä syystä jäännösligniini poistetaan kalliimmilla, mutta ligniinin suhteen selektiivisimmillä kemikaaleilla. [2]

Yleensä valkaisu koostuu valkaisuvaiheiden sarjasta, missä valkaisu tapahtuu valkaisukemikaalien ja sekvenssien yhteisreaktioina. Pelkällä yhdellä tai kahdella vaiheella massan vaaleudessa ei päästä ISO 87 - 90 -prosenttiseen vaaleuteen. Valkaisussa käytetään aina emäksisiä ja happamia vaiheita, happamassa vaiheessa käytetään valkaisukemikaalina klooridioksidia ja emäksisessä vaiheessa korkeassa kP:ssa uutetaan reaktiotuotteet kuidusta. Jokainen sekvenssi hoitaa oman tavoitteen mukaisen valkaisun ja, niiden yhteistuloksena saavutetaan loppuvaaleus massalle. Delignifioiva valkaisu koostuu valkaisu-sekvensseistä ja niiden välisistä pesuista. Sekvenssien jälkeisissä pesuissa massasta pestään liennut ligniini pois pesureilla ja pesusuodos kierrätetään. [3]

Esimerkki valkaisimosta



Kuva 1 Esimerkki valkaisimosta [13]



Kuva 2 Esimerkki valkaisulinjan järjestelmästä [13]

Kemikaalien sekoitus massaan ja massan pesu ovat tärkeä osa valkaisu. Kemikaalien huono sekoitus massavirtaan lisää kemikaalikulutusta, energian kulutusta ja huonontaa valkaisun laatua. Kemikaalien sekoitus on avain asemassa valkaisuoprosessissa ja sekoitustulos vaikuttaa merkittävästi lopputuoteleteen. [3]

Valkaisuoprosessi pyritään saamaan optimaaliselle tasolle, mutta samalla prosessin yksittäisten vaiheiden täytyy toimia taloudellisesti. Viime vuosina valkaisuoprosessi on kehittynyt merkittävästi, mutta valkaisuoprosessi on kuitenkin edelleen merkittävin vedenkuluttaja ja jätevesipäästöjen tuottaja. Kuvassa 2 on esimerkki valkaisulinjasta. Tärkeitä huomion kohteita valkaisuoprosessissa on tuotteen laatu, kustannukset, työntekijöiden terveys ja turvallisuus sekä ympäristön kuormitus. [4]

2.2 VALKAISUSEKVENSSIT

Massan valkaisu prosessi koostuu monesta vaiheesta, koska pelkällä yhdellä valkaisu vaiheella ei päästä laadullisesti parhaaseen tulokseen. Vaiheiden välillä massa pestään, jotta edellisen vaiheen reaktiotuotteet saadaan pois massasta. Monesta yksittäisestä sekvensseistä ja niiden välisistä pesuista koostuvaa kokonaisuutta kutsutaan valkaisu prosessiksi. Tällä tavoin valkaistaessa saadaan korkeita vaaleuksia massan lujuuksien kärsimättä.

Sekvenssiä, jossa on ainakin yksi klooridioksidivaihe, kutsutaan klooridioksidivalkaisuksi (ECF). Dioksidi vaiheita voi olla useita ECF -valkaisuissa, mutta siinä ei käytetä klooria valkaisu kemikaalina. Lisäksi ECF valkaisuun kuuluu kohtuullisen pienet klooridioksidiannokset, joka edellyttää happidelignifointi -vaiheen käyttöä. ECF tulee englannin kielen sanoista Elemental Chlorine free, jossa ei käytetä kloorikaasua, mutta käytetään klooridioksidia yhdessä tai useassa vaiheessa. Toista sekvenssiä, jossa käytetään vain happikemikaaleja, kutsutaan happikemikaalivalkaisuksi (TCF). TCF tulee englannin kielen sanoista Total Chlorine Free. Tässä insinööri työssä perehdytään ECF valkaisuun ja työn kokeelliset osuudet ovat mitattu ECF valkaisu linjalla. [3]

Klooridioksidivalkaisu (ECF) -sekvenssit

Yleensä ennen klooridioksidivalkaisua on happidelignifointivaihe, jossa poistetaan keiton jälkeen jäännösligniiniä hapen ja alkalien avulla. Valkaisu sekvenssi koostuu kolmesta tai neljästä vaiheesta eli applikaatiosta. Jokaiselle vaiheelle on määritelty kansainvälinen lyhenne sen kemikaalikäytön mukaan. Näistä kirjainyhdistelmistä nähdään sekvenssin valkaisu vaiheet. [2]

Hapetettavat kemikaalit:

Kloori, Cl ₂	C-vaihe
Klooridioksidi, ClO ₂	D-vaihe
Happi, O ₂	O-vaihe
Otsoni, O ₃	Z-vaihe
Vetyperoksidi, H ₂ O ₂	P-vaihe
Natriumperoksidi, Na ₂ O ₂	P-vaihe

Uuttavat valkaisu-kemikaalit:

Natriumhydroksidi, NaOH E-vaihe

Apukemikaalit:

pH:n säätö ja valkaisu-kemikaalijäänteiden poisto

Rikkidioksidi, SO₂ D-vaihe

Natriumhydroksidi NaOH pH:n säätö

ECF -valkaisuun voidaan valita useita eri valkaisu-yhdistelmiä. Yhdistelmään, johon päädytään, vaikuttaa massan käyttötarkoitus, puuraaka-aine, massan tulokappi jälkivalkaisuun, AOX -päästötavoite ja muut ympäristötavoitteet, pääomakustannukset sekä energian ja kemikaalien hintasuhteet. [2]

ECF -valkaisussa voi olla esimerkiksi seuraavia sekvenssejä:

- D-EOP-D-PO
- Z-EO-D-D
- EOP-D-PO-D
- O D (EO) D D

2.3 Kaukaan sellutehtaan valkaisu-sekvenssit

Tämän opinnäytetyön koeajot suoritettiin valkaisu EOP-D-PO-D -sekvenssillä ja tässä työssä keskityttiin vain tähän sekvenssiin. EOP=EO, EOP- vaiheeseen ei ajeta peroksidia. EOP-D-PO-D:tä käytetään Kaukaan sellutehtaalla Lappeenrannassa.

Kuitu 90-prosessihavuvalkaisimo on 4-vaiheinen keskisakeusvalkaisimo. Ennen valkaisua voidaan massa hapottaa tai kelatoida (Q-vaihe). Valkaisutornit ovat ylösvirtaustorneja. Valkaisuvaiheessa on DPA -puristin ja kolme 1,5-vaiheista DD -pesuria. [8]

2.3.1 EOP -vaihe

EOP -vaihe on alkaalinen massan valkaisu-vaihe, jossa massavirtaan syötetään happea, hapetettua valkolipeää sekä magnesiumsulfaattia, jolla estetään selluloosan pilkkoutumista. EOP -vaiheessa ei käytetä peroksidia eli se toimii EO -vaiheena, joka on tavallaan toinen happivalkaisuvaihe.

2.3.2 D1-vaihe

D1-vaihe on ensimmäinen klooridioksidi vaihe, jossa massavirtaan syötetään klooridioksidia. D1-vaihe on hapan vaihe. Klooridioksidiveden lämpötila on 8 -10 °C, mutta se lämmitetään 40 °C:seen ennen ajamista klooridioksidivaiheisiin. Massan pH säädetään rikkihapolla, Klooridioksidilaitoksen suolalla tai natriumhydroksidilla. Myös klooridioksidi pudottaa pH:ta.

2.3.3 PO-vaihe

PO -vaihe on kaksi reaktorinen alkalinen valkaisu-vaihe, jossa massavirtaan ajetaan kahdessa vaiheessa happea, natriumhydroksidia, magnesiumsulfaattia ja vetyperoksidia kahdessa reaktorissa.

2.3.4 D2-vaihe

D2-vaihe on valkaisuun viimeinen vaihe, jossa massavirtaan syötetään klooridioksidia. Massan vaaleuden ja jäännöksen tai tuotannon mukaan säädetään klooridioksidin määrää.

Opinnäytetyössä tutkittiin EOP-D1-PO-D2 -sekvenssin kahden vaiheen kemikaalisekoittimien taloudellista toimintaa. Ensimmäinen tutkittava kohde oli EOP -vaiheen happisekoitin 2, ja toinen kohde oli D2-vaiheen klooridioksidisekoitin.

2.4 Valkaisuun sekoituskemikaalit Kaukaan sellutehtaalla

Massan valkaisuun käytetään monia erilaisia kemikaaleja, joilla jokaisella on oma tehtävänsä valkaisuun prosessissa. Seurannan kannalta on tärkeää selvittää valkaisuun kemikaalien kulutus kemikaalisekoittimien kierrosnopeusmuutoksien aikana.

2.4.1 Happi

Happi on väritön, hajuton ja mauton, vähän ilmaa raskaampi kaasu, jonka vähäinenkin pitoisuus ilmassa lisää syttymisriskiä. Happi valmistetaan ilmasta. Yleinen tapa on jäähdyttää ilma nesteeeksi, jonka jälkeen happi erotetaan tislamalla. Toinen hapen valmistusmenetelmä on absorptiomenetelmä. Absorptiomenetelmä perustuu molekyyli-seulaan, jossa tapahtuu ilman kaasujen erottelu. Molekyyli-seula koostuu zeoliitti - ja alumiinioksidilevyistä, joita on seulassa vuorotellen. Typpi, hiilidioksidi ja vesi jäävät seulaan, sen sijaan happi ja argon kykenevät virtaamaan seulan läpi. Absorptiomenetelmä tuottaa noin 95 -prosenttista happipitoista happea. [12]

Happi toimitetaan tehtaalta joko nestemäisenä kaasusäiliöön tai sitä valmistetaan paikan päällä eli nestemäinen happi höyrystetään kaasuksi kaasuasemalla. [4]

Kaukaan sellutehtaalla happea valmistetaan kryogeenisesti tai absorptiomenetelmällä. Happi valmistetaan tehtaan yhteydessä olevalla "on site" -happilaitoksella, jossa nestemäinen hapen varasto ja kaasutusjärjestelmä on backup -laitoksena. [8]

2.4.2 Klooridioksidi

Klooridioksidi on kaasuna myrkyllinen, vihertävä, ärsyttävän ja pistävän hajuista. Se valmistetaan laimeana kaasuna ja varastoidaan sekä käytetään laimeina vesiliuoksina. Se on herkästi hajoavaa ja räjähtää ulkoisista ärsykkeistä, kuljetus ja varastointi on hankalaa. Klooridioksidi valmistetaan aina lähellä käyttöpaikkaa eli tässä tapauksessa sellutehtaalla. Klooridioksidin valmistusmenetelmiä on useita. Perusaineena käytetään natriumklooraattia. Klooraatti pelkistetään rikkidioksidilla, natriumkloridilla, metanolilla, suolahapolla tai kromihapolla happamissa olosuhteissa. [2]

Kaukaan sellutehtaalla klooridioksidi tulee klooridioksidilaitokselta. Klooridioksidin väkevyys vaihtelee käytettävän veden lämpötilan mukaan 16:sta 24:ään g akt. Cl/l. [8]

2.4.3 Natriumhydroksidi (NaOH)

Natriumhydroksidia eli lipeää (kaustista soodaa) valmistetaan teollisuudessa tavallisesti elektrolyyttisesti natriumkloridia (ruokasuolaa) hajottamalla. Kiinteä NaOH on vaaleata, haurasta ja hygroskooppista ainetta. [7]

Natriumhydroksidi on kemiallisesti aktiivinen ja vahva emäs. Natronlipeä toimitetaan tehtaalte noin 50 -prosenttisena liuoksena. Natriumhydroksidia käytetään valkaisu-alkalivaiheessa, muissa alkalisisissa vaiheissa, tarvittaessa lipeäkierron korvauskemikaalina ja neutralointiaineena. Ilman natriumhydroksidia sulfaattisellun valkaisu ei onnistu. [4]

Lipeä laimennetaan valkaisu-alkalivaiheiden valmistusosastolla käyttöväkevyyteen, josta se pumpataan valkaisu-alkalivaihe 2:lle.

2.4.4 Hapetettu valkolipeä

Valkaisuprosessissa hapetettua valkolipeää voidaan käyttää osittain alkalina valkaisuun alkalivaiheissa. Tämä vähentää natriumhydroksidin käyttöä ja tasoittaa natrium- ja rikki – tasapainoa tehtaalla. Hapetettua valkolipeää valmistetaan hapettamalla valkolipeää. Hapetukseen käytetään joko ilmaa tai happea. Hapetettu valkolipeä tulee koivulinjan hapetuslaitteistosta hapetusreaktorinpainneessa. [4]

2.4.5 Vetyperoksidi

Vetyperoksidi on kirkas, hajuton neste (suurissa määrissä pistävänhajuinen). Vetyperoksidi tuodaan tehtaalle noin 50 -prosenttisena vesiliuksena. Peroksidi on hyvin voimakas hapetin, jonka käsittely vaatii varovaisuutta. [2]

Kaukaan sellutehtaalle vetyperoksidi toimitetaan 40 - liuksena tehtaalle ja se laimennetaan käyttökohteessa virtausmittauksen ja säädön jälkeen käyttöväkevyyteen. Vetyperoksidi varastoidaan säiliössä, ja sitä pumpataan vetyperoksidin päivä säiliöön valkaisu 2 linjalla.

2.4.6 Magnesiumsulfaatti

Magnesiumsulfaatti tuodaan tehtaalle kiteisessä muodossa autolla ja varastoidaan siiloon. Siilosta magnesiumsulfaatti annostellaan liuotusosaan, jonne annostellaan vesi oikeassa suhteessa. Magnesiumsulfaatti pumpataan sopivassa väkevyydessä valkaisu linjalle 2.

2.4.7 Natriumbisulfiitti

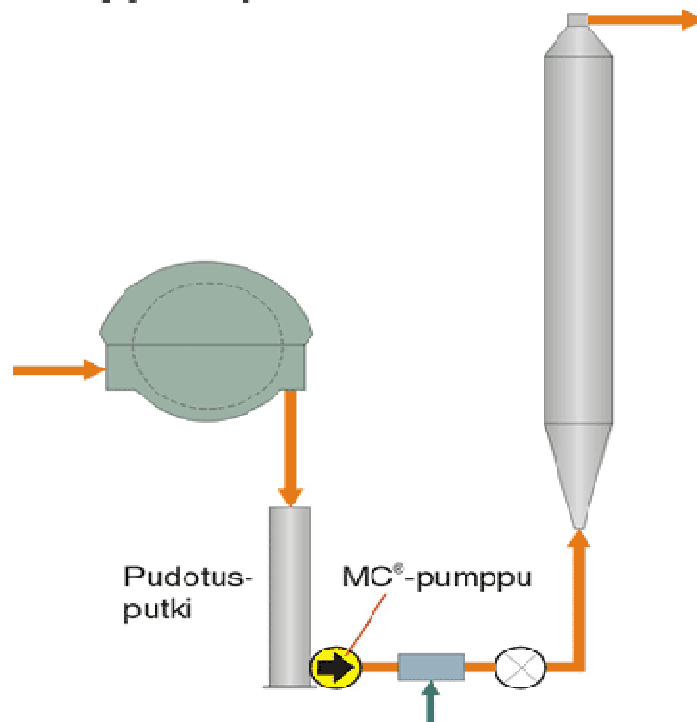
Natriumbisulfiitti valmistetaan hajukaasukattilan savukaasupesurissa. Sitä käytetään pelkistämään aktiivinen kloori ennen DD -pesuria. [8]

2.5 Valkaisulaitteistot ja energian kulutus

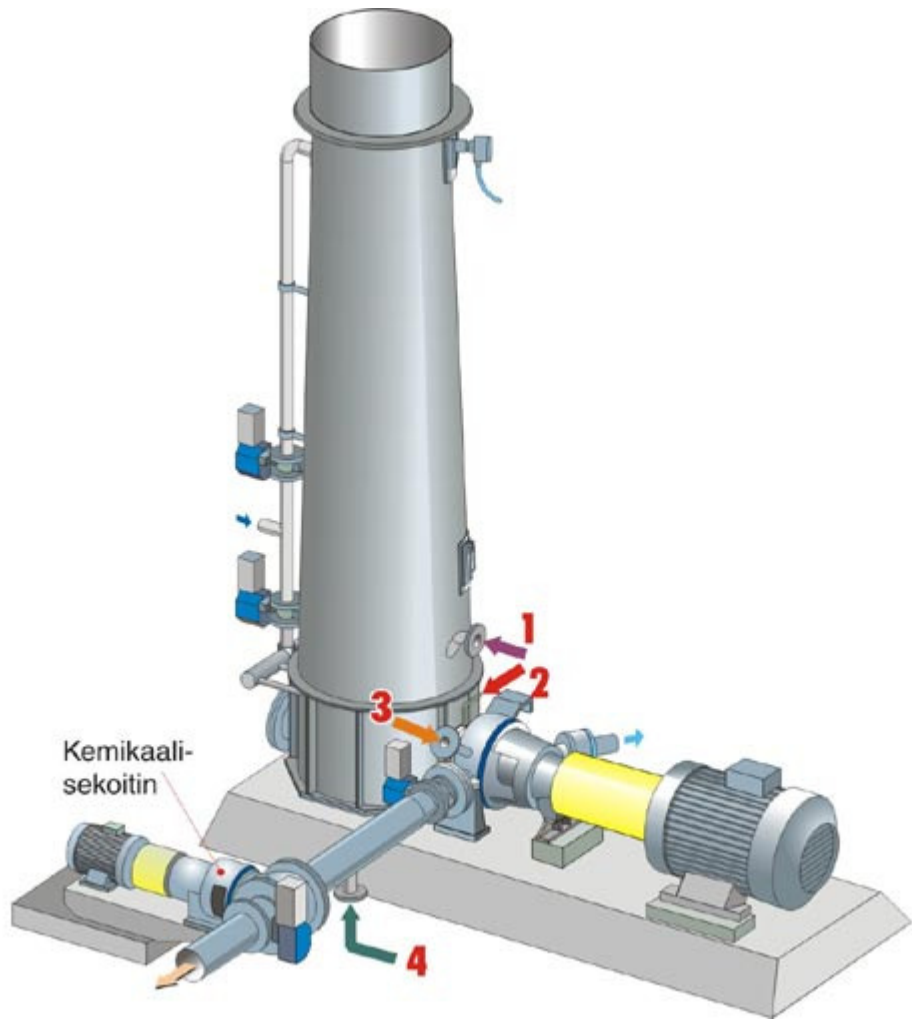
2.5.1 Valkaisun tuotantomäärän vaikutus valkaisulaitteiden valintaan

Valkaisun lopputuloksen kannalta on tärkeää valita tuotantomäärään nähden oikein soveltuvat laitteet valkaisulinjalle. Kuvassa 3 nähdään, mitä laitteita valkaisulinjaan yleensä sisältyy. Kuvan 3 laitejärjestys on pesuri, pudotusputki, MC-pumppu, sekoitin, reaktiotorni.

Pumppaus pesurilta tai suotimelta



Kuva 3 Esimerkki valkaisun laitteistosta [13]



Kuva 4 MC-pumppu, pudotusputki ja kemikaalisekoitin [13]

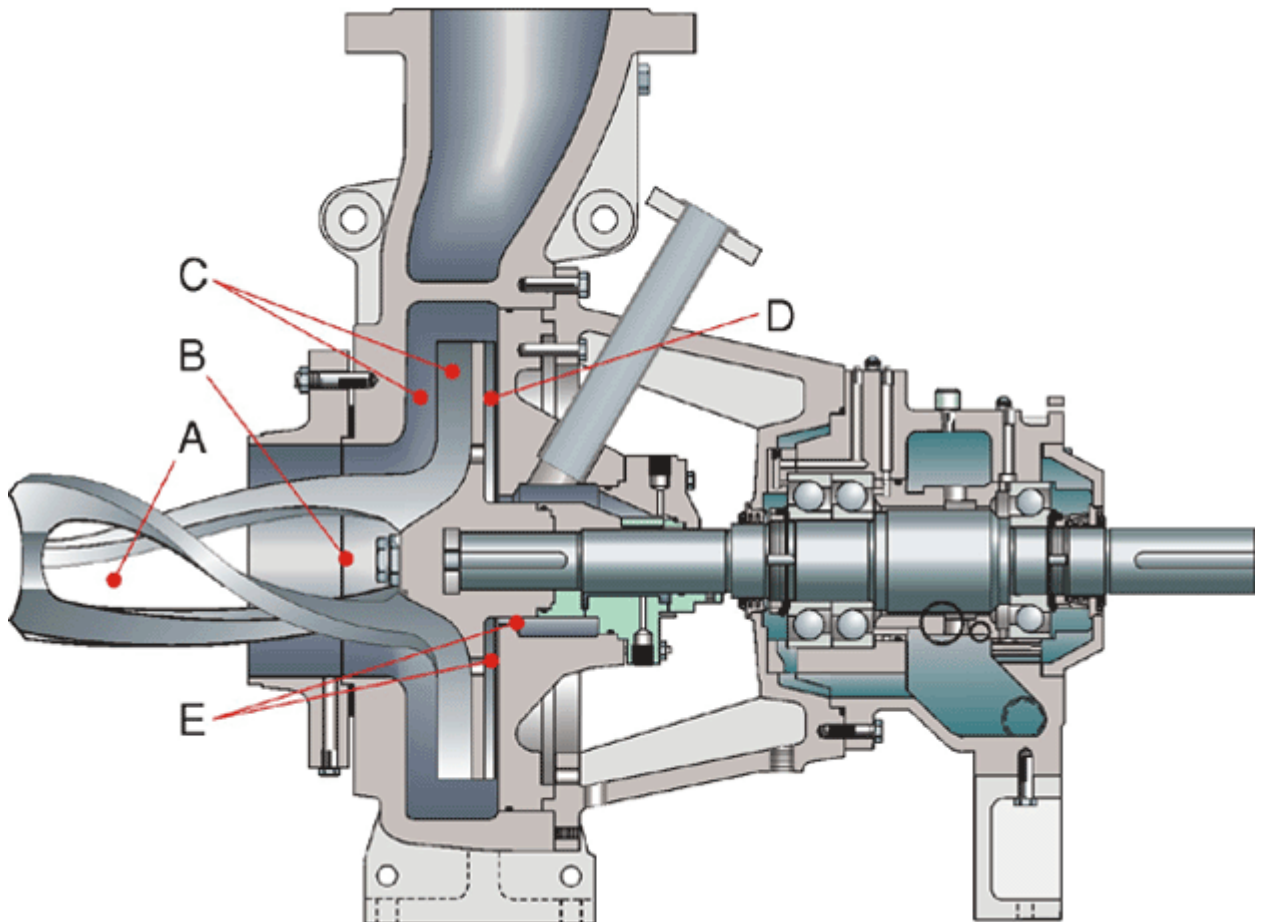
Kuvassa 4 numerot 1-4 näyttävät kemikaalien syöttöpisteitä pudotusputkeen sekä kemikaalisekoittimeen. Sekoituksen kannalta on tärkeää, että kemikaalit syötetään oikeasta kohdasta prosessiin.

2.5.2 MC-pumppu valkaisuainjalla

Keskisakean massan pumppu on yksi valkaisuun päälaitteista. Pumppaussakeus vaihtelee 8 -18 %:n välillä. MC -pumppulla voidaan siirtää massaa tasaisesti ja häiriöttömästi suurista valkaisu- ja varastotorneista. Keskisakean massan pumpun käyttö on pienentänyt muiden laitteiden kokoa ja määrää oleellisesti. MC-pumppu soveltuu hyvin massan pumppaukseen ja siirtoon sellu- ja paperiteollisuudessa. [4]

Pumpun toiminta perustuu kuvan 5 mukaisesti viiteen alueeseen: [11]

- A. Homogenisointi- ja fluidisointialue, jossa juoksupyörä hajottaa massan kuituverkoston.
- B. Kaasun erotusalue
- C. Pumppausalue, jossa juoksupyörän siivet pumppaavat massaa eteenpäin.
- D. Kuitujen palautusalue, jossa kaasualueelta kaasun mukana tulevat kuidut palautetaan takaisin pumppaukseen juoksupyörän takasiipien avulla.
- E. Kaasun poistoalue, jossa kaasu poistetaan kaasunpoistoyksikköön.



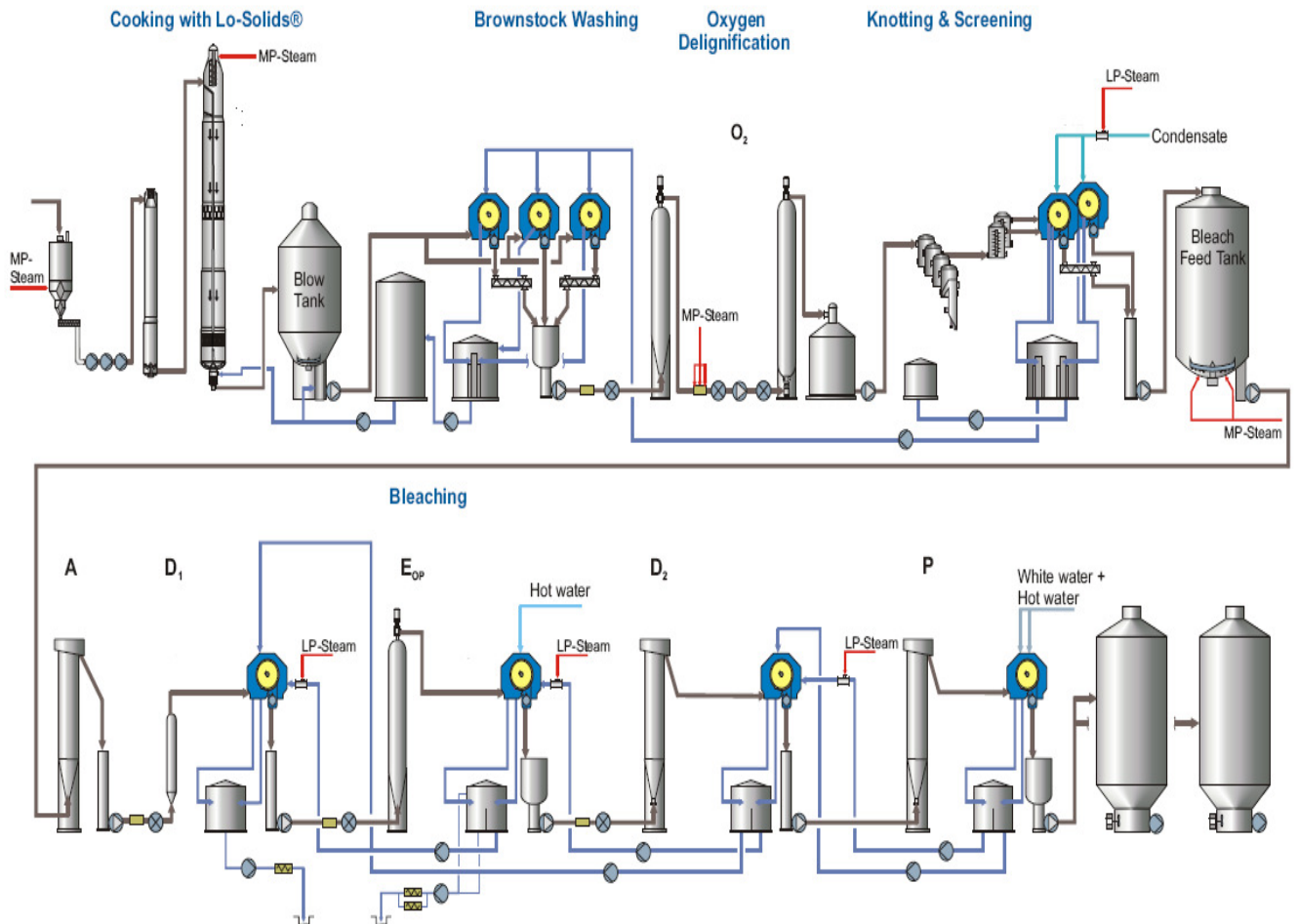
Kuva 5 MC-pumpun halkileikkauksen ja pumpun toiminnalliset alueet. [13]

Valkaisun laitteistot noudattavat kolmea periaatetta:

1. Tornivalkaisimo, jossa jokainen valkaisu vaihe on omassa reaktoritornissaan ja vaiheiden välinen pesu tapahtuu erillisillä pesureilla tornien ulkopuolella.
2. Diffusöörivalkaisimo, jossa jokaisella valkaisu vaiheella on oma reaktoritorni ja vaiheiden välinen pesu tapahtuu tornien yläpäähän sijoitetulla diffusööripesurilla.
3. Syrjäytysvalkaisimo, jossa usea valkaisu vaihe voi olla samassa tornissa, ja pesu tapahtuu tornien sisään rakennetuilla diffusööripesuyksiköillä.

Tornivalkaisimo on kaikista suosituin valkaisuinstallaatio, ja syrjäytysvalkaisu ei ole viime vuosina enää rakennettu, koska siinä valkaisukemikaalien kulutus on suurempi verrattaessa tornivalkaisuun. [2]

Tässä työssä tutkittiin tornivalkaisimon kemikaalisekoittimia. Tornivalkaisimolla EOP-D1-PO-D2 käytetään kuvan 6 mukaisesti seuraavia laitteita:



Kuva 6 esimerkki valkaisulinjasta [14]

Kuvassa 6 on hyvin samanlainen valkaisulinja kuin tutkimuksen linjasto. Kuten kuva 6 kertoo, niin valkaisuvaihe on hyvin monivaiheinen prosessi massan valmistuksessa.

2.5.3 Kaukaan sellutehtaan sekvenssin EOP-D1-PO-D2 laitteet

Seuraavassa kerrotaan Kaukaan sellutehtaan sekvenssien laitteista lyhyesti. Laitteet käydään läpi tehdasjärjestyksessä eli missä järjestyksessä ne ovat prosessissa.

EOP-vaiheen laitteet

1. MC-pumppu: Keskisakean massan pumppu, joka syöttää massaa happisekoittimien kautta EOP -reaktori 2:een.
2. Happisekoitin 1 ja 2 : Tehtävänä on kemikaalien sekoitus EOP -vaiheessa. Molemmille sekoittimille syötetään happea ja hapetettua valkolipeää. Happisekoitin 2 oli tutkimuksen ensimmäinen muutoskohde.
3. MC-jakolaite: Jakaa massan neljään tasaiseen virtaan EOP -reaktorin alapäästä.
4. EOP -reaktori 2: Reaktioastia, jossa valkaisureaktiot tapahtuvat. Kemikaalin reaktionopeuteen ja valkaisutulokseen vaikuttaa reaktorin viipymäaika, massan pH, lämpötila ja paine.
5. Jakopurkain: Purkaa massan ulos EOP -reaktori 2:sta, ja massa siirtyy pesuvaiheelle.

D1-vaiheen laitteet

1. MC-pumppu: Syöttää massan D1-reaktoriin.
2. Klooridioksidisekoitin: Sekoittaa klooridioksidin massaan. Klooridioksidi lisätään ennen klooridioksidisekoitinta massavirtaan.
3. Tornikaavari: Purkaa massan D1-reaktorista ja johdetaan pudotusputkeen.
4. MC-pumppu: Massa pumpataan DD – pesurille, ja massa pestään.

PO -vaiheen laitteet

1. MC-pumppu: Pumppaa massan molempien PO -reaktoreiden läpi puskusäiliöön saakka.
2. Happisekoitinta 1: Ennen sekoitinta lisätään massaan happiannos, vetyperoksidi ja alkali. Happisekoitin sekoittaa kemikaalit tasaisesti massavartaan.
3. PO -reaktori 1: PO -vaiheen ensimmäinen valkaisu on reaktioajassa, lämpötilassa, paineessa ja pH:ssa. Kemikaalin reaktionopeuteen ja valkaisu tulokseen vaikuttaa reaktorin viipymäaika, massan pH, lämpötila ja paine.
4. Fluidisoiva purkain: Tehtävä on purkaa massa tasaisesti pois PO -reaktori 1:stä.
5. Happisekoitin 2: Sekoittaa lisätyt kemikaalit massavirrassa. Ennen sekoitinta lisätään vetyperoksidia, hapetta ja välipainehöyryä.
6. MC-jakolaite: Jakaa massan neljään tasaiseen osavirtaan.
7. PO -reaktori 2: Massan valkaisu tapahtuu uudelleen lisätyillä kemikaaleilla PO -reaktori 2:ssa.
8. Jakopurkain: Purkaa massan ja massa virtaa välisäiliöön.
9. MC-pumppu: Pumppaa massan sopivassa sakeudessa DD -pesurille ja massa pestään.

D2- vaiheen laitteet

1. MC-pumppu: Syöttää massan D2-torniin.
2. Klooridioksidisekoitin: Sekoittaa klooridioksidin, joka on lisätty ennen sekoitinta. Tutkimuksen toinen muutoskohde on klooridioksidisekoitin.
3. D2-reaktori: Massa valkaistaan lopulliseen vaaleuteen sopivissa, pH:ssa ja lämpötilassa. D2- vaiheen torni on atmosfäärinen. Dioksidi valkaisuvaiheessa paineella ei ole vaikutusta valkaisu tulokseen.
4. Tornikaavari: Purkaa massan D2-reaktorista pudotusputkeen.
5. MC-pumppu: Pumppaa massan pudotusputkesta sopivassa sakeudessa DD -pesurille, joka pesee massan.

2.5.4 Sekoittimien energian kulutus

Sekoittimia valmistaa monet eri yritykset. Ominaista kilpailulle on, että jokainen yritys tavoittelee sekoitinta, joka on taloudellisin ja tuottaa sekoituksen jälkeen laadukasta massaa. Energian kulutus on tärkeä ominaisuus sekoittimelle.

Taulukko 1 eri valmistajien sekoittimien toiminnallisia ominaisuuksia [4]

Sekoittimien vertailu massan valkaisulla

Sekotin	Sakeus(C %)	Viipymisaika (s)	Tehohäviöt(W/m ³)	Energia (MJ/t)
Teollisuus sekoittimet				
Ahlstrom, Ahlmix	8,0 - 20,0	0,03-0,2	1-6 x 10 ⁶	2,0- 6,0
Kamyr MC	9,0 - 14,0	0,2-0,9	6- 12 x 10 ⁶	14,0- 43,0
Sunds SM	9,0 -14,0	0,025-0,05	4 -11 x 10 ⁷	9,0-18,0
Sunds T-25	18(max)	0,05-0,2	5 x 10 ⁷	3,0-6,0

Taulukossa 1 vertaillaan valmistajien sekoittimia. Tärkeää vertailussa on huomioida kaikkia sekoittimien ominaisuuksia, mutta työn kannalta oleellisinta on energian kulutuksen huomioiminen.

3 KEMIKAALISEKOITTIMET

Kemikaalisekoittimet ovat tärkeässä osassa valkaisu prosessia. Kemikaalisekoittimien laadukas toiminta takaa parhaan mahdollisen kemikaalien sekoittumisen ja laadullisen lopputuloksen massan valkaisuun. Kemikaalisekoitin sijaitsee valkaisu vaiheissa aina ennen reaktoreita. Kemikaalisekoittimia on joko yksi tai kaksi yhdellä vaiheella. Eri kemikaaleille on valmistettu omat sekoittimensa, koska sekoittumisen merkitys kemikaaleilla on erilainen ja sekoittimen rakenne on suunniteltu soveltuvan aina tietyille kemikaalityypille.

3.1 Sekoittimien toimintaperiaate

Kaikilla massan valkaisuun käytettävillä sekoittimilla on sama tavoite, johon niiden toiminta perustuu. Tärkeintä on saada kuitujen rakenneverkosto hajoamaan, jotta kemikaali leviää tasaisesti massavirtaan. Keskisakean massan sekoittimiin syötetään sekä nestemäisiä että kaasumaisia valkaisu-kemikaaleja ja myös höyryä.

Toiminta perustuu kemikaalisekoittimen roottorin ja erikoisrakenteisen pesän muodostamaan turbulenssivyöhykkeeseen, joka fluidisoi massan. Kuitukimput purkautuvat, ja laadukas sekoitustulos on mahdollinen. Kohtisuoraan virtaussuunnassa oleva roottori ja 3-dimensionaalinen turbulenssirakenne estävät kaasun haitallisen erottumisen. [3]

3.2 Sekoitintyytit

Kemikaalisekoitin koostuu sekoituskammioista, roottorista, laakeroinnista ja moottorista. Laakerointi ja moottori ovat yhteisellä jalustalla. Pesän rakenne perustuu turbulenssin muodostamiseen eli fluidisoinnille soveltuvaksi alueeksi. Roottori on sekoittimen pyörivä osa, joka muodostaa yhdessä pesän kanssa sekoitusvyöhykkeen. Roottoria pyörittää sähkömoottori, joka on mitoitettu yhdessä sekoittimen rakenteen kanssa valkaisu-*linjan* tuotantomäärälle soveltuvaksi.

Sekoitintyyppinä on markkinoilla ja käytössä eri tehtailla monenlaisia, mutta kaikki sekoitin mallit perustuvat samoihin perusvaatimuksiin: [2-3]

- sekoitustehokkuus
- tehokkuus sekä kaasumaisten että nestemäisten kemikaalien sekoituksessa
- laaja sakeusalue 8-15 %
- soveltuvuus kaikkiin valkaisu-vaiheisiin
- joustava ja helppo asentaa
- luotettava suorakäyttö

- mahdollisimman pieni energiankulutus

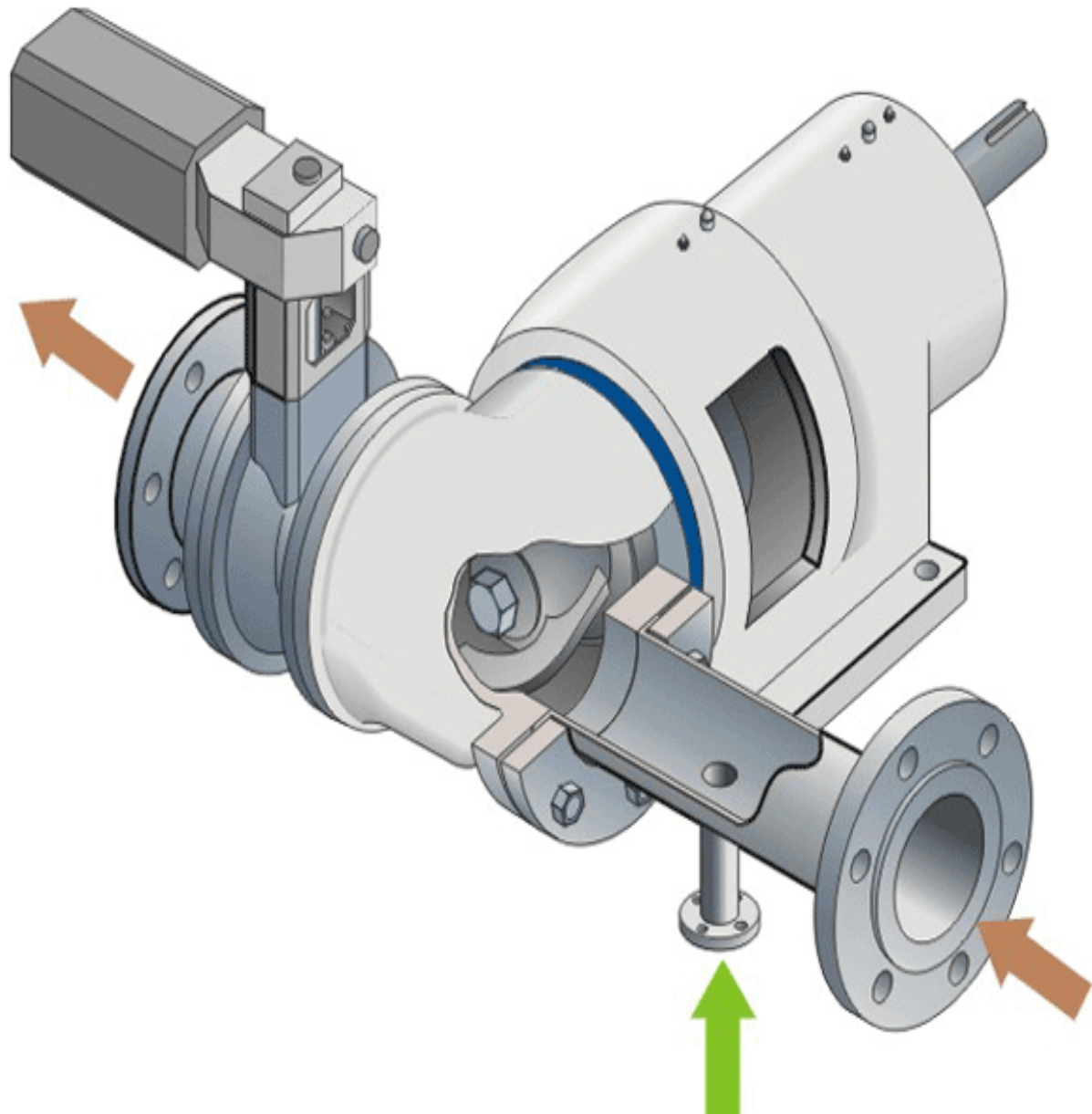
Kun sekoittimesta löytyy edellä luetellut ominaisuudet, niin sekoituksen lopputulos on varmasti jo lähellä laadukasta tasoa.

3.2.1 Ahlmix(Ahlström)

Tässä tutkimuksessa keskitytään Ahlströmin Ahlmix -sekoittimiin. Ahlmix -sekoittimen rakenne koostuu syöpymistä kestävästä materiaaleista, kuten haponkestävästä terästä, titaanista, nikkelseoksesta tai korkeaseosteisesta Avesta 654SMO. Valmistusmateriaali riippuu sekoitettavista kemikaaleista ja valkaisuaseman järjestelyistä. Ahlmix -sekoittimen rakenteen suunnittelulle on ominaista: [3]

- kohtisuoraan virtaussuunnassa oleva roottori
- 0 - 4 metristä pieni paineen pudotus
- suora käyttö
- Pysäytettynä sekoitin päästää massan virtaamaan läpi.

Kemikaalisekoitin



Kuva 7 Ahlmix kemikaalisekoitin Ahlström [13]

Kuvassa 7 nähdään Ahlmix –sekoitin. Vasen nuoli kuvaa massan virtaus suuntaa ja oikea kemikaalin syöttöpistettä massavirtaan. Kuvasta 7 nähdään, että kemikaalit syötetään ennen sekoitinta Ahlmix –sekoittimella

3.2.2 Kvaerner MC-kemikaalisekoitin (GL&V)

Kvaerner on keskisakean massan sekoitin. Kvaernerin kemikaalisekoitin koostuu pesästä ja roottorista. Pesä koostuu pitkittäisistä ripoista ja säteittäin asetetuista suuttimista. Roottorilla on aksiaaliset siivekkeet. Roottori fluidisoi massan laitteen tuloaukolla. Suuttimista lisätään kemikaalit fluidisoituun massaansa nopealla ja tehokkaalla sekoituksella.

MC-sekoittimella on suuri kiekko fluidisoivan roottorin lopussa tapauksille, joissa suuri tilavuuksiset kaasut sekoitetaan. Tehokas dispersio tapahtuu vyöhykkeessä pyörivän kiekon välissä, ja pesä varmistaa kaasukuplien homogeenisen jakautumisen kuitulietteessä. Sekoitustehokkuuden kasvua voi edesauttaa, jos edeltävä pumppu poistaa ilman massasta. Vähentynyt ilmamäärä massassa myös kasvattaa reaktioastetta kemikaalien ja massan välillä. [3]

3.2.3 SM - kemikaalisekoitin (Metso)

SM - sekoittimia voidaan käyttää jokaisessa valkaisu vaiheessa, mutta sekoitin materiaalin täytyy olla vaiheelle kuitenkin soveltuva. Sekoittimen sakeus vaihtelee matalasta sakeudesta (LC) aina 15 %:n (MC) sakeuteen asti. Kloorin sekoituksessa voidaan käyttää veden sijaan dispergointiaineena kaasumaista klooria.

Toimintaperiaate on sellainen, että massasulppu pumpataan sisään sekoittimeen, kemikaaliliuos tai kaasu syötetään massan joukkoon. Kemikaalit ja massasulppu pakotetaan kulkemaan kapeiden solien ja pyörivän pinnan välistä. Sekoittimessa syntyy voimakas pyörremuodostus, ja massasulpun sekoitus tapahtuu kapeissa virtaussolissa voimakkaassa pyörrevirtauksessa. [1]

4 VALKAISUN KEMIKAALISEKOITUS

Seuraavaksi käydään läpi valkaisun tavoitteita, massan homogenisointia, kuitukäyttäytymistä ja sekoitukseen vaikuttavia tekijöitä.

4.1 Kemikaalisekoituksen tavoite

Kemikaalisekoituksen tavoitteena on tasainen sekoitustulos. Kemikaalit sekoitetaan massaan mahdollisimman tasaisesti, jotta päästään parhaaseen valkaisutulokseen. Huono sekoitus heikentää valkaisureaktiota, jolloin kemikaalikulutus kasvaa ja massan vaaleus kärsii. [2]

Kemikaalisekoituksen tavoitteena on myös sekoituksen taloudellisuus ja prosessisujuvuus. Prosessin sekoitusvaiheissa sekoituksen pitää tapahtua nopeasti, jotta ajettavuus säilyy hyvällä tasolla. Kemikaaliensyöttö täytyy tapahtua oikein ajoitettuna. Tärkeimmät tavoitteet sekoituksessa ovat laatu, tehokkuus ja alhaiset kustannukset.

4.2 Massan homogenisointi kemikaalisekoituksessa

Kemikaalisekoituksessa kuidut tarvitsevat tasaisen kemikaalijakauman. Valkaisutuloksen kannalta on edullista, että kuituihin kohdistuu tasainen ja riittävä kemikaaliannos. Kuidun täytyy altistua oikealle määrälle kemikaaleja saavuttaakseen hyvätasoisin sekoitustuloksen. Massavirta koostuu lietteestä, jossa on erikokoisia kuituja ja kaasu- ja ilmakuplia. [4]

Valkaisun kemialliset reaktiot tapahtuvat heterogeenisessä ympäristössä. Käytettävät kemikaalit ovat usein kaasumaisia, esimerkiksi happi ja kloori. Kaasumaisen kemikaalin täytyy läpäistä nestemäinen vesifaasi päästäkseen kuiturakenteessa olevaan reaktiokohtaan.

Kuidut eivät yleensä liiku yksittäin massavirrassa, vaan ne muodostavat kuituverkostoja, ns. flokkeja, jotka muodostuvat kuitukimpuista ja kuitujen väliin jäävästä vedestä. Valkaistava massa täytyy homogenisoida, jotta kemikaalit

saadaan reagoimaan tasaisesti massaan ja vaaleudesta saadaan optimaalinen.
[1]

Fluidisointi tarkoittaa kuitukimppujen hajottamista ja irrottamista toisistaan, tällöin massa muuttuu juoksevaksi ja helposti pumpattavaksi. Valkaisussa homogenisointia ja fluidisointia tapahtuu sekä MC-pumpuilla että kemikaalisekoittimilla. [4]

4.3 Kuitukäyttäytyminen kemikaalisekoituksessa

Sekoituksessa on tärkeää saada hajotettua kuituverkosto, jotta päästään mahdollisimman homogeeniselle alueelle. Kuituverkostolle on ominaista kuitujen vahvat kuitu-kuitusidokset toisiinsa, joka johtuu toisaalta kuitujen jäykkyydestä. Jos kuituverkkoon kohdistetaan fluidisointienergiaa vastaava määrä sekoitustehoa, kuituverkko hajoaa yksittäisiksi kuiduiksi ja mikroflokeiksi. Tällöin se muuttuu tulppavirtauksesta turbulenttiseksi ja alkaa virtaamaa, kuten esimerkiksi vesi. Kun kuituverkon leikkausjännitys ylittyy, fluidi alkaa virtaamaa.
[5]

Massavirta sisältää eripituisia, tilavuuksisia, vahvuuksisia ja kokoisia kuituja. Kuidut uivat ja toimivat lietteessä yksittäisinä, mutta kokonaisuutena ne muodostavat kuituverkoston. Kuitujen koko luokitellaan makroasteikolle, kuituasteikolle ja mikroasteikolle. Makroasteikko nimitys tarkoittaa suurta noin 10 millimetristä ylöspäin olevaa koko luokkaa. Kuituasteikko -nimitys kuvaa pieniä 0,05 – 10 mm:n kokoisia kuituja. Mikroasteikko kuvaa hyvin pientä kuitukokoa eli alle 0,05 millimetrin kokoisia kuituja. Kuitujen koko vaikuttaa sekoituksen reaktiotapahtumiin valkaisuissa.

Kuitukoko vaikuttaa massan liikkumiseen sekoituksessa. Makroasteikko kuvaa kemikaalisekoituksen reaktiota kuitujen ainemäärällisellä liikkumistasolla. Kuituasteikko käsittää laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen saavuttamista sekoitusreaktiossa, jolloin puhutaan kuitujen ja flokkien tasolla tapahtuvasta kemikaalikuljetuksesta. Mikroasteikolla lähestytään kemikaalikuljetusta

molekyylitasolla, jolloin diffuusio on keskeinen kemikaalisekoituksen reaktiossa. [4]

Kun kaasut sekoitetaan massalietteeseen, niin asteikkotasot vaikuttavat kemikaalien ja kuitujen tasaiseen sekoittumiseen. Jokaisella tasolla vaaditaan laadukasta sekoitustulosta. Jos massa jää epätasaiseksi, kemikaalien sekoittuminen kärsii, ja laatu huonontuu. [10]

Kuidut ovat toistensa päällä kuitulietteessä. Verkoston vahvuus riippuu kuitujen määrästä lietteessä. Kuitukimpuilla on vahvempi verkosto kuin muulla ympäristöllä lietteessä. Kuitujen välinen voimakkuus täytyy ottaa huomioon suunniteltaessa sekoittimia.

Massan sakeudella on suuri rooli kuitukäyttämiseksi, mutta keskisakean massan sekoittimilla 8-15 prosentin väliset vaihtelut eivät aiheuta muutosta sekoitustulokseen, koska sekoitin on rakennettu toimimaan sakeusvaihteluilla. [4]

4.4 Sekoitukseen vaikuttavia tekijöitä

Sekoittimen rakenne on tärkein sekoitustulokseen vaikuttava tekijä. Sekoittimen sijainti, koko, energiankulutus, välimatka muihin prosessin laitteisiin, montako sekoittimia on yhdessä valkaisuvaiheessa, ja tietenkin toimivuus sekä taloudellisuus ovat tärkeitä tekijöitä sekoituksessa. [13]

Sekoitustapahtumaan vaikuttaa massan ominaisuudet, fluidisointi, kuitudispersio, kemikaalien syöttö, kemikaalien olomuoto (kaasu/neste), kemikaalien määrä, kemikaalisekoituksen reaktioaste ja sekoitusaste sekä massan tilavuusvirta. [4]

Kaasun ja kuidun väliset tapahtumat vaikuttavat sekoitukseen. Sekoituksessa voidaan saavuttaa tasainen tulos, jos sulpun kaasutilavuus on alhainen. Energian tarpeellisuus on hiukan matalampi kaasun ollessa läsnä sekoituksessa. [6]

Reaktio-olosuhteen, kemikaalipitoisuuksien ja lämpötilan täytyy olla sopiva, jotta kemiallinen reaktio tapahtuu välittömästi, kun kemikaali saavuttaa reaktiovyöhykkeen. Tämä on tärkeää erityisesti, silloin kun reaktioaste on edennyt kuidun pintaa syvemmälle. Valkaisukemikaalin kuljetus reaktiovyöhykkeelle määrää koko valkaisureaktion nopeuden. [1]

4.5 Kemikaalin kulkeutuminen valkaisu-prosessissa

Ensimmäisessä intensiivisessä sekoituksessa kemikaalin kuljetusvaihe on lyhyt. Tarkoituksena on pilkkoa kemikaalivirtaus pieninä osina massavirran joukkoon ja luoda mahdollisimman hyvät edellytykset seuraaville kuljetusvaiheille, joissa kemikaali- ja massakomponentit kulkevat melkein ilman mekaanista sekoitusta putkessa tai reaktiotornissa. Jos sekoitettava kemikaali on kaasu, on seuraava kuljetusvaihe kaasun liukeneminen veteen, jolloin mahdollisimman pieni kuplakoko eli mahdollisimman suuri kaasu-nesterajapinta on hyödyksi.

Nestefaasiin liunneen kemikaalin pitoisuuserot tasoittuvat yleensä diffuusion vaikutuksesta, joten diffuusio parantaa osittain kemikaalisekoitusta. Tämä tapahtuu ainoastaan tapauksissa, joissa valkaisukemikaali ei aiheuta ylivalkaisua eli kemikaali reagoi tasaisesti valkaisuissa. Diffuusion tärkeys näkyy valkaisukemikaalien kuljetuksessa kuitujen reaktiopintaan. [1]

4.6 Kemikaalisekoituksen vaikutus valkaisu-tulokseen

Mekaanisen sekoittumisen ja diffuusion suhteellinen merkitys valkaisu-tuloksen kannalta on erilainen kemikaalien luonteen mukaan. Mekaanisen sekoitusvaiheen merkitys on tärkeä, jos kyseessä on hyvin nopeasti ja epäselektiivisesti reagoiva kemikaali. Huonossa sekoituksessa syntyy suuria paikallisia kemikaalipitoisuuksia, ja kemikaalit eivät ehdi tasoittua diffuusion vaikutuksesta, jolloin massan sekoitustulos on epähomogeeninen ja paikallisesti yli- ja alikloorautunut. Aliklooraus huonontaa massan jatkovalkaisua, ja yliklooraus huonontaa massan lujuusominaisuuksia. [1]

Kemikaalisekoituksella on suurin merkitys vaaleudelta tasaiselle ja laadukkaalle massalle. Kemikaalisekoitus on herkkä vaihe, jossa olosuhteiden täytyy toimia yhteistyössä.

Huomautus: Theseuksessa on opinnäytetyöstä vain teoria osuus työn teettäjän liiketaloudellisten syiden vuoksi.

LÄHTEET

1. Puusta paperiin M-405, Sellun valkaisu, Karhulan kirjapaino Oy, Karhula 1991.
2. Paperi massan valmistus, Kemiallinen metsäteollisuus 1, M. J. Seppälä, U. Klementti, V-M. Kortelainen, J. Lyytikäinen, H. Siitonen, R. Sironen, Gummerus kirjapaino Oy 2004.
3. Chemical pulping, J. Gullisen and C. J. Fogelholm, Paper making science and Technology, Gummerus 2000.
4. Pulp Bleaching, Principles and Practice, C. W. Dence and D. W. Reeve, Tappi Atlanta, 1996.
5. T. Vikström, Nordic Pulp and Paper Research Journal Vol. 17 No. 4/2002, A new correlation for the onset of fluidisation in pulp suspensions.
6. R. J. Smith and Chad P.J. Bennington, Appita Vol. 47 No. 6 Mixing gases and pulp suspensions in a continuous laboratory mixer.
7. Puukemia, Suomen paperi-insinöörien yhdistyksen oppi- ja käsikirja, Waldemar Jensen, Turku 1977.
8. UPM- Kymmene Oy Kaukas, Jaakko Pöyry Kuitu -90 käyttöohjeet valkaisimo 2, A. Eriksson, 1996.
9. UPM-Kymmene Oy Kaukas, Projekti Kuitu -90 konekirjat 2 kemikaalisekoittimet, Mappi 12, 1996.
10. Chad P. J. Bennington, Pulp bleaching, Vol 76 No. Tappi Journal, Mixing gases into medium-consistency pulp suspensions using rotary devices, Vancouver Canada 1993.

11. Sarlin Uppopumppukirja, H. Sarvanne, H. Borg, 2. painos Kauppakirjapaino Oy.
12. V. Stålhanske, Kandidaatin tutkielma: Sufaattisellun valkaisuun käytettävien kemikaalien tuotanto ja valmistuksen energiankulutus, 2009.
13. <http://www.knowpulp.com/suomi/UPM-Kymmene> (Luettu 21.05.2010)
14. Andritz Oy Kotka (Ohjaaja DI Timo Perttula kuvat 20.05.2010)