Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Polysulfidiprosessi sulfaattisellutehtaassa

Polysulphite process in a kraft pulp mill

Työn tarkastaja: Professori, TkT Esa Vakkilainen

Työn ohjaajat: Diplomi-insinööri Antti Vainio-Pekka

Diplomi-insinööri Sanna Hämäläinen

Lappeenrannassa 7.10.2014

Karoliina Szepaniak

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Karoliina Szepaniak

Opinnäytteen nimi: Polysulfidiprosessi sulfaattisellutehtaassa

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2014

Sivuja 56, kuvia 12, yhtälöitä 2.

Hakusanat: uusiutuva energia, bioenergia, energiatehokkuus, höyrynkulutus, sellutehdas, sulfaattikeitto, polysulfidikeitto.

Kandidaatintyön tavoitteena on kartoittaa merkittävimmät muutokset sellutehtaalla siirryttäessä sulfaattimassan valmistuksesta polysulfidiselluprosessiin. Työssä esitellään sulfaattisellun valmistusprosessi ja polysulfidin vaatimat muutokset selluprosessissa erityisesti höyrynkulutuksen kannalta. Sellutehtaan höyrynkulutusta ja sen mahdollisia muutoksia tarkastellaan suhteessa tehtaan selluntuotantoon. Tutkimus tehdään tutustuen dokumenttilähteisiin sekä erityisesti hankkimalla lisätietoa ja käytännön näkemystä asiantuntijahaastatteluista. Työssä käytetään esimerkkinä tyypillistä modernia sellutehdasta, jonka perusteella tarkasteltavat osaprosessit ovat valikoituneet.

Sulfaattiprosessiin tehtävät muutokset käsittävät keittolipeän muuttamisen polysulfidipitoiseksi, polysulfidin valmistusprosessin (MOXY) sekä keiton muuttamisen siten, että polysulfidin vaikutus voidaan maksimoida. Polysulfidiprosessi vaikuttaa merkittävästi lipeäkiertoon, keittämöön sekä kuivauskoneeseen. Muilla osastoilla ominaishöyrynkulutuksen odotetaan pysyvän tavanomaista sulfaattiprosessia vastaavalla tasolla. Höyrynkulutuksella on huomattava merkitys modernin sellutehtaan tuotanto- ja kustannustehokkuuteen, sillä säästetyllä ylijäämähöyryllä voidaan tuottaa myyntisähköä. Uusiutuvan energian tuottajana ja ympäristövastuullisena toimijana sellutehtaiden on järkevää pyrkiä vähentämään omaa höyrynkulutustaan ja lisäämään sitä kautta sähköntuotantoaan.

ABSTRACT

Author: Karoliina Szepaniak

Bachelor's Thesis: Polysulphite process in a kraft pulp mill

School of Technology

Energy Technology

Bachelor's Thesis 2014

Pages 56, figures 12, equations 2.

Key words: renewable energy, bio energy, energy efficiency, steam consumption, pulp mill, kraft pulping, polysulphite pulping.

This Bachelor's Thesis presents a modern kraft pulping process and required modifications for polysulphite pulping. Main objective of this research is to predict changes in steam consumption and its future trends in the entire pulp mill's processes. Steam consumption is studied per air-dry ton of pulp produced by the target pulp mill used in this research. This research is done utilizing documental sources and particularly acquiring additional knowledge and practical knowledge by specialist interviews. A typical, modern pulp mill is used as an example in this thesis whereby the partial processes represented have been chosen.

Modifications made to kraft process are converting the cooking liquor to contain polysulphite, production of polysulphite (MOXY) and optimizing the cooking process in the digester to maximize the effect of polysulphite. Polysulphite process has a major impact on liquor cycle, digester's operation and drying machine whereas the steam consumption of other partial processes can be expected to remain on the level of kraft process. Steam consumption of a pulp mill has a significant effect to modern pulp mill's level of production and cost effectivity as the saved steam can be used to produce electricity for sale. As a renewable energy producer and environmentally responsible

operator it’s rational for pulp mills to aim to reduce their own steam consumption hence increase their electricity production.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä **2**

Abstract **3**

Sisällysluettelo **5**

Symboli- ja lyhenneluettelo **6**

1 JOHDANTO **9**

2 SULFAATTIPROSESSI **12**
2.1 Kuitulinja ... 13
2.2 Lipeälinja ... 16
2.3 Sulfaattisellutehtaan energiavirrat ... 20

3 POLYSULFIDIPROSESSI **23**
3.1 Prosessimuutokset ... 24
3.2 Polysulfidikeiton kemia ... 25

4 HÖYRYNKULUTUS JA MAHDOLLISET MUUTOKSET OSASTOITTAIN **28**
4.1 Puunkäsittely ... 29
4.2 Kaasutuslaitos ... 30
4.3 Keittämö ... 31
4.4 Pesemö, happivalkaisu, lajittamo ja valkaisimo ... 33
4.5 Kuivaamo ... 36
4.6 Haihduttamo ja mäntyöljylaitos ... 39
4.7 Mäntyöljylaitos ... 42
4.8 Soodakattila ja turbiini ... 43
4.9 Kaustisointi ... 45
4.10 Vedenpuhdistuslaitos ... 45

5 YHTEENVETO **47**

Lähdeluettelo **50**

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Alaindeksit

h	kokonaishöyrymäärä
hmp	matalapainehöyry
hvp	välipainehöyry
ka	kuiva-aine

Lyhenteet

ADt	air dry tonne, tonni ilmakuivaa sellua, kuiva-aine 90 %
BAT	best available technique, paras käytettävissä oleva tekniikka
BCTMP	bleached chemi-thermomechanical pulp, valkaistu kemihierresellu
BPR	boiling point rise, kiehumapisteen nousu
CNCG	concentrated non-condensable gases, väkevät hajukaasut
D	valkaisun klooridioksidivaihe
DD	drum displacer, ruskean massan pesurityyppi
ECF	elemental chlorine free, klooridioksidivalkaisu alkuainekloorin sijasta
EES	energy efficiency system, sertifioitu energiatehokkuusjärjestelmä
EOP	sellun valkaisun alkali-happi-peroksidivaihe
HVL	hapetettu valkolipeä, happivaiheessa lisättävä alkali
KK	kuorikattila

KP	korkeapaine
LV	lämmönvaihdin
NCG	non-condensable gases, lauhtumattomat kaasut
PS	polysulfidi
SK	soodakattila
TG	turbiini-generaattori
VLM	lämmin vesi
VKU	kuuma vesi
VRA	raakavesi
VSU	suodatettu vesi

Käsitteet

aktiivilietelaitos	jätevesien puhdistuslaitos, jossa ylläpidetään suurta aktiivista mikrobimäärää liuenneiden epäpuhtauksien hajottamiseksi ja sitomiseksi kiinteään muotoon
bench marking	yritysten käyttämä esikuva-analyysi erityisesti prosessinkehittämisen välineenä
CD-suodin	paineistettu valkolipeän kiekkosuodin
delignifiointi	puukuituja sitovan aineen eli ligniinin poisto sellunvalmistuksessa
ekonomaiseri	höyrykattilakomponentti, jolla kattilassa höyrystettävää vettä esilämmitetään lähemmäksi höyrystymislämpötilaa
ITC	isothermal cooking, isoterminen vuokeitto jossa keittoa jatketaan mustalipeän syrjäyttämisen jälkeen

kalkkimaito	viherlipeän ja poltetun kalkin ($Ca(OH)_2$) sekoitus kaustisointiprosessissa
kappaluku	kuvaa massan ligniinipitoisuutta eli valkaistavuutta
lipeä	natriumhydroksidia (NaOH), jota käytetään keitto- ja valkaisukemikaaleina
luvo	luftvorwärmer, soodakattilan polttoilman esilämmitin
meesa	kiinteää kalsiumkarbonaattia ($CaCO_3$), jota syntyy valkolipeän valmistuksessa ja joka erotetaan valkolipeästä suodattamalla
MOXY	mead oxidation process, polysulfidin valmistusmenetelmä
otsonisaattori	generaattori, joka valmistaa happikaasusta otsonia valkaisun happivaihetta varten
saanto	keiton raaka-ainetehokkuus, eli puun hemiselluloosien ylimääräinen liukeneminen ligniininpoiston yhteydessä
stripperi	pesuri, jossa vesivirtaan liuennut kaasumainen aine höyrystetään eli stripataan
X-filter	meesan ristivirtaussuodin

1 JOHDANTO

Modernit sellutehtaat ovat energiaomavaraisia laitoksia, joiden lähes ainoa raaka-aine on puu. Tehtaalle saapuvasta puusta noin 40 % päätyy eri prosessivaiheiden kautta bioenergian tuotantoon, ja nykyisin metsäteollisuus tuottaa puunjalostuksen ohella noin 80 % Suomen bioenergiasta. (Metsäteollisuus ry 2013.) Bioenergian noususuhdanteen ohella metsäteollisuudella on luonnollinen tarve energian tehokkaaseen käyttöön, sillä sen vuotuiset energiakustannukset ovat miljardin euron luokkaa. Euroopan unionin ja metsäyhtiöiden strategioiden asettamien ympäristötavoitteiden lisäksi energiahintojen nouseva trendi kannustaa yksiköitä energiatehokkuuteen ja sitä kautta kustannussäästöihin. Suomalaisen metsäteollisuuden suurimmat kasvumahdollisuudet nähdäänkin biotaloudessa, kuten bioenergiassa ja biopolttoaineissa. (Paperi ja puu 2012.)

Sulfaattisellun valmistusprosessi on maailman yleisin sellunkeittoprosessi, koska sellusta tulee vahvaa ja menetelmä soveltuu kaikille puulajeille. (Valtion ympäristöhallinto 2005, 3.) Sellun kilpailukykyisten ominaisuuksien lisäksi sulfaattiprosessin hyviä puolia ovat tehokas ja taloudellinen kemikaalien talteenotto, laaja raaka-ainevalikoima sekä klooridioksidivalkaisun tehokkuus. (Kleppe 1970, 36.) Biotalouden merkitys metsäteollisuudelle korostuu erityisesti sulfaattisellutehtaissa kemikaalien talteenottokierron vuoksi.

Selluprosessin saanto vaikuttaa olennaisesti raaka-ainetehokkuuteen ja tuotetun sellumäärän kautta tehtaan ominaisenergiankulutukseen, joten saantolisäystä tavoitellessa sulfaattiprosessia on tutkittu ja kehitelty viime vuosina monin eri keinoin. Lisääntyneen tuotannon ohella saantolisäyksen taloudellisia hyötyjä ovat muun muassa vähentyneet kemikaalikustannukset ja pienempi raaka-ainekulutus. (Cöpür 2007, 280.) Polysulfidin käyttäminen sulfaattiprosessissa lisää keiton saantoa, sillä sen ansiosta suurempi osuus puun hemiselluloosasta pysyy mukana kuiduissa, eikä liukene ligniinin mukana. (Kovasin 2013.)

Sulfaattikeitosta polysulfidikeittoon siirryttäessä keittoprosessi optimoidaan hyödyntämään keittolipeään lisättävää uutta kemikaalia, jonka avulla puuraaka-aine voidaan hyödyntää tehokkaammin. Saantoedun ohella noussut kuitusaanto parantaa

materiaalitehokkuutta ja kasvattaa soodakattilan kapasiteettia, jonka ansiosta tuotantoa voidaan edelleen nostaa. (Kovasin 2013.) Sulfaattiprosessiin tehtävät muutokset käsittävät keittolipeän muuttamisen polysulfidipitoiseksi, polysulfidin valmistusprosessin (MOXY) sekä keiton muuttamisen siten, että polysulfidin vaikutus voidaan maksimoida. (Hämäläinen 2013.)

Saannon ohella tehtaan höyrynkulutuksella on huomattava merkitys modernin sellutehtaan tuotanto- ja kustannustehokkuuteen, sillä säästetyllä ylijäämähöyryllä voidaan tuottaa myyntisähköä. Sähkönmyyntituottojen lisäksi prosessin energiatehokkuuden parantaminen edistää usein myös osaprosessien luotettavuutta sekä tuotanto- ja kustannustehokkuutta. Energiansäästötoimien suunnittelussa tulee kuitenkin huomioida, että monimutkaistamisen sijasta prosessien yksinkertaistaminen voi usein lisätä prosessin luotettavuutta ja sitä kautta parantaa energiatehokkuutta. (Vakkilainen & Kivistö 2010, 124.) Lämmön- ja sähkönkulutuksen lisäksi tehtaan energiatehokkuuteen vaikuttaa myös polttoaineen kulutus, mutta tässä työssä energiatehokkuutta käsitellään höyrynkulutuksena tuotettua sellutonnia kohti. (Szabo et al. 2009, 262.)

Energiatehokkaan sulfaattisellutehtaan suurimmat lämmönkuluttajat ovat veden haihdutus haihduttamolla, kuivauskoneen toiminta sekä prosessivirtojen lämmitys sellun keitossa. Kohdetehtaalla keskimääräinen höyrynkulutus sulfaattiprosessilla on haihduttamolla ~1500 kg_h/ADt, kuivauskoneella ~1300 kg_h/ADt ja massatehtaalla ~900 kg_h/ADt. Höyrynsäästö- ja energiatehokkuustoimet ovat sellutehtailla kannattavia investointeja, sillä lämpöä kuluu esimerkiksi kohdetehtaan osaprosesseissa yhteensä ~20 GJ/ADt ja säästetyllä ylijäämähöyryllä voidaan tuottaa myyntisähköä.

Sellutehtaan nykyisen energiakulutustason määrittäminen on tärkeää muun muassa tehdaskohtaisten tavoitteiden asettamisen, kannattavuustarkastelun sekä tehostamistoimien paikantamisen kannalta. Mahdollisia energiansäästötoimia voidaan paikantaa esimerkiksi vertaamalla oman tehtaan ominaiskulutusta muiden tehtaiden vastaaviin arvoihin tai tarkistamalla oman tehtaan tilanne ennalta laaditun tarkistusluettelon perusteella.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on kartoittaa merkittävimmät muutokset sellutehtaalla siirryttäessä sulfaattimassan valmistuksesta polysulfidiselluprosessiin

erityisesti höyrynkulutuksen osalta. Työssä esitellään sulfaattisellun valmistusprosessi ja polysulfidin vaatimat prosessimuutokset. Kandidaatintyössä tarkastellaan energiatehokkuutta sellutehtaan osaprosessien höyrynkulutuksena suhteessa tehtaan selluntuotantoon molemmilla prosesseilla. Kohdetehtaalla on tehty toinen kandidaatintyö polysulfidiprosessin vaikutuksista soodakattilalla (Parkko 2014).

Taustana työlle on prosessimuutos ja sen tuomat haasteet yhtiön tavoitteissa valmistaa mahdollisimman päästötöntä sellua ja korostaa bioenergian merkitystä tuotteena. Uusiutuvan energian vahvaan asemaan yhtiön strategiassa vaikuttavat erityisesti Euroopan Unionin asettamat vaatimukset sekä kohdeyhtiön sertifioitu energiatehokkuusjärjestelmä, joka tekee tehtaan omasta energiankäytöstä tehokkaampaa ja optimoi bioenergian tuotantoa. Energiatehokkuus kohdeyhtiön tehtailla tarkoittaa erityisesti oman prosessilämmön kulutuksen vähentämistä lauhdesähkön tuotannon lisäämiseksi sekä tuotantoyksiköstä riippuen kuoren tai ylijäämälämmön myyntiä. Energia-asioita pyritään tuomaan lähemmäksi jokapäiväistä tuotantotoimintaa erityisesti etsimällä energiatehokkaampia ajotapoja yksittäisille osaprosesseille. (Heikkilä 2013.)

2 SULFAATTIPROSESSI

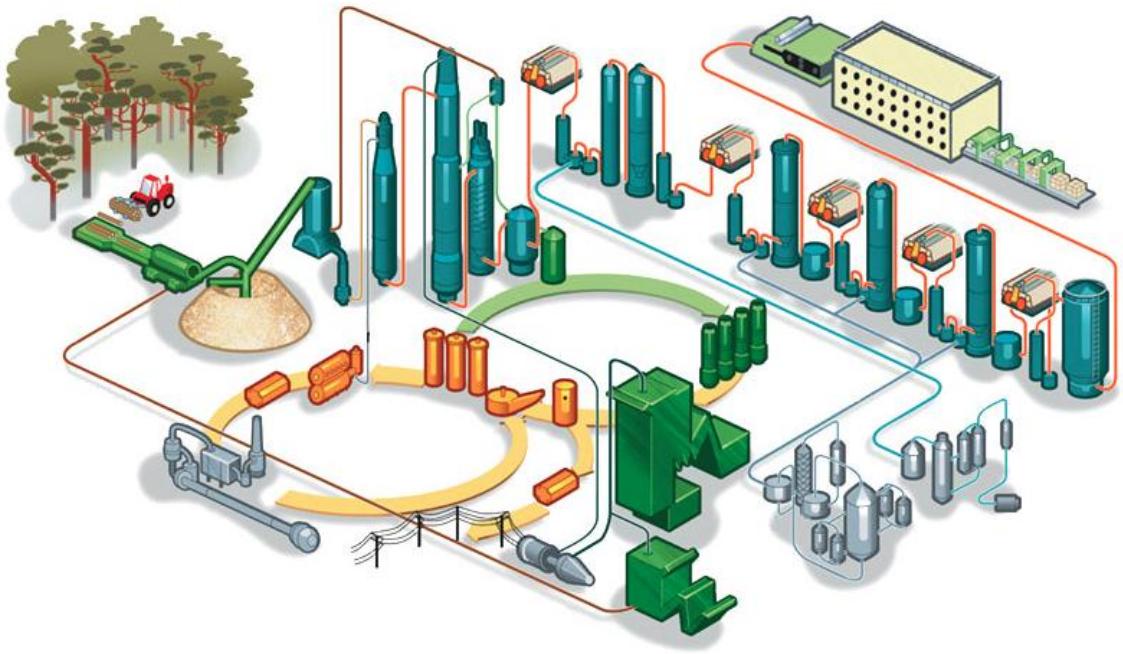
Sulfaattisellun valmistusprosessi on maailman yleisin sellunkeittoprosessi, koska sellusta tulee vahvaa ja menetelmä soveltuu kaikille puulajeille. Tärkeimmät raaka-aineet ovat uusiutuvia luonnonvaroja (puu ja vesi) sekä keitossa ja valkaisussa tarvittavia kemikaaleja. (Valtion ympäristöhallinto 2005, 3.)

Sellun kilpailukykyisten ominaisuuksien lisäksi sulfaattiprosessin hyviä puolia ovat tehokas ja taloudellinen kemikaalien talteenotto, laaja raaka-ainevalikoima sekä klooridioksidivalkaisun tehokkuus. (Kleppe 1970, 36.) Sulfaattisellutehtaissa jätevedet, hajukaasut ja muut päästöt ilmaan yhdessä energiankulutuksen kanssa ovat erityishuomion kohteena, sillä ne mahdollistavat eettisen ja kilpailukykyisen sellun valmistamisen. (Valtion ympäristöhallinto 2005, 3.)

Sulfaattisellun valmistusprosessi jaetaan tyypillisesti kahteen osaan, kuitulinjaan ja talteenottokiertoon eli lipeälinjaan. Kuitulinja käsittää puuaineksen käsittelyprosessit aina haketuksesta massan keittoon ja kuivaukseen. Lipeäkierto puolestaan tarkoittaa keittimestä saatavan laihalipeän talteenottoa ja käsittelyä niin, että se saadaan takaisin keittimeen syötettävään muotoon. Lipeäkierto sisältää myös erillisen kalkkikierron.

Tässä kappaleessa esitellään tyypillinen sulfaattisellun valmistusprosessi jaettuna kuitulinjaan ja lipeälinjaan. Lisäksi tarkastellaan modernin sulfaattisellutehtaan energiavirtoja.

Modernin sulfaattisellutehtaan periaate on esitetty kuvassa 1, johon kuitulinja on merkitty oranssilla viivalla. Lipeälinjaa kuvaavat vihreä ja oranssi väri: vihreä käsittää talteenoton energiantuotannon ja oranssi puolestaan lipeän regeneroinnin ja kalkkikierron.

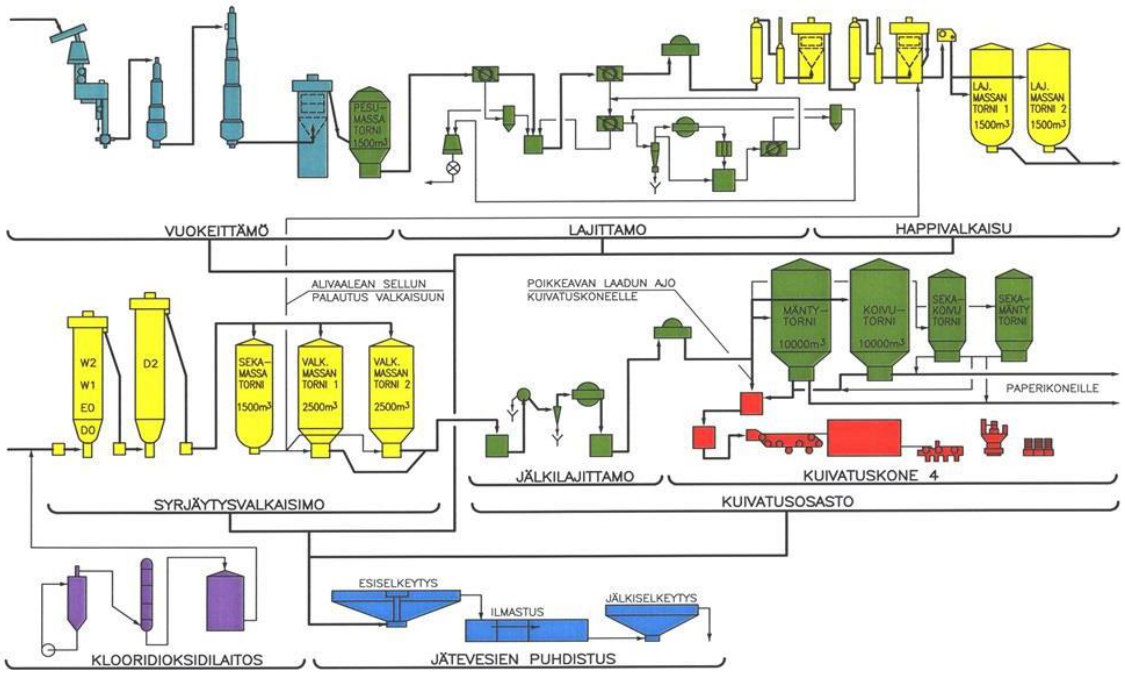


Kuva 1 Sulfaattisellun valmistusprosessi. (Knowpulp 2012.)

Kuitulinjan olennaisimmat osastot ovat kuorimo, keittämö, pesemö, lajittelu, valkaisu ja kuivauskone. Talteenoton pääosat ovat haihduttamo, soodakattila ja turbiini, kaustisointi ja meesauuni. Tavoiteajossa lipeälinja kalkkikiertoineen on täysin suljettu prosessi.

2.1 Kuitulinja

Sulfaattikeiton tarkoituksena on poistaa ainakin osittain puukuituja toisiinsa sitova ligniini keittämällä massaa, eli kuorittua ja haketettua puuainesta, voimakkaasti alkalisella liuoksella. Keitto voi tapahtua joko eräkeittona tai jatkuvatoimisena vuokeittona. Tässä tutkielmassa tarkastellaan vain jatkuvatoimista vuokeittoperiaatetta, sillä merkittävä osa moderneista sulfaattisellutehtaista käyttää vuokeittoperiaatetta. Keiton jälkeen sellunvalmistusprosessissa seuraa sellun pesu, lajittelu, valkaisu ja kuivaus. (Seppälä et al. 2002, 75; Bajpai 2013, 2.) Erään tyypillisen kuitulinjan periaatekaavio keittämöstä kuivauskoneeseen on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2 Erään kuitulinjan periaatekaavio. (Kivilahti 2014, 11.)

Puuraaka-ainetta saapuu tehtaalle sekä valmiina hakkeena että kuitupuuna, ja sellun valmistus alkaa materiaalin käsittelyllä. Kylmätalvisilla alueilla kuitupuu syötetään sulatuskuljettimelle, jossa puu sulatetaan ja kuljetetaan kuorimarumpuun. Rummusta kuori poistetaan kuoripuristimelle ja varastoidaan, kuoritun puuaineksen jatkaessa hakkuun. Hakun jälkeen haketta seulotaan hakkeen tasaisen laadun varmistamiseksi, ja lopulta hake varastoidaan hakekasoille. (Bajpai 2010, 8.)

Ennen kuin hake saapuu keittimeen, se pasutetaan eli siitä poistetaan ilma ja se esilämmitetään paisuntahöyryllä, tuorehöyryllä tai kummallakin. Ennen keitintä hake ja lipeä syötetään imeytystorniin, jossa lipeä imeytyy hyvin hakkeeseen korkean paineen ja pasutuksen ansiosta. (Ikäheimonen et al. 2000, 14.)

Tavallisessa keitintyypissä eli Kamyr -keittimessä hake ja keittolipeä syötetään keittimeen huipulta ja valmista massaa poistetaan eli pusketaan keittimen pohjalta. Keitossa käytettävä neste eli valkolipeä annostellaan suhdesäätönä, jossa mitattava suure on hakemäärä. Keittimen pohjaan syötetään lisäksi pesulipeää, joka lämmitettynä syrjäyttää keittolipeän. Jatkuvatoimisessa vuokeitossa keittoaikaan ei voida vaikuttaa,

vaan viipymäaika riippuu tuotannosta. Tyypillinen keittoaika on 1,5-2 tuntia. (Ikäheimonen et al. 2000, 14.)

Tuotettavan massan laatuun pyritään vaikuttamaan muuttamalla keittimen alkaliprofiilia eli valitsemalla optimaalinen keittoaika ja -lämpötila. Valittu profiili vaikuttaa merkittävästi keittämön höyrynkulutukseen, sillä lämpötilaa hallitaan eri vaiheissa matalapaine- ja korkeapainehöyryllä. ITC- keitto eli isoterminen vuokeitto perustuu siihen, että pesuvaihe tapahtuu samassa lämpötilassa kuin keitto, joten keittimessä vallitsee periaatteessa vakiolämpötila. ITC-keitto sopii erityisesti massoille, joita valkaistaan kloorittomilla tai vähäkloorisilla menetelmillä. (Ikäheimonen et al. 2000, 18.)

Keittimen pohjassa oleva kaavari ja pesulipeä helpottavat puskua. Kaavarin kierroslukua muuttamalla voidaan muuttaa puskettavan massan sakeutta ja määrää, jotka puolestaan vaikuttavat mm. valkaisun höyrynkulutukseen. Keitossa syntyvä mustalipeä pyritään ottamaan mahdollisimman tarkasti talteen ja se ohjataan talteenottolinjalle. Keittolipeä poistuu keittimestä paisuntasykloneihin, joiden tarkoituksena on poistaa höyry haihduttamolle siirrettävästä mustalipeästä. Liian perusteellinen pesu laimentaa mustalipeää ja vaikeuttaa siten talteenottolinjan toimintaa. (Seppälä et al. 2002, 75 – 88.)

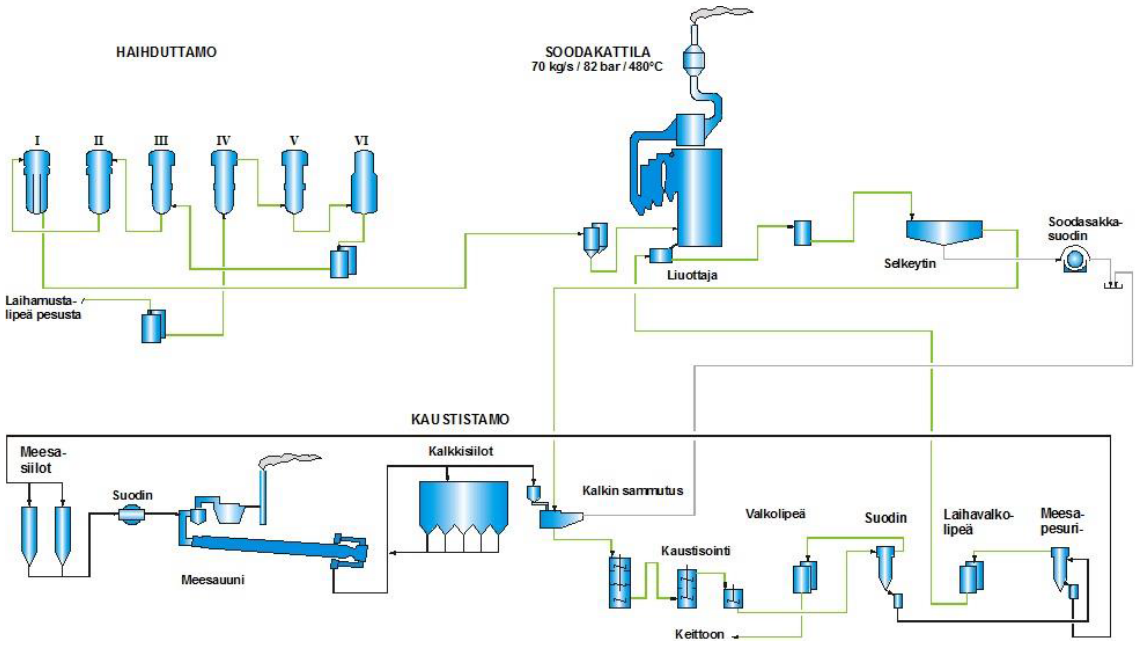
Keittimestä massa johdetaan pesemöön, happivaiheeseen, lajittamolle ja valkaisuun. Pesun tarkoituksena on poistaa sellusta kaikki keittolipeä ja liuennut ligniini sekä ylimääräiset epäpuhtaudet. (Bajpai 2010, 18.) Keitettyyn massaan jäänyt ligniini muodostaa kromoforeja eli väriä aiheuttavia yhdisteitä. Lähes kaikki kemiallinen sellu valkaistaan, sillä valkaisun ensisijaisena tavoitteena on parantaa sellun vaaleutta, laatua ja näin ollen nostaa tuotteen jalostusarvoa ja hintaa. (Stålhandske 2009, 3-5.)

Sellun valkaisu on kallis prosessi ja sillä on suuri vaikutus koko tehtaan vesi- ja lämpötaseeseen. (Cöpür 2007, 280.) Tämä johtuu siitä, että valkaisu on useimmiten monivaiheinen ja jokaisessa eri vaiheessa käytetään yleensä yhtä valkaisukemikaalia. Vaiheiden välissä massa pestään ja optimaalisten olosuhteiden saavuttamiseksi usein myös säädetään massan pH, lämpötila sekä sakeus sopivaksi seuraavaa valkaisukemikaalia varten. (Stålhandske 2009, 3-5.)

Pidempiä kuljetusmatkoja varten sellu kuivataan ja kuljetetaan asiakkaalle selluarkkeina, sillä märkä massa on altis erilaisten sienien aiheuttamille tuhoille varastoinnin aikana eikä veden kuljettaminen märän massan mukana ole tarkoituksenmukaista kuljetuskustannusten kannalta. Kuivausta varten massa johdetaan varastotorneihin, sekoitus- ja konesäiliöön, viirakaivoon ja edelleen kuivauskoneelle. Kuivauskoneella massa johdetaan ensin viiraosalle, sieltä puristinosalle ja edelleen kuivauskaappiin. Viiraosan jälkeen sellun loppukuiva-ainetavoite saavutetaan kuivauskaapissa. Kuivauskoneen tavoite on kuivata sellu ilmakuivaksi, eli noin 90 % kuiva-ainepitoisuuteen. Kuivauskaapin jälkeen rata leikataan arkeiksi ja sellu viedään varastoon asiakkaille toimitettavaksi. (Kilpeläinen 2000, 7.)

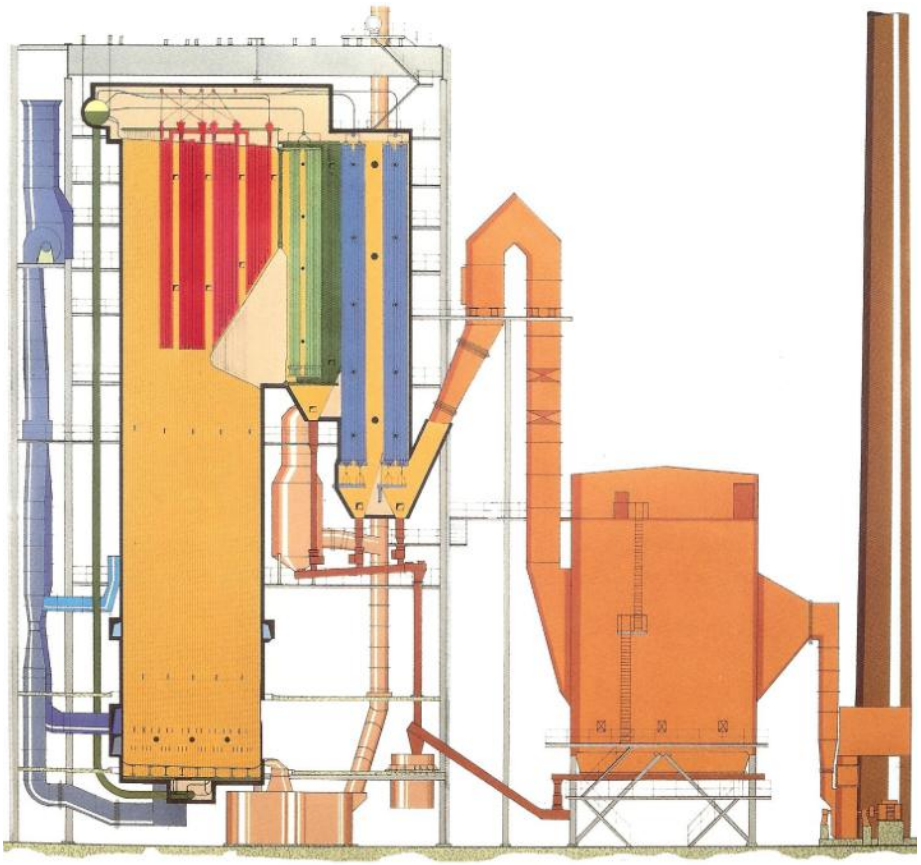
2.2 Lipeälinja

Lipeälinja on olennainen osa selluprosessia, sillä sen avulla käytetyt kemikaalit otetaan talteen ja samalla tuotetaan sivutuotteena sähköä ja lämpöä. Uusiutuvan energian arvon noustessa talteenottoprosessiin eli lipeälinjaan kiinnitetään entistä enemmin huomiota, sillä sen merkitys sellutehtaan kilpailukykyyn on merkittävä ja samalla kiinnostus laajentaa toimialaa biojalostamoiden suuntaan kasvaa. Tyypillisen modernin sellutehtaan talteenottolinjan periaatekaavio haihduttamosta kalkkikiertoon on esitetty kuvassa 3. (Mesfun & Toffolo 2013, 98.)



Kuva 3 Erään tyypillisen talteenottolinjan periaatekaavio. (Kivilahti 2014, 12.)

Mustalipeä saapuu keittämöltä talteenoton haihduttamolle laihalipeäsäiliöihin, joissa siitä erottuu pinnalle mäntysuopaa. Laihalipeäsäiliöiden suopa kuoritaan pinnalta ja pumpataan mäntyöljylaitokselle, jossa suopa keitetään hapolla mäntyöljyksi. Mustalipeä pumpataan laihalipeäsäiliöistä peräkkäisiin haihdutusyksiköihin, joissa nostetaan lipeän kuiva-aine noin 80 % ja syntynyt vahvalipeä poltetaan soodakattilassa. (Tapanen 2009, 17.) Kuvassa 4 on esitetty tyypillisen soodakattilan rakenne.



Kuva 4 Tyypillinen soodakattila. (Boiler Services and Inspections LLC 2014.)

Soodakattilan tarkoitus on muuntaa polttolipeän sisältämä rikki sellun keitossa vaikuttavaksi natriumsulfidiksi ja jäljelle jäävä natrium regeneroituvaksi natriumkarbonaatiksi. Samalla soodakattilan tulee polttaa mustalipeän orgaaninen aines siten, että syntyvä lämpö käytetään hyväksi reaktioihin, tuhkan sulatukseen, polttolipeän kuivatukseen ja veden höyrystämiseen sekä höyryn tulistamiseen. Kattilasta poistuva sula virtaa sularännejä pitkin liuotinsäiliöön, jossa se liuotetaan heikkoon valkolipeään ja tuloksena saadaan viherlipeää. Toisin sanoen, viherlipeä on mustalipeää, jonka orgaaninen aines on poltettu pois ja jonka sisältämät natriumin yhdisteet ovat hieman muuttuneet. (Seppälä et al. 2002, 155–162.)

Soodakattilalta tuleva viherlipeä johdetaan kaustistamolle, jossa yksi viherlipeän pääkomponenteista natriumkarbonaatti muutetaan yhdeksi valkolipeän pääkomponenteista natriumhydroksidiksi. Kaustisointilaitoksella siis tuotetaan sulfaattikeittoon tarvittava valkolipeä soodakattilan liuottajasta tulevan viherlipeän ja

meesauunista saatavan kalkin avulla. Sivutuotteena syntyy meesaa, laihaa valkolipeää ja pieni määrä liukenematonta kiintoainetta. Kaustistamon tärkein tehtävä on maksimoida valkolipeän aktiivisten keittokemikaalien pitoisuus sekä minimoida prosessille vieraiden aineiden, kuten raskasmetallien, pitoisuus. Prosessille vieraiden aineiden poistaminen on tärkeää erityisesti kiristyneiden ympäristövaatimusten vuoksi, sillä ne lisäävät valkaisussa tarvittavien kemikaalien kulutusta. (Lindell 2012, 24–25.)

Kaustisointiprosessi alkaa viherlipeän suodatuksella, jossa siitä erotetaan kiinteitä epäpuhtauksia kuten hiiltä. Liukoiset epäpuhtaudet, kuten erilaiset suolat, jäävät kemikaalikiertoon. Kiinteät epäpuhtaudet ovat prosessien tulevien virtojen mukana tulevia metalleja sekä soodakattilassa palamatonta hiiltä. Suodatus voidaan tehdä esimerkiksi paineistetulla precoat -kiekkosuotimella, kakkusuodatuksella tai ristivirtaussuotimella. Suodatustehokkuuden parantamiseksi käytetään suodattimen pinnalla usein meesaa, jota myös poistuu epäpuhtauksien mukana.

Suodatuksen jälkeen lipeään lisätään poltettua kalkkia, jolloin muodostuu sammutettua kalkkia eli kalsiumhydroksidia ja lämpöä. Sammutettu kalkki puolestaan reagoi viherlipeän sisältämän natriumkarbonaatin kanssa kaustisointiastioissa ja muodostaa natriumhydroksidia. Sammutusreaktio käynnistyy välittömästi, mutta vaatii aikaa tasapainon saavuttamiseksi. Osittain valmis kalkkimaito valuu sammuttajan pohjalle, missä pyörivä kola sekoittaa kalkkimaidon ja painaa sitä eteenpäin lajittimelle. Lajitinosassa pohjalle valuu hiekkaa ja ylipoltettua kalkkia, jotka lajitinruuvi poistaa. Sammuttimesta kalkkimaito johdetaan kaustisointiastioihin, joista muodostunut valkolipeä johdetaan valkolipeäsuotimelle kalsiumkarbonaatista muodostuneen meesasakan erotusta varten. (Lindell 2012, 26–27.)

Suodatettu valkolipeä pumpataan valkolipeäsäiliöön ja erotettu kalsiumkarbonaatti eli meesa jatkaa kalkkikiertoon. Meesa liuotetaan ensin veteen, johdetaan meesasäiliöön ja sieltä meesasuotimelle. Pesuvesi hyödynnetään soodakattilalla sulan liuottamisessa. Meesasuotimen tavoitteena on erottaa viimeiset alkalijäännökset kalsiumkarbonaatista ja nostaa sen kuiva-ainepitoisuutta meesauunissa polttamista varten. (Tapanen 2009, 20–21.)

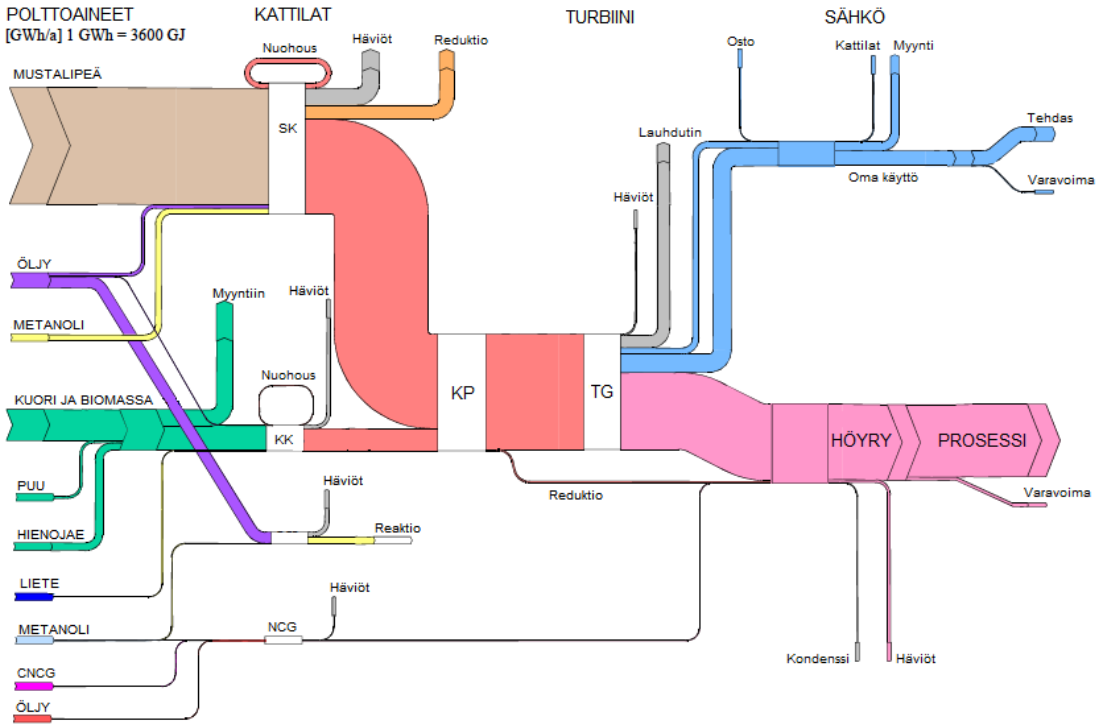
Meesauunin tehtävä on regeneroida kalsiumkarbonaatti kalsiumoksidiksi eli poltetuksi kalkiksi neljässä vaiheessa. Kuivausvyöhykkeellä meesan mukana tullut vesi haihtuu, lämmitysvyöhykkeessä meesa lämpenee reaktiolämpötilaansa, reaktiovyöhykkeessä kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi ja loppukäsittelyvyöhykkeessä poltettu kalkki jäähdytetään ja lajitellaan. (Lindell 2012, 29–30.)

2.3 Sulfaattisellutehtaan energiavirrat

Moderni sulfaattisellutehdas on energiaomavarainen laitos, joka käyttää raaka-aineenaan ainoastaan puuta. Sulfaattisellun suosio perustuu pitkälti siihen, että prosessin sisältämä suljettu talteenottokierto jalostaa sen osan raaka-aineesta joka ei päädy selluksi, edelleen lämmöksi, sähköksi, mäntyöljyksi, metanoliksi ja tärpätiksi tuoden prosessille huomattavaa kustannusetua. Puuraaka-aineen ohella ainut tehtaan tarvitsema kierron ulkopuolinen polttoaine on meesauunin käyttämä polttoaine.

Talteenottoprosessi pystyy tuottamaan selluprosessin mustalipeästä höyryä ja sähköä yli tehtaan oman tarpeen. Nykyaikainen talteenottoprosessi on niin tehokas, että kemikaalikierto pysyy tavoiteajossa täysin suljettuna ja sähköä pystytään myymään ulos jopa 40 %. (Vakkilainen & Kivistö 2010, 137.)

Sellutehtaan kuorimon tuottaman kuoren käyttötapa vaikuttaa merkittävästi tehtaan energiataseeseen, sillä kuorta voidaan käyttää esimerkiksi kuorikattilan ja kuorenkaasutuslaitoksen polttoaineena tai myydä eteenpäin. Soodakattilan ja kuorikattilan sisältämän modernin sellutehdasprosessin energiavirrat on esitetty kuvassa Kuva 55.



Kuva 5 Modernin sellutehtaan energiavirtojen Sankey -diagrammi. (Vakkilainen 2013, 22.)

Kuoren käyttötavan lisäksi tehtaan energiataseeseen vaikuttaa olennaisesti meesauunissa käytetty polttoaine. Meesauunissa on yleisesti poltettu joko polttoöljyä, maakaasua sekä tehtaan itse tuottamaa mäntyöljyä. Mäntyöljyn arvo on kuitenkin nykyisin niin korkea, että tehtaiden on kannattavampaa myydä se jatkojalostajille. Maakaasu pystytään puolestaan korvaamaan esimerkiksi kuorenkaasutuslaitoksen tuottamalla tuotekaasulla. Kuorenkaasutuslaitoksen lisääminen sellutehdasprosessiin tekee koko tehtaasta hiilidioksidineutraalin, sillä raaka-aine saadaan samasta puuraaka-aineesta tehtaan omalla kuorimolla sivutuotteena.

Mäntyöljy on lämmön ja sähkön jälkeen sellutehtaan merkittävin sivutuote. Mäntyöljy saadaan kuorimalla suopaa laihalipeästä, joten se on täysin uusiutuva tuote. Mäntyöljyn markkinoihin vaikuttaa olennaisesti se, että se voidaan tulkintatavasta riippuen laskea joko sellutehtaan tuotteeksi tai tähteeksi. Jos mäntyöljy lasketaan tähteeksi ja siitä tehdään esimerkiksi mäntyöljydieseliä, voidaan lopputuote laskea kahteen kertaan uusiutuvaksi. (Lundén 2012.)

Ennen kuin lipeä poltetaan kattilassa, siitä erotetaan kierron eri vaiheissa metanoli ja tärpätti. Metanoli ja tärpätti ovat peräisin puun sisältämistä uuteaineista, tarkemmin sanottuna pihkan helposti haihtuvista komponenteista. Metanolin erotusprosessin jälkeen se yleensä hyödynnetään soodakattilan tai meesauunin tukipolttoaineena, sillä sen lämpöarvo on korkea sen alhaiseen myyntihintaan verrattuna. Tärpätti myydään useimmiten eteenpäin.

Tärpätti on mäntyöljyn jälkeen sulfaattiselluprosessin merkittävin sivutuote. Sellutehtaalla erotettu tärpätti tislataan tehtaan sisällä tai kuljetetaan säiliöautoilla erillisiin tislaamoihin. Erotus tapahtuu tärpättidekantterin avulla. Dekantterissa tärpätti nousee vettä kevyempänä ja heikosti liukenevana veden pinnalle. Veden pinnalta se on mahdollista erottaa ylikaatona. (Kivilahti 2014, 14.)

Metanoli vapautuu lipeän haihdutuksessa ja se otetaan talteen likaislauhteina. Likaislauhteet puhdistetaan stripperissä, josta metanoli johdetaan polttoon tai nesteytetään metanolilaitoksessa. Nesteytettynä metanolia voidaan varastoida säiliöissä ennen polttoa esimerkiksi soodakattilassa. (Kokkonen 2011, 26.)

3 POLYSULFIDIPROSESSI

Saantolisäystä tavoitellessa sulfaattiprosessia on tutkittu ja kehitelty viime vuosina monin eri keinoin. Saantolisäyksen taloudelliset hyödyt ovat lisääntynyt tuotanto, vähentyneet kemikaalikustannukset ja pienempi raaka-ainekulutus. (Cöpür 2007, 280.) Tavoitteena on ollut pidentää keittovaiheen ligniininpoistoa valkaisun kuorman vähentämiseksi ja siten siirtyä klooripitoisista valkaisukemikaaleista ympäristöystävällisimpiin vaihtoehtoihin. Pidennetty ligniininpoisto kuitenkin heikentää massan laatua ja vähentää keiton saantoa. (Stigsson et al. 2000, 6.) Polysulfidin käyttäminen puolestaan lisää keiton saantoa, sillä sen ansiosta suurempi osuus puun hemiselluloosasta pysyy mukana kuiduissa, eikä liukene ligniinin mukana. (Kovasin 2013.)

Sulfaattikeitosta polysulfidikeittoon siirryttäessä keittoprosessi optimoidaan hyödyntämään keittolipeään lisättävää uutta kemikaalia, jonka avulla puuraaka-aine voidaan hyödyntää tehokkaammin. Saantoedun ohella noussut kuitusaanto parantaa materiaalitehokkuutta ja kasvattaa soodakattilan kapasiteettia, jonka ansiosta tuotantoa voidaan nostaa. (Kovasin 2013.)

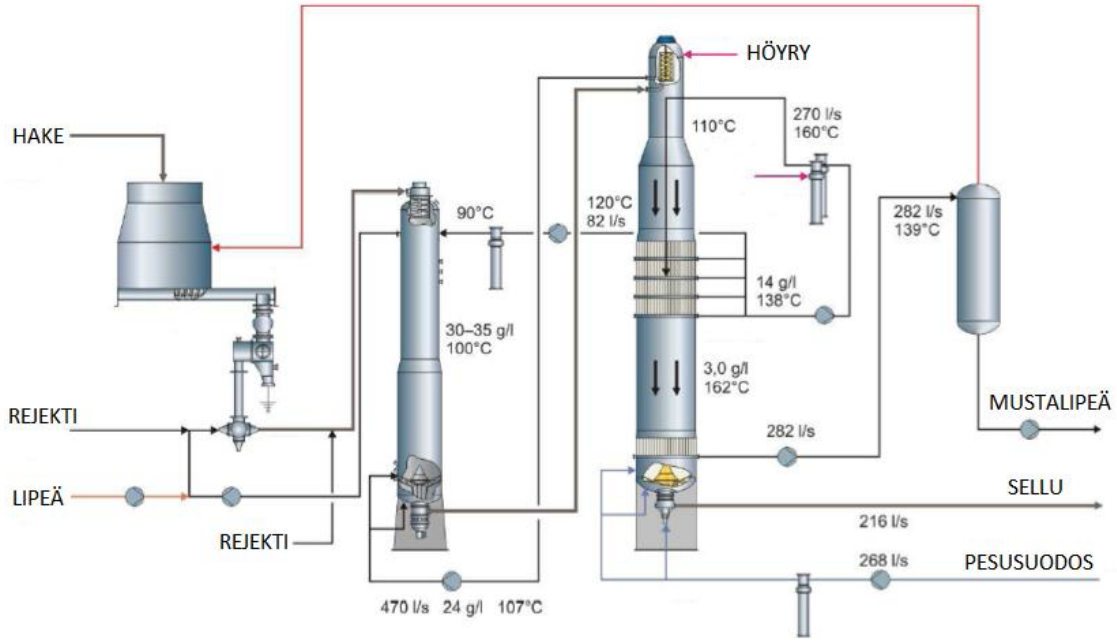
Polysulfidisellumassan odotetaan olevan vaikeammin valkaistavaa ja mustalipeän alentunut orgaanisen aineksen määrä todentunee vähentyvänä sähköntuotantona. Massan odotetaan heikentävän vedenpoistoa kuivauskoneella, mutta paperikoneella polysulfidimassa parantaa ajettavuutta ja säästää energiaa jauhautumalla nopeammin. (Kovasin 2013.) Polysulfidikeiton myötä sellun vetolujuus, vetojäykkyys ja palstautumislujuus paranevat arvioiden mukaan noin 5-10 % ja viskositeetin odotetaan putoavan tavanomaista sulfaattisellua alhaisemmaksi. (Cöpür 2007, 282–283; Partanen 2012b.)

Useat tutkimukset (muun muassa Copur & Tozluoglu 2007, Luthe & Berry 2005, Sturgeoff & Bernhardt 2002, Kleppe 1970) ovat todentaneet polysulfidin tuoman saantolisäyksen eri selluprosesseilla ja rikkipitoisuuksilla, sekä todenneet puulajien suurten ligniini- ja uuteainepitoisuuksien heikentävän polysulfidin tuomaa saantoetua. Saantolisäyksen on todettu havusellulla olevan noin 1-1,4 % syötetyn hakkeen määrästä jokaista lisättyä polysulfidiprosenttia kohti. (Luthe & Berry 2005, 27.) Turkkilaisen

mäntysellun keittoprosesseja vuonna 2007 tutkineet Copur & Tozluoglu todensivat polysulfidin nostavan kappalukua eli massan ligniinipitoisuutta noin 20 % verrattuna tavanomaiseen sulfaattiprosessiin. Tutkimuksessa ligniinipitoisuuden todettiin olevan aiemmin kirjallisuudessa mainittua suurempi ja tämän uskottiin vaikuttavan polysulfidin saantolisäykseen sekä luonnollisesti heikentävän massan vaaleutta.

3.1 Prosessimuutokset

Sulfaattiprosessiin tehtävät muutokset käsittävät keittolipeän muuttamisen polysulfidipitoiseksi, polysulfidin valmistusprosessin (MOXY) sekä keiton muuttamisen siten, että polysulfidin vaikutus voidaan maksimoida. (Hämäläinen 2013.) Polysulfidin vaikutus maksimoidaan tekemällä keittoprosessiin sekä putkisto- että ajotapamuutoksia kuvan 6 mukaisesti.



Kuva 6 Tyypillinen polysulfidikeittoprosessi. (Kovasin 2013.)

Polysulfidin tuoma saantolisäys riippuu pääasiassa puulajista, lisätyn rikin määrästä ja loppukappatavoitteesta muiden ajo-olosuhteiden ollessa optimaaliset. Samoissa ajo-olosuhteissa keitetyn sulfaatti- ja polysulfidimassan olennaisimmat erot ovat kappaluvussa ja saannossa. (Copur & Tozluoglu 2007, 909.)

Polysulfidin aiheuttama saantoetu johtuu pääasiassa siitä, että polysulfidi stabiloi glukomannaania ja lisäksi säilyttää selluloosa- sekä ksylaanipitoisuudet lähes sulfaattiprosessin tasolla. (Copur & Tozluoglu 2007, 909.) MOXY -prosessilla saadulla hapetetulla valkolipeällä saannon nousuksi on ilmoitettu 1,2 prosenttiyksikköä, jolloin polysulfidiannos on ollut 0,8-1,0 % kuivasta hakkeesta. (Virkola 1983a, 329.)

Polysulfidi voi hajota tiosulfaatiksi ja sulfaatiksi korkean lämpötilan tai korkean pH:n takia, joten tavanomaiseen sulfaattikeittoon nähden keittimen olosuhteita tulee muuttaa. (Kleppe 1970, 40.) Polysulfidia käytettäessä korkea sulfiditeetti yhdessä korkean alkaliannoksen kanssa voi heikentää delignifiointia ja siten nostaa kappalukua, sillä delignifioinnissa käytettävä hydroksidi voi vähentyä huomattavasti sen reagoidessa polysulfidin rikin kanssa. Näin ollen tavoitellessa matalaa kappaa polysulfidiprosessissa tulee keiton aktiivialkalimäärää nostaa tai sulfiditeettia laskea. (Cöpür 2007, 281–283.)

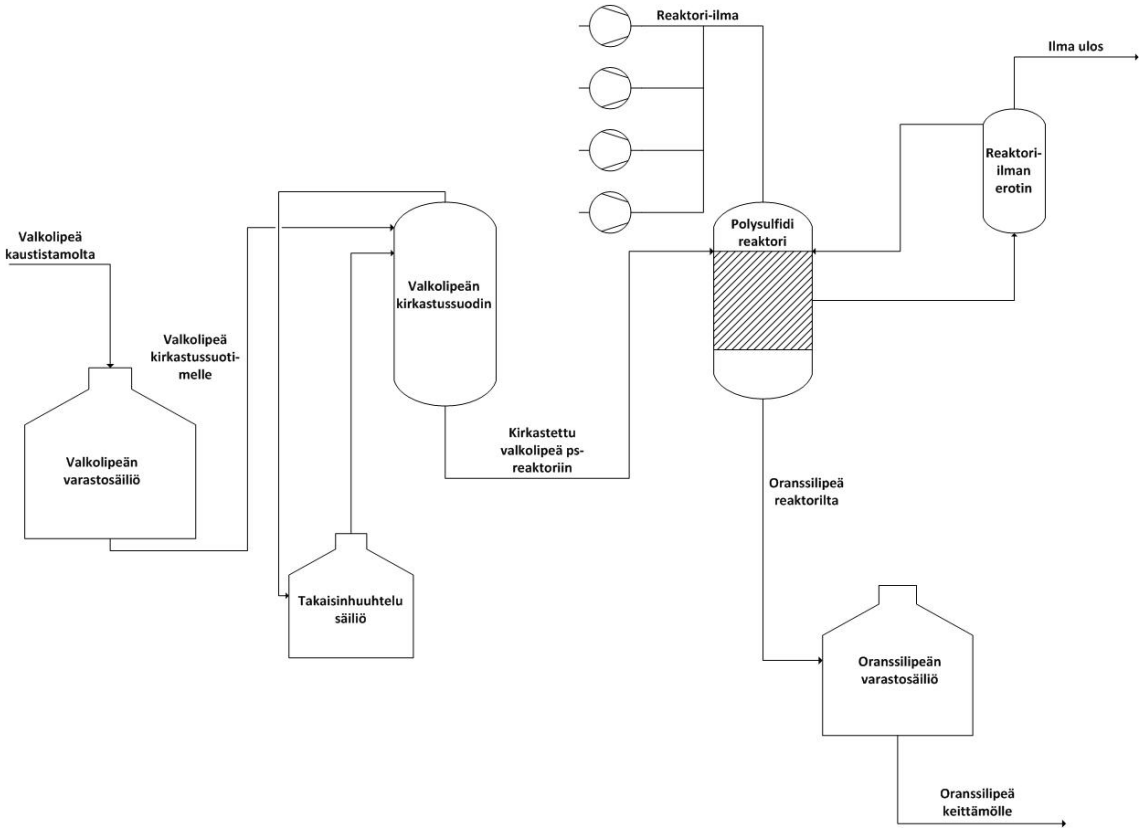
Prosessimuutoksen vuoksi kuitulinjalle tehdään ainoastaan ajomallimuutoksia ja lipeälinjalle lisätään vain polysulfidin valmistusprosessi. (Kovasin 2013.) Suolahapon lisäämisen vaikutusta massaan tutkitaan koeajoilla, ja sen uskotaan vähentävän saostumia sekä tehostavan valkaisua.

3.2 Polysulfidikeiton kemia

Kemiallisen sellun valmistuksessa saantoon vaikuttavat pääasiallisesti hiilihydraattihäviöt. Hiilihydraattipolymeerien pelkistävällä pääteryhmällä on tärkeä merkitys hiilihydraattihäviöiden muodostumisessa, ja purkautumisreaktioiden estämiseksi on välttämätöntä muuttaa pelkistävä pääteryhmä joko hapettamalla se karboksyyliryhmäksi polysulfidin avulla, pelkistämällä alkoholiryhmäksi tai pelkistämällä tiolaatiolla tioliryhmäksi H_2S-esikäsittelyllä. Polysakkaridit muuttuvat näillä käsittelyillä paremmin alkalisia oloja kestäviksi jolloin sulfaattikeiton saanto kasvaa. Tärkeimpänä sulfaatti- tai alkaliseen keittoon merkittävästi vaikuttavista lisäaineista mainitaan yleisimmin polysulfidi ja antrakinoni tai kinoidisen rakenteen omaavat muut yhdisteet. (Virkola 1983a, 327.) Kohdetehtaalla antrakinonia ei käytetä, sillä yhtiö haluaa noudattaa Euroopan Unionin antamia suosituksia.

Polysulfidiprosessissa osa keittoliuoksen sulfidirikistä hapetetaan polysulfidiksi eli ketjutetuksi alkuainemuotoiseksi rikiksi, joka estää hemiselluloosaa hajoamasta keittimessä yhdessä ligniinin kanssa. (Partanen 2012a.) Sellunkeitossa hiilihydraattien saantohäviö johtuu hiilihydraatin pelkistävän sokeripään päätepilkkoutumisreaktiosta, joka aiheuttaa polymeeriketjun hajoamisen sokeriryhmä kerrallaan. Polysulfidi pystyy hapettamaan pelkistävän sokeripään, jolloin päätepilkkoutumisreaktio estyy tai pysähtyy. Tutkimustulosten mukaan tehokas polysulfidireaktio edellyttää korkeaa keittokappaa, jota toisaalta rajoittaa valkaisu. (Kovasin 2013.)

Polysulfidi- eli oranssilipeä tuotetaan lipeälinjalla Mead Oxidation Process eli MOXY -prosessilla kaustistamon tuottamasta valkolipeästä, jonka periaate on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7 MOXY -prosessin periaatekaavio.

MOXY -prosessi aikaansaa polysulfidia sulfaattiprosessin jo kierrossa olevasta rikistä, eikä näin ollen lisää talteenottojärjestelmän epäorgaanista kuormaa tai rikkiemissiota.

MOXY -prosessissa valkolipeästä erotetaan ensin kiintoaine suodattimessa, jonka muodostaa antrasiittihiilellä täytetty torni. Torni puhdistetaan vastavirtahuuhtelun avulla. Valkolipeän hapetus tapahtuu reaktorissa, joka on täytetty hapetuskatalyyttiä sisältävällä, kosteudelta suojaavalla aineella käsitellyllä aktiivihiilellä. Aktiivihiili aktivoidaan ajoittain pesemällä reaktori muurahaishapolla. Hapettumisen jälkeen ilma erotetaan erotussäiliössä ja johdetaan ulos, ja syntynyt oranssilipeä, reaktio (1), pumpataan varastosäiliöön. (Virkola 1983a, 328–329; Kovasin 2013.)

$$(n+1)HS^- + \frac{n}{2}O_2 \rightarrow (n-1)OH^- + S_nS^{2-} + H_2O \quad (1)$$

$$2HS^- + 2O_2 \rightarrow S_2O_3^{2-} + H_2O \quad (2)$$

Valkolipeän sisältämästä sulfidista hapettuu 65 %, josta keskimäärin 67 % muuttuu polysulfidiksi. Polysulfidihapetuksessa muodostuu yhtä hapettunutta sulfidimoolia kohti mooli polysulfidia ja kaksi moolia NaOH:a, joten liuoksen alkalisuus kasvaa hapetuksessa. Sivureaktiona (2) noin kolmasosa reagoivasta rikkivedystä muodostaa tiosulfaattia, Valkolipeän sulfiditeetin tulee olla vähintään 30 %, jotta hapetetulla lipeällä aikaansaataisiin havaittava saannon lisä. (Virkola 1983a, 328–329; Kovasin 2013.)

4 HÖYRYNKULUTUS JA MAHDOLLISET MUUTOKSET OSASTOITTAIN

Tässä kappaleessa tarkastellaan kohdetehtaalla käytössä olevien osaprosessien ja komponenttien toimintaa ja höyrynkulutusta. Lämpö tuodaan prosesseihin joko primäärilämpönä, joka on voimalaitokselta saatavan tuorehöyryn käyttöä, tai sekundäärilämpönä, joka on prosesseista kuumana vetenä tai hönkänä talteen otettua lämpöä. (Virkola 1983b, 1472.) Primäärihöyrynkulutuksen lisäksi tutkimuksessa tarkastellaan osaston kokonaisenergiankulutuksen hahmottamiseksi myös sekundäärilämmönkulutusta. Sellutehdasprosessin kokonaisenergiankulutusta hahmotetaan lisäksi kohdeyksikön teknisen kuukausiraportoinnin lämmönkulutustietojen avulla.

Kohdetehtaalla höyry tuotetaan soodakattilalla polttaen lipeää ja metanolia sekä tarvittaessa maakaasua. Soodakattilan häiriötilanteita varten tehtaalla on myös kaasukattila. Meesauunin polttoaineena käytetään kaasutuslaitoksen tuottamaa tuotekaasua, jonka valmistukseen käytetään vain tehtaan oman kuorimon tuottamaa kuorta.

Systeemin eri vaiheiden käyttötalous on otettava huomioon jo suunnitteluvaiheessa, jotta voidaan määrittää optimaalinen prosessiteho sekä luoda edellytykset sille, että prosessia voidaan ajaa taloudellisesti optimaalisissa olosuhteissa. (Virkola 1983a, 702–704.) Kohdetehtaalla on tehty merkittäviä investointeja BAT -tekniikkaan, jolla toteutetaan Euroopan Neuvoston IPPC -direktiiviä ympäristön pilaantumisen ehkäisemiseksi ja vähentämisen yhtenäistämiseksi. Investointien ansiosta tehtaan päästöt ovat alhaisia, prosessi on verrattain energiatehokas ja asiakkaat voivat täyttää ympäristömerkkien asettamat vaatimukset omissa tuotteissaan. (Metsä Fibre 2012a.) Oikealla tavalla kohdistettujen investointien avulla voidaan täyttää osaprosessien tavoitteet mahdollisimman tehokkaasti, taloudellisesti, tasaisesti ja laatua huonontamatta. (Knowpap 2005.)

Energiatehokkaan sulfaattiselluteh taan suurimmat lämmönkuluttajat ovat veden haihdutus haihduttamolla, kuivauskoneen toiminta sekä prosessivirtojen lämmitys sellun keitossa. Polysulfidiprosessi vaikuttaa merkittävästi lipeäkiertoon, keittämöön sekä kuivauskoneeseen, mutta muilla osastoilla höyrynkulutuksen odotetaan pysyvän tavanomaista sulfaattiprosessia vastaavalla tasolla. Prosessi vaikuttaa muiden osastojen ominaiskulutuksiin lähinnä saantolisäyksen vuoksi. Alhainen tuotantomäärä tai noussut saanto vaikuttaa luonnollisesti höyryn ominaiskulutukseen tuotantotonnia kohti, sillä tuotantomäärä ei vaikuta systeemin peruskulutukseen ja häviöihin. (Ingruber & Kocurek 1985, 110.)

4.1 Puunkäsittely

Kohdetehtaan kuorimo tuottaa mänty- ja kuusihaketta omaan käyttöönsä sekä koivu- ja kuusihaketta viereiselle BCTMP -tehtaalle. Raaka-ainetarpeen tyydyttämiseksi molemmat tehtaat käyttävät myös ostohaketta. Kahden sellutehtaan hakevaatimusten ohella kuorimon tulee tuottaa raaka-aine myös kohdetehtaan kuorenkaasutuslaitokselle, joten myös kuoren tulee olla riittävän hyvää ja tasalaatuista. Tuotetusta kuoresta noin puolet käytetään kaasutuslaitoksen raaka-aineena ja puolet myydään eteenpäin, sillä kohdetehtaalla ei ole erillistä kuorikattilaa.

Tehtaalle saapuvan puun mukana tulee talvella vaihtelevia määriä lunta ja jäätä. Puut on sulatettava sulatuskuljettimella, sillä jäätyneen puun kuorinta ei ole sulattamatta mahdollista eikä kuoren ylimääräinen kosteus ole toivottua. Sulatus on järkevää toteuttaa lämpimällä vedellä, sillä lämmin vesi on usein joko ilmaista tai höyryä halvempaa. Höyrysulatus on lisäksi epävarmaa ja höyryä kuluu paljon. Sulatustavan valinta riippuu paikallisista oloista, saatavissa olevasta sekundäärilämmöstä, puun puhtausvaatimuksista ja jätevesitilanteesta. (Virkola 1983a, 181.) Kohdetehtaan kuorimo on kaksilinjainen ja puut sulatetaan kuumalla vedellä. Kuuma vesi valmistetaan matalapainehöyryllä. Energiatehokkuuden kannalta on järkevää tutkia, olisiko höyry mahdollista korvata kohtalaisin investoinnein esimerkiksi tehdasalueella lähellä sijaitsevien BCTMP -tehtaan tai vedenpuhdistuslaitoksen vesien jätelämmöllä.

Puiden sulatustavasta riippumatta kuorimo tarvitsee myös kuoripuristimia halutun kuoren kuiva-aineen saavuttamiseksi. (Virkola 1983a, 181.) Kuorimolla on kaksi

kuoripuristinta, joilla kuori kuivataan ajamalla matalapainehöyryä puristusteloihin. Kaasutuslaitoksen vaatiman kuoren kuiva-ainepitoisuuden ja myyntikuoren hintamääritelmien vuoksi molemmat kuoripuristimet ovat jatkuvassa ajossa. Kuorimon lämpimiä jakeita voidaan käyttää myös kaukolämpönä, jolloin kaukolämmönvaihtimeen ajetaan myös matalapainehöyryä.

Polysulfidiprosessi ei vaikuta merkittävästi puunkäsittelyn kokonaishöyrynkulutukseen, sillä prosessin lämmönkulutus pysyy samana eivätkä kokonaiskuorintamäärät muutu prosessimuutoksen vuoksi merkittävästi. Puunkäsittelyn ominaiskulutus tehtaan tuottamaa sellutonnia kohti kuitenkin laskee hieman, koska samasta puuraaka-ainemäärästä saadaan enemmän sellua.

4.2 Kaasutuslaitos

Meesauunin öljyn tai maakaasun kulutus voidaan korvata kaasutetulla kuorella. Kuoren kaasutuslaitos edistää uusiutuvan energian käyttöönottoa ja vähentää energiantuotannon kasvihuonekaasupäästöjä, sillä raaka-aineena käytetään vain puun kuorinnassa syntyvää kuorta ja kaasuttimen pohjatuhkaa voidaan hyödyntää joko metsälannoitteena tai teiden rakenneaineena. Kaasutuslaitos edistää koko sellutehdasprosessin energiatehokkuutta myös hyödyntämällä tehtaan matalalämpöisiä vesiä. Laitoksen arvioidaan vähentävän hiilidioksidipäästöjä noin 60 000 tonnia vuodessa, joten normaaliajossa sellutehdas toimii hiilidioksidipäästöttömänä prosessina. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2010.)

Ennen kaasutusta kuori kuivataan viirakuivaimella, joka käyttää lämmityskiertoonsa matalapainehöyryä 1 – 4 kg_{hmp}/s riippuen kuoren kosteudesta. Optimaalisessa ajossa kuivuria operoidaan ainoastaan sellutehtaan ylijäämälämmöllä. Höyrynkulutukseen merkittävästi vaikuttavan kuoren kosteuspitoisuuden hallinta on vaikeaa, sillä kuori varastoidaan ulkoilmassa. Kuoren vaihtelevan kosteuden lisäksi tuloilman kosteus tekee optimaalisesta operoinnista haastavaa, sillä tuloilmaa ei kuivata ennen kuivuria. Kaasutuslaitoksen tuotekaasun tarve on kuitenkin maakaasutarvetta suurempi, sillä tuotekaasun lämpöarvo on maakaasua alempi ja toisaalta kohdetehtaan meesauunin ominaislämmönkulutus on melko korkea. (Hämäläinen 2013.)

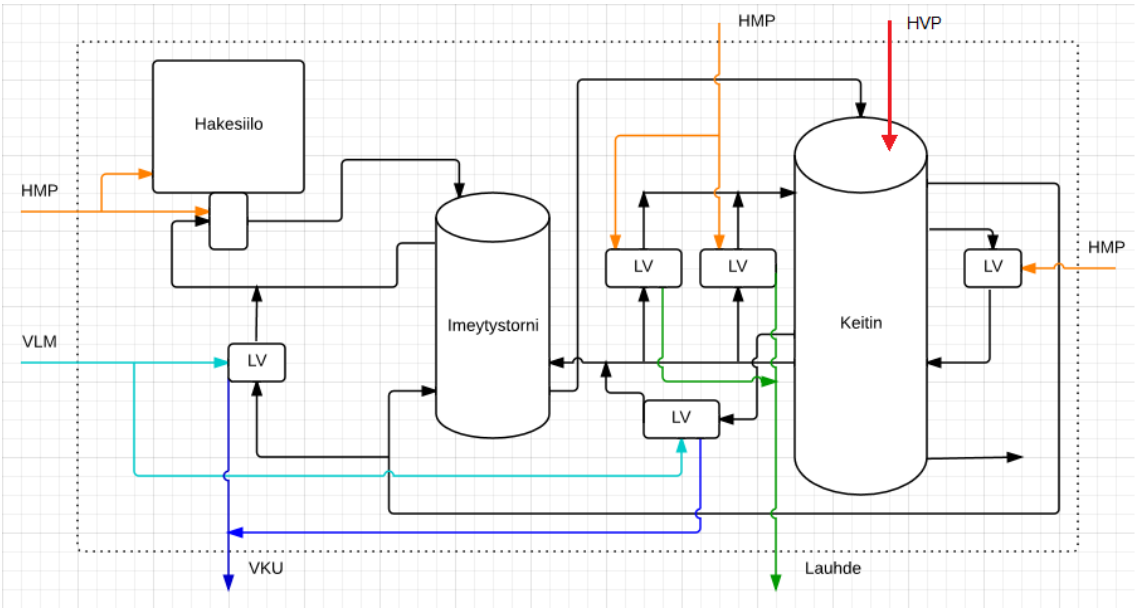
Polysulfidiprosessi ei vaikuta kaasutus- tai kuorenkuivausprosessin höyrynkulutukseen, sillä vaikutukset kaustisointiin ja meesauuniin ovat vähäisiä. Tehtaan tuottaessa enemmän sellua, myös kaasutuslaitoksen höyrynkulutus tehtaan selluntuotantoa kohti vähenee.

4.3 Keittämö

Kohdetehtaalla sellua keitetään isotermisenä vuokeittona, ja sellunkeittoprosessi alkaa kuljettamalla hake varastokasalta hakesiiloon ja edelleen syöttökierrolla imeytystorniin. Hakesiilosta purettavaa haketta pasutetaan, koska hakkeessa oleva ilma hidastaa keittymistä. (Seppälä et al. 2002, 78.) Pasutus tapahtuu syöttämällä matalapainehöyryä hakesiilon pohjalle, sen jälkeiseen syöttökaulaan ja tarpeen vaatiessa rejektiputkeen. Imeytystornista hake siirretään höyry-nestefaasikeittimeen. Keittimestä poistuvan mustalipeän painetta lasketaan, jolloin noin 160 °C mustalipeän paisuntahöyry hyödynnetään hakkeen pasutuksessa ja samalla haihduttamolle menevän lipeän kuiva-ainepitoisuus kasvaa.

Höyry-nestefaasikeittimessä hake lämmitetään keittimen huipussa suoralla välipainehöyryllä lähelle keittolämpötilaa, ja tarkempi säätö tehdään nestetilassa epäsuorasti. Nostovaiheen nopeus määräytyy höyryn tuotannosta ja hakkeen imeytysasteesta. Ligniinin liukeneminen alkaa 140 °C lämpötilassa, ja sen jälkeen lämpötilaa voidaan nostaa mahdollisimman nopeasti. Jos valkolipeä ei ole imeytynyt kunnolla hakkeeseen ja nostonopeus on liian suuri, kuituuntuminen jää epätäydelliseksi. (Seppälä et al. 2002, 79,87.)

Keittimeltä takaisin imeyttimeen tulevan paisuntalipeän lämpötilaa hallitaan jäähdyttimellä, joka käyttää lämmintä vettä. Keittokierrossa on lisäksi kaksi lämmönvaihdinta, jotka käyttävät välipainehöyryä. Syöttökiertoon menevää siirtokiertolipeää jäähdytetään paisuntakierron jäähdyttimessä lämpimän veden avulla. Massatehtaan alkaliset ja happamat höngät johdetaan hönkäpesurille, joka kuluttaa pesuveteen lämmintä vettä. Kohdetehtaan keittämön periaatekaavio ja energiavirrat on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8 Keittämön periaatekaavio.

Keittämö kuluttaa lämpöä sellutehtaan osaprosesseista toiseksi eniten. Keittämön höyrynkulutukseen vaikuttavat merkittävimmin haluttu keittolämpötila sekä keittimeen syötettävän hakkeen ja keittoliuoksen lämpötilat, joihin puolestaan vaikuttavat muun muassa puun tiheys, kosteus ja hakkeen mahdollinen pakkautuminen. Puskun ajoituksella ja määrällä voidaan myös vaikuttaa paljon keittimen energiataseeseen ja näin ollen höyrynkulutukseen. (Ingruber & Kocurek 1985, 110.)

Keittämöllä voidaan säästää höyryä keittämällä sellua korkeammalla alkalisuhteella, sillä siten keittolämpötila saavutetaan aiemmin ja mustalipeän haihdutustarve vähenee. (Ingruber & Kocurek 1985, 110.) Polysulfidikeitossa alkaliväkevyys on sulfaattikeittoa korkeampi, joten kuluva lipeämäärä on alhaisempi. Prosessien yksilöllisyyden vuoksi polysulfidin optimaaliset ajoparametrit vaativat käytännön kokemusta. (Hämäläinen 2013.) Esimerkiksi imeytyslämpötilan alentaminen vähentää matalapainehöyryn ominaiskulutusta ja toisaalta mahdollinen keittolämpötilan nostaminen lisää välipainehöyryn ominaiskulutusta keittämöllä. Keittolämpötilan nostaminen lisää toisaalta myös mustalipeästä hyödynnettävän sekundäärilämmön määrää.

Polysulfidiprosessi ei vaikuta keittoprosessin höyrynkulutukseen, jos keiton parametreja ei muuteta. Tällöin ominaiskulutus kuitenkin laskee, koska keiton saanto paranee. Kirjallisuuden mukaan polysulfidin vaikutuksen optimointi kuitenkin tarkoittaa

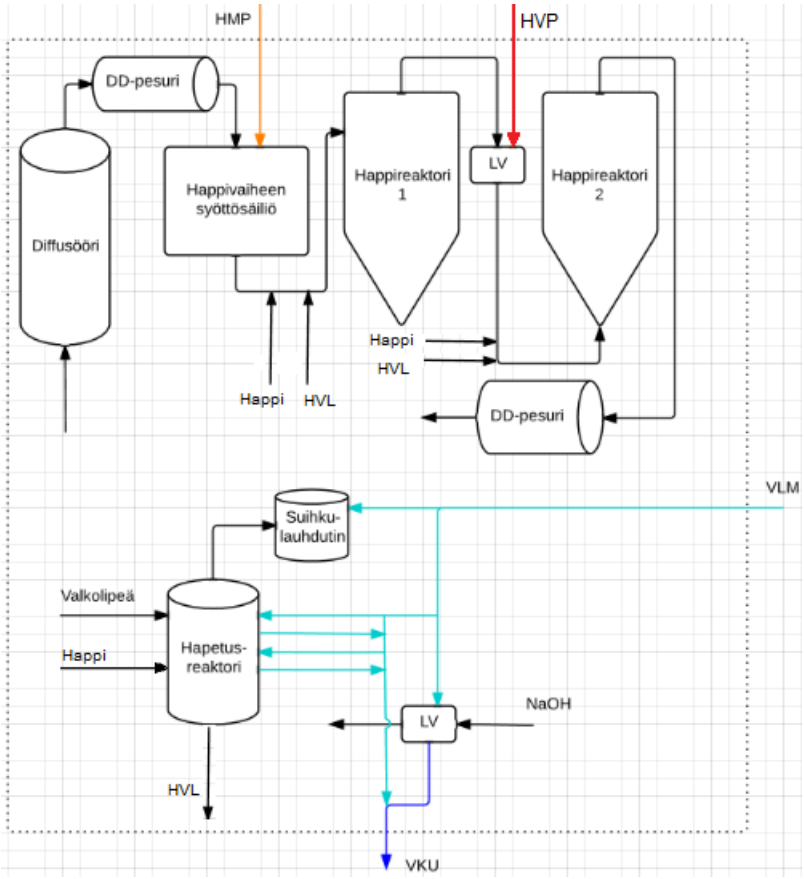
keittimen lämpötilaprofiilin muuttamista, joten keittämön höyrynkulutus tulee muuttumaan olennaisesti.

4.4 Pesemö, happivalkaisu, lajittamo ja valkaisimo

Massa johdetaan keittimeltä pestäväksi diffusööriin ja pesemön DD -pesurille, jotka käyttävät lämpöä vain kuuman veden muodossa. DD – pesurilta massa johdetaan happivaiheen syöttösäiliöön, joka kuluttaa matalapainehöyryä tavoitelämpötilan saavuttamiseksi. Happireaktoreiden välillä massaa voidaan tarvittaessa lämmittää korkeapainehöyryllä.

Pesemön operointi on tärkeää energiatehokkuuden kannalta, sillä pesuhäviö vähenee pesuveden määrän eli laimennuskertoimen kasvaessa. Pesutehoa puolestaan lisätään nostamalla laimennusta, jolloin haihdutustarve ja näin ollen kustannukset sekä kuuman veden tarve lisääntyvät. Laimennuksen ja höyrynkulutuksen optimointiin sekä käyttökustannuksiin vaikuttavat luonnollisesti myös muut olosuhteet, kuten tehtaan haihduttamon lämmönkulutus ja kapasiteetti. (Bajpai 2010, 17–20.)

Pesemön jälkeen massaan lisätään alkalia, joka on kohdetehtaalla hapetettua valkolipeää. Valkolipeä hapetetaan, jotta sen sisältämä rikki ei kuluttaisi turhaa happea ja eikä massan laatu heikkenisi. Hapetusreaktiossa valkolipeän sisältämä rikki eli natriumsulfidi hapettuu natriumtiosulfaatiksi sekä natriumsulfaatiksi. (Karhu 2012, 6.) Hapetetun valkolipeän valmistukseen käytetään runsaasti lämmintä vettä. Pesemön, happivaiheen ja hapetetun valkolipeän valmistuksen periaatekaavio ja energiavirrat on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9 Happivaiheen ja hapetetun valkolipeän valmistuksen periaatekaavio.

Pesemöltä massa johdetaan kaksivaiheiseen happidelignifiointiin, joka jatkaa keitossa alkanutta ligniininpoistoa. Korkean kapan ja kaksivaiheisen happivaiheen käyttäminen ligniinin erotuksen tehostamiseksi vähentää keiton lämmönkulutusta ja parantaa kokonaissaantoa. (Vakkilainen & Kivistö 2010, 93.)

Happivaiheen lämmönkulutukseen vaikuttavat massan sakeuden ja lämpötilan lisäksi myös pesuveden lämpötila, pesutehokkuudet vaihetta edeltävässä ja sen jälkeisessä pesussa ja pesun laimennuskerroin. (Virkola 1983b, 1481.) Happivaihe käyttää matalapainehöyryä happivaiheen syöttösäiliöön happireaktoreiden lämpötilan hallitsemiseksi tavoiteajon aikana. Happireaktoreiden välillä on lisäksi lämmönvaihdin, joka käyttää korkeapainehöyryä.

Happivaiheen DD -pesurilta massa saapuu lajittamoon, jossa massasta poistetaan kuituuntumaton oksa- ja tikkujae sekä muita epäpuhtauksia. Lajittelun suorittaminen ennen viimeistä pesuvaihetta on vesitalouden kannalta edullista, joten ennen valkaisua

massa pestään lajittamon DD -pesurilla. Suljetun, vastavirtaan toimivan kiertovesisysteemin käyttö tarkoittaa myös sitä, että kiertolipeän lämpötila lajittamossa nousee ja valkaisimoon menevä pesuhäviö kasvaa. (Virkola 1983a, 739.)

Täysvalkaistua massaa valmistettaessa on valkaisua jatkettava valkaisukemikaaleja käyttäen. (Virkola 1983b, 1481.) Kohdetehtaan valkaisu on kolmivaiheinen ECF elemental chlorine free -prosessi, joka käyttää alkuainekloorin sijasta klooridioksidia. Klooridioksidi hajoaa vesiliuoksenakin herkästi epäpuhtauksien tai lämpötilannousun vaikutuksesta, joten kuljetus maanteitse on kielletty ja klooridioksidivesiliuos on valmistettava tehtaalla. Reaktorissa tarvittavan lämpötilan ylläpitämiseksi valmistusprosessissa on lämmönvaihdin, joka kuluttaa matalapainehöyryä. Kloraatin liuotukseen tarvitaan myös matalapainehöyryä ja kuumaa vettä. Valkaisussa D_0- eli ensimmäinen klooridioksidivaihe poistaa valtaosan ligniinistä, ja sen jälkeen prosessi jatkuu EOP- reaktorissa eli hapella ja peroksidilla tehostetulla alkalivaiheella. Alkalista uuttovaihetta seuraa D_1- eli viimeinen klooridioksidivaihe. (Stålhandske 2009, 34.)

D-vaiheissa tavoiteltu lämpötila on noin 70–80 °C, joten valkaisu kuluttaa paljon lämpöä. Kolmivaiheinen valkaisu käyttää matalapainehöyryä D_0-, D_1- ja EOP -vaiheiden pesureiden pesuvesien lämmittämiseen. Matalapainehöyryn avulla valmistetaan lisäksi kylmää vettä, jota käytetään klooridioksidin imeytykseen. Valkaisussa suurempi sakeus vähentää lämmitettävää vesimäärää ja kemikaalikulutusta, sillä vaiheet tehoavat paremmin. (Virkola 1983b, 1479.) Polysulfidin lisäämisen ei kuitenkaan odoteta vaikuttavan massan sakeuteen. (Hämäläinen 2013.)

Sellun täysvalkaisu edustaa huomattavaa osaa koko sellutehtaan energiakustannuksista., sillä primäärilämmön lisäksi valkaisu kuluttaa moninkertaisen määrän sekundäärilämpöä noin 40 °C lämpöisenä vetenä. Suoran matalapainehöyryn ja lämpimän veden lisäksi valkaisussa käytetään runsaasti kuumaa vettä, joka lämmitetään epäsuorasti höyryllä. (Virkola 1983a, 865–866.)

Valkaisun lämmöntarpeeseen vaikuttavat paitsi käytettävät lämpötilat, myös vaiheiden lukumäärä, vesien kierrätysaste ja vaiheiden sakeudet. Viimeisten vaiheiden ajo kuumimpina ja vesien kierrätys vastavirtaan niin, että lämpötilaerot eri vaiheiden välillä ovat mahdollisimman pieniä ja lämpötilat alkuun päin alenevia, on kokonaiskulutuksen

kannalta edullisinta. (Virkola 1983a, 865–866.) Valkaisun lämmönkulutuksen optimoimisessa olennaista on pyrkiä tuomaan massa valkaisuun mahdollisimman kuumana, jottei sitä tarvitse erikseen lämmittää valkaisuvaiheiden välillä. (Hämäläinen 2013.)

Kirjallisuuden mukaan polysulfidiprosessi ei vaikuta massan pesuun tai lajitteluun liittyviin ominaisuuksiin. Polysulfidin lisääminen ei myöskään vaikuta ligniinin liukenemisnopeuteen, joten varsinainen delignifioituminen valkaisussa on täysin verrattavissa tavanomaiseen sulfaattikeittoon. (Virkola 1983a, 329.) Tällöin kokonaiskulutus kuitenkin nousee, koska tehtaan tuotantomäärä kasvaa. Kirjallisuuden mukaan saadussa sellussa on enemmän ligniiniä, jolloin valkaisu vaikeutuu eli myös ominaiskulutus valkaisun tuottamaa sellutonnia kohden nousee.

4.5 Kuivaamo

Sellun toimittaminen asiakkaille mahdollisimman kuivana on sekä kustannustehokasta että tärkeää tuotteen laadun kannalta, sillä kosteus altistaa massan mikro-organismeille. (Bajpai 2010, 18.) Kuivauskoneen energiankulutus riippuu pääasiallisesti puristinosan operoinnista, lämmön talteenoton tehokkuudesta sekä sekundäärilauhteiden hyödyntämisestä. (Vakkilainen & Kivistö 2010, 56–57.) Sekundäärilauhteiden hyödyntäminen on merkittävä tekijä energiatehokkuuden kannalta, sillä lämmön talteenoton puuttuessa myös haihdutusteho menetetään. Kuivauskoneen viiran lämpötilan hallitsemiseksi kierrätysilman lämpötilaa tulee kontrolloida, sillä viiran lämpötilan noustessa myös radan laatu heikkenee. (Kouris & Kocurek 1990, 121.)

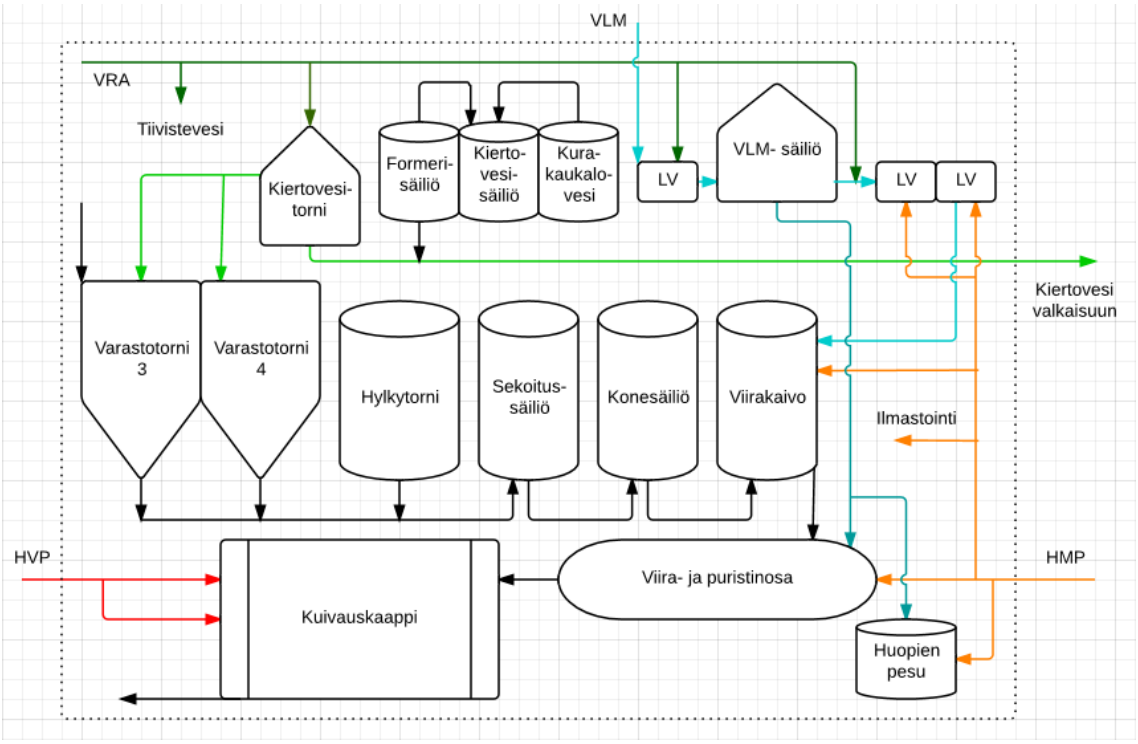
Valkaistu massa johdetaan varastotorneihin, joista se pumpataan sekoitus- ja konesäiliöiden kautta viirakaivoon. Viirakaivosta massa siirretään viiraosan perälaatikolle. Viiraosan jälkeen massaa kuivataan puristinosassa, ja loppukuiva-ainetavoite saavutetaan puristinosan jälkeisessä kuivauskaapissa. Kuivaamon periaate on esitetty kuvassa 10.

Kuivauskoneella on huomattavasti taloudellisempaa poistaa suurin osa vedestä ensin märässä päässä rainaamalla ja puristamalla, ja vasta sen jälkeen haihduttaa loput vedestä kuivatusosassa. (Seppälä et al. 2002, 139.) Viiraosan tulee saattaa raina riittävän

korkeaan kuiva-ainepitoisuuteen, jotta rainan siirto viiralta puristimelle on helppoa ja puristinosalla saavutetaan hyvä ajettavuus. (Knowpap 2005.) Kohdetehtaalla viiraosalla käytetään matalapainehöyryä, jotta veden viskositeetti pienenee ja täten veden poistuminen helpottuu.

Puristimien jälkeisen kuiva-ainetason nousu yhdellä prosentilla pienentää kuivatusosan höyrynkulutusta noin 3-4 %. (Knowpap 2005.) Veden haihduttaminen kuivatusosalla maksaa huomattavasti enemmän kuin mekaaninen vedenpoisto. (Virkola 1983a, 800.) Alhainen pH (Virkola 1983a, 780) ja korkea lämpötila (Hämäläinen 2013) helpottavat vedenpoistoa massasta. Puristimien jälkeisen kuiva-ainepitoisuuden nostamista rajoittaa mm. puristinpaineen nostamisen aiheuttama rainan oheneminen ja huopien kuluminen. Korkeita puristinpaineita käytettäessä puristin on myös herkkä värähtelyille. Optimaalisen kuiva-ainetason lisäksi puristusosan on tärkeää aikaansaada riittävä märkälujuus, jotta rainan siirto kuivatusosalle onnistuu ilman katkoja. (Knowpap 2005.)

Viiraosan höyrylaatikon lisäksi kohdetehtaalla käytetään matalapainehöyryä viirakaivon ja lämminvesisäiliön lämmönvaihtimille, huopien kemikaalipesusäiliön lämmitykseen sekä ilmastointiin. Viiraosan höyrylaatikossa lämmönvaihtimen tarkoituksena on jäähdyttää höyryä niin, että se kuitenkin pysyy tulistettuna. Viirakaivoon menevä lämmin vesi lämmitetään sekä kuivaimen lauhteella että matalapainehöyryllä lyhytkierron lämmönsiirtimessä. Lämminvesisäiliön vesi otetaan ensisijaisesti haihduttamon lämminvesisäiliöltä ja toissijaisesti raakavesilinjalta. Kuivaamon kiertovedet hyödynnetään valkaisun D1-vaiheessa. Kohdetehtaan kuivaamon periaate ja energiavirrat on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10 Kuivaamon periaatekaavio.

Kuivatusosassa haihdutetaan massasta vettä sen kiehumispistettä alemmissa lämpötiloissa. Haihduttaminen vaatii lämmön johtamista massaan ja syntyneen vesihöyryn johtamista pois tuuletusilman mukana. (Seppälä et al. 2002, 142.) Kuivauskaapin lämmönkulutukseen vaikuttavat lisäksi seuraavat seikat: ilma joka kuljettaa höyrystyneen veden pois huuvasta on lämmitettävä, lämmön talteenottotehokkuus vaihtelee ja koneella on säteily- yms. häviöitä. Lämmintä vettä puolestaan tarvitaan mm. viirasuihkuille, perälaatikon suihkuille, huovan ja viiran pesusuihkuille sekä kiertovesijärjestelmään. Kuivaamo on sellutehtaan kolmanneksi suurin lämmönkuluttaja. (Virkola 1983b, 1482.)

Kuivauskoneen lyhyeen vesikiertoon kuuluvat viira- ja puristinosat. Viira- ja puristinosien puhtaat vedet johdetaan kiertovesisäiliöön ja kuitupitoiset vedet viirakaivoon perälaatikolle tulevan massan sakeuden säätöön. Lyhyen kierron vakaus on tärkeää prosessin kannalta, sillä veden virtausmäärien muutokset ja lämpötilojen heilahtelut tekevät koko prosessista vaikeasti hallittavamman. Osa viiraosalta erottuneesta vedestä johdetaan viirakaivolta pitkään vesikiertoon, jonka tehtävänä on tasata massan sakeusvaihteluja kuivauskoneen alkupäässä ja toimia kuivauskoneen

vesivarastona muun muassa häiriötilanteissa. Primäärikierron laimennusvettä eli 0-vettä varastoidaan kiertovesitorniin, josta sitä käytetään kuvan 10 mukaisesti muun muassa varastotornien laimennuksiin. (Hautala 2011, 24–25.)

Kohdetehtaalla kuivatusosan haihdutusteho säädetään muuttamalla kaapin korkeapainehöyryn painetta säätöventtiilillä. Korkeapainehöyryä voidaan ajaa kaappiin myös tulipalon sammuttamiseksi. Polysulfidimassan kuidut ovat hemiselluloosan ansiosta vahvempia, joten massaa odotetaan kuivattavan ohuempana kerroksena.

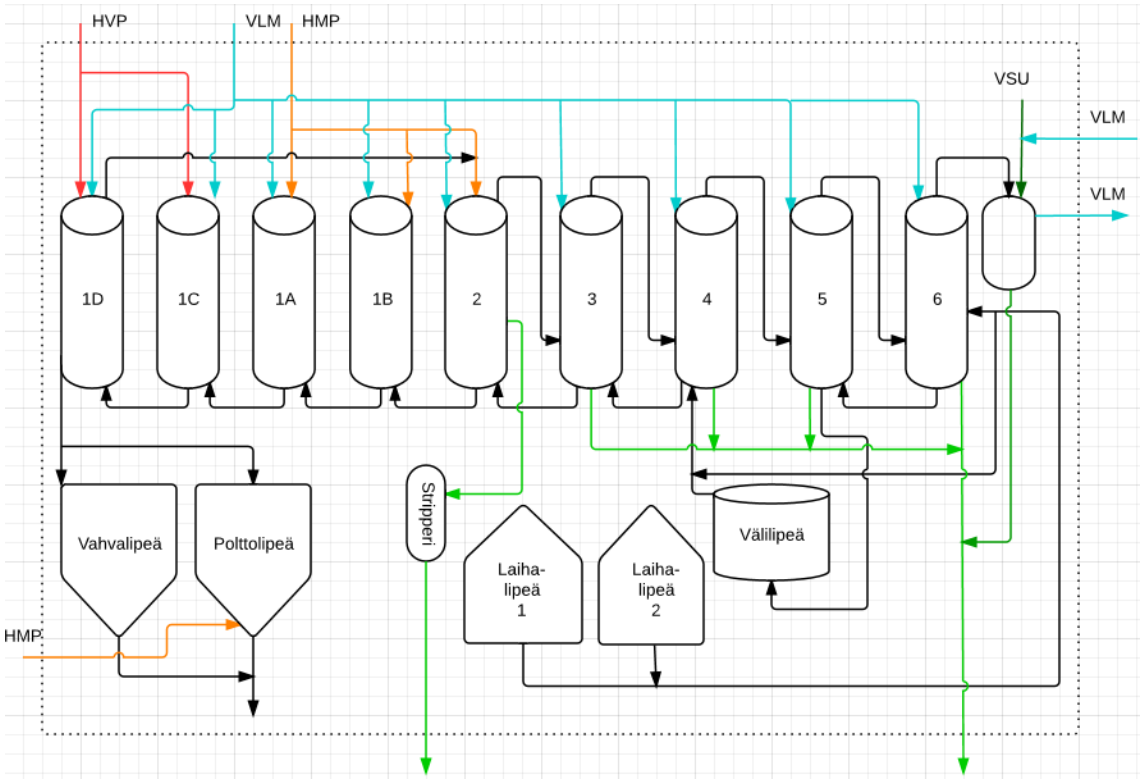
Kuivauskoneen odotetaan tarvitsevan aiempaa enemmän kuivaushöyryä kuivauskaappiin, sillä puristimen jälkeisen kuiva-aineen arvioidaan olevan 0,5-1 prosenttiyksikköä alempi ja vedenpoiston odotetaan heikentyvän polysulfidimassalla. (Kovasin 2013.) Heikompi vedenpoisto vaatii kuivauskoneella ajomallimuutoksia ja lisäksi keiton parantunut saanto kasvattaa tehtaan selluntuotantomäärää, joten sekä kuivaamon kokonaiskulutuksen että ominaiskulutuksen odotetaan kasvavan.

4.6 Haihduttamo ja mäntyöljylaitos

Haihduttamon energiankulutuksen merkittävimmät tekijät ovat haihdutusvaiheiden lukumäärä sekä mustalipeän kuiva-ainepitoisuus haihdutusta ennen ja sen jälkeen. (Vakkilainen & Kivistö 2010, 96.) Kohdetehtaalla haihdutusvaiheita on seitsemän ja polttolipeän kuiva-ainetavoite on 80 %.

Laihalipeä saapuu laihalipeäsäiliöihin, josta se pumpataan haihdutusyksikköön 6. Yksiköstä 6 lipeä etenee yksikköön 5 ja välilipeäsäiliön kautta yksikköihin 4, 3, 2, 1B, 1A, 1C ja 1D sekä edelleen vahva- ja polttolipeäsäiliöihin kuvan 11 mukaisesti.

Mustalipeän lopullinen kuiva-ainepitoisuus saavutetaan yksiköissä 1D ja 1C välipainehöyryllä, jolloin lipeän lämpötila on korkea, viskositeetti alhainen ja sitä voidaan pumpata. (Vakkilainen & Kivistö 2010, 96.) Yksiköihin 1A, 1B ja 2 syötetään matalapainehöyryä, ja alkupään yksiköissä (3, 4, 5, 6) käytetään veden haihduttamiseen ainoastaan edeltävien yksiköiden hönkää. Jokaiseen yksikköön on mahdollista ajaa lämmintä vettä pesua varten. Haihduttamon periaatekaavio ja energiavirrat on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11 Haihduttamon periaatekaavio.

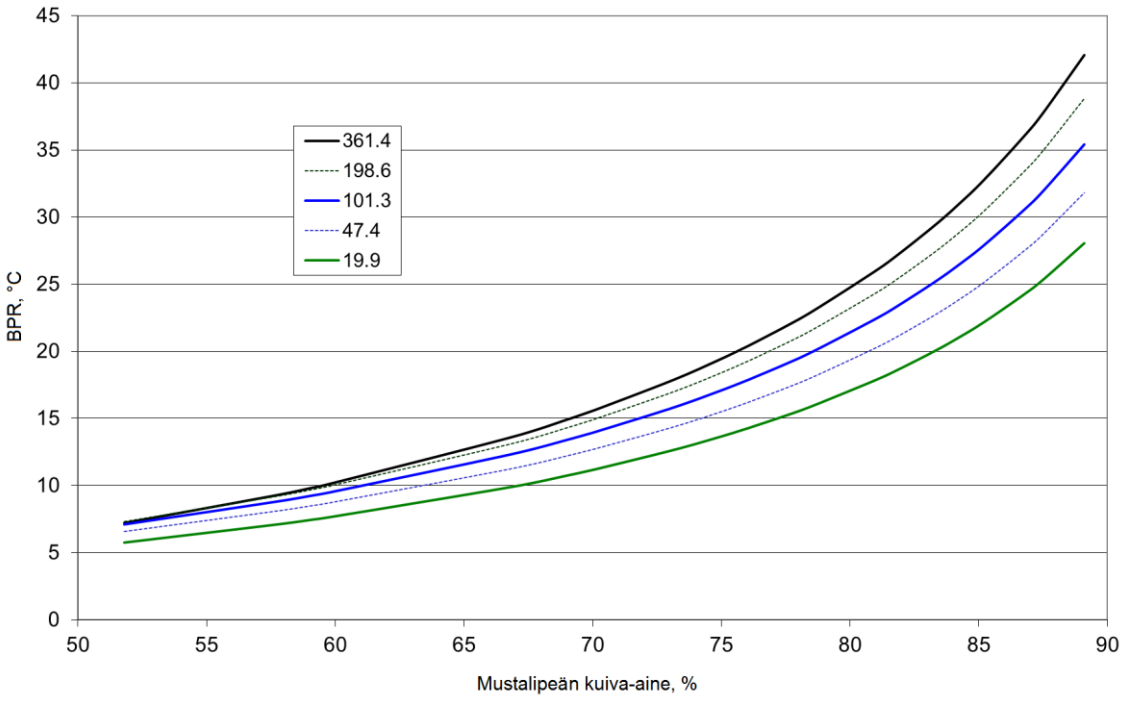
Haihduttamon primäärilauhteet kerätään paisunta-astioiden kautta pumppausastiaan, josta se operoidaan likaislauhdesäiliöön tai päälauhdesäiliöön soodakattilalle. Haihduttamon sekundäärilauhteet hyödynnetään valkaisussa ja kaustisoinnissa sekä haihduttamolla pesuliemenä. Yksiköiden 6, 5, 4, ja 3 lauhteiden käsittely alkaa pumppausastioista, ja yksiköstä 2 likaislauhde kerätään likaislauhteen pinta-astiaan, stripperiin ja sieltä edelleen likaislauhteen pumppausastiaan tai likaislauhdesäiliöön. Lauhteet ohjataan sekundäärilauhdesäiliöihin, likaislauhdesäiliöön tai vuotolipeäsäiliöön. Sekundäärilauhdesäiliö 1:tä voidaan lämmittää lämpimällä vedellä, ja kaustisointiin laihavalkolipeän varastosäiliöön menevän sekundäärilauhteen voi korvata kuumalla vedellä. Kaustisoinnissa käytettävää sekundäärilauhdetta jäähdytetään lämmönvaihtimessa kylmällä vedellä.

Pinta-astian hönkää jäähdytetään lämmönvaihtimella lämpimällä vedellä ja stripperikaasu johdetaan metanolikolonniin. Metanolikolonnin lämpötilaa pidetään yllä matalapainehöyryllä. Kolonnin jälkeiseltä huippulauhduttimelta sekä jälkilauhduttimelta

tulevaa hönkää ja kolonnilta poistuvaa tärpättilauhdetta jäähdytetään lämpimällä vedellä.

Haihduttamon toimintaa kuvaa erittäin olennaisesti mustalipeän kiehumispisteen nousu. Näin ollen mustalipeän kiehumispisteen nousun käyttäytyminen on tärkeää tuntea koko talteenottolinjan käytön, kehityksen ja suunnittelun kannalta. (Zaman et al. 1998, 275.)

Mustalipeän sisältämän veden höyrystymispaine on tärkeä parametri haihdutusprosessin operoinnissa, sillä se kuvaa paineen ja lämpötilan riippuvuutta. Ominaisuus ilmaistaan yleensä mustalipeän kiehumispisteen nousuna (BPR, boiling point rise). Kiehumispisteen nousu määritellään mustalipeän ja puhtaan veden tietyn paineen kiehumislämpötilojen erotuksena (Grace et al. 1989, 482), sillä Dühringin säännön mukaan tunnetun nesteen kiehumispiste on suoraan verrannollinen puhtaan veden kiehumispisteeseen annetussa paineessa. (Kauppi 2006, 21–22.) Mustalipeän kuiva-aineen ja paineen keskinäinen riippuvuus on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12 Kiehumispisteen nousun riippuvuus paineesta. (Vakkilainen 2013.)

Mustalipeän kiehumispisteen nousu riippuu vahvasti lipeän kuiva-ainepitoisuudesta ja vain hieman paineesta tai lämpötilasta. Orgaanisen aineen lisäys veteen vaikeuttaa

vesimolekyylien vapautumista toistensa vaikutuspiiristä. Samoin esimerkiksi suolapitoisuuden kasvu nostaa nesteen kiehumispistettä. (Grace et al. 1989, 482–483.)

Keittämön ajomalli vaikuttaa merkittävästi myös haihduttamon höyrynkulutukseen. Kirjallisuuden mukaan aktiivialkaliannostuksen kasvaessa haihduttamon lämmönkulutus pienenee, jos annos on vakioprosentti kuivan puun määrästä. Jos neste-puusuhde on suuri, se puolestaan vähentää paisuntahöyryn määrää ja lämmöntarve vähenee. Jos se muuttuu hakekosteuden tai valkolipeäväkevyyden kasvaessa tai sitä ei säädetä, tilanne on päinvastainen. (Virkola 1983b, 1488.)

Polysulfidikeitto vähentää lipeän sisältämää hemiselluloosaa, joten kirjallisuuden perusteella haihduttamolle saapuvan laihalipeän kuiva-ainepitoisuuden odotetaan laskevan ja haihduttamon höyrynkulutuksen kasvavan. Muuttuneen koostumuksen aiheuttamia vaikutuksia yksiköiden likaantumiseen eli lämmönsiirtoon ei osata etukäteen arvioida. (Kovasin 2013.)

4.7 Mäntyöljylaitos

Haihduttamolla laihalipeäsäiliöistä kuoritaan säännöllisesti suopaa, joka johdetaan mäntyöljykeittämölle. Mäntyöljy on puhdas biotuote, joka syntyy täysin sellunvalmistuksen sivutuotteena ja sen taloudellinen merkitys yhtiölle on kymmeniä miljoonia euroja vuodessa. Yksi vuoden 2012 strateginen painopistealue oli nostaa mäntyöljyn merkitys aiempaa näkyvämmin esille ja aktivoida yhteistyötä ja toimenpiteitä mäntyöljyn saannon ja laadun parantamiseksi eri tehtailla. (Metsä Fibre 2013.)

Mäntyöljylaitoksella käytetään epäsuorasti matalapainehöyryä välireaktorille saapuvan suopaöljyn sekä edelleen palstoitukseen saapuvan suovan lämmittämiseen. Kirjallisuuden perusteella polysulfidiprosessin ei odoteta vaikuttavan mäntyöljylaitoksen toimintaan, energian kulutukseen tai tuotetun mäntyöljyn laatuun lipeän muuttuvasta koostumuksesta huolimatta.

4.8 Soodakattila ja turbiini

Polttoaineen laatu, kemikaalien talteenotto sekä halutut kemialliset reaktiot vaativat soodakattiloihin erikoisratkaisuja, jollaisia muissa kattiloissa ei ole. (Huhtinen et al. 2000, 164.) Soodakattilan lämmönkulutus riippuu vahvasti sen teknologiasta, ja modernit soodakattilat käyttävät runsaasti höyryä ilman ja syöttöveden esilämmitykseen sähköntuotannon maksimoimiseksi. Höyrynmuodostusta ja näin ollen sähköntuotantoa voidaan lisätä polttolipeän kuiva-ainepitoisuutta nostamalla, sillä kun tulipesässä höyrystettävää vettä on vähemmän niin kuiva-aine tuottaa enemmän höyryä. Höyryntuotannon kasvu puolestaan lisää suoraan sähköntuotantoa. (Vakkilainen & Kivistö 2010, 96.)

Mustalipeän sisältämän energian ja toisaalta keittokemikaalien mahdollisimman tehokkaan talteenoton edellytyksenä on esilämmittää polttolipeä, ja syöttää se kattilaan ns. lusikkasuuttimen avulla tietyssä pisarakoossa. (Huhtinen et al. 2000, 164.) Pisarakokoa hallitaan polttolipeän viskositeetin eli lämpötilan avulla, syöttämällä polttolipeäputkeen matalapainehöyryä. Polttolipeän kiehumispisteen hallitseminen on ensisijaisen tärkeää, jotta höyrynmuodostusvaihe tapahtuu hallitusti oikeassa kohdassa suutinta. (Vakkilainen 2014.)

Kattilahyötysuhteen parantamiseksi myös syöttövettä ja polttoilmaa esilämmitetään. Soodakattilassa on savukaasulämmitteisten ilman esilämmittimien sijaan epäsuorat höyrylämmitteiset esilämmittimet eli luvot, joilla ilma lämmitetään haluttuun noin 150 °C lämpötilaan. (Huhtinen et al. 2000, 167.) Kohdetehtaalla primääri- ja sekundääri-ilman lämmitys tapahtuu syöttämällä luvoihin sekä väli- että matalapainehöyryä, ja ylätertiääri-ilman eli laimeiden hajukaasujen luvoon matalapainehöyryä.

Haihduttamon, kuivauskoneen, keittämön sekä apulauhduttajien lauhteet hyödynnetään kattilan syöttövetenä. Syöttövettä lämmitetään ennen lieriötä matalapainehöyryllä syöttövesisäiliössä. Lauhteiden lisäksi syöttövedeksi tarvitaan lisävettä, joka esilämmitetään omalauhteella ja syöttövesisäiliön paisuntahöngällä lämmönvaihtimissa. Syöttövesisäiliöstä syöttövesi johdetaan lieriöön, laskuputkiin ja takaisin lieriöön veden ja höyryn erottamiseksi. Soodakattilan savukaasulämpö hyödynnetään kahdella ekonomaiserilla, jotka lämmittävät syöttövettä lähemmäs höyrystymislämpötilaa.

Lierioöstä vesi jatkaa takaisin laskuputkiin ja höyry tulistukseen, joka tapahtuu kohdetehtaalla kolmessa vaiheessa. Kattilassa tulistimien jälkeiset savukaasun lämpötilat ovat varsin korkeat (600–800 °C), joten savukaasujen lämmön hyödyntäminen parantaa merkittävästi kattilahyötysuhdetta. (Huhtinen et al. 2000, 195.) Kohdetehtaalla sähkösuotimille ekonomaisereilta saapuvan savukaasun lämpötila on noin 180 °C.

Kattilan lämpöpintojen likaantuminen vähentää höyrynkehitystä lämmönsiirron heikentyessä. Tulistuksen alentuessa ruiskutusveden määrä laskee ja savukaasujen loppulämmöt nousevat. Ruiskutusveden 3 kg/s pienentyminen vähentää sähkönmyyntiä 0,9 milj. € vuodessa. (Vainio-Pekka 2013.) Höyrynuohouksen etuja ovat halvat perustuskustannukset, koska höyry tulee samasta kattilasta, puhalluspaine on säädettävä ja puhallusjaksot ovat lyhyet. Toisaalta se kasvattaa lisäveden tarvetta, vesihöyry voi lisätä kattilan loppupäässä rikkihapon muodostumista, se edellyttää putkiston eristystä ja tarvitsee paljon huoltoa. (Huhtinen et al. 2000, 216.) Puhallusnuohoimet puhdistavat lämpöpintoja höyryllä, joka otetaan reduktioventtiilin kautta turbiinin väliotosta.

Tulistettu höyry siirtyy höyrynjakotukille ja sieltä prosessiin ja turbiinille. Modernien sellutehtaiden vähentynyt lämmöntarve on vähentänyt vastapainevoiman potentiaalia ja lauhdeturbiinit ovat yleistyneet selluprosesseissa. Modernien laitosten lauhdevoiman tuotantomäärät ilman kuorikattilaa ovat lehtipuuprosessille yli 500 kWh/ADt ja havupuuprosessille noin 300 kWh/ADt. (Vakkilainen & Kivistö 2010, 97.)

Polysulfidiprosessin vaikutusten soodakattilan toimintaan odotetaan olevan merkittäviä, sillä massan saannon kasvaessa lipeän sisältämä orgaanisen aineksen määrä vähenee, eli epäorgaanisen ja orgaanisen aineen suhde muuttuu jolloin myös lipeän lämpöarvo pienenee. Näin ollen lämpöarvo eli poltto-ominaisuudet poltettavaa massayksikköä kohden muuttuvat, sillä kuituun jää enemmän hemiselluloosia joilla on merkittävästi alempi polttoarvo kuin esimerkiksi ligniinillä. (Kovasin 2013.) Lipeän kuiva-ainemäärän pieneneminen tarkoittaa soodakattilan höyryntuotannon vähentymistä. Polttolipeän kuiva-aineen 1 % muutos vaikuttaa soodakattilan päähöyryn määrään noin 0,53 %. (Heikkilä 2013.)

Polysulfidin aiheuttamien lipeän saantomuutosten myötä kattilan kuorman odotetaan vähenevän 8 %, joka vastaa myyntisähkön tehona -4,2 MW. (Hämäläinen 2013.) Hachinohen sellutehtaalla polysulfidikeiton on arvioitu lisäävän saantoa noin 1 % kuivasta puusta, ja kyseisellä tehtaalla höyryntuotanto on laskenut saantolisäyksen vaikutuksesta lähes 5 % tavanomaiseen sulfaattikeittoon nähden. Taselaskentaohjelman mukaan saannon 1 % muutos vähentää soodakattilan höyryntuotantoa noin 3 %. (Parkko 2013, 33–34.)

4.9 Kaustisointi

Kaustisoinnin primäärilämmönkulutus on lähes olematonta, sillä sulan liuotuksesta peräisin oleva ja mahdollisesti meesauunin kaasunpesulaitteesta saatava sekundäärilämpö riittää kaustistamon lämpötilojen pitämiseen halutun suuruisina. (Virkola 1983b, 1490.) Tavoiteajossa kohdetehtaan kaustisointi tarvitsee lämpöä vain matalapainehöyrynä kuuman veden valmistamiseen. Kuumaa vettä käytetään X -filter -yksiköiden pesuun.

Meesan kuiva-aineella on merkittävä vaikutus uunin energiankulutukseen ja savukaasujen hukkalämpöön. Lähes kolmasosa meesauuniin tuodusta lämmöstä kuluu kemiallisessa reaktiossa $CaCO_3$:n dissosiaatioon. Sellutonnia kohti laskettuun ominaiskulutukseen vaikuttaa tarvittavan kalkin määrä, joka puolestaan riippuu mm. valkolipeän annostuksesta, keittosaannosta, valkolipeän sulfiditeetista ja poltetun kalkin kaustistamisvoimasta. (Virkola 1983b, 1490.) Riippuen tehtaan rakenteesta, meesan yhden prosenttiyksikön kuiva-aineen nostolla voidaan saavuttaa jopa 70 – 150 000 € vuotuiset säästöt. Tavoiteltava kuiva-ainetaso on 80 %. (Heikkilä 2013.) Kohdetehtaalla meesasuotimelta tulevan meesan kuiva-aine on verrattain alhainen, noin 70 %.

Matalasta energiankulutuksesta johtuen kaustisoinnissa ei ole odotettavissa merkittäviä muutoksia polysulfidiprosessin vuoksi.

4.10 Vedenpuhdistuslaitos

Kohdetehtaan aktiivilietelaitos ei kuluta höyryä, mutta sellutehtaan ylijäämälämmöllä on kuitenkin merkittävä vaikutus vedenpuhdistuslaitoksen toimintaan. Tehtaan

jätelämpömäärä muodostuu vedenpuhdistamolla ongelmaksi erityisesti keskikesällä, jolloin tasausaltaalle saapuvan jäteveden lämpötila voi olla jopa 45 °C.

Sellutehtaan prosesseista valkaisu päästää tavoiteajossa eniten lämpöä hukkaan kuuman veden muodossa. Valkaisun jätevesien lämpötiloja lasketaan keskikesällä mahdollisuuksien mukaan ja jäteveden joukkoon ajetaan viileämpää raakavettä. Jätevedenpuhdistamon toiminnan eli bakteerien hyvinvoinnin kannalta 42 °C on erittäin kriittinen raja, joten jätelämmön tehokkaampi hyödyntäminen varmistaisi myös puhdistamon toimintaa. (Hämäläinen 2013.)

5 YHTEENVETO

Kandidaatintyön tavoitteena oli kartoittaa merkittävimmät muutokset sellutehtaalla siirryttäessä sulfaattimassan valmistuksesta polysulfidiselluprosessiin. Työssä esiteltiin sulfaattisellun valmistusprosessi sekä polysulfidiprosessin aiheuttamat muutokset sulfaattisellutehtaan prosesseissa erityisesti höyrynkulutuksen kannalta. Tutkimuksessa tarkasteltiin sellutehtaan höyrynkulutusta ja sen mahdollisia muutoksia suhteessa tehtaan selluntuotantoon. Tutkimuksessa käytettiin esimerkkinä tyypillistä, modernia sellutehdasta jonka perusteella tarkasteltavat osaprosessit valikoituivat. Tutkimus tehtiin tutustuen dokumenttilähteisiin sekä erityisesti hankkimalla lisätietoa ja käytännön näkemystä asiantuntijahaastatteluista.

Sulfaattisellun valmistusprosessi on maailman yleisin sellunkeittoprosessi, koska sellusta tulee vahvaa ja menetelmä soveltuu kaikille puulajeille. Sellun kilpailukykyisten ominaisuuksien lisäksi sulfaattiprosessin hyviä puolia ovat tehokas ja taloudellinen kemikaalien talteenotto, laaja raaka-ainevalikoima sekä klooridioksidivalkaisun tehokkuus.

Sulfaattisellun valmistusprosessi jaetaan tyypillisesti kahteen osaan, kuitulinjaan ja talteenottoon eli lipeälinjaan. Kuitulinja käsittää puuaineksen käsittelyprosessit aina haketuksesta massan keittoon ja kuivaukseen. Lipeäkierto puolestaan tarkoittaa keittimestä saatavan laihalipeän talteenottoa ja käsittelyä niin, että se saadaan takaisin keittimeen syötettävään muotoon. Lipeäkierto sisältää myös erillisen, suljetun kalkkikierron.

Saantolisäystä tavoitellessa sulfaattiprosessia on tutkittu ja kehitelty viime vuosina monin eri keinoin. Saantolisäyksen taloudelliset hyödyt ovat lisääntynyt tuotanto, vähentyneet kemikaalikustannukset ja pienempi raaka-ainekulutus. Polysulfidin käyttäminen lisää keiton saantoa, sillä sen ansiosta suurempi osuus puun hemiselluloosasta pysyy mukana kuiduissa, eikä liukene ligniinin mukana.

Sulfaattikeitosta polysulfidikeittoon siirryttäessä keittoprosessi optimoidaan hyödyntämään keittolipeään lisättävää uutta kemikaalia, jonka avulla puuraaka-aine voidaan hyödyntää tehokkaammin. Saantoedun ohella noussut kuitusaanto parantaa

materiaalitehokkuutta ja kasvattaa soodakattilan kapasiteettia, jonka ansiosta tuotantoa voidaan nostaa. Prosessimuutoksen vuoksi kuitulinjalle tehtiin ainoastaan ajomallimuutoksia ja lipeälinjalle lisättiin polysulfidin valmistusprosessi (MOXY).

Polysulfidiprosessi vaikuttaa merkittävästi lipeäkiertoon, keittämöön sekä kuivauskoneeseen ja muilla osastoilla höyrynkulutuksen odotetaan pysyvän tavanomaista sulfaattiprosessia vastaavalla tasolla. Polysulfidin valmistusprosessin lisäksi lipeäkierron merkittävin muutos on laihalipeän muuttunut koostumus, jonka merkitys haihduttamoon ja soodakattilaan voidaan todeta luotettavasti lisätutkimusten avulla. Keittämöllä vaikutukset tarkoittavat saannon lisäystä ja optimaalisten ajo-olosuhteiden muuttamista niin, että polysulfidin vaikutus optimoidaan. Kuivauskoneella polysulfidisellun uskotaan säästävän energiaa pidemmällä aikavälillä. Prosessi vaikuttaa muiden osastojen ominaiskulutuksiin lähinnä saantolisäyksen tuoman lisääntyneen tuotannon vuoksi.

Sellu- ja paperiteollisuus pyrkii kasvattamaan energiatehokkuuttaan sekä taloudellisten että eettisten näkökulmien vuoksi. Energiansäästötoimet ovat taloudellisesti kannattavia, sillä säästetyn energian arvo nousee myyntisähkön osuuden kasvaessa. Tämän ohella bioenergian kasvanut merkitys yhtiön strategiassa tuottaa sellunvalmistukselle kilpailuetua. Tärkein keino säästää energiaa sellutehtaalla on höyryn säästäminen operointitavoilla ja laitteiden päivittämisellä, sillä se näkyy suoraan sähkötuotannossa. Sen sijaan höyryn parametrien muuttaminen sähköntuotannon lisäämiseksi on hankalaa, sillä se vaatii suuria investointeja ja prosessimuutoksia.

Energiatehokkuuden kehittäminen on jatkuva prosessi, joka vaatii tehtaan laitteistojen, ohjelmistojen sekä yrityksen johdon katkeamatonta kehittämistä. Energiatehokkuuteen kannattaa pyrkiä ensisijaisesti keskittymällä kulutushöyryn säästämiseen ja ylijäämälämmön hyötykäyttöön, jolloin sähköntuotanto lisääntyy tuotetun höyryn massavirran kasvun ansiosta höyryn parametrien muuttamisen sijaan. Metsäteollisuuden prosesseissa energiatehokkuutta voidaan kehittää joko muuttamalla operointitapoja tai hankkimalla energiatehokkaampaa tekniikkaa.

Selluprosessia kehitetään jatkuvasti ja alkuperäisiä laitteita korvataan suurempi- tai pienempitehoisilla apulaitteiden pysyessä samoina. Monimutkaistuvassa prosessissa

komponenttien keskinäinen riippuvuus kasvaa ja tietyssä osaprosessissa saavutettu energiansäästö saattaa johtaa häviöihin muualla prosessissa. Energiantehokkuustoimet keskittyvät usein monimutkaistamaan prosesseja, vaikka yksinkertaistaminen voisi lisätä prosessin luotettavuutta ja sitä kautta parantaa energiatehokkuutta.

Sellutehtaan energiatehokkuuden edistämiseksi tulisi tutkia syvällisemmin osaprosessien operointitapoja sekä höyryn- että sähkönkulutuksen kannalta. Kohdetehtaalla on investoitu huomattavasti energiatehokkaaseen BAT -tekniikkaan, mutta tehtaan lämmönkulutuksen vähentämiseksi erityisesti prosessilämpötilojen ja operointitapojen energiatehokkuutta sekä jätelämpövirtojen järkevimpiä hyödyntämismahdollisuuksia kannattaa tutkia. Investointeja harkitessa tulee kuitenkin muistaa, että sekundäärilämmön talteenotto on energiatehokasta vain siinä tapauksessa, että sillä voidaan korvata primäärihöyrynkulutusta.

LÄHDELUETTELO

Bajpai Pratima. 2013. Pulp and paper making process. Springerbriefs in Applied Sciences and Technology, Bleach plant effluents from the pulp and paper industry. Springer. ISBN 978-3-319-00544-7 (Print) ISBN 978-3-319-00545-4 (Online). Saatavilla: http://download.springer.com/static/pdf/599/bfm%253A978-3-319-00545-4%252F1.pdf?auth66=1412770068_4d3e63eea34391afc15317b76ab50158&ext=.pdf

Bajpai Pratima. 2010. Environmentally friendly production of pulp and paper. Wiley. 357s. ISBN 978-0-470-52810-5. Saatavilla: http://www.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=zjEeUpwepFMC&oi=fnd&pg=PT9&dq=environmentally+friendly+production+of+pulp+and+paper+bajpai&ots=DoeHJ5rIEX&sig=W5kfVzr7VbDRAnUmwW6vwlI25ZE&redir_esc=y#v=onepage&q=environmentally%20friendly%20production%20of%20pulp%20and%20paper%20bajpai&f=false

Boiler Services and Inspection LLC. 2014. Recovery Boilers. [viitattu 20.5.2014] Saatavilla: http://www.boilerservicesandinspection.com/Services.htm

Copur Y., Tozluoglu A. 2007. Comparison of kraft, PS, kraft-AQ and kraft-$NaBH_4$ Pulps of Brutia pine. Duzce University, faculty of forestry, department of forest industrial engineering. Elsevier. Saatavilla: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407003306

Cöpür Yalcin. 2007. Refining of Polysulfide Pulps. Duzce University, faculty of forestry, department of forest industrial engineering. Asian Network for Scientific Information. ISSN 1812-5654. Saatavilla: http://www.docsdrive.com/pdfs/ansinet/jas/2007/280-284.pdf

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/27/EU. Euroopan unionin virallinen lehti. Saatavilla: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:FI:PDF

Francis D.W., Towers M.T., T.C. Browne. 2009. Energy cost reduction in the pulp and paper industry – an energy benchmarking perspective. Pulp and Paper Research Institute of Canada (Paprican). Saatavilla: http://oee.nrcan.gc.ca/sites/oee.nrcan.gc.ca/files/pdf/publications/infosource/pub/cipec/pulp-paper-industry/pdf/pulp-paper-industry.pdf

Grace T.M., Malcolm E.W., Kocurek, M.J. 1989. Pulp and paper manufacture volume 5 alkaline pulping. Third edition. TAPPI. Joint Textbook Committee of the paper Industry. 637s. ISBN 0-919893-04-x (set) – ISBN 0-919893-71-6 (v. 5).

Hautala Jani. 2011. Kuivatuskoneen vesitaseen optimointi. Opinnäytetyö. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu. Kemiantekniikan koulutusohjelma. Theseus. 66s. Saatavilla: https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/31541/Hautala_Jani.pdf?sequence=1

Heikkilä Jorma. 2013. Kehitysjohtaja, Metsä Fibre. Lappeenranta. Sähköpostihaastattelu. 4.7.2013.

Huhtinen Markku, Kettunen Arto, Nurminen Pasi, Pakkanen Heikki. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. uudistettu painos. Opetushallitus, Edita Oy. Helsinki.

Hyvönen Marko. 2012. Sellu- ja paperi -integraatin lauhdetase. Opinnäytetyö. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Energiatekniikan koulutusohjelma. Theseus. 46s. Saatavilla: http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2012111215158

Hämäläinen Sanna. 2013. Ryhmäpäällikkö, Metsä Fibre. Lappeenranta. Haastattelu 19.7.2013.

Ingruber O.V., Kocurek M.J., Wong A. 1985. Pulp and paper manufacture volume 4 sulfite science and technology. Third edition. TAPPI. Joint Textbook Committee of the paper Industry. 352s. ISBN 0-919893-04-X (set) – ISBN 0-919893-22-8 (v. 4).

Ikäheimonen Jouni, Juuso Esko, Leiviskä Kauko, Murtovaara Sakari. 2000. Sulfaattisellun vuokeittomenetelmät, keiton ohjaus ja massan pesu. Oulun yliopisto, säätötekniikan laboratorio. Herkules. 44s. Saatavilla: http://herkules.oulu.fi/isbn9514275306/isbn9514275306.pdf

Itä-Suomen ympäristölupavirasto. 2006. Päätös nro 109/06/02: Joutsenon tehtaiden ympäristölupa sekä kaasutuslaitoksen toiminnan aloittamislupa, Joutseno. Saatavilla: http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=60579

Karhu Jaana. 2012. Happidelignifioinnin kappasäädön virittäminen havusulfaattisellutehtaalla. Opinnäytetyö. Metropolia ammattikorkeakoulu, Insinööri AMK/kemiantekniikan koulutusohjelma. Theseus. 34s. Saatavilla: http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2012121719680

Kauppi Heikki. 2006. Tyhjöhaihduttimen hyötysuhteen parantaminen. Insinöörityö. Satakunnan ammattikorkeakoulu, kemiantekniikan koulutusohjelma. Theseus. 48s. Saatavilla: http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-200810293775

Kilpeläinen Jarmo. 2000. Sellun kuivauskoneen ajettavuusongelman monimuuttujainen tarkastelu. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, teknillinen tiedekunta/kemiantekniikan osasto/epäorgaanisen ja analyyttisen kemian laboratorio. Doria. 118s. Saatavilla: http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe20021182

Kivilahti Vesa-Matti. 2014. Tärpätin havaitseminen jätevesikanaalissa. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu, automaatiotekniikan koulutusohjelma. Saatavilla: http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201405065956

Kleppe Peder J. 1970. Kraft Pulping. Tappi. Saatavilla: http://kraftpulpingcourse.knowledgefirstwebsites.com/f/Kraft_Pulping.pdf

Knowpap. 2005. Paperin ja kartongin valmistus. VTT Industrial Systems. [viitattu 10.7.2013.] Saatavilla:

http://www.knowpap.com/www_demo/suomi/paper_technology/general/5_papermaking/frame.htm

Knowpulp. 2012. Sulfaattisellun valmistus. VTT Industrial Systems. [viitattu 20.5.2014] Saatavilla: http://www.knowpulp.com/suomi/demo/suomi/kps/ui/process/general/ui.htm

Kokkonen Aleksi. 2011. Puujätekattilan ja öljykattilan nykykunnon sekä tulevaisuuden selvitys. Opinnäytetyö. Oulun seudun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Saatavilla: http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201103163230

Kouris Michael, Kocurek Michael J. 1990. Pulp and paper manufacture volume 8 coating, converting, and specialty processes. Third edition. TAPPI. Joint Textbook Committee of the paper Industry. 386s. ISBN 0-919893-04-X (set) - ISBN 0-919893-91-0 (v. 8).

Kovasin Kari. 2013. Ryhmäpäällikkö, Metsä Fibre. Sähköpostihaastattelu.

Lindell Joakim. 2012. Valkolipeäsuotimen happopesu pitkän puhalluksen yhteydessä. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma/koneautomaatio. Saatavilla: http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2012061112429

Lundén Kimmo. 2012. UPM ärsyttää mäntyöljy-yhtiöitä. Talouselämä. [viitattu 1.6.2014] Saatavilla: http://www.talouselama.fi/uutiset/upm+arsyttaa+mantyoljyyhtioita/a2095548

Luth C., Berry R. 2005. Polysulfide pulping of western softwoods: Yield benefits and effects on pulp properties. Pulp and Paper Canada. Saatavilla: http://www.pulpandpapercanada.com/paptac/PDFs/Apr05/pulpproperties.pdf

Mesfun Sennai, Toffolo Andrea. 2013. Optimization of process integration in a Kraft pulp and paper mill – Evaporation train and CHP system. Luleá University of

Technology, Energy Engineering, Division of Energy Science. Elsevier. Saatavilla: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913001244

Metsä Fibre. 2012a. Metsä Fibre lyhyesti. [viitattu 16.8.2013.] Saatavilla: http://www.metsafibre.fi/Yritys/Metsä-Fibre-lyhyesti/Pages/Default.aspx

Metsäteollisuus ry. 2013. Bioenergian lisääminen edellyttää menestyvää metsäteollisuutta. [viitattu 21.9.2013.] Saatavilla: http://www.metsateollisuus.fi/painopisteet/energia-ilmasto/uusiutuva-energia/Bioenergian-lisaaminen-edellyttaa-menestyvaa-metsateollisuutta-105.html

Paperi ja puu. 2012. Uusiutuva metsäteollisuus: vauhtia biotalouden kehitykseen. [viitattu 10.7.2013.] Saatavilla: http://www.paperijapuu.fi/uutiset/uusiutuva-metsateollisuus-vauhtia-biotalouden-kehitykseen/

Parkko Esa. 2013. Polysulfidiprosessin vaikutukset soodakattilalla. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta/energiatekniikan koulutusohjelma. Doria. 43s. Saatavilla: http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201312167652

Partanen Petja. 2012a. Lisää vain polysulfidisellu. Echo, 2/12. 14-15. ISSN 1795-1089.

Partanen Petja. 2012b. Sellunvalmistuksen uusi askel. Echo, 2/2012. 24–27. ISSN 1795-1089.

Seppälä Markku J., Klemetti Ursula, Kortelainen Veli-Matti, Lyytikäinen Jorma, Siitonen Heikki, Sironen Raimo. 2002. Kemiallinen metsäteollisuus 1: Paperimassan valmistus. 2-1 painos. Opetushallitus. 196s.

Shin-Ichi, H. 1991. New Polysulphite Pulping Process at Shirakawa and Hachinohe. TAPPI pulping conference.

Stigsson Lars et al. 2000. Patent number 6143130: Polysulfide Pulping Process. United States Patent. Saatavilla: http://www.google.fi/patents?hl=fi&lr=&vid=USPAT6143130&id=4IkFAAAAEBAJ&

oi=fnd&dq=polysulfide+pulping&printsec=abstract#v=onepage&q=polysulfide%20pulping&f=false

Stålhandske Ville. 2009. Sulfaattisellun valkaisuun käytettävien kemikaalien tuotanto ja valmistuksen energiankulutus. Kandidaatintutkielma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta/kemiantekniikan osasto/puunjalostustekniikan laboratorio. Doria. 59s. Saatavilla: http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe200903311277

Synergy of Anthraquinone/Polysulfide pulping: The Effect of Sulfidity. Lynda Sturgeoff. PCI Chemicals Canada. TAPPI. Saatavilla: http://www.tappi.org/Downloads/unsorted/UNTITLED-pulp9803pdf.aspx

Szabo L., Soria A., Forsström J., Keränen J.T., Hytönen E. 2009. A world model of the pulp and paper industry: Demand, energy consumption and emission scenarios to 2030. VTT. Elsevier. Saatavilla: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901109000227

Tapanen Risto. 2009. Sellutehtaan sekundäärilämmön käytön tehostaminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta/energiatekniikan koulutusohjelma. Doria. 83s. Saatavilla: http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe200911122335

Työ- ja elinkeinoministeriö. Joutsenoon 4,2 miljoonaa euroa energiatukea kaasutuslaitokselle. Tiedotteet 2010. [viitattu 16.8.2013.] Saatavilla: http://www.tem.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tiedotearkisto/vuosi_2010?101881_m=101580

Vainio-Pekka Antti. 2013. Käyttöinsinööri, Metsä Fibre. Lappeenranta. Haastattelu 29.7.2013.

Vakkilainen Esa, Kivistö Aija. 2010. Energy consumption trends and energy consumption in modern mills in forest industry. Lappeenranta University of Technology. Research report. 148s. ISBN 978-952-265-019-1, ISSN 1798-1328.

Vakkilainen Esa. 2013. Varadekaani, Lappeenranta University of Technology. Haastattelu 21.4.2013.

Valtion ympäristöhallinto. Massa- ja paperiteollisuuden parasta käytettävissä olevaa tekniikkaa koskeva referenssiasiakirja. [viitattu 13.8.2013.] Saatavilla: http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=11768&lan=fi

Virkola Nils-Erik. 1983a. Puumassan valmistus, osa 1. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinööriyhdistys. 1108s. ISBN 951-99117-3-1.

Virkola Nils-Erik. 1983b. Puumassan valmistus, osa 2. Toinen täysin uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinööriyhdistys. 1930s. ISBN 951-99452-0-2.