

LIITE I

**Dew point measurements-tarjous
Åbo Academy
9.12.2010**

**Proposal for Dew point Measurements**

8 Dec 2010

This is a proposal to make dew point measurements, SO_3 measurements and corrosion measurements in two boilers: one Kraft boiler with the possibility of operating with low and high SO_2 and O_2 ; and Heinola's NSSC boiler with extremely high SO_2 . Measurements would be taken behind the ESP, before any scrubber.

The purpose is to get reliable information of the low temperature corrosion conditions in recovery boiler flue gases being cooled further.

1. Dew point measurements will be made with a commercial instrument ("Land" etc). The question here is the sensitivity of the electrical signal at the low concentrations of condensing sulfuric acid normally present in kraft boiler flue gases.
2. Corrosion measurements will be made with our air-cooled probes and samples will be analyzed with SEM-EDS. Careful control of the probe temperature will be required. Also open questions relate to the exposure time.
3. Flue gas samples will be bubbled through an isopropyl alcohol (IPA) water mixture for capture of SO_3 and subsequent analysis of the sulfate ion concentration - according to the standard methods for SO_3 analysis. The challenge here is to exclude any escape of particulate material in the IPA solution. Dust sulfate carryover to the IPA solution will disturb the SO_3 analysis.

The cost for this work is €30 000 (+VAT) and is contingent on one of the two dew point analyzers we have access to (1 at ÅAU, 1 from LUT) working. We will test both before starting the project and if major repairs or a new unit is needed we will make a new proposal accordingly before starting the project.

Prepared by:

Nikolai DeMartini
Patrik Yrjas
Tor Lauren
Mikko Hupa

Senior Researcher
Senior Researcher
Mill Measurement Expert
Professor

LIITE II

**Kastepistemittaus / savukaasun loppulämpötila
projektiehdotus
23.6.2010**

23.06.2010
Marja Heinola

Soodakattilan savukaasun loppulämpötila

Työn tarkoituksena on löytää soodakattilan savukaasun matalin taloudellinen loppulämpötila. Tämä on tullut tärkeäksi viime vuosina, kun sähkösuotimen jälkeen on kytketty savukaasun jäähdyttimet. Käytetyt materiaalit jäähdytysprosessin jälkeen ovat hiiliterästä.

Kuinka hyvin soodakattilan savukaasujen happokastepiste osataan määrittää, aiheutuuko todellista korroosiota hiiliteräksellä, kun olemme lähellä ko. pistettä. Kuinka pitkät SO_2/SO_3 -emissiojaksot riittävät aiheuttamaan huomioonotettavaa korroosiota.

Tutkimus käsittää kokeellisen osuuden I sekä teoreettisen osuuden, joista jälkimmäisessä vertaillaan olemassa olevien happokastepisteen laskentakaavoja. Lisäksi teoreettisessa osuudessa voisi olla lyhyt kirjallisuusselvitys selvitettävän ongelman tämän hetkisestä tietämyksestä.

Kokeellinen osuus I käsittää happokastepistemittaukset toimivalla soodakattilalla, jossa hetkittäin esiintyy myös SO_2 :ta. Savukaasuanalysointoreilla mitataan savukaasun SO_2 , SO_3 , O_2 , HCl . Myös lauhtuvan kaasun pH mitataan, sikäli kun sovellettava mittausmenetelmä löytyy. (Menetelmä voisi olla sovellus pölymittauksesta, jossa imetään kaasu pH säädettyyn nesteeseen ja liuoksesta mitataan lauhtuvan kaasun pH vrt. Dekatin Na-, K-spesifiset ionimetrit.)

Myöhemmin toteutettava:

Kokeellinen II osuus käsittää korroosiosondin, jossa kolmeen eri lämpötilaan säädettyä materiaalikomponenttia on toimivan soodakattilan savukaasukanavassa sähkösuotimen jälkeen altistettuna korroosiolle. Lämpötilat 200°C , 110°C ja mahdollisimman matala riippuen jäähdyttävän väliaineen lämpötilasta.

Korroosiosondin altistuksen ajan savukaasuanalysointoreilla mitataan savukaasun SO_2 , SO_3 , O_2 , HCl . Lisäksi mahdollinen happokastepistemittari otetaan rinnalle mittausjakson ajaksi.

LIITE III

**Sellutehtaan höyrytasojen optimaaliset paineet
-alustava raportti
Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto**

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

ENERGIATEKNIIKAN OSASTO

SELLUTEHTAAN HÖYRYTASOJEN OPTIMAALISET PAINEET

DRAFT

Lappeenrannassa 30.08.2010

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO:

1	JOHDANTO	8
2	METSÄTEOLLISUUDEN ENERGIAN KÄYTTÖ	9
3	SELLUTEHTAAN TOIMINTA.....	14
3.1	Puun käsittely	15
3.2	Sulfaattisellun keitto	15
3.2.1	Eräkeitto	16
3.2.2	Vuokeitto.....	16
3.3	Massan pesu ja lajittelu	18
3.4	Happidelignifiointi.....	19
3.5	Valkaisu.....	20
3.6	Kuivaus.....	21
3.7	Kemikaalikierto	22
3.7.1	Haihduutamo	23
3.7.2	Soodakattila	26
3.7.3	Nuohomet	28
3.7.4	Kattilan vesi-höyrykierto.....	30
3.7.5	Kaustisointi.....	32
3.7.6	Meesauuni	33
3.8	Kuorikattila.....	34
3.9	Höyryturbiini	36
3.10	Höyryn paineen säätö	36
4	HÖYRYN KULUTTAJAT.....	38
4.1	Haihduutamo	40
4.2	Sellun kuivaus.....	41

4.3	Keitin.....	41
4.4	Valkaisu.....	42
4.5	Soodakattila	43
5	LASKENTA	44
5.1	Taselaskenta.....	44
5.2	Putkiston koon määrittäminen	47
5.3	Putken seinämänvahvuuden laskeminen	50
5.4	Putkiston investointikustannus	51
5.5	Haihduttamon investointi kustannus.....	52
5.6	Kuivauskoneen investointikustannus	54
5.7	Vuosittaisen kokonaisinvestoinnin laskeminen.....	55
5.8	Turbiinin tehon laskenta.....	56
6	TAPAUSTEN LASKENTA-ARVOT.....	61
6.1	Höyryn painearvot energiataseiden laskennassa	63
6.2	Turbiinin toiminta-arvot.....	64
6.3	Nuohoushöyryn paineen alentaminen	66
6.4	Toisen matalapainetason rakentaminen	66
7	SUOMESSA KÄYTETTÄVÄT HÖYRYNPAINETASOT	69
8	HÖYRYNPAINETASON VAIKUTUS SÄHKÖN TUOTANTOON	72
8.1	Höyryn painetason vaikutus prosessilämmön kulutukseen.....	72
8.2	Höyryn painetason vaikutus sähköntuotantoon	73
8.3	Nuohoushöyryn paineen vaikutus sähkön tuotantoon	77
8.4	3.5 bar matalapainelinjan rakentamisen vaikutukset sähkön tuotantoon	78
9	HÖYRYNPAINETASON VAIKUTUS INVESTOINTEIHIN	80
9.1	Putkiston investointikustannukset.....	80
9.2	Haihduttamon investointikustannukset	82
9.3	Kuivauskoneen investointikustannukset	83

9.4	Kokonaisinvestointi	83
9.5	Matalapainetason optimaaliset paineet	84
9.6	3.5 bar matalapainetason rakentamisesta aiheutuvat investointikustannukset ja nettotulot	86
10	YHTEENVETO	88
LIITTEET		

SYMBOLILUETTELO

A	pinta-ala [m^2]
A_0	vuosittainen maksu [€]
a	lainan maksuaika, investoinnin pitoaika [a]
$c_{a,i}$	annuiteetti tekijä [-]
c_p	ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
d	halkaisija [m]
f	kitkakerroin [-]
h	ominaisentalpia [kJ/kg]
h_m	muodostumisentalpia [kJ/kg]
h_t	tuntuva entalpia [kJ/kg]
I	investointi [€]
i	investoinnin, lainan korko [%]
k	kertavastus [-]
l	pituus [m]
m	massa [kg]
mk	materiaalikustannus [€/kg], [€/m ²]
n	varmuuskerroin [-]
P	teho [kW]
p	paine [bar, Pa]
Q	lämpö [MW]
q_m	massavirta [kg/s]

R'	höyryn reali kaasuvakio [kJ/kgK]
s_0	teoreettinen seinämänvahvuus [mm]
T	lämpötila [°C]
t	aika [a, h]
w	nopeus [m/s]
X	kuiva-aine pitoisuus [$\text{kg}_{\text{kuiva-ainetta}} / \text{kg}_{\text{vettä}}$]
α	rakennusaste [-]
η	hyötysuhde [-]
Φ	lämpövirta [W]
ρ	tiheys [kg/m^3]
σ_{sall}	laskentajännitys [N/mm^2]
σ_l	materiaalilujuus [N/mm^2]

Alaindeksit

1	alkutila
2	lopputila
e	sähkö
g	sähkö
h	haihduttamo
k	kuivauskone
kok	kokemusperäinen
kp	kiehumapiste

p	putkisto
pap	paperi
pr	prosessi
pt	polytrooppinen
s	isentrooppinen
sat	saturaatio-/ lauhtumis-
sis	sisä
teh	tehollinen
th	prosessilämpö
u	ulko
l	lauhde

Lyhenteet

abs	absoluuttinen
ADt	ilmakuiva sellu tonni
BPR	kiehumapisteen nousu
HPK	hienopaperikone
KK	kuorikattila
LP	matalapainehöyry
MP	välipainehöyry
MP1	turbiinin välipaineväliotto 1
MP2	turbiinin välipaineväliotto 2

NH nuohoushöyry

TH tuorehöyry

ST sellutehdas

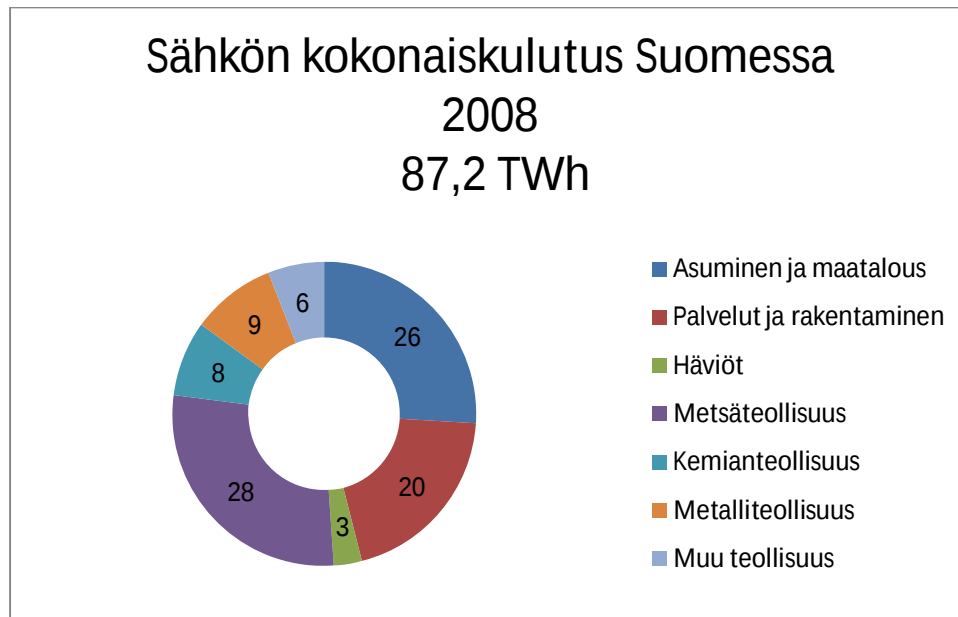
1 JOHDANTO

2 METSÄTEOLLISUUDEN ENERGIAN KÄYTTÖ

Metsäteollisuudella on Suomessa pitkä historia ja suuri vaikutus Suomen kansantalouteen. Se on ollut eräs maamme merkittävimmistä teollisuuden aloista ja Suomen kansainvälinen kilpailukyky on rakentunut suurelta osin sen varaan. Metsäteollisuuden merkitys Suomen bruttokansantuotteessa on edelleen merkittävä. Metsäteollisuuden osuus Suomen energiantuotannossa ja -kulutuksessa on myös suuri.

Metsäteollisuuden tärkein osa-alue on massa- ja paperiteollisuus. Sen piirissä työskenteli vuonna 2008 1 % maamme koko työväestä ja sen osuus bruttokansantuotteeseen oli 2 %. Sellu- ja paperiteollisuus kattaa lähes 10 % Suomen teollisuustuotannosta ja yli 13 % ulkomaan viennistä. Suomi onkin maailman kuudenneksi suurin paperin ja kartongin tuottaja ja toiseksi suurin viejämaa. (Tilastot 2010)

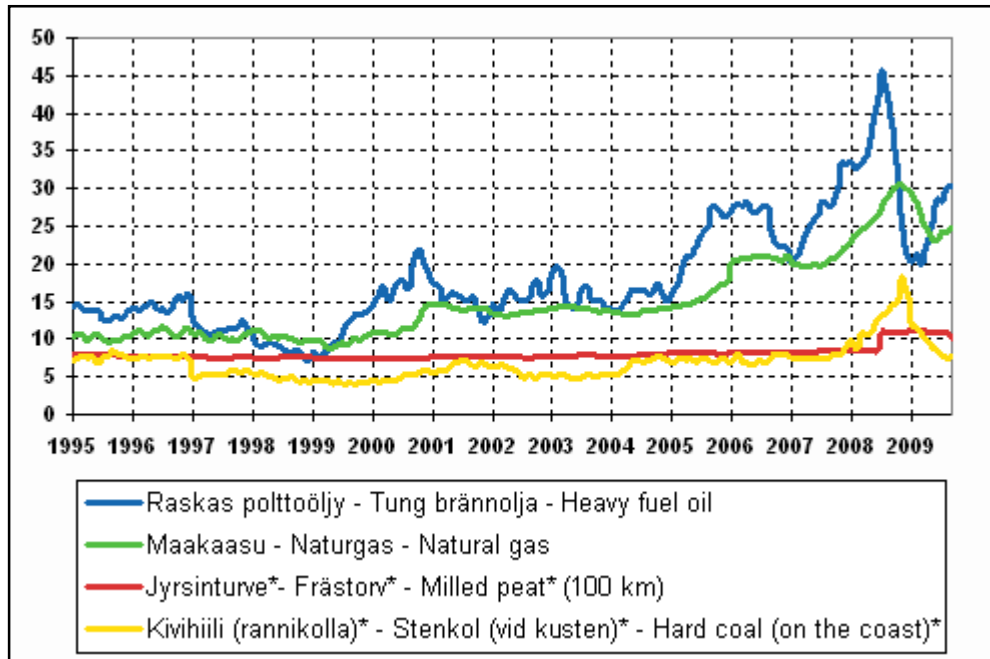
Metsäteollisuudella on myös suuri vaikutus Suomen energiankulutukseen. Kuvassa 1 on esitetty Suomen sähköenergian kulutus sektoreittain. Vuonna 2008 energian kokonaiskulutus oli 1,42 miljoonaa TJ. Sähkön kokonaiskulutus vuonna 2008 oli Suomessa 87,2 TWh, josta metsäteollisuuden osuus oli lähes kolmannes. Metsäteollisuus kulutti lähes 60 % teollisuuden käyttämästä 44 GWh:sta. (Tilastokeskus 2010) Valtaosa metsäteollisuuden energiankulutuksesta tapahtuu sellu- ja paperiteollisuudessa. Prosessien tehostamisen ja tekniikan kehittymisen myötä, selluntuotannon ominaisenergiankulutus on pienentynyt viime vuosikymmeninä. Vajaassa 40 vuodessa sellutehtaiden lämmönkulutus on pienentynyt noin 15 % ja sähkönkulutus noin 5 % tuotettua ilmakeivää sellutonnin kohden. Nykyaikaisen sellutehtaan lämmönkulutus on noin 12 -15 GJ/ADt ja sähkönkulutus noin 650 -800 kWh/ADt. Energian kulutuksen pienemiseen ovat vaikuttaneet muun muassa keiton energian kulutuksen pieneminen, kuivauksen tehostuminen ja lipeä haihduttamon vaihdeluvun lisääntyminen, sekä jätelämmön talteenoton kehittyminen. (Kivistö 2010, 1-3)



Kuva 1 Sähkön kulutus Suomessa vuonna 2008.

Polttoaineiden hintojen noususta ja sellun hinnan laskusta johtuva kilpailun kiristyminen ja taloudellinen taantuma ovat johtaneet mittaviin säästötoimiin suomalaisilla tehtailla. Tehtaiden tuotantokapasiteettia on pienennetty ja tehtaita on jouduttu lakkauttamaan. Metsäteollisuuden aloista vain puutuoteteollisuus on pystynyt parantamaan liiketuloksensa osuutta 2000-luvulla. Massan-, paperin- ja kartongin valmistukseen sijoitetun pääomantuotto on tippunut Suomessa vuodesta 2001 lähtien lähes 13 %:sta vain noin 1 %:iin. (Tilastot 2010) Tehtaat joutuvat tekemään mittavia investointeja kilpailukyvyyn säilyttämiseksi ja säästöjen aikaansaamiseksi ilman tuotantokapasiteetin pienenemistä. Tuotantotekniikan kehittymisen myötä tehtaiden ominaisenergiakulutus on tippunut merkittävästi viime vuosikymmeninä. (Kivistö 2010, 1) Sähkön ja tehdaspolttoaineiden hinnat ovat suuren kulutuksen vuoksi tehtaan talouden kannalta merkittävässä roolissa. Voimalaitospolttoaineiden hinnat ovat yli kaksinkertaistuneet viimeisen 15 vuoden aikana. (Tilastokeskus 2010) Kuvassa 2 on esitetty voimalaitospolttoaineiden hinnankehitys €/MWh. Uusiutuvien polttoaineiden käytöllä on saatu aikaan merkittäviä säästöjä tehtaiden energiantuotantokuluissa. Suomalaisilla sellu- ja paperitehtailla noin 80 % lämmöstä ja sähköstä tuotetaan puuperäisillä polttoaineilla ja tehtaat pystyvät tuottamaan noin 40 % tarvitsemastaan sähköstä itse. (Tilastot 2010). Fossiilisia polttoaineita käytetään pääasiassa vain meesauunin polttoaineena ja kattiloiden tuki- ja kuormapolttimissa. EU:n velvoitteiden mukaisesti Suomen on myös vähennettävä aiheuttamiaan CO₂-päästöjä. Mikäli sellun- ja paperin tuotanto ei tulevaisuudessa kuulu

päästövapaisiin aloihin, on uusiutuvien energialähteiden käyttö entistäkin tärkeämmässä roolissa kilpailukyvyyn säilymisen kannalta.

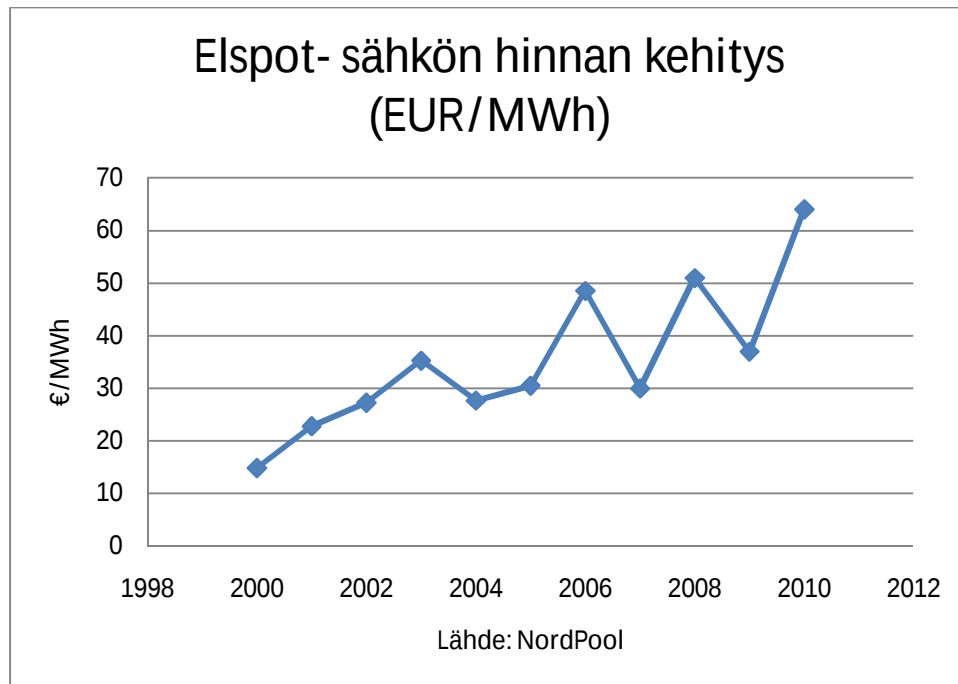


Kuva 2 Voimalaitospolttoaineiden hinnat sähköntuotannossa 1995-, €/MWh (Kuvio 10. Tilastokeskus.)

Tuotantoprosessien optimoinnilla ja sähköntuotannon maksimoinnilla pyritään saamaan aikaan säästöjä tehtaan energiankulutuksessa ja lisäämään tehtaan tuloja sähkön myynnillä. Energian tuotannon maksimoinnin myötä tehtaat voivat olla tulevaisuudessa enenevissä määrin mukana myös yleisillä energiamarkkinoilla. Tästä esimerkkinä voidaan mainita UPM Kymmene:n Kaukaan tehtaat, jossa tuotetaan sähköä ja lämpöä sellu- ja paperitehtaan tarpeisiin, sekä kaukolämpöä Lappeenrannan kaupungille.

Suurista tuotantomääristä ja sähkön korkeasta hinnasta johtuen, sähkön ja lämmön tuotannon lisäämiseksi tehdyt investoinnit ovat kannattavia. Kuvassa 3 on esitetty Nordpoolin määrittelemän Suomen alueen Elspot- sähkön hinnan kehitys. Kuvasta voidaan havaita sähkön hinnan yli nelinkertaistuneen viimeisen 10 vuoden aikana. Aiemmin mainittujen seikkojen vuoksi prosessien energiatehokkuuden ja tehtaiden energiaomavaraisuuden parantaminen on tärkeää sellu- ja paperiteollisuuden kannattavuuden säilymiseksi. Tämän

vuoksi suomalaisilla paperi- ja sellutehtailla tehdään runsaasti tutkimus työtä ja investoidaan runsaasti uusiin, tehokkaampiin energiaratkaisuihin.



Kuva 3 Sähkön hinnan kehitys. (Arvot: Nord Pool Spot)

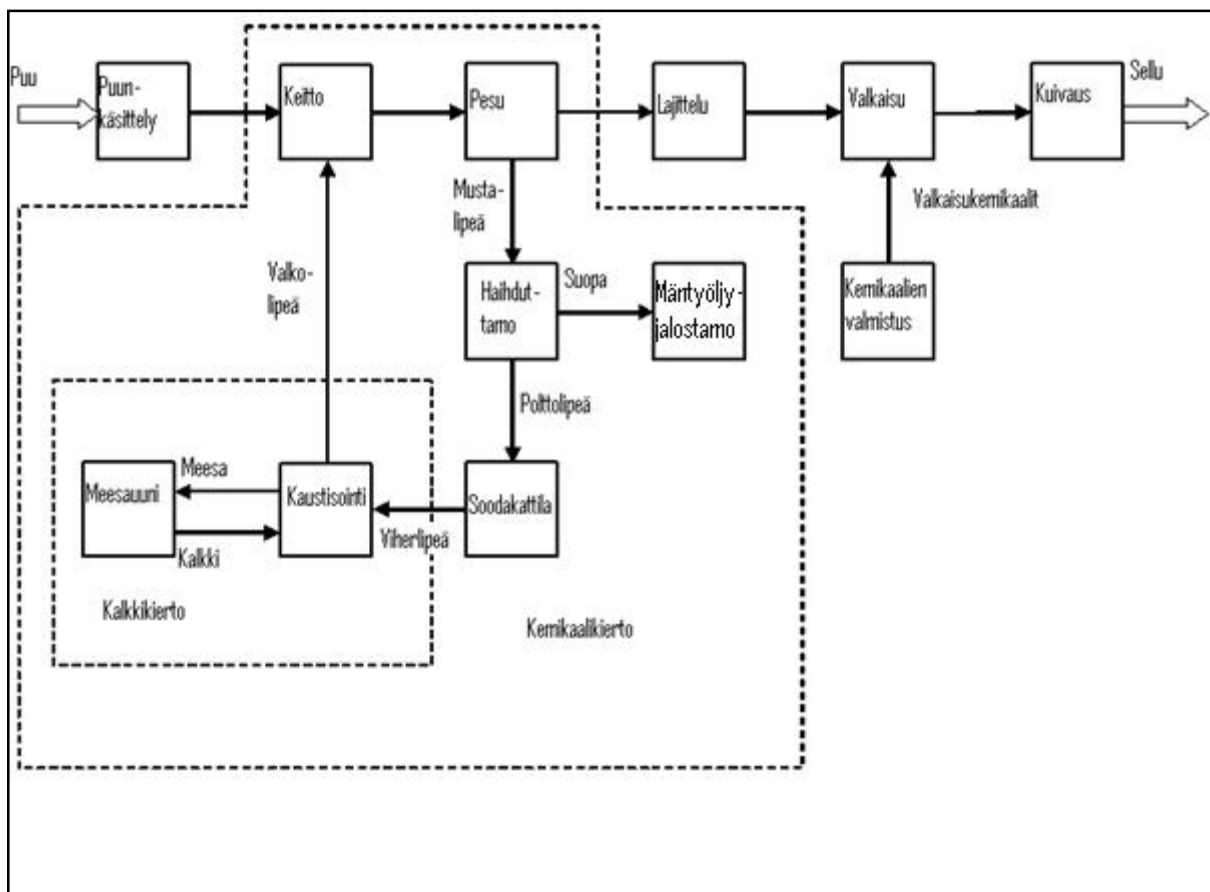
Sellutehtaat pyrkivät löytämään keinoja sähköntuotantonsa maksimoimiseksi. Sellutehtaiden höyrynpainetasojen valinnat perustuvat melko vanhoihin valintoihin. Sähköntuotantoa voitaisiin lisätä laskemalla tehtaan höyrynpainetasoja ja paisuttamalla höyry turbiinissa matalampaan vastapaineeseen. Matalampien höyryn paineiden käyttö merkitsee kuitenkin myös tehtaan investointikustannusten nousemista, höyrylinjojen ja laitteiden lämmönsiirtopintojen kokojen kasvaessa.

Tässä työssä tarkastellaan höyrynpainetasojen vaikutusta Suomeen sopivien, integroitujen ja integroimattomien sellutehtaiden sähköntuotantoon. Erilaisille tehdastyypeille muodostetaan vuosikeskiarvotaseet, sekä investointiarviot käytettävien höyrynpainetasojen mukaan. Vuosikeskiarvotaseiden ja investointiarvioiden avulla pyritään löytämään taloudellisesti optimaaliset paineet tehtaiden matalapainetasoille. Työssä tarkastellaan myös nuohoushöyryn paineen alentamisen vaikutuksia tehtaan sähkön tuotantoon. Lisäksi työssä tarkastellaan nykyisen matalapainetason rinnalle rakennettavan, alemmalla painetasolla

toimivan matalapainelinjaston, vaikutuksia tehtaan vuosikeskiarvotaseeseen, sekä muodostetaan tapaukselle investointiarvio.

3 SELLUTEHTAAN TOIMINTA

Suomessa kemiallisen sellun valmistus tapahtuu sulfaattisellumenetelmällä. Sulfaattisellumenetelmässä puukuitujen erottaminen toisistaan tapahtuu keittokemikaalien ja lämmön avulla. Tehdas koostuu kuitulinjasta, jossa massanvalmistus tapahtuu, sekä kemikaalikierrosta, jossa tuotetaan kemikaaleja keittoon, sekä lämpöä. Kemikaalikierto on edelleen jaettu lipeäkiertoon ja kalkkikiertoon. Mahdollisimman suuri osa keitossa tarvittavista kemikaaleista pyritään palauttamaan uudelleen käytettävään muotoon. Kuvassa 4 on kuvattu sulfaattisellutehtaan periaatteellinen prosessijako. Seuraavissa kappaleissa on kuvattu pääpiirteittäin tyypillisen, suomalaisen sulfaattisellutehtaan toiminta.



Kuva 4 Sulfaattisellutehtaan periaate toimintakaavio.

3.1 Puun käsittely

Suomessa sellun raaka-aineena käytetään pääasiassa mänty- ja koivutukkeja, sekä jonkin verran haapaa. Tukit ovat noin 2-6 metriä pitkiä ja halkaisijaltaan noin 7- 15 cm. Ne tuodaan auto-, laiva- tai junakuljetuksena tehtaan puukentälle, josta ne siirretään kuorintaan. Kuorinnan ensimmäisessä vaiheessa puut pestään irtoliasta lämpimällä vedellä, joka myös sulattaa jäiset puut. Varsinainen kuorinta tapahtuu kuorintarummussa, jossa puut hankautuvat toisiaan vasten ja kuori jauhautuu irti. Kun irronneesta kuoresta on poistettu kivet ja muut epäpuhtaudet, se revitään ja puristetaan, jonka jälkeen kuori kuljetetaan hakekentälle varastoitavaksi. Kuori voidaan polttaa tehtaan kuorikattilassa.

Kuorimisen jälkeen rangat syötetään hakkurille, jossa niistä hakataan tasakokoisia, ellipsimäisiä paloja. Yleisimmin hakettaminen tapahtuu kiekkohakkurilla, jossa puun leikkaaminen tapahtuu pyörivällä teräkiekolla. Hakettamisen jälkeen hakkeesta seulotaan sellun raaka-aineeksi sopiva tasalaatuinen ja oikean kokoinen hake. Sopimaton hake, oksat ja kepit murskataan ja poltetaan kuoren joukossa. Sellun keittoon menevä hake kuljetetaan hakekentälle varastoitavaksi avovarastoihin tai hake siloihin. (Kivistö 2008, 1-3)

3.2 Sulfaattisellun keitto

Sellun keitossa puukuidut erotetaan toisistaan liuottamalla kuitujen sidosaine, ligniini puusta lämmön ja kemikaalien avulla. Keitto kemikaaleina käytetään natriumhydroksidia (NaOH) ja natriumsulfidia (Na_2S). Keittokemikaalit sisältävä valkoliipeä sisältää myös muun muassa natriumkarbonaattia (Na_2CO_3) ja natriumsulfaattia (Na_2SO_4). Sellun keittotekniikoina käytetään, joko vuokeittoa tai eräkeittoa. Eräkeitto oli ainoa keittotapa aina 1950-luvulle saakka. 1960-luvun alussa energiatehokkaampi vuokeitin alkoi kilpailla eräkeittimen kanssa. Eräkeitteletekniikassa tapahtui merkittäviä parannuksia vasta 1980-luvulla, kun keittimen energiatehokkuus ja kemikaalien käyttötehokkuus parantuivat merkittävästi SuperBatch-keittimen myötä. (Gullichsen, Fogelholm1999, A493)

3.2.1 Eräkeitto

Eräkeitossa keittimessä valmistetaan yksi hake-erä kerrallaan, ennen sen tyhjentämistä ja uuden erän keittämistä. Käytössä on useita keittimiä, jotka toimivat kukin eri vaiheessa keittoa. Käytetyt keittoliemet kierrätetään, jotta niiden sisältämä lämpöenergia ja keittokemikaalit saataisiin talteen ja voitaisiin hyödyntää seuraavassa keittoerässä. Keittimen haketäyttö tehdään matalapainehöyryn kanssa, jolloin hakkeesta saadaan poistettua reaktiota haittaavaa ilmaa. Täytön jälkeen keittimeen pumpataan edellisestä keittoerästä talteen otettua mustalipeää. Lipeä poistaa hakkeesta lopun ilman ja esilämmittää sen 80 -90 °C: een. Lämminlipeätäytön loppuvaiheessa keittimen yläosassa oleva venttiili suljetaan ja keittimen paine nousee. Tämän jälkeen alkaa kuumalipeätäyttö, jossa keittimeen pumpataan 160 -170 °C lämpöistä mustalipeää ja poistetaan lämminlipeää. Talteen otettava lämminlipeä pumpataan lämminmustalipeäakkuun. Kun keitin on 140 °C lämpötilassa, aloitetaan myös kuuman valkolipeän pumppaus. Tämän jälkeen keitin lämmitetään keittolämpötilaansa noin 165 -170 °C. Yleensä tarvitaan vain 10 -15 °C:n lämmönnosto. Lämmitys tapahtuu höyryllä, joko kierrättämällä lipeää lämmönsiirtimissä tai suoralla höyrylämmityksellä, jolloin höyryn lauhteita ei saada takaisin. Varsinainen keitto aika on noin 35 -60 minuuttia. Keitto keskeytetään pumppaamalla keittimiin 60 -80 °C lämpötilassa olevaa pesulipeää. Keitossa käytetty kuumamustalipeä poistuu paineistettuihin kuumamustalipeäakkuihin. Syrjäytyksen jälkeen keitin tyhjennetään ja massa pumpataan puskusäiliöön. Puskuvaiheessa keittimen lämpötila on alle 100 °C.

Eräkeiton etuja ovat muun muassa pieni höyryn tarve, joustavuus ja kemikaalien tehokas hyödyntäminen. Nykyaikaisia eräkeitto menetelmiä ovat Cold Blow-, SuperBatch- ja Enerbatch-menetelmät. (Gullichsen, Fogelholm1999, A494-497) Eräkeitton menetelmä on käytössä muun muassa UPM Kymmenen Kaukaan tehtailla. (Vakkilainen 19.08.2010)

3.2.2 Vuokeitto

Vuokeitossa käytetään vain yhtä jatkuvatoimista keitinastiaa. Vuokeittimissä käytetään hydraulista keittoa tai höyry-nestefaasikeittoa. Hydraulisessa keitossa lämmitys tapahtuu

epäsuorasti lämmönsiirtimissä kun taas höyry-nestefaasikeitintä lämmitetään suoralla höyrylämmityksellä. Keittimen yläosaan syötetään koko ajan haketta ja keitetty massa poistetaan sen alaosasta. Kuvassa 5 on esitetty yleiskuva vuokeittoprosessista ja –laitteistosta.

Keitin on jaettu vyöhykkeisiin, joissa keiton eri vaiheet tapahtuvat. Ensimmäisessä vaiheessa hake syötetään hakesiilosta matalapainesulkusyöttimellä pasutusastiaan. Pasutusastiassa hakkeesta poistetaan höyryn avulla ilmaa. Höyrynä voidaan käyttää keittimen jälkeisen mustalipeän paisumisesta saatavaa höyryä tai matalapainehöyryä. Kaikissa tapauksissa pasutusastiassa tapahtuvaa esihöyrytystä ei kuitenkaan tehdä. Pasutusastiasta hake tippuu romuloukkuun, jossa hake upotetaan lipeään. (Virkola 1983, 367-369) Korkeapainepurkain siirtää hakkeen 100-150 kPa:n matalapaineesta yli 1 MPa:n prosessipaineeseen. Hake pumpataan lipeävirtauksen avulla syöttökiertopumpulla keittimen yläruuville. Tyypillisesti hydraulisen keittimen paine on noin 10 -15 bar:a ja lämpötila noin 100 -135 °C. Keittimessä hake valuu ylhäältä alaspäin kaikkien prosessien läpin. (Gullichsen, Fogelholm1999, A513-519)

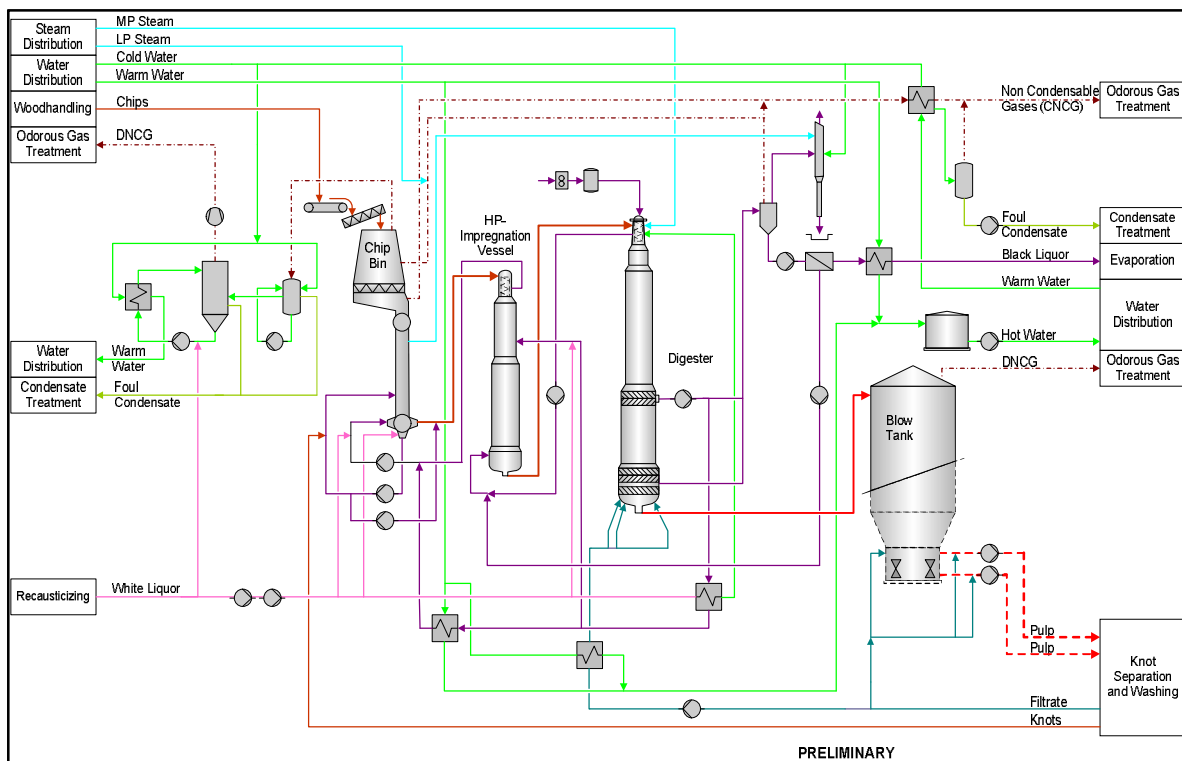
Keittimen yläosassa sijaitsee imeytysvyöhyke, jossa valkolipeä imeytyy hakkeeseen. Vaiheen lämpötila on noin 115- 125 °C ja imeytysaika 45-60 minuuttia. Lipeä poistetaan imeytysvyöhykkeen alaosasta ja lämmitetään noin 150 °C:een ja palautetaan keittimeen keskusputkesta vaiheeseen suunnilleen samalle tasolle.

Toisen vaiheen jälkeen lipeä lämmitetään 150 -170 °C: n keittolämpötilaan. Hake viipyy keittovaiheessa 1.5-2.5 tuntia. Keitto vaihetta seuraa lipeän poistovaihe, jossa hakkeeseen sitoutumaton lipeä poistetaan keittimestä. Poistettu lipeä paisutetaan ilmakehän paineeseen, jolloin se kiehuu. Kuten aiemmin kerrottu, käytetään syntynyt höyry hakkeen esihöyrytykseen pasutusastiassa ja höyrytimessä.

Keitto pysäytetään keittimen alaosassa sijaitsevassa pesuvaiheessa. Pesu voidaan suorittaa esimerkiksi Hi-Heat menetelmällä, jossa massaa pestään vastavirtaan kulkevalla pesusuodoksella. Pesuvaiheessa kiertävän suodoksen lämpötila on noin 130 °C ja pesuaika 1-

4 tuntia. Lisäksi keittimen pohjalle pumpataan alle 80 °C:n lämpötilassa olevaa pesuliipeää. Suurin osa pesuliipeästä pumpataan valmiin massan mukana puskusäiliöön. Massan poistolämpötila on noin 85-90 °C. Keittoliipeä ja osa pesuliipeästä pumpataan paisuntavaiheiden kautta haihduttamolle.

Vuokeiton etuina eräkeittoon verrattuna ovat muun muassa energiatehokkuus, tilatehokkuus, pienempi tehontarve, sekä pienemmät ainevirrat. (Gullichsen, Fogelholm1999, A513-519)



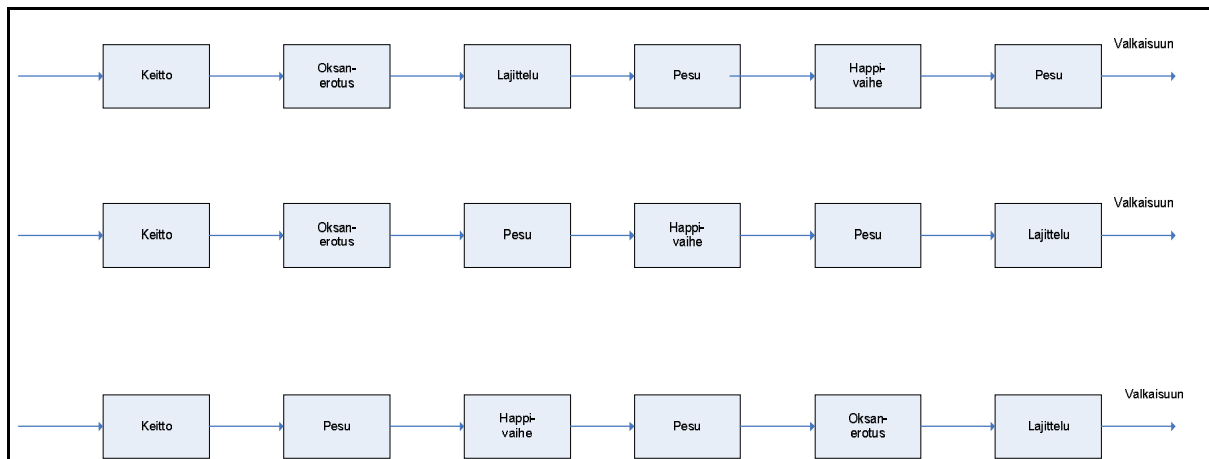
Kuva 5 Vuokeittolaitteisto (Pöyry Oy 2006)

3.3 Massan pesu ja lajittelu

Keiton jälkeen massa pestään ja lajitellaan. Pesu tehdään usein vaiheittain vastavirtapesuna. Vastavirtapesussa vaiheen pesunesteenä käytetään aina edellisestä vaiheesta saatavaa pesulientä. Tällöin vain viimeisen vaiheen pesu tapahtuu puhtaalla vedellä. Tällöin valtaosa

massan sisältämistä jäänöskemikaaleista saadaan talteen ja jäteveden puhdistustarve pienenee. (Virkola 1983, 683)

Lajittelun tarkoituksena on poistaa pestystä massasta kiinteät epäpuhtaudet, kuten hajoamaton puu, oksat ja hiekka, mahdollisimman pienin primäärikuituhäviöin. Epäpuhtauksia erotetaan massan joukosta kokoeroon perustuen seulalla tai tiheyseroon perustuen syklonissa. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A15, A122) Massaa pestään myös valkaisuvaiheiden välissä. Pesu-, valkaisu- ja lajitteluvaiheiden järjestys voi vaihdella. Kuvassa 6 on esitetty vaihtoehtoisia järjestyksiä massan pesulle ja lajittelulle.



Kuva 6 Pesu-, lajittelu- ja happivaiheen sijoitus mahdollisuuksia.

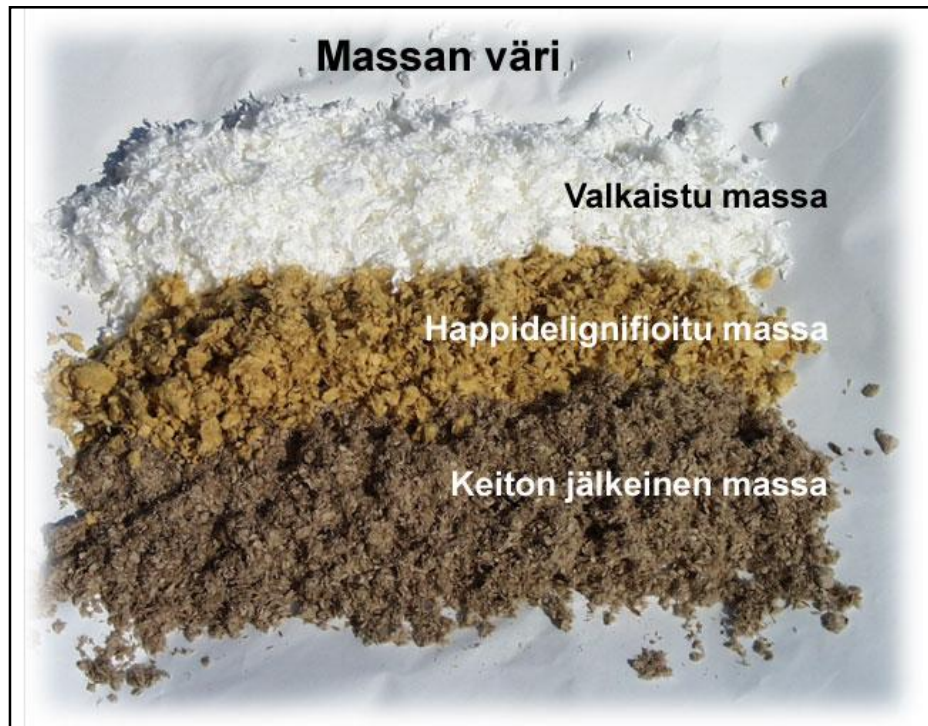
3.4 Happidelignifiointi

Sellu ja useimmat puun polysakkarideista ovat luonnostaan kirkkaan väristä, mutta ligniini antaa niille tummemman värin. Korkeasta ligniinin erotusasteesta huolimatta kemiallinen sellu on vielä tummaa pesuvaiheen jälkeen. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A15) Ligniiniipitoisuuden alentaminen ennen valkaisua on tärkeää myös tehtaan ympäristön suojelun kannalta. Happidelignifiointissa sellu pumpataan sekoittimeen alkaliin, kuten oksidoidun valkolipeän, sekä hapen ja höyryn kanssa. Tämän jälkeen kaasut erotetaan

sellusta ja sellu pestään ennen valkaisua. Happideligfiointi on korkeista pääomakustannuksista huolimatta kannattava, koska sillä voidaan alentaa valkaisun kemikaalitarvetta ja pienentää tehtaan jätevesi kuormitusta merkittävästi. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A137-139)

3.5 Valkaisu

Happideligfioinnin lisäksi massaa valkaistaan myös kemiallisesti. Massan vaaleuden lisäksi valkaisulla voidaan vaikuttaa myös epäpuhtauksien määrään, massan viskositeettiin ja lisätä massan alfaselluloosapitoisuutta. (Virkola 1983, 811) Valkaisu voidaan tehdä poistamalla värin aiheuttavaa ligniiniä tai värjäämällä sitä. Valkaistu ligniini kuitenkin kellertyy ja aiheuttaa ajan myötä myös paperin kellertymisen. Valkaisu voidaan tehdä ECF- (Elemental Chlorine Free) tai TCF- menetelmällä (Total Chlorine Free). ECF- valkaisu tapahtuu klooridioksidilla (ClO_2), kun taas TCF- valkaisussa käytetään kloorikemikaalien sijasta happikemikaaleja kuten happea, vetyperoksidia ja otsonia. (Kivistö 2008, 11) Kuvassa 7 on esitetty sellumassan väri eri valkaisu vaiheiden jälkeen.



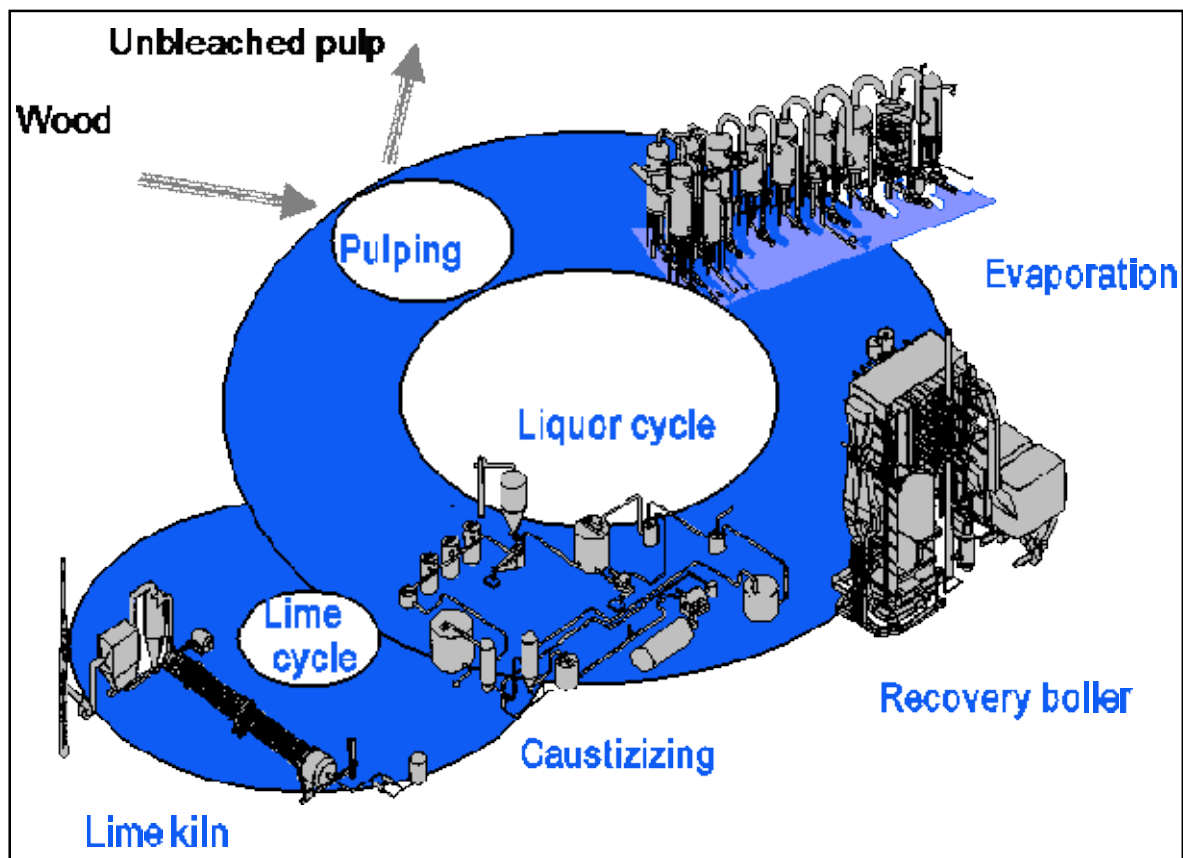
Kuva 7 Sellumassan väri. (KnopPulp 6.0)

3.6 Kuivaus

Valmis sellu kuivataan noin 90 % kuiva-ainepitoisuuteen. Integroidussa sellu- ja paperitehtaassa sellua ei aina kuivata, vaan se siirretään pumppumassana suoraan paperitehtaalalle. Sellua kuivataan ensin puristamalla, jolloin päästään noin 35- 50 % kuiva-ainepitoisuuteen. Tämän jälkeen kuivaus tapahtuu konvektio- tai kontaktikuivauksena. Säteilykuivausta ei käytetä sellun kuivaamiseen. Kontaktikuivaus tapahtuu sylinterikuivaimessa, joka koostuu joukosta höyryllä lämmitettäviä valurautasyntereitä. Massaraina kulkee kuivaimen läpi sylinterien pinnalla, jolloin sen sisältämä kosteus haihtuu ilmaan. Useimmiten mekaanisen massan kuivaus tapahtuu kuitenkin puhallinkuivaimella. Puhallinkuivauksessa kuivaimen yli kulkevaa massarainaa leijutetaan höyryllä lämmitetyllä kuivausilmalla niin ettei se pääse kosketuksiin kuivaimen kanssa. (Virkola 1983, 969-984) Kuivauksessa voidaan hyödyntää myös öljyn tai maakaasun palamisessa syntyviä kuumia savukaasuja. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A225)

3.7 Kemikaalikierto

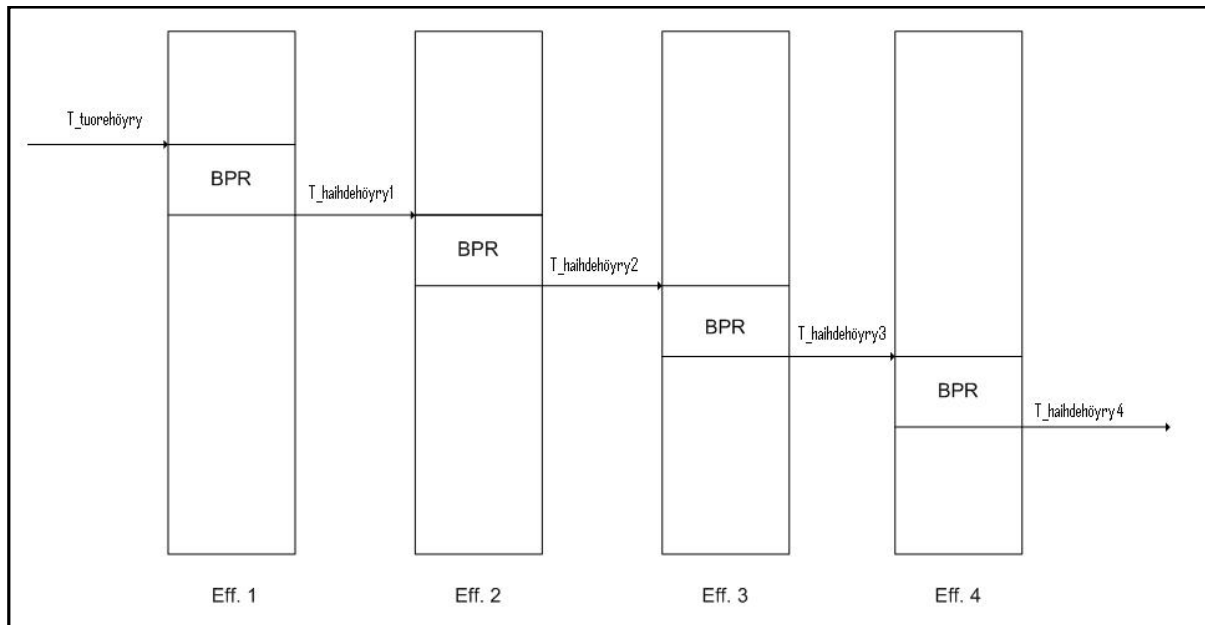
Kemikaalikierron tarkoituksena on keitossa käytettyjen kemikaalien talteenotto ja regenerointi uudelleen käytettävään muotoon, sekä mustalipeän sisältämän puuaineksen hyödyntäminen energian tuotannossa. Kemikaalikierto koostuu lipeäkierrosta, sekä meesakerrosta. Lipeäkierron tehtäviin kuuluvat pesulipeän haihdutus lipeän kuiva-ainepitoisuuden nostamiseksi, mustalipeän polttaminen, sekä keittokemikaalien talteenotto ja regenerointi uudelleen käytettävään muotoon soodakattilassa. Meesakerrosta natriumkarbonaatista kaustisoidaan natriumhydroksidia ja meesa regeneroidaan kalkiksi meesauunissa. Kuvassa 8 on esitetty sellutehtaan kemikaalikierto. Kuten kuvasta voidaan havaita, toimivat lipeä- ja meesakerrot osittain päällekkäin.



Kuva 8 Sulfaattisellutehtaan kemikaalikierto (Vakkilainen 2007, 5)

3.7.1 Haihduttamo

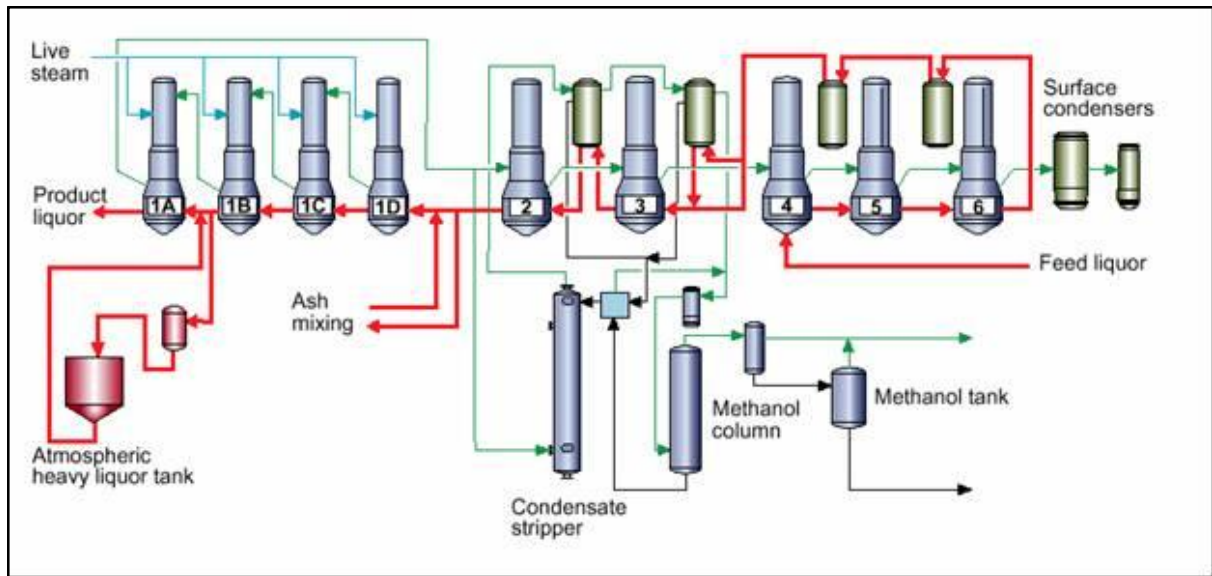
Keitosta saatavan lipeän kuiva-ainepitoisuus on noin 17 %. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on nostettava yli 65 %, jotta sen polttaminen soodakattilassa olisi mahdollista. Jotta lipeän poltosta ei syntyisi rikkipäästöjä, on mustalipeän kuiva-ainepitoisuus kuitenkin nostettava haihduttamalla yli 70 %. Suomalaisilla sellutehtailla mustalipeän kuiva-ainepitoisuus nostetaan haihduttamalla keskimäärin 77-78 %. (Vakkilainen 19.08.2010) Pesusta haihduttamolle tulevaa syöttölipeää vahvistetaan 20 % kuiva-ainepitoisuuteen haihduttimen jälkeisellä vahvistuslipeällä. Haihduttaminen tapahtuu 5-7 sarjaan kytketyssä haihdutinyksikössä. Jotta höyrynkulutus olisi taloudellista, tuorehöyryä käytetään vain viimeisessä vaiheessa vahvamustalipeän haihduttamiseen. Seuraavissa vaiheissa lipeän lämmittämiseen käytetään edellisten vaiheiden lipeän haihdehöyryä. Tällöin lipeä ja höyry virtaavat haihdutinyksiköstä toiseen vastakkaisiin suuntiin. Nestemäisillä seoksilla, jotka sisältävät hajoamattomia orgaanisia aineita, epäorgaanisia aineita tai molempia on korkeampi kiehumispiste kuin vedellä. Tätä lipeän ja veden kiehumispisteiden eroa sanotaan kiehumispisteen nousuksi. (Boiling Point Rise; BPR). (Gullichsen, Fogelholm 1999, B38) Jotta haihtuminen olisi mahdollista, yksikössä vallitseva paine ja lämpötila laskevat aina seuraavaan mentäessä. Paineen laskun aikaansaamiseksi viimeistä haihdutinvaihetta seuraa tyhjöpumppu tai höyryejektori. (Kivistö 2008, 16-20) Kuvassa 9 on periaatteellinen kuva kiehumapisteen noususta haihdutinyksiköissä.



Kuva 9 Höyryjen lämpötilat haihdutinyksiköissä.

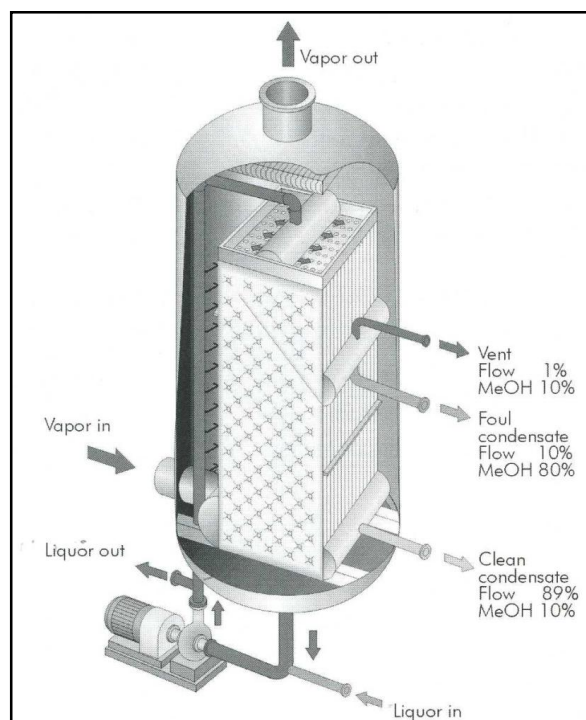
Haihdutin yksiköiden lisääminen on mahdollistanut mustalipeän haihduttamisen yli 80 % kuiva-ainepitoisuuteen. Kuiva-ainepitoisuuden noustessa lipeän viskositeetti kuitenkin nousee ja se on varastoitava paineistettuna ja aiempaa korkeammissa lämpötiloissa. Korkeammat lämpötilat voidaan välttää lämpökäsittelyllä (Liquor Heat Treatment), jolloin lipeän viskositeettiä saadaan laskettua. (Kivistö 2008, 16)

Kuvassa 10 on esitetty monivaihehaihduttamon toimintaperiaate. Lipeää seisotetaan välilipeäsäiliöissä haihdutinvaiheiden välissä, jotta mustalipeän sisältämä suopa ehtisi nousta sen pinnalle. Suopa kaadetaan lipeän pinnalta suopasäiliöön ja jatkojalostetaan esimerkiksi mäntyöljyksi. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A83-91)



Kuva 10 Monivaihehaihduksen toimintaperiaate. (Vakkilainen 2007, 25)

1980- luvun puoliväliin saakka nousevakalvohaihdutin (Rising film) oli laajamittaisessa käytössä. Nousevakalvohaihduttimessa lipeä pumpataan haihdutinyksikön pohjalle, josta se alkaa nousta haihduttimen putkia pitkin ylöspäin ensin lämmiten ja lopulta kiehuen. Haihduttamiseen käytetty höyry syötetään putkinipun ulkopuolelle. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B46) Myöhemmin käyttöön on otettu laskevakalvohaihduttimet (falling-film-haihdutin), joissa lipeä pumpataan haihduttimen yläosaan, josta se valuu lamellien tai putkien pintaa pitkin haihduttimen pohjalle. Lauhtuva höyry virtaa lamellin sisällä, lipeän kiehuessa sen pinnalla. Haihdutinyksiköissä puhtaat ja likaiset lauhteet, sekä haihduttamisessa syntyvät metanoli ja haisevat rikkiyhdisteet saadaan erikseen talteen. Kuvassa 11 on esitetty lamellityyppinen laskevakalvo haihdutinyksikkö. Edellisten lisäksi käytössä on ollut myös muun muassa pakkokierto-lauhduttimia. (Kivistö 2008, 16-20)



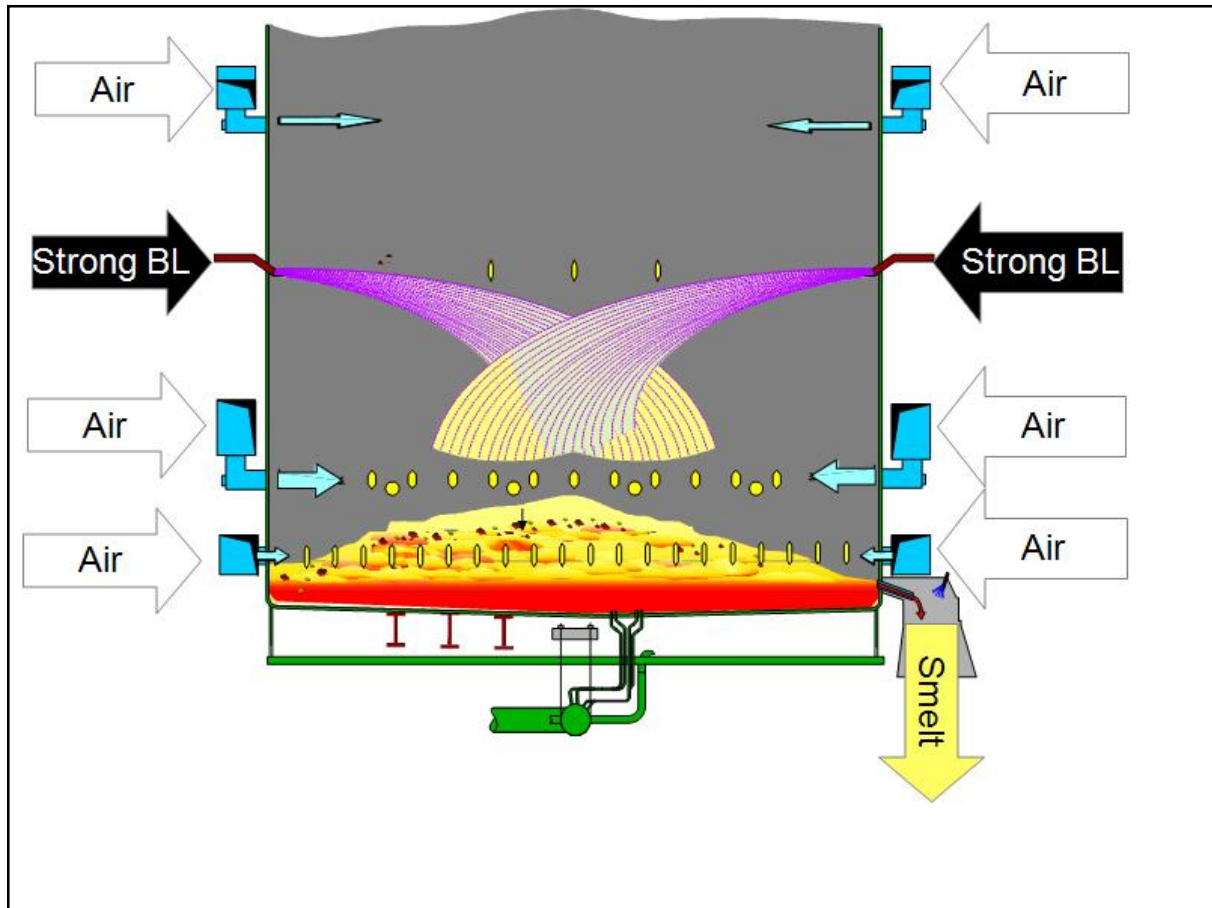
Kuva 11 Lamelli tyyppinen laskevakalvohaihdutin. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B47)

3.7.2 Soodakattila

Soodakattilan tarkoitus on ottaa talteen mustalipeän sisältämät kemikaalit ja regeneroida ne uudelleen käytettävään muotoon, sekä minimoida tehtaan jätevirtoja ympäristöystävällisellä tavalla. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B109-113)

Polttolipeä ruiskutetaan pieninä pisaroina kattilan tulipesään lusikkasuuttimilla. Tulipesässä pisara kuivuu ja haihtuvat aineet palavat. Jäännöshiili ja suurin osa epäorgaanisista aineista putoavat tulipesän pohjalle kekoon, jossa jäännöshiili palaa. Kemikaalit sulavat lämmön vaikutuksesta ja natriumsulfaatti redusoituu natriumsulfidiksi. Parhaissa soodakattiloissa reduktioaste on jopa 99%. Tulipesän pohjalle syötetään primääri-ilmaa vain sen verran, että keon lämpötila pysyy 1000-1100 °C:ssa. Sekundääri-ilmalla varmistetaan keossa kaasuuntuneiden aineiden palaminen. Pääasiassa natriumsulfidista (Na_2S) ja natriumkarbonaatista (Na_2CO_3) koostuva kemikaalisula johdetaan sularännejä pitkin liuotinsäiliöön, jossa siihen sekoitetaan valkolipeää, jolloin siitä muodostuu viherlipeää.

(Huhtinen et al. 2000, 164- 166) Lipeän polttamista soodakattilan tulipesässä on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12 Lipeän polttaminen soodakattilan tulipesässä. (Vakkilainen 2007, 41)

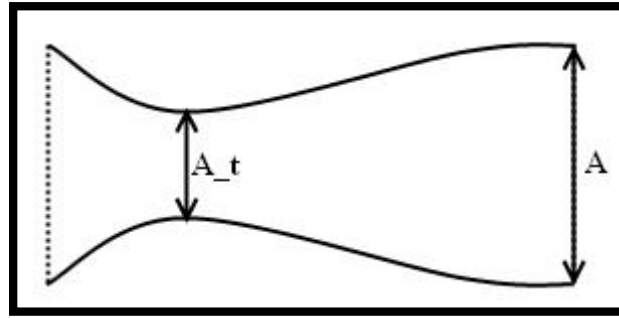
Palamisen ja reduktioreaktion aikana osa lipeän kemikaaleista höyrystyy. (Gulichsen, Fogelholm 1999, B122) Höyrystyneet kemikaalit ja lentotuhka, josta yli 90 % on natriumsulfaattia, poistuvat tulipesästä savukaasuvirran mukana. Kiinteässä muodossa oleva lentotuhka poistetaan savukaasuista kattilan jälkeisellä sähkösuotimella. Sula tuhka jähmettyy kattilan lämmönsiirtopinnoille, muodostaen vaikeasti poistettavia kerrostumia. (Huhtinen et al. 2000, 166) Kerrostumat heikentävät lämmönsiirtimien lämpövirtaa ja aiheuttavat savukaasujen virtausnopeuden noususta johtuvaa painehäiviötä savukaasuvirrassa. (Gulichsen, Fogelholm 1999, B124) Kerrostumien muodostumiseen voidaan vaikuttaa vähentämällä savukaasujen happipitoisuutta, nostamalla polttolipeän kuiva-ainepitoisuutta ja

mitoittamalla tulipesä riittävän suureksi, jotta savukaasujen lämpötila tulistin alueella on riittävän alhainen. (Huhtinen et al. 2000, 166)

3.7.3 Nuohoimet

Savukaasukanavia ja putkipintoja on nuohottava jatkuvasti niille kertyvästä liasta. Soodakattilan tulistinpintojen nuohoukseen käytetään korkeapainehöyryllä toimivia, ulos vedettäviä höyrynuohoimia. Koska nuohoinputket työnnetään kattilaan vain nuohouksen ajaksi ja niiden valmistamiseen käytetään kuumankestäviä materiaaleja, voidaan niitä käyttää jopa 1500 °C lämpötiloissa, tulistimien nuohoukseen. (Huhtinen 2000, 214) 4-6 metriä pitkät ja 7.15-15 cm halkaisijaltaan olevat nuohoinputket liikkuvat tulistin putkiston välissä 1-3 m/min nopeudella. Jotta nuohoaminen tapahtuisi koko lämmönsiirtimen leveydellä, on nuohoimet sijoitettu kattilan vastakkaisille puolille. Nuohoushöyryä ruiskutetaan soonisella nopeudella pyörivien nuohoinputkien päässä olevista suuttimista. Yleensä putkessa käytetään kahta 2.5-3.8 cm kokoista suutinreikää. (Teir 2003, 97) Nuohoimessa käytettävä höyry otetaan yleensä reduktioventtiilillä tulistin vaiheiden välisestä putkesta. Jotta höyryn kulutus pysyisi mahdollisimman tasaisena, käytössä on yleensä kokoajan yksi nuohoin. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B124)

Soodakattilan tulistinpinnat nuohotaan korkeapaineisella höyryllä ulos vedettävien nuohoimien avulla. Nuohoimen päässä olevat suuttimet ovat suppeneva-laajeneva tyyppisiä de laval- suuttimia. Suuttimen avulla höyry saadaan purkautumaan suuttimesta ylääänien nopeudella. Alisoonisella nopeudella virtaava höyry saadaan kiihtymään äänen nopeuteen paisuttamalla sitä suppenevassa suuttimessa. Kun painesuhde suuttimen yli on riittävän korkea, alkaa kaasu kiihtyä ylisooniseen nopeuteen suuttimen kurkun jälkeen. Kuvassa 13 on esitetty laval- suuttimen perusmuoto. Suuttimen muodon kannalta ratkaisevimmat mitat ovat suuttimen kurkun (A_t) ja suun pinta-ala (A).



Kuva 13 De Laval- suuttimen peruskuva.

Höyryn nopeuden kannalta ratkaisevaa on suuttimen kurkun ja suun pinta-alojen, sekä paineiden suhde. Vaaditun Machin-luvun saavuttamiseksi tarvittava suuttimen kurkun ja suun painesuhde voidaan ratkaista yhtälöllä 1.

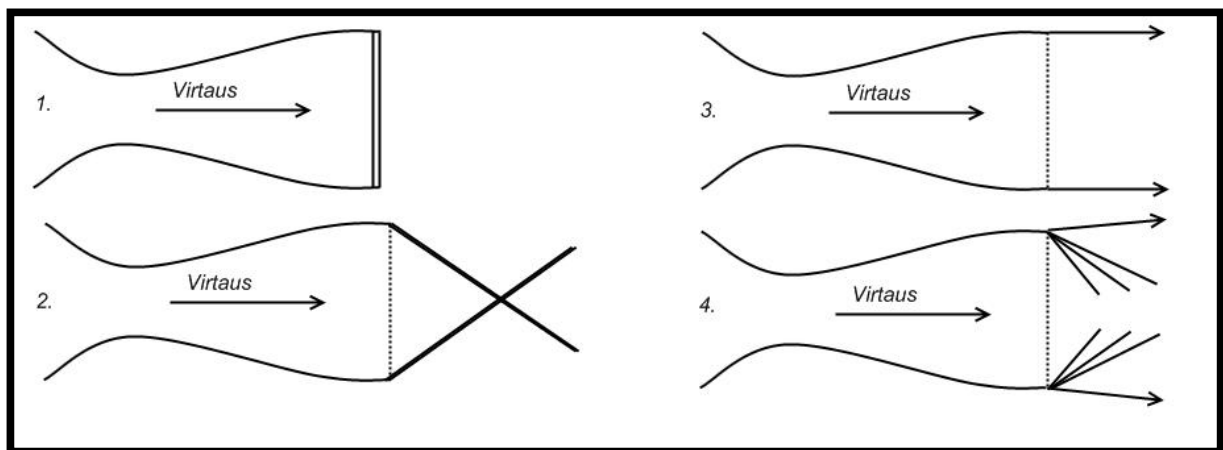
$$\frac{p}{p_t} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} * M^2\right)^{\frac{-\gamma}{\gamma-1}} \quad (1)$$

, missä	p	paine suuttimen jälkeen [Pa]
	p_t	paine suuttimen kurkussa [Pa]
	γ	[-]
	M	Machin luku [-]

Höyryn aineominaisuuksilla kaasu saavuttaa äänen nopeuden suuttimen kurkussa mikäli painesuhde suuttimen kurkun ja suuttimen jälkeisen tilan välillä on vähintään $\frac{p}{p_t} = 0,546$.

Tällöin virtauksella on sooninen nopeus suuttimen kurkussa, mutta painesuhde ei ole riittävän suuri ylisoonisen virtauksen kehittymiseen suuttimen laajenevassa osassa. Kun painesuhdetta nostetaan edelleen, muodostuu suuttimen laajenevaan osaan kohtisuora tiivistysisku, jossa kaasun paine kasvaa äkillisesti ja virtausnopeus tippuu jälleen alisooniseksi. Kun painesuhdetta edelleen kasvatetaan siirtyy tiivistysaalto lähemmäksi suuttimen päätä. Kuvassa 14 on esitetty tiivistys- ja paisunta-aaltojen muodostuminen suuttimessa. 1. kohdassa

on kuvattu tapaus, jossa kohtisuora tiivistysaalto muodostuu aivan suuttimen päähän. Kun painesuhdetta kasvatetaan edelleen, alkaa suuttimen päässä syntyä vinoja tiivistysaaltoja. Tapaus on kuvan kohdan 2. mukainen. Kuitenkin edelleen painesuhdetta kasvatettaessa löydetään tila, jossa kaasu virtaa suuttimesta puhtaasti ilman tiivistysaaltoja. Kaasun virtaus de Laval- suuttimesta ilman tiivistysaaltoja on esitetty kuvan 14, kohdassa 3. Tämän jälkeen painesuhdetta edelleen kasvatettaessa tapahtuu virtaus suuttimen päästä lähtevien vinojen paisunta-aaltojen kautta. Tapauksen mukainen ”alipaisuminen” on kuvattu kuvan 14 kohdassa 4. Koska höyryn virtausnopeus voi olla suppenevan osan jälkeisessä suuttimen kurkussa enimmillään äänennopeus, virtauksen massavirta ei voi kasvaa tästä suuremmaksi, vaikka painesuhdetta kasvatettaisiin. Tämän vuoksi suutin ”tukkeutuu” painesuhteen ylittäessä kriittisen arvon. (Backman et al. 2006, 38-43)

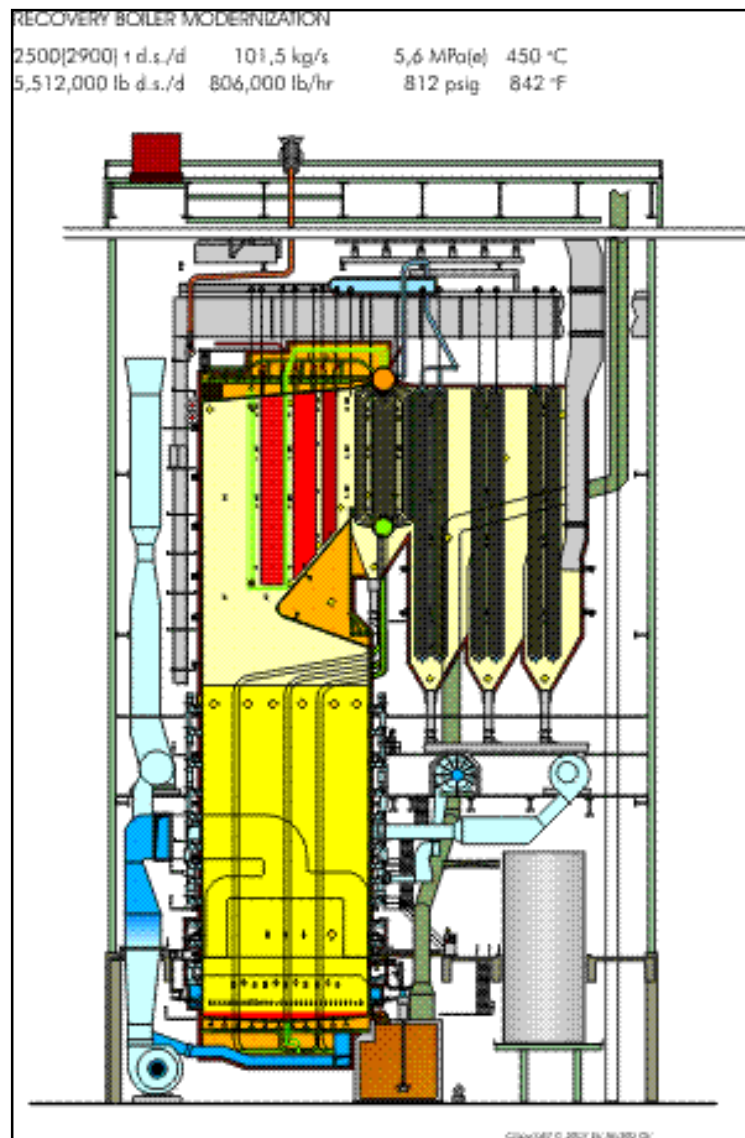


Kuva 14 Tiivistys- ja paisunta-aaltojen muodostuminen Laval-suuttimessa.

3.7.4 Kattilan vesi-höyrykierto

Höyrykattiloissa veden höyrystämiseen käytetään jokseenkin samaa tekniikkaa riippumatta polttoaineesta. Kattilan vesikierrrossa syöttövesiöstä pumpattavaa vettä esilämmitetään savukaasuilla ekonomaiserissa. Ekonomaiserista vesi pumpataan lieriöön, josta se virtaa kattilan alaosaan, tulipesän seinät muodostaviin höyrystin putkiin. Luonnonkiertokattiloissa vesi virtaa lieriöstä höyrystinputkiin höyryn ja veden tiheyseron vuoksi. Kun kattilan paine ylittää kriittisen pisteen (221 bar) luonnonkierto ei ole enää mahdollinen, koska lieriön

laskuputken ja höyrystinputkien välinen tiheysero on liian pieni. Tällöin joudutaan käyttämään pakkokiertoa. Pakkokiertoa käytetään, kun höyryä pumpataan lieriöstä höyrystinputkiin pakkokiertopumpun avulla. Putkissa muodostunut höyry virtaa takaisin lieriöön, jossa höyry ja vesi erotetaan toisistaan. Lieriöstä erotettu höyry tulistetaan kattilan tulistimissa ja johdetaan turbiinille. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B255- 264) Kuvassa 15 on esitetty soodakattilan periaatekuva, jossa on kuvattu myös kattilan vesi-höyry-, sekä ilmakierto.

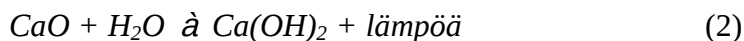


Kuva 15 Soodakattilan periaatepiirros. (Low Nox Retrofit 2010)

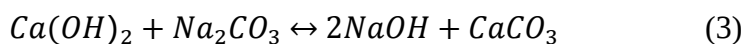
3.7.5 Kaustisointi

Kaustisointilaitos mahdollistaa sellutehtaan jatkuvan toiminnan ilman suurta kemikaalien korvaus tarvetta. Kaustisoinnin päätehtävä on tuottaa riittävästi valkolipeää keiton tarpeisiin. Kaustisoinnin yhteydessä toimii meesauuni, jolla meesasta voidaan valmistaa kaustisoinnissa käytettävää poltettua kalkkia.

Kaustisoinnin ensimmäisessä vaiheessa soodakattilalta tulevasta viherlipeä selkeytetään ja siitä poistetaan sakkaa. Meesauunilta saatava poltettu kalkki sammutetaan viherlipeään sammuttimessa. Tällöin viherlipeän vesi reagoi kalkin kanssa. Reaktiossa syntyy kalsiumhydroksidia (Ca(OH)_2), sekä lämpöä. Viherlipeän lämpötila nousee reaktion vaikutuksesta 14-17 °C. Sammutusreaktio on esitetty yhtälössä 2.



Syntynyt kalsiumhydroksidi reagoi viherlipeän natriumkarbonaatin (Na_2CO_3) kanssa, muodostaen natriumhydroksidia (NaOH) ja kalsiumkarbonaattia (CaCO_3). Reaktio päättyy tasapainotilaan. Reaktio tapahtuu kiinteiden ja liuenneiden aineiden välillä, jonka vuoksi se on hidas. Kalkkimaitoa pidetään sekoitussäiliössä 2- 2.5 tuntia, jotta reaktio ehtii päätyä tasapainotilaan. Yhtälössä 3 on esitetty kaustisointireaktio.



Kaustisoinnin jälkeen valkolipeä sisältää kaikki keitossa tarvittavat kemikaalit. Reaktiossa syntynyt meesa (CaCO_3) erotetaan valkolipeästä. Meesaa pestään toisiolauhteilla tai vedellä. Saatavaa suodosta, heikkovalkolipeää, sekoitetaan soodakattilalta saatavaan sulaan, viherlipeän muodostamiseksi. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B135- 142)

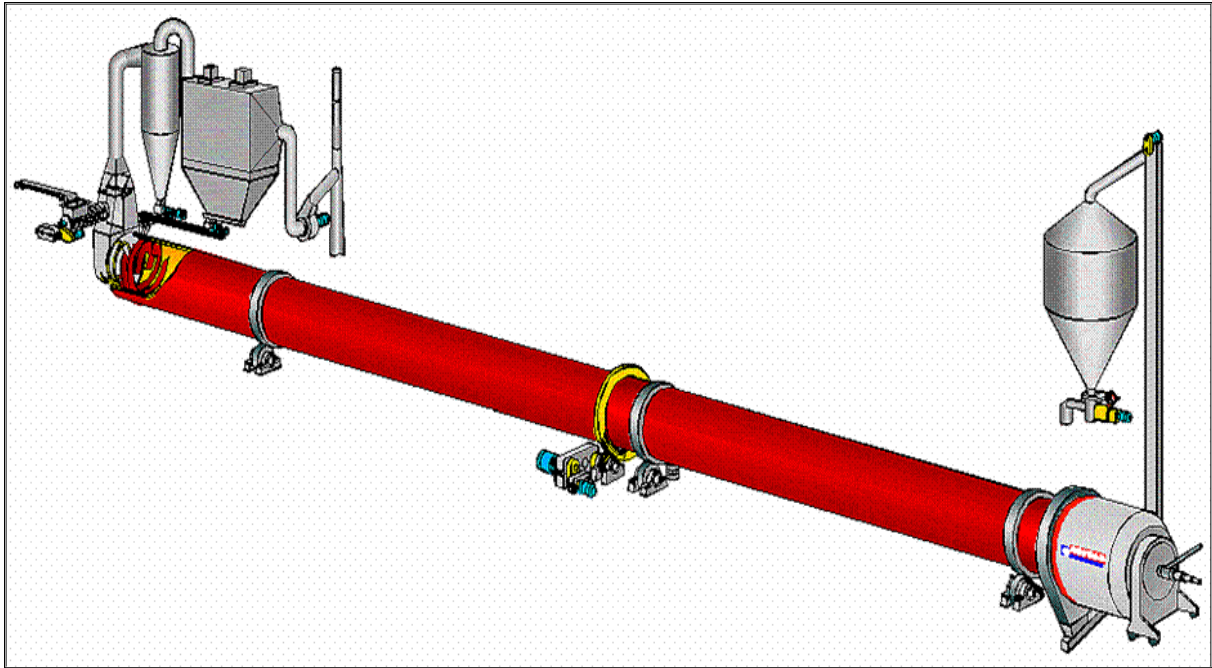
3.7.6 Meesauuni

Pesty meesa kuivataan ja siitä valmistetaan kalkkia meesauunissa. Meesaa kuivataan meesasuoitimella ja mahdollisella syklonilla, jonka jälkeen se syötetään uuniin noin 80 % kuiva-ainepitoisuudessa. (Kiiskilä, Mattelmäki 1992, 16) Uunissa meesa kuivuu, lämpenee, kalsinoituu ja lopuksi siitä sintrautuu palloja. Kalkin lisäksi reaktiossa syntyy todella paljon hiilidioksidia (CO₂). Tämän vuoksi meesauunin CO₂-päästöt voivat olla jopa 80 % modernin sellutehtaan CO₂- kokonaispäästöistä. (Vakkilainen 2008, 7) Kalsiumkarbonaatista eli meesasta muodostuu lämmön vaikutuksesta kalkkia seuraavan reaktion mukaisesti:



Kalkkia poistetaan jonkin verran kierrosta ja korvataan ostokalkilla, jotta prosessiin kuulumattomat NPE- (Non Process Elements) aineet, kuten pii (Si) ja magnesium (Mg) saataisiin poistettua. Kalkkia on myös vaihdettava, jotta sen reaktioteho ei laske. Kalkkia voidaan polttaa noin 300- 600 kertaa ennen kuin sen reaktiivisuus alkaa heiketä. (Vakkilainen 19.08.2010)

Meesauunina käytetään pyörivää kiertouunia. Meesa syötetään pulverimaissa muodossa pyörivään rumpuun. Rummun materiaalina käytetään keraamista tiiltä, sekä metallivaippaa. Jotta meesa saadaan valumaan uunin päässä olevaa poltinta kohti, on rummun oltava hieman kallellaan. Valmis kalkki valuu uunin poltinpäässä olevan hartian yli kalkin jäähdyttimeen, jossa sen sisältämää lämpöä siirretään palamisilmaan. Meesauunin polttoaineena käytetään yleensä maakaasua tai polttoöljyä. Kuvassa 16 on esitetty yleiskuvaus meesauunista.



Kuva 16 Meesaunin yleiskuva. (Vakkilainen 2007, 90)

3.8 Kuorikattila

Puunkäsittelyssä syntyvä puun kuorijäte voidaan hyödyntää tehtaan höyryntuotannossa. 1970- luvulle asti kuori poltettiin arinakattiloissa, mutta myöhemmin leijupetikattilat ovat korvanneet ne. Huonon ja epätasalaatuisen polttoaineen polttaminen on mahdollistunut tehokkaasti leijupetikattiloiden myötä.

Kuori kuljetetaan mekaanisesti polttoainesiilosta pudotusputkille, joista ne putoavat tasaisesti pedin päälle. Kattilan tulipesässä olevaa hiekkapetiä leijutetaan primääri-ilmalla. Kuplivassa kerroleijukattilassa leijutusnopeus on alhainen ja perimateriaali pysyy tulipesässä, muodostaen veden kiehumista muistuttavan kuplivan pedin. Kiertoleijupetikattilassa leijutusnopeus on niin nopea, että petimateriaalia tempautuu ilman mukana tulipesästä. Petimateriaali erotetaan kaasuista syklonissa ja palautetaan tulipesään. Polttoaine voidaan syöttää kattilaan myös tulipesään palaavan hiekan mukana. (Kivistö 2010, 8) Polttoaineen palaminen tapahtuu tulipesässä petimateriaalin joukossa. Pedin suuren lämpökapasiteetin ansiosta polttoaine kuivuu nopeasti ja syttyy lämpötilan noustua yli syttymispisteen. Jotta

3.9 Höyryturbiini

Sellutehtaan tarvitsema energia tuotetaan vastapainevoimalaitoksessa lämmön ja sähkön yhteistuotantona. Laitos tuottaa ensisijaisesti tehtaan prosesseissa tarvittavan höyryn ja tuottaa ylimääräisestä höyrystä sähköä. Kattilalta saatava korkeapaineinen tuorehöyry paisutetaan vastapaineturbiinissa matalapainetasoa vastaavaan vastapaineeseen. Tehtaan kuluttamat korkeampi paineiset höyryt, kuten nuohoushöyry ja välipainehöyry, saadaan vastapaineturbiinin välitoista. (Huhtinen et al. 2008, 63-75) Mikäli laitos tuottaa enemmän höyryä kuin kuluttaa, voidaan ylimääräinen höyry paisuttaa loppuun turbiinin jälkeisessä lauhdeperässä tai hyödyntää lämmöntuotantoon kaukolämpöperässä.

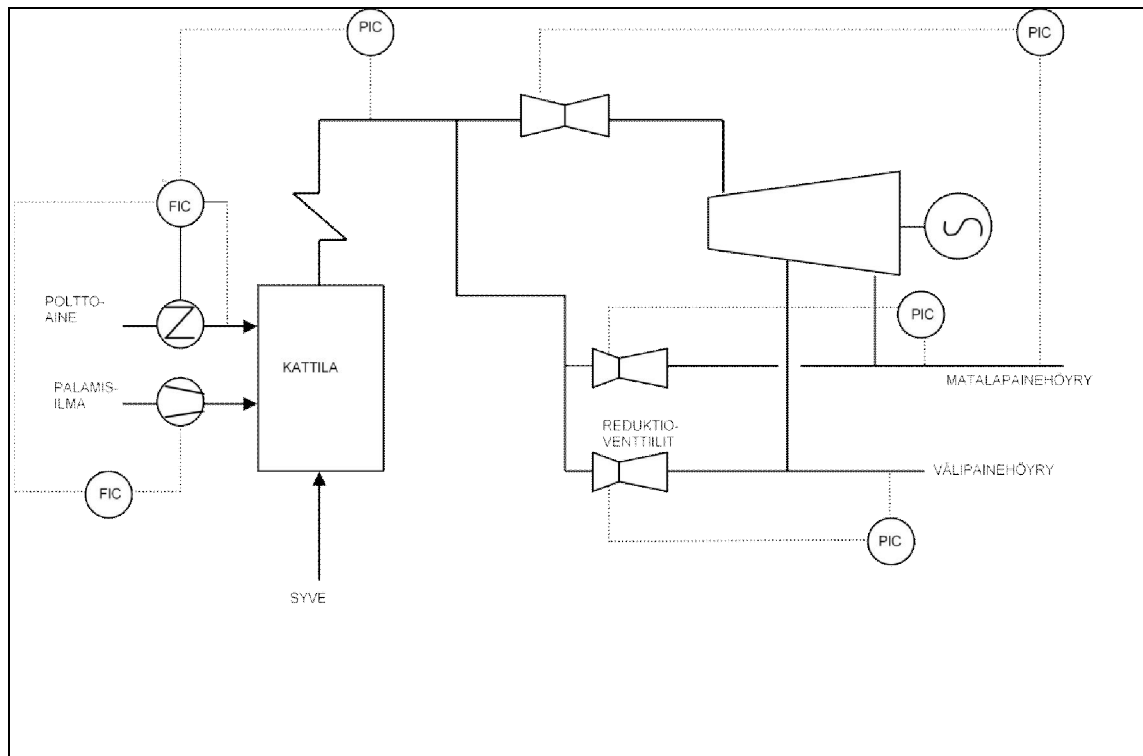
Höyryturbiinissa höyryn lämpö- ja paine-energia muutetaan turbiinin akselilla pyöriväksi mekaaniseksi energiaksi. Turbiineina käytetään aksiaali- ja radiaaliturbineja. Nimensä mukaisesti höyry virtaa aksiaaliturbiniin akselin suuntaisesti ja radiaaliturbiniin akselin säteen suuntainen. (Huhtinen et al. 2008, 109) Turbiini koostuu akselin mukana pyörivästä roottoriosasta ja kiinteästä staattoriosasta. Turbiinin pyörivä mekaaninen energia muutetaan sähköenergiaksi samalle akselille kytketyn generaattorin avulla.

Turbiinien tehot vaihtelevat 0,5- 600 000 kW. (Huhtinen et al. 2008, 109) Laitoksen rakennusaste kuvaa sähkön tuotannon suhdetta prosessilämmön kulutukseen. Metsäteollisuudessa käytettävien vastapainevoimalaitosten rakennusasteet ovat verrattain alhaisia 0,15- 0,5. (Kivistö 2010, 9)

3.10 Höyryn paineen säätö

Sellutehtailla käytettävissä vastapainehöyryä tuottavissa CHP- laitoksissa (Combined Heat and Power) höyryn paineen ja sähkötehon säätöön käytetään kiinteää paineen säätöä. Kiinteässä paineen säädössä tuorehöyryn paine pyritään pitämään vakiona, säätämällä kattilan polttoaine- ja palamisilmavirtaa. Sellutehtaalla höyrynpaineiden on pysyttävä

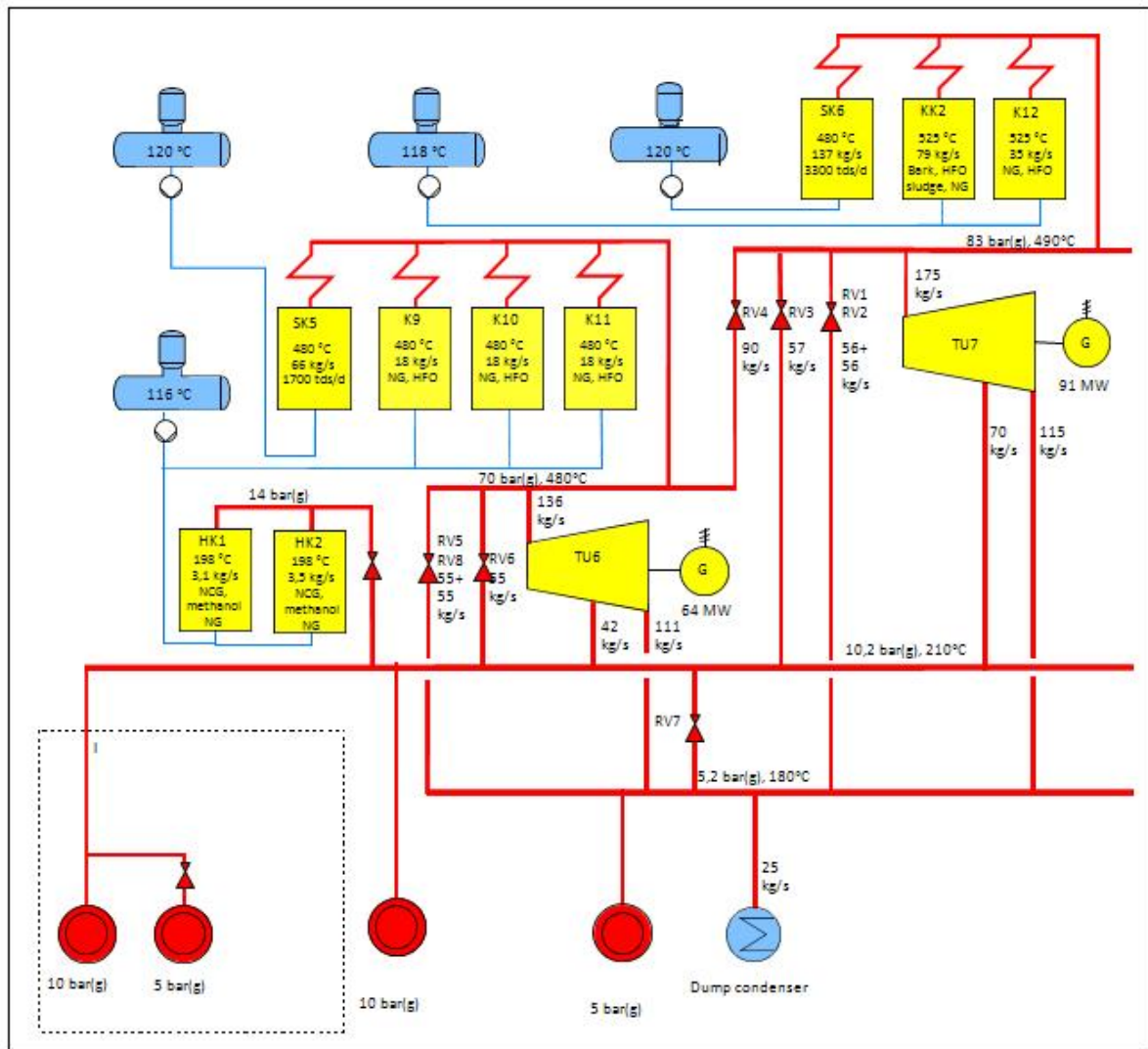
vakioina, kulutuskohteiden määräämällä tasolla, jolloin sähkötehoa ei säädetä lainkaan. Vastapaineen säätö tapahtuu ensisijaisesti turbiinin säätöventtiilin avulla matala- ja välipainehöyrylinjojen paineiden perusteella. Säättö tapa reagoi nopeasti höyryn paineen muutoksiin. Tuorehöyrypaineen säätäminen polttoainevirtaa säätämällä on huomattavasti hitaampaa. Polttoainevirran säätäminen vaikuttaa myös syötettävän palamisilman määrään. Mikäli turbiini ei ole käytössä, voidaan matala- ja välipainehöyry ottaa reduktioventtiilin kautta suoraan tuorehöyryputkesta. (Huhtinen et al. 2008, 154-158) Kuvassa 18 on esitetty höyrynpaineen säätöön käytettävien höyrynpaineen, sekä palamisilman ja polttoaineen virtausmittareiden käyttöperiaate.



Kuva 18 CHP-laitoksen höyrynpaineen säätö.

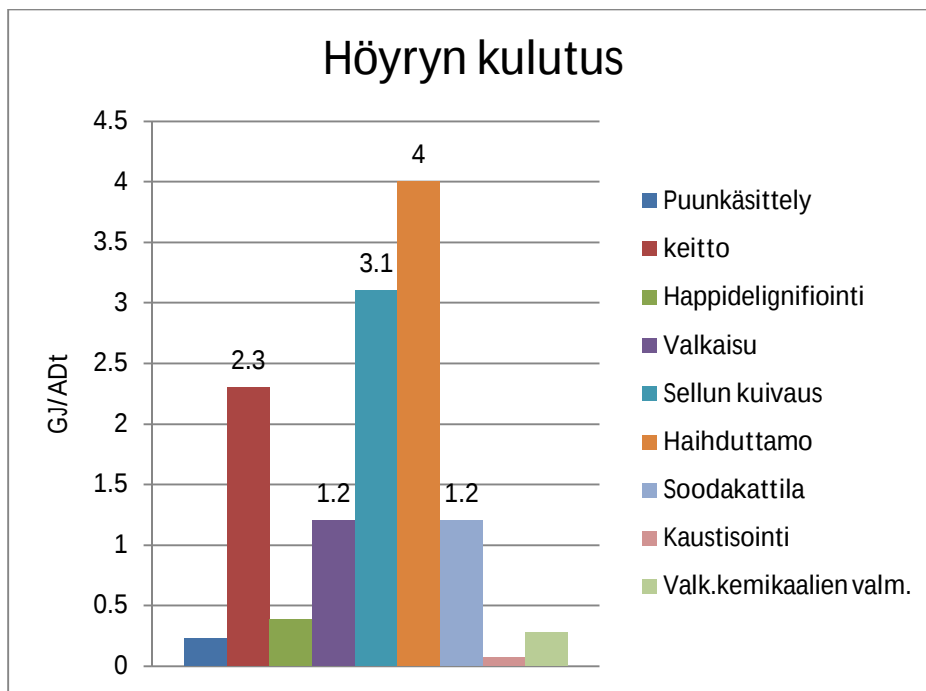
4 HÖYRYN KULUTTAJAT

Sellutehtaat kuluttavat lämpöenergiaa pääasiassa korkea-, väli-, ja matalapainehöyrynä, sekä lämpimänä vetenä. Höyryä kulutetaan pääasiassa prosessien lämmittämiseen ja paineistamiseen. Joissakin tapauksissa höyryn tuotantoon osallistuu useampi kattila, jolloin käytössä voi olla kaksi tai useampi tuorehöyrypainetaso. Korkeapainehöyryä käytetään suoraan kattiloiden nuohoimilla, sekä turbiinilla. Sooda- ja kuorikattilan lisäksi höyryntuotantoon voi osallistua esimerkiksi maakaasu- tai raskas polttoöljykäyttöisiä apukattiloita ja hajukaasukattila. Kuvassa 19 on esitetty yleiskuva sellutehtaan höyryverkosta. Kuvan tapauksessa höyryä voidaan tuottaa 9 eri kattilalla. Kuvan tapauksessa käytössä on kaksi höyrytasoa, joille voidaan tuottaa höyryä kahdella vastapaineturbiinilla tai suoraan tuorehöyrylinjojen reduktioventtiilien kautta. Kuvasta nähdään sellutehtaan monipuoliset höyryn tuottomahdollisuudet. Höyryä voidaan tuottaa kaikille tarvittaville tasoille ja systeemi voi reagoida helposti kapasiteetin vaihteluihin ja esimerkiksi laitteiden vikaantumisiin. Monimuotoisen höyryn tuotantosysteemin käyttö korostaa kuitenkin myös optimaalisten painetasojen valinnan merkitystä. Laitosten sähkön tuotantoa on pyritty lisäämään esilämmittämällä palamisilmaa ja syöttövettä. Nykyaikaisissa kattiloissa ilman esilämmitykseen voidaan käyttää jopa 4 eri höyryn painetasoa. Syöttöveden ja palamisilman esilämmitys lisäävät laitoksen höyryn kulutusta, mutta lisäävät sähkön tuotantoa. (Vakkilainen 19.08.2010)



Kuva 19 Sellutehtaan höyryverkko.

Tehtaat kuluttavat korkeapainehöyryä vain kattilan nuohoimilla ja turbiinilla. Kuvassa 20 on esitetty Markus Niemisen diplomityössä (2007, 86) esitettyjen sellutehtaiden höyrynkulutusten keskiarvot. Sellutehtaan suurimpia höyryn kuluttajia ovat haihduttamo, sellun kuivaus, keitto, valkaisu, sekä soodakattila. Integroidulla sellu- ja paperitehtaalla paperikone on tehtaan merkittävin höyryn kuluttaja. Lämmönkulutuksesta 75- 80 % tapahtuu matalapainehöyrynä ja noin 20- 25 % välipainehöyrynä. (Kivistö 2010, 2) Seuraavissa kappaleissa on esitelty sellutehtaan suurimpien lämmönkuluttajien höyryn kulutuksia.



Kuva 20 Sellutehtaan keskiarvoiset höyrynkulutukset.

4.1 Haihduttamo

Sellutehtaan suurin höyryn kuluttaja on haihduttamo. Haihduttamo käyttää pääasiassa matalapainehöyryä, sekä jonkin verran välipainehöyryä. Haihduttamo on usein suurin este matalapainetason paineen alentamiselle. Painetason laskeminen pienentäisi haihduttamon kapasiteettia ja siten kattilan höyryn tuotantoa. Tämän vuoksi haihduttamon kapasiteetilla on myös vaikutusta uusien tehtaiden vastapainetason määrittämisessä. Haihduttamon höyryn kulutukseen vaikuttavat tulevan pesulipeän kuiva-ainepitoisuus ja lämpötila, haihduttamon vaiheiden lukumäärä, sekä erityisesti lähtevän polttolipeän kuiva-ainepitoisuus. Lämmön tarvetta voidaan pienentää lisäämällä haihdutinvaiheiden lukumäärää. (Nieminen 2007, 56) Keskimäärin 7- vaiheisen haihduttamon lämmön ominaiskulutus on 380- 570 MJ/t_{H2O}. Lämmön kulutuksesta noin 75 % on matalapainehöyryä ja 25 % välipainehöyryä. (Kivistö 2008, 20) Uusissa haihduttamoissa mustalipeä haihdutetaan yli 80 % kuiva-ainepitoisuuteen. Kuiva-ainepitoisuuden nosto yli 80 % vaatii välipainehöyryn käyttöä. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B308)

4.2 Sellun kuivaus

Sellun kuivaus on sellutehtaan toiseksi suurin höyryn kuluttaja. Kuivauksen lämmönkulutus on noin 2,0- 2,7 GJ/ADt matalapaineista höyryä. (Kivistö 2008, 15) Kuivauksen puristinvaiheen tehokkuudella on merkittävä vaikutus kuivauksen lämmön kulutukseen. Viira- ja puristinosan kehittyminen ovat pienentäneet kuivurin lämmöntarvetta. Nykyaikaisissa kuivureissa puristusosan jälkeinen sellun kuiva-ainepitoisuus voi olla jopa 52 %. Myös lämmöntalteenoton ja huuvan jälkeisellä kuivausilman lämpötilalla on merkittävä vaikutus kuivurin lämmön kulutukseen. Puristusvaiheen tehostamisen lisäksi höyrynkulutusta voidaan pienentää tehostamalla lämmöntalteenottoa ja toisiolauhteen hyödyntämistä. Kuivurilta poistuvaa kosteaa ilmaa voidaan käyttää myös kuivausilman lämmittämiseen. (Nieminen 2007, 54, 76)

4.3 Keitin

Sellutehtaan suurin välipainehöyryn kuluttaja on sellunkeitin. Tämän vuoksi sen lämmönkulutuksella on suuri vaikutus tehtaan sähkön tuotantoon. Keittimen höyryn tarve on 1,7- 2,4 GJ/ADt riippuen käytettävästä puulajikkeesta. Keittimen lämmönkulutus riippuu paljon valko- ja mustalipeälämmönsiirtimien kapasiteetista. Keittovaiheen lämmönkulutukseen vaikuttavat muun muassa keitossa käytettävän lipeän ominaisuudet, sekä keitto-olosuhteet. Raaka-aineena käytettävä puulaji vaikuttaa keiton lämpötilan ja keittoajan valintaan ja siksi sillä on myös merkittävä vaikutus vaiheen höyryn kulutukseen. Myös puun kosteus, lämpötila ja laatu vaikuttavat keitto-ominaisuuksiin. Keittoon vaikuttavien ominaisuuksien vaihtelu lisää höyrynkulutusta. Lämmönsiirtimien tyyppillä ei ole niinkään suurta merkitystä höyryn kulutukseen. (Nieminen 2007, 45- 47)

Keiton lämpötilalla on merkittävä vaikutus keittimen lämmönkulutukseen. Modifioidun eräkeiton kehittäminen on mahdollistanut sellun keittämisen eräkeittoprosessilla vuokeittoa alhaisemmassa lämpötilassa. Vuokeittimen keittolämpötila on noin 150-170 °C. Keittolämpötila ei kuitenkaan saisi nousta pysyvästi yli 165 °C:n. Korkeampi keittolämpötila

johtaa epäyhdenmukaisemman sellun valmistukseen. (Tappi) Keittolämpötila riippuu puulajikkeesta, keittoajasta ja keittimen tyypistä. Eukalyptuksen keittolämpötila on noin 140-150 °C ja kovien, sekä pehmeiden puulajikkeiden korkeampi, noin 150-170 °C. Taulukossa 1 on esitetty syrjäytys- ja eräkeittimien lämmöntarve koivu- ja mäntysellulle.

Taulukko 1 Keiton lämmön kulutus mänty- ja koivusellulle. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B306)

	Syrjäytyseräkeitto	Vuokeitto
Mäntysellu:		
Välipainehöyry	1,6-1,9 GJ/ADt	1,7- 2,0 GJ/ADt
Matalapainehöyry	0,3-0,5 GJ/ADt	0,2-0,4 GJ/ADt
Koivusellu:		
Välipainehöyry	1,4-1,6 GJ/ADt	1,5-1,7 GJ/ADt
Matalapainehöyry	0,3-0,4 GJ/ADt	0,2-0,4 GJ/ADt

Moderneissa keittimissä keittoajat ovat pidempiä ja siksi myös keittolämpötilat ovat alhaisempia. (Nieminen 2007, 68) Lipeän lämmitys keittolämpötilaan tapahtuu eräkeitossa suoralla höyrylämmityksellä. Tällöin höyryn lauhteita ei kuitenkaan saada talteen. Keitossa kiertävää mustalipeää lämmitetään välipainehöyryllä. Höyryn kulutus on kuitenkin minimaalista, koska tarvittava lämpötilan nousu keittolämpötilaan on vain 10-15 °C. Vuokeitossa lämmitys tapahtuu epäsuorasti. Vuokeitto on myös eräkeittoa energiatehokkaampi prosessi. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A493-541) Keittimen pesuvaihe kuluttaa pääasiassa sähköä. Pesuvaiheen sähkönkulutus on noin 20- 30 kWh/ ADt.

4.4 Valkaisu

Keiton jälkeinen sellun valkaisu kuluttaa sekä matala-, että välipainehöyryä. Höyryä käytetään sellun lämmitykseen valkaisuvaiheissa. ECF- valkaisun lämmönkulutus on noin 0,4- 0,6 GJ/ADt matalapainehöyryä, sekä noin 0- 0,1 GJ/ADt välipainehöyryä. (Nieminen 2007, 51) Kulutukseen vaikuttavat valkaisuvaiheiden lukumäärä, lämpötila, sekä vaiheiden väliset lämpötilaerot. Lämpötilojen, sekä lämpötilaerojen nousu valkaisuprosessissa on

lisännyt valkaisuvaiheen energian kulutusta. (Kivistö 2008, 11) Lisäksi muun muassa happivalkaus ja peroksidivaiheen käyttö lisäävät höyrynkulutusta. Mikäli valkaisussa on paineellisia vaiheita, siinä käytetään välipainehöyryä. Höyrynkulutusta voidaan vähentää muun muassa sekundäärilämpöjen hyödyntämisellä. (Nieminen 2007, 51) Happidelignifioinnin lämmönkulutus on noin 0,3- 0,5 GJ/ADt matalapainehöyryä ja 0,1- 0,2 GJ/ADt välipainehöyryä. (Nieminen 2007, 49)

4.5 Soodakattila

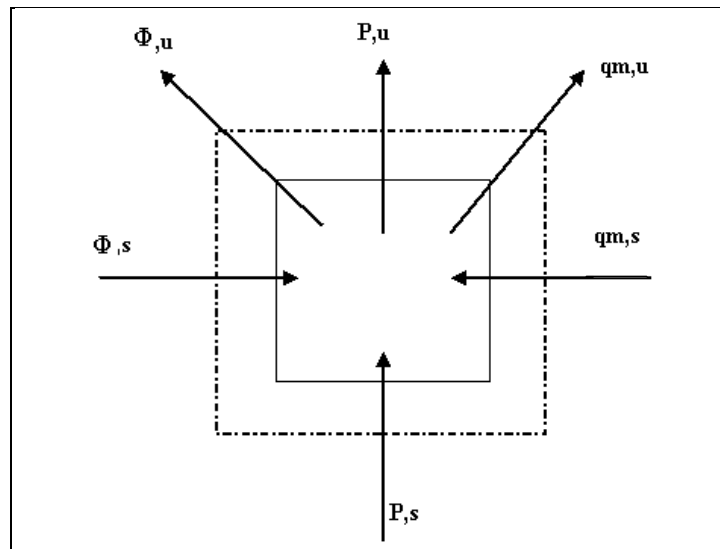
Soodakattila kuluttaa höyryä nuohoimissa, palamisilman ja syöttöveden höyryesilämmittimissä, sekä lipeän esilämmitykseen. (Kivistö 2008, 24) Pieni määrä höyryä käytetään myös sulan hajottamiseen. Palamisilma lämmitetään ensin matalapainehöyryllä 110- 120 °C:een ja välipainehöyryllä lopulliseen 150 °C:een. Kattilan nuohoimet käyttävät noin 2,5- 4 % kattilan tuottamasta tuorehöyrystä. (Nieminen 2007, 58) Vanhemmissa kattiloissa nuohoushöyry on otettu korkeapaineisena höyrynä tulistinvaiheiden välisestä putkesta reduktioventtiilin kautta, mutta uudemmissa kattiloissa käytetään turbiinin väliotosta saatavaa matalampi paineista höyryä. (Vakkilainen 14.07.2010) Soodakattilan lämmönkulutus riippuu sen koosta ja tyypistä. Modernin soodakattilan lämmönkulutus on noin 0,9- 1,6 GJ/ADt.

5 LASKENTA

Seuraavissas kappaleissa on esitetty työssä tehtyjen laskentojen teoriaa. Teoriaosassa on pyritty antamaan riittävä kuva työssä tehdyistä laskentatavoista ja periaatteista.

5.1 Taselaskenta

Tase laskennalla pyritään selvittämään energiavirtojen suuruudet tarkasteltavien rajapintojen yli. Taselaskelmien avulla voidaan selvittää tunnuslukuja prosessin hyötysuhteeseen ja kulutukseen liittyen. Prosessien energiatehokkuutta ja energian kulutusta voidaan tehostaa vertailemalla taselaskennasta saatuja tunnuslukuja aiemmin saatuihin tuloksiin, sekä muiden yksiköiden vastaaviin lukuihin. (Auvinen 2004, 10) Taseesta pyritään muodostamaan mahdollisimman täydellinen, tarkan kokonaiskuvan saamiseksi. Koska kaikkia vuotoja, häviöitä ja energia virtojen määriä ei voida koskaan määrittää täydellisesti, muodostettu energiatase ei vastaa täysin todellisuutta. Tämän vuoksi taselaskennan arvoina käytetään usein arvioita ja tyypillisiä kokemuseräisiä arvoja. Taseiden laskennassa tulee huomioida kaikki taserajan ylittävät massa- ja energiavirrat. Kuvassa 21 on esitetty perustapaus taseelle, jossa taserajan ylittää lämpö- ja sähkötehoa, sekä ainemassavirta.



Kuva 21 Energia- ja massatase

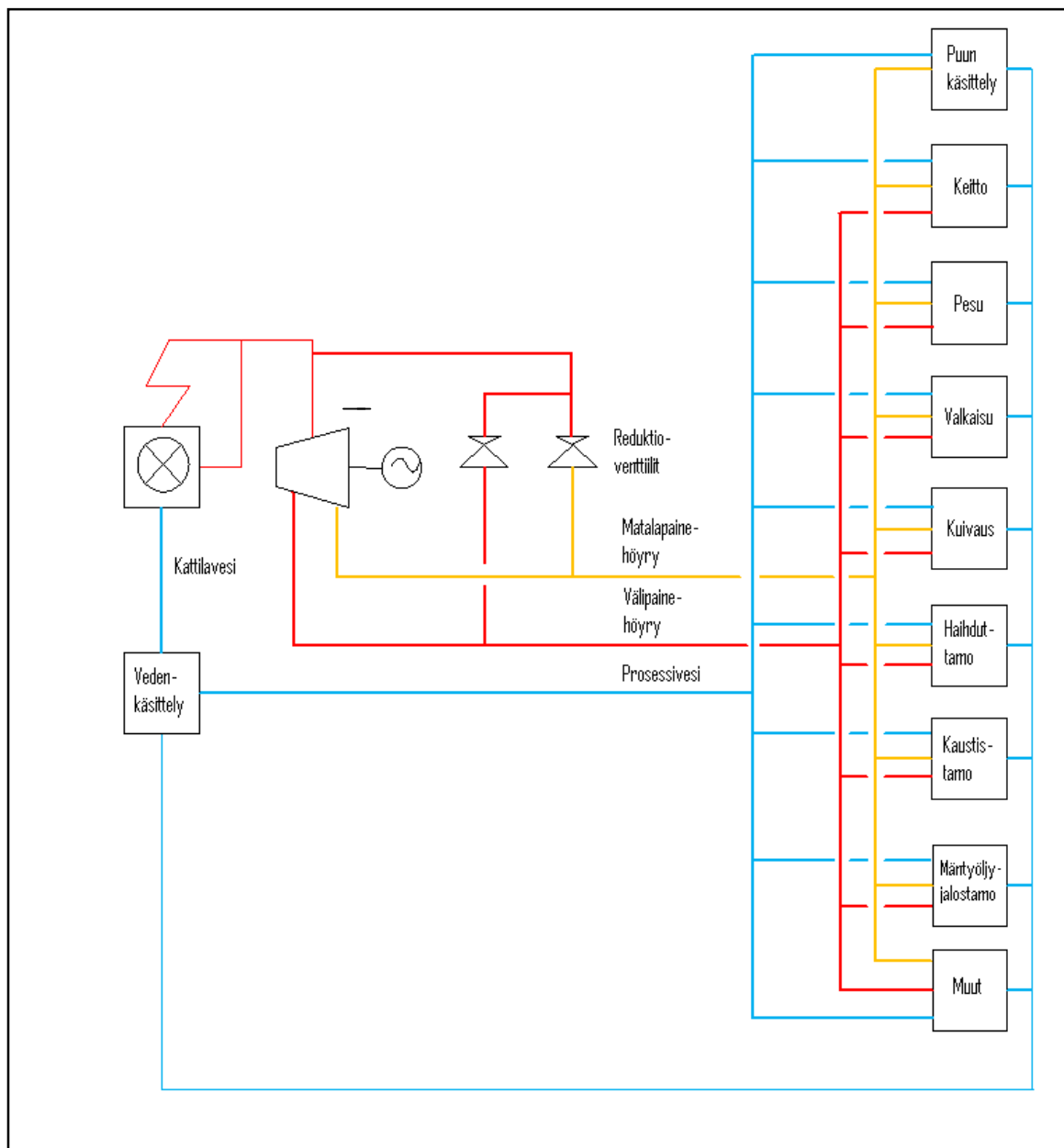
Koska taseeseen ei varastoidu energiaa eikä massaa, tulevien ja lähtevien virtojen summat ovat yhtä suuret. Tällöin taseen energiayhtälöksi voidaan kirjoittaa:

$$\sum_{i=1}^n \Phi + \sum_{i=1}^n P + \sum_{i=1}^n q_{m,i} * (h_{t,i}(T) + h_{m,i}) = 0 \quad (5)$$

,missä	Φ	taserajan ylittävä lämpövirta [W]
	P	taserajan ylittävä sähköteho [W]
	q_m	taserajan ylittävä massavirta [kg/s]
	h_t	tuntuva entalpia [kJ/kg]
	h_m	muodostumisentalpia [kJ/kg]

Taserajan ylittävä lämpöenergia on sellun tuotantoprosesseissa pääasiassa höyryä ja lämmintä vettä. Näiden lisäksi prosesseissa tarvitaan sähköenergiaa. Kuvassa 22 on esitetty periaatteellinen kuva höyryn ja veden kierrosta tuotantoprosesseissa. Sellutehtaalla taseiden rajoina voidaan käyttää kutakin valmistusvaihetta tai prosessia. Lisäksi tehdas jaetaan

alueisiin ainevirtojen mukaan. Prosessien ainevirrat koostuvat muun muassa höyry-, vesi-, lauhde-, kuitu- ja kemikaalivirroista. Kuitulinja koostuu valmistusvaiheista, joissa raakapuusta saatavasta kuidusta valmistetaan sellua. Kemikaalikierto koostuu keittokemikaalien regenerointiin ja valmistukseen tarvittavista prosesseista. Kemikaalikierron osana toimiva kalkkikierto mahdollistaa valkolipeän jatkuvan valmistuksen. Sulfaattisellutehtaan prosesseista ja ainevirroista on esitetty peruskuvaus aiemmin kuvassa 4.



Kuva 22 Höyryn ja veden kierto sellutehtaalla.

5.2 Putkiston koon määrittäminen

Valittavilla höyrynpainetasoilla on merkittävä vaikutus sellutehtaan investointeihin. Varsinkin matalapainetasoa alennettaessa höyryn massavirta lisääntyy merkittävästi höyryn ominaistilavuuden kasvaessa ja energiasisällön pienentyessä. Tämän lisää tehtaan investointikustannuksia, putkikokojen ja lämmönsiirtopinta-alojen kasvaessa. Tässä työssä tarkastellaan matalapainetason muutoksen vaikutusta tehtaan investointikustannuksiin putkiston, sekä suurimpien matalapainehöyryn kuluttajien, haihduttamon ja kuivurin, osalta. Välipainetason muuttamisesta johtuvat muutokset putkistoinvestoinneissa ovat tehdasmittakaavassa suhteellisen pieniä, koska putkikoot muuttuvat vain vähän. Välipaineen muuttaminen vaikuttaa merkittävimmin valkaisun laiteinvestointeihin ja vain vähäisissä määrin haihduttamon ja kuivauskoneen investointeihin. Tämän vuoksi työssä ei ole tarkasteltu välipaineen muutosten vaikutusta tehtaan investointikustannuksiin. Työssä tarkastellaan investointikustannuksia vain materiaalien osalta eikä se ota kantaa investointien käyttökulujen osuuteen.

Sellutehtaalla käytetään jokseenkin saman kokoista välipainehöyryverkkoa koko tehtaan alueella. Matalapainehöyryputkiston koko puolestaan vaihtelee osastoittain. (Esa Vakkilainen 26.05.2010) Turbiinilta lähtevä siirtoputkiston riittävän tarkka mitoitus on laitoksen käytön ja talouden kannalta merkittävä. Liian suuri putkisto lisää erityisesti rakennusvaiheen kustannuksia muun muassa putkiston ja putkisiltojen materiaalikustannusten noustessa. Liian pieneksi mitoitettu putki lisää siirtoputkiston häviöitä ja kulutuskohteella käytettävä höyryn teho laskee. Putkisto ei myöskään tällöin pysty vastaamaan laitoksen kapasiteetin vaihteluihin. (Pipe and pipe sizing 2010)

Höyryputkisto voidaan mitoittaa valittavaan höyryn virtausnopeuteen tai putkiston painehäviöön perustuen. Mitoituksen apuna voidaan käyttää virtausnopeuteen tai painehäviöön perustuvia putkiston mitoitus taulukoita ja kuvaajia, joiden avulla putkikoko

voidaan valita standardikokoisista putkista. Liian suuren painehäviön ja kulumisen välttämiseksi höyryn virtausnopeudet tulisi olla:

- 25-30 m/s Kylläiselle höyrylle
- Tulistettu höyry:
 - o 30- 40 m/s höyryn paineella 40 bar
 - o 17-22 m/s höyryn paineella 80 bar
 - o 15-20 m/s höyryn paineella 125 bar

Turbiinilta lähtevän höyryn paine valitaan kulutuskohteen tarpeiden mukaisesti. Putkistoa suunniteltaessa tiedetään kulutuskohteilla tarvittavan höyryn massavirta, paine ja lämpötila. (Huhtinen 2008, 86) Myös höyryn lämpötila on otettava huomioon valittaessa putkiston materiaalia. Suomessa sellutehtaiden välipainehöyryn lämpötila vaihtelee 194 – 295 °C välillä. Taulukossa 2 on esimerkki höyryputken mitoitusputken sopivasta taulukosta.

Taulukko 2 Putkikoon valintataulukko höyrylle. (Huhtinen 2008, 86)

Höyrymäärä	kg/h	15	30	60	120	250	500	1000	2000	4000
	kg/s	0,004	0,008	0,017	0,033	0,069	0,14	0,28	0,56	1,11
Paine (bar)		Putkikoko DN								
0-0,05	MPa	20	25	40	65	100	125	200	250	350
0,05- 0,15		15	20	32	40	65	80	125	150	250
0,15- 0,35		15	15	25	32	50	65	100	125	200
0,35- 0,65		15	15	20	25	40	50	65	100	150
0,65- 1,3		15	15	15	20	32	40	65	80	125

Kun höyryn tiheys ja massavirta tiedetään, voidaan putken halkaisija myös laskea. Näin ollen virtauksen tarvitsema putken vähimmäishalkaisija voidaan laskea yhtälöllä 6.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_m}{\rho \cdot \pi \cdot w}} \quad (6)$$

, missä	d	putken halkaisija [m]
	q_m	höyryn massavirta [kg/s]
	ρ	höyryn tiheys [kg/m ³]
	w	höyryn virtausnopeus [m/s].

Putkistoa suunniteltaessa putkiston painehäviö pyritään pitämään mahdollisimman vähäisenä. Tällöin höyryä ei tarvitse ottaa turbiinilta tarpeettoman korkeassa paineessa. Painehäviötä lisäävät muun muassa putken mutkat, supistajat ja venttiilit. Putken kokonaispainehäviö voidaan laskea yhtälöstä 7.

$$\Delta p = \left(\Sigma k + \frac{f \cdot l}{d} \right) \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (7)$$

, missä	Δp	höyryn painehäviö [Pa]
	Σk	kertavastusten summa [-]
	f	kitkakerroin [-]
	l	Putken pituus [m]
	d	putken sisähalkaisija [m]

Putkiston kertavastukset koostuvat venttiilien, mutkien, laippojen ja muiden putkiston osien kertavastuksista. Kertavastuksien arvot saadaan taulukoista. Putken kitkakerroin saadaan esimerkiksi Moodyn- käyrästä, pinnankarheuden ja putken halkaisijan suhteen, sekä Reynoldsin- luvun funktiona.

5.3 Putken seinämävahvuuden laskeminen

Putken seinämävahvuus on usein standardikokoisissa putkissa riittävä käytettävillä paineilla. Putket ja putkisillat tulee kuitenkin mitoittaa niin suuriksi, että putkisto voidaan tarvittaessa täyttää vedellä. (Esa Vakkilainen 28.07.2010) Putkiston materiaalikustannuksilla on kuitenkin suuri vaikutus putkikoon valintaan, joten tarpeettoman paksu seinämäisten putkien käyttöä vältetään. Välipaineputkiston käyttöpaine ei yleensä vaikuta putkiston seinämävahvuuteen vaan putki valitaan standardikokoisista putkista, kuten esimerkiksi NP 10 tai NP 16. Putken minimi seinämänpaksuus (s_o) voidaan laskea yhtälöllä 8.

$$s_o = \frac{p \cdot d_u}{2 \cdot \sigma_{sall} + p} = \frac{p \cdot d_{sis}}{2 \cdot \sigma_{sall} - p} \quad (8)$$

, missä	s_o	teoreettinen seinämävahvuus [mm]
	p	höyrynpaine [MPa]
	d_u	putken ulkohalkaisija [mm]
	d_{sis}	putken sisähalkaisija [mm]
	σ_{sall}	laskenta- eli sallittujännitys [N/mm ²]

Yhtälössä 8 esiintyvä laskentajännitys voidaan laskea yhtälöstä 9.

$$\sigma_{sall} = \frac{\sigma_l}{n} \quad (9)$$

, missä	σ_l	materiaalin lujuusarvo [N/mm ²]
	n	varmuuskerroin [-]

5.4 Putkiston investointikustannus

Höyryn massavirran ja höyryn tilanarvojen avulla voidaan ratkaista putkiston koko aiemmin esitetyllä tavalla. Putkiston investointi kustannus voidaan ratkaista sen painoon ja painoyksikköä kohden olevaan kiinteään putkihintaan perustuen. Putkiston massa voidaan laskea halkaisijan ja seinämän vahvuuden, sekä putkimateriaalin tiheyden avulla seuraavasti:

$$m = \pi * d_s * s * l * \rho \quad (10)$$

, missä	m	putkiston massa [kg]
	s	putken seinämänvahvuus [m]
	ρ	materiaalin tiheys [kg/m ³]

Putkiston kokonaisinvestointi voidaan laskea massan ja materiaalihinnan avulla yhtälöstä 11.

$$I_p = mk_p * m \quad (11)$$

, missä	I_p	putkistoinvestointi [€]
	mk_p	putkiston materiaalihinta [€/kg]

5.5 Haihduttamon investointi kustannus

Haihduttamon investointien laskemiseksi on määritettävä haihdutinyksikköjen lämmönsiirtopintojen alat. Pinta-alan avulla voidaan arvioida haihduttamoinvestoinnin suuruutta, aiemmin rakennettujen haihduttamojen investointien perusteella. Kustannusarviosta saadaan luotettavampi käyttämällä tietoa jo rakennettujen haihduttamojen kustannuksista.

Lämmönsiirtopinta-alojen määrittämiseksi on laskettava haihduttamon tehollinen lämpötilaero haihdutinyksikköä kohden. Haihduttamon tehollinen lämpötilaero voidaan laskea yhtälöstä:

$$\Delta T_{teh} = (T_h - T_l) - \sum \Delta T_{kp} - \sum \Delta T_p \quad (12)$$

, missä	ΔT_{teh}	tehollinen lämpötilaero [°C]
	T_h	1. yksikköön tulevan höyryn lämpötila [°C]
	T_l	viimeisestä yksiköstä poistuvan höyryn lauhtumislämpötila [°C]
	ΔT_{kp}	kiehumapisteen nousu (BPR) [°C]
	ΔT_p	vaiheen painehäviöstä johtuva lämpötilaerohäviö [°C]

Yhtälössä 12 oleva kiehumapisteen nousu voidaan laskea yhtälöllä 13. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B20)

$$\Delta T_{kp} = 6.173X - 7.48X(X)^{0.5} + 32.747X^2 \quad (13)$$

, missä X kuiva-aine pitoisuus [$\text{kg}_{\text{kuiva-ainetta}} / \text{kg}_{\text{vettä}}$]

Tehollisen lämpötilaeron suhteen tarvittava haihdutus pinta-ala voidaan määrittää käytössä olevien haihduttamojen tietojen perusteella. Haihduttamon lämmönsiirto pinta-alat voidaan ratkaista kokemusperäisten haihduttamon lämmönsiirtopinta-alan ja tehollisen lämpötilaeron, sekä aiemmin laskettujen arvojen perusteella seuraavasta yhtälöstä.

$$A_h = \left(\frac{\Delta T_{teh,kok}}{\Delta T_{teh,h}} \right) * A_{kok} \quad (14)$$

, missä A_h haihduttamon lämmönsiirtopinta-ala [m^2]
 $\Delta T_{teh,kok}$ kokemusperäinen haihduttamon tehollinen lämpötilaero yksikköä kohden [$^{\circ}\text{C}$]
 $\Delta T_{teh,h}$ määritettävän haihduttamon tehollinen lämpötilaero yksikköä kohden [$^{\circ}\text{C}$]
 A_{kok} kokemusperäinen haihduttamon lämmönsiirtopinta-ala [m^2]

Haihduttamon investoinnin määrittämiseen käytetään kokemusperäistä haihdutus pinta-alaan perustuvaa neliö hintaa. Haihduttamon hinta ei kuitenkaan muutu täysin samassa suhteessa pinta-alan muutoksen suhteen, joten investointia on korjattava kertoimella. Korjauskerroin voidaan määrittää yhtälön 1 avulla. Yhtälössä käytettävä potenssi on tapauskohtainen ja voidaan valita kirjallisuuden perusteella.

$$K_k = \left(\frac{A_h}{A_{kok}} \right)^{0.6} \quad (15)$$

, missä K_k Investoinnin korjauskerroin [-]

Kun tiedetään kokemusperäinen haihduttamon investointikustannus tietyllä haihdutuspinta-alalla, voidaan laskea kustannus arvio uudelle haihduttamolle edellä laskettujen arvojen avulla seuraavasti.

$$I_h = K_k * mk_h \quad (16)$$

, missä I_h haihduttamon investointikustannus [€]
 mk_h kokemusperäinen haihduttamon hinta [€]

5.6 Kuivauskoneen investointikustannus

Kuivauskoneen investoinnin määrittämiseen käytetään myös kokemusperäistä kuivauskoneen neliöhintaa. Koska telasto on kuivauskoneen mittavin investointi, lasketaan sen investointi ja arvioidaan sen osuus koko kuivauskoneen investoinnista. Laskettaessa investoinnin suuruutta ei määritetä kuivauskoneen telaston suuruutta vaan lasketaan investointi telaston ja kuivattavan sellumassan lämpötilaerojen suhteella. Koska telastoa lämmittävä höyry lauhtuu sen sisällä, on laskelmissa oletettu telaston olevan höyryn saturaatio/lauhtumis lämpötilassa. Kuivauskoneen lämmönsiirtopinta-ala voidaan määrittää kokemusperäisen telaston pinta-alan, sekä telaston ja massan lämpötilaeron avulla seuraavasta yhtälöstä.

$$A_k * (T_k - T_{massa,k}) = A_{k,kok} * (T_{kok} - T_{massa,kok}) \quad (17)$$

, missä $A_{k,kok}$ kokemusperäinen telaston kuivauspinta-ala [m²]

T_{kok}	kokemusperäinen telaston lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{\text{massa,kok}}$	kokemusperäinen sellumassan lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
A_k	määritettävä kuivauskoneen telaston pinta-ala [m^2]
T_k	kuivauskoneen telaston lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{\text{massa,k}}$	sellun lämpötila kuivauskoneessa [$^{\circ}\text{C}$]

Kuivauskoneen investoinnin korjauskerroin ja investointi voidaan laskea aiemmin esitetyillä yhtälöillä 15 ja 16 avulla muutamalla tekijät kuivauskonetta vastaaviksi.

5.7 Vuosittaisen kokonaisinvestoinnin laskeminen

Aiemmin esitettyjen yhtälöiden avulla voidaan määrittää laitoksen kokonaisinvestointi kullekin painetasolle. Koska voidaan olettaa, että laitoksen tuotot ja kulut ovat yhtä suuret jokaisena laitoksen pito vuotena, voidaan sen vuosittainen investointikustannus laskea annuiteettimenetelmällä. Annuiteettimenetelmässä investoinnin vuosittainen lyhennys on saman suuruinen jokaisena investoinnin pitovuotena. Annuiteettimenetelmän mukainen laitosinvestoinnin vuosittainen lyhennys voidaan laskea yhtälön 1 mukaan.

$$A_0 = \frac{I_a}{c_{a,i}} \quad (18)$$

, missä A_0 vuosittainen maksu [€]

I_a investointi [€]

$c_{n,i}$ annuiteetti tekijä [-]

Yhtälössä 1 oleva annuiteettitekijä määrittää vuosittaisen lyhennyksen nykyarvon ennalta määritettynä pitoaikana. Annuiteettitekijä voidaan laskea yhtälöllä 1.

$$c_{n,i} = \frac{i \cdot (1+i)^a}{(1+i)^a - 1} \quad (19)$$

, missä i investoinnin/lainan korko [%]
 a lainan maksuaika, investoinnin pitoaika [a]

5.8 Turbiinin tehon laskenta

Höyryn sisältämä energia muutetaan turbiinin staattorin ja roottorin siipisysteemien avulla liike-energiaksi sen paisuessa korkeammasta paineesta matalaan. (Larjola 2002, 9) Turbiinin tehoa määritettäessä pyritään selvittämään höyryn paisuessaan luovuttaman energian määrä. Turbiiniin teho voidaan laskea vaihe kerrallaan, etenemällä väliottojen väli kerrallaan. Vaiheen tuottama mekaaninen teho voidaan laskea yhtälöstä 20.

$$P = \eta * q_m * (h_1 - h_2) \quad (20)$$

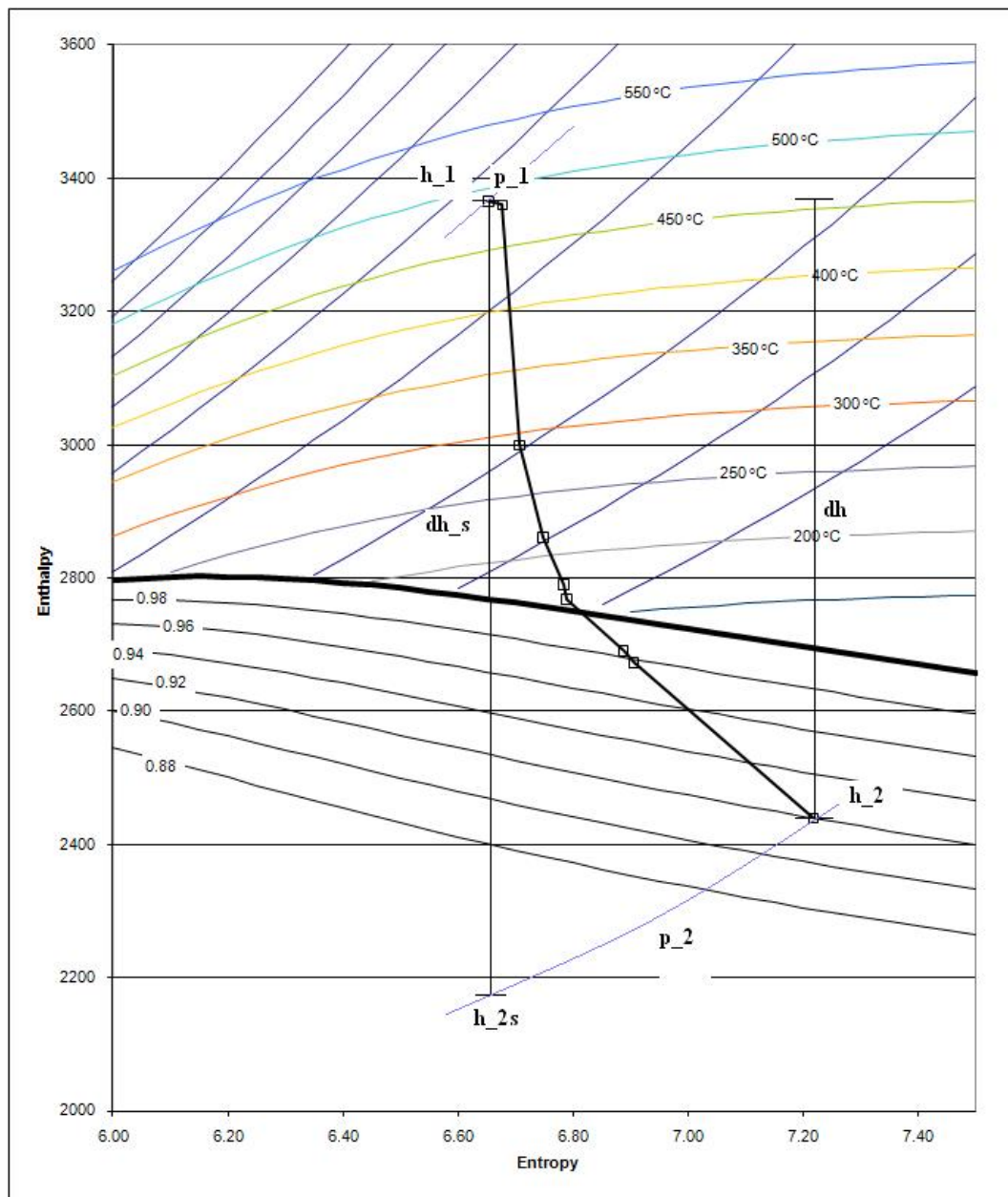
, missä P turbiinin mekaaninen teho [kW]
 η turbiinin mekaaninen hyötysuhde
 q_m höyryn massavirta [kg/s]
 h_1 entalpia ennen turbiini vaihetta [kJ/kg]
 h_2 entalpia turbiinin jälkeen [kJ/kg]

Höyryn entalpiat voidaan määrittää sen paineen ja lämpötilan funktioina taulukoista. Turbiiniväliottojen paineet valitaan prosessin höyryntarpeen mukaan. Höyryn lämpötila vaiheen lopussa voidaan laskea seuraavan yhtälön avulla.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}^{\frac{R' \cdot \eta_{pt}}{c_p}} \quad (21)$$

, missä	T_2	höyryn lämpötila vaiheessa [°C]
	T_1	höyryn lämpötila edellisessä vaiheessa [°C]
	p_1	höyryn paine edellisessä vaiheessa [kPa]
	p_2	höyryn paine vaiheessa [kPa]
	R'	höyryn reali kaasuvakio [kJ/kgK]
	η_{pt}	turbiinin polytrooppinen hyötysuhde [-]
	c_p	höyryn ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

Turbiinin hyötysuhde (η) voidaan laskea turbiinin todellisen ja isentrooppisen paisunnan entalpiamuutosten avulla. Turbiinin isentrooppinen ja todellinen paisunta on esitetty h,s-tasossa kuvassa 23. Kuvan dh_s esittää isentrooppisen paisunnan entalpian muutosta höyryn paisuessa paineesta 1 paineeseen 2 ja dh todellisen paisunnan entalpian muutosta.



Kuva 23 Turbiinin paisuntakäyrä.

Turbiinin hyötysuhde (η) voidaan laskea todellisen ja isentrooppisen paisunnan entalpian muutosten avulla seuraavasti.

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (22)$$

, missä h_{2s} entalpia isentrooppisen paisunnan jälkeen [kJ/kg]

Suunnitteluvaiheessa ei usein voida käyttää todellisen turbiinin mittausdataa hyötysuhteiden ratkaisemiseen. Tämän vuoksi turbiinivaiheiden lämpötilojen ratkaisuun käytetään kokemusperäisiä, tyypillisiä havaittuja turbiinin isentrooppisia hyötysuhteita. Kokemusperäisiä höyryturbiinin isentrooppisia hyötysuhteita on esitetty taulukossa 3. Turbiinin isentrooppinen hyötysuhde on kuitenkin tapauskohtainen ja vaihtelee jonkin verran turbiinityyppien ja valmistajien välillä.

Taulukko 3 Höyryturbiinin kokemusperäisiä isentrooppi hyötysuhteita. (Voimalaitosopin perusteet 2007)

	η_s	Turbiinin vaihe:
Turbiinissa yksi välitulistus	86,5- 88,2	Väli- ja matalapainepesä
	75,0- 84,5	Korkeapainepesä
Turbiinissa ei välitulistusta	81,5- 87,0	Koko turbiini

Sellutehtaan energian tuotanto tapahtuu pääasiassa sähkön ja lämmön yhteistuotantona. Vastapainevoimalaitoksen sähköntuotanto riippuu sellutehtaan prosessilämmön kulutuksesta. Laitoksen rakennusaste kuvaa sähköntuotannon suhdetta laitoksen prosessilämmönkulutukseen. (Kivistö 2010, 9) Laitoksen rakennusaste (α) voidaan laskea yhtälön 2 avulla.

$$\alpha = \frac{P_g}{Q_{pr}} \quad (23)$$

, missä	α	rakennusaste [-]
	P_g	sähköteho [MW]
	Q_{pr}	prosessilämpöteho [MW]

6 TAPAUSTEN LASKENTA-ARVOT

Seuraavissa kappaleissa on esitetty laskennassa käytetyt lähtöarvot ja laskentaperiaatteet.

Höyrynpainetasojen vaikutusta sellutehtaan sähkön tuotantoon tarkasteltiin laskemalla 600 000 tonnia sellua vuodessa tuottavalle, Suomeen sopivalle, esimerkki tehtaalle vuosikeskiarvotase. Taseiden avulla selvitettiin tehtaan vuotuinen sähkön-, sekä lämmön tuotanto ja kulutus. Lisäksi laskettiin laitteiston investointiarviot eri matalapainetasoilla. Taseet laskettiin seuraaville tapauksille:

- Case A: Perinteinen sellutehdas
- Case B: Perinteinen sellutehdas + kuorikattila
- Case C: Perinteinen sellutehdas +hienopaperikone
- Case D: Perinteinen sellutehdas +hienopaperikone + kuorikattila
- Case E: Moderni sellutehdas
- Case F: Moderni sellutehdas + kuorikattila
- Case G: Moderni sellutehdas + hienopaperikone
- Case H: Moderni sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila

Työn energiataselaskelmat toteutettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston tekemällä Millflow v. 1.15- laskentasovelluksella. Taseiden laskentaan ei ollut käytettävissä mittaustuloksia, joten laskennan lähtöarvot valittiin kokemuseräisiksi, tyypilliseen suomalaiseen sellutehtaaseen sopiviksi. Mittaustulosten puuttuminen vaikuttaa merkittävästi muun muassa häviöenergiavirtojen arvioimiseen. Muodostetut energiataseet ovat kokemuseräisiin arvoihin perustuvia yleislaskelmia, joiden soveltaminen käytäntöön vaatii mittausten ja tarkempien laskelmien tekemistä. Tapauksille laskettiin myös painetasojen

mukaiset vuosittaiset sähkön myyntitulot, sekä investointiarviot. Matalapainetasojen mukaisten investointikustannusten ja sähkön myyntitulojen perusteella laskettiin painetasojen mukaiset tehtaan nettotulot, sekä määritettiin tapauksille taloudellisesti optimaalisimmat matalapainetasot.

Modernin, sekä perinteisen sellutehtaan taselaskenta suoritettiin samalla tavalla. Modernin sellutehtaan lämmönkulutuksen arvioitiin olevan 1 GJ/ADt pienempi ja sähkönkulutuksen 60 kWh/ADt pienempi kuin perinteisellä sellutehtaalla.

Laskettaessa hienopaperikone/sellutehdas integraatin energiataseita oletettiin, että sellua ei kuivata ennen sen siirtämistä hienopaperikoneelle. Tämän vuoksi sellun kuivaimen sähkön- ja lämmönkulutus jätettiin huomioimatta tasetta laskettaessa. Tehdasintegraatin oletettiin tuottavan 650 000 tonnia paperia 600 000 tonnia sellua kohden. Hienopaperikoneen oletettiin aiheuttavan sellutehtaalla $5400 \text{ MJ/t}_{\text{pap}}$ lisälämmönkulutuksen ja $650 \text{ kWh/t}_{\text{pap}}$ lisäsähkönkulutuksen. Hienopaperikoneen aiheuttama lisälämmön- ja sähkönkulutus sisältää myös paperimassan kuivaukseen tarvittavan energian. Lisäksi hienopaperikoneen arvioitiin aiheuttavan 20% lisäyksen jätevedenpuhdistamon sähkönkulutuksessa.

Laskennassa tarkasteltiin myös nuohoushöyryn paineen alentamisen vaikutusta sellutehtaan taseisiin. Laskennalla pyrittiin selvittämään nuohoushöyryn paineen alentamisen vaikutuksia tehtaan sähköntuotantoon. Työssä ei kuitenkaan tarkasteltu nuohoushöyryn paineen alentamisen vaikutusta investointeihin, sillä nuohoushöyryn paineen alentaminen ei merkittävästi muuta niitä.

Työssä tarkasteltiin myös 3.5 bar matalapainetason rakentamisen vaikutuksia nykyisen 5 bar matalapainetason rinnalle. Tapauksessa tarkasteltiin muutoksen aiheuttamia vaikutuksia tehtaan sähköntuotannossa, sekä arvioitiin 3.5 bar linjaston rakentamisesta aiheutuvia investointikustannuksia. Laskennassa tarkasteltiin tapausta, jossa osa tehtaan kuluttamasta 5 bar matalapainehöyrystä korvattiin 3.5 bar matalapainehöyryllä. Toisen matalapainetason rakentamisesta aiheutuvia investointikustannuksia ei arvioitu lainkaan laitteiston osalta vaan

arvio tehtiin pelkästään 3.5 bar matalapaineputkistolle. Matalapainetasen muuttumisesta arvioitiin aiheutuvan 2.5 miljoonan euron investointikustannukset syöttöveden esilämmittimelle.

6.1 Höyryn painearvot energiataseiden laskennassa

Jokaiselle tapaukselle muodostettiin perustase ja tutkittiin höyrynpaineen muutosten vaikutusta tehtaan energiataseeseen. Laskenta suoritettiin muuttamalla tarkasteltavan höyrytason arvoja, muiden arvojen pysyessä vakioina. Näin pyrittiin selvittämään käytettävien höyrynpainetasojen vaikutus tehtaan energiataseeseen ja sähkön tuotantoon. Jokaisessa tapauksessa taseita tarkasteltiin 4 eri matala- ja välipainehöyryn arvoilla. Höyryn paineet pyrittiin valitsemaan niin, että muutosten vaikutukset kuvaavat suomalaisen sellutehtaan toimintaa. Höyryn lämpötilat valittiin laskennassa käytettävän turbiinin väliottohöyryjen lämpötilojen mukaisesti. Taulukossa 4 on esitetty laskennassa käytetyt höyryn paineen ja lämpötilan arvot.

Taulukko 4 Taselaskennassa käytetyt höyryn arvot.

	LP		MP		MP2		MP3	
	p[bar](abs)	T [°C]	p[bar](abs)	T [°C]	p[bar](abs)	T [°C]	p[bar](abs)	T [°C]
1.	3	134	7	181	11	226	25	317
2.	4	144	7	181	11	226	25	317
3.	5	152	7	181	11	226	25	317
4.	6	165	7	181	11	226	25	317
5.	4	144	7	181	13	226	25	317
6.	4	144	7	181	15	258	25	317
7.	4	144	7	181	17	273	25	317

Taselaskennassa tehtaan prosessit kuluttivat matalapainehöyryä LP- tasolla, sekä välipainehöyryä MP2 -tasolla. Välipainehöyrytason MP3 höyryn paine valittiin turbiinin toiminnan kannalta sopivaksi siten, että sitä voitaisiin käyttää myös nuohoushöyrynä.

Turbiinin MP- välipainetasolta ei ollut väliottoa. Kaikissa laskenta tapauksissa tuorehöyryn paine oli 96 bar (abs) ja lämpötila 495 °C ja turbiinin sisääntulo paine 93 bar (abs) ja lämpötila 493 °C.

Työn taselaskenta ei huomioi höyryn painetason nostamisesta mahdollisesti aiheutuvaa palaavan lauhteen lämpötilan nousua. Kun höyryn kuluttajille syötettävä prosessihöyryn paine nousee riittävästi on mahdollista, että laitteilta palaava lauhteen joukossa on myös höyryä. Lauhteen on kuitenkin oletettu olevan vetenä, samassa lämpötilassa höyryn paineen nostosta huolimatta. Laskenta ei huomioi myöskään eroja tehtaan taseessa talvi- ja kesäkausien välillä.

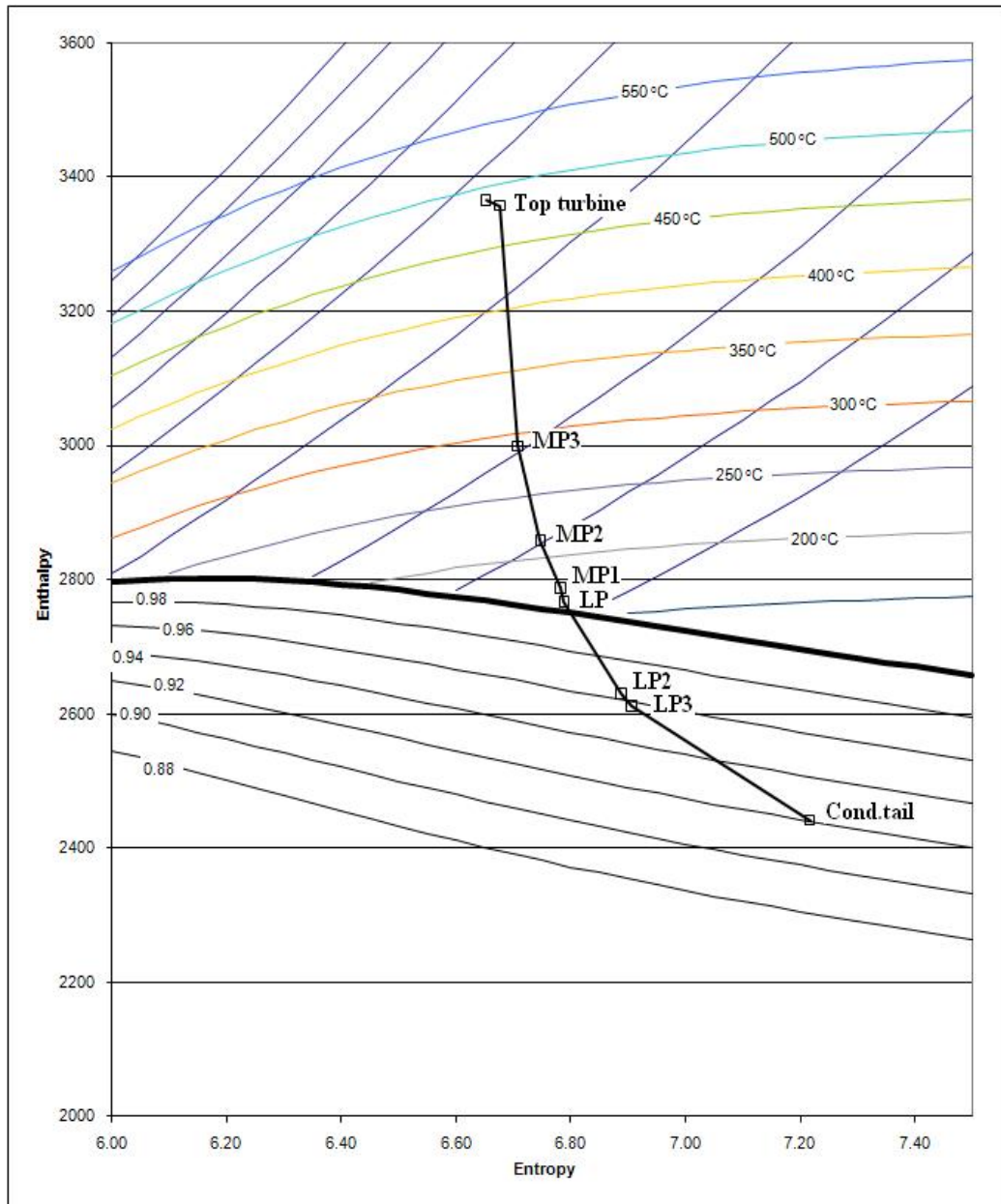
6.2 Turbiinin toiminta-arvot

Turbiinin toiminta-arvot valittiin suunnittelupisteessä (design point) siten, että todellisen turbiinin väliottopaineet ovat prosessin kannalta oikeat. Laskennalla haettiin tila, jossa turbiini tuottaa maksimaalisen tehon juuri ennen tukkeutumistaan.

Myös tapauksissa, joissa höyryn tuotantoon osallistui soodakattilan lisäksi kuorikattila, sähköön tuotanto tapahtui yhdellä turbogeneraattorilla. Näin muuttujien määrä turbiiniprosessissa saatiin pysymään pienempänä ja muutosten vaikutuksista saatiin luotettavampi kuva. Prosesseissa tarvittavat korkea- ja välipainehöyryt otettiin turbiinin väliottoina. Höyry paisutettiin turbiinissa matalapainetasoksi valittuun vastapainetasoon ja prosessista yli jäänyt matalapainehöyry paisutettiin loppuun lauhdeperässä. Turbiinin lämpötila- ja painejakauma, sekä väliottohöyryjen lämpötilat perustuvat teoreettiseen laskentaan, eivätkä taselaskennassa käytettävät höyrynarvot siksi aina vastaa käytännön tapauksia.

Joissakin laskentavaiheissa turbiinin paisunta päätyi lauhdeperässä kosteaksi höyryksi. Uusissa teollisuusturbiineissa tämä on kuitenkin ollut käytäntönä. Käytön aikaisesta

kulumisesta johtuen turbiinin hyötysuhde heikkenee, jolloin häviöt lisääntyvät ja paisuntakäyrän loppupiste nousee h,s- tasossa ylöspäin. Tällöin höyry on tulistettua myös turbiinin loppu päässä. (Vakkilainen 28.06.2010) Kuvassa 24 on esitetty h,s- tasossa eräs laskennassa käytetty turbiinin paisuntakäyrä. Kuvasta nähdään matalapainetason (LP) olevan vielä tulistettua höyryä.



Kuva 24 Turbiinin paisuntakäyrä.

6.3 Nuohoushöyryn paineen alentaminen

Soodakattiloiden nuohoushöyryn painetta ei usein ole valittu suutin virtauksen perusteella. Nuohouslaitteet kestävät yleensä tarvittavaa suuremman paineen ja nuohoushöyryn paineeksi valitaan korkeapainehöyry, koska nuohoustehon uskotaan olevan parempi korkeammalla paineella. Käytännössä nuohoushöyry voi saavuttaa suuttimessa äänen nopeuden jo noin 16 bar paineessa. Höyryn äänen nopeus on noin 600 m/s. Tämän jälkeen suutin tukkeutuu eikä massavirta enää kasva. Lisäksi höyryvirtaus romahtaa suuttimen jälkeisissä tiivistysaalloissa, jolloin sen virtausnopeus tippuu alle äänen nopeuden. Laskemalla nuohoushöyryn painetta voitaisiin kuitenkin lisätä turbiinin sähkön tuotantoa, vaikka nuohoushöyryn massavirta pysyikin samana. Nuohoushöyryn paineen alentaminen ei merkittävästi vaikuta laitoksen investointi kustannuksiin, sillä nuohouksessa käytettävät suuttimet ja putkiston pysyvät samanlaisina. Nuohoushöyrylle voidaan käyttää saman kokoista siirtoputkistoa paineen ollessa 25-40 bar. Mikäli nuohoushöyryn painetta lasketaan alle 25 bar on luultavammin siirryttävä 100mm putkistosta 125 mm putkikokoon. Tämän vuoksi nuohoushöyrypaineen valinta ei juurikaan vaikuta laitoksen investointi kustannuksiin. (Vakkilainen 14.07.2010)

Työssä tarkasteltiin nuohoushöyryn paineen alentamisen vaikutuksia tehtaan sähkön tuotantoon. Laskenta suoritettiin lisäämällä 4.5 kg/s nuohoushöyryvirta turbiinin väliottoon ja soodakattilan höyrynkulutukseen. Tarkastelu tehtiin neljällä eri nuohoushöyryn paineella. Nuohoushöyryn paineet olivat laskennassa 40, 32, 22 ja 20 bar (abs). Laskenta suoritettiin myös siinä tapauksessa, että 0.5 kg/s ja 1.0 kg/s korkeapaineisesta MP3-tason nuohoushöyrystä korvattiin MP2- tason matalapainehöyryllä. Matalapaineinen nuohoushöyry oli kaikissa laskennan vaiheissa 11 bar. Tarkasteltaessa nuohoushöyryn vaikutuksia, tehtaan matalapainehöyryverkko toimi 4 bar:ssa (abs) ja välipainehöyryverkko 11 bar:ssa. Tarkastelussa ei huomioida nuohoushöyryn paineen alentamisen vaikutusta nuohoustehokkuuteen. Nuohoushöyryn massavirta pysyi vakiona kaikissa laskennan vaiheissa.

6.4 Toisen matalapainetason rakentaminen

Projektissa tarkasteltiin myös nykyisen 5 bar rinnalle rakennettavan 3.5 bar matalapainetason käytön vaikutuksia tehtaan sähköntuotantoon ja investointikustannuksiin. Toinen matalapainetaso mahdollistaisi matalapainehöyryn korvaamisen, joissakin höyrynkulutus kohteissa osittain tai kokonaan matalampi paineisella höyryllä. Höyryn korvaaminen mahdollistaisi suuremman sähköntuotannon. Tehtaan suurimpia matalapainehöyryn kuluttajia ovat haihduttamo, kuivuri ja syöttöveden esilämmitin. Toisen matalapainelinjaston rakentaminen on myös helpointa toteuttaa kyseisille höyrynkuluttajille. Linjaston investointikustannuksia arvioitiin putkiston osalta. Koska haihduttamo sijaitsee voimalaitoksen läheisyydessä, sen investointi kustannukset olisivat pienimmät. Tämän vuoksi 3.5 bar höyryllä pyrittiin korvaamaan ensisijaisesti haihduttamon matalapainehöyryn tarve osittain tai kokonaan ja tämän jälkeen kuivauskoneen matalapainehöyrytarvetta. Tase muodostettiin myös tapaukselle, jossa haihduttamo, kuivauskone ja syöttöveden esilämmitin toimivat kokonaisuudessaan 3.5 bar matalapainehöyryllä ja tehtaan muut matalapaineen kuluttajat 5 bar matalapainehöyryllä. Taulukossa 5 on esitetty tapauksissa käytettyjen matalapainehöyryjen massavirrat.

Taulukko 5 5 bar matalapainehöyryn korvaaminen 3.5 bar:lla.

Tapaus:	Höyryn kuluttaja:	LP 3.5 bar [kg/s]	LP 5 bar [kg/s]
1.	Haihduuttamo	10	7
	Kuivauskone	0	18
	SYVE- esilämmitin	0	16
2.	Haihduuttamo	17	0
	Kuivauskone	0	18
	SYVE- esilämmitin		16
3.	Haihduuttamo	17	0
	Kuivauskone	10	9
	SYVE- esilämmitin	0	15
4.	Haihduuttamo	17	0
	Kuivauskone	20	0
	SYVE- esilämmitin	0	13
5.	Haihduuttamo	17	0
	Kuivauskone	20	0
	SYVE- esilämmitin	13	0

Laskennat suoritettiin tapaukselle, jossa on perinteinen sellutehdas, sekä kuorikattila. Tarkastelussa tehtaan välipainetaso oli 11 bar, sekä matalapainetaso 5 bar. Toisen matalapainetason höyry otettiin turbiinin lauhdeperän väliotosta 3.5 bar paineessa. Rinnakkaisen matalapainetason rakentamisen investointikustannukset on laskettu aiemmin esitetyn putkiston investointikustannusten laskennan mukaisesti. Toinen matalapainetaso on oletettu rakennettavaksi osana suurempaa haihduttamon tai kuivauskoneen investointia, jonka vuoksi investointiarviossa ei oteta huomioon muutoksen vaikutuksia haihduttamon, kuivurin ja turbiinin laitteistoinvestointeihin. Arvio on laskettu vain alemman matalapainetason putkiston osalta. Painetason muuttamisesta arvioitiin aiheutuvan 2.5 miljoonan euron investointikustannukset syöttöveden esilämmittimelle.

7 SUOMESSA KÄYTETTÄVÄT HÖYRYNPAINETASOT

Projektia varten kerättiin tietoa Suomen sellutehtailla käytettävistä höyryn painetasoista. Soodakattilayhdistyksen tekemässä kyselyssä pyrittiin selvittämään erityisesti käytettävät höyrytasot ja niiden paineet, sekä mitkä syyt ovat vaikuttaneet painetasojen valintaan. 12 suomalaisen sellutehtaan käyttämät höyryn painearvot on koottu taulukkoon 6.

Taulukko 6 Suomen sellutehtailla käytettävät höyrynpainetasot.

Tehdas:	Tuore- höyry	Tuore- höyry2	Nuohous- höyry	Väli- paine	Väli- paine2	Matala- paine	Matala- paine 2	Muu höyry
	[bar](g)							
1. Enocell	81	-	25	12	-	5	-	0,0059
2. Joutseno	93	-	24	10,5	6,8	3,5	-	-
3. Kemi	84	-	28	12,5	9	3,5	-	-0,6
4. Kymi	100	114	24	13,7	-	4,6	3,9	-0,64
5. Oulu	84	100	24	10,8	-	2,8	-	-
6. Pietarsaari	102	-	27	17	11,5	5,5	3,5	-
	-	-	16	-	-	-	-	-
7. Rauma	92	-	28	11	-	3,5	-	-
8. Sunila	63	-	35	10	-	2,5	-	-
9. Varkaus	64	110	30	17	8	2	-	4
10. Äänekoski	83,2	-	33	12,3	11,8	4,4	4,2	-
11. Imatra	83	67	-	10,1	-	5,1	-	-
12. Kotka	80	-	-	13	-	6	4	-

Yleisesti höyrynpainetasojen valintaan on vaikuttanut laitoksen käyttöönottovuosi, käytettävä laitteisto, sekä tehdastyyppi. Myös sähkön hinnan kehityksellä on ollut vaikutusta höyryn paineiden valintaan.

Kattilan tuorehöyrypaineet on yleisesti valittu tyypillisiksi kattilan rakennusvuodelle. Tuorehöyryn painetta on pyritty nostamaan uusissa laitoksissa, lisäämällä näin laitoksen sähkön tuotantoa. Kattiloiden kehitys näkyy selkeästi tuorehöyryn paineiden merkittävänä

nousuna viime vuosikymmeninä. Kyselyyn vastanneilla tehtailla 80- luvulla rakennettujen kattiloiden tuorehöyrynpaineet ovat 64 -83 bar. Kattiloiden tuorehöyryn paineita ei kuitenkaan näyttäisi olevan nostettu myöhemmistä höyryverkon ja tulistinputkistojen uusimisesta huolimatta. 90- luvulla käyttöön otettujen kattiloiden tuorehöyrynpaineet ovat 81-92 bar. Kattilatekniikan ja materiaalien kehityksen myötä tuorehöyrynpaineet ovat nouseet 2000- luvulla jo yli 100 bariin. Näin ollen myös tuorehöyryn lämpötila on voitu nostaa yli 500 °C. Korkeimmat höyrynpaineet ovat käytössä laitoksissa, joissa on käytössä kaksi tuorehöyryn painetasoa. Syynä korkeisiin tuorehöyrynpaineisiin voitaneen kuitenkin pitää merkittäviä päivityksiä kattilan tulistimissa tai uuden tyyppisiä kattiloita. Kyselyn perusteella kattila tyyppin lisäksi tuorehöyrytason valintaa on vaikuttanut myös sähkön hinnan kehitys.

Kyselyyn vastanneilla tehtailla kattiloiden nuohoushöyryn paineet ovat 16- 35 bar. Nuohoushöyryn painetta voitaisiin alentaa, mutta se vaatisi, esimerkiksi Metsä-Botnian Rauman tehtailla, vanhojen diamond- nuohoimien korvaamista uudemmilla gemini-nuohoimilla.

Välipainehöyrytasojen valintaan ovat vaikuttaneet merkittävimmin keittimen, sekä happivaiheen höyryn paineelle ja lämpötilalle asettamat vaatimukset. Myös mäntyöljyn jalostamon vaatimukset ovat jossakin tapauksessa vaikuttaneet käytettävään höyrynpainetasoon. Soodakattilayhdistyksen kyselyn mukaan sellutehtaiden välipainetasot ovat 10- 17 bar. Yleisimmin välipainehöyryn paine on kuitenkin noin 12 barin luokkaa.

Tehtaiden matalapainetasot on valittu yleisesti haihduttamon, sellun kuivurin, sekä paperi- tai kartonkikoneiden vaatimusten mukaisesti. Myös käytettävä säätötapa vaikuttaa matalapainehöyryn painetasoon. Esimerkiksi Metsä-Botnian Rauman tehtaalla käytetään yhteistä matalapaineverkkoa viereisen paperitehtaan kanssa. Matalapaineverkon paine on alhaisempi (3,45 bar) kun paperitehtaalte menevä väliventtiili säätää sitä kuin apulauhduttimen säätäessä sitä (3,6 bar).

Yleisimmin matalapainetason laskemista rajoittaa haihduttamon kapasiteetti. Tämän vuoksi haihduttamalla käytettävä tekniikka ja haihduttamolle valittu painetaso ovat merkittävimpiä perusteita välipainetason valinnalle. Kyselyn perusteella suomalaisten sellutehtaiden matalapaineverkon paineet ovat 2-6 bar. Laitoksen käyttöönottovuosi voi myös vaikuttaa matalapainetasojen valintaan. 80- luvulla käyttöönotetuissa laitoksissa matalapaine- ja vastapainetasot ovat 2-3 baria, kun taas 90- luvulla käyttöönotetuissa laitoksissa vastaavat paineet ovat yleisimmin 3,5 baria. 2000-luvulla käyttöönotettujen laitosten matala- ja vastapainehöyryjen paineet vaihtelevat 4,4- 5,5 bar:n välillä. Matalapainehöyryyn paineen nousu johtunee luultavimmin haihduttamon kapasiteetin noususta 70- luvulta lähtien. Haihduttamolta lähtevän polttoliipeän kuiva-ainepitoisuus on nykypäivänä noin 80- 85 %. Kuiva-ainepitoisuuden nousun myötä myös haihdutinyksiköiden lämpötilaerot ovat kasvaneet. Tämän vuoksi haihduttamiseen tarvitaan korkeampi paineista höyryä ja lipeä on säilytettävä paineistettuna. (Nieminen 2007, 28) Korkeamman kuiva-ainepitoisuuden ansiosta myös soodakattilan höyryyn tuotanto on kasvanut. Myös uusimpien valkaisuprosessien käyttö lisää välipainehöyryyn käyttöä. Valkaisussa on käytettävä välipainehöyryä mikäli siinä on paineellisia vaiheita. (Kivistö 2008, 11) Uusimpien valkaisuprosessien lämpötilat ovat myös korkeampia ja vaiheiden väliset lämpötilaerot suurempia. Myös nämä syyt voivat vaikuttaa korkeampaan välipainehöyryyn tarpeeseen. (Kivistö 2010, 1)

Suomalaisilla tehtailla painetasoja on tarkastettu laitteiston ja linjastojen uusinnan yhteydessä. Kyselyn perusteella painetasoa ei kuitenkaan ole lähdetty muuttamaan vaan on nähty järkevämmäksi rakentaa uusittavat koneet aiemmalle painetasolle, sähkön tuotanto maksimoiden. Yleisesti ottaen suomalaisilla sellutehtailla käytetään kuitenkin hyvin pitkälle samoja höyrytasoja. Suurimmat erot tehtaiden välillä löytyvät tuorehöyryjen paineissa.

8 HÖYRYNPAINETASON VAIKUTUS SÄHKÖN TUOTANTOON

Seuraavissa kappaleissa on esitetty edellä kuvattujen laskentojen tulokset, höyryn painetasojen vaikutuksesta sellutehtaiden sähkön tuotantoon.

8.1 Höyryn painetason vaikutus prosessilämmön kulutukseen

Prosessilämmön kulutus ja höyryn massavirrat riippuvat tehtaalla käytettävistä prosesseista ja höyrynpainetasoista. Painetasoa nostettaessa höyrymassavirta kulutuskohteille pienenee. Taulukossa 7 on esitetty laskennassa käytetyt, turbiinin väliottoina lähtevien prosessihöyryjen massavirrat eri tapauksissa. Taulukossa esitetyt arvot ovat tapausten perusarvoja ennen paineen nostamista. Tehtaaseen lisätyt prosessit lisäävät sen lämmön ja sähkön tarvetta. Merkittävin matalapainehöyryn, sekä sähkön kulutusta lisäävä tekijä on hienopaperikone. Taulukossa on esitetty myös tapausten ominaislämmön-, sekä -sähkönkulutus tuotettua sellutonnia kohden. Modernin sellutehtaan ominaislämmönkulutus on noin 1 GJ/ADt pienempi kuin perinteisen sellutehtaalla.

Taulukko 7 Prosessilämmön kulutus.

Prosessilämmön kulutus:	LP (3bar)	MP (11bar)		Ominais- lämmön- kulutus	Ominais- sähkön- kulutus
	[kg/s]	[kg/s]	[MW]	[GJ/ADt]	[kWh/ADt]
Case A: Perinteinen sellutehdas	57.4	22.8	188	17.5	733
Case B: Perinteinen sellutehdas + kuorikattila	59.1	23.5	194	17.7	761
Case C: Perinteinen sellutehdas + hienopaperikone	78.4	22.8	240	20.1	1221
Case D: Perinteinen sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila	80.1	23.5	246	20.4	1249

Case E: Moderni sellutehdas	54.4	21.5	178	16.5	674
Case F: Moderni sellutehdas + kuorikattila	56.1	22.2	183	16.7	700
Case G: Moderni sellutehdas + hienopaperikone	76.5	21.5	232	19.2	1174
Case H: Moderni sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila	78.1	22.2	237	19.5	1200

Sellutehtaan prosessit kuluttavat matalapainehöyryä merkittävästi enemmän kuin välipainehöyryä. Tämän vuoksi myös matalapainetason nostamisella on huomattavasti suurempi vaikutus sähköntuotantoon. Painetason nosto vähentää prosessihöyryn tarvetta sen energiasisällön kasvaessa. Tuotantoprosesseihin menevän matalapainehöyrytarve vähenee 0,3 kg/s, mikäli se otetaan turbiinilta 1 bar korkeammassa paineessa. Vastaavasti välipainehöyryn massavirta pienenee 0,12 kg/s mikäli väliottopainetta nostetaan 1 bar.

8.2 Höyryn painetason vaikutus sähköntuotantoon

Höyrynpainetasojen vaikutusta sellutehtaan sähköntuotantoon tarkasteltiin laskemalla taseet kappaleessa 6 esitetyille tapauksille. Muutoksia sähköntuotannossa tarkasteltiin taulukon 4 mukaisilla höyryn arvoilla. Taseiden avulla laskettiin kussakin tapauksessa myytäväksi jäävän sähkön määrä. Tehtaan oletettiin toimivan 350 vuorokautta eli 8400 tuntia vuodessa. Myyntisähköön tuotto laskettiin Nordpoolin määrittelemän spot area -hinnan mukaan. Tapausten myyntivoitot on laskettu 22.06.2010 määritetyn sähkön hinnan mukaan. Nordpoolin määrittelemä sähkön hinta oli tuolloin 45,17 €/MWh. Työssä ei ole otettu huomioon ennustetta sähkön hinnan muutoksesta.

Taulukossa 8 on esitetty laskennan tuloksena saadut arvot höyryn painetasojen nostamisesta aiheutuvasta sähkön myyntitulojen menetyksestä vuodessa. Laskennan mukaan matalapainetason nostamisella on suurin vaikutus Case D:n (Perinteinen sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila) mukaisella tehtaalla. Tällöin matalapainetason nostamisesta aiheutuu 1 249 600 €/bar menetys sähkön myyntituloissa vuodessa. Pienimmät menetykset

matalapainetason nostamisesta aiheutuvat Case E:n (Moderni sellutehdas) mukaisen tehtaan sähkön myyntituloihin. Tällöin sähkön myyntivoiton menetys on 888 200 €/bar vuodessa.

Välipainetason nostamisesta on suurin vaikutus Case B:hen ja pienimmät Case G:hen ja H:n. Taulukon 8 tuloksista voidaan kuitenkin todeta välipainetason muuttamisella olevan lähes saman suuruinen vaikutus sähkön myyntituloihin kaikissa tehdastyypeissä. Koska välipainehöyryn kulutus ei vaihtelee merkittävästi eri tapausten välillä, painetason nostamisesta aiheutuviissa myyntitulojen menetyksissä ei ole suuria eroja eri tapausten välillä.

Taulukko 8 Höyryn painetasojen vaikutus sähkön myyntivoittoon vuodessa.

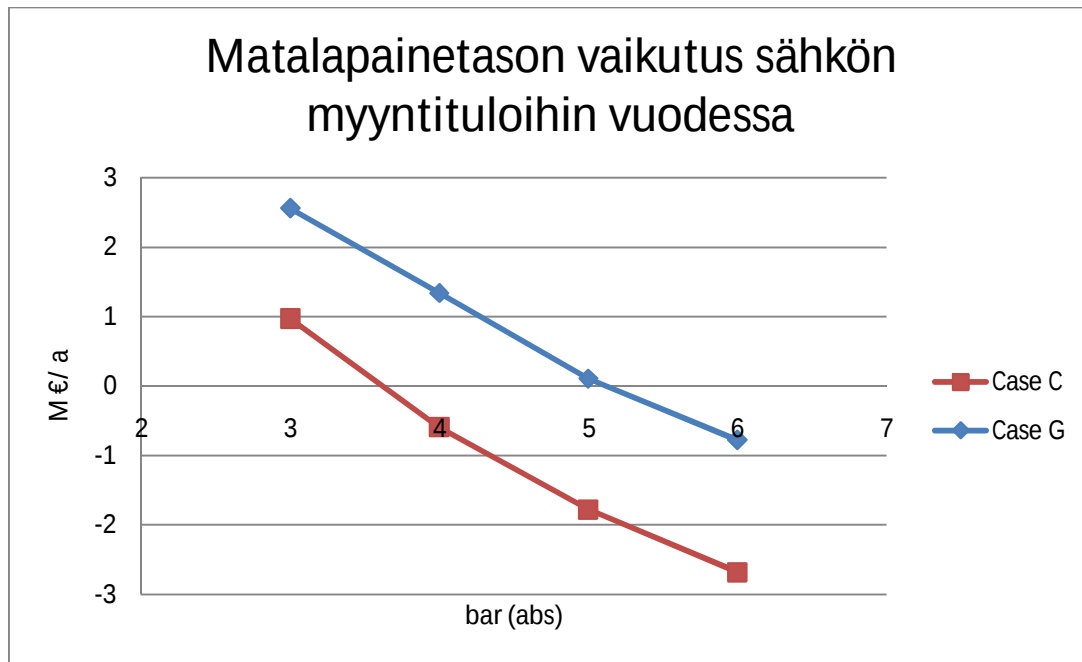
Höyrynpainetasojen vaikutus sähkön myyntituloihin	LP:	MP:
	[1000 €/bar/a]	[1000 €/bar/a]
Case A: Perinteinen sellutehdas	1030.2	69.7
Case B: Perinteinen sellutehdas + kuorikattila	996.8	73.7
Case C: Perinteinen sellutehdas + hienopaperikone	1190.3	68.4
Case D: Perinteinen sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila	1249.6	70.2
Case E: Moderni sellutehdas	888.2	68.0
Case F: Moderni sellutehdas + kuorikattila	960.1	66.9
Case G: Moderni sellutehdas + hienopaperikone	1113.6	66.1
Case H: Moderni sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila	1230.5	66.1

Taulukossa 9 on esitetty taselaskennan tuloksena saadut sähkön myyntitulot vuodessa. Tulokset on esitetty vertailtavan matala- tai välipainehöyryn paineen mukaan. Muut höyryn paineet ovat taulukon 4 mukaisia. Taulukosta 9 nähdään, että tehdas saa pienimmät sähkön myyntitulot vuodessa Case C ja G mukaisissa sellutehdas/hienopaperikone integraateissa, joissa syntyvää kuorijätettä ei polteta.

Taulukko 9 Sähkön myyntitulot vuodessa. [Milj.€/a]

Sähkön myynti tulot vuodessa [Milj.€/a] LP- ja MP- tason mukaan.								
	LP paine [bar](abs)				MP paine [bar](abs)			
	3	4	5	6	11	13	15	17
Case A	17.0	15.7	14.8	13.9	15.7	15.5	15.4	15.3
Case B	31.1	29.8	28.9	28.1	29.8	29.7	29.5	29.4
Case C	0.9	-0.6	-1.8	-2.7	-0.6	-0.7	-0.9	-1.0
Case D	15.1	13.5	12.3	11.3	13.5	13.4	13.2	13.1
Case E	19.4	18.0	17.2	16.5	18.0	17.9	17.8	17.6
Case F	33.4	32.3	31.3	30.6	32.3	32.1	32.0	31.9
Case G	2.6	1.3	0.1	-0.8	1.3	1.1	1.0	0.9
Case H	17.0	15.5	14.2	13.3	15.5	15.3	15.2	15.1

Kuvassa 25 on esitetty Case C:n ja G:n sähkön myyntitulojen muutos vuodessa. Kuvasta 25 ja taulukon 9 tuloksista voidaan nähdä, että perinteinen sellutehdas/hienopaperikone integraatti (ei kuorikattilaa) kuluttaa enemmän sähköä mitä se pystyy tuottamaan mikäli matalapainetaso nostetaan 4 bar:n. Modernissa sellutehdas/hienopaperikone integraatissa (ei kuorikattilaa) vastaava tapahtuu kun matalapainetasoa nostetaan yli 5 bar:n.



Kuva 25 Matalapainetason muutosten vaikutus sähkön myyntituloihin [milj. €/a]

Taulukossa 10 on esitetty laskennan mukaisen turbiinin marginaaliset rakennusasteet (α). Rakennusastetta laskettaessa prosessihöyryn on oletettu palaavan 90 °C lämpöisenä lauhteena. Koska painetasojen nostaminen vähentää turbiinin sähkön tuotantoa, se pienentää myös laitoksen rakennusastetta. Matalapainetason (LP) nostaminen alentaa turbiinin rakennusastetta noin 0.02 MW_e/MW_{th}. Välipaineen muuttamisesta on huomattavasti pienempi vaikutus tason marginaaliseen rakennusasteeseen.

Taulukko 10 Turbiinin marginaali rakennusaste.

	α	
	[MW _e / MW _{th}]	[MW _e /(kg/s)]
Reduktio	0	0
MP3 (25bar)	0.12	0.31
MP2 (11bar)	0.19	0.48
MP1 (7 bar)	0.23	0.67
LP (3 bar)	0.30	0.82

8.3 Nuohoushöyryn paineen vaikutus sähkön tuotantoon

Soodakattilan nuohoushöyryn vaikutusta tehtaan sähköntuotantoon tarkasteltiin alentamalla turbiinin välilotosta saatavan nuohoushöyryn painetta, sekä korvaamalla osa korkeapaineisesta MP3 –tason nuohoushöyrystä matalapaineisella MP2 –tason höyryllä. Taulukossa 11 on vertailtu sellutehtaan vuotuisia sähkön myyntituloja referenssituloihin, joissa nuohoushöyrynä käytetään 4.5 kg/s 40 bar korkeapainehöyryä. Taulukossa on esitetty myös nuohoushöyryn paineen alentamisen vaikutus vuosittaisiin sähkön myyntituloihin (€/bar/a). Sähköntuotannon lisäämiseksi nuohoushöyryn paineen alentaminen on tehokkaampi keino kuin sen korvaaminen matalampi paineisella höyryllä. Pudottamalla nuohoushöyryn paine 40 bar:sta 20 bar, voidaan aikaansaada 260 000 € korkeammat sähkön myyntitulot vuodessa. Korvaamalla 40 bar nuohoushöyryvirrasta 1 kg/s 11 bar:n höyryllä voidaan saavuttaa lähes 100 000 € korkeammat sähkön myyntitulot vuodessa. Nuohoushöyryn korvaamisella matalapaineisemmalla höyryllä saavutetaan sitä suurempi hyöty mitä korkeampi paineista varsinainen MP3- tason nuohoushöyry on.

Taulukko 11 Nuohoushöyryn vaikutus sähkön myyntituloihin.

	MP3: 40 bar (abs)	MP3: 32 bar (abs)	MP3: 22 bar (abs)	MP3: 20 bar (abs)	Vaikutus myyntituloihin [1000€/bar/a]
MP3: 4.5 kg/s MP2: 0 kg/s	0	123	239	260	13.0
MP3: 4 kg/s MP2: 0.5 kg/s	52	155	271	289	11.8
MP3: 3.5 kg/s MP2: 1 kg/s	96	191	300	309	10.6

Merkittävien säästöjen aikaan saaminen edellyttää riittävän suurta nuohoushöyryn paineen pudottamista, koska nuohoukseen käytettävän höyryn massavirta on pieni. Nuohoushöyryn paineen alentamisesta ei kuitenkaan oleteta syntyvän merkittäviä investointikustannuksia.

8.4 3.5 bar matalapainelinjan rakentamisen vaikutukset sähkön tuotantoon

Nykyisen 5 bar matalapainelinjan rinnalle rakennettavan 3.5 bar höyrylinjan vaikutuksia tehtaan sähkön tuotantoon tutkittiin muodostamalla taseet perinteiselle sellutehtaalle, jossa on kuorikattila. Tuloksia verrattiin tapaukseen, jossa on käytössä vain yksi 5 bar matalapainehöyrytaso. 3.5 bar höyryllä korvattiin osittain tai kokonaan tehtaan haihduttamon, kuivauskoneen ja syöttöveden esilämmittimen matalapainehöyrytarve. Laskennassa käytetyt matalapainehöyryn kulutukset on esitetty painetasoittain taulukossa 12. Taulukossa on esitetty tapausten vuosittainen sähkön myyntitulo, sekä myyntitulojen erotus tapaukseen, jossa käytössä on vain yksi (5 bar) matalapainehöyrytaso.

Taulukko 12.2 matalapainetaso-erityylinnin käyttöön vaikutukset tehtaalla sähkön myyntituloihin.

Tapaus:	Höyryn kuluttaja:	LP 3 bar	LP 5 bar	Sähkön myyntitulot [Milj. €/a]	Erotus perustason [1000 €/a]
		[kg/s]	[kg/s]		
Perinteinen ST + KK: (Perustaso)	Haihduttamo	0	17	28.86	0
	Kuivauskone	0	18		
	SYVE-esilämmitin	0	16		
1.	Haihduttamo	10	7	28.94	81.3
	Kuivauskone	0	18		
	SYVE-esilämmitin	0	16		
2.	Haihduttamo	17	0	29.05	194.5
	Kuivauskone	0	18		
	SYVE-esilämmitin	0	16		
3.	Haihduttamo	17	0	29.30	446.5
	Kuivauskone	10	9		
	SYVE-esilämmitin	0	15		
4.	Haihduttamo	17	0	29.56	706.7
	Kuivauskone	20	0		
	SYVE-esilämmitin	0	13		
5.	Haihduttamo	17	0	29.78	921.4
	Kuivauskone	20	0		
	SYVE-esilämmitin	13	0		

Tuloksista voidaan huomata että korvaamalla noin 50 kg/s 5 bar matalapainehöyry virrasta 3.5 bar höyryllä voidaan saada lähes 1 miljoona euroa suuremmat sähkön myyntitulot vuodessa. Matalapainetason paineen alentaminen pienentää prosessihöyryn energiasisältöä. Tämän vuoksi 3.5 bar matalapainehöyryvirran lisääminen vähentää myös syöttöveden esilämmitykseen tarvittavan höyryn määrää.

9 HÖYRYNPAINETASON VAIKUTUS INVESTOINTEIHIN

Investointikustannusten laskennassa hyödynnettiin rakennettujen laitosten kustannuslaskelmia. Putkiston ja haihduttamon kustannuslaskelmien osalta laskennassa hyödynnettiin Jaakko Pöyry Oy:n tekemiä Kymi 700- projektin kustannuslaskelmia. Kymi 700- projekti oli UPM-Kymmene Oyj:n Kymin tehtaille tehtävä talteenottolinjan uusinta. Seuraavissa kappaleissa on esitetty laskelmien tulokset höyryn painetasojen muuttamisen vaikutuksista tehtaan investointi kustannuksiin.

9.1 Putkiston investointikustannukset

Putkiston investointikustannuksia laskettaessa määritettiin sellutehtaalle rakennettavien höyryn siirtoputkistojen pituus, sekä tehtaalla tarvittavien eri kokoisten putkistojen määrä ja materiaali Kymi 700- kustannuslaskelmien perusteella. Kymi 700- projektissa käytetyt putki koot otettiin myös huomioon putkiston mitoituksessa. Siirtoputkiston oletettiin olevan 25 % koko putkiston pituudesta. Investointikustannuksissa laskettavien tapausten höyryputkisto valmistetaan mustasta S2333 -teräksestä, jonka tiheys on 7800 kg/m^3 . Putkistoinvestoinnin kustannus laskettiin putkiston painon mukaan, teräksen hinnan ollessa 6 €/kg. Välipaineen muutos ei vaikuta merkittävästi putkistoinvestointiin, joten sen vaikutusta laitoksen investointiin ei ole tarkasteltu. Tämän vuoksi nuohoushöyry- ja välipaineputkistot pysyvät samanlaisina matalapaineputkiston muutoksista huolimatta. Laskennan tulokseksi saatu putkiston koko ja paino on esitetty taulukossa 13. Putkiston kokonaispaino muuttuu matalapaineen muuttuessa noin 24 000 kg/bar.

Taulukko 13 Nuohoushöyry- (NH), välipaine- (MP) ja matalapaineputkiston (LP) koko ja paino.

	Paine (abs)	Pituus	Halkaisija	Seinämän paksuus	Siirtoputkiston paino (25%)	Koko putkiston paino
	p [bar](abs)	l [m]	DN [mm]	s [mm]	m [kg]	m [kg]
NH	28	100	150	20	7351	
MP	14	700	400	13	89196	
LP	3	700	1300	13	289887	
		700	150	9	23157	409591
	4	700	1200	13	267588	
		700	150	9	23157	387292
	5	700	1100	13	245289	
		700	150	9	23157	364993
	6	700	1000	13	222990	
		700	150	9	19297	338835

Matalapainehöyryn paineiden mukaan lasketut putkistoinvestoinnit on esitetty taulukossa 14. Investointikustannus muuttuu matalapainetason muutoksen suhteen noin 566 000 €/bar. Taulukon 14 viimeisessä sarakkeessa on esitetty investoinnin muutos verrattaessa 3 bar:n perustasaan. Kuten taulukosta 14 nähdään, 6 bar matalapainetasolla investointi kustannukset ovat lähes 1.7 miljoonaa euroa pienemmät kuin 3 bar matalapainetasolla.

Taulukko 14 Putkiston investointikustannus

Paine (abs)	Kokonais paino	Materiaali hinta	Kokonais hinta	Hintaero perustasaan (3 bar)
[bar]	m [kg]	€/m	[1000 €]	[1000€]
3	409591	6	9830	-
4	387292	6	9295	- 535
5	364993	6	8760	-1070
6	338835	6	8132	-1698

9.2 Haihduttamon investointikustannukset

Haihduttamon investointikustannusten määrittämiseksi laskettiin haihduttamon tarvitsema lämmönsiirtopinta-ala kullakin matalapainetasolla. Kymi 700- projektin kustannuslaskelmien perusteella määritettiin haihduttamon investointikustannus haihdutuspinta-alaa kohden. Taulukoon 15 on koottu kappaleen 5.5 mukaisten laskelmien tulokset, sekä matalapainetason mukaiset haihduttamon kokonaisinvestoinnit ja investoinnin muutos 3 bar perustasaan verrattuna. Taulukossa 15 esitetty kiehumapisteennousu (BPR) on laskettu taulukkoarvoista vaiheen kuiva-ainepitoisuuden mukaan. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B21) Taulukon tulosten perusteella voidaan todeta haihduttamon investointikustannusten muuttuvan 3 265 600 €/bar matalapainehöyryn paineen muuttuessa. Taulukon arvot 4 bar höyryn paineessa vastaavat Kymi 700- projektin arvoja.

Taulukko 15 Höyrynpaineen mukaiset haihduttimen toiminta-arvot.

Paine	[bar](abs)	3	4	5	6
BPR	[°C]	21			
Poistuvan höyryn lämpötila	[°C]	55			
Tehollinen lämpötilaero	[°C]	35.0	45.0	53.3	60.3
Vaiheen tehollinen lämpötilaero	[°C]	5.0	6.4	7.6	8.6
Pinta-ala	[m ²]	75272.5	58420.0	49402.6	43668.2
Neliöhinta	[€/m ²]	418.7	500.0	562.3	613.0
Kokonais investointi	[1000 €]	31517.7	29210.0	27777.2	26767.8
Ero 3 bar perustasaan	[1000 €]	-	2307.7	3740.5	4749.9

9.3 Kuivauskoneen investointikustannukset

Kuivauskoneen investointikustannus on laskettu telaston hintaan perustuen. Telaston hinta on arvioitu olevan 50 % koko koneen hinnasta. Telaston hinta määritettiin Kymi 700- projektin perusteella, telaston ja kuivattavan sellumassan lämpötilaeron suhteen. Kuivauskoneen investointikustannukset muuttuvat noin 4 270 000 €/bar matalapaineen muuttuessa. Taulukossa 16 on esitetty kuivauskoneen telaston investointikustannukset matalapaineen suhteen. Taulukossa esitetty lämpötilaero on telaston ja kuivattavan massan lämpötilaero. Telaston oletetaan olevan höyryn saturaatiolämpötilassa. Taulukon arvot 4 bar paineessa vastaavat Kymi 700- projektin arvoja.

Taulukko 16 Kuivauskoneen investointi kustannus

Paine	Lämpötila- ero	Kokonai- s hinta	Hintaero perustasoon (3 bar)
[bar] (abs)	[°C]	[1000 €]	[1000 €]
3	36	46467	-
4	46	40000	6467
5	54	36215	10252
6	61	33656	12811

9.4 Kokonaisinvestointi

Edellä esitettyjen investointilaskelmien perusteella on laskettu laitoksen kokonaisinvestointikustannusarvio matalapainehöyrytason suhteen. Investoinnin vuosittainen lyhennys on laskettu annuiteettimenetelmällä. Investoinnin takaisinmaksuaikana on käytetty 10 vuotta ja korkona 12 %, jotka ovat tyypillisiä arvoja laitteisto investoinneille. Taulukossa 17 on esitetty edellä esitettyjen investointien perusteella lasketut kokonaisinvestointikustannukset, sekä investoinnin vuosittainen lyhennys. Vuosittainen

investoinnin lyhennys muuttuu, matalapainetason muuttuessa, 1.14 miljoonaa euroa baria kohden.

Taulukko 17 Kokonaisinvestointikustannukset.

LP	[bar] (yp)	3	4	5	6
Putkisto	[1000 €]	9830	9295	8760	8132
Haihdutin	[1000 €]	31518	29210	27777	26768
Kuivauskone	[1000 €]	46467	40000	36215	33656
YHT.	[1000 €]	87815	78505	72752	68556
korko	12 %				
Maksuaika [a]	10				
Lyhennys	[1000 €/a]	-15541.8	-13894.1	-12876.0	-12133.4

9.5 Matalapainetason optimaaliset paineet

Jokaiselle tapaukselle laskettiin netto sähkönmyyntitulot matalapainetason mukaan. Nettotulot saadaan kun aiemmin esitetyistä sähkön myyntituloista vähennetään kokonaisinvestointikustannusten vuosilyhennykset. Näin löydetään jokaiselle tapaukselle taloudellisesti optimaalinen matalapainetaso. Taulukossa 18 on esitetty tapauksille matalapainetason mukaiset investointien vuosilyhennykset, vuotuiset sähkön myyntitulot, sekä vuotuiset nettotulot.

Taulukko 18 Tapausten nettotulot vuodessa.

		LP [bar] (abs)	3	4	5	6
Investointi kustannukset	(10a, 12%)	[1000€/a]	-15541.79	-13894.14	-12875.97	-12133.37
Perinteinen ST	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	17024.96	15687.10	14771.66	13934.51
	Nettotulo	[1000€/a]	1 483.18	1 792.95	1 895.69	1 801.14
Perinteinen ST + kk	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	31079.60	29847.10	28855.05	28089.34
	Nettotulo	[1000€/a]	15537.81	15 952.95	15 979.08	15 955.97
Perinteinen ST + HPK	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	890.42	-592.86	-1778.88	-2680.49
	Nettotulo	[1000€/a]	-14 651.37	-14 487.00	-14 654.85	-14 813.85
Perinteinen ST + kk+ HPK	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	15055.19	13517.67	12267.91	11306.28
	Nettotulo	[1000€/a]	-486.60	-376.47	-608.05	-827.09
Moderni ST	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	19130.27	18039.64	17150.22	16465.67
	Nettotulo	[1000€/a]	3 588.48	4 145.50	4 274.26	4 332.30
Moderni ST + kk	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	33430.99	32256.22	31304.81	30550.56
	Nettotulo	[1000€/a]	17 889.20	18 362.07	18 428.85	18 417.19
Moderni ST + HPK	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	2563.59	1268.41	106.52	-777.08
	Nettotulo	[1000€/a]	-12 978.20	-12 625.73	-12 769.45	-12 910.45
Moderni ST + kk + HPK	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	16983.32	15461.71	14229.12	13291.79
	Nettotulo	[1000€/a]	1 441.54	1 567.56	1 353.15	1 158.42

Taulukon 18 nettotulojen perusteella voidaan todeta tapauksille taloudellisesti optimaalisimmat matalapainehöyryn paineet. Optimaalisimmat matalapainehöyryn paineet on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19 Matalapainehöyryn taloudellisesti optimaalisimmat paineet.

Tapausten optimaalisimmat matalapaine höyryn paineet	
	[bar](abs)
Perinteinen ST	5
Perinteinen ST + KK	5
Perinteinen ST + HPK	4
Perinteinen ST + KK+ HPK	4
Moderni ST	6
Moderni ST + KK	5
Moderni ST + HPK	4
Moderni ST + KK + HPK	6

9.6 3.5 bar matalapainetason rakentamisesta aiheutuvat investointikustannukset ja nettotulot

Perinteisen sellutehtaan 5 bar matalapainehöyrylinjan rinnalle rakennettavan 3.5 bar höyrylinjan investointikustannuksien arvioinnissa on otettu huomioon haihduttamon ja kuivauskoneen putkilinjastot, sekä syöttöveden esilämmittimen investoinnit. Matalapainetason muutoksesta on arvioitu aiheutuvan 2.5 miljoonan €:n kustannukset syöttöveden esilämmittimelle. Taulukossa 20 on esitetty toisen matalapainetason käyttämisestä aiheutuvat investoinnit, investointien vuosilyhennykset, sekä vuosittaiset sähkön myyntitulot korvattavan höyryn massavirran mukaan. Investointikustannusten vuosilyhennys on laskettu annuiteettimenetelmällä, 12% vuosikorolla ja 10 vuoden maksuajalle.

Taulukko 20 Toisen matalapainelinjan rakentamisen vaikutukset investointeihin ja nettotuloihin.

LP 3bar massavirta	Investointi kustannus	Vuosi lyhennys	Sähkön myynti tulot	Netto tulo vuodessa
[kg/s]	[€]	[€/a]	[M€/a]	[M€/a]
10	420495.9	-74 421.11	28.94	28.86
17	535176.6	-94 717.78	29.05	28.95
27	2637656	-466 823.35	29.30	28.83
37	3402194	-602 134.47	29.56	28.96
50	3402194	-1 044 594.88	29.78	28.73

Taulukosta 20 voidaan nähdä syöttöveden esilämmittimen aiheuttavan suurimmat investointikustannukset muutokselle, joten sen liittäminen 3.5 bar matalapainehöyryverkkoon on kannattavinta tapauksissa, joissa sen uusiminen on ajankohtaista muutoinkin. Taulukon tuloksista voidaan havaita myös, että 3.5 bar matalapainetason käyttämisestä perinteisen 5 bar tason rinnalla syntyvä lisäys tehtaassa sähköntuotantoon on merkittävästi suurempi kuin linjaston rakentamisesta aiheutuvat investointi kustannukset. Linjaston rakentaminen on kuitenkin todennäköisesti järkevää vain haihduttamon, kuivauskoneen, turbiinin tai syöttöveden esilämmittimen uusimisen tai merkittävän reviisioyhteydessä. Muutoin painetason alentamisesta aiheutuvat kustannukset laitteistossa voivat olla liian suuret.

10 YHTEENVETO

LÄHTEET

Auvinen Janne 02.04.2004. Paperitehtaan lämpöenergian hallinta. Diplomityö. Hamina. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energia- ja ympäristötekniikan osasto.

Backman Jari et al. 2006. Kaasudynamiikka (BH40A1100)- kurssin luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikan osasto, Virtaustekniikan laboratorio.

Cymic boilers-esite. [www-tuotedokumentti]. Metso. [Viitattu: 18.06.2010]. Saatavissa: [http://www.metso.com/energy/boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090517-22575-9DCEB/\\$File/CYMIC.pdf](http://www.metso.com/energy/boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090517-22575-9DCEB/$File/CYMIC.pdf)

Gullichsen Johan, Fogelholm Carl-Johan. 1999. Papermaking science and Technology, Book 6 A-B, Chemical Pulping. ISBN 952-5216-00-4

Hsieh, J.S., Wang, T. 2005 [Tappi- verkkojulkaisu] On the Relationship Between Pulping Temperature and Kraft Pulp Kappa Uniformity at the Single Fiber Level, 2005 Engineering, Pulping & Environmental Conference. [Viitattu: 29.07.2010]. Saatavissa: <http://www.tappi.org/Bookstore/Technical-Papers/Conference-Papers/2005/05EPE>

Huhtinen Markku et al. 2008. Voimalaitostekniikka. Opetushallitus. ISBN 978-952-13-3476-4.

Huhtinen et al. 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki. ISBN 951-37-3360-2

Kiiskilä Erkki, Esko Mattelmäki. 1992. Ahlstrom recovery processes- esite.

Kivistö Aija. 2010. 3. Energian kulutus ja hankinta. BH61A0500 Puunjalostusteollisuuden energiatalous- kurssin luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiatekniikan osasto.

Kivistö Aija. 08.01.2008. 2. Sulfaattisellun valmistus. BH61A0500 Puunjalostusteollisuuden energiatalous- kurssin luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiatekniikan osasto.

KnowPulp 6.0. [www-oppimisympäristö]. Päivitetty 12/2007. [Viitattu: 25.08.2010] Saatavissa: <http://kansi.cc.lut.fi/knowpulp/suomi/kps/ui/instructions/participants/ui.htm>

Kuvio 10. [Tilastokeskuksen [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 24.3.2010, [Viitattu: 31.05.2010]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/ehkh/2009/04/ehkh_2009_04_2010-03-24_kuv_010.html

Larjola Jaakko 25.10. 2002. Turbokoneet, suunnittelun ja laskennan perusteet. Osa 1. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Low Nox Retrofit. [Andritzin [www-sivuilla](http://www.andritz.com)]. 2010 [Viitattu: 18.06.2010]. Saatavissa: <http://www.andritz.com/ANONID341E2AD94B1C0F0C/ppp/ppp-processes/ppp-processes-chemical-recovery/ppp-processes-chemrec-recoveryboiler/ppp-chemicalrecovery-recbo-lownox.htm>

Nieminen Markus. 2007. Energy utilisation in kraft pulp mills. Helsinki: Helsinki University of technology, Department of mechanical engineering.

Pöyry Oy. 02.11.2006. Gunns Bell Bay Pulp Mill General Presentation.

Sihvo Liisa (Toim.). 1969. Tekniikan käsikirja 4: Sähkötekniikka, Voimalaitos- ja lämpötekniikka. Jyväskylä: K.J Gummerus Osakeyhtiön Kirjapainossa.

Pipe and pipe sizing. [Spirax Sarcon [www- sivuilla](http://www.spiraxsarco.com)]. Päivitetty 2010, [Viitattu: 15.06.2010] Saatavissa: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/steam-distribution/pipes-and-pipe-sizing.asp>

Teir Sebastian 2003. Steam Boiler Technology. Espoo. ISBN: 951-22-6759-4

Tilastokeskus. [Tilastokeskuksen [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 26.01.2010, [Viitattu: 31.05.2010]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/tene/2008/tene_2008_2010-01-26_tie_001_fi.html

Tilastot. [Metsäteollisuuden [www-sivuilla](http://www.metsateollisuus.fi)]. 2010, [Viitattu: 31.05.2010]. Saatavissa: <http://www.metsateollisuus.fi/Tilastopalvelu/Sivut/default.aspx>

Vakkilainen Esa. 04.01.2007. Bell Bay Pulp Mill Recovery Presentation. Pöyry Oy.

Vakkilainen Esa. 2008. Alternative fuels for lime kilns. Pöyry Forest Industry.

Vakkilainen Esa. 26.05.2010. Keskustelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Vakkilainen Esa. 28.06.2010. Keskustelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Vakkilainen Esa. 14.07.2010. Keskustelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Vakkilainen Esa. 19.08.2010. Keskustelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Virkola Nils-Erik. 1983. Puumassan valmistus II osa 1. Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. ISBN 951-99117-3-1

Voimalaitosopin perusteet (BH50A0200) - kurssin laskuharjoitus 2. Syksy 2007. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Energiatekniikan osasto.

LIITE IV

Muiden työryhmien kuulumiset

OTR kuulumiset

Tapahtumat

Vuosikokous 13.4-14.4.2011 VTT Expert Services Oy

- Tiistai 13.4.2011
 - Show & Dinner, Grand Casino, Mikonkatu 19, 00100 Helsinki
- Keskiviikko 14.4.2011
 - Vuosikokous
 - Esitys: Soodakattilan vikaantumiset ja niiden kustannusvaikutukset, Tatu Pekkarinen, YIT Teollisuus Oy
 - VTT:n Metsäteollisuustutkimus, Klaus Niemelä, VTT / VTT Expert Services Oy

Soodakattilapäivä 19.10.2011 ja SKYREC-seminaari 20.10.2011

- Sokos hotel Presidentti

ATR kuulumiset

ATR projektit

Määräaikaistestausprojektin jatko, Pöyry/BMS

- Parhaat käytännöt/menetelmät testausvälin pidentämiseksi
- Seisokin aikaisen testauskuorman vähentäminen
- Raportti kommentoitavana tehtailla

Turva-automaatiosuosituksen päivitys

- Käännös saatu FMGlobalilta
- Kommentoitavana työryhmällä

Kattilarakennuksen sähkötekniset turvajärjestelmät, Pelastusopisto

- Valmis ja julkaistu yhdistyksen sivuilla

Selvitys: UPS-kytkennät tehtailla

- Gruvön tehtaalla Ruotsissa sattunut UPS-vika, 30 min blackout
- Selvitetään onko mahdollista tapahtua Suomessa
- Pöyry tehnyt ohjeen ja ehdotuksen toteutuksesta -> ajatus perustaa työryhmä tekemään vika-analyysi Pöyryn toteutuksesta

YTR kuulumiset

YTR Projektit

BAT/BREF-dokumenttiluonnoksen kommentointi / NOx-asiat

- Alustava dokumentti julkaistu keväällä 2010
- Ruotsissa alhaisemmat NOx-päästöt kuin Suomessa
- Yhdistyksen lausunto lähetetty Michael Suhrille 22.12
- Dokumentin lukuarvot julkaistaan toukokuussa

Ammoniakki / natriumsyanaattiprojekti, ÅA

- Tehdasmittaukset Kymillä vko 48
- Analysointi kesken, ongelmia NH₃-määrittämisessä sellusta ja lauhdeista

Päästötason riippuvuus tarkasteluajanjaksosta, LUT

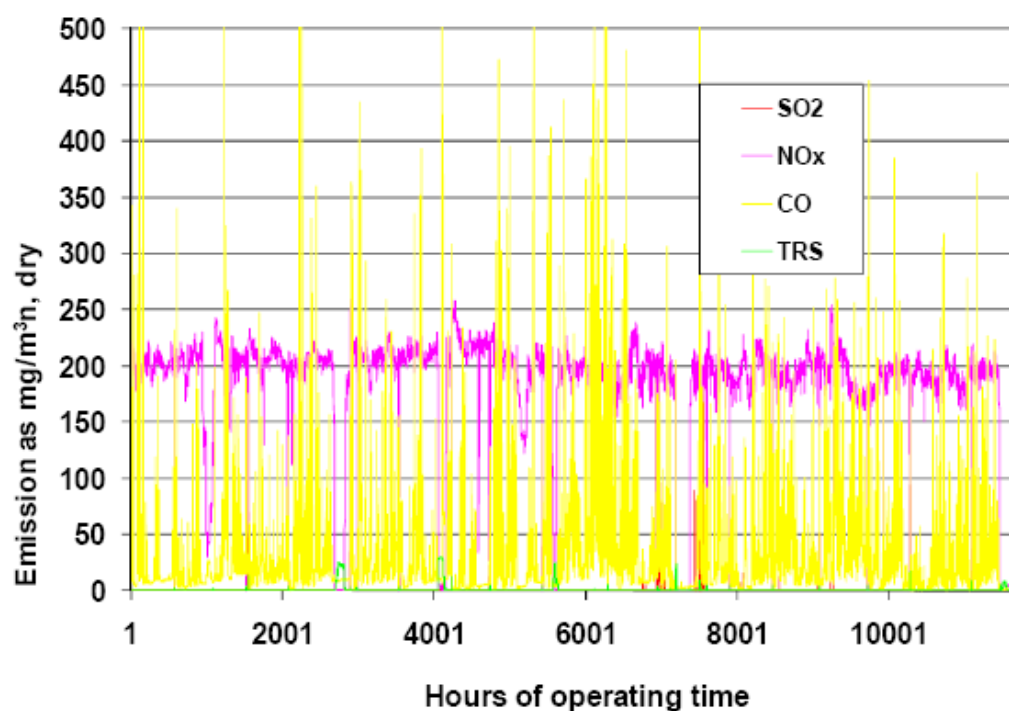
- Työssä selvitetään ilmapäästöjen ajallista vaihtelua
- Datan käsittely menossa, tiedot saatu Imatralta, Kymiltä, Joutsenosta

Päästömittaus/laskenta koulutuspäivä

- Järjestettiin 16.3.2011, Otaniemi, Puu2-luentosali
- Yhteistyössä Metsäteollisuus ry:n ympäristötutkimustoimikunnan kanssa
- 75 osallistujaa

Konsentraatio mittausaikana

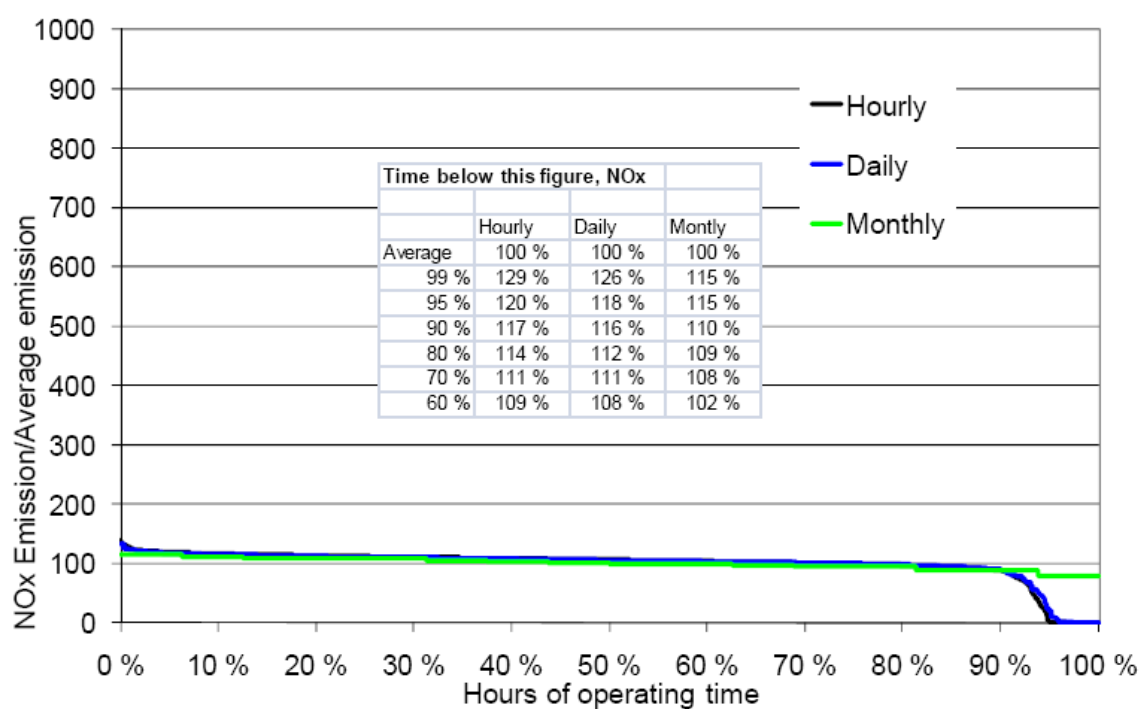
Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology



EkV

NO_x jakauma keskiarvosta

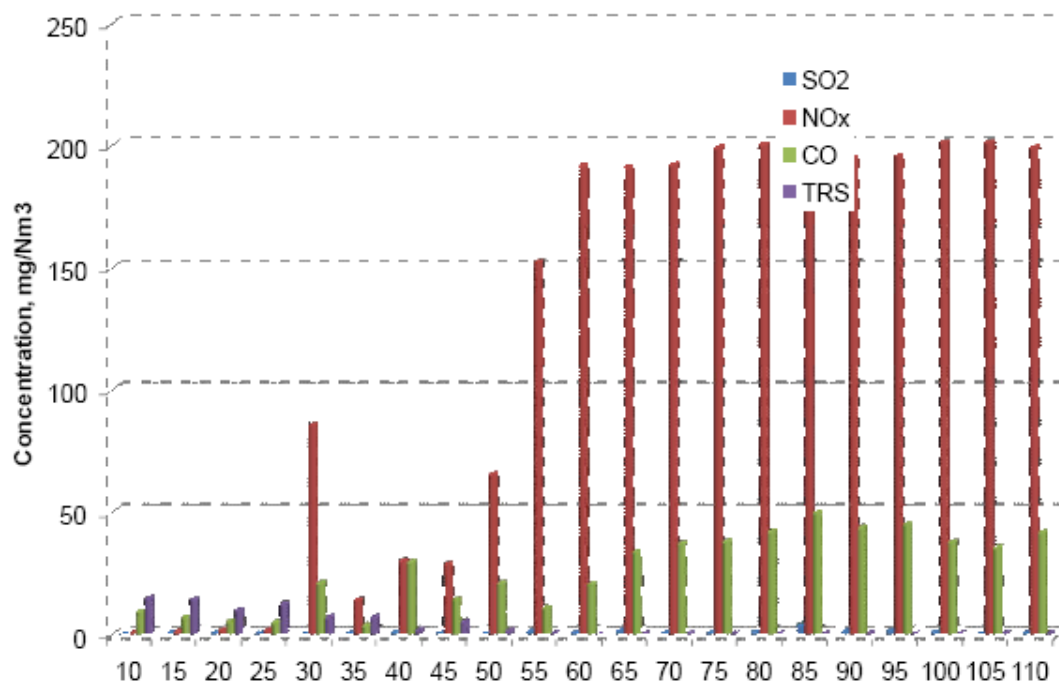
Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology



EkV

Kuorman vaikutus päästöön

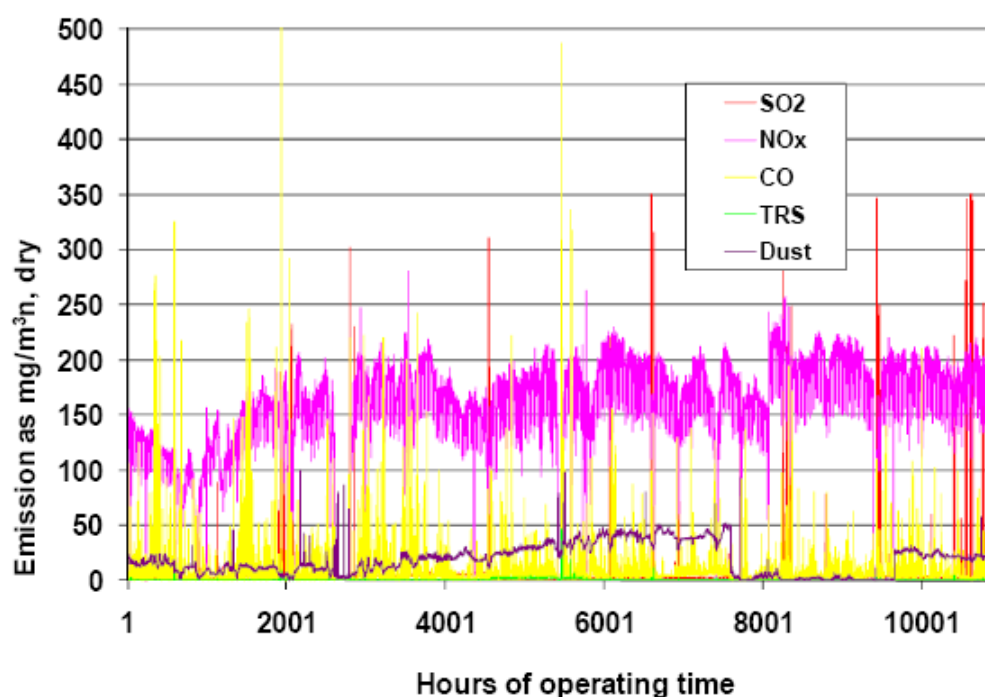
Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology



PÖYRY

Konsentraatio mittausaikana

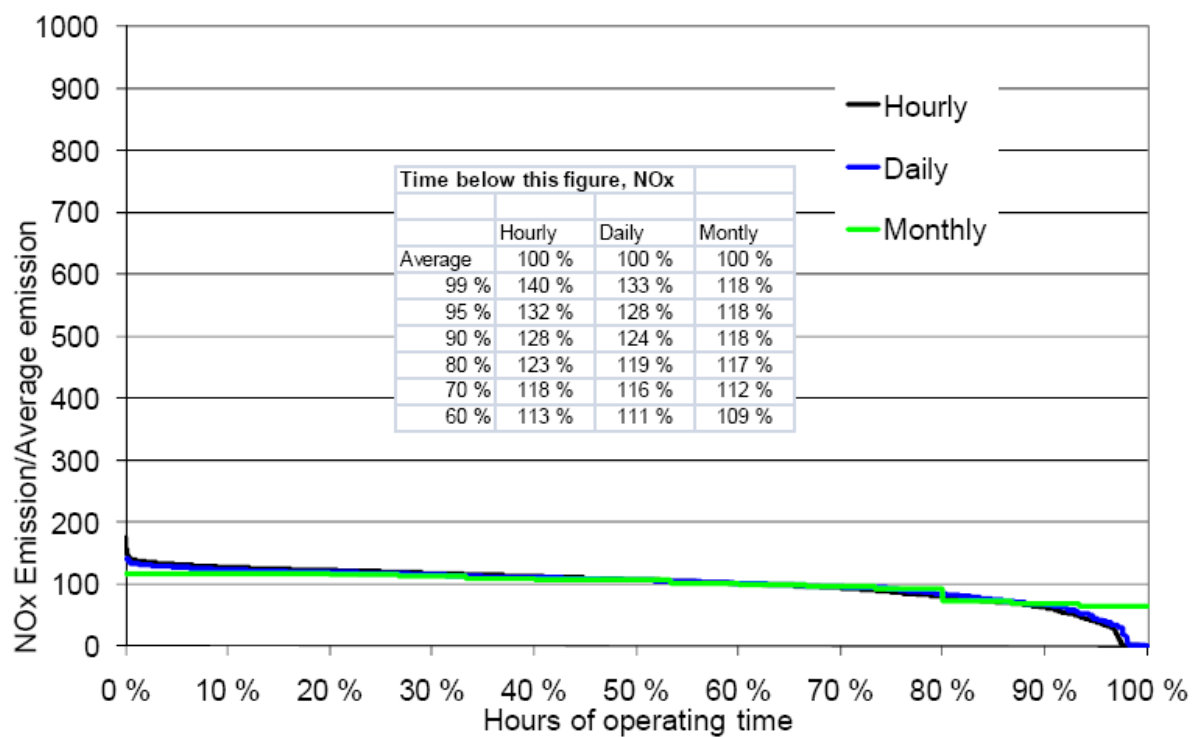
Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology



Pöly ei
Näytä oikein

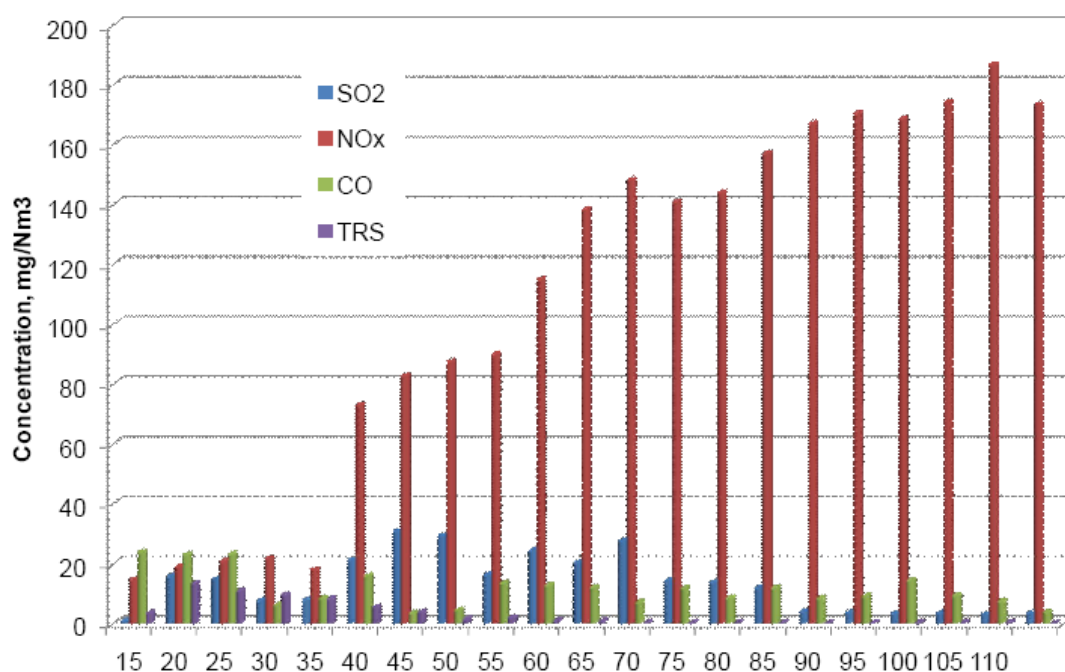
PÖYRY

NOx jakauma keskiarvosta



EKV

Kuorman vaikutus päästöön



EKV

KTR / SKYREC kuulumiset

KTR / SKYREC

Utilization of Pyrolysis Gases from the Recovery Boiler, ÅA

- Mass balance and energy balance calculations of pyrolysis gas extraction.
- Analysis of the gas composition above the bed in two recovery boilers using existing CFD results.
- Dust content in the pyrolysis gas
- Projektі hyväksytty ja julkaistu kotisivuilla

Tulistinputkimateriaalien korroosiotutkimus soodakattilalla, VTT

- Mittausjakso (1000h) alkoi 16.9.2010 ja päättyi noin viikkoa ennen tavoiteaikaa viikolla 42
- Loppuraportti kommentoitavana johtoryhmässä

Field tests of furnace materials, Boildec Oy

- Kolme onnistunutta koetta tehty, tulokset
- Neljäs koe menossa, yksi materiaaleista hiiliteräs
- Materiaalit viidenteen kokeeseen valinnassa

Analysis of the furnace test materials, VTT

- Testikappaleiden paksuudet mitattiin kokeita ennen ja jälkeen. 304L ja Super625 ohentuivat selvästi eniten ($25 - 50 \mu\text{m}/1000 \text{ h}$)
- Tähänastisten tulosten perusteella lupaavimmilta materiaaleilta vaikuttavat 4C54 (3XRE28), San28 ja San38

Corrosion tests in reducing conditions, PART II

- Tests with BL-chars
- Earlier tests were done in a gas containing CO and N₂ and additionally active carbon were placed on the synthetic salts.
- BL-chars contain chlorine and since one of the tested salts (Salt 5) does not contain any chlorine

Keraamiset ja metalliset rakennemateriaalit uusissa soodakattiloissa, OY

- Työssä tutkitaan tulenkestäviä materiaaleja altistamalla koekappaleet soodakattilan sulalle (lipeäruiskaukossa) SE Oulun tehtaalla
- Nopea koe (2 vko) tehtiin 16.2–2.3.2010, omatekoiset materiaalit (ZrO₂ ja Spinelli) lohkesivat, kun sondi otettiin pois kattilasta
- Uusintakoe huhtikuussa



Materiaalisuositus

- Vuoden 1997 suojaussuosituksen päivitys

Aktiivihiihisiuodatuksen ja UV-käsittelyn soveltaminen suolanpoistolaitokseen lisäveden TOC-tason alentamisessa, JP- analysis/Cewic

- Projektin tavoitteena on varmentaa ja optimoida aktiivihiihisiuodattimen toimivuutta TOC:n poistossa tehdasympäristössä
- Selvitetään ja kokeillaan UV-valon käyttöä osana suolanpoistolaitosta

Vesisuositus, Teollisuuden Vesi Oy

- vedelle ja höyrylle laatutaso, johon tulisi päästä
- mitä teet kun tietty arvo ylittyy
- kuinka usein ja mitä pitää analysoida
- oma työryhmä

