

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Aapo Hiltunen

SELLUTEHTAIDEN HÖYRYTASOJEN OPTIMAALISET PAINEET

Työn tarkastajat:

Professori Esa Vakkilainen

Yliassistentti Aija Kivistö

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Aapo Hiltunen

Sellutehtaiden höyrytasojen optimaaliset paineet

Diplomityö

2011

99 sivua, 27 kuvaa, 24 taulukkoa, 6 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen,

Yliassistentti, TkL Aija Kivistö

Hakusanat: Sellutehdas, Höyryn paine, Höyryn painetaso

Keywords: Pulp Mill, Steam Pressure, Steam Pressure Level

Sellutehtaiden kannattavuutta pyritään lisäämään parantamalla tehtaiden energiatehokkuutta ja tehostamalla tuotantoa. Yksi keino tehtaan sähkön tuotannon lisäämiseksi on höyrytasojen paineiden alentaminen tehtaan tuotantoprosesseissa. Tällöin höyry voidaan paisuttaa turbiinissa matalampaan paineeseen. Höyryn painetasojen alentaminen kuitenkin lisää tehtaan investointikustannuksia siirtoputkistojen kokojen ja lämmönsiirtopinta-alojen kasvaessa.

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa osana Suomen Soodakattilayhdistyksen projektia ”Skyrec – Soodakattilan sähköenergiatehokkuuden nostaminen uudelle tasolle”. Tässä diplomityössä määritetään 600 000 tonnia sellua vuodessa tuottaville Suomeen sopiville sellutehdastyypeille taloudellisesti optimaaliset höyryn painetasot. Optimaaliset höyryn painetasot määritettiin painetasojen mukaisten energiataseiden sekä investointiarvioiden perusteella. Työn taselaskennat tehtiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston Millflow-laskentasovelluksella. Matalapainetason mukaisia investointikustannuksia arvioitiin tehtaiden putkiston, haihduttamon ja kuivauskoneen osalta. Tulosten mukaan höyrytasojen paineet on taloudellisesti kannattavaa valita tehtaan laitteiston ja prosessien mukaan alhaisimmiksi mahdollisiksi. Lisäksi työssä tarkastellaan välipainehöyryn ja nuohoushöyryn paineiden alentamisen vaikutuksia tehtaan sähkön tuotantoon sekä joillekin tehtaan prosesseille rakennettavan oman matala- tai välipainelinjan käytön kannattavuutta. Diplomityöhön kerättiin tietoa suomalaisilla sellutehtailla käytössä olevista höyryn paineista sekä syistä painetasojen valintaan.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree programme of Energy Technology
Aapo Hiltunen

Optimal Pressures of Steam Pressure Levels in Pulp Mills

Master's Thesis

2011

99 pages, 27 figures, 24 tables, 6 appendixes

Examiners: Professor, D.Sc Esa Vakkilainen
Chief Assistant, Lic. Sc. Aija Kivistö

Keywords: Pulp mill, Steam Pressure, Steam Pressure Level

Pulp mills are trying to increase their profitability by improving energy effectiveness and intensifying production in mills. One way to improve electricity production in mills is to lower steam pressures in pulping processes. In that case steam can be expanded to lower pressure in turbine. However, lowering the steam pressures increases also investment costs of mill because of bigger pipe sizes and heat transfer areas.

This master's thesis was done in Lappeenranta University of Technology as a part of Finnish Recovery Boiler Committees project "Skyrec – Increasing Recovery Boiler Efficiency to New Level". In this master's thesis is specified the economically optimal steam pressures for Finnish pulp mill types producing 600,000 tons of pulp per year. In the work for different pulp mill types used in Finland were formed energy balances and investment estimations in accordance with steam pressure levels. Energy balance calculations were done with Millflow-calculation application. The optimal steam pressure levels were determined on the bases of energy balances and cost estimations. The investment costs accordant with low pressure steam level were calculated for the part of piping, pulp dryer and evaporator. On the bases of the results it is economically profitable to choose the lowest possible steam pressure levels defined by pulping processes and equipments. In addition in the work was estimated the effect of lowering the middle pressure steam and sootblowing steam pressures for electricity production in pulp mills. In the work was also examined profitability of building own middle or low pressure steamlines for some pulping processes. For this master's thesis was also gathered information about steam pressures used in Finnish pulp mills and about the reasons of choosing the pressure levels.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa osana Suomen Soodakattilayhdistyksen projektia ”Skyrec – Soodakattilan sähköenergiatehokkuuden nostaminen uudelle tasolle”.

Opiskelu-aika yliopistossa on ollut eräs mielenkiintoisimmista ja vaiherikkaimmista ajanjaksoista elämässäni. Tämän diplomityön valmistumisen myötä tämä vaihe elämässäni päättyy. Haluan kiittää erityisesti Professori Esa Vakkilaista ammattitaitoisesta työn ohjaamisesta sekä erinomaisen vaihto-opintomahdollisuuden järjestämisestä Moskovaan. Haluaisin kiittää myös perhettäni läpi elämän kestäneestä tuesta ja kannustuksesta sekä opiskelukavereitani korvaamattomista hetkistä yhdessä opiskelujen aikana ja niiden ulkopuolella.

Lappeenrannassa 26.07.2011

Aapo Hiltunen

SISÄLLYSLUETTELO:

1	JOHDANTO	12
2	SELLUTEHTAAN TOIMINTA.....	17
2.1	Puun käsittely.....	17
2.2	Sulfaattisellun keitto.....	18
2.2.1	Eräkeitto	18
2.2.2	Vuokeitto	19
2.3	Massan pesu ja lajittelu	21
2.4	Happidelignifiointi	22
2.5	Valkaisu	23
2.6	Kuivaus.....	24
2.7	Kemikaalikierto.....	24
2.7.1	Haihduutamo	25
2.7.2	Soodakattila	28
2.7.3	Nuohomet	30
2.7.4	Kattilan vesi-höyrykierto.....	32
2.7.5	Kaustisointi.....	33
2.7.6	Meesauuni.....	35
2.8	Kuorikattila	36
2.9	Höyryturbiini	38
2.10	Höyryn paineen säätö.....	38
3	HÖYRYN KULUTTAJAT	40
3.1	Haihduutamo.....	41
3.2	Sellun kuivuri.....	42
3.3	Keitin	42
3.4	Valkaisu	44

3.5	Soodakattila	44
4	LASKENTA.....	45
4.1	Taselaskenta.....	45
4.2	Putkiston halkaisijan määrittäminen	48
4.3	Putken seinämävahvuuden laskeminen	50
4.4	Putkiston investointikustannukset.....	51
4.5	Haihduuttamon investointikustannukset	52
4.6	Kuivauskoneen investointikustannukset	54
4.7	Vuosittaisten kokonaisinvestointien laskeminen	54
4.8	Turbiinin tehon laskeminen	55
5	TAPAUSTEN LASKENTA-ARVOT	59
5.1	Höyryn painearvot energiataseiden laskennassa.....	60
5.2	Tehdastyypin prosessilämmön kulutus laskennassa.....	61
5.3	Turbiinin toiminta-arvot	63
5.4	Nuohoushöyryn paineen alentaminen	64
5.5	Toisen matalapainetason rakentaminen.....	65
5.6	Toisen välipainetason rakentaminen	67
6	SUOMESSA KÄYTETTÄVÄT HÖYRYN PAINETASOT	69
7	VÄLIPAINETASON LASKEMISTA RAJOITTAVAT TEKIJÄT.....	72
8	HÖYRYN PAINETASON VAIKUTUS SÄHKÖN TUOTANTOON	73
8.1	Höyryn painetasojen muutoksen vaikutus sähkön myyntituloihin	73
8.2	Turbiinin marginaalinen rakennusaste	75
8.3	Nuohoushöyryn paineen vaikutus sähkön myyntituloihin	76
9	HÖYRYN PAINETASON VAIKUTUS INVESTOINTEIHIN.....	78
9.1	Putkiston investointikustannukset.....	78
9.2	Haihduuttamon investointikustannukset	80
9.3	Kuivauskoneen investointikustannukset	81

9.4	Kokonaisinvestoinnit.....	81
10	MATALAPAINETASON OPTIMAALINEN PAINE	83
11	HERKKYYSTARKASTELU	85
12	RINNAKKAISTEN HÖYRYLINJOJEN RAKENTAMINEN.....	86
12.1	Toisen matalapainelinjan rakentamisen kannattavuus.....	86
12.2	Toisen välipainelinjan rakentamisen kannattavuus	88
13	JOHTOPÄÄTÖKSET	90
14	YHTEENVETO	92

LIITTEET

LIITE I:	Sähköpostikeskustelu sellutehdasprosessien painetasovaatimuksista
LIITE II:	Matalapainehöyryn paineen mukaiset kannattavuuslaskelmat
LIITE III:	Rinnakkaisen välipaineputkiston laskennan arvot ja tulokset
LIITE IV:	Tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen kyselyyn käytettävistä painetasoista ja syistä tasojen valintaan
LIITE V:	Esimerkki talteenottolinjan ja kuivauskoneen uusinnan kustannuslaskelmista
LIITE VI:	Haihduuttamon investointilaskelmat

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]
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'	reaali 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
h	haihduttamo
k	kuivauskone
kp	kiehumapiste
l	lauhde
m	muodostumis-

p	putkisto
pap	paperi
pr	prosessi
pt	polytrooppinen
s	isentrooppinen
sat	saturaatio-/ lauhtumis-
sis	sisä-
t	tuntuva
teh	tehollinen
th	prosessilämpö
tun	tunnettu
u	ulkoinen

Lyhenteet

abs	absoluuttinen
ADt	ilmakuiva sellutonni
BPR	kiehumapisteen nousu
HPK	hienopaperikone
KK	kuorikattila
LP	matalapainehöyry
MP	välipainehöyry

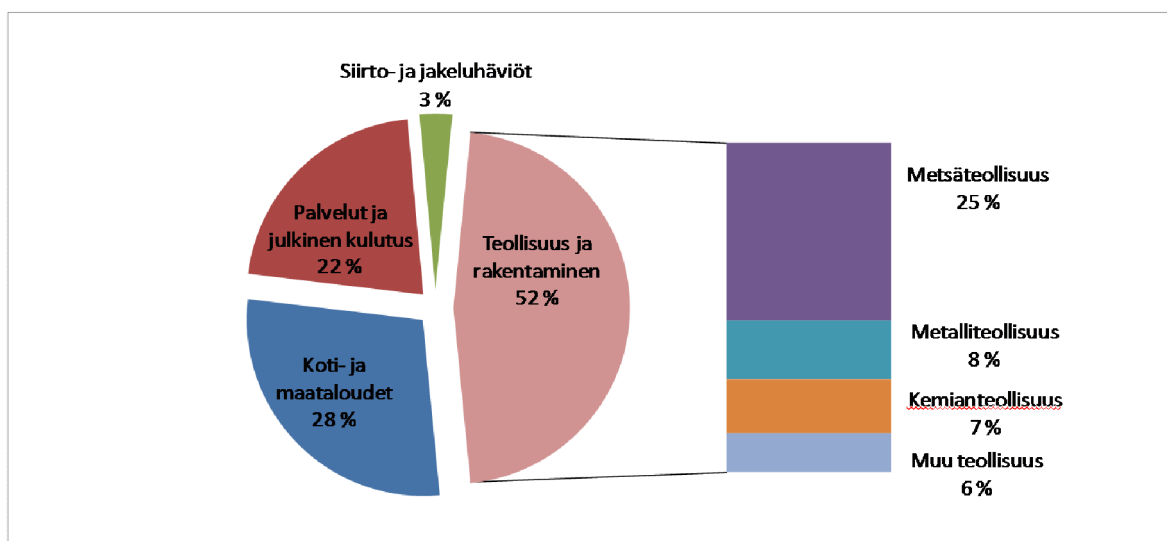
MP1	turbiinin väliottopaine 1
MP2	turbiinin väliottopaine 2
NH	nuohoushöyry
TH	tuorehöyry
ST	sellutehdas

1 JOHDANTO

Metsäteollisuudella on Suomessa pitkä historia, ja sillä on merkittävä vaikutus Suomen kansantalouteen. Metsäteollisuus on eräs maamme suurimmista teollisuudenaloista, ja Suomen kansainvälinen kilpailukyky on rakentunut monilta osin sen varaan.

Metsäteollisuuden tärkeimmät osa-alueet ovat massa- ja paperiteollisuus. Metsäteollisuus työllistää suoraan noin 50 000 ihmistä ja luo noin 15 % teollisuuden työpaikoista Suomessa. Sellu- ja paperiteollisuus kattoivat vuonna 2009 lähes 17 % Suomen teollisuustuotannon arvosta. Vuonna 2010 metsäteollisuuden viennin osuus Suomen koko tavaran viennin osuudesta oli noin viidennes. (Tilastot 2011) Metsäteollisuuden viennin arvo henkeä kohti ja osuus koko viennistä ovatkin maailman suurimmat. (Suomen metsäteollisuus 2011)

Metsäteollisuudella on myös suuri vaikutus maamme energiankulutukseen. Kuvassa 1 on esitetty Suomen sähköenergiankulutus sektoreittain. Vuonna 2010 sähkön kokonaiskulutus oli Suomessa 87,5 TWh, josta metsäteollisuuden osuus oli neljännes. Metsäteollisuus kulutti yli 50 % teollisuuden käyttämästä sähköstä. (Suomen virallinen tilasto 2011) Sellu- ja paperiteollisuus ovat metsäteollisuuden suurimmat energiankuluttajat.

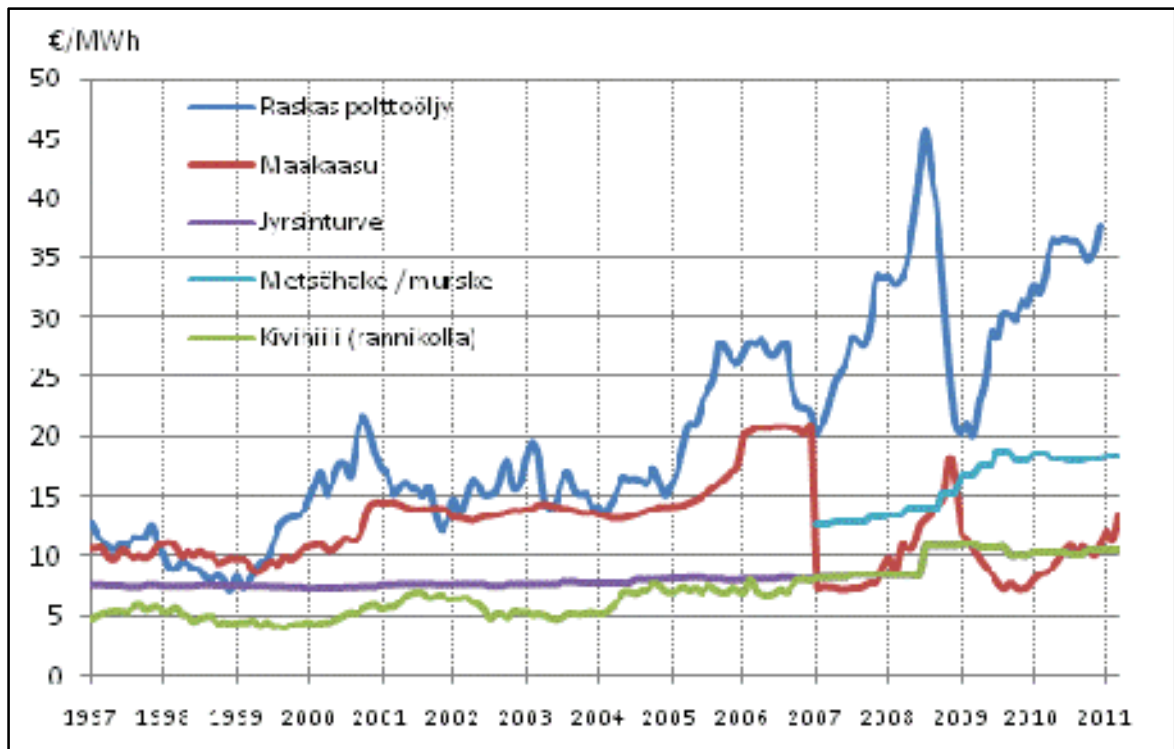


Kuva 1. Sähkön kulutus sektoreittain Suomessa vuonna 2010. (Lähdettä mukaillen: Sähkönkulutus 2011)

Polttoaineiden hintojen noususta ja sellun hinnan laskusta johtuva kilpailun kiristymisen sekä taloudellinen taantuma ovat johtaneet mittaviin säästötoimiin suomalaisilla tehtailla.

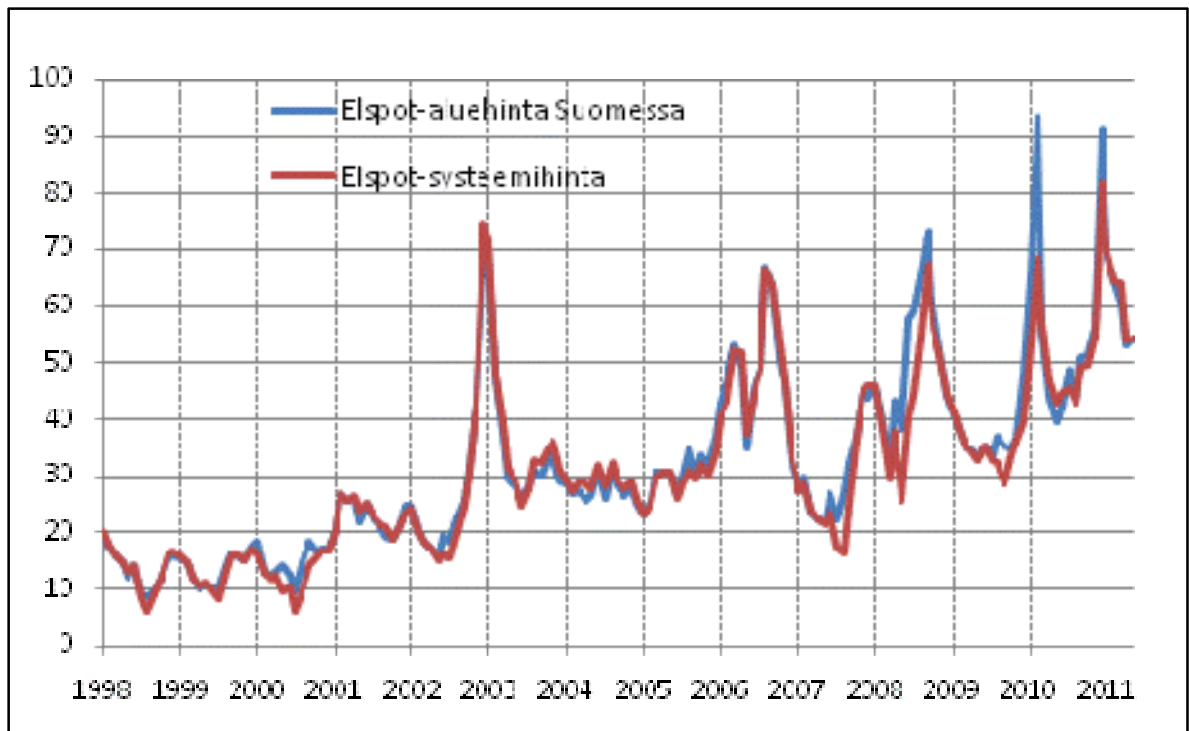
Tehtaiden tuotantokapasiteettia on pienennetty ja tehtaita on jouduttu lakkauttamaan. Liiketuloksen osuus liikevaihdosta on pienentynyt kaikilla metsäteollisuuden aloilla. Tehtaat joutuvat tekemään mittavia investointeja kilpailukykyänsä säilyttämiseksi ja säästöjen aikaansaamiseksi ilman tuotantokapasiteetin vähenemistä. (Kivistö 2010, 1)

Tehtaiden suuresta energian kulutuksesta johtuen sähkön ja tehdaspolttoaineiden hinnat vaikuttavat merkittävästi niiden talouteen. Kuvassa 2 on esitetty voimalaitospolttoaineiden hinnankehitys viime vuosikymmeninä. Kuvasta voidaan todeta voimalaitospolttoaineiden hintojen yli kaksinkertaistuneen viimeisten 15 vuoden aikana. Viime vuosina 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 2011) Suomen on edelleen vähennettävä aiheuttamiaan CO₂-päästöjä EU:n velvoitteiden mukaisesti. Suomalaisilla sellutehtailla fossiilisia polttoaineita käytetään vain meesauunin polttoaineena ja kattiloiden tuki- ja kuormapolttimissa. Prosessien tehostumisen ja tekniikan kehittymisen myötä selluntuotannon ominaisenergiankulutus on vähentynyt viime vuosikymmeninä. Vajaassa 40 vuodessa sellutehtaiden lämmönkulutus on pienentynyt noin 15 % ja sähkönkulutus noin 5 % tuotettua ilmakeivää sellutonnin (ADt) kohden. Energian kulutuksen vähenemiseen ovat vaikuttaneet muun muassa sellun keittovaiheen energiankulutuksen pieneneminen, kuivauksen tehostuminen, lipeähaihduttamon vaihdeluvun lisääntyminen sekä jätelämmön talteenoton kehittyminen. (Kivistö 2010, 1–3)



Kuva 2. Voimalaitospolttoaineiden hinnat sähköntuotannossa. (Energian hinnat 2011A)

Tuotantoprosessien optimoinnilla ja sähköntuotannon maksimoinnilla pyritään saamaan aikaan säästöjä tehtaiden energiankulutuksessa ja lisäämään tehtaan tuloja. Suurista tuotantomääristä ja sähkön korkeasta hinnasta johtuen sähkön ja lämmön tuotannon lisäämiseksi tehdyt investoinnit ovat kannattavia. Kuvassa 3 on esitetty Nord Pool Spot –sähköpörssin kuukausikeskiarvot sähkön hinnalle. Kuvasta voidaan havaita sähkön hinnan yli nelinkertaistuneen viimeisen 10 vuoden aikana. Vuonna 2010 Suomessa myytävän sähkön hinta oli Euroopan korkein. (Metsäteollisuus 2010) Aiemmin mainittujen seikkojen vuoksi prosessien energiatehokkuuden ja tehtaiden energiaomavaraisuuden parantaminen on tärkeää sellu- ja paperiteollisuuden kannattavuuden lisäämiseksi. Tämän vuoksi suomalaisilla paperi- ja sellutehtailla tehdään runsaasti tutkimustyötä ja investoidaan paljon uusiin tehokkaampiin energiaratkaisuihin.



Kuva 3. Nord Pool Spot-sähköpörssin kuukausikeskiarvot. (Energian hinnat 2011 B)

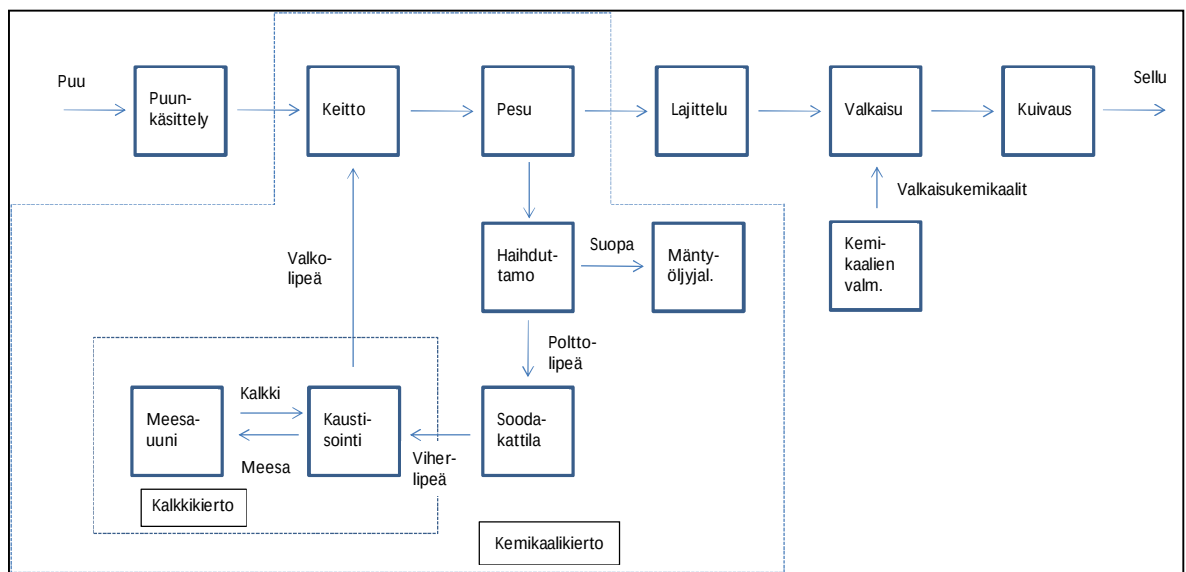
Edellä mainituista syistä johtuen sellu- ja paperitehtailla pyritään löytämään keinoja lämmönkulutuksen vähentämiseksi ja sähköntuotannon lisäämiseksi. Useilla tehtailla käytettävät höyryn painetasot on määritetty vanhojen laitteistojen mukaan, eikä niitä ole optimoitu uusista laitteistoinvestoinneista huolimatta. Alan kirjallisuudessa ja tutkimisissa ei ole yleisohjetta painetasojen vaikutuksesta tehtaan sähkön tuotantoon ja kulutukseen. Sähköntuotantoa voitaisiin lisätä alentamalla tehtaan höyryn painetasoja ja paisuttamalla höyry turbiinissa matalampaan vastapaineeseen. Matalampien höyrynpaineiden käyttö merkitsee kuitenkin myös suurempia investointikustannuksia höyrylinjojen ja laitteiden lämmönsiirtopintojen kokojen kasvaessa.

Tämän työn tavoitteena on selvittää suomalaisten sellutehdastyypin optimaaliset matalapainehöyrytasojen paineet sekä tarkastella höyrytasojen paineiden muuttumisen vaikutusta tehtaan sähkön kulutukseen ja tuotantoon. Erilaisille tehdastyypeille on muodostettu vuosikeskiarvotaseet sekä investointiarviot käytettävien höyryn painetasojen mukaan. Paineen muuttumisesta aiheutuvia investointeja on arvioitu putkiston, haihduttamon ja kuivurin osalta. Investointiarvioissa ei ole huomioitu painetasojen muuttumisesta aiheutuvia kustannuksia tehtaan muissa prosesseissa ja laitteissa. Vuosikeskiarvotaseiden ja investointiarvioiden avulla on määritetty taloudellisesti

optimaaliset paineet tehdastyypin matalapainehöyrylle. Työssä tarkastellaan myös välipainehöyryn sekä nuohoushöyryn paineiden alentamisen vaikutuksia tehtaassa sähköntuotantoon. Lisäksi työssä tarkastellaan nykyisten matala- ja välipainetasojen rinnalle rakennettavien alempien painetasojen vaikutuksia tehtaassa vuosikeskiarvotaseeseen sekä muodostetaan tapauksille investointiarviot.

2 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 tehtaan prosesseihin. Kemikaalikierto on jaettu lipeäkiertoon ja kalkkikiertoon. Mahdollisimman suuri osa keitossa tarvittavista kemikaaleista pyritään palauttamaan uudelleen käytettävään muotoon. Kuvassa 4 on kuvattu sulfaattisellutehtaan periaatteellinen prosessijako, sekä edellä kuvattua kemikaalien kiertoa. Seuraavissa kappaleissa on kuvattu pääpiirteittäin tyypillisen suomalaisen sulfaattisellutehtaan toiminta.



Kuva 4. Sulfaattisellutehtaan periaate toimintakaavio.

2.1 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 siiloihin. (Kivistö 2008, 1-3)

2.2 Sulfaattisellun keitto

Sellun keitossa puukuidut erotetaan toisistaan liuottamalla kuitujen sidosaine, ligniini puusta lämmön ja kemikaalien avulla. Keittokemikaaleina käytetään natriumhydroksidia (NaOH) ja natriumsulfidia (Na_2S). Lisäksi keittokemikaalit sisältävässä valkolipeässä on 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)

2.2.1 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 tässä vaiheessa tarvitaan vain 10–15 °C:n lämmönnosto. Lämmitys tapahtuu höyryllä joko kierrättämällä lipeää lämmönsiirtimissä tai suoralla höyrylämmityksellä, jolloin höyryn lauhteita ei saada talteen. Varsinainen keittoaika 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. (Kivistö 2008, 5–7)

Eräkeiton etuja ovat muun muassa pieni höyryn tarve, joustavuus ja kemikaalien tehokas hyödyntäminen. Nykyaikaisia eräkeitto menetelmiä ovat Cold Blow-, SuperBatch- ja Enerbatch-menetelmät. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A494–497) Suomessa eräkeitton menetelmää käytetään muun muassa UPM Kymmenen Kaukaan tehtailla. (Vakkilainen, keskustelu 19.08.2010)

2.2.2 Vuokeitto

Vuokeitossa käytetään vain yhtä jatkuvatoimista keitinastiaa. Keittäminen tapahtuu vuokeittimessä hydraulisena tai höyry-nestefaasikeittona. Hydraulisessa keitossa lipeän lämmitys tapahtuu epäsuorasti lämmönsiirtimissä kun taas höyry-nestefaasikeitintä lämmitetään suoralla höyrylämmityksellä. Keittimen yläosaan syötetään koko ajan haketta ja keitettyä sellumassaa poistetaan sen alaosaan. Kuvassa 5 on esitetty yleiskuva vuokeittolaitteistosta ja keittimen ainevirroista.

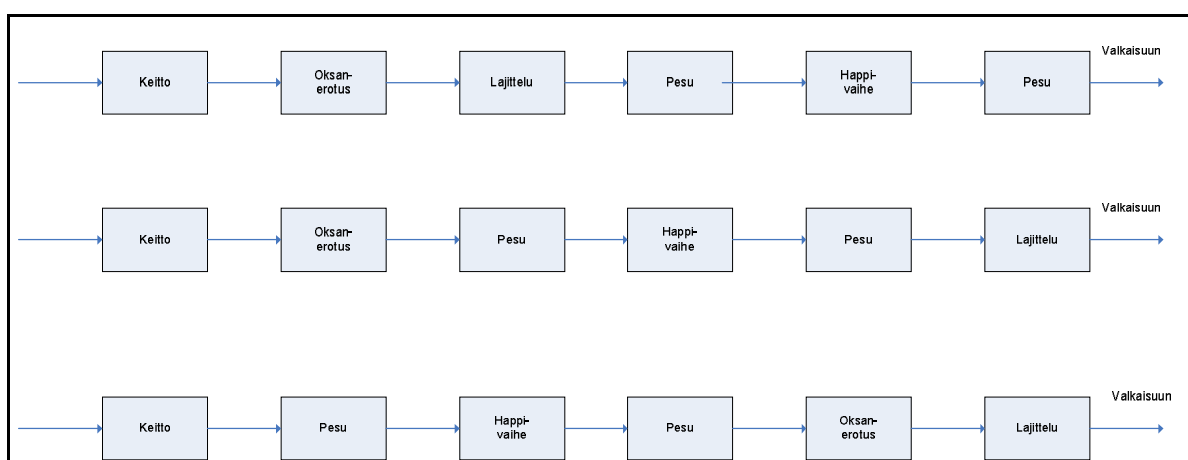
Keitin on jaettu vyöhykkeisiin, joissa keiton eri vaiheet tapahtuvat. Ensimmäisessä vaiheessa hake syötetään hakesiilosta matalapainesulkusyöttimellä pasutusastiaan. Pasutusastiassa hakkeesta poistetaan höyryn avulla ilmaa. Höyrynä voidaan käyttää keittimen jälkeisen mustalipeän paisumisesta saatavaa höyryä tai matalapainehöyryä. Kuvassa 5 höyrylinjat näkyvät sinisellä. Kaikissa keittimissä pasutusastiassa tapahtuvaa esihöyrytystä ei kuitenkaan tehdä. Pasutusastiasta hake tippuu romuloukkuun, jossa hake upotetaan lipeään. (Virkola 1983, 367–369) Korkeapainepurkain siirtää hakkeen romuloukusta 100–150 kPa:n matalapaineesta yli 1 MPa:n prosessipaineeseen. Hake pumpataan lipeävirran mukana syöttökiertopumpulla keittimen yläruuville. Kuvassa 5 hakkeen kulku pasutusastialta keittimeen on kuvattu punaisella nuolella. Tyypillisesti hydraulisen keittimen paine on noin 10–15 bar ja lämpötila noin 100–135 °C. Keittimessä hake valuu ylhäältä alaspäin kaikkien keittovaiheiden läpin. (Gullichsen, Fogelholm 1999, 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. Tämän jälkeen se palautetaan keittimeen keskusputkesta suunnilleen samalle tasolle.

Toisen vaiheen jälkeen lipeä lämmitetään 150–170 °C keittolämpötilaan. Hake viipyy keittovaiheessa 1.5–2.5 tuntia. Keittovaihetta seuraa lipeän poistovaihe, jossa hakkeeseen sitoutumaton lipeä poistetaan keittimestä. Poistettu lipeä paisutetaan ilmakehän paineeseen, jolloin se kiehuu. Syntynyt höyry käytetään hakkeen esihöyrytykseen pasutusastiassa ja höyrystimessä.

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 pesulipeää. Suurin osa pesulipeästä pumpataan valmiin massan mukana puskusäiliöön. Massan poistolämpötila on noin 85–90 °C. Kuvassa 5 keitetyn sellumassan pumpppausta keittimen pohjalta puskusäiliöön kuvataan punaisella nuolella. Keittolipeä ja osa

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



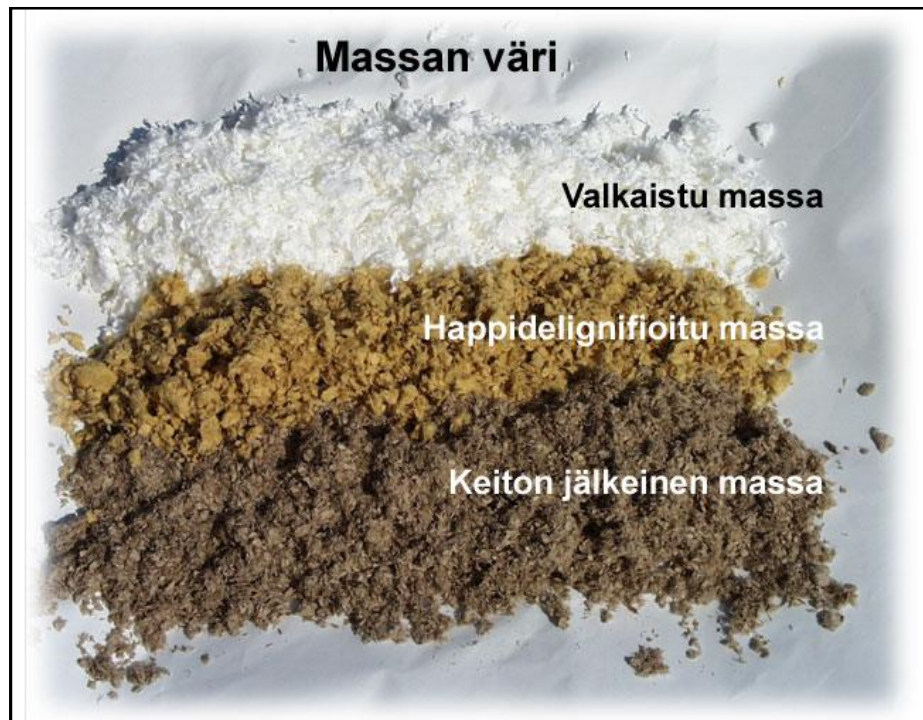
Kuva 6. Pesu-, lajittelu- ja happivaiheen sijoitus mahdollisuuksia.

2.4 Happidelignifiointi

Sellu ja useimmat puun polysakkarideista ovat luonnostaan kirkkaan värisiä, mutta ligniini antaa niille tummemman värin. Korkeasta ligniinin erotusasteesta huolimatta kemiallinen sellu on vielä tummaa pesuvaiheen jälkeen. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A15) Ligniininipitoisuuden alentaminen ennen valkaisua on tärkeää myös tehtaan ympäristön suojelun kannalta. Happidelignifioinnissa sellu pumpataan sekoittimeen alkaalin, kuten oksidoidun valkolipeän, sekä hapen ja höyryn kanssa. Tämän jälkeen kaasut erotetaan sellusta ja sellu pestään ennen valkaisua. Happidelignifiointi on korkeista pääomakustannuksista huolimatta kannattava, koska sillä voidaan alentaa valkaisun kemikaalitarvetta ja pienentää merkittävästi tehtaan jätevesi kuormitusta. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A137–139)

2.5 Valkaisu

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



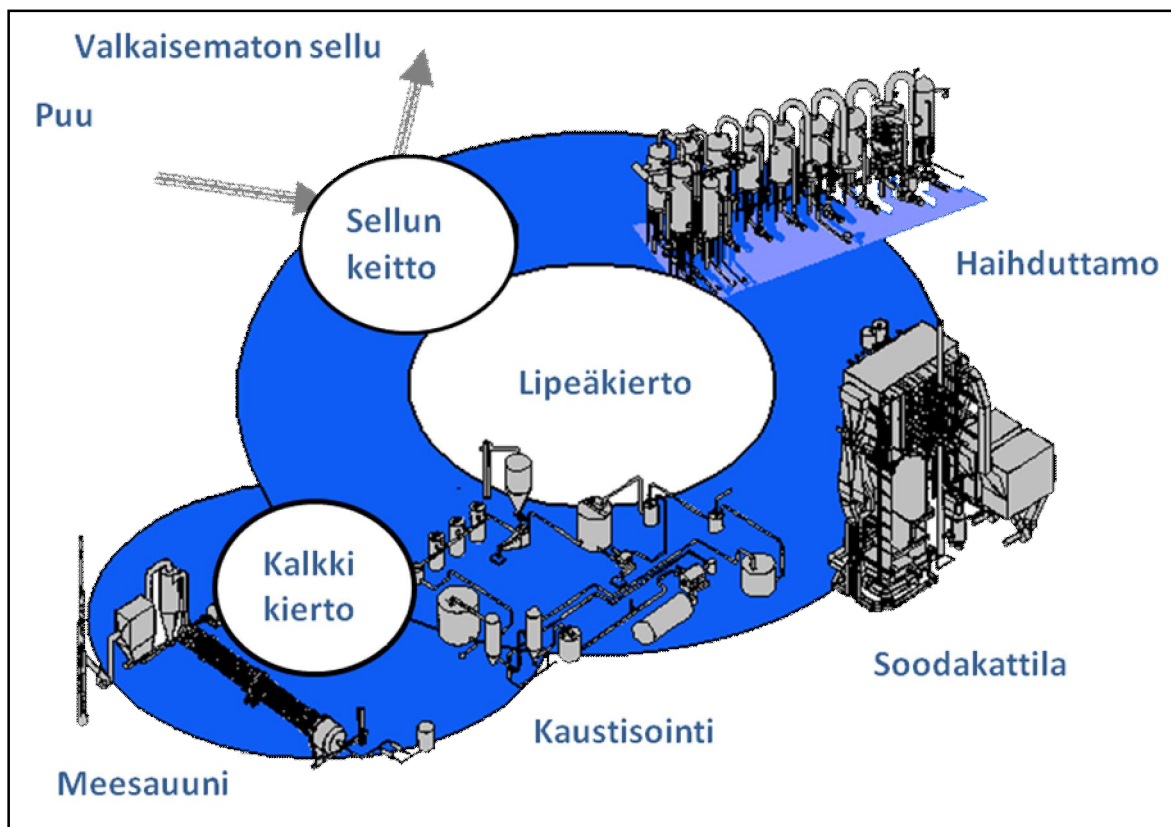
Kuva 7. Sellumassan väri. (KnowPulp 6.0)

2.6 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. Säteilukuivausta 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)

2.7 Kemikaalikierto

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

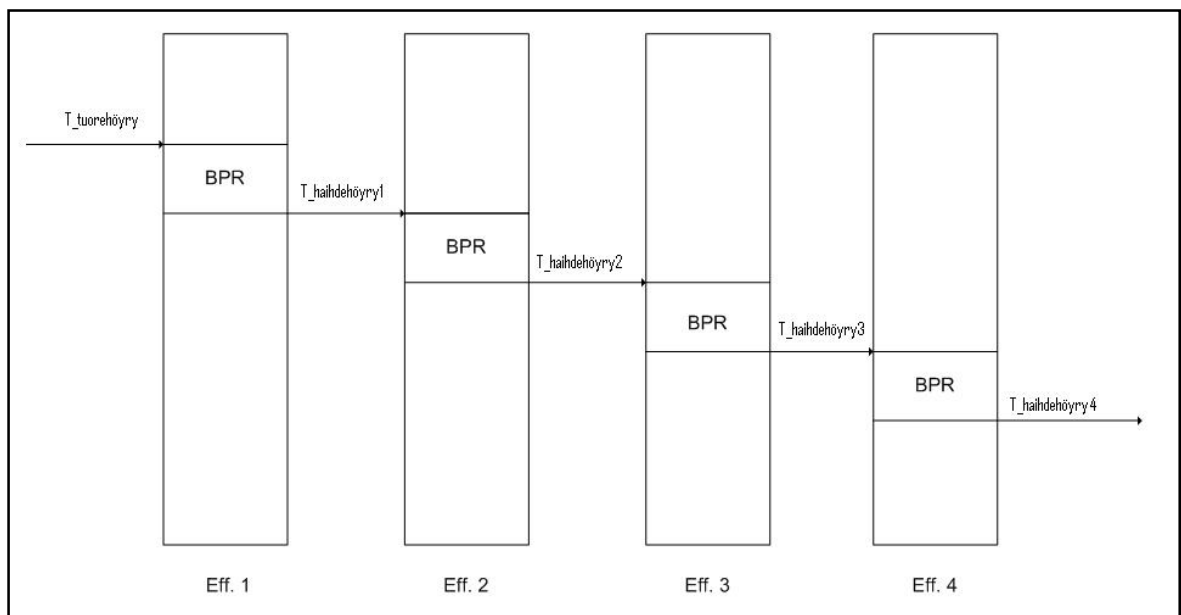


Kuva 8. Sulfaattisellutehtaan kemikaalikierto (Lähdettä mukaillen: Vakkilainen 2007, 5)

2.7.1 Haihduttamo

Keitosta saatavan lipeän kuiva-ainepitoisuus on noin 17 %. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on nostettava yli 65 prosenttiin, jotta sen polttaminen soodakattilassa olisi mahdollista. Jotta lipeän poltosta ei syntyisi rikkipäästöjä, on mustalipeän kuiva-ainepitoisuus kuitenkin nostettava haihduttamolla yli 70 %:iin. Suomalaisilla sellutehtailla mustalipeän kuiva-ainepitoisuus nostetaan haihduttamolla keskimäärin 77–78 % :iin. (Vakkilainen, keskustelu 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) Kuvassa 9 on esitetty periaattekuva, josta voidaan nähdä lipeän kiehumapisteen nousu, sekä haihdehöyryn lämpötilan muutos haihdutinyksiköistä toiseen mentäessä. Jotta haihtuminen olisi mahdollista, yksikössä vallitseva paine ja lämpötila laskevat aina seuraavaan mentäessä. Paineen laskun aikaansaamiseksi viimeistä haihdutinvaihetta seuraa tyhjäpumppu tai höyryejektori. (Kivistö 2008, 16–20)

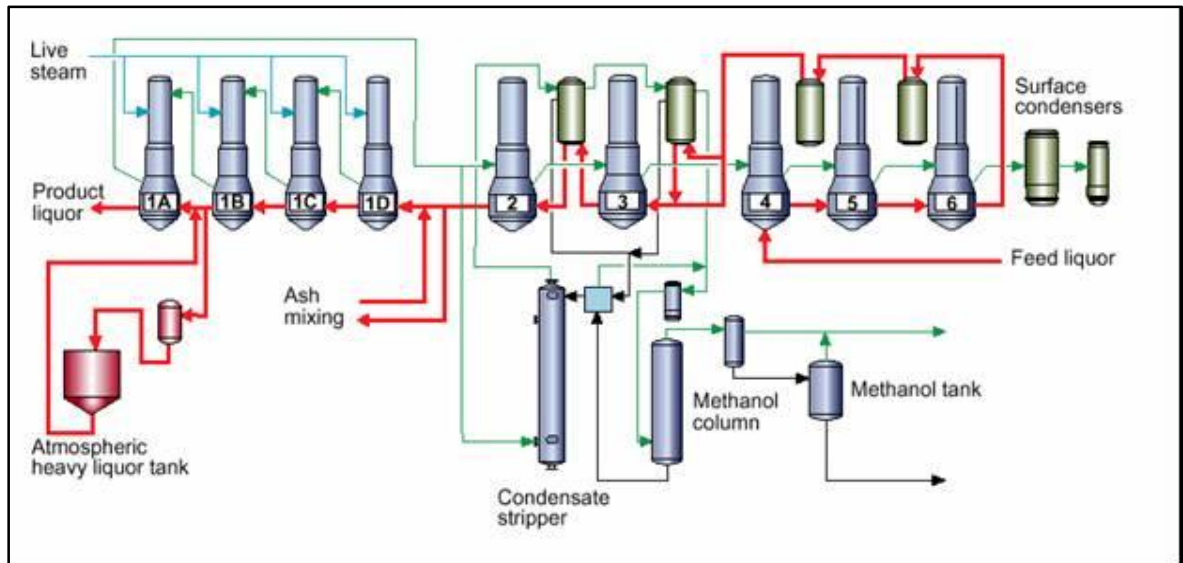


Kuva 9. Höyryjen lämpötilat haihdutinyksiköissä.

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 korkeammassa lämpötiloissa. Korkeammat lämpötilat voidaan välttää lämpökäsittelyllä, jolloin lipeän viskositeettiä saadaan laskettua. (Kivistö 2008, 16)

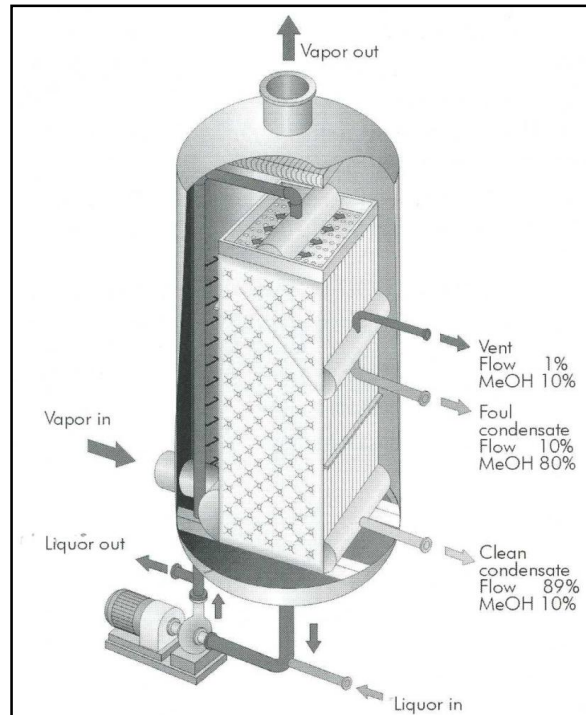
Kuvassa 10 on esitetty monivaihehaihduttamon toimintaperiaate. Lipeää seisotetaan välilipeäsäiliöissä haihdutinvaiheiden välissä, jotta mustalipeän sisältämä suopa ehtisi nousta sen pinnalle. Suopa kaadetaan lipeän pinnalta suopasäiliöön ja jatkojalostetaan esimerkiksi mäntyöljyksi. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A83–91) Kuten kuvasta 10 nähdään, syötetään lipeä keskimmäisiin haihdutinyksiköihin, joista se kulkee alkuun höyryn kanssa saman suuntaisesti haihduttamon viimeisiin yksiköihin. Ensimmäinen

haihdutinvaihe on jaettu useampaan haihdutinyksikköön. Niiden järjestystä voidaan vaihdella, jolloin ne eivät tukkeudu.



Kuva 10. Monivaihehaihduttamon 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 ensin lämmiten ja lopulta kiehuun. Haihduttamiseen käytetty höyry syötetään putkinipun ulkopuolelle. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B46) Myöhemmin on otettu käyttöön, kuvassa 11 esitetyn mukaisia, laskevakalvohaihduttimia (falling-film). Laskevakalvohaihduttimessa 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 lauhdet sekä haihduttamisessa syntyvät metanoli ja haisevat rikkiyhdisteet saadaan erikseen talteen. Edellisten lisäksi käytössä on ollut myös muun muassa pakkokierto-lauhduksia. (Kivistö 2008, 16–20)



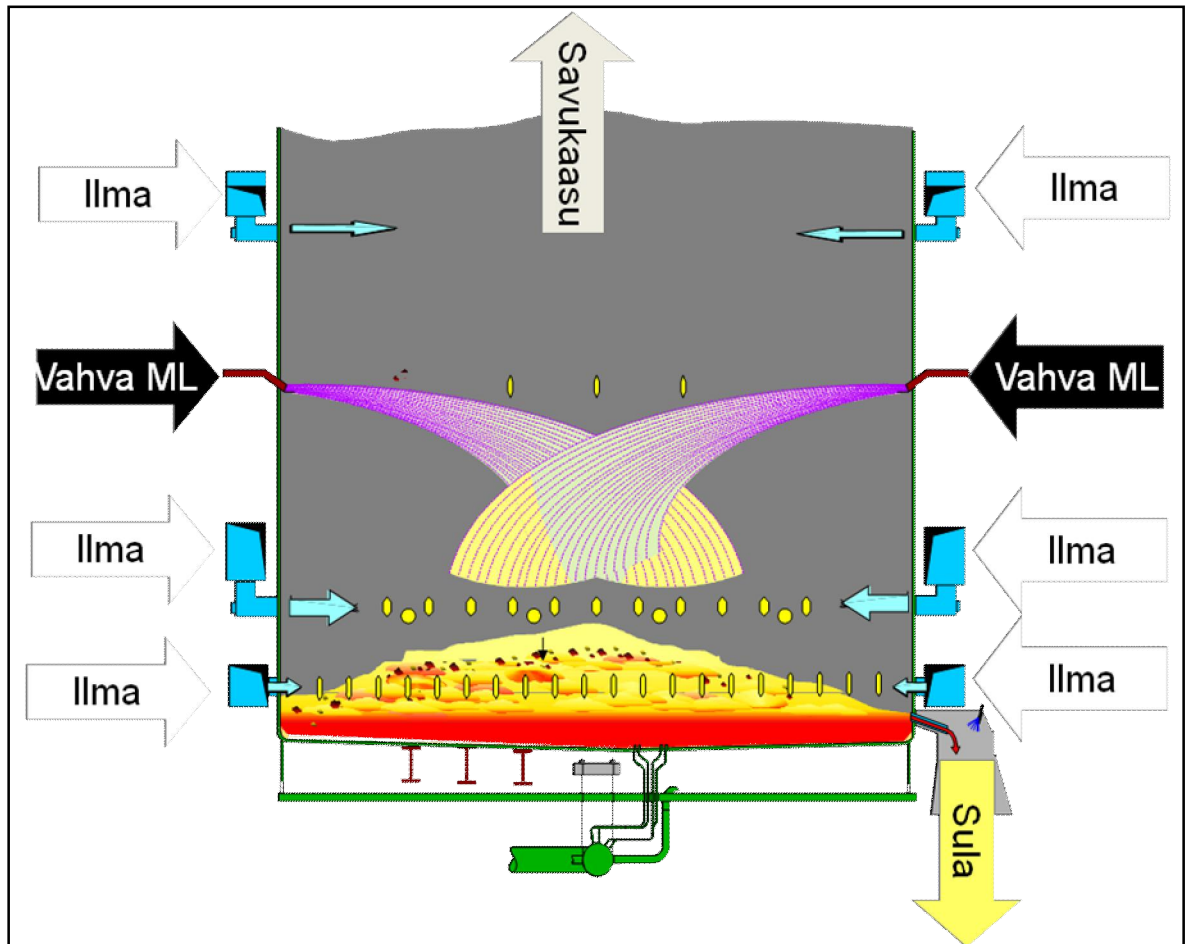
Kuva 11. Lamelli tyyppinen laskevakalvohaihdutin. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B47)

2.7.2 Soodakattila

Soodakattilan tarkoitus on talteenottaa mustalipeän sisältämät keittokemikaalit 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 kemikaalien 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. Kuvassa 12 esitetyssä periaatekuvassa näkyy hyvin tulipesään syötettävän ilman monivaiheisuus. Pääasiassa natriumsulfidista (Na_2S) ja natriumkarbonaatista (Na_2CO_3) koostuva

kemikaalisula johdetaan sularännejä pitkin liuotinsäliöön, jossa siihen sekoitetaan valkolipeää. Tällöin siitä muodostuu viherlipeää. (Huhtinen et al. 2000, 164–166)



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

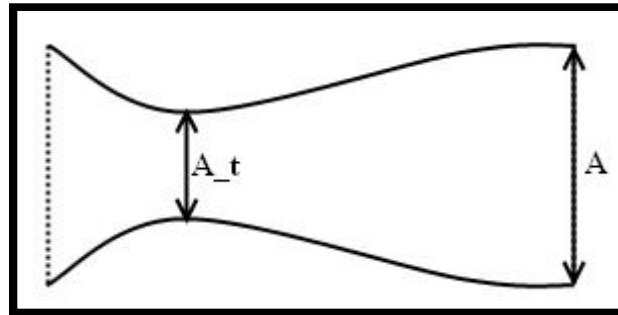
Palamisen ja reduktioreaktion aikana osa lipeän kemikaaleista höyrystyy. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B122) Höyrystyneet kemikaalit ja lentotuhka, josta yli 90 % on natriumsulfaattia, poistuvat tulipesästä savukaasuvirran mukana. Kiinteässä muodossa oleva lentotuhka poistetaan savukaasuista kattilan 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. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B124) Kerrostumien muodostumista

voidaan vähentää alentamalla savukaasujen happipitoisuutta, nostamalla polttolipeän kuiva-ainepitoisuutta sekä mitoittamalla tulipesä riittävän suureksi, jolloin savukaasujen lämpötila tulistin alueella on riittävän alhainen. (Huhtinen et al. 2000, 166)

2.7.3 Nuohoimet

Savukaasukanavia ja putkipintoja on nuohottava jatkuvasti niille kertyvän lian vuoksi. 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 lämpötilassa tulistimien nuohoukseen. (Huhtinen 2000, 214) Nuohoinputket ovat 4–6 metriä pitkiä ja halkaisijaltaan 7.15–15 cm. Ne 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 nuohoinputkessa 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)

Nuohoimen päässä olevat suuttimet ovat suppeneva-laajeneva tyyppisiä Laval-suuttimia. Suuttimen avulla höyry saadaan purkautumaan suuttimesta ylääänin nopeudella. Alisoonisella nopeudella virtaava höyry saadaan kiihtymään äänen nopeuteen paisuttamalla sitä suppenevassa suuttimessa. Kun painesuhde suuttimen yli on riittävän suuri, 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 (A) pinta-ala.



Kuva 13. Laval -suuttimen perusmuoto.

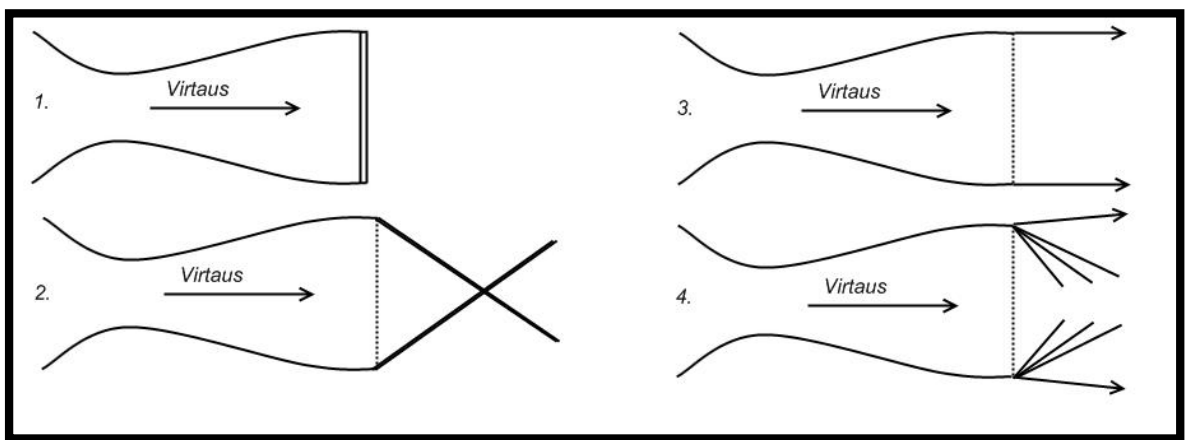
Höyryn nopeuden kannalta ratkaisevaa on suuttimen kurkun ja suun pinta-alojen sekä paineiden suhde. Määritetyn virtausnopeuden (Machin luvun) saavuttamiseksi tarvittava paine-ero voidaan ratkaista seuraavalla yhtälöllä.

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

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

Höyry 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. Painesuhde ei kuitenkaan ole riittävän suuri, jotta virtaus kehittyisi ylisooniseksi suuttimen laajenevassa osassa. Suuttimen laajenevaan osaan muodostuu kohtisuora tiivistysisku, jossa kaasun paine kasvaa äkillisesti ja virtausnopeus tippuu jälleen alisooniseksi. Kun painesuhdetta edelleen kasvatetaan siirtyy tiivistysaalto lähemmäksi suuttimen päätä ja lopulta sen ”yli”. Kuvassa 14 on esitetty tiivistys- ja paisunta-aaltojen muodostuminen suuttimessa. Ensimmäisessä kohdassa on kuvattu tapaus, jossa kohtisuora tiivistysaalto muodostuu aivan suuttimen päähän. Kun painesuhdetta kasvatetaan edelleen, syntyy suuttimen päässä vinoja tiivistysaaltoja (kuvan 14 kohta 2).

Painesuhdetta edelleen kasvatettaessa löydetään kuvan kolmannen kohdan mukainen tila, jossa kaasu virtaa suuttimesta puhtaasti ilman tiivistysaaltoja. Mikäli painesuhdetta edelleen kasvatetaan, muodostuu suuttimen päähän vinoja paisunta-aaltoja. Tapauksen mukainen ”alipaisuminen” on kuvattu kuvan neljännessä kohdassa. Kaasu voi saavuttaa suuttimen kurkussa maksimissaan äänennopeuden. Tämän vuoksi suutin ”tukkeutuu” painesuhteen ylittäessä kriittisen arvon, eikä virtauksen massavirta enää kasva. (Backman et al. 2006, 38–43)

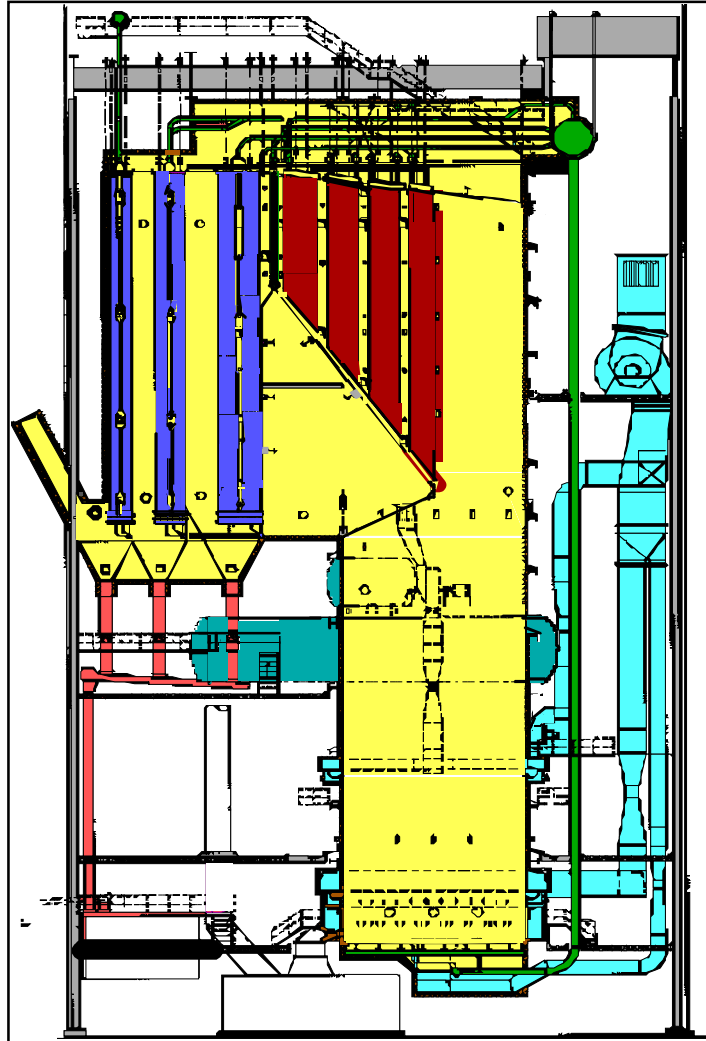


Kuva 14. Tiivistys- ja paisunta-aaltojen muodostuminen Laval-suuttimessa.

2.7.4 Kattilan vesi-höyrykierto

Monissa teollisuuden höyrykattiloissa käytetään jokseenkin samanlaista vesi-höyrykiertoa polttoaineesta riippumatta. Kattilan syöttövesisäiliöstä pumpattavaa vettä esilämmitetään savukaasuilla ekonomaiserissa. Ekonomaiserista vesi pumpataan lieriöön, josta se virtaa kattilan alaosaan tulipesän seinät muodostaviin höyrystin putkiin. Kuvassa 15 esitetyssä soodakattilan periaatepiirroksessa lieriö ja laskuputki on kuvattu vihreällä. 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 pakkokiertokattilaa, jossa vesi 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. Kuvassa 15 tulistimia on kuvattu punaisella. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B255–264)



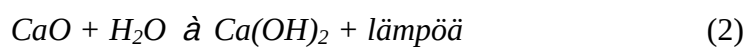
Kuva 15. Soodakattilan periaatepiirros. (Vakkilainen 2007, 53)

2.7.5 Kaustisointi

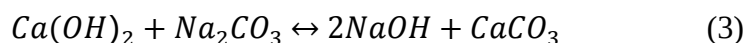
Kaustisointilaitos mahdollistaa sellutehtaan jatkuvan toiminnan ilman suurta kemikaalien korvaustarvetta. Kaustisoinnin päätehtävä on tuottaa riittävästi valkolipeää keiton

tarpeisiin. Kaustisoinnin yhteydessä toimivalla meesauunilla meesasta voidaan valmistaa kaustisoinnissa tarvittavaa poltettua kalkkia.

Kaustisoinnin ensimmäisessä vaiheessa soodakattilalta tulevaa viherlipeä selkeytetään ja siitä poistetaan sakkaa. Meesauunilta saatava poltetu 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 seuraavassa yhtälössä.



Syntynyt kalsiumhydroksidi reagoi edelleen viherlipeän natriumkarbonaatin (Na_2CO_3) kanssa muodostaen natriumhydroksidia (NaOH) sekä 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. Seuraavassa yhtälössä on esitetty kaustisointireaktio.



Kaustisoinnista tuleva valkolipeä sisältää kaikki keitossa tarvittavat kemikaalit. Reaktiossa syntynyt meesa (CaCO_3) erotetaan valkolipeästä. Meesaa pestään toisiolauhteilla tai vedellä. Pesusta saatavaa suodosta (heikkovalkolipeää) sekoitetaan soodakattilalta saatavaan sulaan viherlipeän muodostamiseksi. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B135–142)

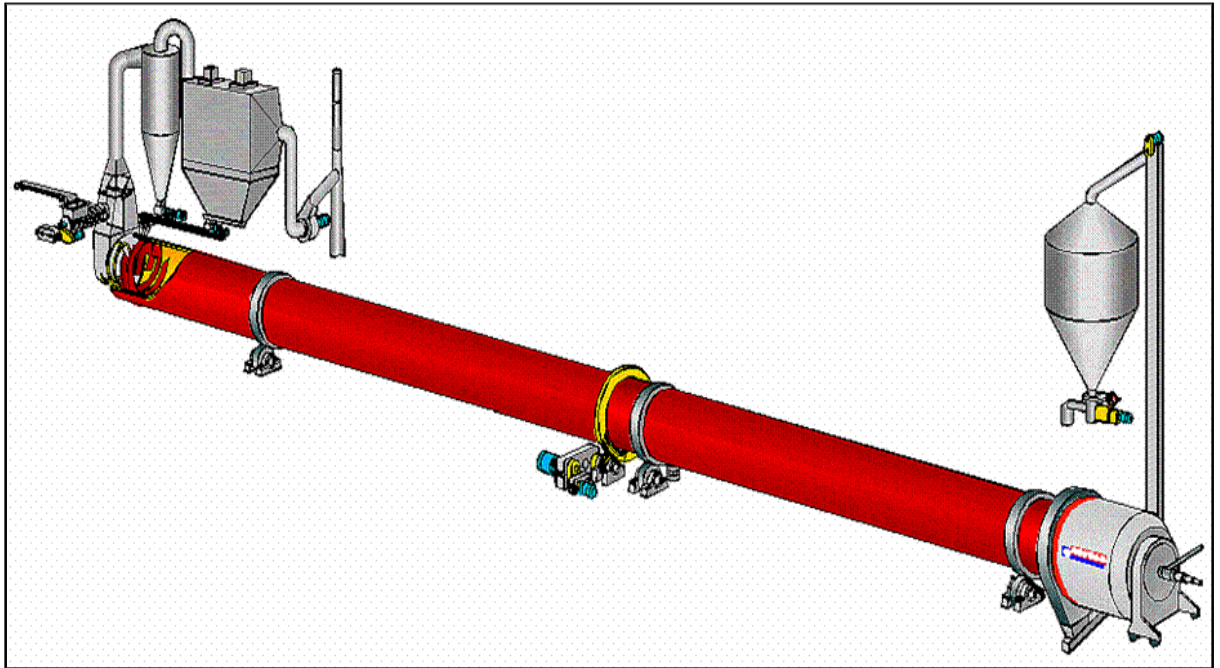
2.7.6 Meesauuni

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 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, keskustelu 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 jäähdystimeen, jossa sen sisältämää lämpöä siirretään palamisilmaan. Meesauunin polttoaineena käytetään yleensä maakaasua tai polttoöljyä. Kuvassa 16 on esitetty yleiskuvaus meesauunista.



Kuva 16. Meesauunin yleiskuva. (Vakkilainen 2007, 90)

2.8 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 kehittymisen myötä.

Kuori kuljetetaan mekaanisesti polttoainesiilosta pudotusputkille, joista ne putoavat tasaisesti pedin päälle. Kattilan tulipesässä olevaa hiekkapetiä leijutetaan primääri-ilmalla. Kuplapetikattilassa hiekan leijutusnopeus on niin alhainen, että 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. Polttoaineen ja petimateriaalin kiertoa tulipesässä ja syklonissa on kuvattu kuvassa 17 esitetyssä kiertoleijupetikattilan poikkileikkauskuvassa. Polttoaine voidaan syöttää kattilaan myös tulipesään palaavan hiekan mukana. (Kivistö 2010, 8) Polttoaineen palaminen tapahtuu tulipesässä petimateriaalin joukkossa. Pedin suuren lämpökapasiteetin

2.9 Höyryturbiini

Höyryturbiinissa höyryn lämpö- ja paine-energia muutetaan turbiinin akselilla pyöriväksi mekaaniseksi energiaksi. Höyryturbiinityypit jaetaan aksiaali- ja radiaaliturbiineihin. Nimensä mukaisesti höyry virtaa aksiaaliturbiinissa akselin suuntaisesti ja radiaaliturbiinissa 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. Valmistettavien turbiinien tehot vaihtelevat 0,5–600 000 kW. (Huhtinen et al. 2008, 109)

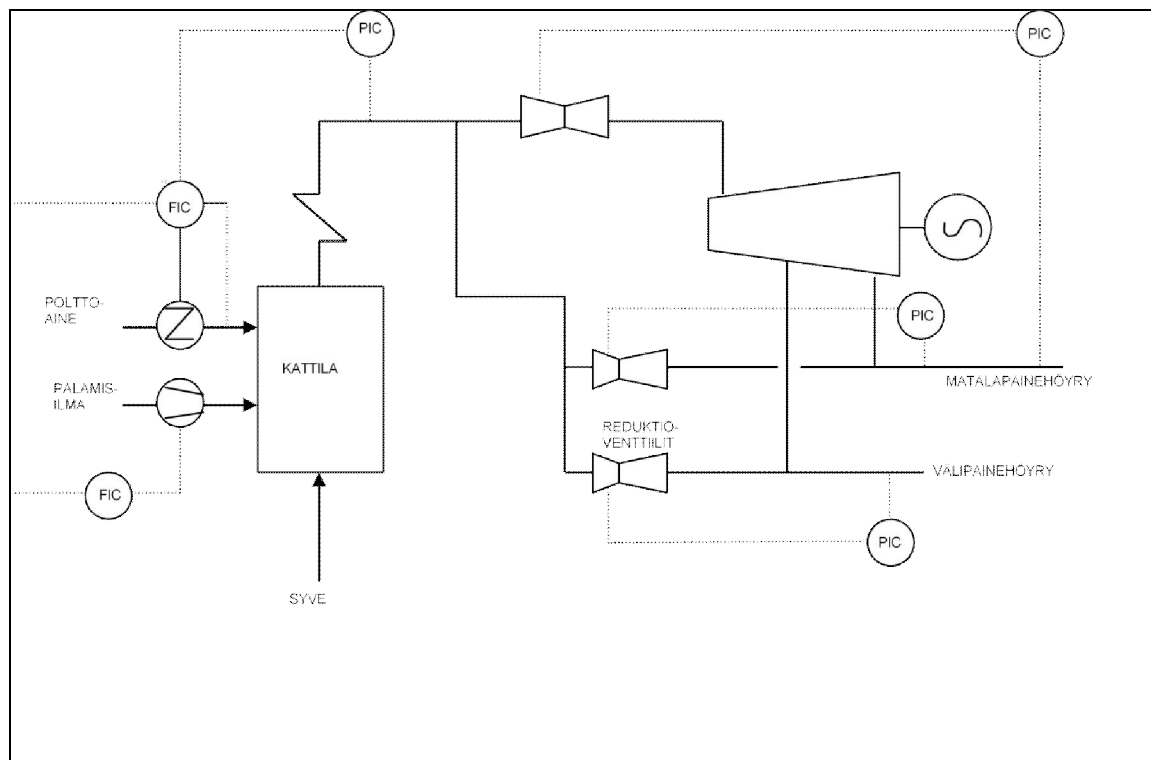
Sellutehtaiden tarvitsema energia tuotetaan vastapainevoimalaitoksissa lämmön ja sähkön yhteistuotantona. Tehtaalla käytetään yleensä vastapaineturbiinia, jossa kattilan tuorehöyry paisutetaan tehtaan matalapainetasoon. Tehtaalla tarvittavat väli- ja korkeapainehöyry saadaan turbiinin välitoista. (Huhtinen et al. 2008, 63–75) Tehtaan prosesseilta yli jäävä höyry voidaan paisuttaa loppuun turbiinin jälkeisessä lauhdeperässä tai hyödyntää lämmöntuotantoon kaukolämpöperässä.

Laitoksen rakennusaste kuvaa sähkön tuotannon suhdetta prosessilämmön kulutukseen. Metsäteollisuudessa käytettävien vastapainevoimalaitosten rakennusasteet ovat verrattain alhaisia 0,15–0,5. (Kivistö 2010, 9)

2.10 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. Säätötapa reagoi nopeasti höyryn paineen muutoksiin. Tuorehöyrynpaineen säätäminen polttoainevirtaa säätämällä on huomattavasti

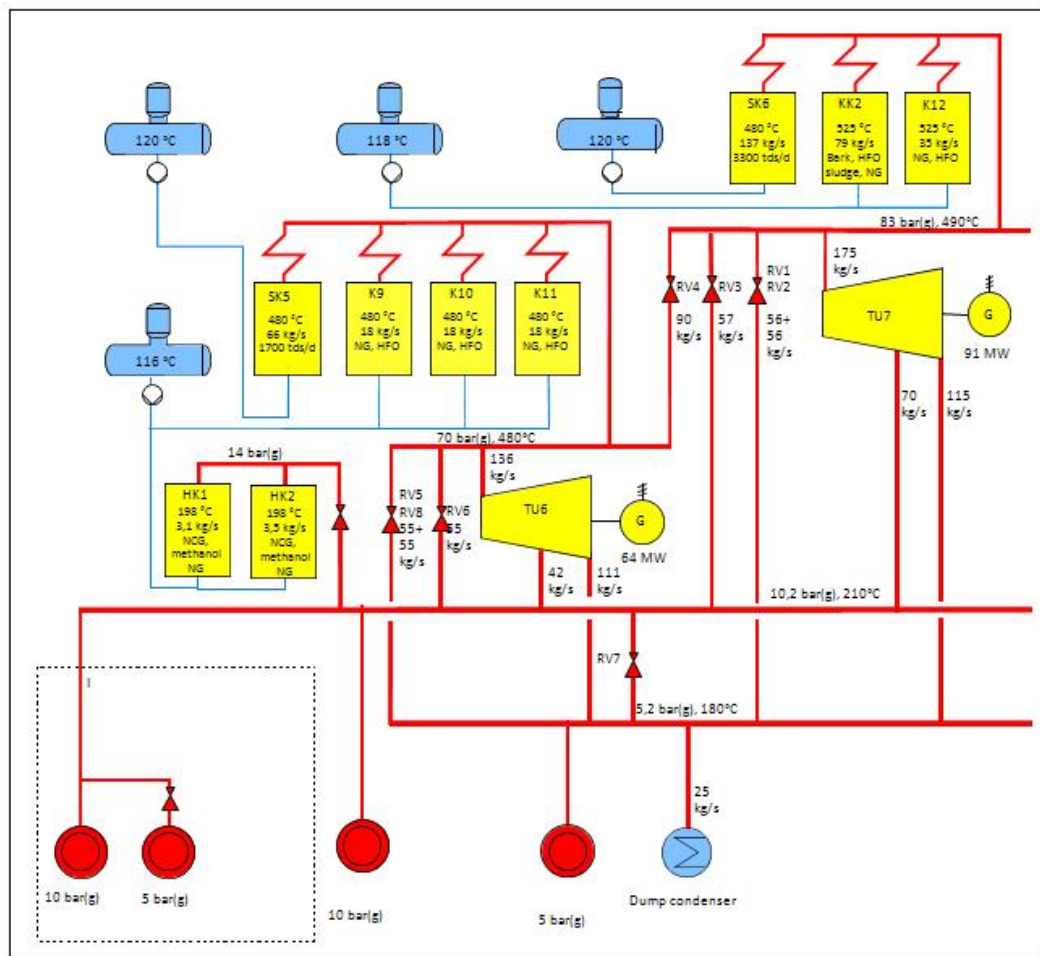
hitaampaa. Polttoainevirran säätäminen vaikuttaa myös syötettävän palamisilman määrään. Mikäli turbiinia ei käytetä, voidaan matala- ja välipainehöyry ottaa reduktioventtiilin kautta suoraan tuorehöyryputkesta. Kuvassa 18 on esitetty höyrynpaineen säätöön käytettävien höyrynpaineen, sekä palamisilman ja polttoaineen virtausmittareiden käyttöperiaate. Kuvan periaatekytkennän mukaan prosessihöyryn painetta säädetään turbiinin säätöventtiilillä. Lisäksi palamisilma- ja polttoainesäätimet seuraavat tuorehöyryn painemittaria. Käytännön toteutus voi kuitenkin olla huomattavasti monimutkaisempi. (Huhtinen et al. 2008, 154–158)



Kuva 18. CHP-laitoksen höyrynpaineen säätö.

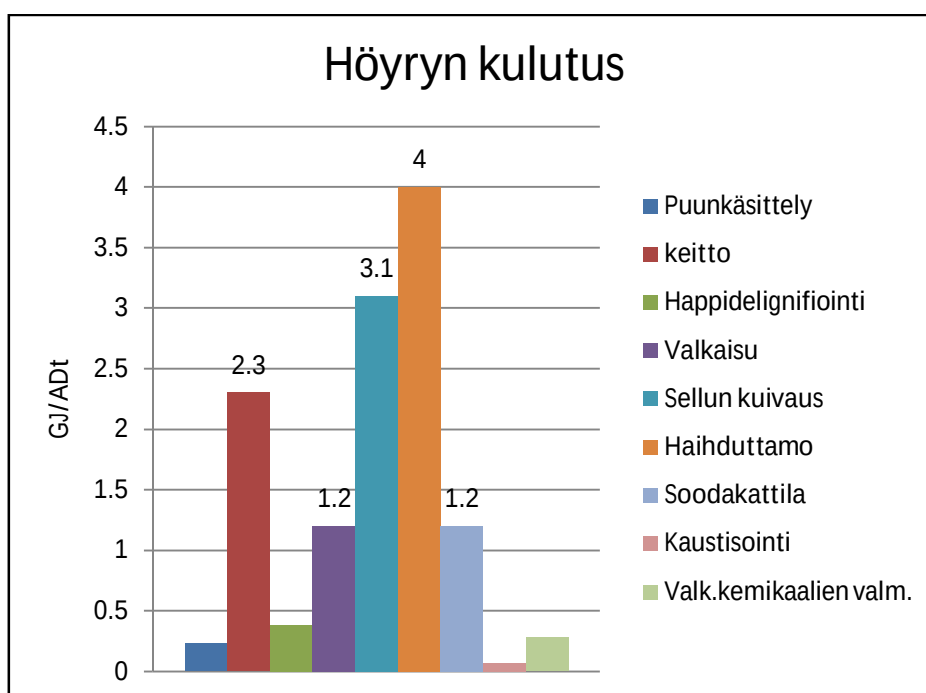
3 HÖYRYN KULUTTAJAT

Sellutehtaat kuluttavat lämpöenergiaa pääasiassa korkea-, väli-, ja matalapainehöyrynä sekä lämpimänä vetenä. Höyryä käytetään prosessien lämmittämiseen ja paineistamiseen. Nykyaikaisen sellutehtaan lämmönkulutus on noin 12–15 GJ/ADt. (Kivistö 2010, 1–3) Joissakin tapauksissa höyryn tuotantoon osallistuu useampi kattila ja höyryturbiini, jolloin käytössä voi olla useampia tuorehöyryn painetasoja. Kuvassa 19 on esitetty yleiskuva sellutehtaan höyryverkosta. Sooda- ja kuorikattilan lisäksi höyryntuotantoon voi osallistua esimerkiksi maakaasu- tai raskas polttoöljykäyttöisiä apukattiloita ja hajukaasukattila. Kuvasta voidaan todeta sellutehtaan monipuoliset höyryntuottomahdollisuudet sekä kyky reagoida höyryverkon kuormituksen vaihteluihin ja laitteiden vikaantumisiin tehokkaasti.



Kuva 19. Sellutehtaan höyryverkko.

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



Kuva 20. Sellutehtaan höyrynkulutuksen keskiarvot.

3.1 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 määrittää osaltaan myös uusien tehtaiden vastapainetason. 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)

3.2 Sellun kuivuri

Sellun kuivuri 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 puristinsosan 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)

3.3 Keitin

Sellutehtaan suurin välipainehöyryn kuluttaja on sellunkeitin. Tämän vuoksi sen lämmönkulutuksella on suuri vaikutus tehtaan sähköntuotantoon. 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. Keiton lämpötila ja keittoaika valitaan sellun raaka-aineena käytettävän puulajin mukaan 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 tyypillä ei ole niinkään suurta vaikutusta höyrynkulutuksen määrään. (Nieminen 2007, 45–47) Modifioidun eräkeiton kehittyminen 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. 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)

		Syrjäytysräkeitto	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 ja vuokeitossa epäsuorasti. Käytettäessä suoraa höyrylämmitystä höyryn lauhteita ei saada talteen. Keitossa kiertävää mustalipeää lämmitetään välipainehöyryllä. Höyryn kulutus on kuitenkin minimaalista, koska tarvittava lämpötilan nousu keittolämpötilaan on yleensä vain 10–15 °C. Vuokeitto on eräkeittoa energiatehokkaampi prosessi. (Gullichsen, Fogelholm 1999, A493–541) Keittimen pesuvaihe kuluttaa pääasiassa sähköä. Pesuvaiheen sähkönkulutus on noin 20–30 kWh/ADt.

3.4 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 nousu sekä vaiheiden välisten lämpötilaerojen kasvu valkaisuprosessissa on lisännyt valkaisuvaiheen energian kulutusta. (Kivistö 2008, 11) Lisäksi muun muassa happivalkaisu 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)

3.5 Soodakattila

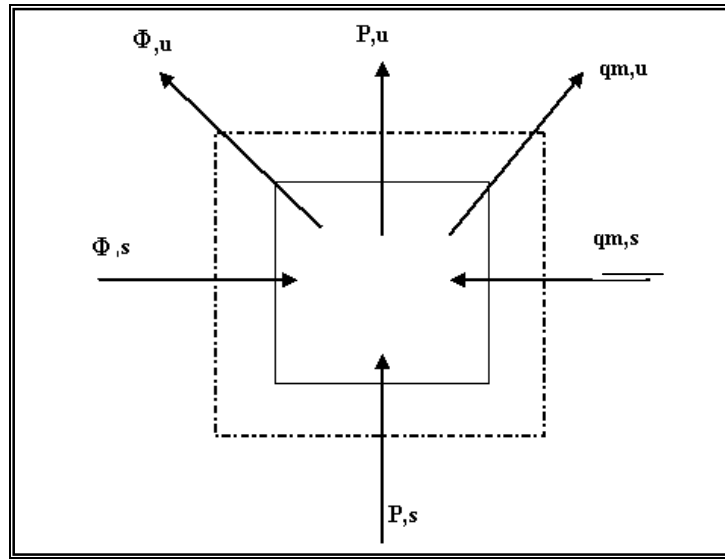
Soodakattila kuluttaa höyryä nuohoimissa, palamisilman ja syöttöveden höyryesilämmittimissä sekä lipeän esilämmitykseen. (Kivistö 2008, 24) Pieni määrä höyryä käytetään myös sulan hajottamiseen. Palamisilma lämmitetään ensin matalapainehöyryllä 110–120 °C:een ja välipainehöyryllä lopulliseen 150 °C:een. Kattilan nuohoimet käyttävät noin 2,5–4 % kattilan tuottamasta tuorehöyrystä. (Nieminen 2007, 58) Nykyaikaisissa soodakattiloissa palamisilman esilämmitykseen voidaan käyttää jopa 4 eri höyrynpainetasoa. (Vakkilainen, keskustelu 19.08.2010) Kattilan nuohoushöyry otetaan vanhemmissa kattiloissa korkeapainehöyrynä tulistinvaiheiden välisestä putkesta reduktioventtiilin kautta, mutta uudemmissa kattiloissa käytetään turbiinin väliotosta saatavaa matalampi paineista höyryä. (Vakkilainen, keskustelu 14.07.2010) Soodakattilan lämmönkulutus riippuu sen koosta ja tyypistä. Modernin soodakattilan lämmönkulutus on noin 0,9–1,6 GJ/ADt. (Nieminen 2007, 59)

4 LASKENTA

Seuraavissa kappaleissa on esitetty työssä tehtyjen laskentojen teoria. Kappaleessa on pyritty kuvaamaan työssä käytetyt laskentatavat ja menetelmät. Työn energiataselaskelmat toteutettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston tekemällä Millflow v. 1.15-laskentasovelluksella. Taseiden laskentaan ei ollut käytettävissä mittaustuloksia, joten laskennan lähtöarvoiksi valittiin kokemusperäiset tyypilliseen suomalaiseen sellutehtaaseen sopivat arvot. Mittaustulosten puuttuminen vaikuttaa merkittävästi muun muassa häviöenergiavirtojen arvioimiseen. Muodostetut energiataseet ovat yleislaskelmia, joiden soveltaminen käytäntöön vaatii mittausten ja tarkempien laskelmien tekemistä. Taseiden avulla määritettiin tehdastyyppien höyryn painetasojen mukaiset vuotuiset energiankulutukset, energiantuotto ja painetasojen muutosten investointiarviot. Investointiarviot muodostettiin putkiston, haihduttamon ja kuivauskoneen osalta. Vuotuisten sähkön myyntitulojen ja investointiarvioiden avulla tehdastyypeille määritettiin optimaaliset matalapainehöyryn painetasot.

4.1 Taselaskenta

Taselaskennalla 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 energiavirtojen määriä ei voida koskaan määrittää täydellisesti, muodostettu energiatase ei vastaa täysin todellisuutta. Tämän vuoksi taselaskennan arvoina käytetään usein arvioita ja tyypillisiä kokemusperäisiä arvoja. Taseiden laskennassa tulee huomioida kaikki taserajan ylittävät massa- ja energiavirrat. Kuvassa 21 on esitetty peruskuvaa taseelle, jossa taserajan ylittää lämpö- ja sähkötehoa sekä ainemassavirta.



Kuva 21. Energia- ja massatase

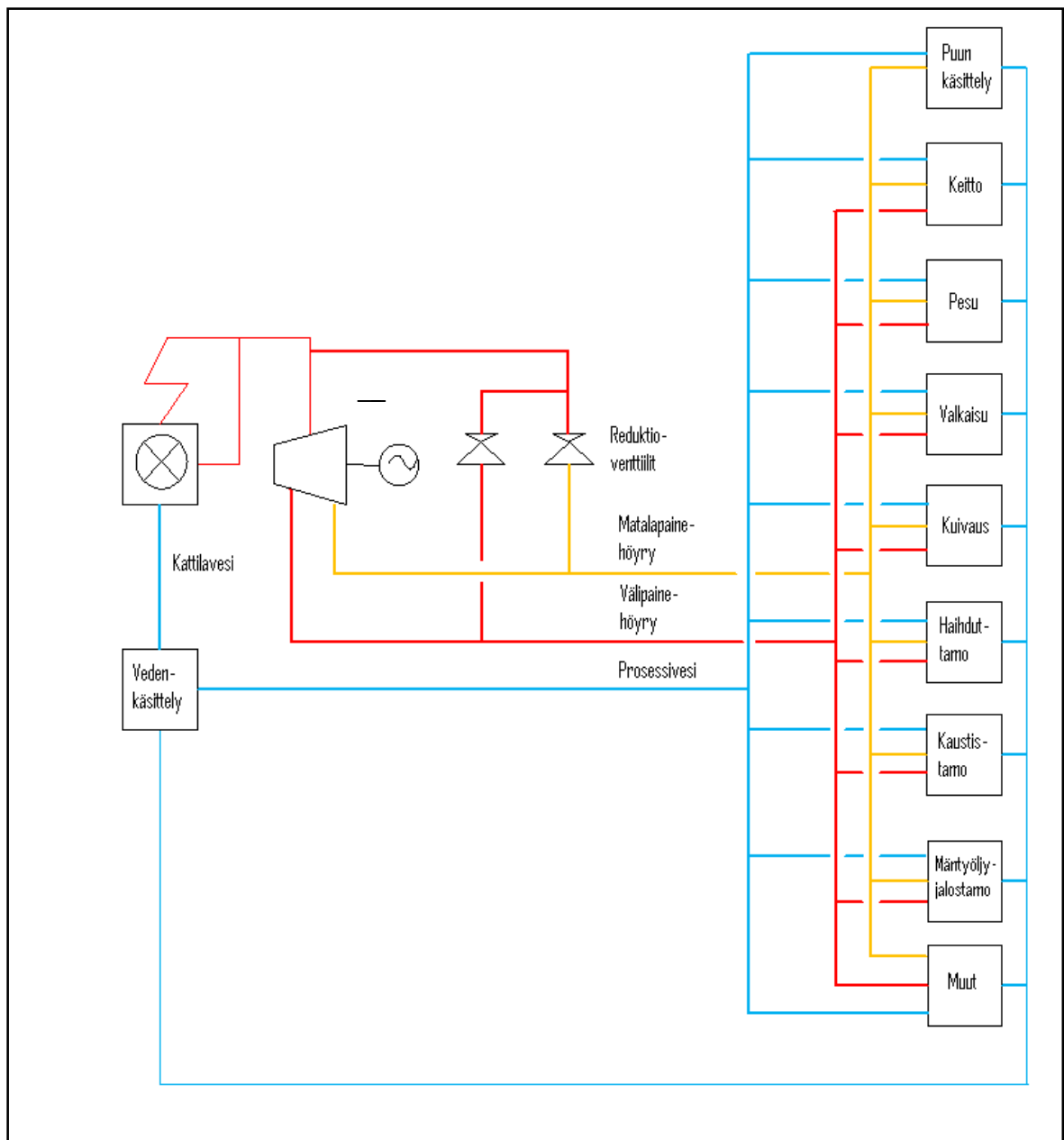
Koska taseeseen ei varastoidu energiaa eikä massaa, tulevien ja lähtevien virtojen summat ovat yhtä suuret. Tällöin taseen energiayhtälöksi voidaan kirjoittaa:

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

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.

4.2 Putkiston halkaisijan määrittäminen

Höyryn paineen valinnalla on merkittävä vaikutus sellutehtaan investointeihin. Varsinkin matalapainetasoa alennettaessa höyryn massavirta lisääntyy merkittävästi höyryn ominaistilavuuden kasvaessa ja energiasisällön pienentyessä. Tämä lisää tehtaan investointikustannuksia putkikokojen ja lämmönsiirtopinta-alojen kasvaessa. Välipainetason muuttumisesta johtuvat muutokset putkistoinvestoinneissa ovat tehdasmittakaavassa suhteellisen pieniä, koska putkikoot ovat pieniä ja muuttuvat vain vähän. Välipaineen muuttaminen vaikuttaa kuitenkin jonkin verran valkaisun, haihduttamon ja kuivauskoneen laitteistoinvestointeihin. Tässä työssä ei ole tarkasteltu välipaineen muutosten vaikutusta tehtaan investointikustannuksiin. Investointikustannuksia arvioitaessa materiaalikustannukset valittiin niin suuriksi, että niiden oletettiin kattavan myös putkiston rakentamisen työn osuus.

Sellutehtaalla käytetään jokseenkin saman kokoista välipainehöyryverkkoa koko tehtaan alueella. Matalapainehöyryputkiston koko puolestaan vaihtelee osastoittain. (Esa Vakkilainen, keskustelu 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 kasvaessa. Liian pieneksi mitoitettu siirtoputkisto lisää virtaushäviöitä ja kulutuskohteella käytettävän höyryn teho pienenee. Putkisto ei myöskään tällöin pysty vastaamaan laitoksen kapasiteetin vaihteluihin. (Pipe and pipe sizing 2010) Putkiston investointikustannuksia arvioitiin tässä työssä siirtoputkistojen osalta.

Höyryputkisto voidaan mitoittaa höyryn virtausnopeuteen tai putkiston painehäviöön perustuen. Mitoituksen apuna voidaan käyttää virtausnopeuteen tai painehäviöön perustuvia putkiston mitoitusaulukoita ja kuvaajia, joiden avulla putkikoko voidaan valita standardikokoisista putkista. Liian suuren painehäviön ja kulumisen välttämiseksi höyryn virtausnopeudet tulisi olla:

- Kylläiselle höyrylle 25–30 m/s
- Tulistetulle höyrylle:
 - 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 prosessihöyryn paine valitaan tehtaan prosessien tarpeiden mukaisesti. Putkistoa suunniteltaessa tiedetään yleensä kulutuskohteilla tarvittavan höyryn massavirta, paine ja lämpötila. (Huhtinen 2008, 86) Myös höyryn lämpötila on otettava huomioon valittaessa putkiston materiaalia. Suomalaisilla sellutehtailla välipainehöyryn lämpötila vaihtelee 194–295 °C välillä. Taulukossa 2 on esitetty höyryn massavirran ja paineen mukaisia putkistolle sopivia halkaisijoita.

Taulukko 2. Putkikoon valintataulukko höyrylle. (Lähdettä mukaillen: Huhtinen et al. 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	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 seuraavalla yhtälöllä.

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

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 putkiston mutkat, supistajat ja venttiilit. Putken kokonaispainehäviö voidaan laskea seuraavasti.

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

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.

4.3 Putken seinämävahvuuden laskeminen

Putken seinämävahvuus on standardikokoisissa putkissa yleensä riittävän suuri. Putket ja putkisillat tulee kuitenkin mitoittaa siten, että putkisto voidaan tarvittaessa täyttää kokonaan vedellä. (Esa Vakkilainen, keskustelu 28.07.2010) Koska putkiston materiaalikustannuksilla on suuri vaikutus putkikoon valintaan, tarpeettoman paksu seinämäisten putkien käyttöä vältetään. Välipaineputkiston käyttöpaine ei yleensä vaikuta putkiston seinämän vahvuuteen vaan putki valitaan standardikokoisista putkista, kuten esimerkiksi NP10 tai NP16. Putken minimi seinämänpaksuus (s_o) voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä.

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

missä	s_o	teoreettinen seinämänvahvuus [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 seuraavasti.

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

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

4.4 Putkiston investointikustannukset

Höyryn massavirran ja höyryn tilanarvojen avulla voidaan ratkaista putkiston koko aiemmin esitetyllä tavalla. Putkiston investointikustannus lasketaan putkiston painon ja materiaalin kilohinnan mukaan. Putkiston massa voidaan laskea halkaisijan ja seinämän vahvuuden, sekä putkimateriaalin tiheyden avulla seuraavasti:

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

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

4.5 Haihduttamon investointikustannukset

Tässä työssä haihduttamon investointeja arvioidaan haihdutuspinta-alaan perustuen. Tämän vuoksi investointien laskemiseksi on määritettävä haihdutinyksikköjen lämmönsiirtopintojen alat. Pinta-alan avulla voidaan haihduttamoinvestoinnin suuruutta aiemmin rakennettujen haihduttamojen investointikustannusten perusteella. Kustannusarviosta saadaan luotettavampi käyttämällä tietoa jo rakennettujen haihduttamojen kustannuksista.

Lämmönsiirtopinta-alojen määrittämiseen käytetään haihduttamon tehollista lämpötilaeroa haihdutinyksikköä kohden ja rakennetun haihduttamon tunnettua lämmönsiirtopinta-alaa. Haihduttamon tehollinen lämpötilaero voidaan laskea seuraavasti:

$$\Delta T_{teh} = (T_h - T_l) - \sum \Delta T_{kp} - \sum \Delta T_p \quad (11)$$

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	painehäviöstä johtuva lämpötilaerohäviö [°C]

Yhtälössä 11 oleva kiehumapisteen nousu voidaan laskea seuraavalla Gullichsenin ja Fogelholmin (1999, B20) esittämällä yhtälöllä.

$$\Delta T_{kp} = 6.173X - 7.48X(X)^{0.5} + 32.747X^2 \quad (12)$$

missä	X	kuiva-aine pitoisuus [kg _{kuiva-ainetta} / kg _{vettä}]
-------	-----	---

Tässä työssä painetason mukainen haihduttamon tarvitsema lämmönsiirtopinta-ala (A_h) määritetään rakennetun haihduttamon tehollisen lämpötilaeron ($\Delta T_{teh,tun}$) ja määritettävän haihduttamon tehollisen lämpötilaeron ($\Delta T_{teh,h}$) suhteen sekä käytössä olevan haihduttamon lämmönsiirtopinta-alan avulla. Lämmönsiirtopinta-alan ja haihdutinyksikön tehollisen lämpötilaeron oletetaan muuttuvan samassa suhteessa. Lämmönsiirtopinta-ala saadaan ratkaistua annetuin ehdoin seuraavasta yhtälöstä.

$$\frac{A_h}{A_{tun}} = \frac{\Delta T_{teh,tun}}{\Delta T_{teh,h}} \quad (13)$$

missä	A_h	haihduttamon lämmönsiirtopinta-ala [m ²]
	A_{tun}	tunnettu haihduttamon lämmönsiirtopinta-ala [m ²]
	$\Delta T_{teh,tun}$	tunnettu haihduttamon tehollinen lämpötilaero yksikköä kohti [°C]
	$\Delta T_{teh,h}$	tehollinen lämpötilaero yksikköä kohden [°C]

Haihduttamon investoinnin määrittämiseen käytetään kokemuseräistä haihdutuspinta-alan perustuvaa neliöhintaa. Haihduttamon hinta ei kuitenkaan muutu täysin samassa suhteessa pinta-alan muutoksen kanssa, joten investointia on korjattava kertoimella. Korjauskerroin voidaan määrittää seuraavan yhtälön avulla. Yhtälössä käytettävä potenssi on tapauskohtainen ja voidaan valita kirjallisuuden perusteella.

$$K_k = \left(\frac{A_h}{A_{tun}} \right)^{0.7} \quad (14)$$

missä	K_k	Investoinnin korjauskerroin [-]
-------	-------	---------------------------------

Kun tiedetään kokemuseräinen haihduttamon investointikustannus tietyllä haihdutuspinta-alalla, uuden haihduttamon kustannusarvio voidaan laskea, edellä laskettujen arvojen avulla, seuraavan yhtälön mukaisesti.

$$I_h = K_k * mk_h * A_h \quad (15)$$

missä	I_h	haihduttamon investointikustannus [€]
	mk_h	tunnettu materiaalikustannus [€/m ²]

4.6 Kuivauskoneen investointikustannukset

Haihduttamon tapaan myös kuivauskoneen investoinnin arvioimiseen käytettiin kokemusperäistä kuivauskoneen neliöhintaa. Kuivauskoneen investoinnin suuruus määritettiin viimeaikaisten uusimisprojektien mukaan ja arvioidaan telaston osuus koko kuivauskoneen investoinnista. Telaston pinta-alan oletettiin muuttuvan samassa suhteessa haihdutuskapasiteetin kanssa. Näin ollen höyryn paineen mukaisen haihdutuskapasiteetin muutoksen avulla määritettiin telaston pinta-alan muutos. Koska telaston pinta-ala ja investointikustannus eivät muutu täysin samassa suhteessa, investointia korjataan kertoimella. Kerroin laskettiin kuivauskoneen arvojen mukaisesti aiemmin esitetyllä yhtälöllä 14. Kuivauskoneen investointi lasketaan kuivauskoneen arvojen mukaisesti yhtälöllä 15.

4.7 Vuosittaisten kokonaisinvestointien laskeminen

Aiemmin esitettyjen yhtälöiden avulla voidaan määrittää laitoksen kokonaisinvestoinnit kullekin painetasolle. Tehtaan tuottojen ja kulujen oletetaan pysyvän saman suuruusina jokaisena tarkasteluvuotena. Tämän vuoksi investointien vuosittainen takaisinmaksuerä lasketaan annuiteettimenetelmällä. Investointien vuosittainen maksuerä voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä.

$$A_0 = \frac{I_a}{c_{a,i}} \quad (16)$$

missä	A_0	vuosittainen maksuerä [€]
	I_a	investointi [€]
	$c_{n,i}$	annuiteetti tekijä [-]

Yhtälössä 16 oleva annuiteettitekijä määrittää vuosittaisen lyhennyksen nykyarvon ennalta määritettynä pitoaikana. Annuiteettitekijä voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä.

$$c_{n,i} = \frac{i \cdot (1+i)^a}{(1+i)^a - 1} \quad (17)$$

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

4.8 Turbiinin tehon laskeminen

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

$$P = \eta * q_m * (h_1 - h_2) \quad (18)$$

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 turbiinivaiheissa voidaan määrittää höyryn paineen ja lämpötilan funktiona taulukoista. Turbiiniväliliottojen paineet valitaan prosessin höyryntarpeen mukaan. Höyryn lämpötila vaiheen lopussa voidaan laskea seuraavan yhtälön avulla.

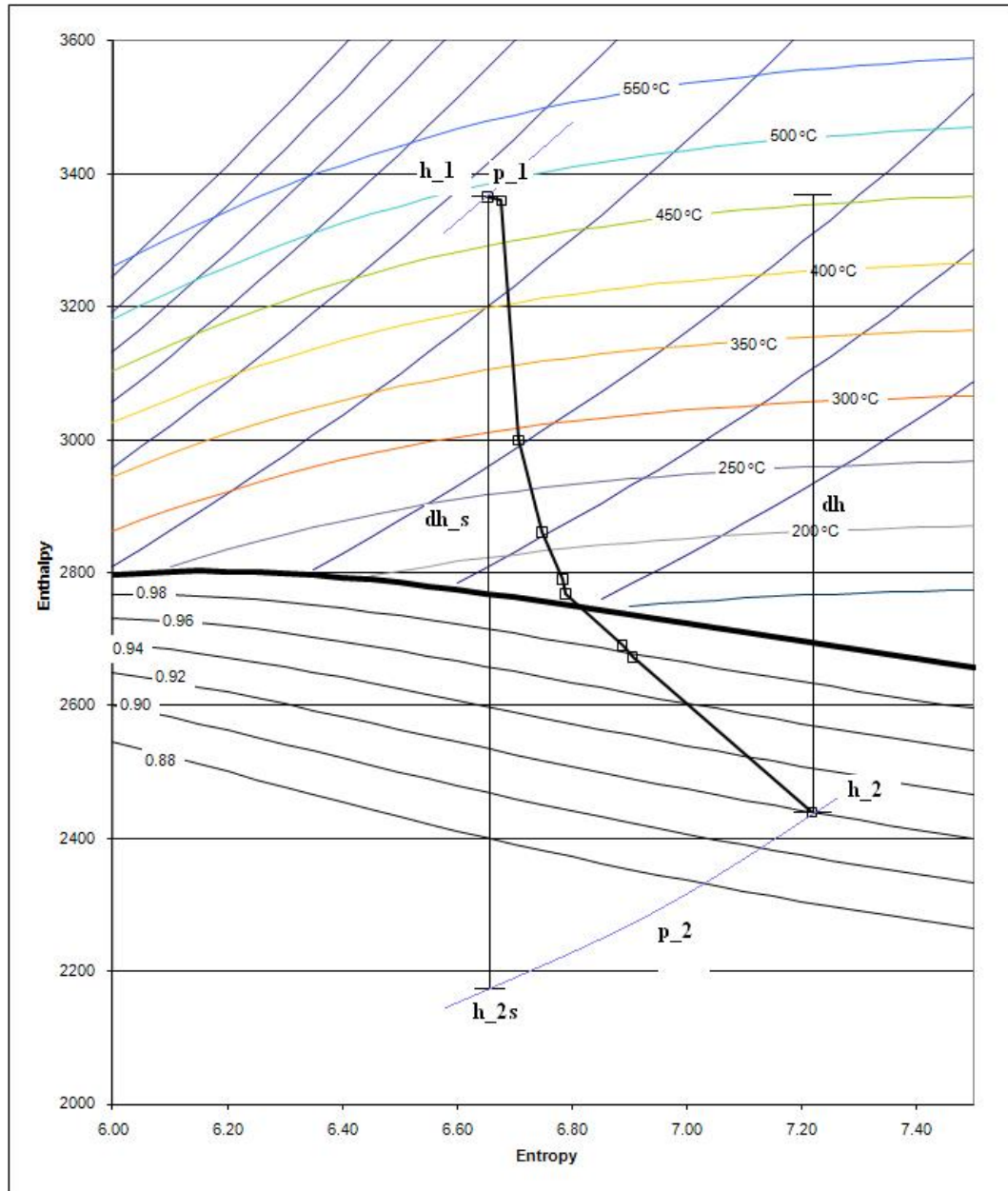
$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}^{\frac{R' \cdot \eta_{pt}}{c_p}} \quad (19)$$

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 väli dh_s kuvaa höyryn entalpian muutosta sen paisuessa isentrooppisesti paineesta 1 paineeseen 2. Turbiinin hyötysuhde (η) voidaan laskea todellisen ja isentrooppisen paisunnan entalpian muutosten avulla seuraavalla yhtälöllä.

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (20)$$

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



Kuva 23. Turbiinin paisuntakäyrä.

Turbiinivaiheiden lämpötilojen ratkaisussa käytetään kokemusperäisiä turbiinin isentrooppisia hyötysuhteita. Tyypillisiä höyryturbiinin isentrooppisia hyötysuhteita on esitetty taulukossa 3. Turbiinin isentrooppinen hyötysuhde on kuitenkin tapauskohtainen ja vaihtelee jonkin verran turbiinityyppien ja valmistajien kesken.

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

	η_s	Turbiinivaihe
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 energiantuotanto 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 seuraavasti.

$$\alpha = \frac{P_e}{Q_{pr}} \quad (21)$$

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

5 TAPAUSTEN LASKENTA-ARVOT

Höyryn painetasojen muuttumisen vaikutusta sellutehtaiden energiankulutukseen ja -tuotantoon tarkasteltiin muodostamalla esimerkkitapaukset Suomeen sopivista sellutehdastyypeistä. Esimerkkitapauksille laskettiin energiataseet, joiden avulla määritettiin painetasojen muutosten vaikutus vuotuisiin sähkön myyntituloihin ja menoihin. Energiataseissa laskettiin 600 000 tonnia sellua vuodessa tuottavien sellutehtaiden sähkön- ja lämmöntuotanto ja -kulutus eri prosesseissa. Taselaskenta suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston Millflow-laskentasovelluksella. Lisäksi tehdastyypeille laskettiin matalapainetasojen mukaiset investointiarviot. Taseet laskettiin seuraaville tehdastyypeille.

- 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

Taselaskennan ja investointiarvioiden avulla määritettiin tehdastyypin taloudellisesti optimaaliset matalapainehöyryn paineet. Lisäksi laskennalla tarkasteltiin välipaine- ja nuohoushöyryn paineiden alentamisen vaikutuksia laskentatapausten energian tuotantoon ja vuotuisiin sähkön myyntituloihin. Taselaskennalla tutkittiin myös tapauksia, joissa osa prosessien tarvitsemasta matala- tai välipainehöyrystä korvataan matalampi paineisella höyryllä. Laskennalla pyrittiin selvittämään onko rinnakkaisen matala- tai välipaineputkiston rakentaminen ja käyttö taloudellisesti kannattavaa.

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

Laskettaessa hienopaperikone-sellutehdasintegraatin energiataseita oletettiin ettei sellua 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 $5400 \text{ MJ/t}_{\text{pap}}$ lisälämmön kulutuksen ja $650 \text{ kWh/t}_{\text{pap}}$ lisäsähkön kulutuksen. Hienopaperikoneen aiheuttama lisälämmön ja -sähkön kulutus sisältää myös paperimassan kuivaukseen tarvittavan energian. Lisäksi hienopaperikoneen arvioitiin aiheuttavan 20% lisäyksen jätevedenpuhdistamon sähkönkulutuksessa.

Seuraavissa kappaleissa on esitetty laskennassa käytetyt lähtöarvot ja laskentaperiaatteet.

5.1 Höyryn painearvot energiataseiden laskennassa

Jokaiselle tehdastyypille muodostettiin perustase, ja tutkittiin höyrynpaineen muutosten vaikutusta tehtaan energiataseeseen. Laskenta suoritettiin muuttamalla tarkasteltavan höyrytason painetta turbiinin väliotossa ja höyryn kuluttajilla muiden väliottohöyryjen arvojen pysyessä vakioina. Näin pyrittiin selvittämään käytettävien höyryn painetasojen vaikutus tehtaan energiataseeseen ja sähkön tuotantoon. Jokaisen tehdastyypin taseita tarkasteltiin 4 eri matala- ja välipainetasolla. Höyryn paineet pyrittiin valitsemaan niin, että ne soveltuvat suomalaiselle sellutehtaalle. Prosessihöyryn lämpötilat valittiin laskennassa käytettävän turbiinin väliottohöyryjen lämpötilojen mukaisesti. Laskennassa käytetyt höyryn arvot on esitetty taulukossa 4. Laskentatapauksissa 1–4 muutettiin matalapainetason (LP) painetta ja tapauksissa 5–7 välipainetason (MP) painetta.

Taulukko 4. Taselaskennassa käytetyt höyryn arvot.

Laskenta- tapaus:	LP		MP		MP3	
	[bar](abs)	[°C]	[bar](abs)	[°C]	[bar](abs)	[°C]
1.	3	134	11	226	25	317
2.	4	144	11	226	25	317
3.	5	152	11	226	25	317
4.	6	165	11	226	25	317
5.	4	144	13	243	25	317
6.	4	144	15	258	25	317
7.	4	144	17	273	25	317

Välipainehöyrytaso MP3 valittiin turbiinin toiminnan kannalta sopivaksi siten, että sitä voidaan käyttää kattiloiden nuohoushöyrynä. Kaikissa laskentatapauksissa tuorehöyryn paine oli 96 bar (abs) ja lämpötila 495 °C ja turbiinin sisääntulopaine 93 bar (abs) ja lämpötila 493 °C.

Työn taselaskennassa ei huomioitu höyryn painetason nostamisesta mahdollisesti aiheutuvaa palaavan lauhteen lämpötilan nousua. Kun höyryn kuluttajille syötettävä prosessihöyryn paine nousee riittävästi on mahdollista, että laitteilta palaavan lauhteen joukossa on myös höyryä. Lauhteen on kuitenkin oletettu palaavan vetenä aina samassa lämpötilassa höyryn paineen nostosta huolimatta. Laskennassa ei myöskään otettu huomioon laitteiston mahdollisia vaatimuksia höyryn paineelle eikä talvi- ja kesäkausien välisiä eroja taselaskennassa.

5.2 Tehdastyypin prosessilämmön kulutus laskennassa

Prosessilämmön kulutus ja höyryn massavirrat riippuvat tehtaalla käytettävistä prosesseista ja höyryn painetasoista. Painetasoa nostettaessa höyrymassavirta kulutuskohteille pienenee. Taulukossa 5 on esitetty laskennassa käytetyt turbiinin väliottohöyryjen massavirrat laskennan lähtötasolla. Tällöin tehtaan matalapainetaso on 3 bar (abs) ja välipainetaso 11 bar (abs). Tehtaaseen lisätyt prosessit lisäävät sen lämmön ja sähkön tarvetta. Merkittävin matalapainehöyryn sekä sähkön kulutusta lisäävä tekijä on hienopaperikone. Taulukossa on esitetty myös tapausten ominaislämmönkulutus sekä

ominaissähkönkulutus tuotettua sellutonna kohden laskennan lähtötasolla. Modernin sellutehtaan ominaislämmönkulutus on noin 1 GJ/ADt pienempi kuin perinteisen sellutehtaalla.

Taulukko 5. Prosessilämmön kulutus laskennassa.

	LP (3bar)	MP (11bar)	Lämmön kulutus	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

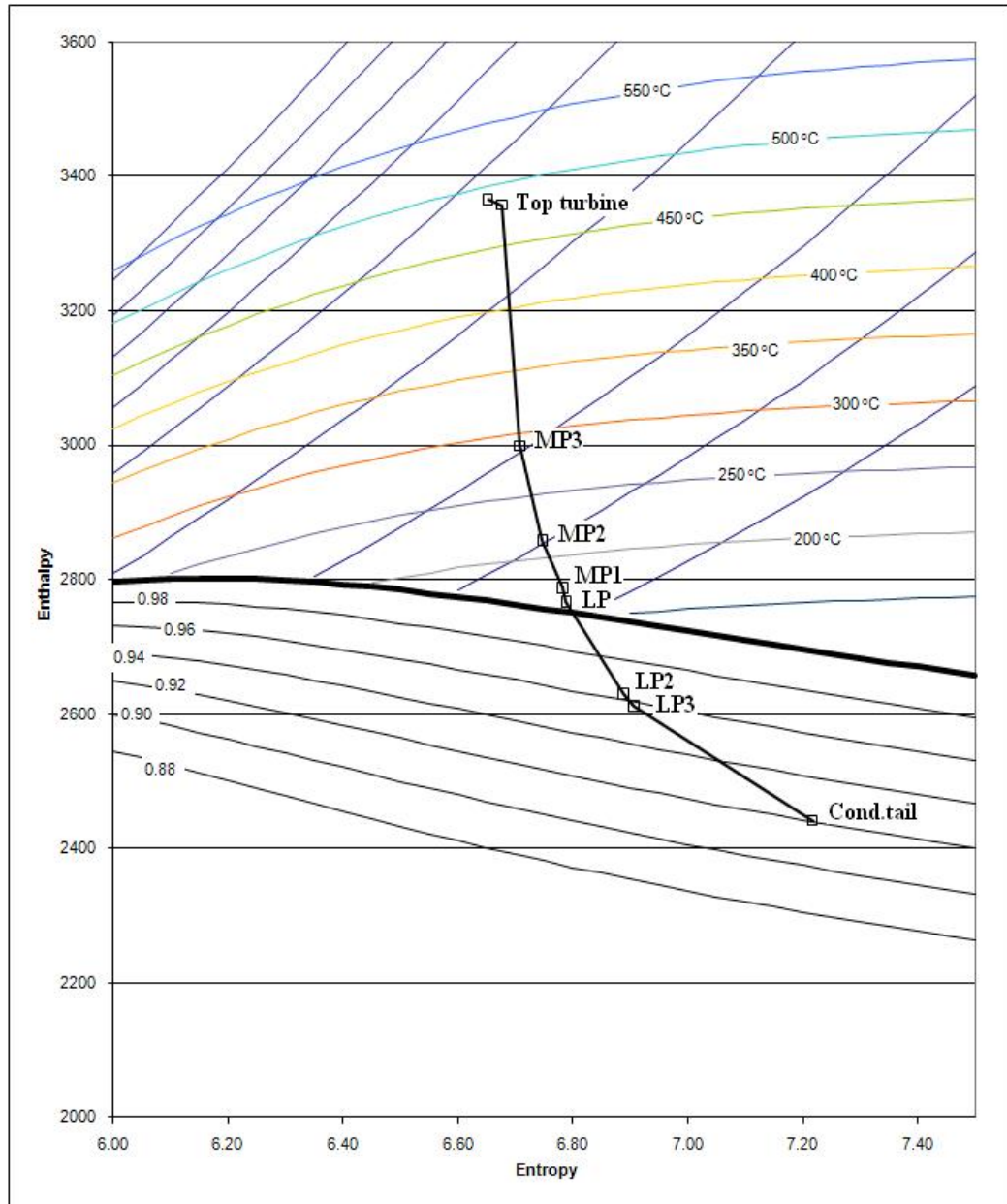
Sellutehtaan prosessit kuluttavat matalapainehöyryä merkittävästi enemmän kuin välipainehöyryä. Matalapainetason nostamisella on huomattavasti suurempi vaikutus sähköntuotantoon kuin välipainetason nostamisella. Painetason nosto vähentää prosessihöyryn tarvetta höyryn energiasisällön kasvaessa. Taselaskennassa huomattiin tuotantoprosessien tarvitseman matalapainehöyryn tarpeen vähenevän 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.

5.3 Turbiinin toiminta-arvot

Turbiinin toiminta-arvot valittiin suunnittelupisteessä (design point) siten, että turbiinin väliottopaineet sen toimintapisteessä ovat prosessin kannalta sopivat. 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 myös turbiinin väliotoista. Höyry paisutettiin turbiinissa tehtaan matalapainetasoon ja prosessista yli jäänyt matalapainehöyry paisutettiin loppuun lauhdeperässä. Turbiinin lämpötila- ja painejakauma sekä väliottohöyryjen lämpötilat perustuvat teoreettiseen laskentaan. Siksi taselaskennassa käytettävät höyrynarvot eivät aina vastaa täysin käytännön arvoja.

Joissakin laskentavaiheissa turbiinin paisunta päättyi lauhdeperässä kosteaksi höyryksi. Uusissa teollisuusturbiineissa höyryn kostealle alueelle paisutus on ollut käytäntönä, koska käytön aikaisesta kulumisesta johtuen turbiinin häviöt lisääntyvät ja hyötysuhde heikkenee. Tällöin paisuntakäyrän loppupiste nousee h,s - tasossa ylöspäin ja höyry on tulistettua myös turbiinin loppu päässä. (Vakkilainen, keskustelu 28.06.2010) Kuvassa 24 on esitetty eräs laskennassa käytetty turbiinin paisuntakäyrä h,s - tasossa. Kuvasta nähdään matalapainetason (LP) olevan vielä tulistettua höyryä.



Kuva 24. Turbiinin paisuntakäyrä.

5.4 Nuohoushöyryn paineen alentaminen

Kattiloiden nuohoushöyryn paineen valinta ei yleensä perustu suutinvirtaukseen. 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. Tätä suuremmilla paineilla suutin tukkeutuu eikä massavirta enää kasva. Höyryvirtaus romahtaa suuttimen jälkeisissä tiivistysaalloissa, jolloin sen virtausnopeus tippuu alle äänen nopeuden. Alentamalla nuohoushöyryn painetta voitaisiin kuitenkin lisätä turbiinin sähköntuotantoa, vaikka nuohoushöyryn massavirta pysyykin samana. Nuohoushöyryn paineen alentaminen ei merkittävästi vaikuta laitoksen investointikustannuksiin, sillä nuohouksessa käytettävät suuttimet ja putkisto pysyvät samanlaisina. Nuohoushöyrylle voidaan käyttää saman kokoista siirtoputkistoa paineen ollessa 25–40 bar. Mikäli nuohoushöyryn painetta lasketaan alle 25 bar on luultavammin siirryttävä 100 mm putkistosta 125 mm putkikokoon. Tämän vuoksi nuohoushöyryn paineen valinta ei juurikaan vaikuta laitoksen investointikustannuksiin. (Vakkilainen, keskustelu 14.07.2010)

Työssä tarkasteltiin nuohoushöyryn paineen alentamisen vaikutuksia tehtaan sähköntuotantoon. Tasetarkastelussa soodakattilan nuohoushöyry otettiin turbiinin välitosta 40, 32, 22 ja 20 bar (abs) paineessa, nuohoushöyryvirran ollessa 4.5 kg/s. Laskenta suoritettiin myös siinä tapauksessa, että 0.5 kg/s tai 1.0 kg/s korkeapaineisesta nuohoushöyryvirrasta korvattiin 11 bar (abs) välipainehöyryllä. Nuohoushöyryn kokonaismassavirta pysyi samana kaikissa laskennan vaiheissa. Tarkastelu ei huomioi nuohoushöyryn paineen alentamisen vaikutusta nuohoustehokkuuteen.

5.5 Toisen matalapainetason rakentaminen

Taselaskennalla tarkasteltiin myös tapausta, jossa 5 bar (abs) matalapainehöyry korvattiin joissakin tehtaan prosesseissa matalampi paineisellä höyryllä. Laskennalla selvitettiin rinnakkaisen matalapainelinjan rakentamisen kannattavuutta ja vaikutuksia tehtaan sähkön tuotantoon. Taselaskenta suoritettiin tapaukselle, jossa 5 bar matalapainehöyrylinjan rinnalle rakennettiin 3.5 bar matalapainelinja. Matalalampi paineisellä höyryllä korvattiin osittain tai kokonaan haihduttamon, kuivauskoneen ja syöttöveden esilämmittimen matalapainehöyryn tarve, tehtaan muiden prosessien käyttäessä 5 bar (abs) matalapainehöyryä. Tarkastelu suoritettiin kyseisille prosesseille, koska ne ovat tehtaan suurimpia matalapainehöyryn kuluttajia. Laskennalla pyrittiin selvittämään kuinka suuri höyryvirran tulee olla, jotta linjaston rakentaminen on kannattavaa. Linjaston

investointikustannuksia arvioitiin putkiston osalta. Koska haihduttamo sijaitsee voimalaitoksen läheisyydessä, sen investointikustannukset olisivat pienimmät ja siksi uudella höyrylinjalla pyritään korvaamaan ensisijaisesti haihduttamon matalapainehöyryn tarve. Taulukossa 6 on esitetty tarkastelussa käytettyjen matalapainehöyryjen massavirrat ja lämmön kulutukset. Taulukosta nähdään, että höyryn paineen muutos on niin pieni ettei tarvittavan höyryn massavirta merkittävästi lisäänty. Paineen muutos vaikuttaa kuitenkin hiukan kattilan syöttöveden esilämmitys tarpeeseen.

Taselaskenta suoritettiin perinteiselle sellutehtaalle, jossa on kuorikattila. Tarkastelussa tehtaan välipainetaso oli 11 bar (abs). Toisen matalapainetason höyry otettiin turbiinin lauhdeperän välitosta 3.5 bar (abs) paineessa. Rinnakkaisen matalapainetason rakentamisen investointikustannukset on laskettu aiemmin esitetyn putkiston investointikustannusten laskennan mukaisesti. Investointiarviot on laskettu vain uuden putkiston osalta eikä niissä ole otettu huomioon mahdollista lisäinvestointia kuivauskoneessa, haihduttamossa tai turbiinissa. Painetason muuttamisesta syöttöveden esilämmittimellä arvioitiin aiheutuvan 2.5 miljoonan euron investointikustannukset esilämmittimessä.

Taulukko 6. Laskenta-arvot rinnakkaisille matalapainelinjastoille.

Tapaus:	Höyryn kuluttaja:	LP 3.5 bar		LP 5 bar	
		[kg/s]	[MW]	[kg/s]	[MW]
1.	Haihduuttamo	10	24	7	17
	Kuivauskone	0	0	18	47
	SYVE- esilämmitin	0	0	16	36
	YHTEENSÄ	10	24	41	100
2.	Haihduuttamo	17	41	0	0
	Kuivauskone	0	0	18	47
	SYVE- esilämmitin	0	0	16	36
	YHTEENSÄ	17	41	34	83
3.	Haihduuttamo	17	41	0	0
	Kuivauskone	10	24	9	24
	SYVE- esilämmitin	0	0	15	33
	YHTEENSÄ	27	65	24	57
4.	Haihduuttamo	17	41	0	0
	Kuivauskone	20	47	0	0
	SYVE- esilämmitin	0	0	13	30
	YHTEENSÄ	37	88	13	30
5.	Haihduuttamo	17	41	0	0
	Kuivauskone	20	47	0	0
	SYVE- esilämmitin	13	30	0	0
	YHTEENSÄ	50	118	0	0

5.6 Toisen välipainetason rakentaminen

Työssä tarkasteltiin myös toisen välipainehöyrylinjaston rakentamismahdollisuuksia keittimelle. Tarkastelulla pyrittiin selvittämään kuinka suuri välipainehöyryvirran on oltava, jotta oman linjaston rakentaminen tulee kannattavaksi. Tarkastelu tehtiin perinteiselle sellutehtaalle, jossa käytetään kuorikattilaa. Laskennassa keittimen 13 bar (abs) välipainevirta korvattiin osittain tai kokonaan 9 bar (abs) välipainehöyryllä. Taulukossa 7 on esitetty välipainehöyryn massavirrat, joilla tarkastelu on tehty. Tasetarkastelussa prosesseissa käytettävä matalapainehöyryn paine oli 4 bar (abs) ja lämpötila 144 °C. Liitteessä III on esitetty toisen välipaineputkiston kannattavuuslaskelmien arvoja ja tulokset.

Taulukko 7. Toisen välipainelinjaston laskemisessa käytetyt höyryn massavirrat.

	MP	MP2
Paine [bar] (abs)	13	9
Lämpötila [°C]	243	203
Massavirta [kg/s]	10.4	0
	9.4	1
	8.4	2
	6.4	4
	4.4	6
	2.4	8
	0.4	10
	0	10.4

Toisen välipainelinjaston investointi kustannukset on laskettu putkiston osalta aiemmin kuvatulla tavalla. Lisäksi uuden välioton rakentamisesta turbiinille arvioitiin aiheutuvan 200 000 € lisäinvestointi. Taulukossa 8 on esitetty putkiston mitoituksessa käytetyt muut laskenta-arvot. Siirtoputkiston on arvioitu olevan 25 % koko putkiston pituudesta.

Taulukko 8. Putkiston laskenta-arvot.

Laskentajännitys	350	[N/mm ²]
Varmuuskerroin	1.3	[-]
Siirtoputkiston pituus	200	[m]
Putkiston kokonaispituus	800	[m]
Materiaalin tiheys	7800	[kg/m ³]

6 SUOMESSA KÄYTETTÄVÄT HÖYRYN PAINETASOT

Projektia varten kerättiin tietoa suomalaisilla sellutehtailla käytettävistä höyryn painetasoista. Suomen Soodakattilayhdistyksen tekemässä kyselyssä pyrittiin selvittämään erityisesti käytettävät höyrytasot ja niiden paineet sekä paineiden valintaan vaikuttaneet syyt. Kyselyyn vastanneiden 12 suomalaisen sellutehtaan käyttämät höyryn painearvot on koottu taulukkoon 9. Liitteeseen IV on koottu tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen painetasokyselyyn.

Taulukko 9. Suomen sellutehtailla käytettävät höyrynpainetasot.

Tehdas:	Tuore- höyry	Tuore höyry2	Nuohous höyry	Väli- paine	Väli- paine2	Matala paine	Matala paine2	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. Pietar- saari	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. Ääne- koski	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 höyryn painetasojen valintaan ovat vaikuttaneet laitoksen käyttöönottovuosi, käytettävä laitteisto sekä tehdastyyppi. Myös sähkön hinnan kehityksellä on ollut vaikutusta höyryn paineiden valintaan.

Kattilan rakennusvuosi määrää käytettävän tuorehöyryn paineen. 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 tuorehöyryn paineet ovat 81–92 bar. Kattilatekniikan ja materiaalien kehityksen myötä tuorehöyrynpaineet ovat nouseet 2000-luvulla jo yli 100 bariin. 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 mukaan kattilan 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 joissakin tapauksissa vaikuttaneet käytettävään höyryn painetasoon. 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 samaa matalapaineverkkoa viereisen paperitehtaan kanssa. Matalapaineverkon paine on alhaisempi (3,45 bar) kun paperitehtaalte menevä väliventtiili säätää sitä kuin apulauhduttimen säätäessä (3,6 bar) painetta.

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. Matalapainehöyryn paineen nousu johtuneen luultavimmin haihduttamon kapasiteetin noususta 70-luvulta lähtien. Haihduttamolta lähtevän polttolipeän 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 höyryn tuotanto on kasvanut. Myös uusimpien valkaisuprosessien käyttö lisää välipainehöyryn käyttöä. Valkaisussa on käytettävä välipainehöyryä mikäli siinä on paineellisia vaiheita. (Kivistö 2008, 11) Uusimpien valkaisuprosessien lämpötilat ovat myös korkeampia ja vaiheiden väliset lämpötilaerot suurempia. (Kivistö 2010, 1) Myös nämä syyt voivat vaikuttaa korkeampaan välipainehöyryn tarpeeseen.

Yleisesti ottaen suomalaisilla sellutehtailla käytetään samankaltaisia höyrytasoja. Suurimmat erot tehtaiden välillä löytyvät tuorehöyryjen paineissa. 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. Näin vältetään mittavilta laitteistoinvestoinneilta. Valitut höyryn painetasot eivät kuitenkaan välttämättä ole tehtaan energiatehokkuuden ja sähköntuotannon maksimoinnin kannalta parhaat mahdolliset. Tekniikan kehittyminen näkyy selvästi painetasojen alentumisena.

7 VÄLIPAINETASON LASKEMISTA RAJOITTAVAT TEKIJÄT

Sellutetehtaan suurimmat välipainehöyryn kuluttajat ovat keittovaihe sekä haihduttamo. Ne rajoittavat usein välipainetason paineen alentamista. Haihduttamon ensimmäisessä vaiheessa käytettävän välipainehöyryn painetta on jo onnistuneesti laskettu suomalaisilla sellutehtailla. (Vakkilainen, keskustelu 09.06.2011) Työtä varten kysyttiin Andritz Oy:n sekä Pöyry Oy:n mielipiteitä keittämön tarvitsemasta välipainetasosta. Sähköpostikeskustelut laitteiston höyryn paineen tarpeesta on esitetty liitteessä I. Kyselyn mukaan keitin tarvitsee lehtipuun keitossa vähintään 7 bar (g) ja havupuun keitossa 9 bar (g) välipainehöyryä. Happivaihe tarvitsee kuitulinjan korkeimman höyryn paineen. Happivaiheen tarvitsema höyrynpaine on 10–11 bar ylipainetta. Mikäli tehtaan muut osat tulevat toimeen tätä alhaisemmilla höyryn paineilla, voidaan välipainetasoa nostaa happivaiheelle höyryejektorilla eli termokompressorilla. Ejektorin investointi kustannukset ovat varsin pienet, joten välipainetason laskemisesta saadaan merkittävä hyöty sähkön tuotannossa. Happivaiheessa voidaan myös käyttää boosteripumppua reaktoreiden välissä, jolloin sen tarvitsema höyryn paine on 7 bar ylipainetta.

Välipainetason alentaminen voidaan myös mahdollistaa rakentamalla joillekin tehtaan prosesseille oma välipainehöyrylinja. Prosessissa tarvittavan välipainehöyryvirran on oltava riittävän suuri, jotta linjaston rakentaminen ja uuden turbiinivälioton rakentaminen on kannattavaa. Työssä tehtyjen laskelmien mukaan 9 bar (abs) välipainelinjan rakentaminen keittimelle tulee kannattavaksi kun höyryvirta on vähintään 4 kg/s. Rinnakkaisten höyrytasojen rakentamista kannattanee harkita ainakin haihduttamon, keittimen, sellun kuivurin tai turbiinin uusinnan yhteydessä.

8 HÖYRYN PAINETASON VAIKUTUS SÄHKÖN TUOTANTOON

Höyryn painetasojen muuttumisen vaikutusta sellutehtaan sähköntuotantoon tarkasteltiin laskemalla taseet kappaleessa 5 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. Myyntisähkön tuotto laskettiin Nord Pool sähköpörssin määrittelemän sähkön spot area- hinnan mukaan. Tapausten myyntivoitot on laskettu 22.06.2010 määritetyn sähkön hinnan mukaan. Nord Poolin määrittelemä sähkön hinta oli tuolloin 45,17 €/MWh. Työssä ei ole otettu huomioon ennustetta sähkön hinnan muutoksesta.

Seuraavissa kappaleissa on esitetty aiemmin kuvattujen laskentojen tulokset höyryn painetasojen vaikutuksesta sellutehtaiden energian tuotantoon ja kulutukseen.

8.1 Höyryn painetasojen muutoksen vaikutus sähkön myyntituloihin

Taulukossa 10. on esitetty laskennan tulokset höyryn painetasojen muutoksien vaikutuksesta sähkön vuotuisiin myyntituloihin. Laskennassa huomattiin matalapainetason nostamisella olevan suurin vaikutus tapauksen D (Perinteinen sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila) mukaiseen tehtaaseen. Matalapainetason nostamisella aiheutuu 1 250 000 €/bar menetys kyseisen tehdastyypin sähkön vuotuisissa myyntituloissa. Pienimmät menetykset matalapainetason nostamisesta aiheutuvat tapauksen E (Moderni sellutehdas) mukaisen tehtaan sähkön myyntituloihin. Tällöin sähkön myyntivoiton menetys on 890 000 €/bar vuodessa. Taulukon tuloksista voidaan todeta matalapainehöyryn paineen valinnalla olevan suurin merkitys tehdastyypeissä, joissa höyryn kulutus on suuri.

Taulukon 10 tuloksista voidaan todeta välipainetason muuttamisella olevan saman suuruinen vaikutus kaikkien tehdastyypien sähkön myyntituloihin. Välipainehöyryn

kulutuksissa ei ole merkittäviä eroja tehdastyyppien välillä, jonka vuoksi myös vaikutus sähkön myyntituloihin on saman suuruinen kaikissa tapauksissa.

Taulukko 10. Höyrytasojen paineen muutoksen vaikutus vuotuisiin sähkön myyntituloihin.

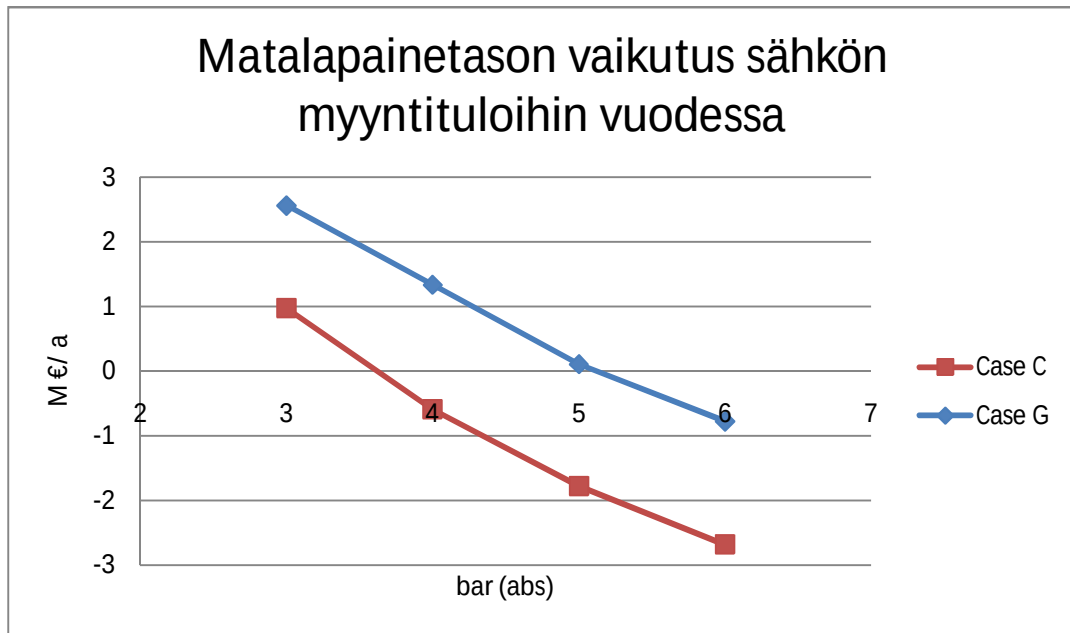
Höyryn painetason vaikutus sähkön myyntituloihin	LP:	MP:
	[1000 €/bar/a]	[1000 €/bar/a]
Case A: Perinteinen sellutehdas	1030	70
Case B: Perinteinen sellutehdas + kuorikattila	1000	70
Case C: Perinteinen sellutehdas +hienopaperikone	1190	70
Case D: Perinteinen sellutehdas +hienopaperikone + kuorikattila	1250	70
Case E: Moderni sellutehdas	890	70
Case F: Moderni sellutehdas + kuorikattila	960	70
Case G: Moderni sellutehdas + hienopaperikone	1110	70
Case H: Moderni sellutehdas + hienopaperikone + kuorikattila	1230	70

Taulukossa 11 on esitetty taselaskennan tulokset vuotuisista sähkön myyntituloista. Tulokset on esitetty vertailtavan matala- ja välipainehöyryn paineen mukaan. Muut höyryn paineet ovat aiemmin esitetyn taulukon 4 mukaisia. Taulukosta 11 nähdään, että tehdas saa pienimmät vuotuiset sähkön myyntitulot tapausten C ja G mukaisissa sellutehdas-hienopaperikone integraateissa, joissa syntyvää kuorijätettä ei polteta. Tehdastyyppien höyryn kulutus on suurin ja höyryn tuotanto vähäistä.

Taulukko 11. Vuotuiset sähkön myyntitulot matala- ja välipainetason paineiden mukaan. [Milj.€/a]

Paine [bar](abs)	Sähkön myynti tulot vuodessa [Milj. €/a]							
	LP				MP			
	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 tapausten C (Perinteinen ST + HPK) ja G (Moderni ST + HPK) sähkön myyntitulojen muutos vuodessa. Kuvan 25 ja taulukon 11 tuloksista voidaan todeta perinteisen sellutehdas-hienopaperikone integraatin (ilman kuorikattilaa) kuluttavan enemmän sähköä mitä se pystyy tuottamaan mikäli matalapainetaso yli 4 bar (abs). Modernissa sellutehdas-hienopaperikone integraatissa (ilman kuorikattilaa) vastaava tapahtuu kun matalapainetaso on yli 5 bar (abs).



Kuva 25. Matalapainetason mukaiset vuotuiset sähkön myyntitulot tapauksissa C ja G [milj. €/a]

8.2 Turbiinin marginaalinen rakennusaste

Taulukossa 12 on esitetty laskennan mukaisen turbiinin marginaaliset rakennusasteet (α). Rakennusastetta laskettaessa prosessihöyryn on oletettu palaavan 90 °C lämpöisenä lauhteena. Koska painetasojen nostaminen vähentää turbiinin sähköntuottoa, se pienentää myös laitoksen rakennusastetta. Matalapainetason (LP) nostaminen alentaa turbiinin rakennusastetta noin $0.02 \text{ MW}_e/\text{MW}_{th}$. Välipaineen muuttamisella on huomattavasti pienempi vaikutus painetason marginaaliseen rakennusasteeseen.

Taulukko 12. Turbiinin marginaali rakennusaste.

Turbiinivaihe	α	
	[MW _e / MW _{th}]	[MWe/(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 myyntituloihin

Soodakattilan nuohoushöyryn paineen valinnan vaikutusta tehtaän sähköntuotantoon tarkasteltiin alentamalla turbiinin väliotosta saatavan nuohoushöyryn painetta. Lisäksi tarkasteltiin tilannetta, jossa osa nuohoushöyrystä korvattiin matalampi paineisella höyryllä. Taulukossa 13 on esitetty laskennan tulokset nuohoushöyryn paineen vaikutuksesta tehtaän sähkön myyntituloihin. Vertailupisteenä käytetään tilannetta, jossa soodakattilan nuohoukseen käytetään 4.5 kg/s 40 bar (abs) höyryä. Taulukossa on myös esitetty tulokset tapauksille, joissa osa korkeapaineisesta (MP3) nuohoushöyrystä on korvattu 11 bar (abs) (MP2) välipainehöyryllä. Alentamalla nuohoushöyryn paine 40 bar:sta 20 bar voidaan aikaansaada 260 000 € korkeammat sähkön myyntitulot vuodessa. Nuohoushöyryn korvaamisella matalampi paineisella höyryllä on merkittävä vaikutus sähkön tuotantoon tapauksissa, joissa käytetään korkeaa nuohoushöyryn painetta.

Taulukko 13. 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	12.0
MP3: 3.5 kg/s MP2: 1 kg/s	96	191	300	309	11.0

Koska nuohoukseen käytettävän höyryn massavirta on pieni, merkittävien säästöjen aikaan saaminen edellyttää suurta nuohoushöyryn paineen alentamista. Nuohoushöyryn paineen alentamisesta ei kuitenkaan synny merkittäviä investointikustannuksia.

9 HÖYRYN PAINETASON VAIKUTUS INVESTOINTEIHIN

Investointilaskelmissa hyödynnettiin tietoja viimeisimmistä tehdyistä talteenottolinjastojen ja kuivauskoneiden uusimisprojekteista. Liitteessä V on esitetty näihin tietoihin perustuva esimerkkilaskelma talteenottolinjaston ja kuivauskoneen uusimisen investointikustannuksista. Tämän työn investointilaskelmat ovat esimerkin kaltaisia. Investointiarviot ja haihduttamon sekä kuivauskoneen mitoituksessa tehdyt tekniset valinnat perustuvat suurelta osin aiemmin tehtyihin projekteihin. Seuraavissa kappaleissa on esitetty laskelmien tulokset höyryn painetasojen muuttamisen vaikutuksista tehtaan investointikustannuksiin. Painetason muuttamisesta aiheutuviissa investointikustannuksissa ei ole huomioitu tehtaan muita lämmönsiirtimiä. Lämmönsiirtimien investointikustannusten arvioidaan olevan noin 10–20 % lasketuista investointikustannuksista. Tämän vuoksi niiden oletetaan jäävän lasketatarkkuuden sisälle.

9.1 Putkiston investointikustannukset

Putkiston investointikustannuksia laskettaessa määritettiin sellutehtaalle rakennettavien höyryn siirtoputkistojen pituus sekä tehtaalla tarvittavien putkistojen kokoluokkien määrä ja materiaali viimeaikaisimpien talteenottolinjastojen uusimisprojektien kustannuslaskelmien avulla. Projektien putkikoot otettiin huomioon myös esimerkkitapausten putkistojen mitoituksessa. Siirtoputkiston oletettiin olevan 25 % rakennettavasta koko putkiston pituudesta. Investointikustannuksissa laskettavien tapausten höyryputkisto valmistetaan mustasta S2333-teräksestä, jonka tiheys on 7800 kg/m³. Putkistoinvestointien kustannukset laskettiin putkiston painon mukaan teräksen hinnan ollessa 6 €/kg. Putkiston materiaalihinta on niin korkea, jotta se kattaa myös muutoksen työ- ja muut kulut. Höyryn paineen muutos ei kasvata merkittävästi nuohous- ja välipainehöyryputkistojen investointeja. Tämän vuoksi investointiarvioita ei tehty välipainetasojen mukaan. Laskennan tulokseksi saadut putkiston koko ja paino on esitetty matalapainetason mukaan taulukossa 14. Putkiston kokonaispaino muuttuu noin 24 000 kg/bar höyryn matalapainetason muuttuessa.

Taulukko 14. Nuohoushöyry- (NH), välipaine- (MP) ja matalapaineputkiston (LP) koko ja paino.

	Paine	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	23157	338835

Matalapainehöyryn paineiden mukaan lasketut putkistoinvestoinnit on esitetty taulukossa 15. Investointikustannukset pienenevät matalapainetason kohotessa noin 566 000 €/bar. Taulukossa on myös esitetty investoinnin muutos lähtötasoon (3 bar) verrattuna. Kuten taulukosta 15 nähdään, 6 bar matalapainetasolla putkiston investointikustannukset ovat noin 1.7 miljoonaa euroa pienemmät kuin 3 bar matalapainetasolla.

Taulukko 15. Putkiston investointikustannus

Paine	Kokonais-paino	Materiaali hinta	Kokonais-hinta	Investoinnin muutos (3 bar)
[bar] (abs)	[kg]	[€/kg]	[1000 €]	[1000 €]
3	409 591	6	9 830	-
4	387 292	6	9 295	- 540
5	364 993	6	8 760	-1 070
6	338 835	6	8 132	-1 700

9.2 Haihduttamon investointikustannukset

Haihduttamon investointikustannusten määrittämiseksi laskettiin haihduttamon tarvitsema lämmönsiirtopinta-ala kullakin matalapainetasolla. Aiemmin tehtyjen talteenottolinjastojen uusimisprojektien kustannuslaskelmien avulla määritettiin haihduttamon investointikustannus haihdutuspinta-alaa kohden. Liitteessä VI on esitetty haihduttamon investointikustannusten määrittämiseksi tehtyjä laskelmia. Taulukoon 16 on koottu kappaleen 4.5 *Haihduttamon investointikustannus* mukaisten laskelmien tulokset sekä matalapainetason mukaiset haihduttamon kokonaisinvestoinnit ja investoinnin muutos (3 bar) perustasoon verrattuna. Taulukossa 16 esitetty kiehumapisteennousu (BPR) on laskettu taulukkoarvoihin perustuen, haihdutinvaiheessa olevan lipeän kuiva-ainepitoisuuden mukaan. (Gullichsen, Fogelholm 1999, B21) Taulukon 16 tulosten perusteella voidaan todeta haihduttamon investointikustannusten muuttuvan noin 3 266 000 €/bar matalapainehöyryn paineen muuttuessa. Taulukon arvot 4 bar höyryn paineessa vastaavat käytössä olevan haihduttimen arvoja.

Taulukko 16. Höyrynpaineen mukaiset haihduttimen toiminta-arvot ja investoinnit.

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]	75 273	58 420	49 403	43 668
Neliöhinta	[€/m ²]	419	500	562	613
Kokonais-investointi	[1000 €]	31 500	29 200	27 800	26 800
Investoinnin muutos	[1000 €]	-	-2 300	-3 700	-4 700

9.3 Kuivauskoneen investointikustannukset

Kuivauskoneen investointikustannukset on laskettu telaston hintaan perustuen. Telaston hinta on arvioitu olevan 50 % koko kuivauskoneen hinnasta. Telaston hinta määritettiin viimeisimpien kuivauskoneen uusimisprojektien mukaan. Telaston investoinniksi arvioitiin 4 miljoonaa euroa höyryn paineen ollessa 4 bar (abs). Kuivauskoneen puristin osan investointien oletettiin pysyvän samana (4 milj. €) painetason muutoksesta huolimatta. Telaston pinta-ala on laskettu, viimeaikasimpien kuivauskoneiden uusimisprojektien tietojen avulla, höyrynpaineen mukaiseen haihdutuskapasiteetin muutokseen perustuen. Taulukossa 17 on esitetty kuivauskoneen investointikustannukset matalapainetason suhteen. Taulukossa esitetty pinta-ala -% kuvaa pinta-alan muutosta vertailutasoon (100%) nähden. Vertailutasona pidettiin käytössä olevan kuivauskoneen uusimisprojektin tietoja 4.7 bar paineessa. Pinta-alan ja haihdutuskapasiteetin oletettiin muuttuvan samassa suhteessa. Investoinnin muutosta verrataan 4 bar (abs) lähtötasoon, joka on määritelty tehtyjen talteenottolinjastojen ja kuivauskoneen uusimisprojektien tietojen perusteella. Tätä pidettiin investointien vertailutasona.

Taulukko 17. Kuivauskoneen investointikustannukset matalapainetason mukaan.

Paine	Pinta-alan muutos	Investoinnin muutos	Telaston investointi	Kuivurin Kokonais- investointi	Kokonais- investoinnin muutos
[bar] (abs)	[-%]	[-%]	[1000 €]	[1000 €]	[1000 €]
3	113	104	41 762	81 760	1 760
4	105	100	40 000	80 000	0
5	98	96	38 470	78 470	-1 530
6	92	93	37 110	77 110	-2 890

9.4 Kokonaisinvestoinnit

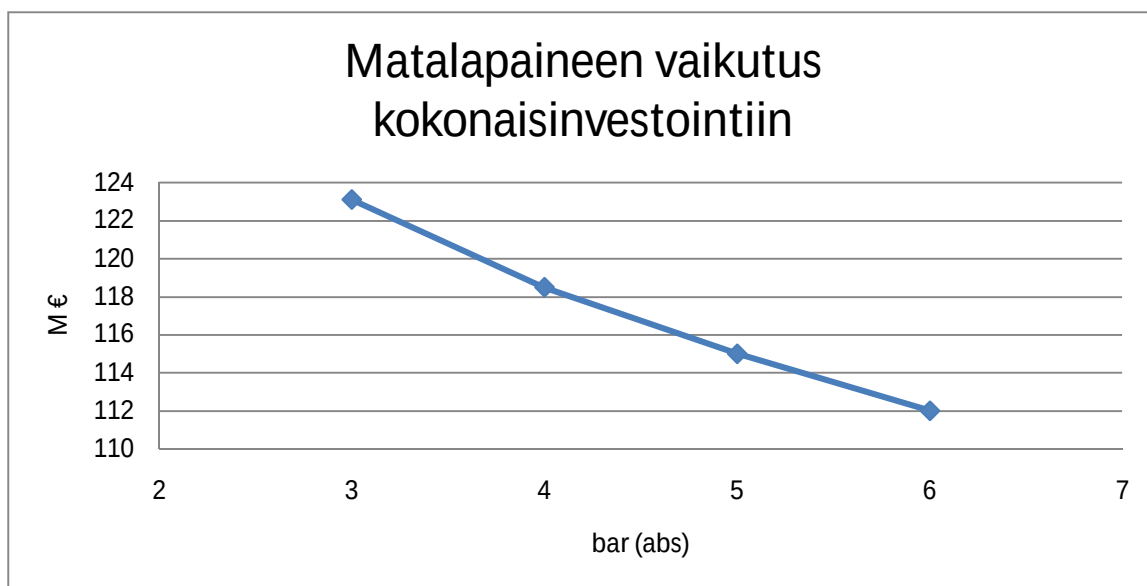
Edellä esitettyjen investointilaskelmien perusteella on laskettu laitoksen kokonaisinvestointiarvio matalapainehöyryn paineen suhteen. Investoinnin vuosittainen lyhennys on laskettu annuiteettimenetelmällä. Investoinnin takaisinmaksuaikana on käytetty 10 vuotta ja korkona 12 %, jotka ovat tyypillisiä arvoja laitteistoinvestoinneille.

Taulukossa 18 on esitetty edellä esitettyjen investointien perusteella lasketut kokonaisinvestointikustannukset sekä investoinnin vuosittainen lyhennys.

Taulukko 18. Painetasomuutoksen kokonaisinvestointikustannukset.

LP	[bar] (yp)	3	4	5	6
Putkisto	[1000 €]	9 830	9 300	8 760	8 130
Haihdutin	[1000 €]	31 520	29 210	27 780	26 770
Kuivauskone	[1000 €]	81 760	80 000	78 470	77 110
YHT.	[1000 €]	123 110	118 510	115 000	112 010
Korko	12 %				
Maksuaika [a]	10				
Lyhennys	[1000 €/a]	-21 790	-20 970	-20 350	-19 820

Kuvassa 26 on esitetty höyryn matalapainetason vaikutus laskettuihin kokonaisinvestointeihin.



Kuva 26. Matalapainetason vaikutus kokonaisinvestointeihin.

10 MATALAPAINETASON OPTIMAALINEN PAINE

Työssä laskettujen sähkön myyntitulojen ja investointien vuosilyhennysten avulla tapauksille laskettiin matalapainetason mukaiset nettotulot vuodessa. Matalapainetasojen mukaiset sähkön myyntitulot on esitetty aiemmin kappaleen 8.2 taulukossa 11 ja kokonaisinvestointikustannukset kappaleen 9.4 taulukossa 18. Taulukossa 19 on esitetty tapausten matalapainetason mukaiset investointien vuosilyhennykset sekä vuotuiset nettotulot. Liitteessä II esitettyyn taulukkoon on koottu laskentatapausten matalapainetason mukaiset investointikustannukset, vuotuiset sähkön myyntitulot, sekä vuotuiset nettotulot.

Taulukko 19. Matalapainehöyryn paineen mukaiset vuotuiset nettotulot.

Matalapainehöyryn paine [bar] (abs)	3	4	5	6
Investoinnin vuosilyhennys [1000 €/a]	-21 790	-20 970	-20 350	-19 820
	Nettotulot [1000 €/a]			
Perinteinen sellutehdas	-4 764	-5 286	-5 582	-5 890
Perinteinen sellutehdas + KK	9 291	8 874	8 501	8 265
Perinteinen sellutehdas +HPK	-20 898	-21 566	-22 133	-22 505
Perinteinen sellutehdas +HPK + KK	-6 733	-7 456	-8 086	-8 518
Moderni sellutehdas	-2 658	-2 934	-3 204	-3 358
Moderni sellutehdas + KK	11 642	11 283	10 951	10 727
Moderni sellutehdas + HPK	-19 225	-19 705	-20 247	-20 601
Moderni sellutehdas + HPK + KK	-4 805	-5 512	-6 125	-6 532

Taulukon tuloksien perusteella voidaan havaita painetason muutoksesta aiheutuvien investointien olevan niin suuria, että investointi on tappiollinen ensimmäisinä pitovuosina. Mikäli painetason muutoksen yhteydessä ei kuitenkaan uusita kuivurin puristin osaa, pienentyvät investointikustannukset 40 miljoonaa euroa. Tällöin tapausten vuotuiset nettotulot ovat taulukon 20 mukaiset. Tässä tapauksessa investointi on tappiollinen vain tehtaissa, joissa käytetään hienopaperikonetta, mutta ei kuorikattilaa. Tuloksista nähdään, että perinteisellä sellutehdas-hienopaperikoneintegraatissa, jossa on kuorikattila matalapainetason alentaminen on kannattavaa vain jos painetaso lasketaan alle 3 bar (abs).

Taulukko 20. Tehtaiden nettotulot ilman kuivurin puristin osan uusimista.

Matalapainehöyryn paine [bar] (abs)	3	4	5	6
Investointikustannukset	-14 710	-13 890	-13 280	-12 740
	Nettotulot [1000 €/a]			
Perinteinen sellutehdas	2 316	1 793	1 497	1 190
Perinteinen sellutehdas + KK	16 370	15 953	15 580	15 345
Perinteinen sellutehdas +HPK	-13 819	-14 487	-15 054	-15 425
Perinteinen sellutehdas +HPK + KK	346	-377	-1 007	-1 438
Moderni sellutehdas	4 421	4 146	3 876	3 721
Moderni sellutehdas + KK	18 722	18 362	18 030	17 806
Moderni sellutehdas + HPK	-12 146	-12 626	-13 168	-13 522
Moderni sellutehdas + HPK + KK	2 274	1 568	955	547

Saatujen nettotulojen perusteella voidaan todeta tapausten taloudellisesti optimaaliset matalapainehöyryn paineet. Optimaaliset matalapainehöyryn paineet on esitetty taulukossa 21. Taulukosta nähdään optimaalisten paineiden olevan tarkasteluvälin alhaisimmat (3 bar) kaikissa tapauksissa. Laskennassa huomattiin kuitenkin optimaalisen paineen olevan joissakin tapauksissa korkeampi mikäli painetason muutoksesta aiheutuva kuivauskoneen investointi pienentyy merkittävästi. Kuivauskoneen investointikustannus on tarkastelluista kohteissa suurin ja siksi merkittävä.

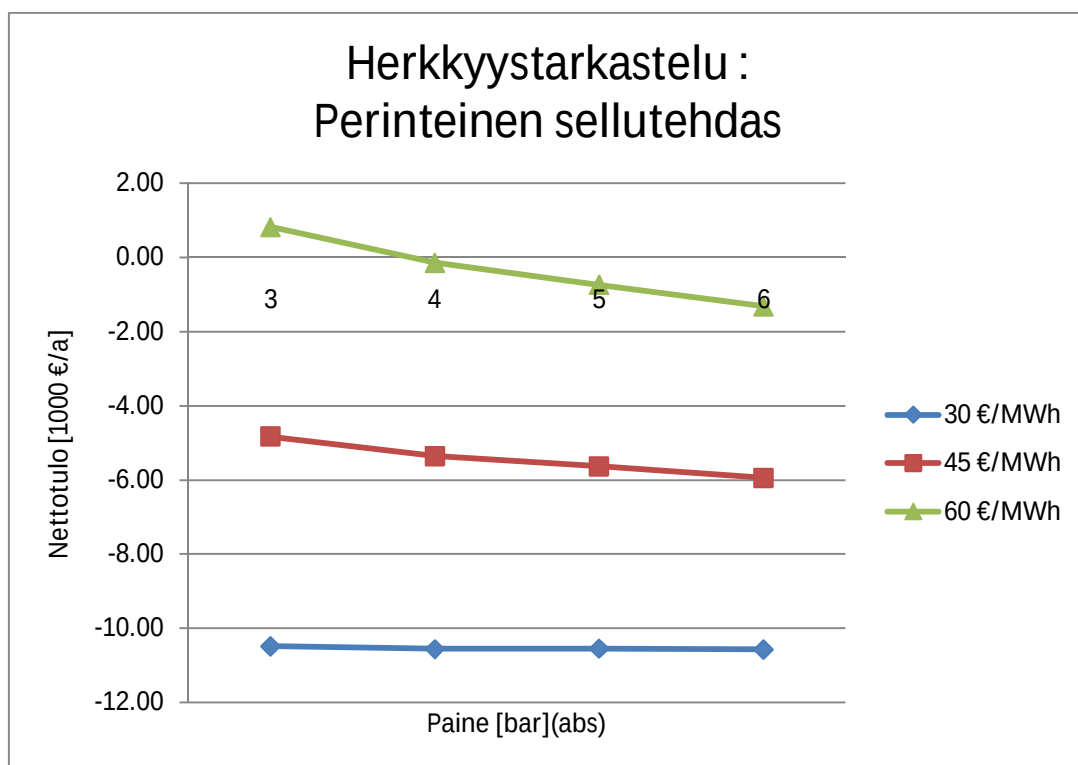
Taulukko 21. Matalapainehöyryn taloudellisesti optimaalisimmat paineet.

Tapaus	[bar](abs)
Perinteinen ST	3
Perinteinen ST + KK	3
Perinteinen ST + HPK	3
Perinteinen ST + KK+ HPK	3
Moderni ST	3
Moderni ST + KK	3
Moderni ST + HPK	3
Moderni ST + KK + HPK	3

11 HERKKYYSTARKASTELU

Työssä tehtiin suuntaa antava herkkyystarkastelu sähkön hinnan vaikutuksesta matalapainehöyryn optimaalisiin paineisiin. Sähkön hinnan vaikutusta tarkasteltiin sen ollessa 30 €/MWh, 45 €/MWh ja 60 €/MWh. Alustava tarkastelu tehtiin perinteisen sellutehtaan, perinteisen sellutehtaan, jossa kuorikattilan sekä perinteisen sellutehdas-hienopaperikoneintegraatin, jossa kuorikattila mukaisille tapauksille. Matalapainehöyryn optimaalinen paine oli kaikilla sähkön hinnoilla, kaikissa tarkastelluissa tapauksissa, 3 bar. Mikäli investointikustannukset muuttuvat voi herkkyystarkastelukin kuitenkin antaa erilaiset tulokset.

Kuvassa 27 on esitetty sähkönhinnan muutoksen vaikutus tehtaan nettotuloihin perinteisellä sellutehtaalla. Kuvasta nähdään painetason valinnalla olevan suurin merkitys tehtaan taloudelle kun sähkön hinta on korkea. Sähkön hinnan ollessa 60 €/MWh voidaan muuttamalla matalapainetaso 6 bar:sta 3 bar:iin aikaansaada yli 2 miljoonaa euroa suuremmat tulot. Kuvasta 27 nähdään myös tehtaan kannattavuuden lisääntyvän merkittävästi sähkön hinnan noustessa, koska sähkön myynnistä saatavat tulot kasvavat.



Kuva 27. Sähkön hinnan vaikutus perinteisen sellutehtaan sähkön myyntiin.

12 RINNAKKAISTEN HÖYRYLINJOJEN RAKENTAMINEN

Työssä tarkasteltiin toisen matala- ja välipainelinjaston rakentamisen kannattavuutta perinteiselle sellutehtaalle, jossa käytössä on kuorikattila. Laskennassa käytetyt arvot on esitelty kappaleissa 5.4 ja 5.5. Seuraavissa kappaleissa on esitetty taselaskennan tulokset matala- ja välipainehöyryvirtojen korvaamisesta matalampi paineisella höyryllä, sekä uusien linjastojen investointiarviot.

12.1 Toisen matalapainelinjan rakentamisen kannattavuus

Toisen matalapainelinjan rakentamisen kannattavuutta tarkasteltiin muodostamalla tase perinteiselle sellutehtaalle, jossa käytetään kuorikattilaa. Tehtaalla käytettävä 5 bar (abs) matalapainehöyryvirta korvattiin osittain tai kokonaan 3.5 bar (abs) matalapainehöyryllä haihduttamalla, kuivurilla ja syöttöveden esilämmittimellä. Tapauksille muodostettiin investointiarviot, jossa kuivurille ja haihduttamolle oletettiin rakennettavan omat putkistot. Investointeja arvioitiin höyryn massavirran mukaan mitoitettavan putkiston osalta. Investointiarviossa ei ole otettu huomioon painetason muutoksesta aiheutuvia lisäinvestointeja haihduttamossa tai kuivauskoneessa. Lisäksi painetason muutoksesta syöttöveden esilämmittimellä arvoitiin aiheutuvan 2 500 000 €:n lisäinvestointi. Koska haihduttamo sijaitsee voimalaitoksen vieressä, sinne rakennettavan putkiston investointikustannukset ovat huomattavasti pienemmät kuin kuivauskoneelle rakennettavan. Tämän vuoksi matalampi paineisella höyryllä pyrittiin korvaamaan ensisijaisesti haihduttamon matalapainehöyryn tarve. Haihduttamolle rakennettavan siirtoputkiston pituudeksi määritettiin 100 metriä ja kuivauskoneelle 500 metriä. Siirtoputkistojen pituuden arviotiin olevan 25 % rakennettavan putkiston kokonaispituudesta. Investointiarvio on laskettu työssä aiemmin kuvatulla tavalla 12 % korolla ja 10 vuoden takaisin maksuajalla.

Taulukossa 22 on esitetty taselaskennan tuloksena saadut tehtaan vuosittaiset sähkön myyntitulot sekä toisen matalapainelinjan rakentamisesta aiheutuvat investointikustannukset. Taulukon 22 ensimmäisessä tapauksessa matalampi paineisella

3.5 bar (abs) höyryllä on korvattu vain osittain haihduttamon höyryvirta ja tapauksessa 2 kokonaan. Tapauksissa 3 ja 4 on korvattu vastaavalla tavalla kuivurin höyryvirta. Koska tapauksen 3 investointeihin kuuluu myös kuivauskoneelle rakennettava höyryputkisto, jäävät tehtaan vuotuiset nettotulot tappiollisiksi. Tapauksessa 5 alemmalla 3.5 bar (abs) matalapainehöyryllä on korvattu haihduttamon, kuivauskoneen sekä syöttöveden esilämmittimen matalapainehöyryn tarve. Taulukosta nähdään, että haihduttamolle rakennettavan 3 bar (abs) matalapainelinjan rakentaminen tulee kannattavaksi höyryvirran ylittäessä 10 kg/s. Myös kuivauskoneelle rakennettavan oman matalapainehöyrylinjan rakentaminen on kannattavaa kun turbiinilta otettavan 3 bar (abs) kokonais matalapainehöyryvirta on suurempi kuin 37 kg/s.

Taulukko 22. Toisen matalapainelinjan rakentamisen kannattavuus.

	Höyryn massavirta [kg/s]		Sähkön myyntitulo	Investointi- kustannus	Investoinnin vuosilyhennys [1000 €/a]	Nettotulo	Nettotulon muutos
	LP 3.5 bar	LP 5 bar					
Perinteinen ST + KK	0	50	28 860	0	-0	28 860	-
1.	10	41	28 940	420	-74	28 860	0
2.	20	34	29 050	535	-94	28 950	90
3.	27	24	29 330	2 637	-466	28 830	-30
4.	37	13	29 560	3 402	-602	28 960	100
5.	50	0	29 780	5 902	-1 044	28 730	-130

Laskennan tuloksista voidaan päätellä, että korvaamalla haihduttamon matalapainehöyryn tarve 3.5 bar (abs) höyryllä voidaan saada 90 000 € suuremmat sähkön myyntitulot vuodessa. Mikäli lisäksi kuivurin höyryvirta korvataan matalampi paineisellä höyryllä sähkön myyntitulot ovat noin 100 000 € suuremmat vuodessa kuin lähtötilanteessa. Kuivurille rakennettavan putkilinjan investointikustannukset voivat kuitenkin olla huomattavasti laskettua pienemmät, jolloin investointi on kannattavampi. Tuloksista voidaankin päätellä, että toisen matalapainehöyrylinjan rakentaminen on kannattavaa ensisijaisesti haihduttamolle. Myös kuivurin lisääminen uuteen matalapainehöyryverkkoon tuo vain vähäisen lisäyksen sähkön myyntituloihin. Rinnakkaisen matalapainelinjan rakentaminen kannattanee parhaiten turbiinin, haihduttamon, kuivauskoneen tai syöttöveden esilämmittimen uusimisien yhteydessä. Tällöin painetason muutoksesta aiheutuvat investoinnit voidaan minimoida. Taulukon 22 tuloksista nähdään, että

syöttöveden esilämmittäminen matalampi paineisella höyryllä ei ole kannattavaa suuresta investointikustannuksesta johtuen.

12.2 Toisen välipainelinjan rakentamisen kannattavuus

Työssä selvitettiin kuinka suuri välipainehöyryvirran on oltava keittimelle, jotta oman höyrylinjan rakentaminen alemmalla painetasolla tulee kannattavaksi. Tarkastelussa keittimen 13 bar (abs) välipainehöyry korvattiin 9 bar (abs) välipainehöyryllä. Laskennassa käytetyt arvot esiteltiin aiemmin kappaleessa 5.5. Taulukossa 23 on esitetty laskennan tulokset putkiston mitoituksista, sekä investointiarviot. Investointiarvioissa on huomioitu putkiston investointikustannukset sekä välioton rakentamisesta johtuva 200 000 € lisäinvestointi turbiinilla.

Taulukko 23. Välipaineputkiston investointikustannukset.

Massavirta (9 bar)	Halkaisija	Seinämän paksuus	Paino	Putkiston hintaa	Kokonais- kustannus	Lyhennys vuodessa
[kg/s]	[mm]	[mm]	[kg]	[€]	[€]	[€]
0	0	0.0	0	0	0	0
1	100	1.7	3 283	20 000	-220 000	-39 000
2	140	2.4	6 566	40 000	-240 000	-42 000
3	170	2.9	9 850	59 000	-259 000	-46 000
4	200	3.4	13 133	79 000	-279 000	-50 000
6	240	4.1	19 699	118 000	-318 000	-56 000
8	280	4.8	26 266	158 000	-358 000	-63 000
10	315	5.3	32 832	197 000	-397 000	-70 000

Taulukossa 24 on esitetty taselaskennan tulokset uuden välipainetason rakentamisen vaikutuksista sähkön myyntivoittoon ja nettotuloihin investionnin vuosilyhennyksen jälkeen. Tuloksista voidaan nähdä, että keittimen välipainetason muuttaminen 13 bar (abs):sta 9 bar (abs):aan on kannattavaa kun höyryvirta on suurempi kuin 4 kg/s. Muutettaessa keitin toimimaan kokonaan 9 bar (abs) välipainehöyryllä voidaan saada noin 60 000 € suuremmat sähkön myyntitulot vuodessa. Uuden turbiiniväliotun rakennuskustannuksista johtuen rinnakkaisen välipainelinjan rakentaminen on

kannattavampaa mikäli myös haihduttamo voidaan muuttaa toimimaan matalammalla välipainehöyryn tasolla.

Taulukko 24. Välipaineputkiston investoinnin kannattavuus

Massavirta (9 bar)	Sähkön tuotanto	Sähkön kulutus	Sähköä myyntiin	Sähkön myyntivoitto	Sähkön myynnin muutos	Nettotulon muutos
[kg/s]	[MW]	[MW]	[MW]	[M€]	[€]	[€]
0	93.61	52.36	41.25	15.65	0	0
1	93.65	52.36	41.29	15.67	15 000	-24 000
2	93.69	52.37	41.32	15.68	27 000	-16 000
3	93.73	52.37	41.36	15.69	42 000	-4 000
4	93.77	52.37	41.40	15.71	57 000	8 000
6	93.85	52.38	41.47	15.73	83 000	27 000
8	93.91	52.40	41.51	15.75	99 000	35 000
10	93.99	52.40	41.59	15.78	129 000	59 000

13 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tarkasteltiin sellutehtaan höyrytasojen paineiden vaikutusta tehtaan sähköntuotantoon ja -kulutukseen sekä määritettiin matalapainehöyryn optimaaliset paineet suomalaisille sellutehdastyypeille. Sellutehdastyypeille muodostettiin energiataseet sekä laskettiin painetasojen muutosten mukaiset investointikustannusarviot.

Laskennan mukaan kaikilla sellutehdastyypeillä matalapainehöyryn paineeksi kannattaa valita alhaisin mahdollinen paine. Näin ollen uusilla tehtailla matalapainetasoksi on taloudellisesti kannattavinta valita laitteiston vaatimusten mukaisesti alhaisimmat paineet. Suurista investointikustannuksista johtuen matalapainetason alentaminen ei ole kannattavaa kaikissa jo rakennetuissa tehtaissa. Painetason muuttamisella voidaan lisätä tehtaan tuloja kuitenkin tehdastyypeissä, joissa käytetään kuorikattilaa, mutta ei hienopaperikonetta. Muissa tehdastyypeissä tehty investointi on tappiollinen ensimmäisinä pitovuosina. Mikäli painetason muuttamisen yhteydessä ei kuitenkaan uusita kuivurin puristin osaa, on investointi kannattava. Tällöin painetason muuttamisesta aiheutuvat investointikustannukset ovat merkittävästi pienemmät. Näin ollen matalapainetason alentaminen aiheuttaa tehtaalle tappiota ensimmäisinä pitovuosina vain sellaisissa sellutehdas-hienopaperikoneintegraateissa, joissa ei ole kuorikattilaa. Matalapainetason alentaminen on todennäköisesti kannattavaa kaikilla sellutehdastyypeillä mikäli se tehdään turbiinin tai suurimpien höyryn kuluttajien uusimisen yhteydessä. Tällöin ylimääräisiä investointeja ei merkittävästi synny.

Matalapainetason alentamisen lisäksi sähköön myyntituloja voidaan lisätä tekemällä toinen turbiiniin väliotto alhaisemmalla matalapainetasolla ja rakentamalla oma matalapainelinja suurimmille matalapainehöyryn kuluttajille. Laskelmien mukaan oman matalapainelinjan rakentaminen on kuitenkin kannattavaa ensisijaisesti vain lipeähaihduttamolle, sillä linjaston investointikustannukset ovat tällöin pienimmät. Putkiston suurien investointikustannusten vuoksi oma matalapaineputkisto kannattanee rakentaa kuivauskoneelle ainakin laajempien talteenottolinjastojen uusimisen yhteydessä. Oma matalapainehöyrylinja kannattanee rakentaa myös syöttöveden esilämmittimelle ainakin

esilämmittimen uusimisen yhteydessä. Muussa tapauksessa oman matalapainelinjan rakentamisesta syöttövedenesilämmittimelle aiheutuu liian suuret muutostkustannukset.

Laskennan perusteella myös välipainetason alentamisella voidaan lisätä tehtaan sähkönmyyntituloja. Välipainetason alentamisesta aiheutuvat investointikustannukset ovat huomattavan pieniä. Mikäli välipainehöyryn painetta nostetaan keittimelle höyryjektorilla tai vaiheiden välissä käytetään boosteripumppua, voidaan tehtaalla käyttää huomattavasti matalampaa välipainehöyrytasoa. Joissakin tapauksissa välipainehöyryä voidaan ottaa keittimelle ja haihduttamolle myös reduktioventtiilin kautta korkeammasta paineesta. Työssä tehtyjen laskelmien perusteella myös rinnakkaisen välipainelinjaston rakentaminen alemmalla painetasolla on kannattavaa. Oman välipainelinjaston rakentaminen on kannattavaa ainakin keittimelle.

Työssä lasketun suuntaa antavan herkkyytstarkastelun mukaan sähkön myyntitulojen kasvu painetasoa muutettaessa on voimakkaampi kun sähkön markkinahinta on korkea. Työssä tehdyt laskelmat on laskettu Nord Pool Spot -sähköpörssin kesäkuun 2010 hinnan mukaan. Sähkön hinta on kuitenkin jo tämän jälkeen noussut, ja painetason muutoksista saatava hyöty on suurempi.

Työssä tehdyissä investointilaskelmissa huomioitiin vain putkiston, haihduttamon ja kuivurin investointikustannukset. Tämän vuoksi lisätutkimus painetason alentamisen vaikutuksista kaikkiin prosesseihin ja tarkempien investointilaskelmien tekeminen on tarpeellista. Lisäksi on tarpeellista selvittää höyrytasojen alentamisen vaikutus tehtaan muihin lämmönsiirtimiin, lauhduttimiin ja esilämmittimiin. Alhaisimpien mahdollisten höyrytasojen määrittämiseksi tulisi myös selvittää prosessien ja laitteiden tarvitsemat höyryn vähimmäispaineet.

14 YHTEENVETO

Metsäteollisuus on eräs suurimmista energian kuluttajista Suomessa. Suuren kulutuksen vuoksi tehtaiden energiatehokkuudella ja energian hinnalla on merkittävä vaikutus tehtaiden talouteen. Voimalaitospolttoaineiden hinnat ovat yli kaksinkertaistuneet viimeisen 15 vuoden aikana ja sähkön hinta on yli nelinkertaistunut Suomessa viimeisen 10 vuoden aikana. Polttoaineiden ja sähkön hinnan noususta sekä sellun hinnan laskusta ja taloudellisesta taantumasta johtuen suomalaiset tehtaot ovat joutuneet tekemään mittavia säästöjä, ja tehtaota on jouduttu lakkauttamaan. Tulevaisuudessa energian tuotanto voi olla vielä tärkeämmässä roolissa tehtaiden kilpailukyvyn kannalta, mikäli selluteollisuus ei kuulu päästövapaisiin aloihin. Tehtaiden suuren energiankulutuksen vuoksi sähkön tuotannon lisääminen ja energiatehokkuuden parantaminen ovat tehokkaita keinoja tehtaiden kilpailukyvyn parantamiseksi. Viime vuosikymmeninä tehtaiden energiatehokkuus on parantunut merkittävästi muun muassa keittovaiheen energian kulutuksen pienenemisen, kuivauksen tehostumisen, lipeähaihduttamon vaiheluvun lisääntymisen sekä jätelämmön talteenoton kehittymisen myötä. (Kivistö 2010, 1–3) Tehtaiden sähkön tuotanto on myös lisääntynyt kattiloiden kehittymisen myötä tuorehöyryn paineiden noustua.

Eräs keino tehtaan sähkön tuotannon lisäämiseksi on höyrytasojen paineiden alentaminen tehtaiden tuotantoprosesseissa. Tällöin höyry voidaan paisuttaa turbiinissa matalampaan paineeseen ja lisätä näin sähkön tuotantoa. Alhaisemmat höyryn paineet kuitenkin lisäävät tehtaan investointikustannuksia putkistojen ja lämmönsiirtopintojen kokojen kasvaessa. Alan kirjallisuudessa ja tutkielmissa ei ole yleisohjetta paineen alentamisen vaikutuksista sellutehtaan talouteen ja sähkön tuotantoon. Tämän diplomityön tavoitteena on määritellä tyypillisille, Suomeen sopiville, sellutehdastyypeille optimaaliset matalapainehöyryn paineet sekä tutkia höyrytasojen paineiden alentamisen vaikutusta tehtaan energiantuotantoon. Työssä tarkastellaan välipainehöyryn ja nuohoushöyryn paineiden alentamisen vaikutusta sellutehtaan sähkön tuotantoon. Lisäksi työssä tutkitaan sähkön tuotannon lisäämismahdollisuuksia korvaamalla joissakin tuotantoprosesseissa matala- tai välipainehöyry matalampi paineisella höyryllä ja rakentamalla turbiinilta oma höyrylinja prosessille.

Tässä työssä erilaisille Suomeen sopiville tehdastyypeille muodostettiin energiataseet, joiden avulla määritettiin tehtaiden energian tuotanto ja kulutus eri matala- ja välipainetasoilla. Lisäksi työssä laskettiin matalapainetasojen mukaiset investointiarviot. Energiataseiden ja investointiarvioiden avulla tehdastyypeille määritettiin optimaaliset matalapainehöyryn paineet. Tasetarkastelun ja investointikustannusarvioiden avulla tutkittiin myös lipeähaihduttamolle, kuivauskoneelle ja syöttöveden esilämmittimelle rakennettavan oman matalapainelinjaston kannattavuutta sekä oman välipainelinjaston rakentamisen kannattavuutta keittimelle ja haihduttamolle. Työn taselaskennat suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston Millflow-laskentasovelluksella. Investointiarvioiden laskemisessa hyödynnettiin tietoja viimeisimmistä talteenottolinjastojen ja kuivauskoneiden uusimisprojekteista.

Laskennan tulosten mukaan sellutehtaiden matalapainetason optimaalinen höyrynpaine on kaikilla tehdastyypeillä vertailtujen arvojen alhaisin. Näin ollen sellutehtaan matalapainetaso on kannattavaa valita prosessien ja laitteiston vaatimusten mukaan alhaisimmaksi mahdolliseksi. Laskentatulosten mukaan matalapainetason alentaminen on kannattavaa tehdä vanhoilla tehtailla vain tehdastyypeillä, joissa käytetään kuorikattilaa mutta ei hienopaperikonetta. Mikäli kuitenkin paineen alentaminen voidaan tehdä ilman kuivauskoneen uuden puristinosan investointia, on se kannattavaa myös muilla tehdastyypeillä. Tehtaan sähkön tuotannon lisääminen on kannattavaa myös rakennettaessa turbiinilta oma matalapainelinjasto alhaisemmalla paineella haihduttamolle. Lisäämällä myös kuivauskone tähän painelinjastoon saadaan aikaan vain vähäinen taloudellinen hyöty. Laskentatulosten mukaan höyryn paineen alentaminen ja oman höyrylinjaston rakentaminen syöttöveden esilämmittimelle ei ole kannattavaa painetason muutoksesta aiheutuvien esilämmittimen investointikustannuksien suuruudesta johtuen. Paineen muuttaminen syöttöveden esilämmittimellä voi kuitenkin olla kannattava esilämmittimen uusimisen yhteydessä. Työn laskennassa ei otettu kantaa välipainehöyryn paineen muuttumisen vaikutuksiin tehtaan investointikustannuksissa. Välipainehöyryn ja nuohoushöyryn paineen alentamisella voidaan kuitenkin aikaansaada mittavia säästöjä. Välipaineputkiston ja nuohoushöyrysuuttimien investointien oletettiin olevan verrattain pieniä saavutettuun hyötyyn verrattuna. Tehtyjen investointikustannusarvioiden mukaan uuden välipainelinjaston rakentaminen alhaisemmalla painetasolla tulee kannattavaksi jo varsin pienellä höyrynvirralla, ainakin lipeähaihduttamolle tai keittimelle.

Tulosten perusteella sekä matala että välipainetasot kannattaa valita laitteiston mukaan alhaisimmiksi mahdollisiksi. Haihduttamo ja keitin ovat suurimmat välipainehöyryn kuluttajat. Välipainetaso voidaan valita jopa keittimen ja haihduttamon vaatimaa painetasoa alhaisemmiksi mikäli paineen nostamiseksi kyseisille prosesseille voidaan käyttää höyryejektoria. Näin voidaan aikaan saada suuria säästöjä. Keittimen painetasovaatimusta voidaan myös hiukan alentaa käyttämällä boosteripumppua vaiheiden välillä.

Työssä tehdyn suuntaa antavan herkkyystarkastelun mukaan paineen alentamisella aikaansaatu sähkön myyntitulojen kasvu on voimakkaampi kun sähkön markkinahinta on korkea. Sähkön hinta on noussut Suomessa diplomityön laskelmien tekemisen jälkeen. Sähkön hinnan noustua painetason muuttaminen on tullut kannattavammiksi kaikilla sellutehdastyypeillä.

Työssä tehdyt investointiarviot on tehty vain putkiston, haihduttamon ja kuivauskoneen osalta. Tämän vuoksi tarkemman lisätutkimuksen tekeminen höyryn painetasojen vaikutuksesta tehtaan prosessien investointikustannuksiin on tarpeellinen. Lisäksi on tarpeellista selvittää painetasojen muutoksen vaikutukset sellutehtaan muihin lämmönsiirtimiin, lauhduttimiin ja esilämmittämiin sekä selvittää laitteiston asettamat vaatimukset höyryn vähimmäispaineille.

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)

Energian hinnat A [verkkojulkaisu]. ISSN=1799-7984. 1. vuosineljännes 2011, Liitekuvio 4. Voimalaitospolttoaineiden hinnat sähköntuotannossa . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 18.7.2011]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/ehi/2011/01/ehi_2011_01_2011-06-22_kuv_004_fi.html

Energian hinnat B [verkkojulkaisu]. ISSN=1799-7984. 1. vuosineljännes 2011, Liitekuvio 6. Nord Pool Spot -sähköpörssin kuukausikeskiarvot . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 18.7.2011]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/ehi/2011/01/ehi_2011_01_2011-06-22_kuv_006_fi.html.

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. 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]. 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]. 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>

Liikevaihto. [Metsäteollisuuden tietopalvelu www-sivuilla]. Päivitetty: 21.06.2011.
[Viitattu: 18.07.2011] Saatavissa:
<http://www.metsateollisuus.fi/tilastopalvelu2/tilastokuviot/Talous/Forms/DispForm.aspx?ID=38&RootFolder=%2ftilastopalvelu2%2ftilastokuviot%2fTalous%2fJulkinen-FI&Source=http%3A%2F%2Fwww.metsateollisuus.fi%2Ftilastopalvelu2%2Ftilastokuviot%2FTalous%2FForms%2FAllItems.aspx>

Metsäteollisuus. [Metsäteollisuuden tietopalvelu www-sivuilla]. 11.10.2010.
[Viitattu: 13.06.2011]. Saatavissa:
http://www.metsateollisuus.fi/tilastopalvelu2/tilastokuviot/Energia/Julkinen-FI/d10Energia_023.ppt

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

Suomen metsäteollisuus. [Metsäteollisuuden www-sivuilla]. Päivitetty 07.04.2011.
[Viitattu: 18.07.2011] Saatavissa:

<http://www.metsateollisuus.fi/tilastopalvelu2/tilastokuviot/Perustietoa/Forms/DispForm.aspx?ID=79&RootFolder=%2ftilastopalvelu2%2ftilastokuviot%2fPerustietoa%2fJulkinen%2dFI&Source=http%3A%2F%2Fwww%2Emetsateollisuus%2Efi%2Ftilastopalvelu2%2Ftilastokuviot%2FPerustietoa%2FForms%2FAllItems%2Easpx%3FRootFolder%3D%252Ftilastopalvelu2%252Ftilastokuviot%252FPerustietoa%252FJulkinen%252DFI>

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

Suomen virallinen tilasto (SVT): Teollisuuden energiankäyttö [verkkojulkaisu].
ISSN=1798-775X. 2009. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 18.7.2011].

Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/tene/2009/tene_2009_2010-10-27_tie_001_fi.html.

Sähkönkulutus. [Metsäteollisuuden www-sivuilla]. Päivitetty 30.06.2011

[Viitattu: 18.07.2011]. Saatavissa:

<http://www.metsateollisuus.fi/tilastopalvelu2/tilastokuviot/Energia/Forms/DispForm.aspx?ID=20&RootFolder=%2ftilastopalvelu2%2ftilastokuviot%2fEnergia%2fJulkinen-FI&Source=http%3A%2F%2Fwww.metsateollisuus.fi%2Ftilastopalvelu2%2Ftilastokuviot%2FEnergia%2FForms%2FAllItems.aspx>

Tilastot. [Metsäteollisuuden www-sivuilla]. Päivitetty 19.05.2011

[Viitattu: 18.07.2011]. Saatavissa:

<http://www.metsateollisuus.fi/Infokortit/metsateollisuusnumeroina/Sivut/default.aspx?imported=True#>

Vakkilainen Esa. Esitelmä. 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.
- Vakkilainen Esa. 09.06.2011 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 perusteen (BH50A0200) – Kurssin laskuharjoitus 2. Syksy 2007. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Energiatekniikan osasto.

Sähköpostikeskustelu sellutehdasprosessien painetasovaatimuksista.

From: peter.ryder@poyry.com
Sent: 16. helmikuuta 2011 16:45
To: Esa Vakkilainen
Subject: Re: minimum medium pressure level

Esa,

I am working in Canada at the moment with Pertti Winter who I shall ask his advice. I will get back to you with his opinion also.

During the gunns project we investigated this with Andritz and Kvaerner and we came up with the cooking plant minimum of about 9 bar.

regards

From: "Esa Vakkilainen" <Esa.Vakkilainen@lut.fi>
To: <peter.ryder@poyry.com>
Date: 16/02/2011 08:25 PM
Subject: minimum medium pressure level

Peter

Do you have any opinion on the minimum possible medium pressure level in pulp mill. We want to make it low so the electricity is maximized. But there are probably limitations in cooking and in bleaching. What are they?

Esa Vakkilainen
Professor - Sustainable energy systems
phone +358 - 40 - 357 8684
fax +358 - 5 - 621 6399
Lappeenranta University of Technology
Energy Technology
P.O. Box 20, FIN-53851 LAPPEENRANTA

Sähköpostikeskustelu sellutehdasprosessien painetasovaatimuksista.

From: Tuominen Kari [Kari.Tuominen@andritz.com]
Sent: 3. maaliskuuta 2011 9:34
To: Esa Vakkilainen; Tikka Petri
Cc: Heinola Marja
Subject: RE: sellutehtaan painetasot

Terve vielä Esa,

toinen mahdollisuus tuon happivaiheen painetasoasian ratkaisemiseksi on käyttää boosteripumppua reaktoreiden välillä. Tällöin paineeksi riittää 7 bar.

T: Kari

-----Original Message-----

From: Tuominen Kari
Sent: 01 March 2011 16:40
To: 'Esa Vakkilainen'; Tikka Petri
Cc: Heinola Marja
Subject: RE: sellutehtaan painetasot

Terve Esa,

keittämön tarvitsema painetaso on n. 7 bar (g) lehtipuulla ja 9 bar(g) havulla. Happivaihe on edelleen se, joka kuitulinjalla tarvitsee korkeimman paineen, 10-11 bar(g) riippuen vähän järjestelyistä. Tämä saattaa olla halvinta tehdä ejektorilla, jos lopputehdas pärjää pienemmällä ja saa siitä kovia säästöjä.

T: Kari

Sähköpostikeskustelu sellutehdasprosessien painetasovaatimuksista.

-----Original Message-----

From: Esa Vakkilainen [mailto:Esa.Vakkilainen@lut.fi]

Sent: 16 February 2011 11:21

To: Tikka Petri; Tuominen Kari

Cc: Heinola Marja

Subject: sellutehtaan painetasot

Tervehdys

Ohessa nykyinen versio projektista sellutehtaan painetasot. Tarkennamme vielä taloudellisia tarkasteluita.

Soodakattilayhdistyksen pyynnöstä lähestymme kysymyksillä

- mikä on keiton kannalta alin mahdollinen välipaine
- mikä on valkaisun kannalta alin mahdollinen välipaine

Vastauksia näihin ja muihinkin mahdollisiin kysymyksiin otamme vastaan mielellämme.

Esa Vakkilainen

Professor - Sustainable energy systems

phone +358 - 40 - 357 8684

fax +358 - 5 - 621 6399

Lappeenranta University of Technology

Energy Technology

P.O. Box 20, FIN-53851 LAPPEENRANTA

Matalapainetason mukaiset kannattavuuslaskelmat.

			Matalapainehöyryn paine [bar] (abs)			
			3	4	5	6
Investointi kustannukset	(10a, 12%)	[1000€/a]	-15540	-13890	-12880	-12130
Perinteinen ST	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	17025	15687	14772	13935
	Nettotulo	[1000€/a]	1 483	1 793	1 896	1 801
Perinteinen ST + kk	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	31080	29847	28855	28089
	Nettotulo	[1000€/a]	15538	15 953	15 979	15 956
Perinteinen ST + HPK	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	890	-593	-1779	-2681
	Nettotulo	[1000€/a]	-14 651	-14 487	-14 655	-14 814
Perinteinen ST + kk+ HPK	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	15055	13518	12268	11306
	Nettotulo	[1000€/a]	-487	-377	-608	-827
Moderni ST	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	19130	18040	17150	16466
	Nettotulo	[1000€/a]	3 589	4 146	4 274	4 332
Moderni ST + kk	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	33431	32256	31305	30551
	Nettotulo	[1000€/a]	17 889	18 362	18 429	18 417
Moderni ST + HPK	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	2564	1268	107	-777
	Nettotulo	[1000€/a]	-12 978	-12 626	-12 769	-12 910
Moderni ST + kk + HPK	Sähkön myyntitulot	[1000€/a]	16983	15461	14229	13292
	Nettotulo	[1000€/a]	1 442	1 568	1 353	1 158

Matalapainetason mukaiset kannattavuuslaskelmat tapauksessa, jossa kuivurin puristin osaa ei uusita painetason muutoksen yhteydessä.

			Matalapainehöyryn paine [bar] (abs)			
			3	4	5	6
Investointi kustannukset	(10a, 12%)	[1000€/a]	-14 710	-13 890	-13 280	-12 740
Perinteinen ST	sähkön myynti	[1000€/a]	17 025	15 687	14 772	13 935
	Nettotulo	[1000€/a]	2316	1793	1497	1190
Perinteinen ST + kk	sähkön myynti	[1000€/a]	16 370	15 953	15 580	15 345
	Nettotulo	[1000€/a]	16 370	15 953	15 580	15 345
Perinteinen ST + HPK	sähkön myynti	[1000€/a]	890	-593	-1 779	-2 680
	Nettotulo	[1000€/a]	-13 819	-14 487	-15 054	-15 425
Perinteinen ST + kk+ HPK	sähkön myynti	[1000€/a]	15 055	13 518	12 268	11 306
	Nettotulo	[1000€/a]	346	-377	-1007	-1438
Moderni ST	sähkön myynti	[1000€/a]	19 130	18 040	17 150	16 466
	Nettotulo	[1000€/a]	4421	4146	3876	3721
Moderni ST + kk	sähkön myynti	[1000€/a]	33 431	32 256	31 305	30 551
	Nettotulo	[1000€/a]	18 722	18 362	18 030	17 806
Moderni ST + HPK	sähkön myynti	[1000€/a]	2 564	1 268	106	-777
	Nettotulo	[1000€/a]	-12 146	-12 626	-13 168	-13 522
Moderni ST + kk + HPK	sähkön myynti	[1000€/a]	16 983	15 462	14 229	13 292
	Nettotulo	[1000€/a]	2274	1568	955	547

Rinnakkaisten välipaineputkistojen laskennan arvot ja tulokset.

Höyryn arvot:		
Paine	[bar](abs)	9
Lämpötila	[°C]	203
Tiheys	[kg/m ²]	4.3
Nopeus	[m/s]	30

Putkisto:							
Laskentajännitys 350 N/mm ²					Varmuuskertoimen 1.3		
Massavirta [kg/s]	Pituus [m]	Halkaisija [mm]	Seinämän paks. [mm]	Kokonaispaino [kg]	Putkist.hinta [€]	Kokonaiskust. [€]	Vuosi- lyhennys [€]
0	800	0	0.0	0	0	0	0
1	800	100	1.7	3308	19846	219846	-38 909
2	800	140	2.4	6566	39399	239399	-42 370
3	800	170	2.9	9739	58436	258436	-45 739
4	800	200	3.4	13231	79384	279384	-49 447
6	800	245	4.2	19850	119101	319101	-56 476
8	800	280	4.8	26195	157172	357172	-63 214
10	800	315	5.4	32948	197689	397689	-70 385

Sähkö:						
Massavirta	Tuotanto	Kulutus	Myyntiin	Sähkön myynti	Erotus	Muutos vertailutasoon
[kg/s]	[MW]	[MW]	[MW]	[M€]	[€]	[€]
0	93.6	52.36	41.25	15.65	0	0
1	93.7	52.36	41.29	15.67	15177	-23706
2	93.7	52.37	41.32	15.68	26560	-15810
3	93.7	52.37	41.36	15.69	41737	-4119
4	93.8	52.37	41.40	15.71	56914	7571
6	93.9	52.38	41.47	15.73	83474	27158
8	93.9	52.40	41.51	15.75	98651	35362
10	94.0	52.40	41.59	15.78	129006	58744

Tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen kyselyyn käytettävistä painetasoista ja syistä tasojen valintaan.

Tehdas	Oy Metsä-Botnia Ab Rauman tehdas	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	Startti 1996. Siirtyminen ECF-valkaisuun 2007	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	92	490
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry	28	340
Välipaine	11	200
Välipaine 2	-	-
Matalapaine	3.45-3.6	150
Matalapaine 2	-	-
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: Sellutehtaalla yhteinen matalapaineverkko viereisen paperitehtaan kanssa. 3,5 bar valittu ilmeisesti sellu- ja paperikoneprosessien mukaan. Tällä hetkellä paine joko 3,45 bar (kun paperitehtaallemenevä väliventtiili säätää) tai 3,6 bar (kun apulauhdutin säätää). Tämän hetkisen painetason määräävät melko samanaikaisesti samanaikaisesti turbiini (minimi ulostulopaine), haihuttamo (1D:n kapasiteetti) sekä keittämö (valkolipeä- ja mustalipeälämmönvaihtimien kapasiteetti). Nuohoushöyrylle 28 bar toimii nykyisillä vanhanaikaisilla (vanhat diamondit) nuohoimilla. Siirtymällä gemini-putkiin voitaisiin päästä alaspäin.		

Tehdas	Enocell Oy	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	1992	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	81	480
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry	25	?
Välipaine	12	194
Välipaine	12	194
Välipaine 2	-	-
Matalapaine	5	150
Matalapaine 2	-	-
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	0.0059	38
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: haihuttamon ja keittämön kapasiteetit		

Tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen kyselyyn käytettävistä painetasoista ja syistä tasojen valintaan.

Tehdas	Botnia Joutseno	
Käyttöönottovuosi (suurimmat uudistukset)	1998	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	93	491
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry	24	335
Välipaine	10,5	213
Välipaine 2	6,8	195
Matalapaine	3,5	146
Matalapaine 2	-	-
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: Matalapaineverkon paineen laskua rajoittaa haihduttamo.		

Tehdas	MB Äänekoski	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	1985, kattilarevisio 2004	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	83.2	479
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry	33	380
Välipaine (turbiinilta)	12.3	295
Välipaine 2 (tukilta, ruisk. jälkeen)	11.8	210
Matalapaine (turbiinilta)	4.3-4.5	168-170
Matalapaine 2 (tukilta)	4.1-4.4	160-165
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: Välipaine ja matalapainetasot kulutuskohteiden mukaan: keitin vaatii korkean välipaineen, kuivakone ja haihduttamo matalapaineen. Haihduttamo voisi ajaa pienemmällä paineella, mutta kap pienenee --> höyrystys pienenee --> sähköntuotanto pienenee. Nykyisen painetaso voitot/tappiot on +/- 0		

Tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen kyselyyn käytettävistä painetasoista ja syistä tasojen valintaan.

Tehdas	MB Kemi	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	Soodakattila 1990 Turbiini tg5 1996 Höyryverkosto 1970-2010	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	84	480
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry	28	370
Välipaine	12.5	200
Välipaine 2	9	200
Matalapaine	3.5	155
Matalapaine 2	-	-
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-0.6	76
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: Kartonki koneen ja kuivauskoneen vaatimat paineet		

Tehdas	UPM Pietarsaaren sellutehdas	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	2004	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	102	505
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry, tulistin	27	335
keittopinta ja ekot	16	260
Välipaine	17	260
Välipaine 2	11.5	215
Matalapaine	5.5	180
Matalapaine 2	3.5	148
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: Sähkön hinnan kehitys à tuorehöyrylle, Välipaine ja matalapaine à koneiden, keittämön ja haihduttamon vaatimuksien mukaan.		

Tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen kyselyyn käytettävistä painetasoista ja syistä tasojen valintaan.

Tehdas	Varkauden tehdas	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	1980 soodakattila: tehon nosto 76 MW --> 102 MW 06/1988 tehon nosto 102 MW --> 121.7 MW 12/1988 sulakourun puoleinen pohja ja takaseinän alaosa uusittu 1996 3-tulistin uusittu 1997 kattopukisto uusittu 1998 1-tulistin uusittu 1999 2-tulistin uusittu 2005 vertikaali-ilmajärjestelmä 2007 höyry-vesikierron kasvattaminen lisäämällä lieriöön syklooneja 42 --> 44 kg/s 2008	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry Soodakattilalta	64	475
Tuorehöyry 2 Kuorikattilalta	110	535
Nuohoushöyry	30	350
Välipaine	17	280
Välipaine 2	8	275
Vastapaine	4	185
Matalapaine	2	175
Muu höyry (esim.lauhdeperä)	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: PK3 kuivaussylinterit 4 bar Haihduttamo 4 bar		

Tehdas	UPM-Kymmene, Kymi		
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	Talteenottolaitos 2008		
Painetasot	Nimellispaine bar (g)	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry (SK3)	102	100	500
Tuorehöyry 2 (Kymin Voima)	114	114	540
Nuohoushöyry (SK3 turb. välipaine)	28	24	305
Välipaine (SK3 turb.)	13.5	13.7	240
Välipaine 2	-	-	-
Matalapaine (SK3 vastap.höyry)	5	4.6	160
Matalapaine 2	3.5	3.9	160
Muu höyry: Kymin Voima kaukolämpöperä	-	-0.64	78
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan:	-paperikoneiden kuivauskapasiteetti -keittimien vaatimukset		

Tehtaiden vastaukset Suomen Soodakattilayhdistyksen kyselyyn käytettävistä painetasoista ja syistä tasojen valintaan.

Tehdas	Oulu			
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C	Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	Kommentti
Tuorehöyry Soodakattila	84	480	1988	-
Tuorehöyry 2 (Leijukattila)	80-100	max 525	1997	Ajetaan yleensä samassa verkossa soodakattilan kanssa.
Nuohoushöyry	24	335	-	Turbiinin väliotto
Välipaine	10.8	220	-	-
Välipaine 2	-	-	-	-
Matalapaine	2.8	142		Kylläinen
Matalapaine 2	-	-	-	-
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-	-	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan:	Tuorehöyryb arvot tyypilliset 80 luvulle. Nohoushöyryn paine myös aikana nuohoin tekniikan valinta Välipainehöyryn paine tason määrännyt monta asiaa. Jatkuvan keittimen maksimi painetarve, Happi vaiheen vaatima maksimi paine ja lämpötila ja mäntyöljy tislamon vaatimukset. Vastapaine paine optimoitiin kun lipeälinja / haihduttamo / voimalaitos uusitiin 1988 ja sen kuivauskone oli jo aiemmin rakennettu ko paineellein. Myöhemmin paperikoneiden rakentamisen yhteydessä on painetaso aina tarkistettu ja todettu että uusin kone on järkevintä rakentaa sähkön tuotanto maksimi moiden alkaen jo aiemmin valitusta painetasosta			

Tehdas	Storaenso Oyj, Sunilan tehdas	
Käyttöönottovuosi (suurimmat muutokset)	Pääkattilat: SK10 1965, SK11 1988	
Painetasot	Paine bar (g)	Lämpötila °C
Tuorehöyry	63	480
Tuorehöyry 2	-	-
Nuohoushöyry	35	300
Välipaine	10	280
Välipaine 2	-	-
Matalapaine	2.5	160
Matalapaine 2	-	-
Muu höyry (esim. lauhdeperä)	-	-
Tärkeimmät syyt nykyisten painetasojen valintaan: Historia		

Esimerkki talteenottolinjan ja kuivauskoneen uusinnan kustannuslaskelmista.

[illegible]

Haihduttamon investointilaskelmat

Wood		Mixed							
No of effects		7							
Black liquor side heat transfer area				p_steam	bar	3	4	5	6
HD	m2					BPR	BPR	BPR	BPR
Eff 1A+1B+1C	m2	21300							
					78 %	19.6	19.6	19.6	19.6
Eff II	m2	8900			55 %	8	8	8	8
Eff III	m2	7470			40 %	5	5	5	5
Eff IV	m2	7000			25 %	3	3	3	3
Eff V	m2	6850			21 %	2.5	2.5	2.5	2.5
Eff VI	m2	7000			18 %	1.5	1.5	1.5	1.5
Eff VII	m2	7000			15 %	1	1	1	1
Sum	m2	65520							
Sum II-IV	m2	44220				40.6	40.6	40.6	40.6
Feed liquor dry solids	%	14.2							
Virgin liquor dry solids	%	85							
Evaporation									
	tH2O/h	950							
				p_steam	bar	3	4	5	6
Specific loading	kg H2O/m	14.49939		T_sat	oC	133.5	143.6	151.8	158.8
Primary condensor	m2	2300							
Secondary condensor	m2	3000		T_hönkä	oC	55	55	55	55
Sum Condensor	m3	5300		(pintalauhdutin)					
LP-steam									
	kg/s	37.7							
	MJ/tH2O	338.5443		dT_over.	oC	78.5	88.6	96.8	103.8
MP-steam	kg/s	9.6		dT	oC	35.0	45.0	53.3	60.3
	MJ/tH2O	86.17323		dT/period	oC	5.0	6.4	7.6	8.6
Total steam	MJ/tH2O	424.7176							
Cooling water				Area diff.	%	128.8 %	100.0 %	84.6 %	74.7 %
	in oC	25		Area´	m2	75272.5	58420.0	49402.6	43668.2
	out oC	50		INV corr.	%	83.7 %	100.0 %	112.5 %	122.6 %
Electricity	kW	1870		squar.price	€/m2	418.7	500.0	562.3	613.0
				INV	k€	31517.7	29210.0	27777.2	26767.8
Calculated Evaporator	35000 k€			Diff.	k€	0.0	2307.7	3740.5	4749.9
	0.300 k€/m2								