LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen Tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Ossi Ikonen

BIOVOIMALAITOKSEN ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN JA OSAKUORMA-AJON OPTIMOINTI

Tarkastajat: Professori, TkT EsaVakkilainen
Tutkimusassistentti, DI Kari Luostarinen

Ohjaaja: DI Jukka Kiuru

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Ossi Ikonen

Biovoimalaitoksen energiatehokkuuden parantaminen ja osakuorma-ajon optimointi

Diplomityö

2013

107 sivua, 55 kuvaa, 17 taulukkoa, 5 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
Tutkimusassistentti, DI Kari Luostarinen

Ohjaaja: DI Jukka Kiuru

Hakusanat: energiatehokkuus, voimalaitos, hyötysuhde, sähkö
Keywords: energy efficiency, power plant, efficiency, electricity

Energiatehokkuus on nykyaikana yksi tärkeimmistä energiataloudellisista tekijöistä voimalaitosten sähköntuotannossa. Varsinkin yhteistuotantolaitoksissa joissa sähkö on lämpöenergian lisänä saatava sivutuote, sähkön tuotannon optimointi voi merkitä laitostalouden ja yrityksen kannalta huomattavia lisätuloja tai -säästöjä.

Kaukaan Voima Oy:n biovoimalaitos on vuonna 2009 kaupalliseen käyttöön valmistunut moderni yhteistuotantolaitos, joka sijaitsee Lappeenrannassa UPM Kaukas sellutehtaan tehdasalueella. Voimalaitos tuottaa kaukolämpöä ja sähköä Lappeenrannan kaupungille sekä prosessihöyryä ja sähköä UPM Kaukaan tehtaille.

Tämän työn tavoitteena on tarkastella biovoimalaitoksen omakäyttösähkön kulutusta kuukausitasolla verrattuna laitoksella tuotettavan höyryn määrään sekä etsiä voimalaitokselta kohteita, joiden omakäyttösähkön kulutusta voidaan vähentää vaikuttamatta höyryntuotantoon ja näin parantaa laitoksen energiatehokkuutta ja hyötysuhdetta. Työ rajataan käsittelemään voimalaitoksen apulaitteiden ja -järjestelmien omakäyttösähkön kulutusta. Työssä tarkastellaan vuodenaikojen vaihtelun ja kaukolämmön sekä prosessihöyryn tarpeen muutoksen vaikutusta voimalaitoksen ajomalliin sekä höyryntuotannon ja omakäyttösähkön kulutuksen suhteisiin.

Työssä esiin nousseiden kohteiden potentiaaliset sähköenergian säästöt ovat noin 2500 MWh vuodessa joka tarkoittaa keskimäärin 3,7 % vähennystä voimalaitoksen kuukausittaiseen omakäyttösähkön kulutukseen. Kohteet eivät käytännössä vaadi minkaanlaista investointirahaa, vaan uusia ajojärjestelyitä. Keskeisimmiksi säästökohteiksi valikoitui laitoksen pumppausjärjestelmien paineenalennukset.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Program of Energy Technology

Ossi Ikonen

Improving energy efficiency of biomass power plant and optimizing partial-load operation

Master's thesis

2013

107 pages, 55 figures, 17 tables, 5 appendixes

Examiners: Prof. (Tech) EsaVakkilainen
M.Sc (Tech) Kari Luostarinen

Supervisor: M.Sc (Tech) Jukka Kiuru

Hakusanat: energiatehokkuus, voimalaitos, hyötysuhde, sähkö
Keywords: energy efficiency, power plant, efficiency, electricity

Energy efficiency is nowadays one of the most important economical aspects in electricity production of power plants. Especially in combined heat and power-plants optimization of electricity production of the plant can result in significant additional income or savings.

Kaukaan Voima Oy's biomass power plant is modern combined heat and power-plant located at UPM-Kymmene paper mill site in Lappeenranta. The plant was taken in commercial operation in the year 2009. The plant produces distrcit heat and electricity for the city of Lappeenranta and process steam and electricity for the paper mill site.

The purpose of this study is to examine power demand of the biomass power plant auxiliaries compared to the steam generation of the boiler and to search potential targets for energy savings without affecting to the steam generation and thus to improve the energy efficieny of the plant. The study examines effect of seasonal changes to the need for district heat of the city and process steam of the mill. Monthly changes in the needs are compared to the operation model of power plant and to the ratio of steam generation and auxiliary equipment power consumption.

Targets for energy savings found in this study have potential of savings of approximately 2500 MWh per year which means on the average 3,7 % reduction to the monthly auxiliaries power consumption. Targets do not require any investment costs, just new adjustments to the operation of the plant. Pressure drops of water pumping systems of the plant were selected as key targets for the savings.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Kaukaan Voima Oy:lle Lappeenrannassa UPM Kaukaan tehtaalla aikavälillä 1.6. - 30.11.2013. Haluan kiittää kaikkia työni avustamiseen osallistuneita henkilöitä UPM Kaukaan tehtaalla, Lappeenrannan Energiassa sekä Foster Wheeler Oy:ssä.

Eritoten kiitokseni mielenkiintoisesta aiheesta kuuluvat työn ohjaajalle Jukka Kiurulle, joka on diplomityön ohjaamisen lisäksi avannut laajasti näkemystäni energiatekniikan yritysmaailmasta ja siinä toimimisesta. Koko työaikani Kaukaan Voimalla on ollut erittäin opettavaista ja antoisaa. Kiitän myös työn tarkastajia Kari Luostarista sekä varsinkin Esa Vakkilaista arvokkaista neuvoista diplomityön sekä koko muun tutkintoni aikana.

Suurimmat kiitokseni tutkintoni suorittamisessa menevät kuitenkin opiskelukavereilleni, joiden kanssa opiskelijaelämä ja viimeiset 5 vuotta Lappeenrannassa ovat olleet tähän astisen elämäni parasta aikaa. Liikaa ei koskaan voi myöskään kiittää perhettäni jatkuvasta tuesta läpi koko elämän.

Lappeenrannassa 12.12.2013
Ossi Ikonen

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO 5
1 JOHDANTO 7
2 KAUKAAN VOIMA:N TOIMINTAYMPÄRISTÖ 9
2.1 Pohjolan Voima 9
2.2 Lappeenrannan Energia 10
2.3 UPM Kaukaan tehtaat 12
2.3.1 Kaukaan tehtaiden energiatase 13
3 SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTO 17
3.1 CHP-höyryvoimalaitoksen toimintaperiaate 17
3.1.1 Kaukolämpövoimalaitos 18
3.1.2 Teollisuuden vastapainevoimalaitos 20
3.2 Leijukerrospoltto 22
3.2.1 BFB-kattila 23
3.2.2 CFB-kattila 25
3.2.3 Biopolttoaineet leijukerrospoltossa 28
4 VOIMALAITOKSEN HYÖTYSUHDE 30
4.1 Kokonaishyötysuhde 30
4.2 Omakäyttöhyötysuhde 31
4.3 Rakennusaste 32
5 KAUKAAN VOIMA:N BIOVOIMALAITOKSEN PROSESSIKUVAUS 33
5.1 Polttoainejärjestelmät 34
5.1.1 Polttoaineet ja niiden hankinta 34
5.1.2 Polttoaineenkäsittely ja kuljettimet 35
5.1.3 Syöttöjärjestelmä 35
5.2 Kattilalaitos 36
5.2.1 Palamisilmajärjestelmä 38
5.2.2 Savukaasujärjestelmä 38
5.2.3 Vesijärjestelmä 39
5.2.4 Tuhkajärjestelmä 39
5.2.5 Ilmapäästöjen hallinta 39
5.3 Turbiinilaitos 40

5.3.1 Höyryjärjestelmä ... 40
5.3.2 Kaukolämpöjärjestelmä ... 41
5.3.3 Lauhde- ja jäähdytysjärjestelmä ... 42
5.4 Käytöntarkkailu ja säätö ... 42
6 KAUKAAN VOIMA:N ENERGIANTUOTANTO ... 44
6.1 Energiatase ... 44
6.2 Polttoainehuolto ... 46
6.2.1 Ulkoisten polttoinejakeiden määrä ... 49
6.2.2 Kaukaan tehtaan polttoainejakeiden määrä ... 49
6.2.3 Sahan toimittaman polttoainemäärän hallinta ... 49
7 OMAKÄYTTÖSÄHKÖN TARKASTELU ... 52
7.1 Ajokuorma ja tuotettu energia eri vuodenaikoina ... 52
7.2 Tuotettu sähköteho ja omakäyttöhyötysuhde ... 56
7.3 Suurimmat omakäyttösähkön kuluttajat ... 61
7.4 Ajokuorma ja osastojen kuluttama sähköteho ... 62
7.4.1 Syöttövesipumput ... 62
7.4.2 Vesilaitoksen pumput ... 63
7.4.3 Primääri-ilmapuhaltimet ... 64
7.4.4 Sekundääri-ilmapuhallin ja korkeapaineilmapuhaltimet ... 66
7.4.5 Savukaasulinjat 1 ja 2 ... 66
7.4.6 Biopolttoaineen käsittely ... 68
7.4.7 Kattilan polttoainejärjestelmä ... 68
7.4.8 Kaukolämpöpumput ja turbiinin apulaitteet ... 69
7.4.9 Valaistus ja LVI ... 70
8 ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN ... 72
8.1 Tehon määritys ... 72
8.2 Koeajot ja mittaukset ... 74
8.2.1 Yhden savukaasulinjan ajomalli osakuormalla ... 74
8.2.2 Metsäenergiamurskan käyntiajan tehostaminen ... 80
8.3 Teoreettiset tarkastelut ... 84
8.3.1 Makrovesiverkon paineenalennus ... 85
8.3.2 Lähtevän kaukolämpöveden paineenalennus ... 89
8.3.3 Syöttövesipumpun tehon kulutus osakuorma-ajossa ... 95

8.4 Energiansäästöt yhteensä vuodessa 100
9 KEHITYSKOHTEET JATKOSSA 102
10 YHTEENVETO 104
LÄHTEET 106

LIITTEET

Liite 1. Sahan kuorimäärätestin tulokset ja kuorimäärän laskenta.

Liite 2. Savukaasupuhaltimen ominaiskäyrä.

Liite 3. Makrovesipumppu 6:n ominaiskäyrä.

Liite 4. KL-kiertopumpun ominaiskäyrä.

Liite 5. Syöttövesipumpun ominaiskäyrä.

SYMBOLILUETTELO

P	teho	[MW]
Φ	lämpöteho	[MW]
Q	lämpöarvo, teho	[MJ/kg, MW]
$\dot{m}$	massavirta	[kg/s]
t	lämpötila	[°C]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
r	rakennusaste	[%]
η	hyötysuhde	[%]
M	kosteus	[%]
ρ	tiheys	[kg/m^3]
H	nostokorkeus	[m]
g	putoamiskiihtyvyys	[m/s^2]
p	paine	[Pa]
q_v	tilavuusvirta	[m^3/s]
U	jännite	[V]
I	virta	[A]
T	vääntömomentti	[Nm]
ω	kulmanopeus	[rad/s]
n	pyörimisnopeus	[1/s]

Lyhenteet

NO_x	typenoksidi
SO_2	rikkidioksidi
O_2	happi

CO	hiilimonoksidi
CO_2	hiilidioksidi
$CaCO_3$	kalsiumkarbonaatti (kalkki)
$CaSO_4$	kalsiumsulfaattidihydraatti (kipsi)

Alaindeksit

th	lämpö
e	sähkö
netto	nettosähkö
brutto	bruttosähkö
pr	prosessihöyry
kl	kaukolämpö
net,ar	saapumistila
net,d	kuiva-aine
tot	kokonais
ok	omakäyttö
kat	kattila
mg	generaattori- ja laakeri
put	putkisto
sk	savukaasu
0	referenssi
pa	polttoaine
e	esilämmitys
in	sisään
sm	sähkömoottori

1 JOHDANTO

Energiatehokkuus on nykyaikana yksi tärkeimmistä energiataloudellisista tekijöistä voimalaitosten sähköntuotannossa. Varsinkin yhteistuotantolaitoksissa joissa sähkö on lämpöenergian lisänä saatava sivutuote, sähkön tuotannon tai kulutuksen optimointi voi merkitä laitostalouden ja yrityksen kannalta huomattavia lisätuloja tai -säästöjä.

Kaukaan Voima Oy:n biovoimalaitos on vuonna 2009 kaupalliseen käyttöön valmistunut moderni yhteistuotantolaitos, joka sijaitsee Lappeenrannassa UPM Kaukas sellutehtaan tehdasalueella. Voimalaitos tuottaa kaukolämpöä ja sähköä Lappeenrannan kaupungille sekä prosessihöyryä ja sähköä UPM Kaukaan tehtaille.

Kaukolämpövoimalaitosten ajokuorma riippuu vuosittain vahvasti kaukolämpöverkon alueella vallitsevasta ulkoilman lämpötilasta. Suomessa suuret kaukolämpökuorman tarpeet ajoittuvat talven pakkaskuukausille, ja keväästä syksyyn voimalaitokset ajavat usein osakuormaa. Teollisuusprosessien lämmityshöyryn tarve puolestaan on myös suurimmillaan talvikuukausina, sillä prosessikierroissa käytettävä vesi otetaan suoraan lähivesistöistä joiden lämpötila on talvella alhaisimmillaan. Osakuorma-ajo asettaa haasteita voimalaitosten ohjaukselle ja hyötysuhteiden optimoinnille.

Tämän työn tavoitteena on etsiä Kaukaan Voiman voimalaitokselta kohteita, joiden omakäyttösähkön kulutusta voidaan vähentää ja näin parantaa laitoksen energiatehokkuutta ja hyötysuhdetta. Työ rajataan käsittelemään voimalaitoksen apulaitteiden ja -järjestelmien energiankulutusta. Työssä käydään aluksi läpi biovoimalaitoksen prosessikuvaus, laitteisto, polttoaineiden käyttö ja hankinta sekä energiatase. Työssä tarkastellaan vuodenaikojen vaihtelun ja kaukolämmön sekä prosessihöyryn tarpeen muutoksen vaikutusta voimalaitoksen ajomalliin sekä höyryntuotannon ja omakäyttösähkön kulutuksen suhteisiin.

Voimalaitoksen omakäyttösähkön kulutusta tarkastellaan osastokohtaisesti vuoden ajalta ja tunnistetaan alueet, joissa omakäyttötehoa kuluu osakuorma-ajossa paljon. Osastojen tarkastelussa keskitytään suurimpiin ja jatkuvakäyttöisiin kuluttajiin, joita ovat pääasiassa voimalaitoksen suuret pumput ja puhaltimet. Myös polttoaineen

käsittelyjärjestelmän energiankulutusta sekä polttoainehuoltoa ja sen vaikutusta voimalaitoksen energiatehokkuuteen tarkastellaan.

Tarkasteludatana käytetään voimalaitoksen prosessinohjausjärjestelmän historiatietoihin jatkuvasti kirjautuvia mittauspositioita. Tarkasteludatan, voimalaitoksen henkilökunnan haastattelujen ja laitetoimittajien kirjallisuuden perusteella tunnistetaan potentiaaliset energiansäästökohteet, jotka otetaan syvempään tarkasteluun. Kohteiden tutkinta jaetaan kahteen osaan: laitoksella suoritettavat koeajot ja mittaukset sekä kirjallisuuteen pohjautuvat teoreettiset tarkastelut.

Syvempään tarkasteluun valituista kohteista tehdään optimointiarvio. Optimointiarviossa tutkitaan, onko kohteen energiatehokkuuta mahdollista parantaa käytännön menetelmien ja säätötapojen puitteissa sekä lasketaan kuinka suuri sähköenergian säästö voidaan vuositasolla saavuttaa. Tutkitut kohteet dokumentoidaan toteutettavia toimenpiteitä sekä jatkokehitystä varten.

2 KAUKAAN VOIMA:N TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Kaukaan Voima Oy eli KauVo on Pohjolan Voiman, Lappeenrannan Energian ja UPM:n toteuttama yhteishanke. KauVo:n omistusosuudet ovat Pohjolan Voima Oy 54 % ja Lappeenrannan Energia Oy 46 %. KauVo:n biovoimalaitos sijaitsee Lappeenrannassa, UPM Kaukas sellutehtaan tehdasalueella ja sen käytön hoitaa UPM:n henkilökunta. (Pohjolan Voima 2010, 2)

Tässä kappaleessa esitellään KauVo:n toimintaympäristön yritykset sekä biovoimalaitoksen energiantuotannon osuus näiden yritysten energianhankinnasta ja polttoaineiden käytöstä vuonna 2012.

2.1 Pohjolan Voima

Pohjolan Voima (PVO) on vuonna 1943 perustettu energiayhtiö. Sen perustajat olivat suomalaisia metsäteollisuusyhtiöitä, jotka tarvitsivat toiminnassaan sähköä. Yksikään osakas ei pystynyt kattamaan suurten voimlaitosten rakennuksen kustannuksia, joten energian tuotanto päätettiin keskittää ja kustannukset jakaa. Vuosikymmenien aikana Pohjolan Voimasta on kasvanut osaamiseltaan ja tuotantorakenteeltaan monipuolinen energiatalo.

Pohjolan Voimalla on nykyään 21 osakasta. Osakkaita ovat suomalaiset vientiteollisusyritykset, energiayhtiöt sekä kaupungit. Taulukossa 1 on esitetty Pohjolan Voiman osakkaat toimialoittain. Pohjolan Voiman liiketoimintamalli perustuu omakustannusperiaatteeseen, eli yhtiö tuottaa sähköä ja lämpöä osakkailleen omakustannushintaan. Osakkaat vastaavat osuuksiensa mukaisesti toiminnan kustannuksista.

Taulukko 1. PVO:n osakkaat toimialoittain. (PVO 2012)

Osakkaat toimialoittain	Omistus [%]
Metsäteollisuus	62,0
Energiayhtiöt	21,3
Kaupungit	6,8
Kemianteollisuus	5,6
Muut	4,2
Yhteensä	**100,0**

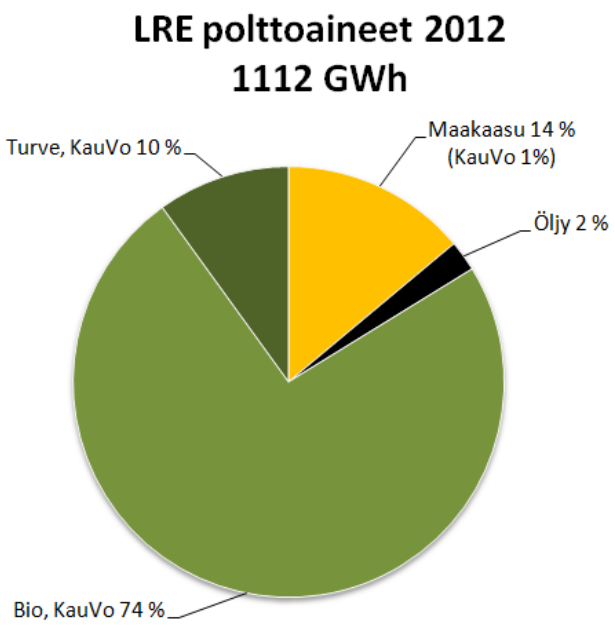
Pohjolan Voiman toiminnan painopisteitä ovat vesivoima, lämpövoima ja ydinvoima. Noin 80 prosenttia Pohjolan Voiman tuotannosta on hiilidioksidipäästötöntä. Yhtiön tavoitteena on määrätietoisilla investoinneilla nostaa hiilidioksidipäästöttömän tuotannon osuus 90 prosenttiin vuoteen 2015 mennessä. Viimeisen kymmenen vuoden aikan Pohjolan Voima on investoinut vesi- lämpö- ja ydinvoimaan lähes 4 miljardia euroa. (Pohjolan Voima 2012, 1)

2.2 Lappeenrannan Energia

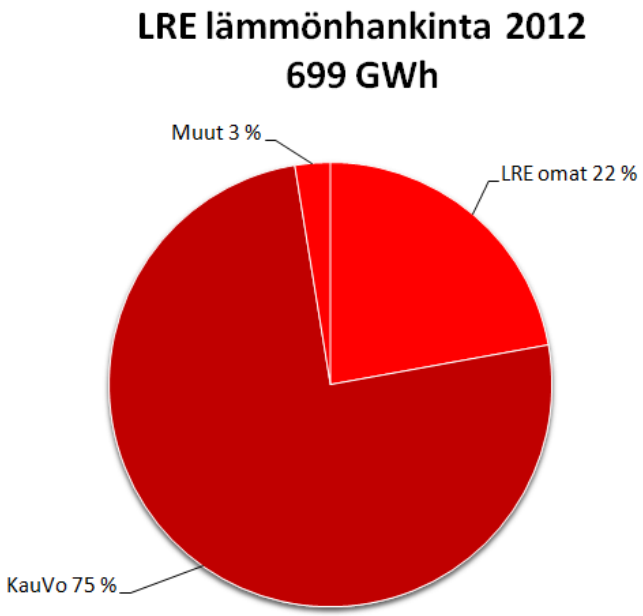
Lappeenrannan Energia on Lappeenrannan kaupungin omistama vuonna 1901 perustettu energiayhtiö. Lappeenrannan Energia -konserni muodostuu Lappeenrannan kaupungin kokonaan omistamasta emöyhtiöstä Lappeenrannan Energia Oy:sta, sekä emoyhtiön kokonaan omistamista tyäryhtiöistä Lappeenrannan Energiaverkot Oy, Lappeenrannan Verkonrakennus Oy ja Lappeenrannan Lämpövoima Oy. Lappeenrannan lämpövoima yhdistettiin Lappeenrannan Energiaan vuoden 2003 alusta alkaen, jolloin myös osakeyhtiömuotoinen toiminta alkoi. Lappeenrannan Energiaverkot Oy ja Lappeenrannan Verkonrakennus Oy aloittivat toimintansa vuoden 2006 alussa.

Lappeenrannan Lämpövoima tuottaa sähköä, kaukolämpöä ja höyryä ja sen vastuulle kuuluvat myös tuotantolaitosten käyttö ja kunnossapito. Lämpövoimaan kuuluu kaksi maakaasuvoimalaitosta, vuonna 1975 toimintansa aloittanut Mertaniemi 1 ja vuonna 1977 valmistunut pääyksikkö Mertaniemi 2. Laitos on kombivoimalaitos, ja se koostuu yhdestä höyryturbiinista ja kahdesta kaasuturbiinista. Mertaniemen laitosten lisäksi yhtiö huolehtii viidestätoista lämpökeskuksesta ja kolmestä höyrykeskuksesta. (Lappeenrannan Energia 1, 2013)

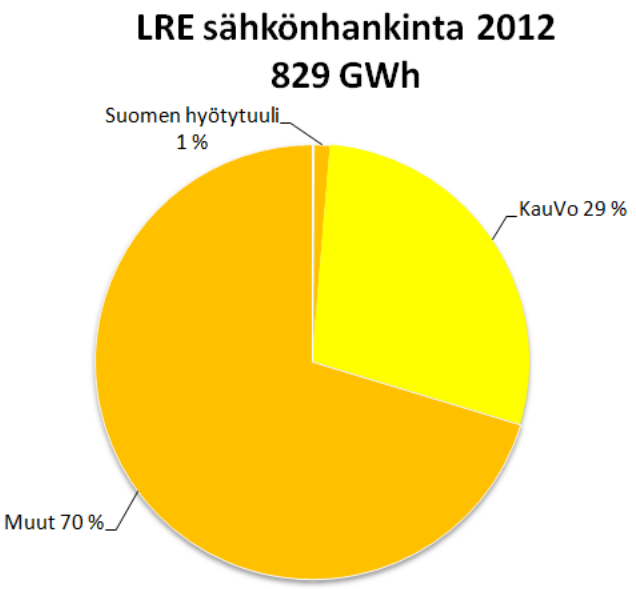
Lappeenrannan Energian käytetyt polttoaineet vuonna 2012 on esitettynä kuvassa 1, hankittu lämpöenergia kuvassa 2 ja hankittu sähköenergia kuvassa 3.



Kuva 1. Lappeenrannan Energian käytetyt polttoaineet vuonna 2012.



Kuva 2. Lappeenrannan Energian lämmönhankinta vuonna 2012.



Kuva 3. Lappeenrannan Energian sähkönhankinta vuonna 2012.

Kuvista nähdään että KauVo:n osuus Lappeenrannan Energian käytetyistä polttoaineista vuonna 2012 oli yhteensä 85 %. Vastaavasti KauVo tuotti 75 % kaukolämmön hankinnasta sekä 29 % sähkönhankinnasta.

2.3 UPM Kaukaan tehtaat

UPM Kymmene Oyj on maailman suurimpia metsäteollisuusyhtiöitä. UPM syntyi syksyllä 1995, kun Kymmene Oy ja Repola Oy sekä sen tytäryhtiö Yhtyneet Paperitehtaat Oy ilmoittivat yhdistymisestään. Nykyään UPM:lla on kuusi liiketoiminta-aluetta: UPM Biorefining, UPM Energy, UPM Raflatac, UPM Paper Asia, UPM Paper ENA Eurooppa ja Pohjois-Amerikka sekä UPM Plywood. (UPM 2013, 1)

UPM Kaukaan tehdas sijaitsee Lappeenrannassa Saimaan rannalla. Tehdasalueella toimii useita UPM:n tuotantolaitoksia ja yksiköitä kuten sellutehdas, paperitehdas, saha, tutkimuskeskus sekä KauVo:n biovoimalaitos. Integraatti mahdollistaa tehokkaan puuraaka-aineen käytön, energiahuollon ja logistiikan. Kuvassa 4 on esitetty UPM kaukaan tehtaiden tuotantoyksiköt tehdasalueella. KauVo:n biovoimalaitos on merkattu kyseisessä kuvassa numerolla 30.

Kaukaan tehdasalueen kartta
N
W
E
S
0 100 200 300 400 500m
S a i m a a
UPM Lappeenranta
Biojalostamo-projekti
Puuportintie
Tehtaantie
Puuterminaali
Puuterminaali
Puuportti
Puuportti
Puuportti
Puuterminaali
Puuterminaali
Puuterminaali

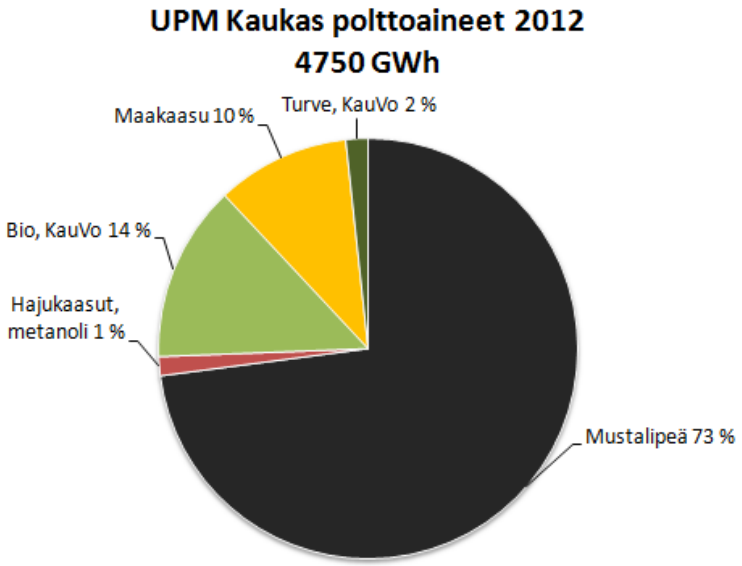
kantoja, metsätähteitä ja muita puuperäisiä polttoainetta sekä turvetta. Vara- ja käynnistyspolttoaineina käytetään maakaasua. Myös osa Kaukaan tehtaiden biolietteestä hävitetään polttamalla se kattilassa. (Pohjolan Voima 2010, 1)

Ennen KauVo:n biovoimalaitoksen rakentamista Kaukaan tehtaiden energiantuotanto hoidettiin seuraavilla yksiköillä:

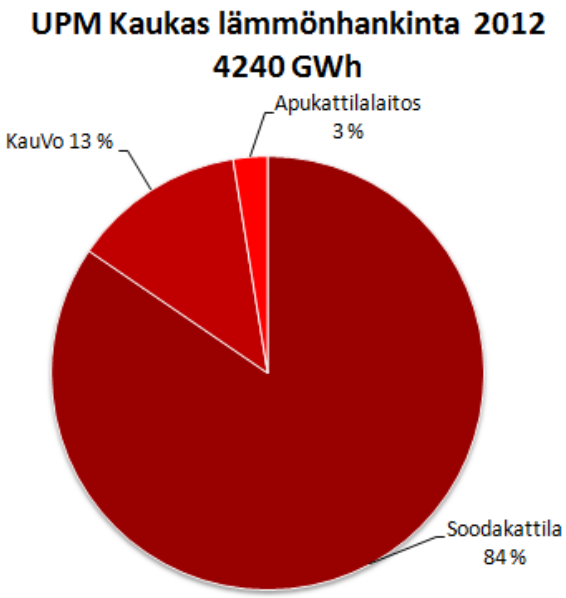
1) Soodakattila, polttoaine: mustalipeä, maakaasu, liete ja kevytöljy.
2) KK1, polttoaine: puupolttoaine, liete, maakaasu, raskasöljy.
3) Hajukaasukattila, polttoaine: hajukaasut, metanoli ja maakaasu.
4) Kaasuturbiinilaitos, polttoaine: maakaasu.
5) Apukattilalaitos, polttoaine: maakaasu.

Nykyisin näistä toimintansa on lopettanut KK1 sekä kaasuturbiinilaitos. Pääkattiloina toimivat tällä hetkellä biokattila ja soodakattila, jotka käyvät huoltoseisokkeja lukuun ottamatta yhtäjaksoisesti ympäri vuoden. Lisäksi KauVo:n biokattila on seisokissa kesäisin ylimääräisen ajan huoltojakson jälkeen, kun kaukolämpökuormaa Lappeenrannan kaupungille ei tarvita. Energiantuotannolla mitaten soodakattilan osuus Kaukaan energiantuotannosta on edelleen ylivoimaisesti suurin. Höyryn tarpeen mukaan energiantuotantoon otetaan tarvittaessa mukaan kolmesta tulitorvikattilasta koostuva apukattilalaitos.

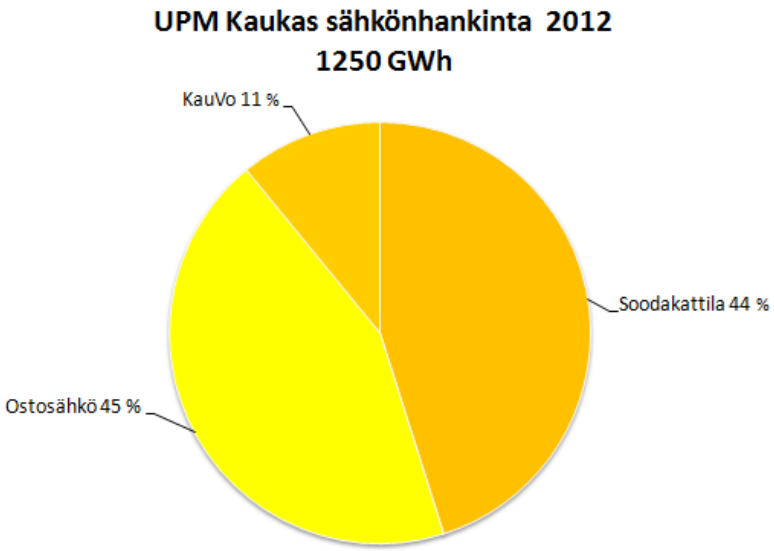
Kaukaan tehtaiden käytetyt polttoaineet vuonna 2012 on esitettynä kuvassa 5, hankittu lämpöenergia kuvassa 6 ja hankittu sähköenergia kuvassa 7. Kuviin merkatut KauVo:n osuudet tehtaiden polttoaineista ja energiantuotannosta ovat UPM:n osuuksia biovoimalaitoksen polttoaineista ja tuotannosta.



Kuva 5. UPM Kaukaan polttoaineet vuonna 2012.



Kuva 6. UPM Kaukaan lämmönhankinta 2012.



Kuva 7. UPM Kaukaan sähkönhankinta 2012.

Biovoimalaitoksen UPM:n osuuden polttoaineenkulutus vastaa noin 15 % koko tehtaiden polttoainetarpeesta. KauVo toimittaa tehtaiden vuotuisesta lämmöntarpeesta noin 13 % ja sähköntarpeesta 11 %. Tehdasintegraatti on omavarainen lämmön suhteen, sähkön suhteen oma tuotanto kattaa noin puolet kokonaistarpeesta ja loput hankitaan ostosähkönä UPM Energian kautta.

3 SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTO

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto tarkoittaa voimalaitostekniikassa tuotantoa, jossa laitoksella tuotetaan lämmitysenergiaa kuten kaukolämpöä tai teollisuuden prosessihöyryä jonkin kuluttajan tarpeeseen ja samalla saadaan sivutuotteena tuotettua sähköä. Yhteistuotannolla voimalaitoksen hyötysuhde saadaan korkeammaksi verrattuna pelkästään sähkön tai lämmön tuotantoon. Yhteistuotantolaitoksista käytetään myös nimitystä CHP-voimalaitos (combined heat and power). (Huhtinen et al. 2008, 11)

Suomi on maailmanlaajuisesti yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon johtava maa. Lähes 80 prosenttia kaukolämmön tuotannosta Suomessa perustuu sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Vastaavasti noin kolmannes tuotetusta sähköstä syntyy yhteistuotannosta. (Energiateollisuus 2013, 1)

Höyryvoimalaitokset jaetaan turbiinista ulos tulevan höyryn perusteella vastapainevoimalaitoksiin ja lauhdutusvoimalaitoksiin. Vastapainevoimalaitoksissa turbiinista ulos tulevan höyryn paine ja sen myötä höyryn lauhtumislämpötila on niin korkea, että sitä voidaan käyttää lämmitystarkoituksiin. Vastapainevoimalaitoksia ovat kaukolämpöä tai teollisuuden lämmityshöyryä ja sähköä tuottavat voimalaitokset. (Huhtinen et al. 2008, 12)

Lauhdutusvoimalaitoksissa turbiinista ulos otettavan höyryn paine ja lauhtumislämpötila ovat niin alhaiset, että höyrystä vapautuvaa lauhtumislämpöä ei voida hyödyntää lämmitysenergiaksi. Näin ollen lauhdutusvoimalaitokset tuottavat pelkästään sähköä.

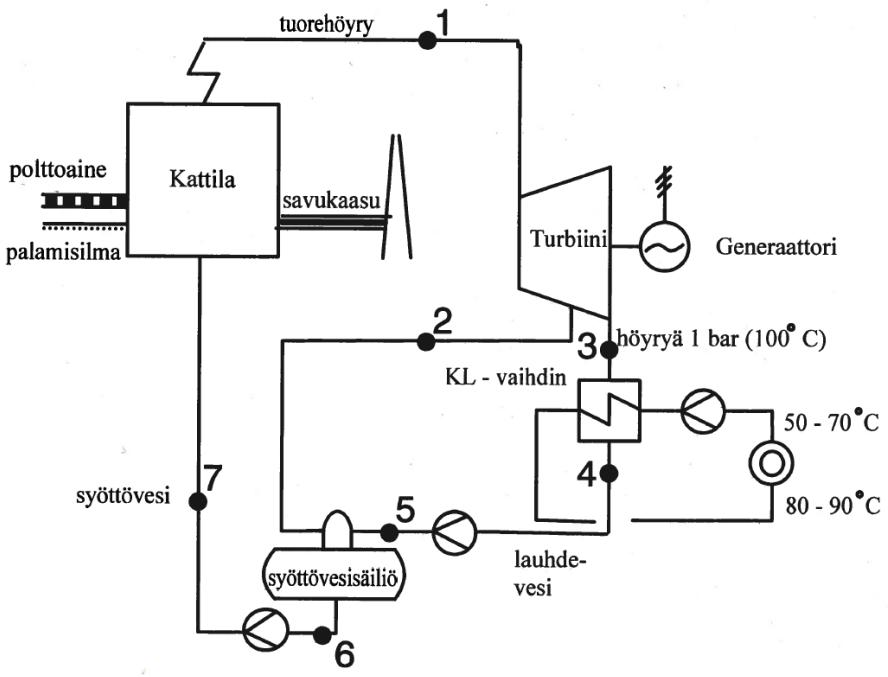
Tässä kappaleessa keskitytään sähkön ja lämmön yhteistuotannolla toimivan höyryvoimalaitoksen, eli vastapainevoimalaitoksen, laitteistoon ja teoriaan. Polttoaineiden osalta käsitellään biopolttoaineiden palamista ja polttotekniikkaa leijukerrospoltossa.

3.1 CHP-höyryvoimalaitoksen toimintaperiaate

Seuraavassa esitellään höyryvoimalaitosprosessin periaate sekä kahden CHP-voimalaitoksen, kaukolämpövoimalaitoksen ja teollisuuden vastapainevoimalaitoksen yleiskuvaukset sekä erityispiirteet.

3.1.1 Kaukolämpövoimalaitos

Kaukolämpövoimalaitoksen tarkoituksena on tuottaa määrältään sekä lämpötilaltaan riittävästi kaukolämpövettä kulutuskohteen, kuten kaupungin tai taajaman lämmönkulutuksen kattamiseksi. Pienimuotoiseen, kaukolämpöteholtaan 10 - 40 MW_{th} kaukolämmön tuotantoon perustuvan höyryvoimalaitoksen peruskomponentit joilla prosessi saadaan toimimaan, ovat tulistimella varustettu kattila, turbiini, kaukolämmön vaihdin, syöttövesisäiliö sekä syöttövesi- ja lauhdepumput.(Huhtinen et al.2008, 22) Höyryvoimalaitoksen peruskytkentä josta ilmenee prosessin vaiheet on esitetty kuvassa 8. Esimerkkinä on kaukolämpövoimalaitos teholtaan 10 MW_{th}.



Kuva 8. Höyryvoimalaitoksen peruskytkentä, kaukolämpövoimalaitos KL-teho 10 MW_{th}. (Huhtinen et al. 2008)

Höyryvoimalaitoksessa muunnetaan polttoaineeseen sitoutunutta kemiallista energiaa sähköksi prosessivaiheiden kautta. Höyrykattilassa polttoaineen palaessa polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen lämpöenergia pyritään siirtämään savukaasujen avulla mahdollisimman tehokkaasti kattilaan syötettävän veden lämmitykseen, höyrystykseen ja syntyneen höyryn lämmitykseen eli tulistukseen. Turbiinissa kattilalta saatavaa korkeapaineista ja kuumaa tuorehöyryä paisutetaan pienempään lämpötilaan ja paineeseen. Höyryn paine- ja lämpöenergiasta osa (15-45%) saadaan muutettua turbiinin akselia pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi.

Turbiinin pyörittämässä generaattorissa akselin mekaaninen energia muutetaan sähköksi.

Turbiinista ulos virtaava vastapainehöyry muutetaan vedeksi lämmönsiirtimessä eli kaukolämmönvaihtimessa, jossa höyryn lauhtumisessa vapautuva lämpö siirtyy lämmön vastaanottavaan lämpenevään veteen eli tässä tapauksessa kaukolämpöveteen. Höyryn lauhtumisessa muodostunut lauhdevesi pumpataan syöttövesisäiliöön ja sitä kautta edelleen takaisin kattilaan. Tätä kutsutaan yleisesti voimalaitoksen höyrykierroksi. Kaukolämpövesi lähtee voimalaitokselta kulutuskohteeseen eli kaukolämpöverkkoon. Kulutuskohteelle lämpönsä luovuttanut jäähtynyt kaukolämpövesi palaa takaisin voimalaitokselle.

Jos palaava kaukolämpövesi lämmitetään 50°C:stä 90°C:een, turbiinista tulevan vastapainehöyryn tulee lauhtua lämmitettävän veden lähtölämpötilaa korkeammassa lämpötilassa, esimerkiksi 100°C:ssa. Höyry lauhtuu 100°C:n lämpötilassa kun sen paine on 1 bar, joten tällöin turbiinista ulos tulevan höyryn paine eli turbiinin vastapaine on 1 bar. Juuri turbiinin jälkeisen höyryn paineen vuoksi turbiinia nimetään vastapaineturbiiniksi ja koko voimalaitosta vastapainevoimalaitokseksi. (Huhtinen et al. 2008, 22)

Kaukolämmönvaihtimelta kaukolämpöverkostoon lähtevän veden lämpötilaa muutetaan vallitsevan ilman ulkolämpötilan mukaan siten, että lähtevän veden lämpötila on talven kylmimpinä aikoina 115°C ja kesällä 70°C. Kaukolämpöverkosta laitokselle palaavan veden lämpötila vaihtelee 40°C ja 60°C välillä. Suurimmat kaukolämpötehon tarpeet ajoittuvat talven huippupakkasten ajalle ja pienimmillään tehontarve on kesällä. Kaukolämpövoimalaitos rakennetaan yleensä siten, että sen teho on noin 50 % kaukolämmön huipputehosta. Näin voimalaitosinvestoinnille saadaan pitkä käyttöikä, sillä pääosa energiasta (80 %) saadaan tuotettua edullista polttoainetta käyttävällä peruskuormalaitoksella pienin käyttökustannuksin ja pieni osa energiasta (20 %) jaa tuotettavaksi kallista polttoainetta käyttävillä mutta investoinneiltaan edullisilla huippulämpökeskuksilla. (Huhtinen et al. 2008, 14)

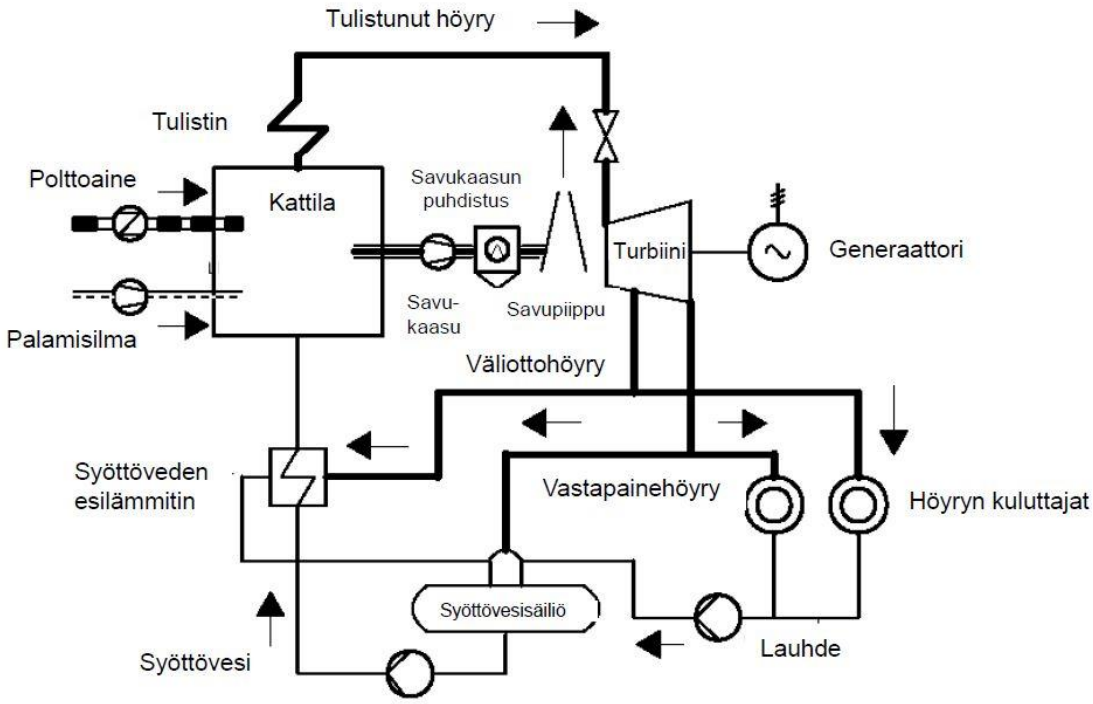
Prosessin mitoituksessa otetaan huomioon myös sähköntuotantoa lisäävät kytkennälliset mahdollisuudet. Voimalaitosprosessit optimoidaan niin, että energia saadaan sekä käyttö- että kunnossapitokustannukset huomioiden tuotettua

mahdollisimman edullisesti. Käytännössä tämä tarkoittaa, että mitä pienempi voimalaitos on teholtaan, sitä yksinkertaisempi prosessikytkentä on taloudellisesti edullisin. Yksinkertaisella kytkennällä tarkoitetaan sitä, että kytkennässä ei ole otettu käyttöön sähkön tuotantoa lisääviä kytkennällisiä mahdollisuuksia. Tällaisia ovat prosessiin lisättävät lämmönsiirtopinnat kuten ekonomaiserit eli syöttöveden esilämmittimet, höyryn välitulistus sekä monivaiheinen kaukolämpöveden lämmitys. Palamisilman esilämmittimiä eli luvoja käytetään voimalaitoskattiloissa kaikilla polttoaineilla polttoaineen syttymisen tehostamiseksi ja palamisen stabiilisuuden varmistamiseksi. (Huhtinen et al. 2008, 47)

3.1.2 Teollisuuden vastapainevoimalaitos

Teollisuusprosessien lämmitykset on yleensä toteutettu käyttäen lämmönsiirtoaineena höyryä. Höyryn avulla saadaan helposti siirrettyä suuria lämpötehoja ja kohde saadaan lämmitetyksi nopeasti höyryn hyvien lämmönsiirto-ominaisuuksien ansiosta. Kun lämmitystehon tarpeet kasvavat yli 10 MW_{th}:n suuruisiksi ja teollisuuslaitos toimii ympäri vuoden, tulee kannattavaksi ryhtyä valmistamaan lämmityshöyryn sivutuotteena sähköä. Sähkön tuotantoa varten kattilan painetasoa on nostettava ja lisäksi tarvitaan turbiinilaitos, jonka kautta kattilan tuottama höyry johdetaan prosessiin. (Huhtinen et al. 2008, 63)

Teollisuuden vastapainevoimalaitoksen perustoimintaperiaate on sama kuin kaukolämpövoimalaitoksenkin. Tavallisesti teollisuusprosessissa tarvitaan kuitenkin eripaineisia lämmityshöyryjä, joten höyryä otetaan prosessiin myös turbiinin väliotosta eli höyryn paisunnan välivaiheesta. Tyypillinen turbiinin vastapaine on 2 - 3 bar ja väliottopaine 10 bar. Väliottoja voi suurissa voimalaitoksissa olla useampiakin. Yleensä vain osa höyrystä palautetaan lauhteena takaisin voimalaitokselle. Teollisuuden suuria prosessihöyrynkäyttäjiä ovat mm. Sellu- ja paperitehtaiden prosessit. Periaatekaavio teollisuuden vastapainevoimalaitoksen prosessista on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Teollisuuden vastapainevoimalaitoksen prosessi. (Vakkilainen 2011)

Teollisuudessa lämmöntarve on ympäri vuoden tasaisempaa ja vaihtelut pienempiä kuin kaukolämmön kulutuksessa. Teollisuudessa prosessin lämpö on ensisijainen tarve, joka voimalaitoksen täytyy tyydyttää ja lämpötuotannon yhteydessä syntyvä sähkö on toissijainen tuote. Voimalaitoksen rakennusaste tarkoittaa tuotetun sähköenergian suhdetta tuotettuun lämpöenergiaan. Rakennusaste vaihtelee höyryvoimalaitoksilla välillä 0,3 - 0,6 sen mukaan millaisia sähköntuotantoa lisääviä muutoksia perusprosessiin on tehty. (Huhtinen et al. 2008, 64)

Teollisuuden vastapainevoimalaitosten kulutussuhde, eli sähkötehon tuottoon tarvittavan polttoainetehon suhde tuotettuun nettosähkötehoon on tyypillisesti hieman huonompi kuin kaukolämpövoimalaitoksen, koska prosessin lämmittämiseen tarvitaan korkeampipaineista höyryä kuin kaukolämpöveden lämmittämiseen. Teollisuuden voimalaitoksille on myös tyypillistä, että prosessiin menevän höyryn tulee olla kylläistä höyryä, koska lauhtuva höyry lämmittää prosessia tehokkaasti. (Huhtinen et al. 2008, 64)

3.2 Leijukerrospoltto

Teollisuuden vastapainevoimalaitoksissa käytetään polttoaineena usein teollisuusprosessissa tai laitosalueella syntyviä jätteitä, kuten puunjalostusteollisuuden voimalaitoksissa puujätettä, kuorta, lietettä ja mustalipeää. Biopolttoaineita polttoaineenaan käyttävissä voimalaitoksissa ja lämpökeskuksissa yleisimpiä polttoratkaisuja ovat arina- ja leijukerrospoltto. Leijukerrospolttoa on ryhdytty käyttämään energian tuotannossa 1970 - luvulta lähtien. Nykyisin se on syrjäyttänyt lähes kokonaan arinatekniikan yli 20 MW:n lämpötehoilla ja on varteenotettava vaihtoehto arinapoltolle pienemmilläkin tehoilla.

Leijukerrostekniikalla tarkoitetaan polttotapaa, jossa polttoaine palaa kattilan tulipesässä leijutettavan hiekan seassa. Hiekka kattilassa leijutetaan altapäin puhallettavilla ilmasuuttimilla. Leijukerroskattilat jaetaan kiertoleijupetikattiloihin (CFB - Circulating Fluidized Bed) ja kerrosleijupetikattiloihin eli kuplapetikattiloihin (BFB - Bubbling Fluidized Bed). Näiden periaatteellinen ero on käytetyssä pedin leijutusnopeudessa. Tyypilliset lämpötehokokoluokat kuplapetikattiloille ovat alle 100 MW_{th} ja kiertopetikattiloille yli 50 MW_{th}. (Huhtinen et al. 2008, 36)

Leijukerrospoltto asettaa polton hallinnalle tiettyjä vaatimuksia. Leijupoltto onnistuu, kun seuraavat tekijät toteutuvat:

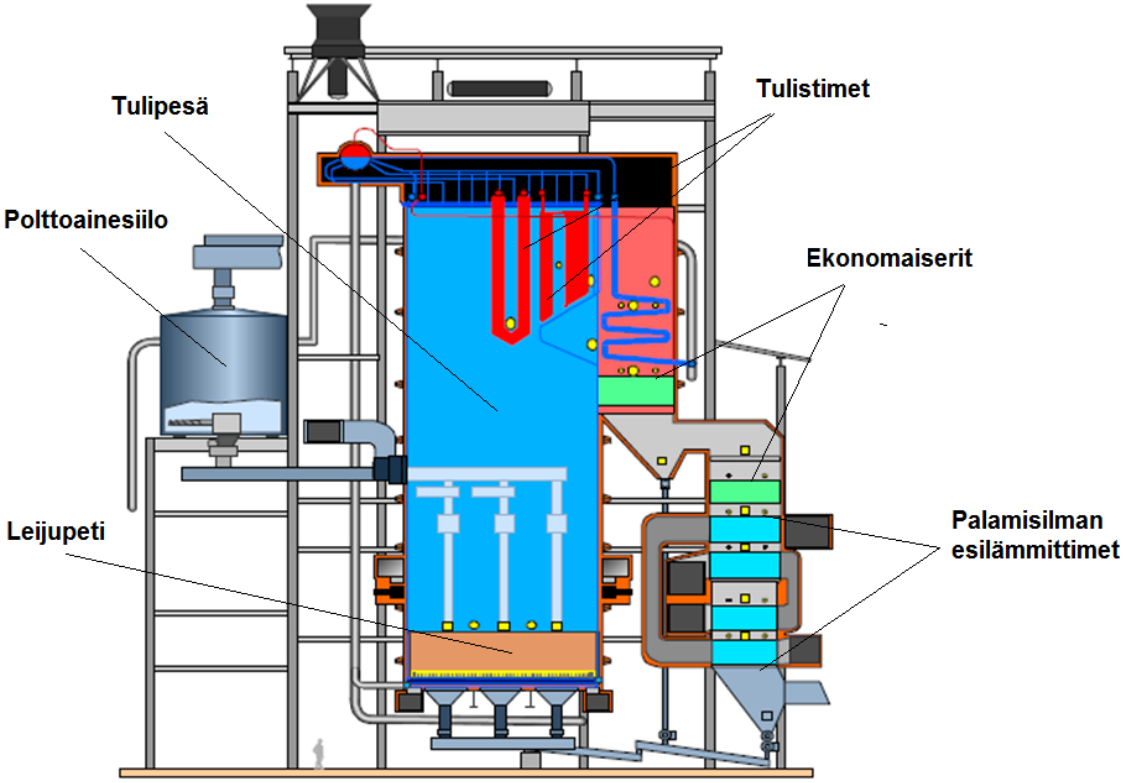
- Leijutuskaasun jakautuminen arinan läpi on tasaista.
- Pedin lämpötilaa pidetään oikealla alueella (700°C - 900°C riippuen polttoaineen laadusta, jolloin tuhka ei sula).
- Palamisnopeus on suuri (ei synny polttoainevarastoa petiin).
- Polttoaine jauhautuu ja sekoittuu tehokkaasti.
- Petimateriaalin raekoko pidetään sopivana leijutusta varten (isot kappaleet, kuten kivet ja rautaesineet poistetaan pohjatuhkan mukana).
- Pedin korkeus on riittävä, mutta ei liian suuri.
- Ilman ja polttoaineen suhde on oikea.

Leijukerrospoltto sopii erittäin hyvin huonolaatuisten, kosteiden ja tuhkapitoisten polttoaineiden polttoon ja sitä käytetään laajalti erilaisten kiinteiden polttoaineiden poltossa. Leijukerrospolton etuihin kuuluu mahdollisuus polttaa monia polttoaineita samanaikaisesti, korkea palamishyötysuhde, alhaiset NO_x-päästöt (typenoksidi) sekä

yksinkertainen rikkipäästöjen hallinta syöttämällä kalkkia tulipesään. (Vakkilainen 2010, 2)

3.2.1 BFB-kattila

Kuplapetikattiloita käytetään yleensä alle 100 MW_{th} kokoisissa sovelluksissa. Kuplapetikattilan poikkileikkaus ja rakenne on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Kuplapetikattilan poikkileukkaus. (Vakkilainen 2010)

Kuplapetikattilassa leijukerroksen pinta on selvästi erotettavissa. Leijukerroksen korkeus on 0,4 - 0,8 m joka aiheuttaa 6 - 12 kPa painehäviön kerroksen yli. Kerrosmateriaali on hiekkaa ja polttoaineesta syntynyttä tuhkaa. Optimaalinen kerrosmateriaalin hiukkaskoko on 1 - 3 mm, kun leijutusnopeutena käytetään 0,7 - 2,0 m/s. Kuplapedin tyypillisiä toiminta-arvoja on esitetty taulukossa 2. (Vakkilainen 2010, 8)

Taulukko 2. Kuplapetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja. (Huhtinen 2000)

Suure	Yksikkö	Toiminta-arvo
Pedin painehäviö	kPa	6,0 - 12,0
Leijutusnopeus	m/s	1 - 3
Pedin korkeus	m	0,4 - 0,8
Petilämpötila	°C	700 - 1000
Ilmakerroin	-	1,1 - 1,4
Minimikuorma	%	30 - 40

Kattilan polttotila koostuu leijusuutinarinasta, petihiekkakerroksesta ja muurauksista. Murskattu kiinteä polttoaine syötetään pedin päälle yhtä tai useampaa pudotusputkea pitkin. Pienet partikkelit ja haihtuvat aineet palavat pedin yläpuolella, raskaat partikkelit kulkeutuvat petiin jossa ne kuivuvat ja kaasuuntuvat. Jäännöshiili palaa pääasiallisesti leijupedissa. Petimateriaalilla ja polttotilalla on korkea lämpökapasiteetti, joten polttoaineen kosteudella ei ole suurta epäedullista vaikutusta palamiseen. Ulkopuolista kuivausta eli muuta kuin mekaanista puristusta ei tarvita käytettäessä biopolttoaineita. (Huhtinen et al. 2008, 36)

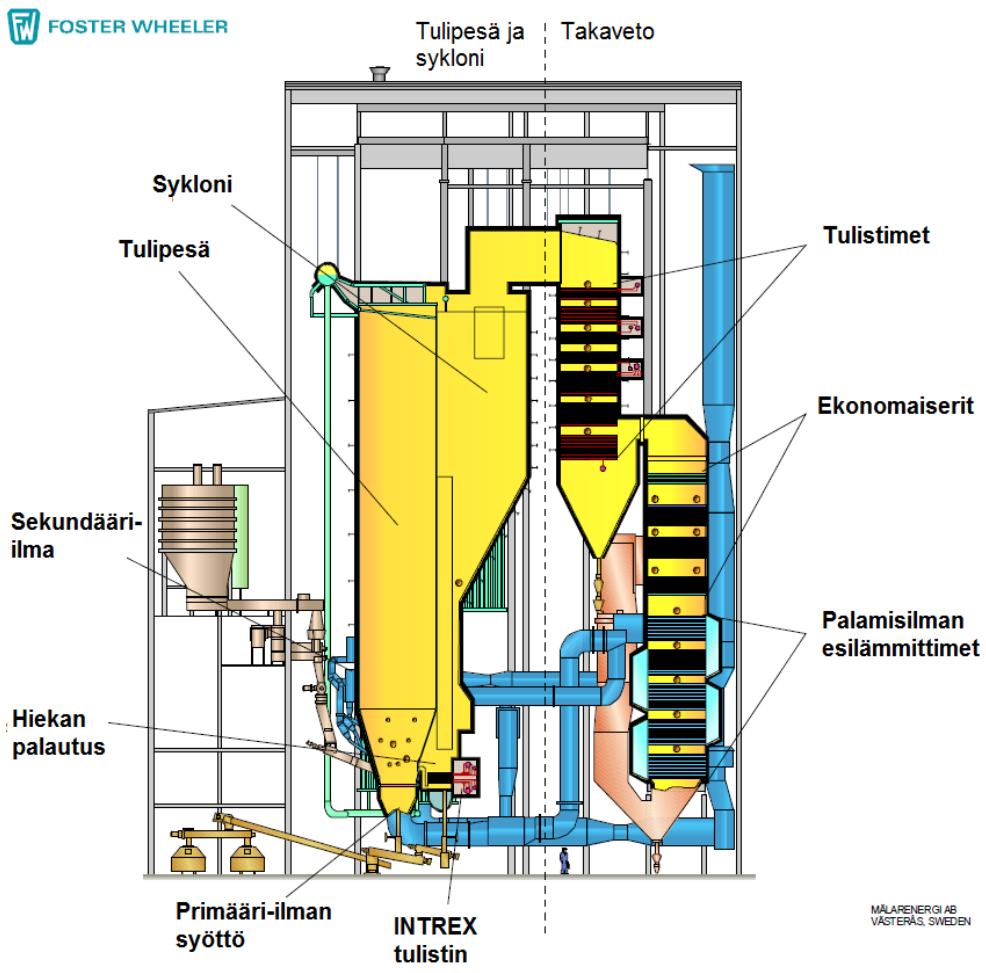
Kattilan käynnistämisen aikana leijupeti lämmitetään öljy- tai kaasupolttoisilla sytytyspolttimilla ensin 400°C - 600°C lämpötilaan, mikä varmistaa kiinteän polttoaineen turvallisen syttymisen. Pedin yläpuolella olevat polttimet voivat olla tarpeellisia kattilan minimikuorman ylläpitämiseksi, kun biopolttoainetta ei ole hetkellisesti käytettävissä.

Tulipesän membraaniseinä on rakennttu hitsatuista vesijäähdytteisistä putkista. Tulipesän alaosassa olevat putket ovat usein vuorattu tulenkestävällä materiaalilla. Tulenkestävää massaa tarvitaan suojaamaan putkia eroosiolta ja avustamaan riittävän lämpötilan ylläpidossa, kun poltetaan kosteita polttoaineita. Käytettäessä biopolttoaineita kuplapedin mahdollinen minimikuorma on tyypillisesti 30 - 40 % suurimman jatkuvan tehon kuormasta. Tätä alhaisemmat kuormat vaativat öljyn tai kaasun käyttämistä tukipolttoaineena. Petilämpöilan aleneminen on tärkein kuormaa rajoittava tekijä, sillä petilämpötilan pitäisi pysytellä yli 700°C lämpötilassa. Suurimman jatkuvan kuorman yläpuolella petimateriaali alkaa kulkeutua

savukaasujen mukana ja pedin lämpötila nousee yli sallitun lämpötilan. Tämä aiheuttaa palamattoman aineksen määrän nousua, päästöjen nousua sekä petimateriaalin vaurioitumista. Kuplapeti sopii parhaiten paljon haihtuvia aineita sisältävien polttoaineiden, kuten kuoren ja puun polttamiseen. (Vakkilainen 2010, 10)

3.2.2 CFB-kattila

Kiertopetikattiloissa käytetään suurempia leijutusnopeuksia ja hienojakoisempaa petimateriaalia kuin BFB-kattiloissa. Kiertopetikattilan rakenne on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Kiertopetikattilan poikkileikkaus. (Vakkilainen 2010)

Kiertopetikattilan polttoprosessissa leijutusnopeutta on kasvatettu kuplivan alueen ohi ja kaasuvirta vie jatkuvasti mukanaan suuren osan pedin massasta.

Kiertopetikattiloiden pedinleijutusnopeus on 3 - 10 m/s ja hiekan raekoko 0,1 - 0,5 mm. Savukaasujen mukana kattilan yläosaan kulkeutunut materiaali erotellaan syklonissa ja palautetaan takaisin tulipesään. Hiukkasten kulkeutumisen takia pedin ja kaasutilan välillä ei ole selvää rajaa kuten kuplapetikattilassa, vaan pedin tiheys pienenee korkeuden funktiona. Painehäviö pedin ylä- ja alaosan välillä seuraa tätä alenevaa gradienttia. (Vakkilainen 2010, 10)

Kiinteiden hiukkasten kierrätys takaisin tulipesän alaosaan johtaa erinomaiseen sekoittumiseen ja kaasun ja kiinteiden hiukkasten kontaktiin. Kiinteitä hiukkasia on koko tulipesän tilavuudessa, joten kaasun ja kiinteiden hiukkasten lämpötilat ovat periaatteessa yhtenäiset koko tulipesän ja syklonin alueella. Nämä johtavat korkeaan palamishyötysuhteeseen, kalkin tehokkaaseen käyttöön sekä alhaisiin NO_x-pitoisuuksiin. (Vakkilainen 2010, 11)

Kattilan pääosat muodostavat tulipesä ja siihen liitetty kiertävän petimateriaalin ja palamattomat hiukkaset tulipesän pohjalle palauttava sykloni. Jotta syklonin erotusaste saadaan hyväksi, savukaasun on virrattava sykloniin noin 20 m/s. Syklonin erotuskyky huononee halkaisijan kasvaessa, joten syklonit pyritään rakentamaan halkaisijaltaan alle 8 metriseksi. Suuriin kattiloihin valmistetaan tarvittaessa ueampia sykloneja, ja niitä voi olla molemmin puolin tulipesää. Syklonit ovat aiemmin olleet pääsääntöisesti jähdyttämättömiä, mutta nykysin käytetään kattilaputkilla jäähdytettyjä sykloneja. Jäähdytetyn syklonin etuja ovat lämpöhäviöiden pieneneminen, muurausten huollon tarpeen pieneneminen, syklonin pintojen hyödyntäminen lämmönsiirtimina sekä laitoksen ylösajon nopeutuminen. (Huhtinen et al. 2008, 98)

Syklonin jälkeen savukaasukanavassa sijaitsevat konvektiiviset lämmönsiirtimet eli tulistimet sekä veden- ja ilman esilämmittimet. Kukin kiertopetikattila suunnitellaan tapauskohtaisesti joten eri kattiloiden lämmönsiirtimien keskinäinen sijoittelu voi vaihdella jonkin verran. Korkeilla höyrynpaineilla joitakin tulistinpintoja sijoitetaan tyypillisesti tulipesään. (Vakkilainen 2010, 10)

Suomeen rakennettujen kiertopetikattiloiden vesikiertona on luonnonkiertojärjestelmä, koska kattiloita käytetään teollisuuden ja yhdyskuntien vastapainevoimalaitoksissa ja halutut tuorehöyryn paineet mahdollistavat

luonnonkierron. (Huhtinen et al. 2008, 97) Taulukossa 3 on esitetty kiertopetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja.

Taulukko 3. Kiertopetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja. (Huhtinen 2000)

Suure	Yksikkö	Toiminta-arvo
Kokonaispainehäviö	kPa	10 - 15
Petimateriaali	mm	0,1 - 0,5
Leijutusnopeus	m/s	3 - 10
Petilämpötila	°C	850 - 950
Ilmakerroin	-	1,1 - 1,3
Minimikuorma	%	25 - 30

Palamisilmajäjestelmä kiertopetikattiloissa on samanlainen kuin kuplapetikattiloissakin. Palamisilma jaetaan primääri- ja sekundääri-ilmaan. Primääri-ilma eli leijutusilma tuodaan tulipesään alhaalta pohjasuuttimien kautta. Tarvittava primääri-ilman puhallinpaine on 15 - 20 kPa ja osuus polttoaineen mukaan 30 - 60 % kokonaisilmamäärästä. Sekundääri-ilma tuodaan useiden ilma-aukkojen kautta yhdelle tai kahdelle eri tasolle, jotka sijaitsevat 2 - 5 m korkeudella arinapohjan yläpuolella. Sekundääri-ilman määrää voidaan yleensä säätää välillä 10 - 50 % kokonaisilmamäärästä.

Kattila vaatii tietyn minimipainehäviön arinasuuttimien yli, jotta vältetään epätasainen leijutus, sopimaton lämpötilajakauma pedissä sekä petimateriaalin takaisinvirtaus ilmakanaviin. Pienin sallittu arinan painehäviö määrää pienimmän arinasuuttimien primääri-ilmavirtauksen, joka on tavalliseti noin 50 % kokonaisprimääri-ilman virtausmäärästä. CFB - kattilan minikuorma on noin 25 - 40 % täydestä kuormasta riippen käytetystä polttoaineesta ja arinamallista. Alhaisilla kuormilla yli-ilmamäärä alkaa nousta, kun pienin sallittu primääri-ilman määrä on saavutettu ja tulipesän lämpötila laskee. (Vakkilainen 2010, 13)

Kiertopetikattilan suunnittelussa voidaan helposti ottaa huomioon valmius polttaa monia erilaisia polttoaineita, sillä korkea tulipesän lämpökapasiteetti takaa kosteidenkin polttoaineiden kuten kuoren, puun ja biolietteen vakaan palamisen. Koska palamislämpötila pysyy alhaisella alueella 800°C - 950°C, jää NO_x:n

muodostuminen vähäiseksi. Mikäli typenoksidipäästöjä halutaan edelleen vähentää, voidaan petiin syöttää ammoniakkia, joilloin NO_x-päästöjen pitäisi jäädä katalyyteittä alle 50 ppm arvoon. Savukaasujen rikin puhdistaminen kiertopetikattiloissa onnistuu helposti syöttämällä tulipesään kalkkia ($CaCO_3$). Kalkki reagoi polttoaineessa olevan rikin palamisessa muodostuvan rikkidioksidin (SO_2) kanssa muodostaen kipsiä ($CaSO_3$) reaktion 1 mukaisesti.

$$CaCO_3\ (kiinteä) + SO_2\ (kaasu) = CaSO_4\ (kiinteä) + CO_2\ (kaasu) \qquad (1)$$

Muodostunut kipsi poistetaan tuhkan mukana kattilasta. (Huhtinen et al. 2008, 100)

3.2.3 Biopolttoaineet leijukerrospoltossa

Biopolttoaineiden käyttö asettaa omat polttotekniset haasteensa niitä polttoaineenaan käyttäville voimalaitoksille. Alhainen lämpöarvo, korkea kosteuspitoisuus sekä tulipesään syötettävän polttoainemäärän mittaus ovat tyypillisiä hankaluuksia. Kuten aiemmin jo mainittiin, leijukerrospoltto sopii kuitenkin hyvin kosteille ja vaihtelevalaatuisille biopolttoaineille pedin korkean lämpökapasiteetin ansiosta. Palamistehokkuus kattilassa on korkea ja palamattomien häviöt ovat BFB -kattiloissa 10 - 2 % ja CFB -kattiloissa 5 - 0,5 %. Leijukerroskattiloita ei tarvitse suunnitella kovin tarkasti polttoaineiden ominaisuuksien mukaan. (Vakkilainen 2010, 13)

Biopolttoaineiden käytössä leijukerroskattiloiden polttoaineena haasteena on kattilan käytettävyys. Biopolttoaineista syntyy ongelmallista tuhkaa, jolla on taipumus liata ja kuonata lämmönsiirtimien pintoja. Tuhkahiukkaset kerrostuvat lämmönsiirtimien pinnoille aiheuttaen lämmönsiirtokyvyn heikentymistä sekä alttiutta korroosiolle.

Toinen käytettävyysongelma on pedin leijutuskyvyn heikentyminen. Petihiukkaset voivat agglomeroitua eli rakeistua kiinni toisiinsa tuhkan ja petipartikkeleiden reaktioiden kautta. Agglomeroitumisen kasvattaessa raekokoa tarpeeksi pitkälle voi tuloksena lopulta olla defluidisaatio eli pedin leijutuskyvyn menettäminen. Tämä johtaa pahimmillaan kattilan alasajoon, ja suurimmat agglomeroituneet partikkelit joudutaan poistamaan tulipesästä mekaanisesti pedin leijutuskyvyn palauttamiseksi. Leijupetikattiloista poistetaan pohjatuhkajärjestelmän mukana jatkuvasti petimateriaalia, joka täytyy korvata uudella leijutusominaisuuksien ylläpitämiseksi. Kattilan petilämpötiloja on tarkkailtava käytön aikana jatkuvasti, sillä

petilämpötilojen nousu viestii petimateriaalin mahdollisesta karkenemisesta ja tällaisessa tilanteessa pohjatuhkan poistoa on tehostettava. (Vakkilainen 2010, 13)

Metsästä korjattujen biopolttoaineiden ja turpeen mukana kattilaan voi kulkeutua hiekkaa, kiviä, rautaa ja muita palamattomia materiaaleja. Ylimääräinen palamaton materiaali lisää pedin karkeutta, joka haittaa pedin leijutusta ja sekoittumista ja heikentää näin lämmönsiirtoa. Lämmönsiirron heikentymisen myötä petiin voi muodostua epätasainen lämpötilajakauma joka voi johtaa pedin sintraantumiseen siinä esiintyvien lämpötilapiikkien vuoksi. Ylimääräisten materiaalien torjumiseksi tuontipolttoaineiden käsittelyssä käytetään yleensä murskausta, seulontalaitteita ja raudanerotusmagneettia ennen ohjausta kattilaan johtavalle hihnakuljettimelle.

Tulipesässä petipartikkelit jauhautuvat ja pristoutuvat leijutuksen vaikutuksesta jatkuvasti myös normaaliajossa, joten partikkelikoon pitäminen tasaisena on haasteellista. Petimateriaalin määrä on hyvin riippuvainen käytettävästä polttoaineesta. Esimerkiksi kivihiilen poltossa syntyy paljon tuhkaa petiin, joka toimii itsessään petimateriaalina eikä uutta petimateriaalia tarvitse juurikaan jakuvasti syöttää kattilaan. Vähätuhkaisen biopolttoaineen poltossa taas tarvitaan runsaasti uutta petimateriaalia poistetun tilalle. (Vakkilainen 2010, 14)

4 VOIMALAITOKSEN HYÖTYSUHDE

Voimalaitoksen hyötysuhde kuvaa polttoaineen kemiallisen energian muuntamisen tehokkuutta sähkö- ja lämpöenergiaksi. Tässä kappaleessa käsitellään voimalaitoksen kokonaishyötysuhdetta, hyötysuhteen muodostumista ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

4.1 Kokonaishyötysuhde

Voimalaitoksen kokonaishyötysuhteella tarkoitetaan hyödyksi saadun sähkö- ja lämpötehon summaa verrattuna käytettyyn polttoainetehoon:

$$\eta_{tot} = \frac{P_{net}+\Phi_{pr}}{\Phi_{pa}} \tag{2}$$

missä P_{net} nettosähköteho [MW]

Φ_{pr} prosessihöyry- ja/tai kaukolämpöteho [MW]

Φ_{pa} Polttoaineteho [MW]

Vastapainevoimalaitoksessa sekä sähkö että lämpö saadaan hyödyksi joten kokonaishyötysuhde on hyvä, suurusluokkaa 85 %. Voimalaitoksen sähköntuotannon hyötysuhde voidaan myös esittää prosessin sisäisten hyötysuhteiden tulona. Yhtälössä 3 on esitetty sähköntuotannon kokonaishyötysuhteen muodostuminen ja osahyötysuhteiden tyypillisiä vaihteluvälejä (Larjola 2009, 98):

$$\eta_{e,tot} = \eta_{ok} * \eta_{mg} * \eta_{pros} * \eta_{put} * \eta_{kat} \tag{3}$$

missä η_{ok} omakäyttöhyötysuhde 0,91...0,94

η_{mg} generaattori-ja laakerihäviöt 0,96...0,98

η_{pros} prosessihyötysuhde 0,30...0,50

η_{put} putkistoiden lämpöhäviöt 0,96...0,98

η_{kat} kattilahyötysuhde 0,85...0,93

Turbiinin varsinainen hyötysuhde sisältyy tässä prosessihyötysuhteeseen. Generaattori- ja laakerihäviöt sekä putkistoiden lämpöhäviöt ovat yleensä verrattain

pieniä. Merkittävässä osassa sähköntuotantohyötysuhteen kannalta ovat kattilahyötysuhde ja omakäyttöhyötysuhde.

Tyypillisesti kattilahyötysuhteet vaihtelevat kiinteiden biopolttoaineiden noin 90%:sta öljy- ja kaasukattiloiden lähes 95%:iin. Suurin syy biopolttoainekattiloiden huonommalle suorituskyvylle on polttoaineen korkea kosteuspitoisuus, joka lisää savukaasuvirtausta ja -häviöitä. (Vakkilainen 2010, 26)

4.2 Omakäyttöhyötysuhde

Voimalaitoksen omakäyttöteholla tarkoitetaan voimantuotantoprosessin ja voimalaitoksen apujärjestelmien sekä voimalaitoskomponenttien häviöiden kuluttamaa sähkötehoa (Huhtinen et al. 2008, 309.) Voimalaitoksen verkkoon tuottama nettosähköteho on bruttosähkötehon ja omakäyttötehon erotus:

$$P_{netto} = P_{brutto} - P_{ok} \tag{4}$$

missä P_{netto} nettosähköteho [MW]

P_{brutto} bruttosähköteho [MW]

P_{ok} omakäyttöteho [MW]

Omakäyttöhyötysuhde kuvastaa vastaavasti omakäyttötehon suhdetta laitoksen tuottamaan bruttosähkötehoon tietyllä tuotantoteholla:

$$\eta_{ok} = 1 - (\frac{P_{ok}}{P_{brutto}}) \tag{5}$$

Omakäyttösähkön kulutus on merkittävä osa voimalaitoksen sähköenergian tuotannosta, varsinkin yhteistuotantolaitoksilla. Lämpöteholtaan 190 MW_{th} vastapainevoimalaitoksen 22 MW_e sähköntuotannosta noin 4 MW_e eli 18 % voi kulua omakäyttösähkönä laitoksen omiin tarpeisiin. Suurimpina kuluttajina ovat voimalaitoksen syöttövesipumput, suuret puhaltimet sekä kiinteän polttoaineen käsittelylaitteet. (Huhtinen et al. 2008, 310)

4.3 Rakennusaste

Yhteistuotantolaitoksen sähköntuotannon tehoa verrattuna lämpötuotantoon kuvataan rakennusasteella:

$$r = \frac{P_{netto}}{\Phi_{lämpö}} \tag{6}$$

missä r rakennusaste [%]

$\Phi_{lämpö}$ kaukolämpöteho- ja/tai höyryteho [MW]

Rakennusaste vaihtelee höyryvoimalaitoksilla välillä 0,3 - 0,6 sen mukaan, millaisia sähköntuotantoa lisääviä kytkentöjä perusprosessiin on tehty. Sähköntuotantoa lisäävien lämmönsiirtopintojen lukumäärän valinta on taloudellinen optimointitehtävä, sillä niistä johtuva lisäinvestointi täytyy saada maksettua takaisin saavutettavalla polttoainesäästöllä.

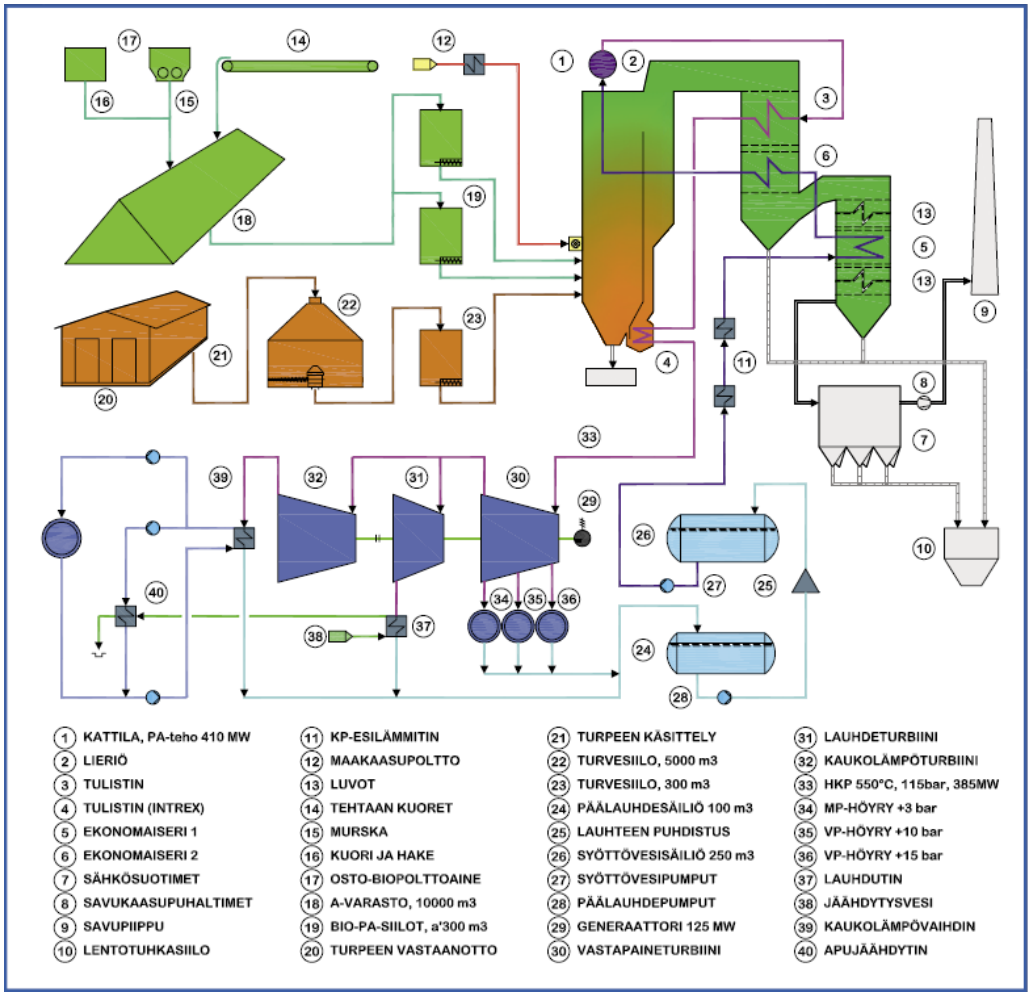
Mitä pienempi voimalaitos on teholtaan sen yksinkertaisempi prosessikytkentä on taloudellisesti edullisin, joten rakennusaste yleensä kasvaa voimalaitoksen lämpötehon kasvaessa. Kaukolämpöteholtaan 25 MW_{th} kaukolämpövoimalaitoksen rakennusaste on yleensä noin 0,30 ja 100 MW_{th} laitoksen noin 0,50. (Huhtinen et al. 2008, 46) Vastapainevoimalaitoksessa rakennusasteeseen vaikuttaa kuitenkin monta tekijää, kuten höyryn vastapaineen suuruus, turbiinin väliottojen lukumäärä ja painetasot sekä mahdollinen turbiinin lauhdutusosa.

5 KAUKAAN VOIMA:N BIOVOIMALAITOKSEN PROSESSIKUVAUS

KauVo:n biovoimalaitos tuottaa UPM:n kaukaan tehtaille sähköä ja prosessihöryä sekä Lappeenrannan Energialle kaukolämpöä ja sähköä. Voimalaitoksen mitoitustehot ovat kokonaislämpöteho 385 MW_{th}, sähköteho 125 MW_e, prosessihöyrykapasiteetti 152 MW_{th} sekä kaukolämpöteho 110 MW_{th}. On huomattava, että kyseiset mitoitustehot eivät kaikki toteudu samanaikaisesti. Vuosittain voimalaitoksen tuottama energiamäärä UPM Kaukaan tehtaille on noin 500 GWh prosessihöyryä ja 200 GWh sähköä sekä Lappeenrannan Energialle 550 GWh kaukolämpöä ja 260 GWh sähköä. (Pohjolan Voima 2012, 2)

Voimalaitoksen päätuote on lämpöenergia eli sitä ajetaan lämpökuorman mukaisesti. Kaukolämpöä laitos toimittaa noin 80 % Lappeenrannan kaupungin vuositarpeesta. Kaukolämpöverkkoon KauVo:a varten mitoitettu siirtolinja rajoittaa KL-tuotannon kapasiteetin tähän määrään. Laitoksen mahdollinen maksimikaukolämpökuorma riittää kattamaan koko Lappeenrannan kaupungin kaukolämmön tarpeen noin -5°C...0°C ulkoilman lämpötiloihin saakka. Prosessihöyry UPM:n tehtaiden höyrynkuluttajille toimitetaan kahdessa eri painetasossa, matalapainehöyry HMP 3,5 bar ja välipainehöyry HVP 10 bar. (Kuiri 2008, 4)

Biovoimalaitoksen prosessikaavio on esitettynä kuvassa 12. Prosessin kulkua, mitoitusta ja voimalaitoksen laitteistoa käydään seuraavaksi tarkemmin läpi.



Kuva 12. Kaukaan Voiman biovoimalaitoksen prosessikaavio. (Pohjolan Voima 2010)

5.1 Polttoainejärjestelmät

5.1.1 Polttoaineet ja niiden hankinta

Biovoimalaitoksen polttoaineena käytetään tehdasalueen kuorimoilla syntyvää kuorta ja tehdasalueelle tuotavaa metsäenergiapuuta eli kantoja, oksia, latvuksia ja pienpuuta sekä turvetta. Turvetta käytetään lähinnä kattamaan talven huippukulutusjaksoja sekä biopolttoaineen laadun tasaamiseen vaativissa tilanteissa.

Metsäenergiapuu hankintaan UPM Metsän organisaation ja ulkoisten toimittajien kautta ja tuodaan tehdasalueelle rekkakuljetuksilla. Osa Kaukaan jätevedenpuhdistamon lietteestä sekä sahan jatkojalostusjakeeseen kuuluvat kutteripuru ja sahajauho poltetaan myös kattilassa. Kokonaispolttoaineenkulutuksesta tehtaan sisäiset jakeet kattavat noin 35 % ja ulkoa ostettavat jakeet 65 %. Vara- ja

käynnistyspolttoaineena käytetään maakaasua ja laitos voidaan käynnistää myös kevyellä polttoöljyllä mikäli maakaasua ei ole saatavilla. (Kuiri 2008, 4)

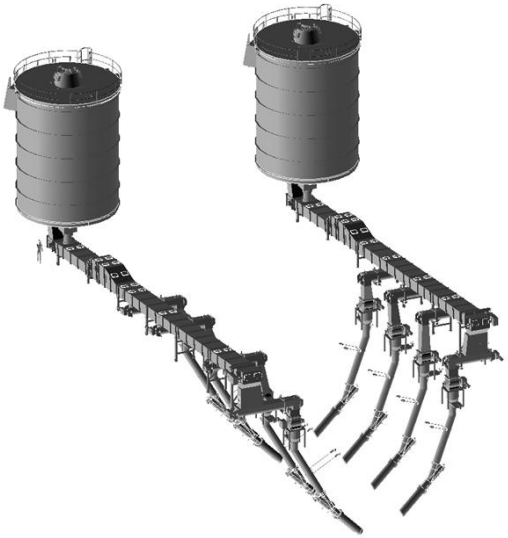
5.1.2 Polttoaineenkäsittely ja kuljettimet

Polttoaineenkäsittely alatehtaan alueella koostuu kahdesta biopolttoaineen vastaanottoasemasta ja metsäenergiamurskasta, polttoaineen ulkovarastosta sekä kuljetinlaitteistosta paperin kuorimolta, sellun kuorimolta, sahan kuorimolta sekä sahan jatkojalostuksesta. Vastaanotettu metsäenergiapuu murskataan, seulotaan ja ohjataan samaan 10 000 m^3 aumavarastoon kuin oman tehtaan jakeetkin.

Polttoaine tuodaan alatehtaan alueelta voimalaitokselle aumavaraston kautta hihnakuljettimella ja jaetaan ketjukolakuljettimilla kahteen 300 m^3 kokoiseen biopolttoainesiiloon, ns. päiväsiiloon. Molempien biopolttoainesiilojen päällä on moottoritoimiset sulkupellit, joiden avulla kulloinkin täytettävä siilo voidaan valita. Ylätehtaan alueella voimalaitoksen vieressä on turpeen vastaanottoasema, joka koostuu vastaanottorakennuksesta, seulasta, murskasta, 5000 m^3 turpeen varastosiilosta sekä kuljetinlaitteistosta. Turve tuodaan omalla hihnallaan varastosiilosta yhteen 300 m^3 kokoiseen turvesiiloon. (Kuiri 2008, 5)

5.1.3 Syöttöjärjestelmä

Biopolttoaineen päiväsiilot ja kattilasyöttöjärjestelmä on esitettynä kuvassa 13.



Kuva 13. Biopolttoaineen syöttöjärjestelmä kattilaan. (FosterWheeler 2010)

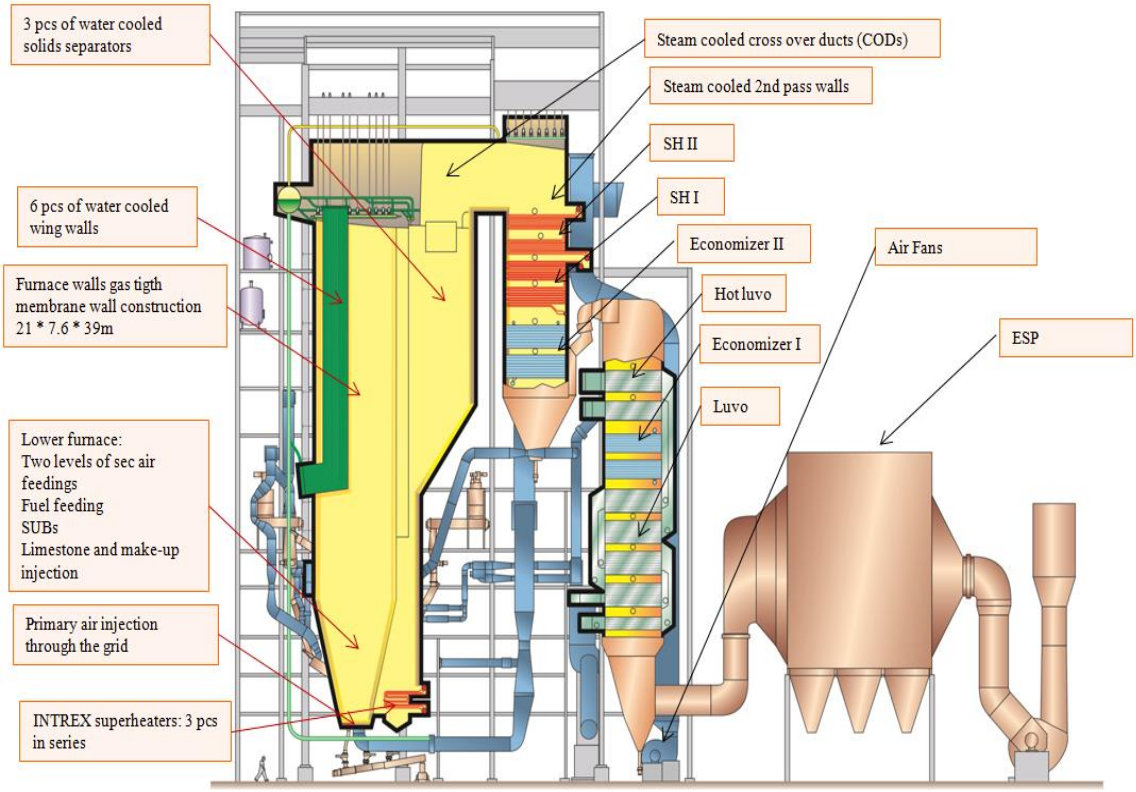
Päiväsiilot ovat tasapohjaisia ja pohjalla on pohjan ympäri kääntyvä ruuvipurkain. Ruuvipurkaimilta polttoaine putoaa ketjukolakuljettimille. Turvesiilon pohjalla on myös ympäri kääntyvä ruuvipurkain. Ruuvipurkaimelta turve putoaa syötöntasaustaskuun, jonka pohjalta turve syötetään kahden annosteluruuvin avulla polttoainelinjojen kolakuljettimille. (FosterWheeler 2007, 17)

Polttoaine syötetään kattilaan kahta rinnakkaista linjaa pitkin. Kolakuljetinlinjat sijaitsevat kattilan etu- ja takaseinillä ja ovat keskenään samanlaisia. Annosteluruuvit ketjukolakuljettimien pohjassa annostelevat polttoaineen sulkusyöttimille. Sulkusyöttimet annostelevat polttoaineen kattilaan pudotustorvia pitkin.

Toisen polttoainelinjan pysähtyessä rinnakkainen linja ottaa automaattisesti vastaan pysähtyneen linjan kuorman kapasiteettinsa puitteissa. Tarvittaessa kattilan tehoa saattaa joutua rajoittamaan, sillä yhden linjan kapasitetti on noin 70 % kattilan maksimikuormasta. Annosteluruuvien nopeuksia ohjataan järjestelmästä kattilan tehontuotantotarpeen tai kattilan painesäädön mukaan. (FosterWheeler 2007, 18)

5.2 Kattilalaitos

Voimalaitoksen kattilana toimii FosterWheeler Energia Oy:n toimittama 385 MW_{th} lämpötehoinen luonnonkiertoinen kiertoleijupetikattila. Tuorehöyryn mitoitusarvot kattilan mitoituspisteessä mitoituspolttoaineella ovat höyryvirtaus 149 kg/s, paine 115 bar ja lämpötila 550 °C. (Kuiri 2008, 4) Kattilan poikkileikkaus, josta ilmenee kattilan rakenne, lämmönsiirtopinnat sekä ilmajärjestelmät on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Kaukaan Voiman CFB-kattilan rakenne. (Foster Wheeler 2010)

Kiinteä polttoaine syötetään kattilan tulipesään 8 syöttöpisteen kautta. Tulipesässä kiertää kuuma hiekka, jota leijutetaan puhaltamalla ilmaa tulipesän alaosan arinaan nuolenpääsuuttimien kautta. Tulipesään hiekan joukoon putoava polttoaine kuivuu, kaasuuntuu ja palaa leijuvassa hiekkakerroksessa. Hiekka erotetaan kattilan yläosassa sijaitsevissa savukaasuerottimissa, joita on 3 kpl. Hiekka palautetaan takaisin tulipesään erottimessa savukaasujen jatkaessa kohti takavedoissa sijaitsevia lämpöpintoja sekä savukaasunpuhdistusta. Viimeisen tulistusvaiheen INTREX-tulistin sijaitsee kattilan tulipesän takaseinän puolella. INTREX-tulistimessa syklonista palaavaa hiekkaa ja petimateriaalia käytetään höyryn tulistukseen. (Kuiri 2008, 8)

Kattilan takavetojen lämpöpinnat savukaasujen virtaussuunnassa ovat seuraavat: korkeapainetulistimet 2 ja 1 höyryn tulistamista varten, ekonomaiserit 2 ja 1 syöttöveden esilämmittämiseksi sekä kaksiosainen savukaasuluvo palamisilman esilämmittämiseksi. Syöttövedelle on lisäksi erilliset höyrykäyttöiset korkeapaine-esilämmittimet ennen ekonomaisereita. Kattilan ulospuhallusjärjestelmä koostuu

jatkuvan ulospuhalluksen säiliöstä, ulospuhalluksen jäähdyttimestä sekä ulospuhallussäiliöstä.

5.2.1 Palamisilmajärjestelmä

Primääri-ilmaa syötetään tulipesään arinan alle sekä sekundääri-ilmaa ylempänä tulipesässä oleviin ilmasuuttimiin, käynnistys- ja tukipolttimien palamisilmaksi. Laitoksella on kaksi 60 % kuormaan mitoitettua primääri-ilmapuhallinta sekä yksi sekundääri-ilmapuhallin. Puhaltimet ovat radiaalipuhaltimia. Kattilan tulipesän alipaine säädetään ilma- ja savukaasupuhaltimien yhteisvaikutuksesta niin, että ylipaineen nollataso asettuu polttoaineensyöttöjen tasalle. (Parkkonen 2007, 6)

Primääri- ja sekundääri-ilmajärjestelmät ovat varustettu savukaasu- ja höyryesilämmittimillä. Höyryesilämmittimiä käytetään kattilan kylmäkäynnistyksessä sekä normaalin käytön aikana säätämään savukaasujen loppulämpötilaa yli happokastepisteen sekä palamisilman lämpötilaa yli vesikastepisteen. Kattilan konvektio-osaan on sijoitettu kaksiosainen savukaasuluvo joka on kytketty vastavirtaan savukaasuihin nähden. (Parkkonen 2007, 7)

5.2.2 Savukaasujärjestelmä

Savukaasut pyritään poistamaan kattilan tulipesästä oikeassa paineessa ilmakehään siten, että suunniteltu lämmönsiirto kattilaveteen ja palamisilmaan toteutuu. Lämpöpintojen jälkeisten sähkösuodattimien tehtävänä on poltossa syntyvien epäpuhtauksien erottaminen savukaasuvirrasta. Savukaasupuhaltimia on kaksi kappaletta, kumpikin mitoitusteholtaan 65 % täyden kuorman savukaasumäärästä. Puhaltimet ovat radiaalipuhaltimia, joissa on virtausmäärän säätöä varten pneumaattisesti ohjattavat johtosiivet sekä taajuusmuuttajat.

Savukaasut puhdistetaan 2 kammioisella sähkösuodattimella, joissa molemmissa kammioissa on 3 erotuskenttää. Kumpikin kammio on mitoitettu 60 % savukaasumäärälle. Sähkösuodattimien jälkeen savukaasut ohjataan ulos piippuun. Kattilan petilämpötilan säätöön voidaan käyttää tarvittaessa savukaasua eli ns. kiertokaasua, koska sillä on inerttinä kaasuna voimakas jäähdyttävä vaikutus. Kiertokaasu otetaan radiaalipuhaltimella savukaasupuhaltimien jälkeisestä

savukaasuvirrasta ja johdetaan etuseinän käynnistyspoltinten aukoista tulipesään. (FosterWheeler 2007, 8)

5.2.3 Vesijärjestelmä

Syöttövesi kattilaan pumpataan 250 m^3 syöttövesisäiliöstä sähkökäyttöisillä syöttövesipumpuilla. Molemmat pumput on mitoitetty täydelle 100 % kuormalle. Syöttövesisäiliöön tuodaan myös lauhteet kaukolämpövaihtimilta sekä korkeapaine-esilämmittimiltä. Lisävesi tuotetaan Kaukaan tehtaiden soodakattilan lisäveden valmistuslaitoksella ja pumpataan sieltä biovoimalaitoksella sijaitsevaan lisävesisäiliöön. (Kuiri 2008, 6)

5.2.4 Tuhkajärjestelmä

Kattilan tuhkajärjestelmä koostuu pohja- ja lentotuhkajärjestelmästä. Pohjatuhka johdetaan kattilan pohjalta jäähdytetyillä pohjatuhkaruuveilla seulan kautta pohjatuhkalavoille. Seulan läpässyt tuhka ja hiekka palautetaan takaisin tulipesään. Lentotuhka poistetaan kattilan vetojen pohjilta ja sähkösuodattimien tuhkasuppiloista pneumaattisilla tuhkalähettimillä lentotuhkasiiloon. Siilosta tuhka voidaan purkaa joko kuiva- tai märkäpurkuna kuorma-autoon ja kuljetuksilla jatkokäyttöön. (Kuiri 2008, 5)

5.2.5 Ilmapäästöjen hallinta

Laitokselle on sen ympäristöluvassa asetettu päästörajat ilmaan typenoksideille (NO_x), rikkidioksidille (SO_2), hiilimonoksidille (CO) ja hiukkasille. Mittauspisteet sijaitsevan laitoksen savupiipussa. Tuntikeskiarvolla mitattuna ja 6 % kuivan savukaasun happipitoisuuteen (O_2) redusoituna vuorokauden päästörajat on esitetty taulukossa 4.

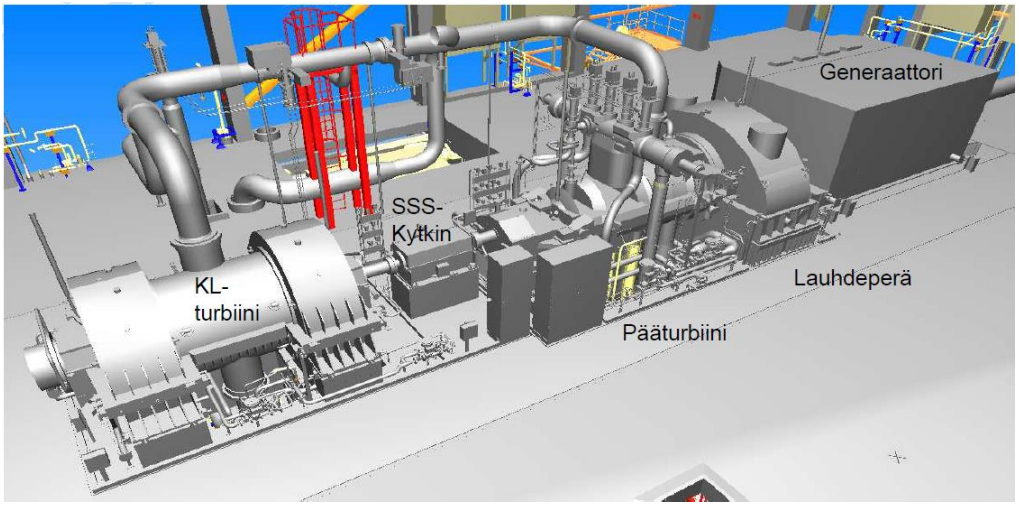
Taulukko 4. KauVo:n vuorokauden päästörajat tuntikeskiarvolla mitattuna, 6% O_2-kuiva savukaasu.

Kaasu	Päästöraja [mg/m^3n]
NO_x	150
SO_2	200
CO	250
Hiukkaset	20

Leijukerrospoltossa on matalan palamislämpötilan takia mahdollista polttoteknisesti päästä alhaisiin NO_x-pästöihin varsinkin puupolttoaineita poltettaessa. Tarvittaessa NO_x-päästöjä voidaan vähentää myös savukaasujen ammoniakkiruiskutuksen avulla. SO_2-päästöjen vähentämiseksi laitoksella on mahdollisuus syöttää kalkkikivijauhetta tulipesään. Tämä on tarpeellista lähinnä jos turvetta joudutaan polttamaan suurempia määriä. Savukaasujen sisältämän kiintoaineen erotukseen laitoksella on kaksi sähkösuodatinta, joiden erotusaste on yli 99 %. (Itä-Suomen Ympäristölupavirasto 2007, 7)

5.3 Turbiinilaitos

Voimalaitoksen höyryturbiini on vastapaine-väliottoturbiini lauhdeperällä sekä erillinen kaukolämpöturbiini. Kaukolämpöturbiini on kytkettynä samalle akselille pääturbiinin kanssa kytkimen avulla, joten se on mahdollista erottaa pääturbiinista. Kuvassa 15 on esitetty turbiinin rakenne. Turbiinissa on väliotot korkeapaine-esilämmittimille, ja HVP höyrylle. Turbiini on mitoitettu mitoituspisteelle 149 kg/s ja sen maksimi nielukyky ylikuormapisteessä on 156 kg/s. (Kuiri 2008, 5)



Kuva15. Vastapaine-väliottoturbiini lauhdeperällä sekä erillinen kaukolämpöturbiini. (Kuiri 2009)

5.3.1 Höyryjärjestelmä

Voimalaitoksen höyrynjakelujärjestelmässä on kaksi pääpainetasoa, HMP 3,5 bar ja HVP 10,5 bar. Näissä painetasoissa höyryä toimitetaan Kaukaan tehtaille.

Voimalaitos on yhdistetty Kaukaan tehtaiden höyryverkkoihin putkisillalla menevillä höyryputkilla. Laitoksen sisällä on myös yksittäisiä kulutuskohteita palvelevia eri painetasoisia höyryverkkoja turbiinin eri kohdissa ja korkeapaine-esilämmittimien toiminta-alueella.

Pääasiassa eri painetasoiset höyryt otetaan turbiinin väliotoista. Poikkeustilanteita varten joita ovat laitoksen käynnistys, pysäytys ja turbiinin huolto laitos on varustettu reduktioventtiileillä, joilla kattilan tuorehöyry voidaan redusoida HMP- ja HVP-verkkoihin ennen turbiinia. Voimalaitoksella on HMP-verkkoon kytkettynä kaksi 15 kg/s ulospuhallusventtiiliä tasaamaan mahdollisia nopeita höyrykuorman pudotuksia. Lisäksi kattilalla on omat ulospuhallusventtiilit päähöyrylinjassa estämässä tuorehöyryverkon liiallista paineennousua. (Kuiri 2008, 6)

5.3.2 Kaukolämpöjärjestelmä

Kaukolämpöturbiini on kytketty pääturbiinin 3,5 bar väliottoon. Turbiini on rakenteeltaan kaksijuoksuinen turbiini, jossa tuloyhde on turbiinin keskellä. Höyry virtaa keskeltä turbiinin molempien päiden poistoyhteisiin ja edelleen kaukolämmönvaihtimiin. Kaukolämpöturbiinin jälkeiset lämmönvaihtimet KLV1 ja KLV2 ovat kytketty sarjaan, eikä vaihtimia voida erottaa yksitellen. Poikkeustilanteita varten on HMP-verkkoon kytketty kaukolämmönvaihdin KLV3, jolla voidaan ajaa kaukolämpöverkkoon mitoitusteho vaikka turbiini ei olisikaan käytössä. (Kuiri 2008, 7)

Kaukolämmön kiertojärjestelmään kuuluu kaksi pyörimisnopeussäädettyä sarjaan kytkettyä keskipakopumppua, joista toinen on laitokselle tulevassa linjassa ennen lämmönvaihtimia ja toinen laitokselta lähtevässä linjassa lämmönvaihtimien jälkeen. Voimalaitoksella on myös kaukolämpöverkon paineenpitojärjestelmä. Kaukolämpöjärjestelmän ajo tapahtuu yhteistyössä Lappeenrannan Energian kanssa.

Kaukolämpöjärjestelmään on kytketty myös kaukolämmön apujäähdytin. Apujäähdytin on levylämmönsiirrin, jolla voidaan saada aikaan keinotekoista kuormaa laitoksen sisäiseen kaukolämpökiertoon. Jäähdyttimen teho vaihtelee 60 - 90 MW riippuen käytettävän jäähdytysveden lämpötilasta. Keinotekoista kuormaa tarvitaan varsinkin kesäaikaan kattilan minimikuorman turvaamiseksi, kun

Lappeenrannan kaukolämmönkulutus ja Kaukaan tehtaiden höyrynkulutus ovat samanaikaisesti pientä. (Kuiri 2008, 8)

5.3.3 Lauhde- ja jäähdytysjärjestelmä

Turbiinin lauhdeperän kapasiteetti on 20 kg/s ja minimihöyryvirta 3,25 kg/s, eli sinne ajetaan jatkuvasti jäähdytyshöyryvirtaus. Lauhdeperään johdetaan pääturbiinin jälkeistä 3,5 bar höyryä jonka määrää ohjataan venttiilillä. Lauhduttimen paine vaihtelee 0,012 bar ja 0,035 bar välillä riippuen tulevan jäähdytysveden lämpötilasta. Jäähdytysvesi lauhduttimeen otetaan kylmävesiverkosta, joka on laitoksella toimiva makrovesiverkko. Makrovesi voimalaitokselle tuotetaan Kaukaan tehtaiden vesilaitoksella, jonne on rakennettu biovoimalaitosta varten uusi makrovesipumppu sekä raakavesipumppu. Makrovesiverkolla jäähdytetään myös kaukolämmön apujäähdytintä sekä suljettua jäähdytysvesikiertoa, joka hoitaa mm. turbiinin öljynjäähdytykset ja generaatorin jäähdytysilman jäähdytyksen. (Kuiri 2008, 9)

Kaukaan tehtaalta voimalaitokselle tulevat lauhteet kerätään 100 m^3 päälauhdesäiliöön, jonne johdetaan myös lauhteet kattilan ja turbiinin omakäyttölauhdesäiliöstä. Tehdaslauhteiden jako soodakattilalle tai KauVo:lle tapahtuu putkisillalta käsiventtiileiden avulla sekä ennen päälauhdesäiliötä olevalla säätöventtiilillä. Päälauhdesäiliöön tulevan lauhde puhdistetaan 2-vaiheisessa lauhteenpuhdistuksessa, joka koostuu patruunasuodattimesta sekä sekavaihtimesta (MB-suodatin). (Kuiri 2008, 6)

5.4 Käytöntarkkailu ja säätö

Voimalaitoksen käytöntarkkailu eli ohjaus ja valvonta suoritetaan Kaukaan sellutehtaan soodakattilan valvomosta, jossa on jatkuva miehitys. Ohjaus ja säätäminen toteutetaan MetsoDNA-prosessinohjausjärjestelmällä, joka on yhteydessä laitoksen automaatio- ja mittausjärjestelmiin. Ohjelmalla hoidetaan myös laitoksen häiriöseuranta ja raportointi. Ohjaamonhoitaja tekee automaation avulla laitoksen käytöntarkkailua ja linjanhoitaja tarkastuskäyntejä laitoksella sekä säännönmukaisesti että saatuaan hälytyksiä. Turpeen ja kuoripolttoaineen laatua seurataan tekemällä sekä tuontikuormista että oman tehtaan jakeista kosteus- ja lämpöarvomäärityksiä.

Laitoksen perusajotapana on toiminta lämpökuorman, eli Kaukaan tehtaan prosessilämmön sekä Lappeenrannan Energian kaukolämpökuorman mukaan. Sähköntuotanto on verrannollinen hetkelliseen lämmöntuotantoon. Pääsääntöisesti voimalaitos toimii säätävänä laitoksena, ja tasoittaa Kaukaan tehtaiden höyryverkossa tapahtuvia höyryntarpeen muutoksia. Turbiini säätää vastapainetta sekä lähtevän kaukolämpöveden lämpötilaa ja kattila säätää tuorehöyryverkon painetta. Kaukolämpöverkon säädössä käytettävä säätötapa on sovittu yhdessä Lappeenrannan Energian kanssa. (Kuiri 2008, 9)

Turbiinin lauhdeosa antaa mahdollisuuden tuottaa sähköä vapaan kattilakapasiteetin puitteissa silloin, kun tuotetun sähkön rajakustannus alittaa sähkön markkinahinnan. Lauhdeosa myös helpottaa voimalaitoksen ajoa suurissa kuorman muutoksissa, sillä jatkuvasti päällä oleva lauhdeperä pystyy lisäämään tai vähentämään kulutusta hyvin nopeasti, jolloin kattilakuorma saadaan tasaisemmaksi normaalille säätöalueelle. (Kuiri 2008, 9)

6 KAUKAAN VOIMA:N ENERGIANTUOTANTO

6.1 Energiatase

KauVo:n biovoimalaitos valmistui kaupalliseen käyttöön loppuvuodesta 2009 Esisuunnittelu- ja mitoitusvaiheessa vuonna 2007 biovoimalaitoksen vuosittaiseksi polttoainetarpeeksi arvioitiin noin 2300 GWh lauhdesähkön tuotannon minimimäärällä ja noin 2800 GWh lauhdesähkön tuotannon maksimimäärällä. Laitoksen koon määrittelyn lähtökohtana oli ennuste Kaukaan tehtaiden lämpökuorman kehityksestä. Kuorman oletettiin kasvavan vuoden 2005 jälkeen vuosittain 10 GWh/a vuoteen 2020 saakka. Voimalaitoksen oletettu käyntiaika vuodessa oli noin 8000 h. (Bastman 2007, 6) Taulukossa 5 on esitetty KauVo:n toteutunut käyntiaika, polttoainekäyttö ja tuotettu energia vuosina 2010 - 2012.

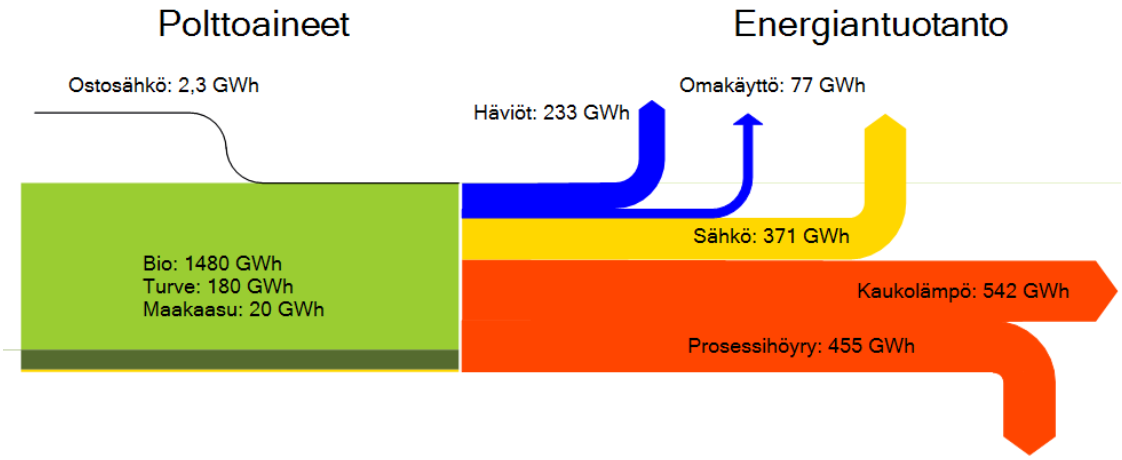
Taulukko 5. KauVo:n toteutunut polttoainekäyttö 2010 - 2012

Vuosi	Käyntiaika [h]	Polttoaineiden käyttö [GWh]	Energiantuotanto [GWh]
2010	7100	1927	1404
2011	7160	1773	1217
2012	6940	1679	1370

Kuten taulukosta 5 näkee, vuosittainen polttoaineiden käyttö KauVo:lla on jäänyt valmistumisen jälkeen reilusti alle suunnitteluarvojen. Mitoitusvaiheessa tehdasalueella toimi vielä UPM:n vaneritehdas joka toimi höyrynkuluttajana ja josta syntyvää vanerinsyrjää suunniteltiin poltettavan KauVo:n kattilassa. Lisäksi paperitehtaan höyrynkulutuksen oletettiin kasvavan tasaisesti. Höyryntarve on kuitenkin viime vuosina päinvastoin vähentynyt. Tämä johtuu tehtaan energiatehokkuuden paranemisesta sekä toisaalta paperitehtaan käyntiasteiden jäätyä mahdollisesti suunniteltua pienemmiksi. Vaneritehtaan toiminta lopetettiin kokonaan vuonna 2010 osana UPM:n tehostamistoimia. Tämä aiheutti suoraan noin 100 GWh - 150 GWh vuosittaisen vähennyksen KauVo:n polttoaineiden käytölle ja samalla höyrynkulutukselle.

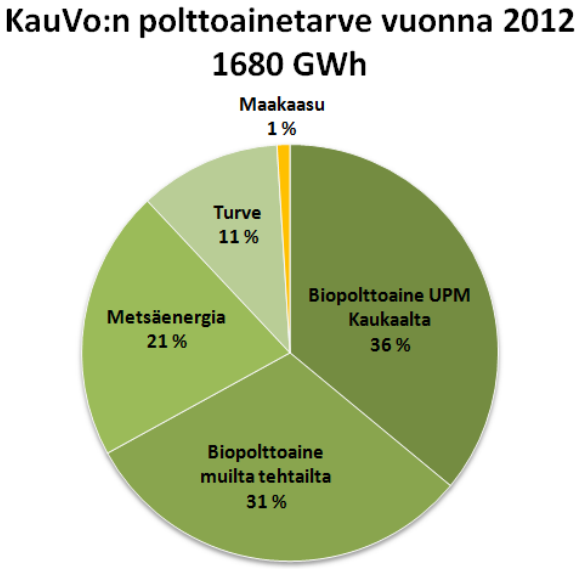
Kuvassa 16 on esitetty eSankey-ohjelmistolla tehty Sankey-diagrammi, joka kuvastaa KauVo:n energiatasetta vuonna 2012. Sankey-diagrammissa ainevirtojen

paksuudet ovat verrannollisia tarkastellun taseen kokonaismäärään. Kulutus- ja tuotantoarvot on kerätty KauVo:n vuoden 2012 vuosiyhteenvedosta.

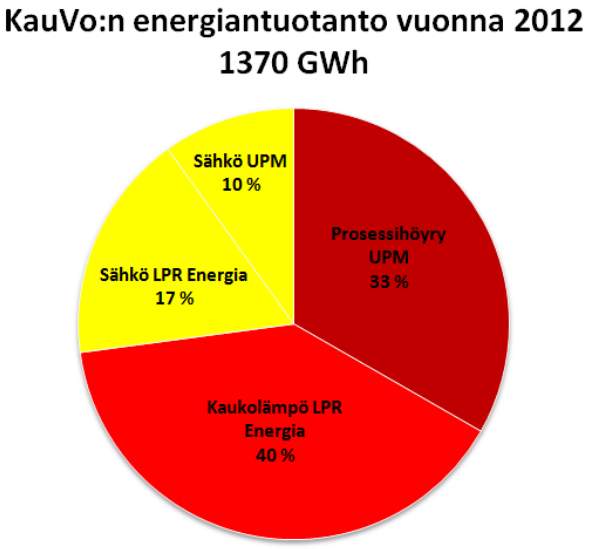


Kuva 16. KauVo:n energiatase 2012 Sankey-diagrammi.

Polttoaineosion ostosähkö kuvaa laitoksen seisomisen aikana omakäyttötarpeisiin ostettua sähköä. Laitoksen polttoainetarve vuonna 2012 oli 1680 GWh ja toimitettu nettoenergiantuotanto 1368 GWh. Häviöiden ja omakäyttöenergian osuus oli yhteensä 310 GWh. Tuotantolukujen perusteella laitoksen rakennusaste vuonna 2012 oli 0,37 ja kokonaishyötysuhde 0,82. Toteutuneen polttoainetarpeen tarkempi jakautuminen on esitetty kuvassa 17 ja toimitettu energia osakkaille kuvassa 18.



Kuva 17. KauVo:n polttoainetarpeen jakautuminen vuonna 2012.



Kuva 18. KauVo:n energiantuotannon jakautuminen 2012.

Kuten kuvasta 17 nähdään, KauVo:n kokonaispolttoainetarpeesta noin 35 % saavutetaan UPM Kaukaan tehtailta suoraan kuljettimilla tulevilla polttoaineilla. Näistä suurimman osan muodostavat sellun, paperin, ja sahan kuorimoiden kuorijakeet. Noin 65 % vuosittaisesta polttoainetarpeesta on Kaukaan ulkopuolisia polttoainejakeita. Näihin kuuluu kuoripolttoaine muilta tehtailta, metsäenergia sekä turve.

6.2 Polttoainehuolto

Kuten kappaleessa 3 käsiteltiin, biopolttoaineiden käyttö asettaa omat polttotekniset haasteensa niitä polttoaineenaan käyttäville voimalaitoksille. Käytettäessä biopolttoaineita polttoaineen laadun hallinta on erittäin tärkeää kattilan ongelmattoman toiminnan ja korkean käytettävyyden takaamiseksi. Polttoaineen laadun tulisi kaikissa tilanteissa pysyä laitetoimittajan sopimusvaatimusten rajoissa polttohäiriöiden, laitevaurioiden ja liiallisen korroosion estämiseksi. Huonolaatuinen polttoaine aiheuttaa voimalaitoksen epäkäytettävyyttä ja ylimääräisiä energiantuotantokustannuksia. (Parkkonen 2007, 27)

Polttoaineen kuiva-aine tai kuiva-ainepitoisuus on polttoaineanalyysien raportointiperusta. Kuiva-aineen massa on polttoaineen vedettömän osan kokonaismäärä. Polttoaineen kosteus taas vastaavasti tarkoittaa polttoaineen vesipitoisuutta eli polttoaineessa olevan veden suhdetta polttoaineen veden ja kuiva-

aineen yhteenlaskettuun painoon. Energiantuotannon kannalta polttoaineen merkittävin ominaisuus on sen lämpöarvo. Polttoaineen lämpöarvo ilmaisee sen täydellisessä palamisessa kehittyvän energiamäärän ja se ilmoitetaan yleensä megajouleina polttoainekiloa kohden. Kalorimetrisessä lämpöarvossa eli ylemmässä lämpöarvossa on otettu huomioon palamisen yhteydessä syntyvän vedyn höyrystymisenergia. (Alakangas 2000, 26)

Suomessa polttoaineiden lämpöarvo ilmoitetaan kuitenkin yleensä tehollisena lämpöarvona eli alempana lämpöarvona. Tehollinen lämpöarvo saadaan selville kalorimetrisestä lämpöarvosta ottamalla huomioon myös polttoaineen sisältämän vedyn palamisessä syntyvän ja savukaasuissa poistuvan vesihöyryn haihduttamiseen kuluvan energian. Polttoaineen tehollinen lämpöarvo toimituskosteudessa saadaan edelleen selville kuiva-aineen tehollisesta lämpöarvosta. Puupolttoaineiden kuiva-aineen teholliset lämpoarvot liikkuvat yleensä alueella 18,5 - 20,0 MJ/kg. (Alakangas 2000, 27)

Tehollinen lämpöarvo toimituskosteudessa eli saapumistilassa $Q_{net,ar}$voidaan laskea yhtälöllä:

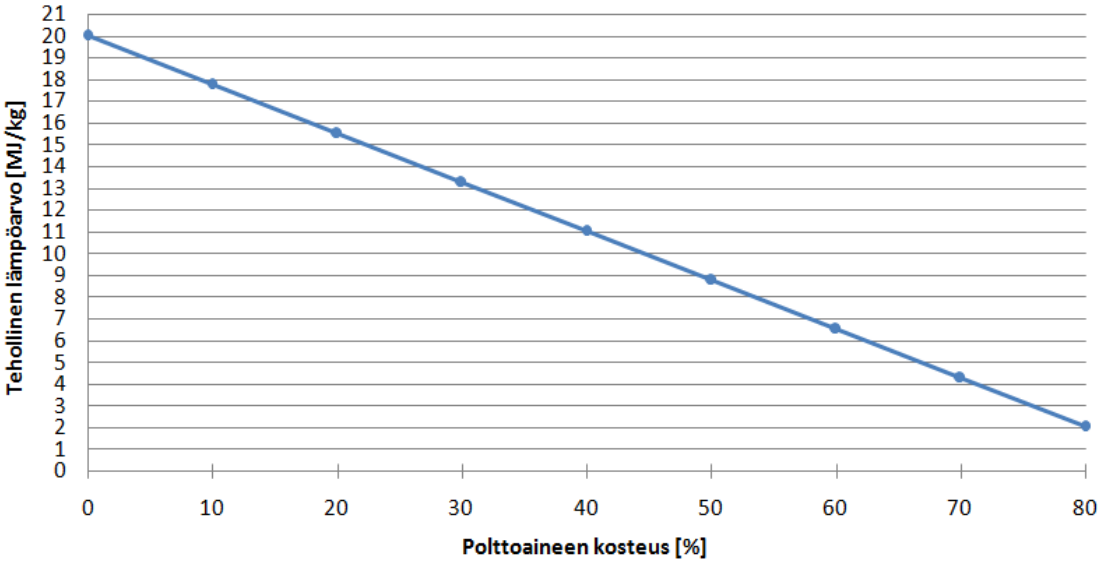
$$Q_{net,ar} = Q_{net,d} * \frac{100-M_{ar}}{100} - 0{,}02441 * M_{ar} \tag{7}$$

missä $Q_{net,d}$ kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]

M_{ar} vastaavan polttoaine-erän kokonaiskosteus saapumistilassa [%]

0,02441 veden höyrystymiseen kuluva lämpömäärä [MJ/kg]

Biopolttoaineiden voimalaitoskäytössä sen tärkein laatuominaisuus on siis sen sisältämä kosteus. Kosteus vaikuttaa suoraan polttoaineen teholliseen lämpöarvoon, koska veden höyrystyminen vaatii energiaa. Laitoksen biopolttoaineesta saama energiahyöty kasvaa polttoaineen kuivamassan kasvaessa ja kosteuden alentuessa. Biopolttoaineiden kuten puun ja kuoren kosteuspitoisuus on yleensä 60 - 55 %. (Alakangas 2000, 27) Kuvassa 19 on esitetty yhtälön 7 pohjalta tehty kuvaaja polttoaineen tehollisen lämpöarvon ja sen sisältämän kosteuden riippuvuudesta, kun polttoaineen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 20 MJ/kg.



Kuva 19. Polttoaineen tehollisen lämpöarvon riippuvuus kosteudesta, kun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo 20 MJ/kg.

Tehtaan omilla kuorimoilla talteen otettu kuori revitään ja puristetaan, jotta se soveltuu paremmin polttoon. Kasvavan puun kuoren kuiva-ainepitoisuus on 40 - 65 %. Mikäli puu on tuotu tehtaalle uittamalla, sen kuoren kuiva-ainepitoisuus on laskenut 17 - 28 %:iin. Maitse kuljetetun ja kuivana kuoritun kuoren kuiva-ainepitoisuutta ei pystytä puristamalla nostamaan. Märkäkuorinnasta tulevan kuoren kuiva-ainepitoisuus on puulaadun mukaan 20 - 35 %, joka pystytään puristamalla nostamaan noin 35 - 50 %:iin. (Huhtinen et al. 2000, 74) Revinnän ja puristuksen jälkeen kuori ohjataan hihnakuljettimilla välivarastointiin ja sitä kautta voimalaitokselle polttoon.

Polttoaineiden laadunmäärittely on kattilalaitoksen tasaisen toiminnan takaamisen lisäksi tärkeää KauVo:lle myös taloudelliselta kannalta, koska polttoaineen hankintakanavana käytetään UPM:n organisaatiota. Polttoainejakeet laskutetaan kuukausittain toimitetun polttoainelämpömäärän (MWh) perusteella. KauVo:lle tulevista biopolttoaineista otetaan säännöllisesti näytteitä polttoaineiden kosteuspitoisuuden ja lämpöarvon määrittämiseksi. Käyttöhenkilöstö ottaa sellun, paperin ja sahan kuorimoilta tulevista kuorista kerran vuorossa kuorinäytteen. Näyte otetaan kuorimoiden omilta kuljetinhihnoilta revinnän jälkeen ennen aumavarastoon johtavaa yhteistä hihnakuljetinta.

6.2.1 Ulkoisten polttoinejakeiden määrä

Kuljettajat ajavat tuontipolttoaineen tehtaalle vaa'an kautta ja ottavat näytteen jokaisesta tehtaalle tuotavasta polttoainekuormasta ennen kuorman purkamista vaastaanottoasemille. Jos samalta toimittajalta tulee useampia kuljetuksia päivässä, sekoitetaan näytteet analyysilaboratoriossa astiassa ja tästä otetaan keräilynäyte. Vastaanotettujen kuormien paino kirjautuu UPM:n järjestelmään. Kaikki näytteet toimitetaan alatehtaalla sijaitsevaan näytelaboratorioon, jossa niistä määritetään uunikuivauksella kuiva-ainepitoisuus ja sen perusteella lämpöarvo. Näin saadaan selville jokaisen polttoainekuorman sisältämä lämpömäärä laskutusta varten. (Laitinen, haastattelu 12.6.2013)

6.2.2 Kaukaan tehtaan polttoainejakeiden määrä

Tehtaan omien kuorijakeiden määrän ja edelleen toimitetun energiamäärän selvittämiseksi kuorimoilta aumavarastoon johtaville kuljetinhihnoille on asennettu kuljetinvaa'at. Kuljetinvaa'at ovat radiometrisiä mittalaitteita. Mittalaite muodostuu säteilijä- ja ilmaisinosasta, jotka sijoitetaan mitattavan kuljettimen vastakkaisille puolille. Säteilylähteen ansiosta vaaka ei kosketa kuljetinta. Vaaka ilmoittaa järjestelmään hihnalla liikkuvan kuoren massan tonneina tunnissa (t/h). (Ohmart Vega 2009, 4)

Oman tehtaan jakeet pyritään mittaamaan aina vaa'oilla, mutta jos vaa'at toimivat epätarkasti käytetään apuna laskennallista menetelmää. Laskennallisessa menetelmässä käytetään kiinteää kerrointa, jolla kuoren määrä lasketaan suoraan alueella käsitellyn raaka-aineen määrästä. Ongelmana kuljetinvaakojen käytössä Kaukaalla on ajoittain ollut niiden epävarmuus. Varsinkin Kaukaan sahalta tulevan jakeen määrää mittaava kuorivaaka on aika-ajoin näyttänyt polttoainevirtausta vaikka kuljetinhihna olisi tyhjillään. Näin ollen sahan toimittaman polttoainejakeen määrä on ollut ajoittain epäselvää ja arvailujen varassa.

6.2.3 Sahan toimittaman polttoainemäärän hallinta

Kaukaan sahalla käytetään pääasiallisena raaka-aineena mäntytukkia. Lisäksi kuusitukkia on aika-ajoin sahauksessa pieniä määriä. Sahan kuorimolta KauVo:lle tuleva kuorimäärä on hihnavaa'an epäluotettavuuden takia ollut laskennallinen.

Sahan kuorimolla kuorta syntyy sahalle menevän tukkipuun kuorinnasta sekä ns. siivouskuorena. Siivouskuoreen kuuluu sahan tukkikentällä tukkien siirtelyssä tukeista irronnut kuori. Siivouskuorta syötetään kauhakuormaajalla säännöllisin väliajoin samalle hihnalle, jolle tukkikuorinnasta syntyvät kuoret tulevat. Tämän jälkeen kuorijae siirtyy kuorenrepimen kautta pitkälle hihnakuljettimelle, joka vie jakeen biopolttoaineiden yhteiseen aumavarastoon. (Väkeväinen, haastattelu 7.6.2013)

Johtuen kuorivaakojen toimimattomuudesta sahan kuorimäärästä on käytetty laskennallisesti kerrointa 0,06 eli syntyvän kuoren määrän on oletettu olevan 6 % sahattujen tukkikuutioiden määrästä. KauVo:lle tulevien polttoainejakeiden määrien hallinta on energiatehokkuutta tarkasteltaessa erittäin tärkeää, koska laitoksen kokonaishyötysuhde lasketaan kuukausittain raportointiin perustuvan lämmön- ja sähköntuotannon sekä polttoaineen kulutuksen perusteella. Sahalla todellisuudessa syntyvää kuorimäärää päätettin testata tämän johdosta kuorenajotesteillä.

Kuorimäärätesti suoritettiin viikon 26 aikana Kaukaan tehtaalla 24.6. - 28.6.2013. Testi katsottiin järkeväksi sijoittaa tälle viikolle, sillä saha ajoi koko kyseisen viikon jatkuvassa 3-vuorossa ja näin ollen syntyvää kuorta ja variaatiota eripaksuisten tukkien välillä tuli riittävästi. KauVo:n biovoimalaitos oli aikaisemmin ajettu alas kesäseisokkia varten 20.6.2013, joten kuoren polttotarvetta ei testin aikana ollut. Sahan vuorotyökäytännössä aamuvuoro aloittaa työnsä klo 08:00, iltavuoro klo 14:00 ja yövuoro klo 22:00. Tilanteesta riippuen sahalla on normaalisti ajossa joko 2- tai 3-vuoroa.

Kuori on mahdollista ajaa sahan kuorimolta revinnän jälkeen ruuvilla ulos betonibunkkeriin kuljetinhihnan sijasta. Sahan työnjohtohenkilöstön kanssa tehtiin sopimus kuorijakeen kääntämisestä bunkkeriin maanantaista 24.6. klo 08:00 alkaen perjantaihin 28.6.2013 klo 22:00 asti. Tehdasalueella toimivan kuljetusyrityksen kanssa sovittiin, että he ajavat tämän jakson ajan kuorijaetta erillisinä kuormina bunkkerista tehtaalla sijaitsevan autovaa'an kautta välivarastointiin. Kuorijakeelle luotiin erillinen leimauskortti, jolla kuljettajat leimasivat punnituksen yhteydessä jokaisen kuorikuorman painon ylös järjestelmään. Näin saatiin selville testijakson aikana syntyneen kuoren kokonaismäärä kuormien yhteispainon perusteella.

Liitteessä 1 on esitetty UPM:n rapujärjestelmään kirjautuneet kuormat ja niiden yhteispaino. Testijakson ajo sujui kaikkien osapuolten mielestä onnistuneesti.

Sahattujen tukkikuutioiden määrä kyseisellä viikolla saatiin selville sahan tuotantopäällikön ilmoituksesta, ja se oli 20 868 m^3. Syntynyttä kuorta ajettiin yhteensä 18 kuormallista ja punnittu kuoren yhteispaino oli 405 900 kg. Kyseisellä viikolla tehtiin kuoresta kosteusanalyysit analyysilaboratoriossa normaalin toimintatavan mukaisesti kerran päivässä. Keskimääräiseksi kosteuspitoisuudeksi saatiin 58,92 %. Sahan kuorelle kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona on sovittu käytettävän arvoa 19,69 MJ/kg. Testin laskenta on esitetty liitteessä 1 ja tulokset taulukossa 6.

Taulukko 6. Sahan laskennallinen kuorimäärä ja viikon 26 kuorenajotestin tulokset.

Sahan kuorijae	**Kuorimäärä [m^3]**	**Kuoriprosentti [%]**	**Energiasisältö [MWh]**
Sahan kuori laskennallinen	1252,08	6,00	810
Sahan kuori todellinen	1159,71	5,56	750
Erotus	92,37	0,44	60

Kuten taulukosta 6 näkee, syntynyt kuorimäärä oli todellisuudessa 5,56 % ja näin ollen 0,44 % vähemmän kuin laskennallinen käytetty kuorimäärä. Kyseisen viikon keskimääräisellä polttoainekosteudella laskettuna kuorijakeen energiasisältö oli 60 MWh vähemmän kuin laskutuksessa käytetty. Todellinen kuorimäärä on hyvin lähellä käytettyä 6 % laskennallista määrää, joten laskennallista prosenttiosuutta voi pitää paikkansa pitävänä ja käyttää tarvittaessa jatkossakin voimalaitoksen kokonaishyötysuhdetta tarkasteltaessa ja sahan kuorijakeen laskutuksessa.

Sahan KauVo:lle toimittama polttoainemäärä vuositasolla on yhteensä noin 100 - 150 GWh. KauVo:n kokoisessa voimalaitoksessa käytetään polttoainetta kuukausittain yhteensä jopa 200 GWh, joten polttoainehuolto ja polttoainevirtojen hallinta on taloudellisesti tärkeää voimalaitoksen energiatehokkuutta ja hyötysuhdetta tarkasteltaessa. Pienetkin prosenttivirheet ja epävarmuudet polttoainehuollossa kasvattavat laitoksen toiminnan kokonaiskuluja nopeasti.

7 OMAKÄYTTÖSÄHKÖN TARKASTELU

Vuoden 2010 aikana voimalaitoksella tehtiin vielä paljon käytännön ajomalleihin liittyvää säätötyötä. Vuoden 2011 aikana taas joitakin prosessimittauksia jouduttiin korjaamaan tai vaihtamaan, kun huomattiin että ne näyttävät epätarkasti tai kokonaan väärin. Vuosi 2012 oli voimalaitoksen tarkasteludatan keräystä ja analysointia varten tähän astisista ajovuosista onnistunein. Ajo oli onnistunutta lukuunottamatta yhtä pidempää suunnittelematonta kattilan alasajoa.

Tässä kappaleessa tarkastellaan KauVo:n vuosittaiseen energiantuotantoon vaikuttavia tekijöitä, ajokuormia sekä omakäyttösähkön kulutusta ja omakäyttöhyötysuhdetta vuonna 2012. Tarkastelussa selvitetään voimalaitoksen suurimmat omakäyttösähkön kuluttajat ja osastot, joihin kannattaa keskittyä laitoksen energiatehokkuuden parantamiseksi.

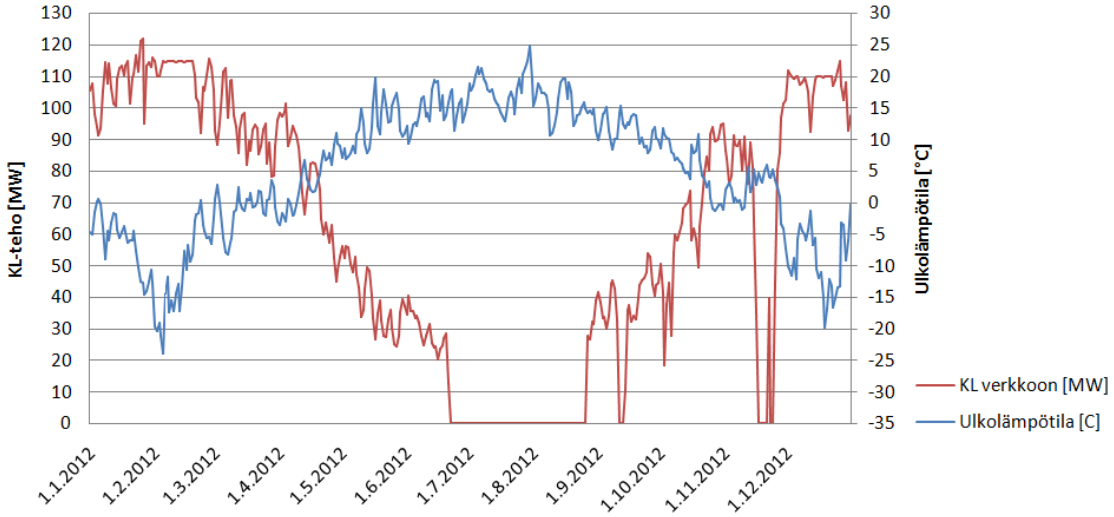
7.1 Ajokuorma ja tuotettu energia eri vuodenaikoina

Koska kaukolämpövoimalaitoksia ajetaan lämpökuorman mukaan, ajoittuvat KauVo:nkin suurimmat tuotantotehot talven pakkaskauden ajalle. Lisäksi Kaukaan tehtaille toimitettavan lämmityshöyryn tarve kasvaa talvella, kun Saimaasta tehtaan prosessikiertoon otettavan raakaveden lämpötila laskee. Keväisin ja syksyisin kaukolämmöntarve on pienempää ja raakaveden lämpötila korkeammalla, joten laitoksen ajokuormakin pienenee. Kesäkuukausina juuri ennen ja jälkeen kesäseisokkia laitoksella ajetaan minimikuormaa.

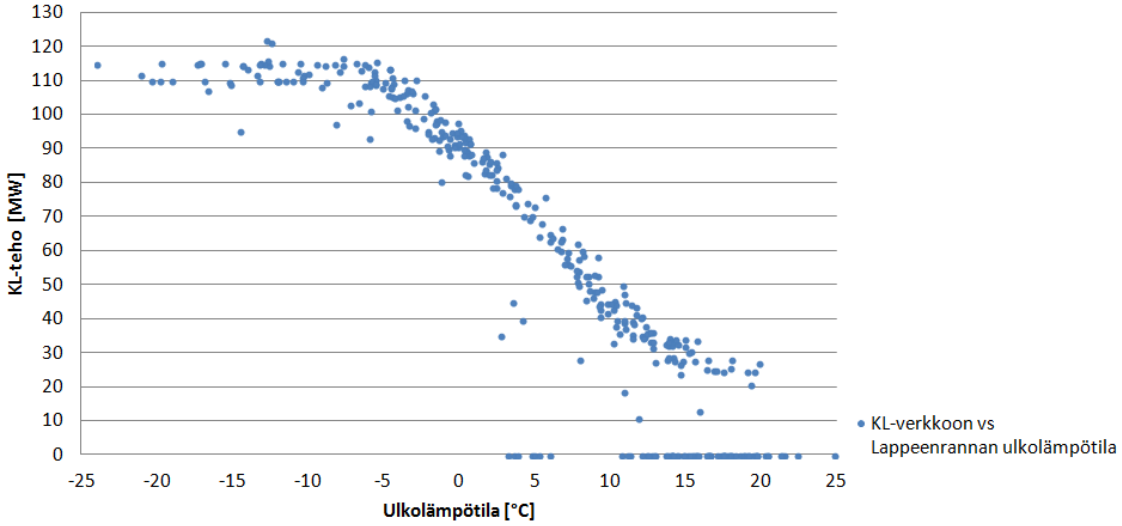
Tarkastellaan seuraavaksi KauVo:n tuotantolukuja ja -muuttujia vuodelta 2012. Kesäseisokki kesti yli 2 kk ja se toteutettiin 22.6. - 27.8. Syyskuun alussa kattila oli hetken aikaa pois tuotannosta UPM Kaukaan tehtaiden vuosihuoltoseisokin takia. Lisäksi kattila oli huollossa ja alhaalla viikon ajan 17.11. – 24.11. johtuen leijupetiongelmista.

Kuvassa 20 on esitetty ajallisesti Lappeenrannan ilman ulkolämpötila verrattuna KauVo:n tuotettuun kaukolämpötehoon, sekä kuvassa 21 nämä muuttujat määrällisesti pisteittäin vuoden 2012 ajalta. Kuvassa 22 on puolestaan esitetty ajallisesti KauVo:n tehtaalle toimittaman höyryn lämpöteho verrattuna Saimaasta otettavan raakaveden lämpötilaan sekä kuvassa 23 nämä muuttujat määrällisesti

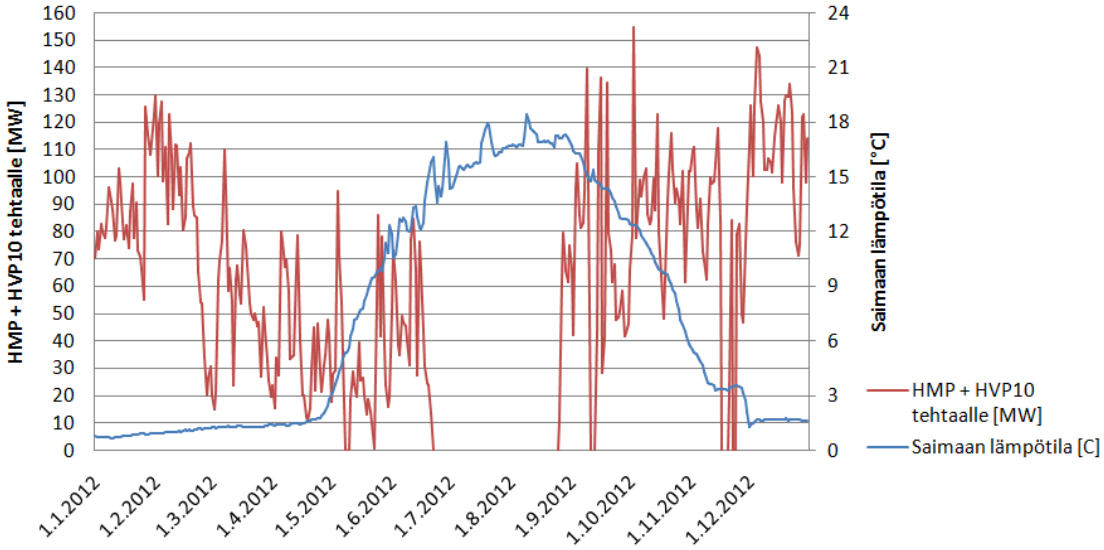
pisteittäin vuonna 2012. Ilman ulkolämpötila on mitattu Kaukaan tehdasalueelta ja Saimaan lämpötila tehtaan raakaveden otosta. Tarkasteludatan pisteet vuoden ajalta on kerätty päiväkeskiarvona MetsoDNA-prosessitiedonkeruujärjestelmästä.



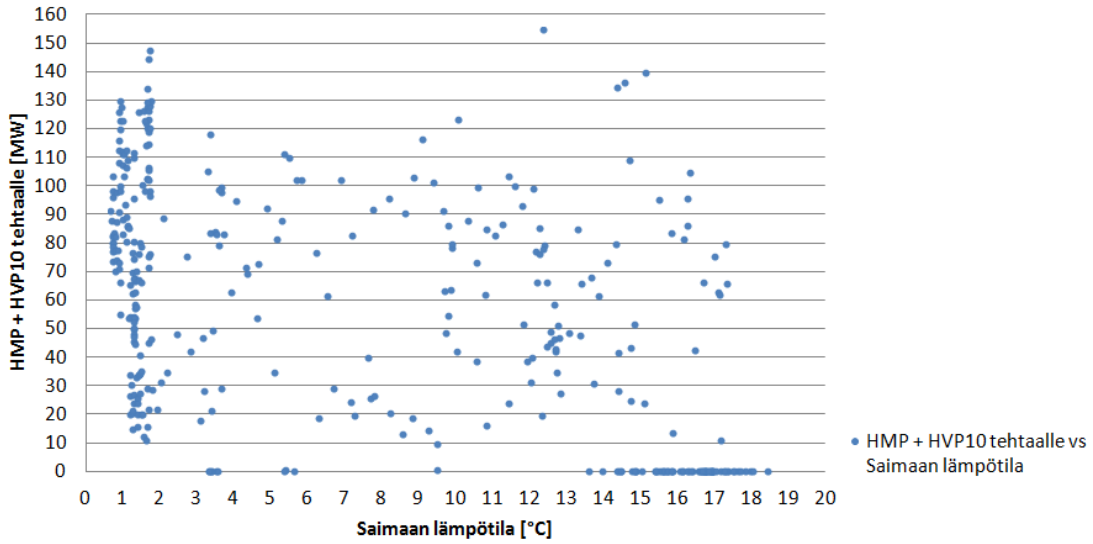
Kuva 20. Lappeenrannan ulkolämpötila ja KauVo:n KL-teho verkkoon vuonna 2012.



Kuva 21. Lappeenrannan ulkolämpötila vs KauVo:n KL-teho verkkoon päiväkohtaisesti vuonna 2012.



Kuva 22. Saimaan raakaveden lämpötila ja KauVo:n tehtaalle toimittama höyryteho vuonna 2012.



Kuva 23. Saimaan raakaveden lämpötila vs KauVo:n tehtaalle toimittama höyry päiväkohtaisesti vuonna 2012.

Kaukaan tehtaille toimitettavan vastapainehöyrykuorman eli HMP- ja HVP10 – höyryjen tuotanto vaihtelee aina välillä 0 - 150 MW, suurimpien toimitustehojen sijoittuessa talven kylmimmille kuukausille. Kuvasta 23 nähdään että tehtaalla on vuoden mittaan hyvin monenlaisia ajotilanteita, jotka vaikuttavat tehtaan prosessihöyryn tarpeeseen. Toimitettu höyryteho vaihtelee jatkuvasti kymmeniä megawatteja ja tämä kuvastaakin KauVo:n luonnetta tehtaan säätävänä laitoksena. Toimitettu höyryteho vaihtelee sahan kulutuksen, paperitehtaan käyntiasteen ja sellutehtaan oman höyryntuotannon ja tarpeen mukaisesti. Tehtaille toimitettu

höyrykuorma on säätävää kuormaa joka täydentää sen osan kokonaishöyrykuormasta, jota soodakattilalla tuotettu vastapainehöyry ei pysty kattamaan.

Voimalaitoksen ajokuormasta voidaan näiden diagrammien perusteella tunnistaa vuosittain 3 erityyppistä jaksoa:

1) Maksimikuormajakso: joulukuu - maaliskuu

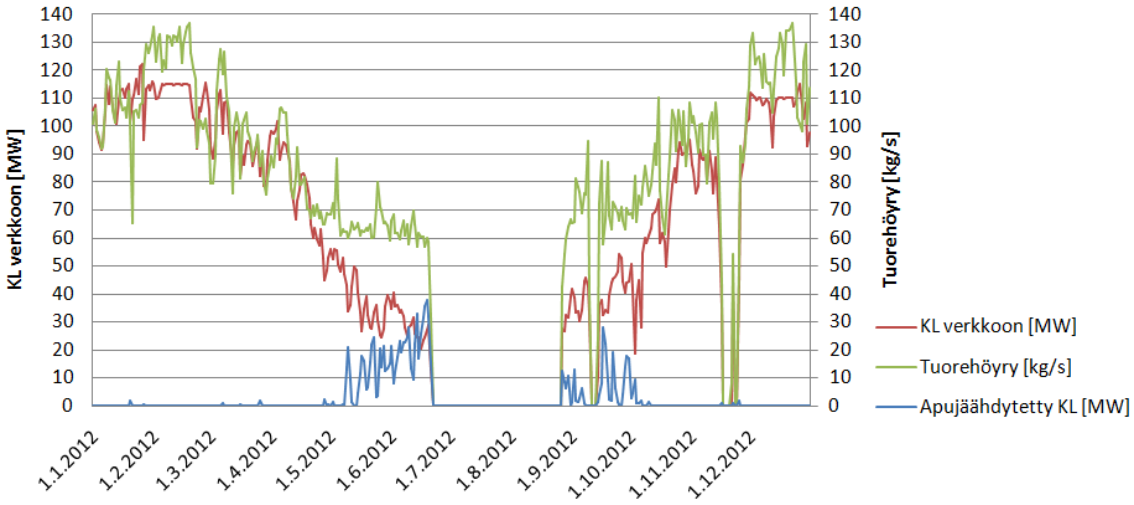
2) Osakuormajakso: huhtikuu-toukokuu ja syyskuu-marraskuu

3) Minimikuormajakso: kesäkuu-elokuu

Maksimikuormajakso sijoittuu välille joulukuu – maaliskuu, jolloin ulkoilman lämpötilojen päiväkeskiarvot vaihtelevat alueella -20 °C...0 °C. KauVo:n kaukolämpötuotanto riittää kattamaan Lappeenrannan kaukolämmöntarpeen noin -5 °C…0 °C lämpötiloihin asti, joten tällä jaksolla ajetaan käytännössä jatkuvasti lähellä maksimikaukolämpötehoa, joka on noin 115 MW_{th}. KauVo:n kokonaislämpöteho on maksimikuormajakson aikana noin 80 % mitoitustehosta. Alle -5 °C lämpötiloissa loppukaukolämpö kaupungille tuotetaan Lappeenrannan Energian Mertaniemen maakaasuvoimalaitoksella tai paikallisilla lämpökeskuksilla.

Osakuormajakso sijoittuu välille huhtikuu – toukokuu sekä syyskuu - marraskuu, jolloin ulkoilman lämpötilat vaihtelevat välillä 0 °C…15 °C ja verkkoon tuotettu kaukolämpöteho vaihtelee välillä 35 – 80 % maksimitehosta. Voimalaitoksen minimikuormajakso sijoittuu välille kesäkuu – elokuu, jolloin ulkoilman lämpötilat ovat suurimmaksi osaksi yli 15 °C. Voimalaitos ajetaan alas kesäseisokkiin kesäkuun loppupuolella ja takaisin ylös tuotantoon elokuun loppupuolella. Heinäkuu on kokonaan seisokkiaikaa. Verkkoon tuotettu kaukolämpöteho minimikuormajaksolla on noin 20 – 30 % maksimitehosta.

Kuvassa 24 on esitetty kattilan höyryntuotanto, verkkoon toimitettu kaukolämpöteho sekä apujäähdytetty kaukolämpöteho vuonna 2012:

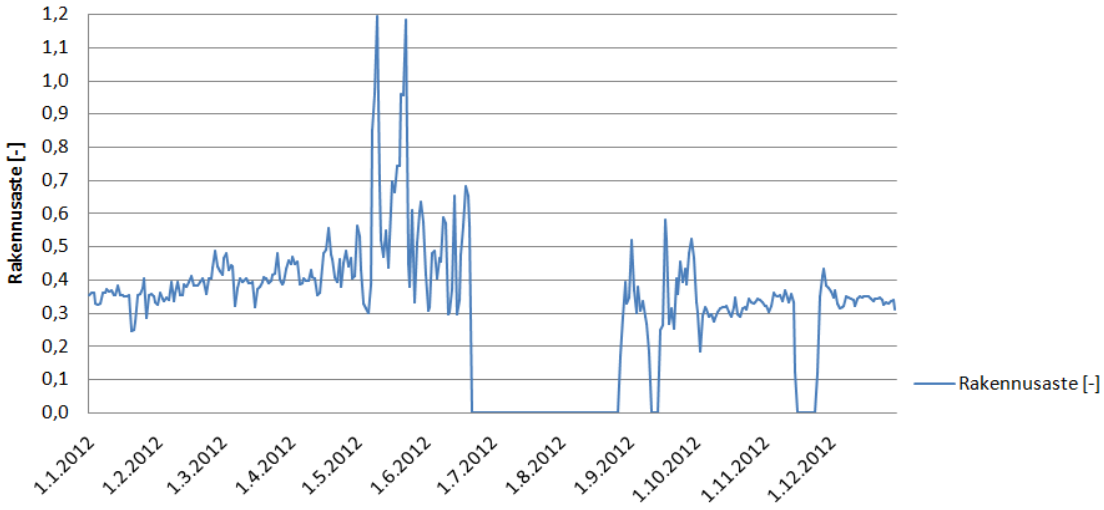


Kuva 24. Tuorehöyry, KL verkkoon ja apujäähdytetty KL vuonna 2012.

Kattilatoimittajan takuuarvoissa määrittelemä minimihöyrykuorma KauVo:n kattilalle on 60 kg/s joka vastaa noin 40 % maksimihöyrykuormasta (Parkkonen 2007, 26.) Kuvasta 22 nähdään, että kun kaukolämmöntarve toukokuun alkupuolella pienenee, joudutaan minimikattilakuorman turvaamiseksi ottamaan käyttöön kaukolämmön apujäähdytin. Samoin apujäähdytintä käytetään alkusyksystä kesäseisokin jälkeen. Osa kaukolämmönvaihtimilla tuotetusta kaukolämpövedestä ohjataan apujäähdyttimeen, jossa se jäähdytetään jäähdytysvedella alhaisempaan lämpötilaan ja ohjataan takaisin ennen kaukolämmönvaihtimia sijaitsevaan linjaan. Lämmennyt jäähdytysvesi ohjataan hukkalämpönä viemäriin. Apujäähdyttimen avulla kattilalla voidaan siis ajaa korkeampaa höyrykuormaa kuin kaukolämpöverkosto sallisi, jolloin vältetään tarpeettomat lyhytaikaiset kattilan alasajot.

7.2 Tuotettu sähköteho ja omakäyttöhyötysuhde

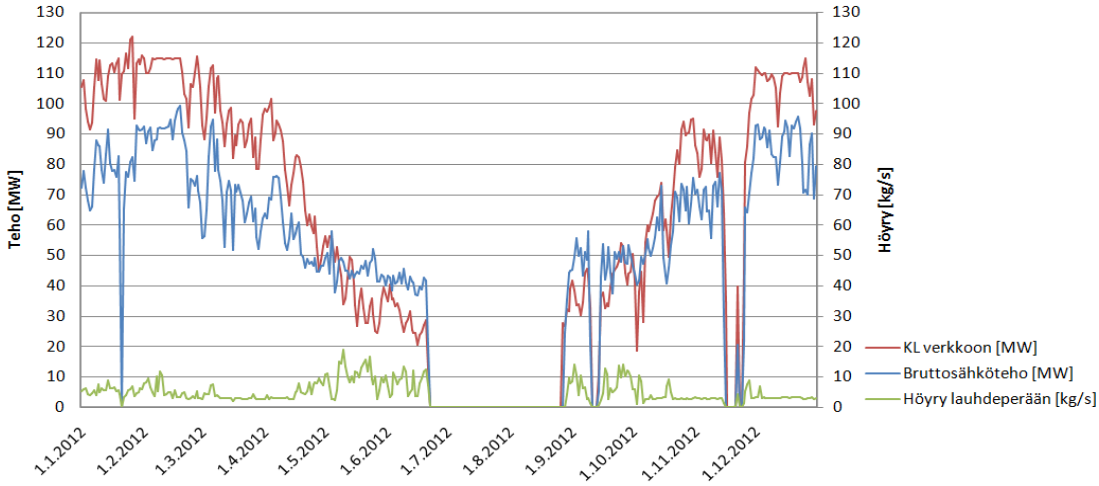
Sähkö on voimalaitoksen sivutuote. KauVo:n turbiinin sähköntuotanto voidaan periaatteessa laskennallisesti jakaa kolmeen osaa: Kaukaan tehtaalle toimitettavan vastapainehöyryn tuottama sähkö, kaukolämpöturbiinin tuottama sähkö sekä turbiinin lauhdeperän tuottama sähkö. Kuvassa 25 on esitetty KauVo:n rakennusasteen vaihtelu vuodelta 2012:



Kuva 25. KauVo:n rakennusaste vuonna 2012.

Kuvasta 25 näkee laitoksen rakennuasteen vaihtelun vuoden ajalta. Rakennusaste liikkuu talven maksimikuormajaksolla välillä 0,30 - 0,45 ja nousee osa- ja minimikuormalla jopa yli 0,6 arvoihin. Kuvaajan yli 1,0:n menevät arvot johtuvat prosessilaskennan virheestä. Rakennusasteen päivittäinen vaihtelu osakuormalla on huomattavasti voimakkaampaa kuin maksimikuormalla. Tämä johtuu siitä, että kaukolämpötehoa verkkoon tarvitaan vähemmän laitoksen peruskuormana ja rakennusaste on voimakkaammin riippuvainen UPM:n tehtaiden ottamasta höyrykuormasta. Rakennusaste kasvaa osakuormalla, sillä kaukolämpöveden kierrätys takaisin KL-apujäähdyttimen kautta ja vastapainehöyryn suurempi määrä turbiinin lauhdutusosaan kasvattavat turbiinin lämmöntuotantoon verrannollista sähkötehoa.

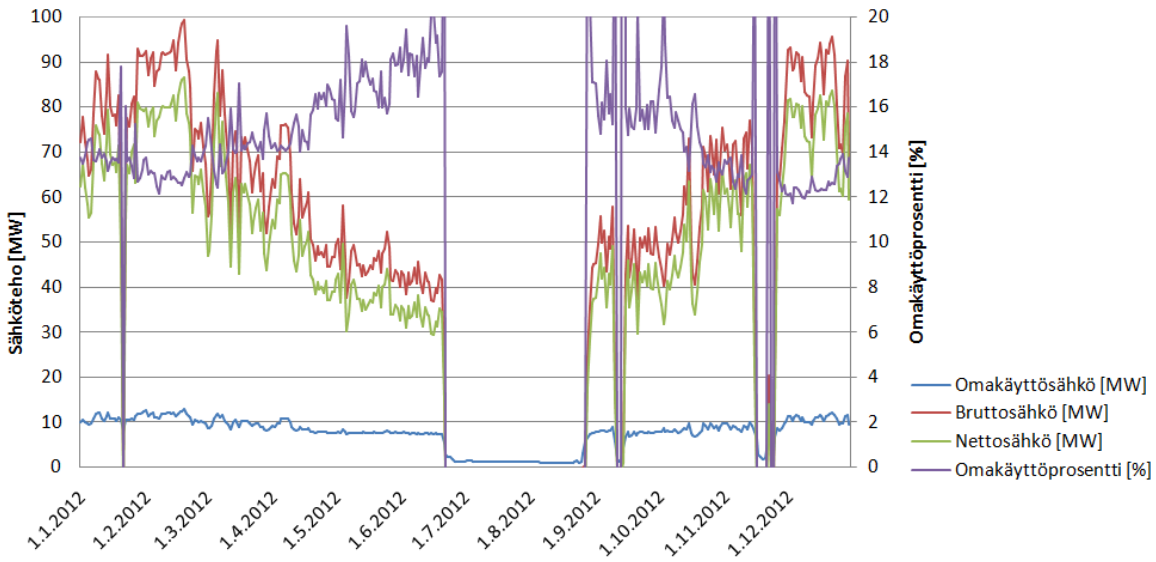
Kuvassa 26 on esitetty verkkoon tuotettu kaukolämpö, turbiinin bruttosähköteho sekä turbiinin lauhdeperään ajettu höyry vuonna 2012.



Kuva 26. KL verkkoon, bruttosähköteho ja lauhduttimeen ajettu höyry vuonna 2012.

Turbiinin lauhdeperän minimihöyryvirtaus on 3,25 kg/s ja maksimihöyryvirtaus 20 kg/s. Lauhdeperä vaatii minimihöyryvirtauksen jäähdytystä varten. Kuvaajasta 24 nähdään, että huippukuormajaksolla tuotettu bruttosähköteho noudattaa kaukolämpötehon tarpeen vaihtelua. Osakuorma- ja minimikuorma-ajossa kaukolämpötehoon verrannollinen bruttosähköteho kasvaa, koska kaukolämmön apujäähdytin on käytössä sekä kattilalla tuotettua höyryä ajetaan enemmän turbiinin lauhdeperään. Lauhdeperään ajetaan höyryä osaltaan kattilan minimikuorman turvaamiseksi sekä hetkellisen markkinasähkön hinnan ylittäessä sähkön tuotantokulujen rajakustannuksen.

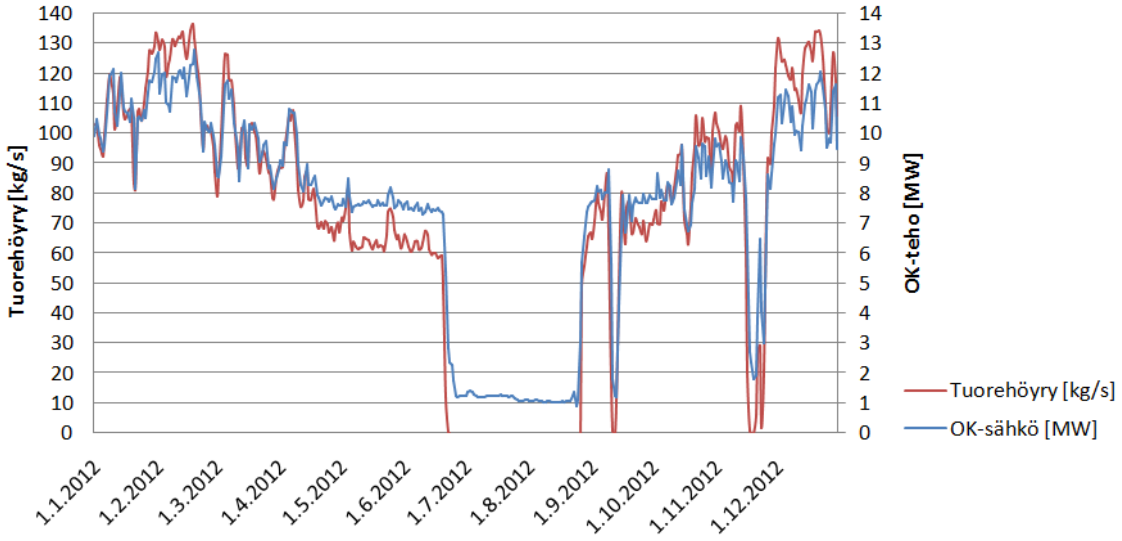
Hyödyksi saatava nettosähköteho verkkoon saadaan, kun bruttosähkötehosta vähennetään laitoksen omakäyttösähköteho. Kuvassa 27 on esitetty tuotettu bruttosähköteho, omakäyttösähköteho, nettosähköteho sekä omakäyttötehon prosenttiosuus tuotetusta bruttosähkötehosta vuonna 2012:



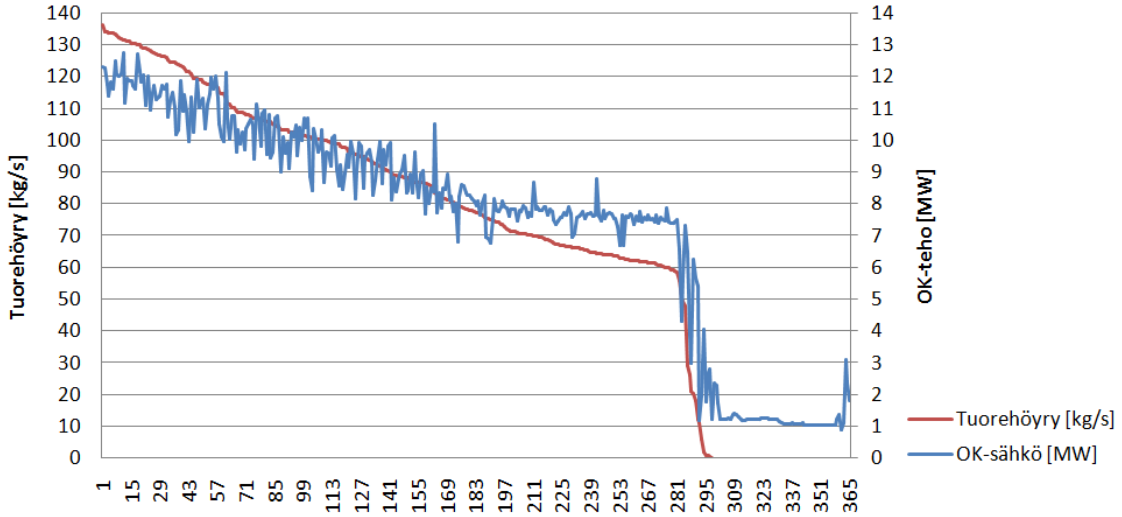
Kuva 27. Bruttosähköteho, nettosähköteho, omakäyttösähköteho ja omakäyttöprosentti 2012.

Kuvasta 27 huomataan, että laitoksella tuotettu bruttosähköteho sekä kulutettu omakäyttöteho vaihtelee maksimikuormajakson 95 MW_e / 12 MW_e arvoista aina minimikuormajakson 45 MW_e / 7,5 MW_e arvoihin. Omakäyttötehon prosenttiosuus tuotetusta sähköstä vaihtelee välillä 20 - 12 % eli toisin sanoen laitoksen omakäyttöhyötysuhde vaihtelee välillä 88 - 80 %. Yli 20 % omakäytön menevät piikit kuvaajassa johtuvat alas- tai ylösajosta, koska vuorokautiset datapisteet muodostuvat 24 tunnin keskiarvosta. Korkeimmillaan omakäyttöhyötysuhde on maksimikuormajakson aikana, ja huonoimmillaan osakuorma- ja minimikuorma-ajossa.

Lukujen perusteella voidaan sanoa, että nykyisillä ajomalleilla merkittävä osa tuotetusta sähköstä varsinkin osakuorma-ajossa kuluu tällä hetkellä voimalaitoksen apulaitteiden omakäyttötehojen kattamiseen. Kuvassa 28 on esitetty tarkemmin voimalaitoksen omakäyttösähkön kulutus megawatteina verrattuna höyryn tuotantoon, sekä kuvassa 29 omakäyttösähkö verrattuna höyryn tuotannon pysyvyyskäyrään.



Kuva 28. Höyryn tuotanto ja omakäyttösähkön kulutus 2012.



Kuva 29. Höyryn tuotannon pysyvyyskäyrä ja omakäyttösähkön kulutus 2012.

Pysyvyyskärästä kuvassa 29 huomataan, että höyryn tuotannon arvoilla 85 - 115 kg/s omakäyttöteho seuraa suunnilleen höyryn tuotannon käyrää. Höyryn tuotannon arvoilla 120 - 140 kg/s omakäyttöteho ei enää nouse höyrykäyrän mukaisesti, jolloin omakäyttöhyötysuhde on parhaimmillaan. Osakuorma-ajon höyryntuotannon arvoilla 60 - 80 kg/s omakäyttöteho taas ei enää laske höyrykäyrän mukaisesti, mikä huonontaa laitoksen omakäyttöhyötysuhdetta. Seuraavaksi täytyy selvittää mitkä osastot ja apulaitteet kuluttavat myös osakuorma-ajossa paljon omakäyttötehoa ja tarkastella, voidaanko niiden kulutusta vähentää vaikuttamatta oleellisesti höyryn tuotantoon.

7.3 Suurimmat omakäyttösähkön kuluttajat

Pyrittäessä tarkemmin selvittämään mihin osastoihin ja laitteisiin laitoksen omakäyttötehon kulutus keskittyy, on järkevintä tarkastella laitoksen suurimpia ja jatkuvasti käytössä olevia kuluttajia. Seuraavassa taulukossa 7 on listattu tehojärjestyksessä KauVo:n voimalaitokseen liittyvät suurimmat sähkömoottorit eli suurimmat omakäyttötehon kuluttajat, niiden jännitteet ja nimellistehot sekä laitteen säätötapa. Voidaan sanoa, että nämä kuluttajat kuluttavat 90 % laitoksen käyttämästä omakäyttötehosta. Tiedot taulukkoon on kerätty KauVo-projektin loppudokumentoinneista.

Taulukko 7. KauVo:n suurimmat sähkömoottorit. (CTS Entec 2009)

Liittyvä laite	Säätötapa	Jännite [V]	Teho [kW]
Syöttövesipumppu 1 - 2	TJM	3300	2850
Savukaasupuhallin 1 - 2	johtosiipi + TJM	690	1950
Sekundääri-ilmapuhallin	TJM	690	1650
Primääri-ilmapuhallin 1 - 2	johtosiipi	10 500	1600
Biomurska, roottorit yht.	TJM	690	1092
Makrovesipumppu 6	TJM	690	800
Raakavesipumppu 5	TJM	690	500
Kiertokaasupuhallin	johtosiipi	690	560
Kiertopumppu 1 - 2, KL	TJM	690	450
Ruuvipurkain 1 - 2, Auma	TJM	690	355
Sähkösuodin 1 - 2 (A - C)	-	690	300
Korkeapaineilmapuhallin 1 - 4	-	690	250
Paineilmakompressori	-	690	240
Jälkimurskain, ennen Aumaa	-	690	200
Jälkimurskain, Auman jälkeen	-	690	160
Lauhdepumppu 1 - 2, KLV1	kuristus	690	160
Lauhdepumppu 1 - 2, KLV2	kuristus	690	160
Lisävesipumppu 1 - 2	TJM	690	132
Kiertopumppu 1 - 2, sulj.jääh.vesi	kuristus	690	132

Taulukosta 7 nähdään, että prosessin suurimmat sähkönkuluttajat voimalaitoksen pumppujen ja puhaltimien osalta ovat syöttövesipumput 1 ja 2, savukaasupuhaltimet

1 ja 2, sekundääri-ilmapuhallin, primääri-ilmapuhaltimet 1 ja 2, kiertokaasupuhallin, kaukolämpöveden kiertopumput 1 ja 2, korkeapaineilmapuhaltimet 1 - 4 sekä muutamia pienempiä lauhde- ja kiertopumppuja. Näistä laitteista kaikki ovat jatkuvassa käytössä ympäri vuoden, paitsi petilämpötilan säätöön käytettävä kiertokaasupuhallin. Lisäksi kaikki yli 250 kW laitteet ovat taajuusmuuttajasäätöisiä, paitsi primääri-ilmapuhaltimet ja kiertokaasupuhallin. Kiertokaasupuhallinta ei ole KauVo:n ajoaikana jouduttu käyttämään.

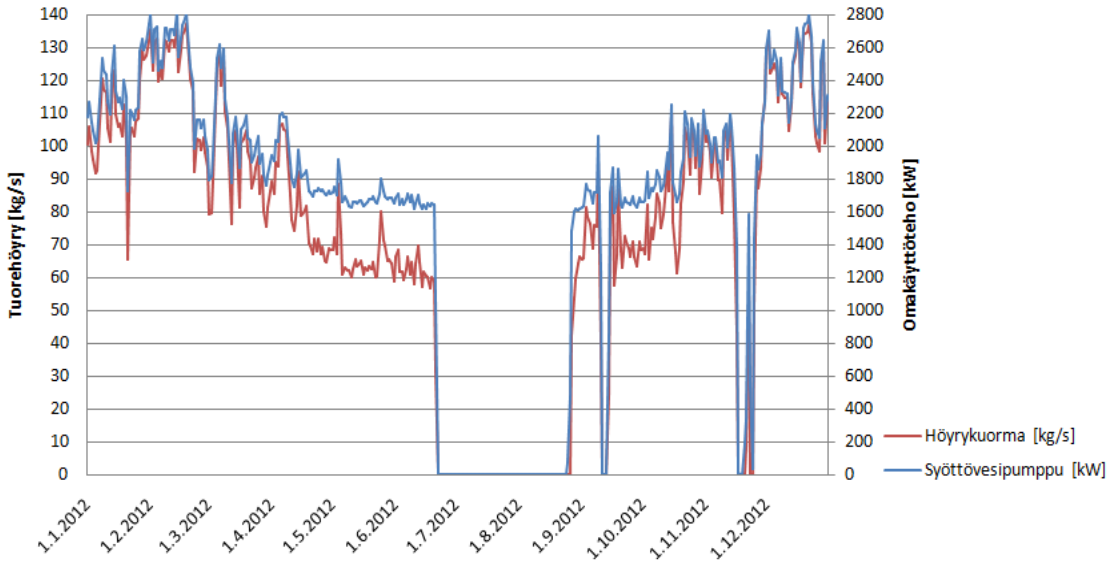
Suurimmat sähkönkuluttajat polttoaineenkäsittelyssä ovat alatehtaan metsäenergiamurska, aumavaraston ruuvipurkaimet 1 ja 2 sekä jälkimurskaimet ennen ja jälkeen aumaa. Metsäenergiamurskan kokonaisuuteen kuuluu taulukon roottorit 1 ja 2, alaroottori ja yläroottori. Merkittävässä osassa sähkönkulutuksen kannalta ovat myös sähkösuodattimet 1 ja 2 sekä UPM:n vesilaitokselle lisäkapasiteetiksi uutta voimalaitosta varten rakennetut makrovesipumppu 6 ja raakavesipumppu 5.

7.4 Ajokuorma ja osastojen kuluttama sähköteho

Tarkastellaan seuraavaksi voimalaitoksen kuluttajien käyttämää omakäyttötehoa osastokohtaisesti verrattuna kattilan höyryntuotantoon vuonna 2012. Tarkastelu auttaa selvittämään, millä osastoilla omakäyttötehon kulutus on korkealla tasolla myös laitoksen pienempien höyrykuormien ajon aikana. Osastojen omakäyttötehojen kulutuksista on sähkönjakelukeskuskohtaisesti jatkuvat mittaukset laitoksen tiedonkeruujärjestelmässä. Sähkönjakelukeskuksia on laitoksella yhteensä 12 kpl. Suurimmissa laitteissa, syöttövesipumpuissa ja primääri-ilmapuhaltimissa on oma jakelukeskus. Muissa osastoissa jakelukeskukseen kuuluu useampia laitteita.

7.4.1 Syöttövesipumput

Molemmat syöttövesipumput ovat mitoitetusteholtaan 100 % maksimikuormasta ja niitä ajetaan vuorotellen siten, että toinen on käytössä ja toinen varalla. Kuvassa 28 on esitetty höyryntuotantoon verrannollinen omakäyttötehonkulutus syöttövesipumpulta.

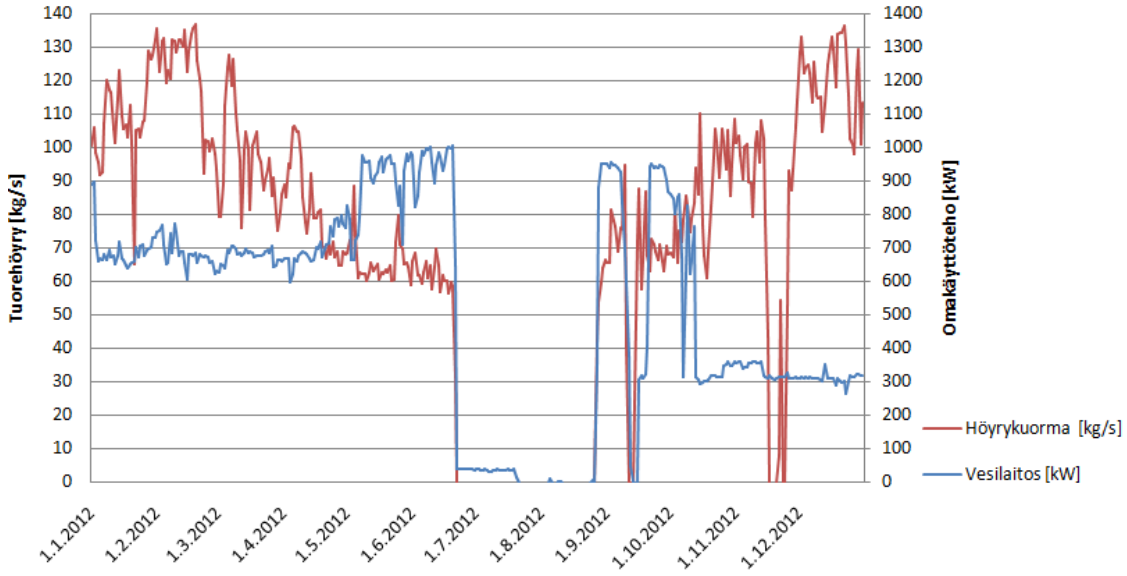


Kuva 30. Syöttövesipumpun omakäyttötehon kulutus.

Kuvasta 30 nähdään, että syöttövesipumpun kuluttama omakäyttöteho vaihtelee välillä 1700 kW - 2700 kW. Teho ei seuraa höyryntuotantoa osakuormajaksolla yhtä selvästi kuin maksimikuormajaksolla, sillä osakuorma-ajossa höyryntuotantoon verrannollista omakäyttötehoa kuluu noin 400 kW enemmän. Syöttövesipumpun säätömahdollisuudet osakuormalla ovat potentiaalinen tarkastelukohde. Mahdollisesti voisi harkita myös pelkästään osakuormakäyttöön tarkoitetun syöttövesipumpun hankinnan kannattavuutta.

7.4.2 Vesilaitoksen pumput

Vesilaitoksen makrovesipumppu on mitoitusteholtaan 800 kW ja raakavesipumppu 500 kW. Kuvassa 29 on esitetty höyryntuotantoon verrannollinen omakäyttötehon kulutus vesilaitoksen pumpuilta.

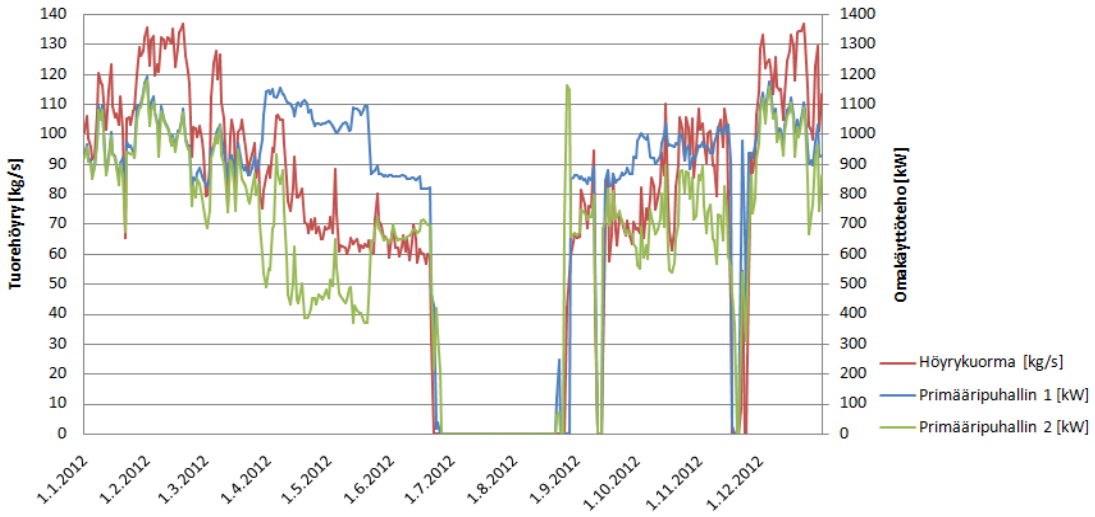


Kuva 31. Vesilaitoksen omakäyttötehon kulutus.

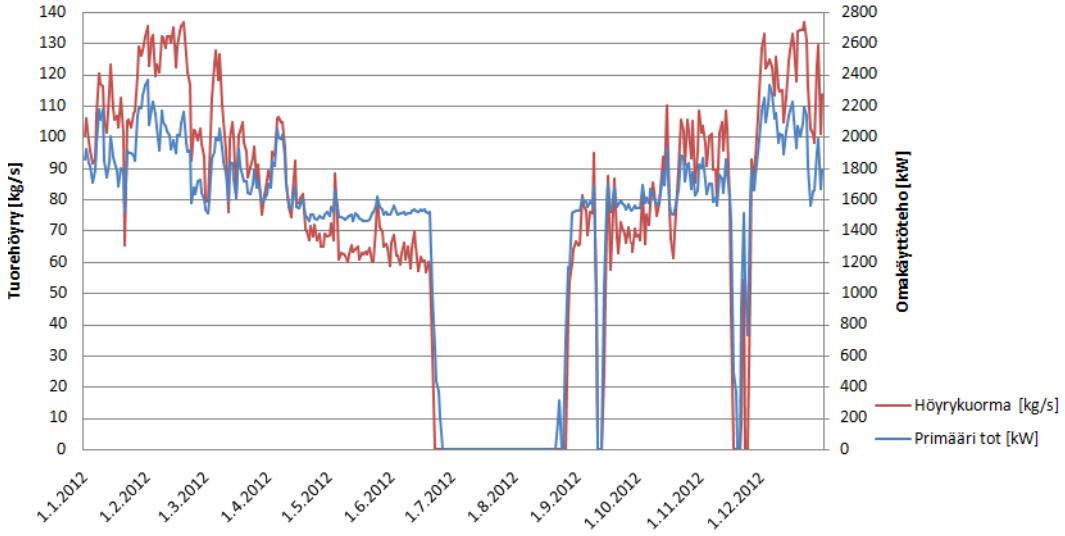
Vesilaitoksen omakäyttöteho on vaihdellut välillä 700 - 1000 kW. Kulutus kasvaa osakuorma-ajossa, kun makrovettä ajetaan laitokselle enemmän jäähdyttämään turbiinin lauhdutinta sekä kaukolämmön apujäähdytintä. Mitä korkeammaksi järviveden lämpötila kesällä nousee, sitä enemmän jäähdytysvettä kohteisiin tarvitaan. Vesilaitoksen makrovesipumppu on yhdistettynä Kaukaan tehtaiden makrovesitukkiin, johon makrovettä tuottaa myös tehtaiden 5 omaa pumppua. Makrovesipumpulla voidaan siis tarvittaessa tukea Kaukaan tehtaiden makroveden tarvetta ja toisaalta makrovesitukista voidaan ohjata vettä biovoimalaitokselle mikäli KauVo:n oma pumppu vikaantuu. Loppuvuodesta makrovesipumppu on ollut pois päältä, joten kuvaajan noin 300 kW kulutus on ainoastaan raakavesipumpun kulutusta. Järjestelyn takia makrovesipumpun KauVo:n omiin jäähdytystarpeisiin käyttämän sähkötehon määrä on ollut epäselvää. Makrovesipumpun ja jäähdytysvesikierron toiminta kannattaa ottaa tarkasteluun energiansäästöjä tutkittaessa.

7.4.3 Primääri-ilmapuhaltimet

Primääri-ilmapuhaltimia on laitoksella kaksi ja molemmat ovat mitoitusteholtaan 60 % maksimikuormasta. Puhaltimet ovat radiaalipuhaltimia, joiden tuottoa säädetään imupuolen johtosiipisäleiköllä. Kuvassa 32 on esitetty primääri-ilmapuhaltimien kuluttama omakäyttöteho erikseen ja kuvassa 33 yhdistetty omakäyttöteho.



Kuva 32. Primääri-ilmapuhaltimien 1 ja 2 omakäyttötehon kulutus.

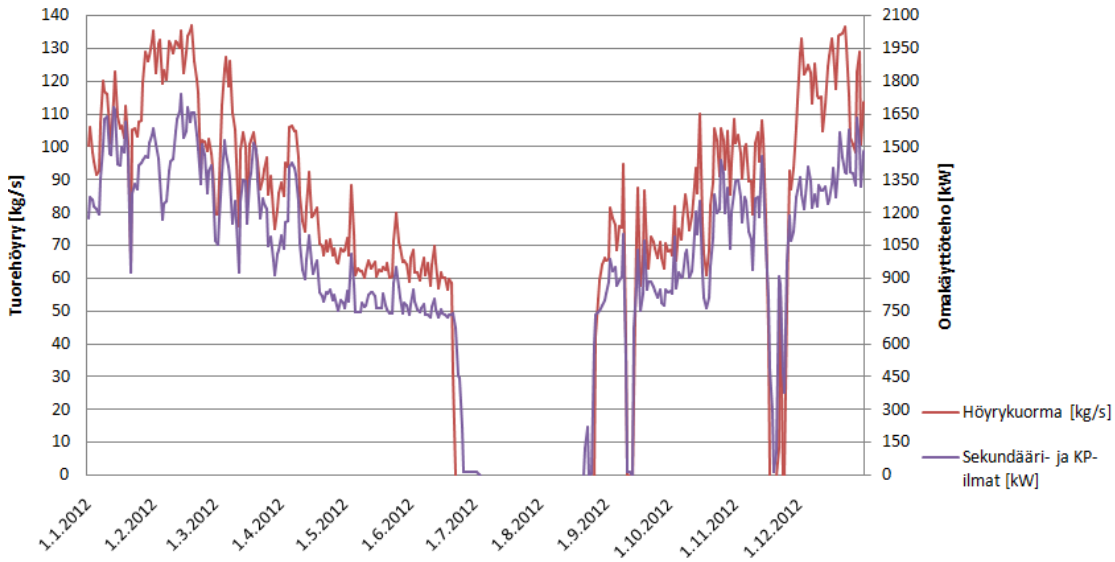


Kuva 33. Primääri-ilmapuhaltimien omakäyttötehon kulutus yhteensä.

Primääri-ilmapuhaltimien yhteensä kuluttama teho vaihtelee välillä 1500 kW - 2300 kW. Osakuormajaksolla puhaltimet vaativat höyryntuotantoon verrannollista tehoa useita satoja kilowatteja enemmän kuin maksimikuormajaksolla. Tämä johtuu todennäköisesti kattilan vaatimasta minimileijutusilmamäärästä. Primääri-ilmapuhaltimet ovat jatkuvasti käytössä ja niiden tuottoa ohjataan tällä hetkellä pelkästään imupuolen johtosiivistön kulmaa muuttamalla, joten ne ovat potentiaalinen tutkimuskohde energiansäästöille.

7.4.4 Sekundääri-ilmapuhallin ja korkeapaineilmapuhaltimet

Sekundääri-ilmapuhallin on 100 % mitoitusteholtaan oleva pyörimisnopeussäädetty radiaalipuhallin. Korkeapaineilmapuhaltimet ovat kiertomäntäkompressoreita, niitä on 4 kpl joista yksi on kerrallaan varalla. Kuvassa 34 on esitetty sekundääri-ilmapuhaltimen ja korkeapaine-ilmapuhaltimien omakäyttöteho.

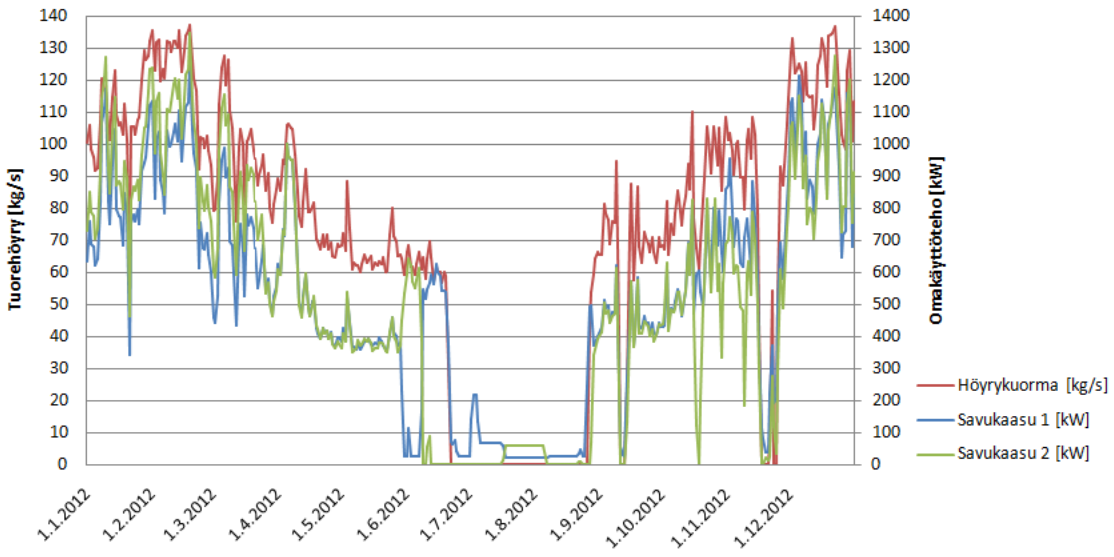


Kuva 34. Sekundääri-ilmapuhaltimen ja korkeapaine-ilmapuhaltimien kuluttama teho.

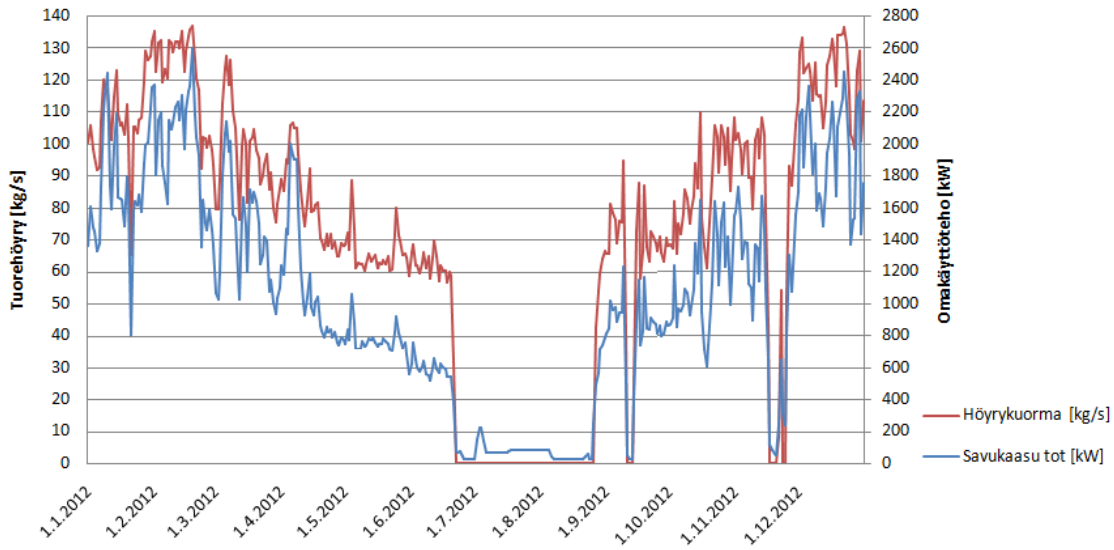
Sekundääri-ilmapuhaltimen ja korkeapaine-ilmapuhaltimien höyrykuormaan verrannollinen omakäyttöteho noudattaa pitkälti höyrykuorman muutosta koko tarkastelujakson ajan, joten energiansäästöjä osakuorma-ajolla ei todennäköisesti ole saavutettavissa.

7.4.5 Savukaasulinjat 1 ja 2

Savukaasulinjojen tehon mittaukseen sisältyy savukaasupuhaltimet, sähkösuotimet sekä turpeen käsittelylaitteita. Molemmissa sähkösuotimissa on kolme kammiota. Savukaasupuhaltimet on mitoitettu 65 % ja sähkösuotimien kammiot 60 % maksimikuormasta. Kuvassa 35 on esitetty savukaasulinjojen omakäyttötehon kulutukset linjoittain ja kuvassa 36 kulutus yhteensä.



Kuva 35. Savukaasulinjojen 1 ja 2 omakäyttötehon kulutus.



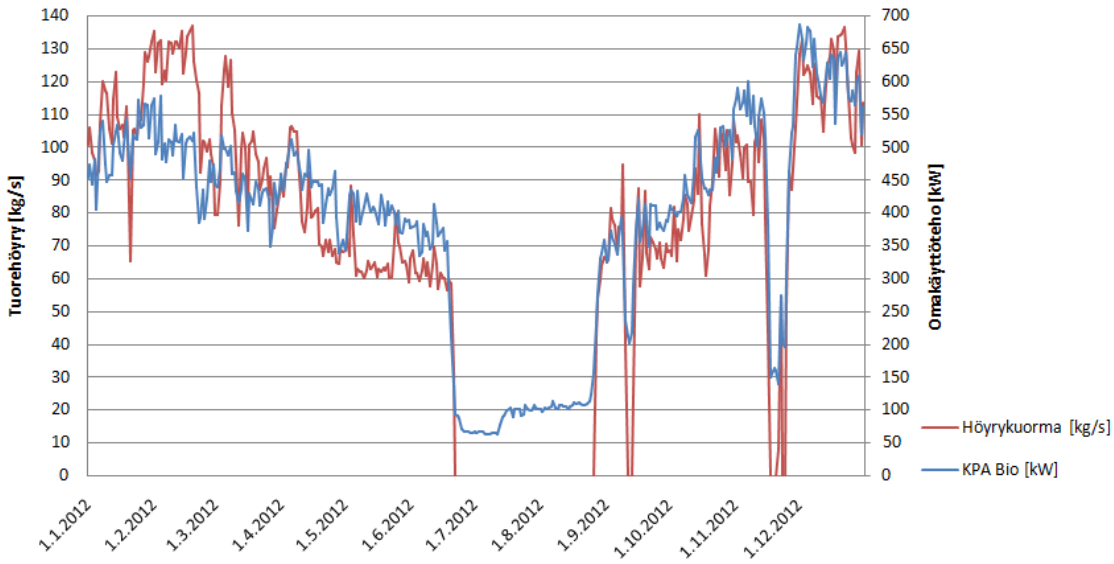
Kuva 36. Savukaasulinjojen omakäyttötehon kulutus yhteensä.

Savukaasulinjojen kokonaiskulutus vaihtelee 600 kW - 2400 kW välillä. Höyryntuotantoon verrannollinen kulutus laskee osakuormajaksolla verrattuna maksimikuormajaksoon. Kuvasta 35 nähdään, että kesäkuun alussa laitoksella on testattu vain yhden savukaasulinjan ajoa kesäseisokkiin asti. Tällä on saavutettu noin 150 kW vähennys kokonaiskulutukseen verrattuna kahdella linjalla ajoon. Linjojen tehomittauksiin sisältyy kuitenkin myös turpeen käsittelylaitteiden kulutuksia, joten pelkästään savukaasupuhaltimen ja sähkösuodattimen tehoa ei käyrästä voi suoraan päätellä. Yhden savukaasulinjan ajomalli kannattaa kuitenkin ottaa tarkasteluun ja

tutkia, onko yhden linjan ajo pienillä kattilakuormilla mahdollista taloudellisuuden ja ympäristöarvojen puitteissa.

7.4.6 Biopolttoaineen käsittely

Biopolttoaineen käsittelyn sähkönkulutukseen kuuluvat alatehtaan metsäenergiamurska, aumavaraston ruuvipurkaimet 1 ja 2, jälkimurskaimet ennen ja jälkeen aumaa sekä kuorimoiden hihnakuljettimet aumaan asti. Kuvassa 37 on esitetty alatehtaan biopolttoaineen käsittelyn omakäyttötehon kulutus.



Kuva 37. Biopolttoaineen käsittelyn omakäyttötehon kulutus.

Kuvan 37 perusteella biopolttoaineenkäsittelyn kulutus vaihtelee laitoksen käyntiaikana 350 kW - 650 kW välillä. Käyttöhenkilökunnan mukaan suuri osa kulutuksesta johtuu alatehtaan metsäenergiamurskasta ja aumavaraston ruuvipurkaimista. Metsäenergiamurskaa on pidetty syksystä kevääseen tyhjäkäynnillä päällä, vaikka metsäenergiakuormia ei hetkellisesti olisi tehdasalueella. Murskan tehon kulutusta tyhjäkäynnillä tai murskatessa ei ole kuitenkaan tutkittu, joten murskan toiminta kannattaa ottaa tarkastelun.

7.4.7 Kattilan polttoainejärjestelmä

Kattilan PA-järjestelmän kulutukseen kuuluvat polttoaineen hihnakuljetin aumasta ja seulonnasta voimalaitokselle, biosiilojen ja turvesiilon ruuvipurkaimet, kattilan kola- ja ruuvikuljettimet sekä sulkusyöttimet, kattilahuoneen tuloilmapuhaltimet sekä

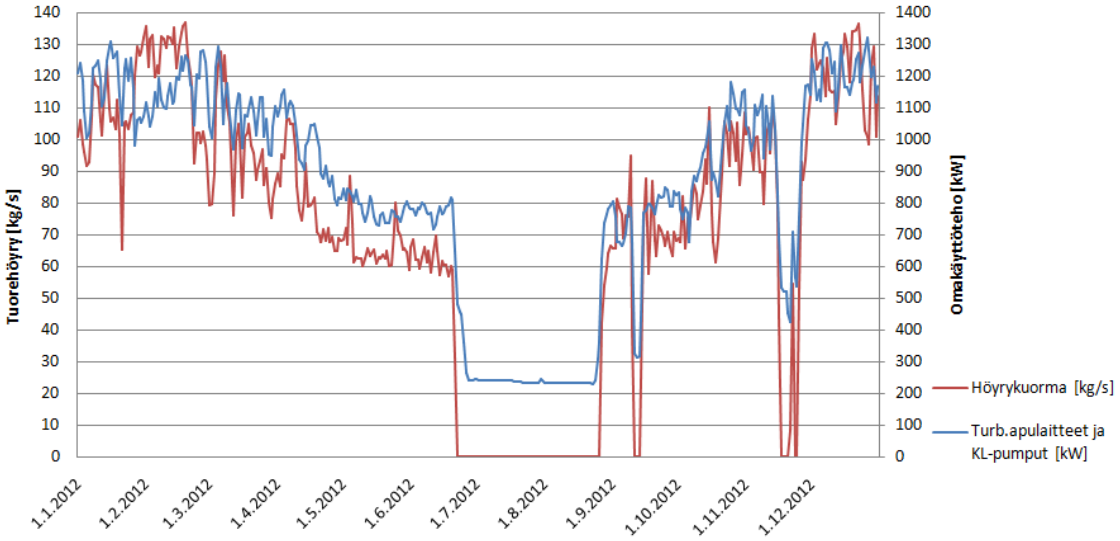
paineilmakompressori. Kattilan PA-järjestelmän omakäyttötehon kulutus on esitetty kuvassa 38.

Kuva 38. Kattilan PA-järjestelmän omakäyttötehon kulutus.

Kattilan PA-järjestelmän kulutus vaihtelee käynnin aikana 550 kW - 750 kW välillä. Suurimillaan kulutus on talviaikaan, kun kuljettimilla ja ruuveilla on eniten kuormaa. Kesäseisokin aikaisen kulutuksen ensimmäinen pudotus johtuu kuljettimien ja ruuvipurkainten pysäytyksestä ja jälkimmäinen pudotus kattilahuoneen tuloilmakojeiden ja -puhaltimien pysäytyksestä. Loppuvuoden kulutuksen heittely kuvaajassa johtuu siitä, että paineilmakompressori on ollut ajoittain pois päältä. Kattilan PA-järjestelmän säästömahdollisuuksia ei oteta tässä työssä tarkasteluun.

7.4.8 Kaukolämpöpumput ja turbiinin apulaitteet

Turbiinin apulaitteet ja KL-pumput -tehomittaukseen sisältyy suurimpina kuluttajina kaukolämmön kiertopumput, apujäähdyttimen kiertopumppu, kaukolämmönvaihtimien ja lauhduttimen lauhdepumput, lisävesipumput sekä turbiinisalin tuloilmakojeet ja tuloilma- ja poistoilmapuhaltimet. Kuvassa 39 on esitetty kyseisen osaston omakäyttötehon kulutus.

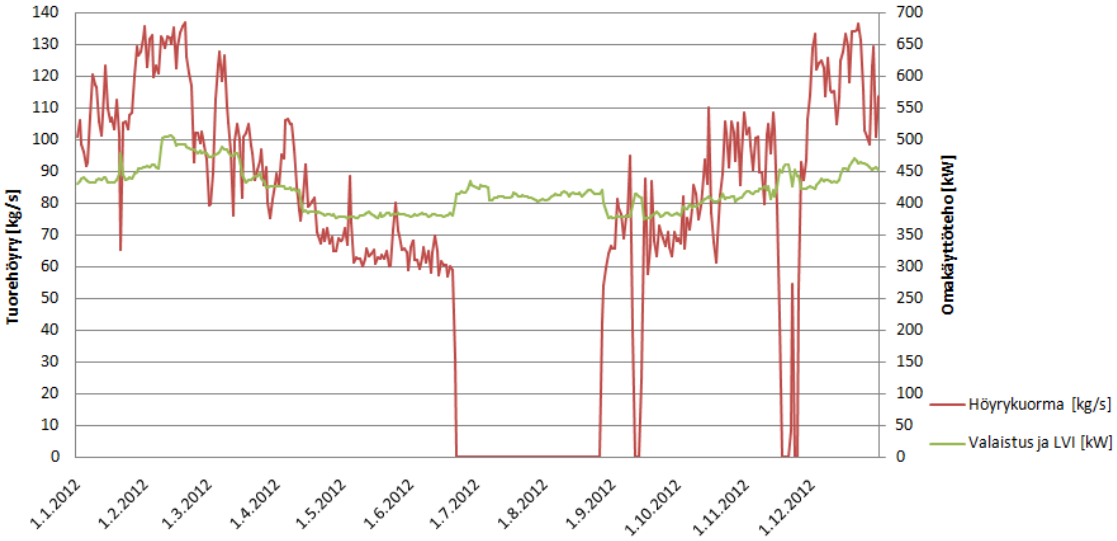


Kuva 39. Turbiinin apulaitteiden ja KL pumppujen omakäyttötehon kulutus.

Turbiinin apulaitteiden ja kaukolämpöpumppujen sähkönkulutus vaihtelee välillä 800 kW - 1300 kW laitoksen ollessa tuotannossa. Osakuormalla osaston höyryntuotantoon suhteellinen sähkönkulutus on hieman suurempi kuin maksimikuormajaksolla. Kaukolämpöpumppuja ohjataan Lappeenrannan Energian Mertaniemen valvomosta. Pumppujen tavoitepaineesta ja kaukolämpöverkon ohjauksesta yleensä kannattaa keskustella heidän kanssaan tutkittaessa energiansäästöjä kaukolämpökiertoon liittyen. Turbiinisalin ilmastointilaitteet kuluttavat sähköä myös kesäseisokin aikana noin 200 kW tuotannon ollessa pois päältä.

7.4.9 Valaistus ja LVI

Valaistuksen ja LVI-järjestelmän mittaukseen sisältyy voimalaitosrakennuksen ja hihnakuljettimien valaistukset, puhaltimien kiertovesipumppuja, voitelulaitteita sekä laitteiden sähkölämmityksiä mukaanlukien sähkösuotimien eristimien ja pohjasuppiloiden lämmitykset. Kuvassa 40 on esitetty Valaistus ja LVI-järjestelmän omakäyttötehon kulutus.



Kuva 40. Valaistus ja LVI-laitteiston omakäyttötehon kulutus.

Valaistus ja LVI-järjestelmät kuluttavat suunnilleen yhtä paljon sähköä vuoden ympäri, noin 450 kW riippumatta laitoksen muusta toiminnasta. Ylimääräiset tai turhat valaistukset varsinkin kesäaikaan voi tulevaisuudessa ottaa tarkasteluun osaston energiansäästöjä tavoiteltaessa.

8 ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN

Mitä pienemmäksi voimalaitoksen omakäyttösähkötehon kulutus saadaan muuttamatta tuotettavan höyryn parametreja, sitä enemmän nettosähkötehoa on mahdollista tuottaa verkkoon. Toisaalta omakäyttöenergian vähennyksestä johtuva kokonaishyötysuhteen paraneminen merkitsee säästöä kulutetussa polttoaineessa.

Tässä kappaleessa tutkitaan laitekohtaisesti kappaleen 7 perusteella valikoituneita, KauVo:n potentiaalisimpia omakäyttöenergian vähennyskohteita sekä mahdollista saavutettavaa vuosittaista energiansäästöä niiltä. Laitekohtaisiksi tarkastelukohteiksi otetaan syöttövesipumpun säätötapa, yhden savukaasulinjan ajomalli, makrovesipumpun tehon kulutus, metsäenergiamurskan tyhjäkäynnin tehon kulutus sekä KL-kiertopumppujen tehon kulutus. Kohteet on valikoitu vuoden 2012 tarkasteludatan sekä laitoksen käyttöhenkilökunnan haastattelujen perusteella.

Aluksi käydään läpi mekaanisen tehon ja sähkötehon määritys. Kappaleen tarkasteluun valittujen kohteiden energiatehokkuuden parantamisen tarkastelu jaetaan kahteen osaan: laitoksella suoritettavat koeajot ja mittaukset sekä laskennalliset ja teoreettiset tarkastelut. Koeajoilla tarkastellaan yhden savukaasulinjan ajomallin tehonkulutusta ja toimivuutta verrattuna kahden linjan ajomalliin sekä mitataan metsäenergiamurskan tyhjäkäynnin tehon kulutus. Teoreettisissa tarkastelukohteissa tutkitaan KauVo:n makrovesijärjestelmän sekä lähtevän KL-kiertoveden paineenalennusta sekä alennuksista syntyvää tehon säästöä valmistajien pumpuista tekemien ominaiskäyrien avulla. Lisäksi tutkitaan syöttövesipumpun suuren tehon kulutuksen syytä osakuormalla sekä mahdollisuutta syöttöveden paine-eron paineenalennukseen.

Potentiaalisimmista vähennyskohteista tehdään energiansäästöanalyysi, jonka perusteella lasketaan kohteen mahdollinen energiansäästö vuodessa sekä tarvittavat ja voimalaitoksen ajon kannalta mahdolliset toimenpiteet vähennysten aikaansaamiseksi.

8.1 Tehon määritys

Voimalaitoslaitteiden vaatimien tehojen määrityksessä voidaan puhua laitteen mekaanisesta tehontarpeesta, tai laitteen pyörittämiseksi tarvittavan sähkömoottorin

verkosta ottamasta sähkötehosta. Tarkastellaan seuraavaksi keskipakoispumpun ja puhaltimen tehon tarvetta sekä sähkömoottorin tehoa. Pumpun tehontarve voidaan laskea yhtälöllä:

$$P = \frac{\rho * g * H * q_v}{\eta} \tag{8}$$

missä P pumpun tehontarve [W]

ρ väliaineen tiheys [kg/m^3]

g putoamiskiihtyvyys [9,81 m/s^2]

H nostokorkeus [m]

q_v tilavuusvirta [m^3/s]

η pumpun hyötysuhde

ja sama yhtälö voidaan esittää muodossa

$$P = \frac{\Delta p * q_v}{\eta} \tag{9}$$

missä Δp paineennousu pumpussa [Pa]

Puhaltimen tehontarve voidaan laskea samalla tavoin yhtälöllä 9, kun väliaineen tiheyden muutosta ei huomioida. Nämä tehot eivät vielä huomioi sähkömoottorin hyötysuhdetta, joten laitteiden kuluttama sähköteho on todellisuudessa näitä tehoja suurempi. (Larjola et al. 2008, 64) Pumppujen ja puhaltimien vaatiman tehon muutosta pyörimisnopeuden, tilavuusvirran ja paine-eron funktiona voidaan yleensä tarkastella laitetoimittajien tekemien ominaiskäyrien avulla.

Oikosulkumoottoreita käytetään yleisesti teollisuuden laitteiden momenttilähteenä. Oikosulkumoottori muuttaa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi sähkömagneettisen induktion avulla. (ABB 2001, 7) Sähkömoottorin akseliteho voidaan laskea nopeuden ja momentin avulla yhtälöllä 10:

$$P_{lähtö} = T * \omega = T * 2 * \pi * n \tag{10}$$

missä $P_{lähtö}$ akseliteho [W]

T	vääntömomentti [Nm]
ω	kulmanopeus [rad/s]
n	pyörimisnopeus [1/s]

Moottoriin tarvittava syöttöteho voidaan laskea jännitteen, virran ja tehokertoimen avulla yhtälöllä 11 (ABB 2001, 14):

$$P_{syöttö} = \sqrt{3} * U * I * cos\phi \tag{11}$$

missä

$P_{syöttö}$	syöttöteho [W]
U	jännite [V]
I	virta [A]
$cos\phi$	moottorin tehokerroin [-]

Moottorin tehokertoimet annetaan yleensä moottoritoimittajien kilpitiedoissa. Sähkömoottorin hyötysuhde voidaan laskea yhtälöllä 12.

$$\eta_{sm} = \frac{P_{lähtö}}{P_{syöttö}} \tag{12}$$

Sähkömoottorin hyötysuhteet liikkuvat alueella 0,82...0,97 moottorin koosta ja nimellisnopeudesta riippuen. (ABB 2001, 14) Pumpun tai puhaltimen lopullinen sähkötehon tarve voidaan edelleen laskea yhtälöllä 13.

$$P_e = \frac{P}{\eta_{sm}} \tag{13}$$

8.2 Koeajot ja mittaukset

Tässä kappaleessa tarkasteltujen kohteiden koeajot ja mittaukset suoritettiin Kaukaan tehdasalueella vuoden 2013 kesän ja syksyn aikana.

8.2.1 Yhden savukaasulinjan ajomalli osakuormalla

KauVo:n laitoksella on kaksi savukaasulinjaa, joihin kuuluu sähkösuodatin ja savukaasupuhallin. Savukaasupuhallin on linjassa sähkösuotimen jälkeen, ja puhaltimelle tuotava savukaasu on aina alipaineessa. Savukaasujärjestelmän

tehtävänä on kattilan tulipesässä syntyneiden savukaasujen poistaminen oikeassa paineessa ilmakehään ja sähkösuodattimen tehtävänä on poltossa syntyneiden hiukkaspäästöjen erottaminen savukaasuvirrasta. Molemmat savukaasulinjat ovat mitoitettu noin 65 % maksimikuormasta. (Parkkonen 2007, 3)

Savukaasupuhaltimet ovat radiaalipuhaltimia, joissa on virtausmäärän säätöä varten pneumaattisesti ohjattavat johtosiivet sekä taajuusmuuttajat. Savukaasukanaviston vetoa säädetään automaattisesti siten, että vedon tasapainopiste on tulipesän muuratulla alueella ja tulipesän yläosan vedonsäädön mittaus pidetään alipaineessa. Tulipesän yläosan alipainetta säädetään savukaasupuhaltimien virtausmäärää muuttamalla. Kattilakuorman kasvaessa sähkösuodattimille ja siitä savukaasupuhaltimille menevän kaasun alipaine kasvaa. Näin savukaasupuhaltimien kuormitustaso seuraa automaattisesti kattilan kuormatasoa. (Parkkonen 2007, 5)

Tähän asti ajotapana on ollut käyttää molempia savukaasulinjoja rinnakkain myös osakuorma-ajolla. Yhden savukaasulinjan 65 % kapasiteetti maksimikuormasta tarkoittaa käyttöarvojen perusteella laitoksen höyryntuotantoon peilaten noin 95 kg/s tuorehöyryn tuotantoa ja savukaasuvirtauksena noin 150 Nm^3/s. Edellisessä kappaleessa käsiteltyjen vuoden 2012 höyrykuormien perusteella laitos ajaa päiväkeskiarvolla mitattuna alle 95 kg/s kuormaa yli 4 kk ajan vuodessa. Poltossa syntyneeseen savukaasuvirtaan vaikuttaa kuitenkin myös käytetyn polttoaineen kosteus, sillä polttoaineesta haihtuva vesihöyry lisää savukaasuvirtausta. Jos polttoaine on normaalia kosteampaa, yhden savukaasulinjan vetoraja voi tulla vastaan alhaisemmilla höyrykuormilla. Pääasiasssa kuitenkin yhden linjan vetokapasiteetti riittää suurimman osan ajasta osakuorma-ajolla.

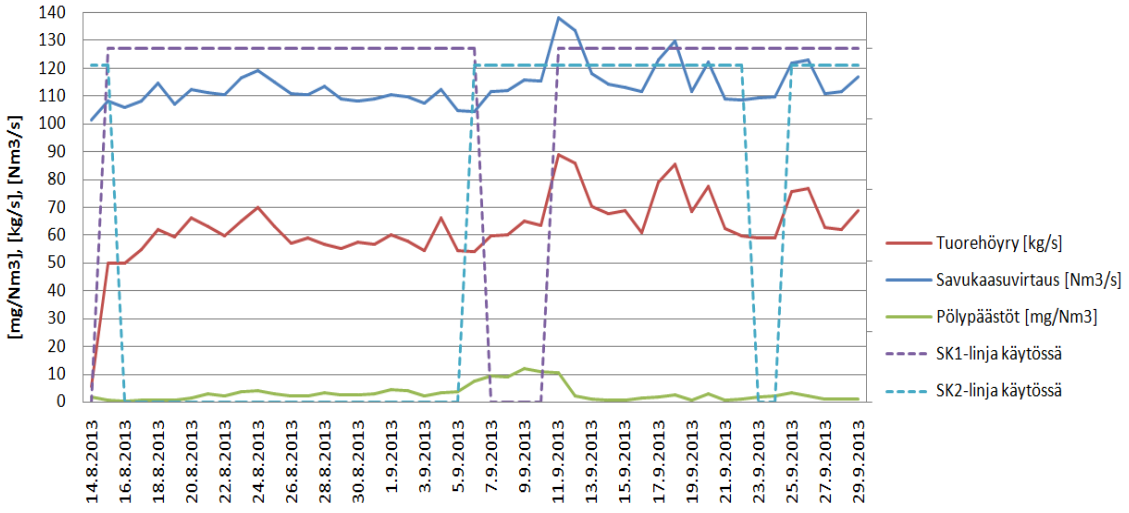
Toinen mahdollinen rajoittava tekijä yhden linjan ajossa on laitokselle asetettu hiukkaspäästöraja, joka on tuntikeskiarvona mitattuna 20 mg/Nm^3. Toisen sähkösuodattimen ollessa pois käytöstä piippuun ajettavan savukaasun pölypitoisuus kasvaa. Yhden sähkösuodattimien tehonkulutus koostuu seuraavista laitteista, jotka on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. KauVo:n sähkösuodinten laitteet (Alstom 2008).

Laite	Lukumäärä [kpl]	Teho/kpl [kW]	Teho yht. [kW]
Tasasuuntaaja	3	76	228
Lämmitysvastukset, kannatineristimet	12	1	12
Lämmitysvastukset, pohjasuppilot	18	1,5	27
Lämmitysvastukset, lämminilmahuuhtelu	1	36	36
Ravistimet	6	0,25	1,5

Lämmitysvastuksia pidetään päällä, vaikka suodatin olisi muuten poissa toiminnasta. Toisen sähkösuodattimen ollessa pois päältä tehon kulutuksen ero verrattuna kahden suotimen käyttöön on tasasuuntaajien kuluttama teho 228 kW. Tutkittaessa yhden savukaasulinjan ajomallin taloudellisuutta verrattuna kahteen linjaan, verrataan siis toisessa linjassa lisääntyneen savukaasuvirtauksen johdosta kasvanutta savukaasupuhaltimen tehonkulutusta sähkösuotimen tasasuuntaajissa säästettyyn tehoon.

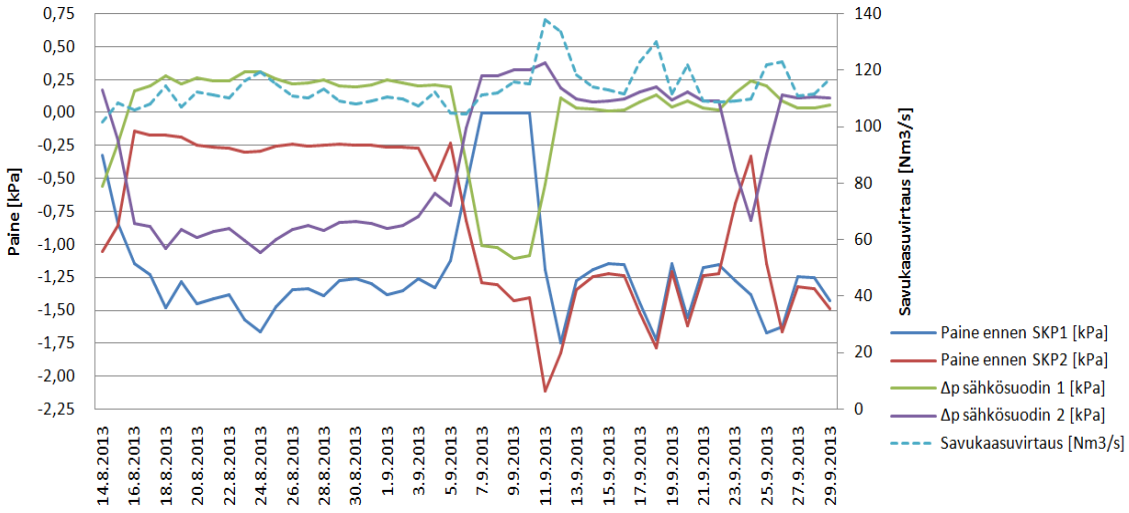
Voimalaitos otettiin kesäseisokin jälkeen takaisin tuotantoon elokuun puolivälissä 15.8.2013. Käynnistyksestä lähtien savukaasujärjestelmää ajettiin testiajona aluksi yhdellä savukaasulinjalla 15.8. - 10.9. testaten vuorotellen kumpaakin linjaa, ja tämän jälkeen molemmilla linjoilla 11.9. - 30.10. välisen ajan. Yhden linjan ajoa testattiin myös tällä välillä 2 vuorokauden ajan 23. - 24.9. Kuvassa 41 on esitetty koeajon aikainen höyrykuorma, savukaasuvirtaus ja pölypäästöt. Kuvaan on katkoviivalla merkattu tieto kumpi linja on hetkellisesti ollut käytössä.



Kuva 41. Höyryn tuotanto, savukaasuvirtaus sekä hiukkaspäästöt testijaksolla.

Kuvasta 41 huomataan, että pölypäästöt pysyvät hyvin alle lupaehdon yhdenkin linjan ajomallissa. Pelkästään savukaasulinja 2:lla ajettaessa 6.9. - 10.9. pölypäästöissä on pieni nousu johtuen osaltaan siitä, että suodattimen kolmesta erotuskentästä yksi oli epäkunnossa ja pois päältä.

Siirryttäessä kahden linjan ajosta yhden linjan ajolle, kaikki savukaasuvirta kulkee vain toisen sähkösuotimen läpi ja painehäviö käytössä olevan sähkösuotimen yli kasvaa. Kuvassa 42 on esitetty sähkösuodinten painehäviöt sekä savukaasupuhaltimille johdettavan savukasuun paine testiajojen aikana.



Kuva 42. Sähkösuodinten painehäviöt ja savukaasun paineet ennen puhaltimia testijaksolla.

Kuvasta huomataan, että testijakson savukaasukuormalla yhden linjan ajossa painehäviö sähkösuotimen yli on noin 0,1 kPa enemmän kuin painehäviöt molempien suotimen ajossa yhteensä. Siirryttäessä yhden linjan ajoon, puhaltimen läpi kulkeva savukaasuvirta kaksinkertaistuu mutta painehäviön kasvu sähkösuotimen yli pysyy kohtalaisena. Savukaasupuhaltimien ominaiskäyrästö, josta ilmenee puhaltimen vaatima akseliteho savukaasuvirtauksen ja paineenmuutoksen funktiona eri kierrosnopeuksilla on esitetty liitteessä 2. Ominaiskäyrästä voidaan arvioida yhden puhaltimen lisääntyneen savukaasuvirtauksen vaikutusta puhaltimen akselitehoon.

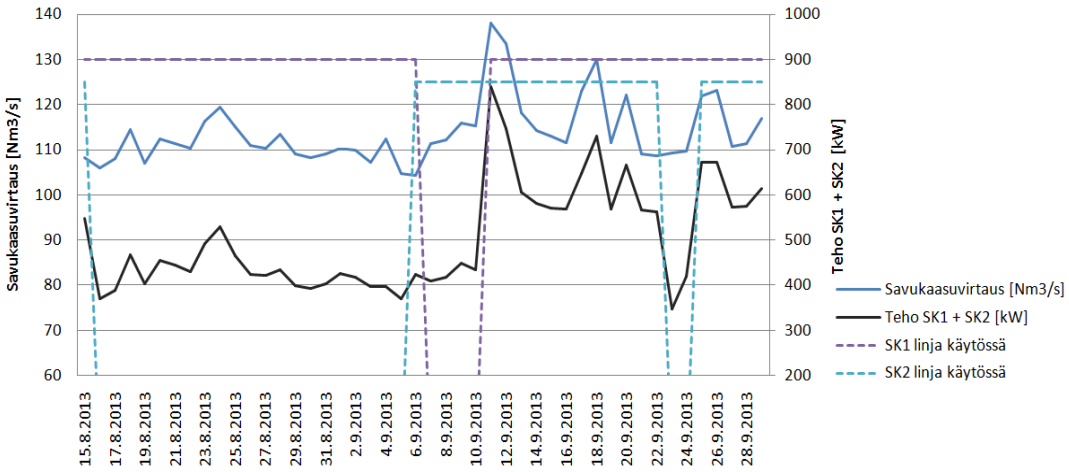
Laitoksen osakuorma-ajossa liikutaan savukaasuvirtauksissa välillä 100 - 130 Nm^3/s eli 360 000 - 468 000 Nm^3/h. Liitteen 2 puhaltimen ominaiskäyrän perusteella näissä virtausmäärissä yhden puhaltimen ajo verrattuna kahden puhaltimen ajoon ei näyttäisi olevan epäedullisella alueella puhaltimen vaatiman akselitehon kannalta.

KauVo:n prosessinohjausjärjestelmässä on mittaus savukaasupuhaltimien sähkömoottoreiden vääntömomentista ja pyörimisnopeudesta. Savukaasupuhaltimen sähkömoottorin mitoitustiedot on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Savukaasupuhaltimen moottorin mitoitustiedot.

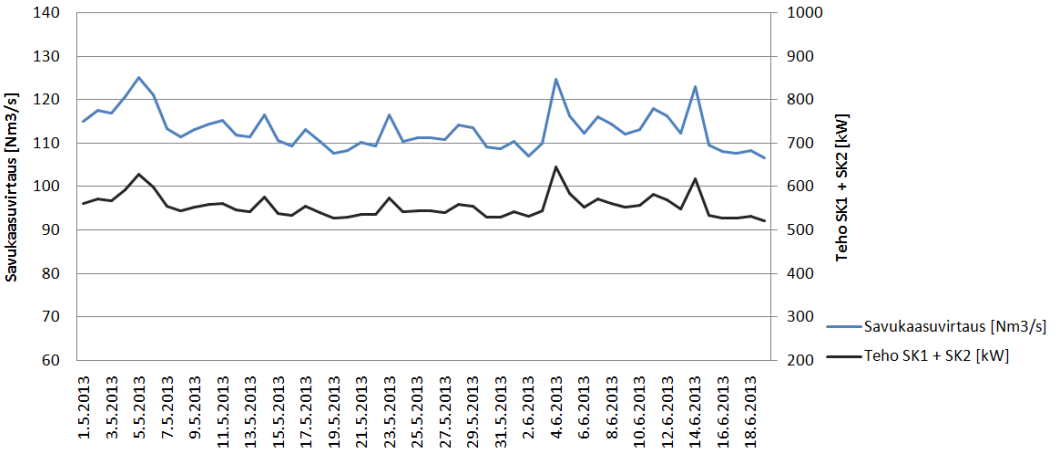
P_n [kW]	U_n [V]	I_n [A]	n_n [rpm]	T_n [Nm]	cos φ
1950	690	1940	995	18716	0,86

Puhaltimen hetkellisesti vaatima sähköteho voidaan mittausten perusteella laskea yhtälöllä 10. Tarkastelussa ei oteta huomioon sähkömoottorin hyötysuhdetta. Kuvassa 43 on esitetty linjojen käyntiajat, savukaasuvirtaus sekä molempien savukaasulinjojen yhteenlaskettu tehon kulutus testiajojen ajalta. Tehon kulutukseen sisältyy savukaasupuhaltimien akseliteho sekä sähkösuodattimien tasasuuntaajien teho.



Kuva 43. Savukaasuvirtaus sekä savukaaslinjojen tehon kulutus yhteensä testijaksolla.

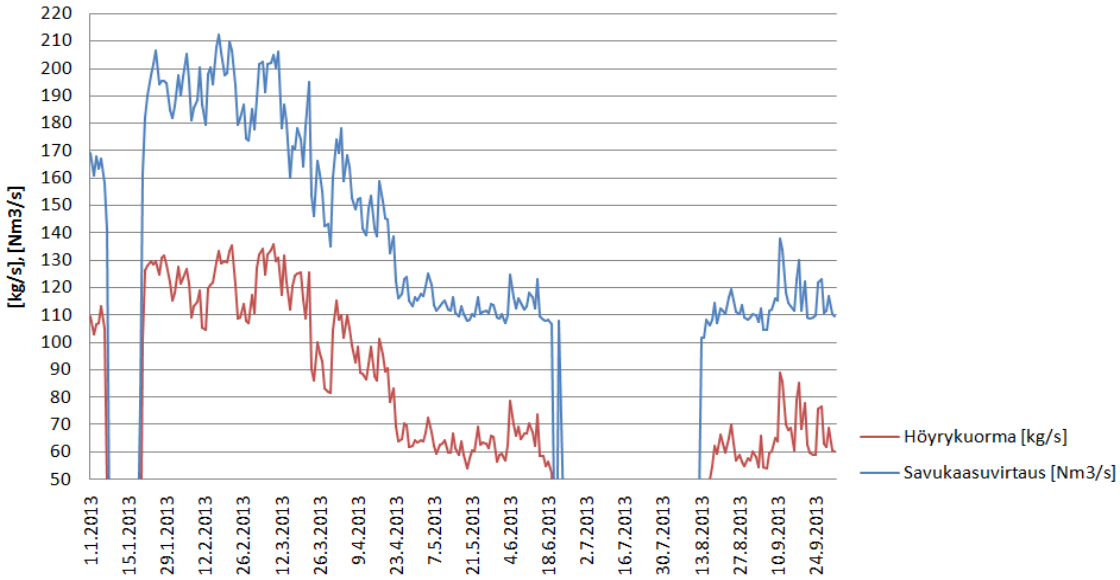
Kuvasta 43 huomataan, että yhden linjan testiajolla savukaasuvirtaus on vaihdellut välillä 110 - 120 Nm^3/s ja savukaasulinjan tehon kulutus 400 - 520 kW. Kahden linjan ajolle siirryttäessä samaisella virtausmäärällä tehon kulutus on vaihdellut välillä 550 - 670 kW. Kuvassa 44 on esitetty savukaasuvirtaus ja savukaasulinjojen tehonkulutus ennen KauVo:n kesäseisokkia välillä 1.5. - 20.6.2013, kun ajettiin molemmilla savukaasulinjoilla.



Kuva 44. Savukaasuvirtausmäärä ja savukaasulinjojen tehot ennen seisokkia, kahden linjan ajomalli.

Kuvassa 44 ennen seisokkia kahdella linjalla ajettaessa savukaasuvirtausmäärä on ollut hyvin samankaltainen kuin heti seisokin jälkeen testatussa yhden linjan ajossa kuvassa 43. Kahden linjan ajossa savukaasulinjojen tehon kulutus on ollut noin 550 kW ja yhden linjan ajossa noin 400 kW. Yhden savukaasulinjan testiajojen ja kahden linjan vertailuajojen tuloksena voidaan todeta, että yhden savukaasulinjan ajomallilla

osakuorma-ajossa säästetään noin 150 kW sähkötehoa jatkuvasti. Kuvassa 45 on esitetty KauVo:n höyrykuorma ja savukaasuvirtaus vuodelta 2013.



Kuva 45. Höyrykuorma ja savukaasuvirtaus vuonna 2013.

Kuvan 45 perusteella huomataan, että yhden savukaasulinjan ajomallin olisi vuonna 2013 voinut ottaa käyttöön 21.4. eli 2 kk ennen kesäseisokkia. Ajomallin voi ottaa käyttöön, kun laitoksen päivittäiset höyrykuormat laskevat alle 95 kg/s tasolle ja sitä voi jatkaa niin kauan kun höyrykuormat nousevat tämän tason yläpuolelle. Tilanne täytyy kuitenkin vuosittain arvioida tapauskohtaisesti.

Vuosittain arvioituna yhden savukaasulinjan ajomallia voidaan käyttää keväällä ja syksyllä noin 4 kk ajan. Energiansäästö vuodessa voidaan näin ollen laskea yhtälöllä:

$$P_{e,sk} = 0{,}150\ MW * 24\ h * 120\ d = 432\ MWh$$

Energiansäästö on merkittävä ja se saadaan aikaan pelkällä ajo-ohjeistuksella.

8.2.2 Metsäenergiamurskan käyntiajan tehostaminen

Vuonna 2012 alatehtaalle tuotiin metsäenergiaa yhteensä 350 GWh. Murskalle otetaan vastaan metsäenergiakuormia yleensä vuosittain noin 8 kk ajan eli lähes koko voimalaitoksen käynnin ajan. Kuljettajat ajavat metsäenergian rekkakuormilla tehdasalueen murskalle, ja purkavat käsiteltävän polttoaineen suoraan syöttökuljettimelle rekkaan asennetulla nostimella. Syksyllä ja keväällä päivittäisiä

kuormia saapuu murskalle noin 5 - 10, talvella huippukulutuksen aikaan jopa 15. Toimitettavia metsäenergiakuormia on eri tyyppejä: kantoja, esimurskattuja kantoja, irtonaista hakkuutähdettä, pienpuuta sekä järeää runkopuuta. Vuonna 2012 kannot käsittivät noin 50 % kaikesta metsäenergiasta. (Blom, haastattelu 20.9.2013)

Murska on mitoitusteholtaan suurin yksittäinen tehonkuluttaja biopolttoaineen käsittelyssä. Murskauslinjan kokonaisuuteen kuuluu syöttökuljetin, murskan roottorit ja murskatun jakeen kuljettimet. Itse murskan voimansiirtoa hoitavien roottoreiden moottoritehot on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Murskan komponentteihin liittyvät sähkömoottorit. (Saalasti 2009)

Moottoriin liittyvä osa	Teho [kW]	Pyörimisnopeus [rpm]
Syöttörulla	22	1500
Yläroottori	132	1500
Alaroottori	250	1500
Päärootori 1	355	1000
Päärootori 2	355	1000

Vuonna 2011 Metsäteho Oy:n tekemässä tutkimuksessa eri jakeiden purkamisajat murskalla vaihtelivat välillä 20 - 40 min ja metsäenergia-autojen kokonaisaika tehdasaluella välillä 40 - 80 min. Välillä autoja on murskalla jonoksi asti ja ne joutuvat odottamaan omaa murskausvuoroaan. Energiasisällöltään kuormakoot vaihtelivat tutkimuksessa välillä 65 - 105 MWh. (Metsäteho 2011, 44)

Murskan roottoreita on tämän hetkisen käytännön mukaisesti pidetty lähes jatkuvasti päällä pyörimässä, vaikka metsäenergiakuormia ei hetkellisesti olisi murskalla tai tehdasalueella. Käytönvalvojien arvion mukaan murska on pyörinyt tyhjillään noin 50 % ajasta. Murskan epäiltiin vievän suuren osan mitoitustehostaan myös tyhjäkäynnillä, mutta tyhjäkäyntitehosta ei oltu tehty käytännön tutkimusta. Prosessinohjausjärjestelmässä on seuranta vain murskan moottoreiden virran kulutuksesta, joka ei suoraan kerro moottoreiden syöttötehon kulutusta.

Murskan roottoreiden tyhjäkäynnin tehomittaukset suoritettiin 24.9.2013 klo 12:20 - 13:00. Mittaukset suoritettiin alatehtaan sähkötilasta, josta virransyöttö murskan

sähkömoottoreille tapahtuu. Kaikkien roottoreiden tehonkulutukset mitattiin niiden syöttökaapeista. Kuvassa 46 on esitetty toisen pääroottorin syöttökaappi avattuna.

Kuva 46. Roottorin 1 syöttökaappi sekä käytetty tehomittari.

Molemmat pääroottorit ovat vakiokierrosnopeudella toimivia, ylä- ja alaroottorit ovat varustettu taajuusmuuttajilla. Taulukossa 11 on esitetty tehomittarin antamat tulokset.

Taulukko 11. Murskan roottoreiden tyhjäkäynnin tehomittausten tulokset.

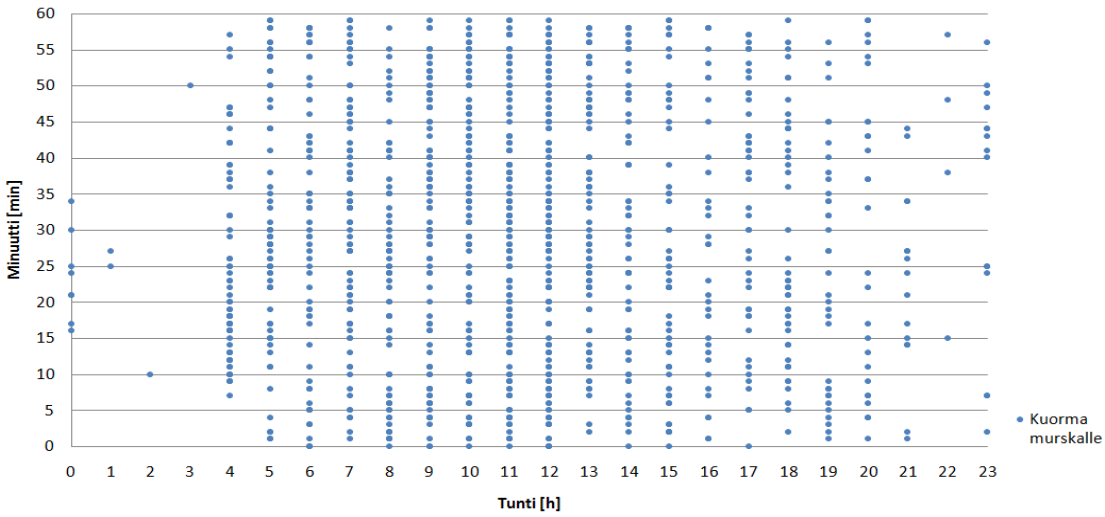
Laite	Virta [A]	Jännite [V]	Pätöteho [kW]	Näennäisteho [kVa]	Loisteho [kVar]
Roottori 1	54,0	699,0	9,0	66,0	65,4
Roottori 2	55,0	700,0	9,0	66,0	65,4

Yläroottori	9,0	700,0	10,0	10,1	0,0
Alaroottori	72,0	700,0	8,5	-	-

Taulukosta 11 nähdään, että murskan roottoreiden kuluttama pätöteho tyhjäkäynnillä on yhteensä noin 40 kW. Sen sijaan murskan pääroottorit kuluttavat reilusti loistehoa, jota kompensoidaan tehtaalle asennetuilla kondensaattoreilla. Murskan syöttökuljetin, syöttörulla sekä muut pienemmät apulaitteet kuluttavat murskan tyhjäkäynnillä pätötehoa noin 10 kW. Murskan pysäyttämisellä kuormien välillä saavutettaisiin siis yhteensä noin 50 kW:n tehonsäästö.

Murskan pääroottoreiden pysähtymisaika on 10 - 15 min. Murska voidaan käynnistää uudelleen, kun roottorit ovat täysin pysähtyneinä. Pääroottoreiden kuorman käynnistys vaatii 30 sekunnin pehmosartin, ja pääroottorit ovat varustettu pehmokäynnistimillä. (Saalasti 2009, 8) Pehmokäynnistimissä on virran ja jännitteen elektroninen ohjaus moottorin käynnistyksen ja pysäytyksen aikana, ja ne estävät korkeita virtapiikkejä ja sysäysvirtaa moottorin käynnistyksessä (ABB 2013, 4)

Murskan käyntiaikaa voitaisiin rajoittaa kahdella tavalla: pysäyttämällä se aina kun kuljettaja lähtee murskalta ja seuraavaa kuljettajaa ei ole jonossa, tai pitämällä murska tietyn ajan vuorokaudesta kokonaan pois päältä. Murskan käynnistelyille päivän mittaan ei ole mekaanista estettä, mutta käynnistys ja pysäytys useita kertoja päivässä voi rasittaa pääroottoreiden pehmokäynnistimiä. Tämän takia murskan pysäyttäminen yhtenäiseksi ajaksi päivittäin olisi järkevämpi vaihtoehto. Kuvassa 47 on esitetty metsäenergiakuormien päivittäiset tuontiajat tehtaalle vuoden 2013 aikana kuukausilta tammikuu - lokakuu. Kellonajat ovat tulopunnitusaikoja tehtaan autovaa'alla ja ne on kerätty kuvaajaan KauVo:n raportointijärjestelmästä.



Kuva 47. Metsäenergiakuormien päivittäiset tuloajat murskalle, tammikuu - lokakuu 2013.

Tarkastelussa kuormia on saapunut yhteensä 1256 kpl. Kuormista vain 31 kpl eli 2,5 % on tullut murskalle aikavälillä 22 - 04 ja loput aikavälillä 04 - 22. Murska on kuormien perusteella yöaikaan todella vähäisellä käytöllä. Murskan pitäminen pois päältä yöaikana vaatisi sopimuksen metsäenergiakuormien tuontiajasta toimittajien kanssa. Esimerkiksi jos päivittäinen tuontiaika rajoitetaan välille klo 04 - 22, tällä käytännöllä murskan päivittäinen säästö energiankulutuksessa olisi

$$P_{e_{murska,d}} = 50\ kW * 6\ h = 0{,}30\ MWh$$

ja vuosittain 8 kk:n aikana

$$P_{e_{murska}} = 240\ d * 0{,}30\ MWh = 72\ MWh$$

Murskan pysäyttämisellä saavutettu sähköenergian säästö vuodessa ei ole kovin merkittävä. Sähköenergian säästön lisäksi murskan pysäyttämisellä öiden ajaksi estettäisiin kuitenkin myös mekaanisten osien, kuten laakereiden kulumista ja niiden huoltokustannuksia.

8.3 Teoreettiset tarkastelut

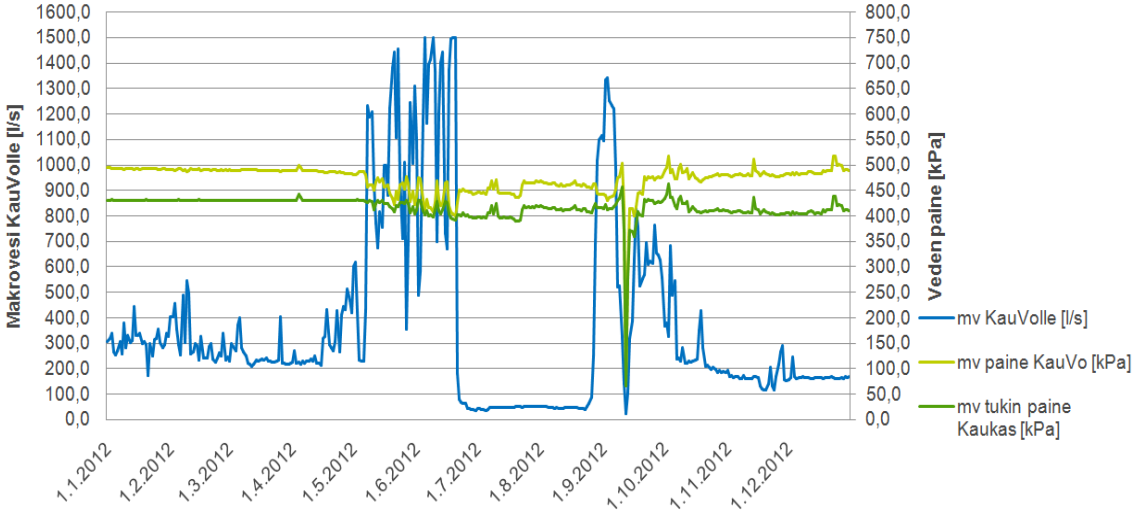
Teoreettisissa tarkastelukohteissa tarkastellaan voimalaitoksen kolmen eri pumppaussysteemin paineenalennuksen mahdollisuutta. Paineenalennuksesta saavutettavaa pumppausten energiansäästöä tarkastellaan laitetoimittajien pumpuista tekemien ominaiskäyrien avulla.

8.3.1 Makrovesiverkon paineenalennus

KauVo:n kylmävesiverkon toimintaan käytetään Kaukaan tehtaiden vesilaitoksella valmistettua makrovettä. Makroveden pumppaamiseksi vesilaitokselle on rakennettu uusi makrovesipumppu, ja vesi tulee voimalaitokselle maanalaista putkea pitkin. Voimalaitoksella makrovettä käytetään jäähdytysvetenä, suurimpina kuluttajia lauhdutin sekä jäähdytysvesipuolelta lauhduttimen kanssa sarjaan kytketty kaukolämmön apujäähdytin. Lisäksi makrovedellä jäähdytetaan suljettua jäähdytysvesikiertoa, johon on kytketty mm. laitoksen puhaltimien jäähdyttimet, kattilan pohjatuhkan jäähdytyskierto, generaattorin jäähdytys sekä syöttövesipumppujen moottoreiden jäähdytykset. Makrovettä tarvitaan voimalaitoksen käyttöö maksimissaan noin 1200 l/s, lauhdutin vaatii suurimmillaan noin 1000 l/s vesivirtauksen ja suljetun jäähdytysvesikierron maksimivirtaus on noin 200 l/s. (Kuiri 2008, 3)

Makrovesilinjasta haarautuu ennen lauhdutinta lisäksi yksi pienempi linja, joka vie jäähdytysvettä kattilan ilmanvaihtotilan jäähdytyssiirtimille, turbiinin ulospuhallussäiliöön ja kattilan ulospuhallussäiliöön. Tämän linjan maksimijäähdytysvesitarve normaalikäytössä on noin 30 l/s. Linjasta on vedetty myös turbiinirakennukseen pesuyhteitä, joita sijaitsee turbiinisalin pohjakerroksessa sekä turbiinisalissa. Linjasta nousee kattilahuoneen puolelle lisäksi lisävesiputki kattilan pohjatuhkaruuvien jäähdytysvesikierron paisuntasäiliöön, joka sijaitsee kattilahuoneen 11. kerroksessa. Paisuntasäiliössä pidetään pintaa lisäämällä järjestelmään tarvittaessa makrovettä pinnan laskiessa.

Kuvassa 48 on esitetty KauVolle pumpattu makrovesimäärä, veden paine Kaukaan makrovesitukissa sekä veden paine KauVo:n kylmävesiverkossa vuonna 2012:



Kuva 48. Makrovesi KauVolle, kylmävesiverkon paine ja Kaukaan makrovesitukin paine 2012.

Kuvasta 48 nähdään, että jäähdytysveden tarve ajoaikana KauVolla on ollut tammikuu - huhtikuu välillä 200 - 400 l/s, toukokuu - syyskuu välillä 600 - 1500 l/s ja jälleen lokakuu - joulukuu välillä 200 - 400 l/s. Jäähdytysveden tarve kasvaa osakuorma-ajossa huomattavasti, kun Saimaasta otettava raakavesi lämpenee, sekä kaukolämmön apujäähdytintä ja lauhdutinta käytetään apuna saavuttamaan suurempaa ajokuormaa. Kevään 1500 l/s arvoihin yltävät vesimäärät viestivät kuitenkin siitä että lauhduttimen säädöissä on ollut ongelmia, sillä 1200 l/s pitäisi mitoitusarvojen perusteella riittää laitoksen jäähdytysvedeksi kaikissa tilanteissa. Lauhduttimen asteisuuksia on tämän jälkeen muutettu ja veden tarvetta saatu alemmaksi.

Kaukaan tehtailla on 5 omaa makrovesipumppua. KauVoa varten rakennetun makrovesipumppu 6:n ja sen moottorin mitoitustiedot on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Makrovesipumppu 6:n mitoitustiedot.

Mitoitus	$q_{v,max}$ [l/s]	Δp_{max} [kPa]	P_n [kW]	Säätötapa
Makrovesipumppu 6	1600	392	800	TJM

Makrovesipumpun pyörimisnopeussäätöä ohjaa tällä hetkellä Kaukaan tehtaan makrovesitukin vaatima paine. Pumpun painepuolen linja on yhdistettynä käsiventtiilillä makrovesitukkiin, johon myös 5 Kaukaan omaa pumppua pumppaa makrovettä. Tällä käytännöllä KauVo:n makrovesipumpulla voi tukea Kaukaan

tehtaiden makrovesiverkon painetta sekä toisinpäin. Aiemmasta kuvaajasta 46 nähdään, että makrovesitukin paine vaihtelee välillä 400 - 430 kPa ja kylmävesiverkon paine KauVo:n päässä tämän mukana välillä 450 - 490 kPa. KauVo:n päässä paine on noin 60 kPa korkeampi, sillä voimalaitoksen korkeusasema on matalammalla kuin vesilaitoksen. Kylmävesiverkon paineen mittaus sijaitsee tuloputkessa KauVo:n päässä noin 2 m voimalaitoksen pohjatason yläpuolella. Voimalaitoksen pohjatason korkoasema on +93.400 m.

Selvitettäessä tarvittavaa vähimmäispainetta, joka kylmävesiverkossa on oltava verkon toimimiseksi täytyy etsiä verkon putkiston korkein kohta sekä ottaa huomioon putkiston painehäviöt. Kylmävesiverkko sijaitsee lähes kokonaisuudessaan voimalaitoksen turbiinirakennuksessa. Taulukossa 13 on esitetty voimalaitoksen turbiinirakennuksen kerrosten korkeusasemat ja kylmävesiverkon laitteet/putkistot näissä kerroksissa.

Taulukko 13. KauVo:n voimalaitoksen turbiinirakennuksen kerrosten korkeusasemat.

Tila / laitteet	**Korko [m]**
Kerros 1. Voimalaitoksen pohjataso: KL-apujäähdytin	+93.400
Kerros 2. Avoin taso: lauhdutin, suljetun JV-kierron jäähdytykset	+99.400
Kerros 3. Avoin taso: IV-tilan jäähdytykset, UP-säiliöiden jäähdytykset	+102.200
Kerros 4. Turbiinitaso: pesuyhteitä	+105.400
Kerros 5. Avoin taso	+109.400
Kerros 6. Avoin taso: pesuyhteitä	+112.400
Kerros 7. Avoin taso	+117.400

Kylmävesiverkon kaikki päälaitteet ja niihin liittyvät putkistot sijaitsevat 5 m turbiinitason eli korkoaseman +105.400 m alapuolella. KauVolle tuleva makrovesiputki nousee heti laitoksen 1. kerroksen kattotasoon, josta veden jakaminen jäähdytyskohteille alkaa. Ainoat tämän tason yläpuolelle nousevat putket

ovat muutama pesuyhdeputki, jotka nousevat turbiinisalin syöttövesisäiliön tasolle sekä kattilahuoneen puolella pohjatuhkaruuvien jäähdytysvesikierron paisuntasäiliöön tasolle +135.400 m nouseva putki. Paisuntasäiliö on paineeton, ja makrovettä paisuntasäiliön täyttöön käytetään lisävedeksi lähinnä sellaisen huoltoseisokin jälkeen, jossa pohjatuhkaruuvien jäähdytysvesikierto on jouduttu tyhjentämään.

Korkeuseroa KauVo:n makrovesiverkon paineen mittauspisteestä turbiinitasoon on siis 12 m, joka paine-erona tarkoittaa hieman alle 120 kPa:ta. Teoriassa makrovesiverkon paineen voisi pudottaa lähelle tasoa 120 kPa. Makrovesiverkon turvallinen toiminta taas voidaan taata pitämällä verkon painetta esimerkiksi tasolla 240 kPa. Tämä tarkoittaisi 200 kPa:n pudotusta verkon nykyiseen painetasoon.

Liitteessä 3 on esitetty makrovesipumppu 6:n ominaiskäyrä. Ominaiskäyrästä nähdään pumpun tehonkulutus tilavuusvirran ja paine-eron funktiona vuoden 2012 ajalta nykyisellä painetasolla sekä esimerkkinä, jossa makrovesiverkon painetta KauVo:n päässä pudotetaan 200 kPa:lla. Yhtälailla makrovesipumppu 6:n tuottopaine Kaukaan vesilaitoksella putoaa 200 kPa:lla. Tarkastelussa käytetään tammikuu - huhtikuu ja lokakuu - joulukuu aikaisen pumpatun makrovesimäärän keskiarvona 300 l/s ja toukokuu - syyskuu aikana 1000 l/s. Pumpun tehonkulutukset ja hyötysuhteet kyseisillä arvoilla on esitetty taulukossa 14. Tarkastelu ei ota huomioon sähkömoottorin hyötysuhdetta.

Taulukko 14. Makrovesiverkon paineenalennuksen vaikutus makrovesipumppu 6:n tehonkulutukseen.

Tammi - Huhti, Loka - Joulu	**Makrovesi [l/s]**	**Pumpun Δp [kPa]**	**Pumpun tehontarve [kW]**	**Hyötysuhde**
Nykytilanne	300	320	250	< 0,75
Paineenalennus	300	120	65	< 0,75
Touko - Syys				
Nykytilanne	1000	320	370	0,85
Paineenalennus	1000	120	130	0,88

Ominaiskäyrän avulla tehdyn tehotarkastelun avulla voidaan laskea paineenpudotuksen avulla saavutettu pumppauksen energiansäästö vuodessa. Energiansäästö ajalta tammikuu - huhtikuu ja lokakuu - joulukuu, yhteensä 7 kk:

$$P_{e_{mvp6,7kk}} = (0{,}250 - 0{,}065)\ MW * \ 210\ d * 24\ h = 932{,}4\ MWh$$

energiansäästö ajalta toukokuu - syyskuu, yhteensä 3 kk:

$$P_{e_{mvp6,3kk}} = (0{,}370 - 0{,}130)\ MW * 90\ d * 24\ h = 518{,}4\ MWh$$

ja yhteensä vuodessa:

$$P_{e_{mvp6}} = 932{,}4\ MWh + 518{,}4\ MWh = 1450{,}8\ MWh$$

Makrovesiverkon paineenalennuksella saavutettava energiansäästö vuodessa olisi huomattava. Paineenalennuksen toteuttamiseksi käsiventtiili Kaukaan tehtaiden makrovesitukkiin tulee sulkea ja makrovesipumppu 6:n pyörimisnopeusohjaus tulee muuttaa KauVo:n makrovesiverkon paineenmittauksen perään.

8.3.2 Lähtevän kaukolämpöveden paineenalennus

KauVo toimii Lappeenrannan kaukolämpöverkon päälämmöntuottajana. Kaukolämpöverkon lisä- ja varakapasiteettina toimii lisäksi Lappeenrannan Energian Mertaniemen maakaasuvoimalaitos ja 5 maakaasu- ja/tai polttoöljykäyttöistä lämpökeskusta eri puolilla kaupunkia. Noin 0 °C...-5 °C ulkoilman lämpötiloihin asti KauVo toimii yksin verkon lämmöntuottajana, alhaisemmilla lämpötiloilla aletaan käynnistää mukaan muita tukevia lämpölaitoksia. (Lappeenrannan Energia 2008, 2)

Staattinen paine on kaukolämmön paluuputken paine, ja se määräytyy verkon korkeimman maastokohdan mukaan. Paineenpidon tarkoituksena on pitää kaukolämpöverkoston putkistot kaikissa tilanteissa täynnä vettä ja estää veden kiehuminen yhdessäkään verkon osassa. KauVo ylläpitää verkon staattista painetta voimalaitoksen staattisen paineenpidon pumpuilla yleensä aina, kun se on mukana kaukolämmön tuotannossa. Kaukolämmön paluuputken painetta on tällä hetkellä KauVo:lla pidetty arvossa 250 kPa. (Lappeenrannan Energia 2008, 6)

Kaukolämpöveden kierrätykseen käytetään KauVo:lla kahta sarjaan kytkettyä pyörimisnopeussäädettyä pumppua. Kiertovesipumppujen mitoitusperusteena on Lappeenrannan Energian verkkoon siirtyvä huippukaukolämpöteho 110 MW. Pumppujen maksimituotto on 550 l/s ja tätä vastaava paine-ero 590 kPa. (Kuiri 2009, 8)

Lappeenrannan kaukolämpöverkoston pituus on noin 320 km ja se on esitetty kuvassa 49. KauVo:n voimalaitoksen sijainti on merkattu kuvaan punaisella neliöllä.

Kuva 49. Lappeenrannan kaukolämpöverkko (Lappeenrannan Energia 2013)

KauVo:lta Lappeenrannan Energian kaukolämpöverkkoon pumpattavan KL-veden lämpötilaa säädetään vallitsevan ulkoilman lämpötilan mukaan. Kaukolämpöveden pumppauksessa käytetään kahta erilaista säätötapaa, verkon tehon säätöä paine-erolla sekä kiinteän tehon ajoa verkkoon. (Lappeenrannan Energia 2008, 6)

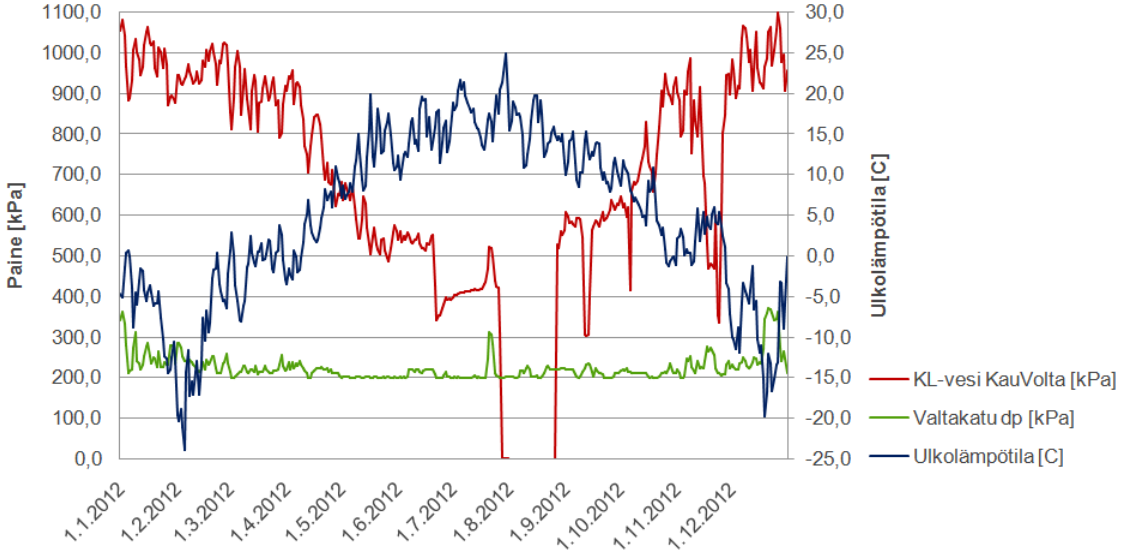
Paine-erosäädössä Δp tarkoittaa kaukolämmön meno- ja paluuputken välistä paine-eroa. Paine-eroa tarvitaan kuluttajalaitteiden yli veden virtauksen varmistamiseksi. Kaukolämpöverkossa paine-ero vaihtelee jatkuvasti ja on yleensä talvella korkeampi kuin kesällä. Liian suuren paine-eron pitäminen on epätaloudellista, joten verkon eri pisteiden paine-erot on tunnettava ja tärkeimpiä pisteitä valvottava. Suomen Kaukolämpöyhdistyksen suosituksen mukainen vähimmäispaine-ero on 60 kPa.

Paine-eroon voidaan vaikuttaa laitoksilla olevilla KL-pumpuilla sekä verkostojen pumppaamoilla. Jos pumppausta suurennettaan, Δp kasvaa ja päinvastoin. Lappeenrannan kaukolämpöverkoston pumppaamot sijaitsevat Lepolassa ja Leirissä. Kaukolämpöverkon itäisen alueen paine-erosäätö hoidetaan talvella Lepolan pumppamolla ja syksyllä ja keväällä Lauritsalan lämpökeskuksen kiertopumpuilla. Läntisen alueen paine-erosäätöä hoitaa Leirin pumppaamo. Kaupungin keskustan sekä pohjois- ja eteläosien verkon paine-eron säädettävänä arvona toimii Valtakadun paine-ero. (Lappeenrannan Energia 2008, 6)

KauVo säätää kaukolämpöverkon tehoa paine-erosäädöllä silloin, kun kaupungin kaukolämmöntarve on alle KauVo:n maksimitehon. Kaukolämpöverkon paine-eron asetusarvo ja KauVo:lta lähtevän KL-veden lämpötilan asetusarvo ohjataan Mertaniemen valvomosta. Kierrätyspumppujen kierroslukusäätö seuraa tällöin Lappeenrannan Energian antamaa paine-eroa, joka on normaalisti Lappeenrannan keskustan Valtakadun paine-ero. (Lappeenrannan Energia 2008, 7)

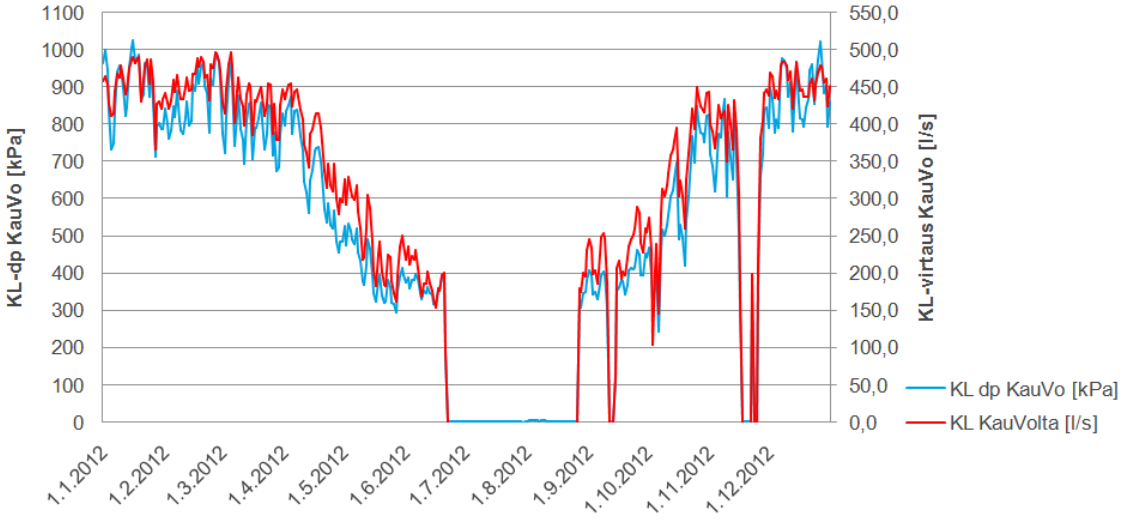
Kun verkon KL-tarve on suurempi kuin KauVo:n tuotantokyky, KauVo ajaa kiinteällä teholla huippukaukolämpötehoa verkkoon. Voimalaitokselta ajetaan tällöin vakiotehoa menolämpötilan perusteella ja Lappeenrannan Energia säätää omia laitoksiaan verkon tehon tarpeen mukaisesti. KauVo:n KL-pumppujen pumppausta säädetään siten, että verkkoon siityvä teho pysyy vakiona. Käytännössä kiinteän tehon ajaminen on sama kuin virtaussäätö. (Lappeenrannan Energia 2008, 7)

Valtakadun paine-erosäädössä ongelmana on ollut verkon eteläisen osan Ihalaisen alue, jonka takia keskustan paine-eroa on jouduttu pitämään korkeampana kuin muuten tarvitsisi. (Nummikoski, LRE 12.9.2013) Kuvassa 50 on esitetty Lappeenrannan ulkolämpötila, Valtakadun paine-ero kaukolämpöverkossa ja KauVo:lta lähtevän KL-veden paine vuonna 2012.



Kuva 50. Lappeenrannan ulkolämpötila, Valtakadun paine-ero ja KL-veden paine KauVo:lta 2012.

Kuvasta 50 nähdään, kuinka Valtakadun paine-ero ohjaa KauVo:lta lähtevän KL-veden painetta. Valtakadun paine-ero vaihtelee välillä 200 - 350 kPa ja KauVo:lta lähtevän KL-veden paine välillä 500 - 1100 kPa. Kesäseisokin alun jälkeen lähtevän KL-veden mittaus on näyttänyt virheellisesti paine-eroa vaikka pumput ovat poissa toiminnasta. Kuvassa 51 on vastaavasti esitetty KauVo:lta lähtevän KL-veden virtausmäärä sekä kiertopumppujen yhteensä tuottama paine-ero voimalaitoksella.



Kuva 51. KL-veden virtaus ja KL-pumppujen tuottama paine-ero KauVo:lta 2012.

Kuvaajasta nähdään että tuotettu paine-ero on verrannollinen pumpattuun veden määrään. Suurella virtauksella pumput joutuvat tuottamaan suhteellista paine-eroa hieman enemmän kuin pienellä virtauksella, sillä huippukuormalla painehäviö

kaukolämmönvaihtimien yli kasvaa. Painehäviö on huippukuormalla noin 120 kPa ja minimikuormalla noin 40 kPa.

Lappeenrannan kaukolämpöverkon ääripisteiden paine-erot siis vaikuttavat keskustan Valtakadun vaatimaan paine-eroon, joka puolestaan ohjaa KauVo:n KL-kiertopumppujen pyörimisnopeutta. Tarkastellaan seuraavaksi teoreettista tilannetta, jossa KauVo:lta lähtevän kaukolämpöveden painetta voitaisiin pudottaa 100 kPa ja edelleen 200 kPa eli paine vaihtelisi vuoden mittaan välillä 400 - 1000 kPa ja 300 - 900 kPa. Tämä tarkoittaisi Valtakadun paine-eron laskemista alemmalle tasolle, tai paine-eron tukemista muutoin esim. kaukolämpöverkon Ihalaisen haaraan asennettavalla pumpulla.

KauVo:n KL-kiertopumppujen ominaiskäyrä on esitetty liitteessä 4. Ominaiskäyrän avulla voidaan tarkastella pumppujen tehon kulutusta suhteessa niiden tuottamaan paine-eroon ja virtaukseen. Valitaan kuvan 51 perusteella tarkastelun lähtöarvoiksi kuukausien joulukuu - maaliskuu paine-eron tuoton keskiarvo 900 kPa ja virtaus 450 l/s, huhtikuun ja lokakuun keskiarvot 700 kPa, 300 l/s sekä välin toukokuu - syyskuu keskiarvot 400 kPa, 200 l/s. Kaukolämpöveden virtausmäärä kulkee molempien pumppujen läpi ja yhden pumpun täytyy tuottaa puolet tästä paine-erosta.

Taulukossa 15 on esitetty yhden pumpun paine-eroa ja veden virtausta vastaavat tehon kulutukset ennen ja jälkeen paineen pudotusta sekä pumpun hyötysuhde tällä alueella. Tarkastelussa ei huomioida sähkömoottorin hyötysuhdetta.

Taulukko 15. KauVo:n KL-kiertopumpun ominaiskäyrän arvot muutoksen jälkeen.

Joulu - Maalis	**KL Δp [kPa]**	**KL virtaus [l/s]**	**Teho [kW]**	**Hyötysuhde**
Nykyinen	450	450	230	0,87
Uusi (-100 kPa)	400	450	210	0,88
Uusi (-200 kPa)	350	450	180	0,88
Huhti, Loka				
Nykyinen	350	300	130	0,79
Uusi (-100 kPa)	300	300	110	0,82
Uusi (-200 kPa)	250	300	95	0,84
Touko - Syys				
Nykyinen	200	200	55	0,76

Uusi (-100 kPa)	150	200	35	0,80
Uusi (-200 kPa)	100	200	20	0,85

Taulukosta 15 nähdään, että 100 kPa:n paineenpudotuksella pumput siirtyvät paremmalle hyötysuhteelle ja niiden tehon kulutus putoaa 20 kW per pumppu jokaisessa ajomallissa. 200 kPa pudotuksella paras energiansäästö, 50 kW per pumppu saavutetaan huippukuorma-ajossa. Ominaiskäyrän perusteella 100 kPa:n pudotuksella vuosittain saavutettava energiansäästö KL-kiertopumpuilta laitoksen käyntiaikana olisi seuraava:

joulukuu - maaliskuu, 4 kk :

$$P_{e_{KL,4kk}} = 2 * (0{,}230 - 0{,}210)\ MW * 24\ h * 120\ d = 115{,}2\ MWh$$

huhtikuu ja lokakuu, 2 kk:

$$P_{e_{KL,2kk}} = 2 * (\ 0{,}130 - 0{,}110)\ MW * 24\ h * 60\ d = 57{,}6\ MWh$$

toukokuu - syyskuu, 3,5 kk:

$$P_{e_{KL,3,5kk}} = 2 * (0{,}055 - 0{,}035)\ MW * 24\ h * 105\ d = 100{,}8\ MWh$$

ja energiansäästö KL-kiertopumpuilta yhteensä vuodessa:

$$P_{e_{KL}} = 115{,}2\ MWh + 57{,}6\ MWh + 100{,}8\ MW = 273{,}6\ MWh$$

200 kPa:n pudotuksella vuosittain saavutettava energiansäästö KL-kiertopumpuilta laitoksen käyntiaikana olisi seuraava:

joulukuu - maaliskuu 4 kk :

$$P_{e_{KL,4kk}} = 2 * (0{,}230 - 0{,}180)\ MW * 24\ h * 120\ d = 288\ MWh$$

huhtikuu ja lokakuu 2 kk:

$$P_{e_{KL,2kk}} = 2 * (\ 0{,}130 - 0{,}095)\ MW * 24\ h * 60\ d = 100{,}8\ MWh$$

toukokuu - syyskuu 3,5 kk:

$$P_{e_{KL,3,5kk}} = 2 * (0{,}045 - 0{,}020)\ MW * 24\ h * 105\ d = 176{,}4\ MWh$$

ja energiansäästö KL-kiertopumpuilta yhteensä vuodessa:

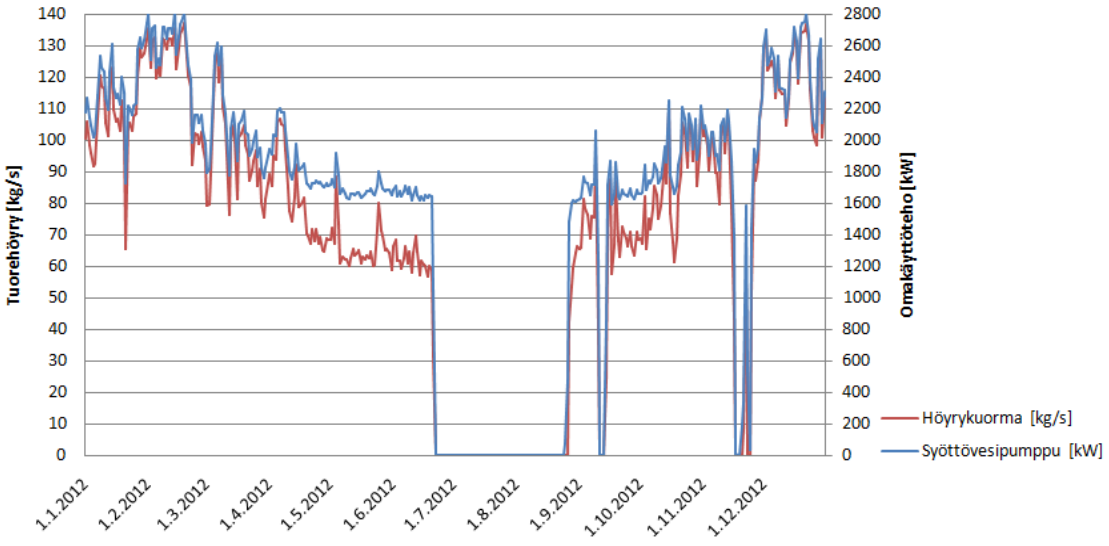
$$P_{e_{KL}} = 288\ MWh + 100{,}8\ MWh + 176{,}4\ MW = 565{,}2\ MWh$$

Energiansäästö vuodessa lähtevän KL-veden paineenalennuksella olisi kohtalainen. Taulukosta nähdään myös että KauVo:n KL-kiertopumppujen sähkönkulutus osakuormalla laskee alhaiselle tasolle nykyisillä arvoillakin, joten kiertopumppujen ajo osakuormassa ei vaikuta merkittävän heikentävästi laitoksen omakäyttöhyötysuhteeseen.

100 kPa:n paineenpudotusta olisi näistä vaihtoehdoista todennäköisesti helpompi lähteä toteuttamaan. Jatkotutkimuksissa asiasta pitäisi keskustella Lappeenrannan Energian kanssa. Kaukolämpöverkosta täytyy selvittää millä suhteella KauVo:lta lähtevän KL-veden virtaama ja paineen pudotus vaikuttavat Valtakadun paine-eron pitämiseen, ja kuinka verkon ääripisteiden paineen pito vaikuttaa käytännössä paine-eroon Valtakadun pisteessä. Tämän jälkeen voi pohtia kuinka suurta KauVo:lta lähtevän kaukolämpöveden paineenpudotusta voisi taloudellisesti harkita ja millaisia toimenpiteitä paineenpudotuksen mahdollistamiseksi kaukolämpöverkkoon tulisi tehdä.

8.3.3 Syöttövesipumpun tehon kulutus osakuorma-ajossa

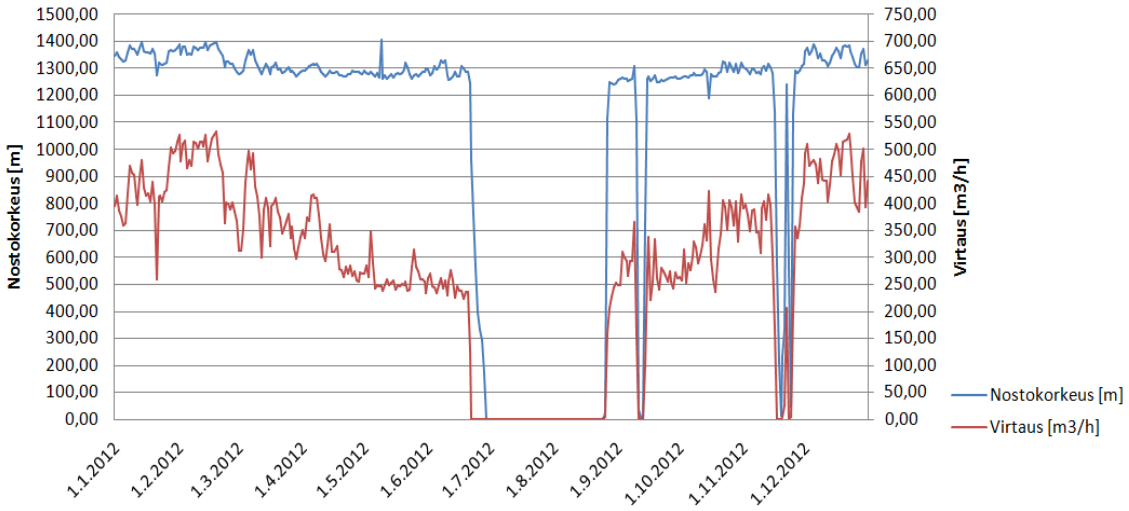
Suurimmat yksittäiset omakäyttötehon kuluttajat laitoksella ovat syöttövesipumput. Syöttövesipumppuja on 2 kpl ja molemmat ovat mitoitettu 100 % suurimman jatkuvan höyrykuorman mukaan. Koska toinen pumppu on kerrallaan ajossa ja toinen varalla, käsitellään tämän kappaleen tarkastelussa syöttövesipumppuja yhtenä pumppuna. Kuvassa 52 on esitetty syve-pumpun omakäyttösähkön kulutus verrattuna kattilan tuorehöyrykuormaan.



Kuva 52. Höyrykuorma ja syöttövesipumpun sähkön kulutus 2012.

Kuvaajan mukaan syöttövesipumpun sähkön kulutus ei enää laske höyryntuotantokäyrän mukaisesti alle 80 kg/s kuormilla juuri lainkaan, vaan jää tasolle 1700 kW. Syöttövesipumpun kierrosluku on taajuusmuuttajasäädetty ja kierrosluku määräytyy kattilan lieriön pinnansäätöventtiilille annetusta paine-erosta, pumpattavasta vesimäärästä ja lieriön paineesta.

Kuvassa 53 on esitetty syöttövesipumpun tuottama nostokorkeus eli paine-ero sekä syöttöveden virtaus ennen pinnansäädön venttiiliryhmää. Kuvaajassa nostokorkeus on esitetty metreinä ja virtaus yksikössä m^3/h valmistajan pumppukäyrän tarkastelua varten.



Kuva 53.Syöttövesipumpun nostokorkeus ja syöttöveden virtaama.

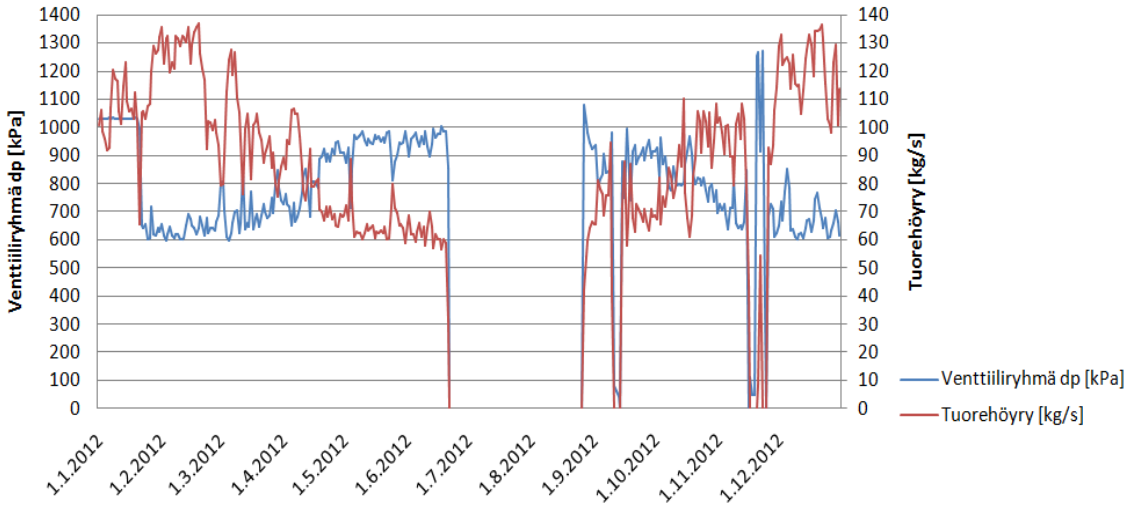
Liitteessä 5 on esitetty valmistajan tekemä ominaiskäyrä syöttövesipumpulle. Syöttövesipumppu on mitoitettu standardin EN12952-7 Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot mukaisesti niin, että mitoituksessa on huomioitu 125 % virtausmarginaali sekä 10 % paineenkorotus. (Parkkonen 2007, 2) Ominaiskäyrästä nähdään, että osakuormalla pumpun hyötysuhde huononee selvästi, jos syöttöveden painetasoa ei samalla lasketa radikaalisti. Kuvan 53 ja ominaiskäyrän avulla voidaan tarkastella pumpun hyötysuhdetta ja tehon kulutusta nostokorkeuden ja virtauksen funktiona vuoden 2012 ajalta. Taulukossa 16 on esitetty kuukausikeskiarvona syöttövesipumpun virtaama, paine-ero sekä pumpun hyötysuhde ja pumppukäyrän mukainen tehon tarve näillä arvoilla.

Taulukko 16. Syöttövesipumpun hyötysuhde ja tehontarve paine-eron ja virtaaman funktiona kuukausittain.

2012	**q_m[kg/s]**	**q_v [m^3/h]**	**Δp [m]**	**η [-]**	**P [kW]**
tammi	109	425	1350	0,77	1900
helmi	121	475	1400	0,81	2100
maalis	102	400	1300	0,76	1700
huhti	83	325	1280	0,66	1500
touko	70	275	1270	0,64	1400
kesä	64	250	1270	0,61	1400
heinä	0	0	0	0	0
elo	0	0	0	0	0
syys	70	275	1260	0,64	1400
loka	83	325	1280	0,66	1500
marras	102	400	1300	0,77	1700
joulu	121	475	1350	0,81	2000

Taulukosta 16 nähdään että käytetyillä lieriön painetasoilla talvikuukausien kuormilla 100 - 120 kg/s pumpun hyötysuhde on alueella 0,77 - 0,81. Alle 90 kg/s virtaamilla pumpun hyötysuhde laskee huonolle alueelle arvoihin 0,61 - 0,71, ollen huonoimmillaan pienimmän virtauksen aikana. Pumppukäyrän arvot tehon tarpeelle eivät vastaa järjestelmästä mitattua todellista kulutettua tehoa kovin hyvin, mutta tehojen suhteista voi nähdä huonon hyötysuhdealueen vaikutuksen korkeampana tehon kulutuksena osakuormilla.

Syöttöveden paine-eroa venttiiliryhmän yli säädetään ohjaamalla joko syöttövesipumpun nopeutta tai syöttöveden säätöventtiiliä. Mittaus lasketaan paine-erosta ennen ja jälkeen venttiiliryhmää. (Foster Wheeler 2009, 1) KauVo:lla on käytetty tällä hetkellä paine-eron säätöön venttiilisäätöä. Kuvassa 54 on esitetty paine-ero venttiiliryhmän yli verrattuna tuotettuun tuorehöyryyn.



Kuva 54. Höyrykuorma ja paine-ero venttiiliryhmän yli.

Kuvasta 54 nähdään, että paine-ero venttiiliryhmän yli on 600 - 700 kPa kun höyryntuotanto on yli 80 kg/s ja nousee arvoihin 800 - 1000 kPa kun höyryntuotanto laskee alle 80 kg/s. Osakuormalla paine-ero venttiiliryhmän yli siis kasvaa kun käytetään venttiilisäätöä. Syöttövesipumpun suhteessa korkeampi tehonkulutus osakuormalla johtuu siis kahdesta asiasta, pumpun hyötysuhteen huononemisesta sekä paine-eron kasvusta venttiiliryhmän yli. Näistä paine-eroon venttiiliryhmän yli voidaan vaikuttaa muuttamatta lieriön ja turbiinille ajettavan tuorehöyryn painetasoa. Siirtymällä pyörimisnopeussäätöön eli pumppusäätöön paine-eron voisi laskea alemmalle tasolle. Tarkastellaan seuraavaksi saavutettua tehon säästöä pumpulta, jos

venttiiliryhmän paine-ero voitaisiin laskea osakuormalla 500 kPa alemmaksi eli arvoihin 300 - 500 kPa.

Osakuorma-ajon suhteessa suuremmat tehon kulutuksen jaksot siis sijoittuvat virtauksille 250 - 350 m^3/h. Jos paine-eroa venttiiliryhmän yli osakuormalla pienennetään 500 kPa:lla, pumpulla tarvittava nostokorkeus laskee noin 50 m. Liitteen 5 pumppukäyrän mukaan tarkasteltuna ero nykyiseen tehon kulutukseen olisi 250 - 350 m^3/h virtauksella noin 80 kW ja pumpun hyötysuhde näyttäisi parantuvan noin 0,5 - 1,0 %. Jos tämän virtausalueen osakuorma-ajoa on vuodessa 5 kk ajan, vuosittainen energiansäästö on silloin:

$$P_{e_{svp}} = 0{,}080\ MW * 150\ d * 24\ h = 288\ MWh$$

Tämä on kuitenkin melko karkea arvio, sillä vaikutusta pumpun hyötysuhteeseen ja tehon kulutukseen on vaikea arvioida pumppukäyrän tehon kulutuksen skaalan ollessa suuri. Itse mahdollista paineenpudotuksen suuruutta pumppusäädölle siirryttäessä on myös hankala arvioida ilman operatiivista kokemusta. Jos pumppusäätö toimisi moitteettomasti, paine-eron voisi laskea vieläkin alemmaksi kuin tässä tarkastellut arvot. Pumppusäätöä tulisi testata ja määrittää kuinka alas säätävän paine-eron arvon voi asettaa ilman häiriöitä kattilan lieriön toiminnassa. Suurin syy syöttövesipumpun korkeammalle tehon kulutukselle osakuorma-ajossa on kuitenkin selvästi pumpun hyötysuhteen huonontuminen.

KauVo:n laitosoperaattoreita haastatellessa heillä ei ollut muistikuvia, milloin pumppusäätöä on viimeksi testattu ja miten se käytännössä vaikuttaisi venttiiliryhmän paine-eron laskemiseen. Prosessinohjausjärjestelmässä ei ole myöskään tiedonkeruuta siitä, onko säädin ollut venttiili- vai pumppusäädöllä joten historiadatan perusteella sitä ei pystytä suoraan päättelemään. Yleisesti operaattorit pitivät venttiilisäätöä kattilan hallinnan vuoksi varmempana, koska KauVo toimii tehtaan säätävänä laitoksena ja osakuorma-ajossa hetkittäinen vaihtelu höyrykuormassa voi olla jopa 20 - 30 kg/s. Tällaisissa kuorman heitoissa pumppusäätö ei välttämättä ehtisi mukaan lieriön pinnan vaihteluun.

8.4 Energiansäästöt yhteensä vuodessa

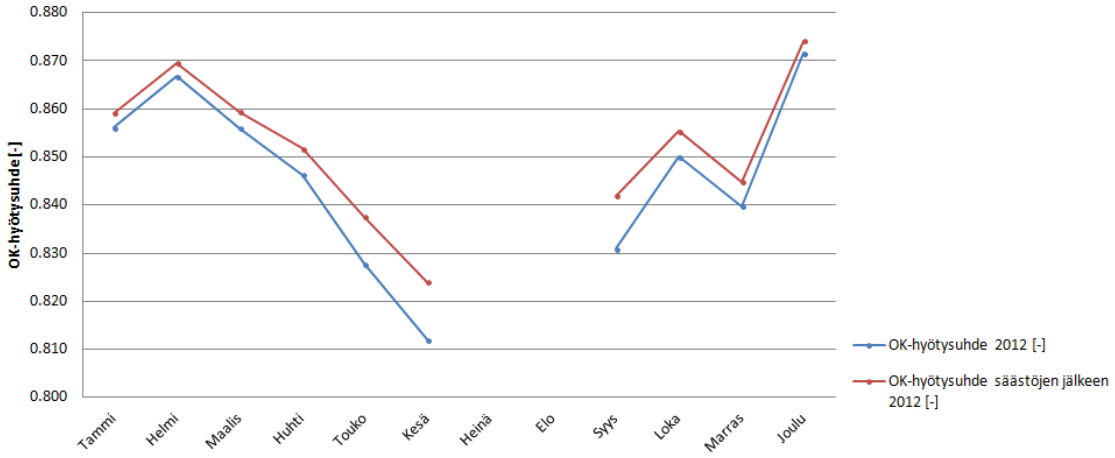
Tarkastellaan seuraavaksi työssä käsiteltyjen energiansäästökohteiden potentiaalista kokonaisenergiansäästöä vuodessa ja energiansäästön vaikutusta voimalaitoksen omakäyttöhyötysuhteeseen. Taulukossa 17 on esitetty energiansäästökohteet ja niiden potetiaalinen energiansäästö suuruusjärjestyksessä sekä alustavasti tarvittavat toimenpiteet säästön toteuttamiseksi.

Taulukko 17. Energiansäästökohteet vuodessa ja tarvittavat toimenpiteet säästöjen toteuttamiseksi.

Säästökohde	Ajanjakso vuodessa	Energiansäästö vuodessa [MWh/a]	Tarvittavat toimenpiteet
Makrovesipumppu	koko vuosi	1451	Pumpun ohjauksen muutos
Savukaasulinja	touko - syys	432	Valmis toteutettevaksi ajo-ohjeistuksella
Syöttövesipumppu	huhti - loka	288	Pumppusäätö
KL-kiertopumput (-100 kPa)	koko vuosi	274	Jatkotutkimus LRE:n kanssa
Metsäenergiamurska	koko vuosi	72	Sopimus toimittajien kanssa
Σ		**2517**	

Yhteensä tarkasteltujen kohteiden energiansäästöksi muodostuu 2517 MWh vuodessa. Selvästi merkittävin kohde on makrovesijärjestelmän paineenalennus, joka kattaa yli puolet säästöistä. Kuvassa 55 on esitetty KauVo:n toteutunut omakäyttösähkön kulutus kuukausittain vuonna 2012 ja omakäyttösähkön kulutus, jos yllä tarkastellut säästöt olisi pystytty kyseisenä vuonna toteuttamaan. Kuvassa 56 on puolestaan esitetty vastaava tarkastelu KauVo:n omakäyttöhyötysuhteelle kuukausittain vuonna 2012.

Kuva 55. Toteutunut OK-sähkö 2012 sekä OK-sähkö säästöjen jälkeen.



Kuva 56. Toteutunut OK-hyötysuhde 2012 sekä OK-hyötysuhde säästöjen jälkeen.

Kuvaajissa energiansäästöt koko vuoden kohteilta on jaettu tasan joka kuukaudelle. Todellisuudessa KL-kiertopumppujen suurin energiansäästö syntyy talvikuukausien aikana ja makrovesipumpun suurin energiansäästö taas kevät- ja syyskuukausien aikana. Kuvasta 55 nähdään, että säästöt vastaavat 2,0 - 6,5 %:n vähennystä laitoksen kuukausittaiseen omakäyttösähkön kulutukseen. Kuvan 56 perusteella KauVo:n kuukausittainen omakäyttöhyötysuhde taas paranee 0,3 - 1,2 %.

Sähkön keskiarvohinta pohjoismaiden sähkömarkkinoilla vuosina 2010 - 2012 on ollut 44 €/MWh (Nord Pool Spot 2012.) Vuosittaista euromääräistä säästöä voidaan näin ollen arvoida esimerkiksi käyttämällä sähkön hintana arvoa 40 €/MWh, jolloin vuosittainen säästö:

$$S = 2517\ \frac{MWh}{a} * 40 \frac{€}{MWh} = 100\ 680\ €/a$$

Kohteet eivät käytännössä vaatisi minkäänlaista investointirahaa, vaan uusia ajojärjestelyitä ja säätötapoja.

9 KEHITYSKOHTEET JATKOSSA

Työssä syvemmin tarkasteltujen kohteiden lisäksi tutkittavaa jäi myös tulevaisuutta varten. Seuraavia ajatuksia tulevista kehityskohteista on muodostunut laitosoperaattoreiden haastattelujen sekä laitetoimittajien dokumentaation johdosta.

Yksi tutkimuskohde tulevaisuudessa olisi kattilan savukaasun happipitoisuuden säädön kehittäminen osakuormilla. Savukaasun happisäätö ei tällä hetkellä alle 60 kg/s höyryntuotannon kuormalla säädä happipitoisuutta enää ollenkaan vaan jää ohjelmarajoituksesta arvoon 3 %. Tällöin ajetaan ylimääräistä ilmaa kattilaan. Savukaasun happipitoisuuden kattilalukitusrajan pudotusta 1,0 %:sta 0,5 %:iin voisi tarkastella myös säädön luotettavuuden ja energiansäästöjen kannalta.

Toinen palamisilmajärjestelmään liittyvä tutkimuskohde olisi itse primääri-ilmapuhaltimet. Tällä hetkellä puhaltimien tuottoa ohjataan pelkästään imupuolen johtosiipisäleiköllä, joka ei ole energiatehokkuuden kannalta optimaalinen säätötapa. Puhaltimien tuotto määräytyy minimikuorma-ajossa minimileijutusilman tarpeen mukaisesti. Puhaltimista tulisi selvittää, kuinka suuren energiansäästön taajuusmuuttajien asentamisella saavutettaisiin verrattuna niiden investointikustannukseen.

Prosessinohjausjärjestelmässä ilmeni myös puutteita. Joitakin mittauspositioita ei ole kytketty mukaan historiatiedon keruuseen vaikka mittaukset on asennettu ohjelmaan, joten laitteiden käyntiarvojen analysointia on mahdoton tehdä. Näitä olivat esimerkiksi joidenkin suurten taajuusmuuttajakäyttöisten sähkömoottoreiden pätötehon, pyörimisnopeuden, virran ja momentin mittaukset. Moottoreiden

kuormituksen mittaus on ohjausjärjestelmässä ilmoitettu prosentteina nimellisarvosta, mutta varmuutta ei myöskään ole onko kaikkien moottoreiden nimellistiedot syötetty ohjelmaan oikein. Jotkut kuormitustiedonkeruut laitteiden sähkömoottoreista eivät myöskään ole toiminnassa lainkaan ja jotkut taas näyttävät todennäköisesti väärin.

Lisäksi operaattorit kaipasivat ohjelmaan ominaisuutta, jonka avulla tietyn keskeisen ajoparametrin muutos voidaan kirjata ja merkata näkyvästi ylös ohjelmakuvaan. Jokaisen vuoron operaattori voi näin ollen tarkastaa operointinsa aikana merkatun ajoparametrin tarkoituksen ja tämä auttaa selkeyttämään laitoksen energiatehokkuuden kannalta optimaalista ajotapaa eri vuorojen välillä.

Tehtaalle tuontipolttoaineena tulevien polttoainekuormien laadun valvonnan tehostaminen vähentäisi epäkurantin polttoaineen, kuten huonolaatuisen biopolttoaineen tai palamattomien materiaalien kulkeutumista kattilaan. Mitä parempana ja tasaisempana kattilaan syötettävän polttoaineen laatu pystytään pitämään, sitä parempi käytettävyys kattilan toiminnalle voidaan pitkällä aikavälillä taata.

10 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli Kaukaan Voima:n CHP-biovoimalaitoksen energiatehokkuuden parantaminen ja osakuorma-ajojen optimointi. KauVo tuottaa kaukolämpöä ja sähköä Lappeenrannan kaupungille sekä prosessihöyryä ja sähköä UPM:n Kaukaan tehtaille. Työssä tarkasteltiin laitoksen hyötysuhdetta sekä apulaitteiden ja -järjestelmien omakäyttösähkön kulutusta peilattuna vuosittaiseen ajokuormaan. Koska KauVo:n päätuote on lämpöenergia, joudutaan laitoksella noin 2 kk kesäseisokin lisäksi ajamaan jopa 5 kk ajan vuodessa osa- ja minimikuormaa, kun kaukolämmöntarve Lappeenrannan Energialle on pientä sekä UPM:n Kaukaan tehtaat tarvitsevat vähemmän prosessihöyryä. Osakuorma- ja minimikuorma-ajossa kattilan höyryntuotanto on 35 - 60 % mitoitustehosta.

Sähkö on laitoksen sivutuote, ja osakuorma-ajossa laitoksen omakäyttöhyötysuhde huononee. Työssä selvitettiin mitkä tekijät laitoksen vuosittaiseen höyrykuormaan vaikuttavat ja mitkä laitteet kuluttavat osakuorma-ajossa enemmän höyryntuotantoon verrannollista sähkötehoa kuin suurilla kuormilla. Energiansäästöjen syvemmiksi tutkintakohteiksi nousivat makrovesijärjestelmän paineenalennus, yhden savukaasulinjan ajomalli, syöttövesipumpun tehon kulutus osakuorma-ajossa, metsäenergiamurskaimen käyntiajan tehostaminen sekä lähtevän kaukolämpöveden paineenalennus. Kattilalle toimitettavien polttoainejakeiden määrän ja laadun mittausta tutkittiin yhden oman tehtaan polttoainejakeen koeajoilla ja kosteusanalyyseillä.

Tutkituista kohteista suurimmat energiansäästöpotentiaalit omaavat makrovesijärjestelmän paineenalennus sekä yhden savukaasulinjan ajomalli ovat valmiita toteutettaviksi. Yhden savukaasulinjan ajomalli on valmis toteutettavaksi pelkällä ajo-ohjeistuksella ja se tullaan todennäköisesti ottamaan käyttöön keväällä 2014. Makrovesipumpun ohjauksen muutosta ja makrovesijärjestelmän

paineenalennusta aletaan tekemään vuoden 2014 alussa. Metsäenergiamurskan päivittäisellä pysäyttämisellä saavutettava energiansäästö ei näytä olevan riittävän suuri murskan käyttövarmuuden ja kuljetusten sujuvuuden kannalta, jotta se kannattaisi toteuttaa. Lähtevän kaukolämpöveden paineenalennuksen mahdollisuus vaatii lisätutkimusta. Syöttövesipumpun ajossa paine-eron pienentäminen ja mahdollisesti pumppusäädölle siirtyminen ja säädön toiminta vaatii myös käytännön testausta.

Yhteensä tutkituilla säästökohteilla on mahdollista saada aikaan vuosittain noin 2520 MWh:n sähköenergian säästö joka tarkoittaa keskimäärin 3,7 % vähennystä laitoksen kuukausittaiseen omakäyttösähkön kulutukseen. Omakäyttösähkön vähennys parantaa laitoksen kuukausittaista omakäyttöhyötysuhdetta keskimäärin 0,6 %. Tutkitut säästökohteet eivät käytännössä vaadi minkäänlaisia investointeja. Jatkotutkimuskohteina jäävät mielenkiintoisiksi primääri-ilmapuhaltimien säätötapa sekä savukaasujen happipitoisuuden säädön kehittäminen. Myös polttoainehuoltoa eli polttoaineen määrän, alkuperän ja laadun varmistamista voi tulevaisuudessa pitää tärkeänä laitoksen käyttöasteen pitämisessä mahdollisimman hyvänä.

Oman haasteensa voimalaitoksen energiatehokkuuden optimoinnille aiheuttaa KauVo:n luonne Kaukaan tehtaan säätävänä laitoksena. KauVo:lta on oltava tarjottavissa pikaisesti lämmityshöyryä tehtaalle, mikäli tehtaan omassa höyryn tuotannossa on ongelmia tai höyryntarve muuttuu äkillisesti. Tehtaalle toimitettava höyryteho voi vaihdella päivän aikana kymmeniä megawatteja tehtaan höyrynkulutuksen ja -tarpeen mukana.

Laitoksen ohjauksessa ja valvonnassa haasteita asettaa myös operointijärjestely, jossa KauVo:n biovoimalaitosta ohjaavalla operaattorilla on ohjattavanaan myös UPM:n Kaukaan tehtaiden kaustisointilaitos, meesauuni sekä tehtaiden jätevesien käsittely. Höyryn tuotannon ja laitoksen optimaalisen ohjauksen hallinta vaatii varsinkin osa- ja minimikuormalla tehokasta valvontaa ja tarvittaessa prosessiarvojen säätämistä käsin. Kaustisointilaitoksen säätäminen ja häiriötilanteet vievät operaattorin valvonta- ja ohjausaikaa.

LÄHTEET

ABB Automation Group Ltd. 2001. Sähkökäytön mitoitus. Tekninen opas nro 7. 39 sivua. 3BFE64444841 R0105.

Alakangas Eija. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia.VTT Energia. 196 sivua. ISBN 951-38-5699-2

Bastman Tapani. 2007. Biovoimalaitoksen esisuunnittelu. Sweco PIC. 36 sivua.

Blom Marika, UPM. Keskustelu UPM Kaukaan sellutehtaan konttorissa 20.9.2013.

Huhtinen Markku; Kettunen Arto; Nurminen Pasi; Pakkanen Heikki. 2000. Helsinki. Höyrykattilatekniikka. 379 sivua. ISBN 951-37-3360-2

Huhtinen Markku; Korhonen Risto; Pimiä, Tuomo; Urpalainen Samu. 2008. Keuruu. Voimalaitostekniikka. 342 sivua. ISBN 978-952-13-3476-4

Iivanainen Antero, Itkonen Ahti, Mikkonen Viljo. 2007. Kaukaan Voima Oy:n ympäristölupapäätös. Itä-Suomen Ympäristölupavirasto. 38 sivua.

Kuiri Jyri. 2008. Yleiskuvaus voimalaitos. KauVo-projekti. ÅF-Consult. 10 sivua.

Kuiri Jyri. 2008. Prosessiseolstus kaukolämpöjärjestelmä. KauVo-projekti. ÅF-Consult. 16 sivua.

Kärhä Kalle, Mutikainen Arto, Hautala Antti. 2011. Saalasti Murska 1224 HF käyttöpaikkamurskauksessa, tuloskalvosarja. Metsäteho Oy. 61 sivua.

Laitinen Erkka, UPM. Haastattelu Kaukaan sellutehtaalla 12.6.2013.

Lappeenrannan Energia. 2013. [Internet-sivut] Viitattu: 13.6.2013 Saatavilla: http://www.lappeenrannanenergia.fi/index.php

Lappeenrannan Energia. 2008. Tuotanto. Kaukolämpöverkon ajotapa 2010. 9 sivua.

Larjola Jaakko. Punnonen Pekka. 2009. BH40A0300 Energianmuuntoprosessit. Tekninen raportti LFD 2/2009. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. 212 sivua.

Larjola Jaakko. Punnonen Pekka. 2008. BH40A0200 Pumput, puhaltimet ja kompressorit. Tekninen raportti LFD 4/2008. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. 100 sivua.

Nord Pool Spot. 2012. Elspot prices, yearly. [Internet-sivut] Viitattu: 27.11.2013 Saatavilla: http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/ALL1/Hourly/

Nummikoski Pekka, Lappeenrannan Energia. Keskustelu Mertaniemen voimalaitoksella 12.9.2013.

Ohmart Vega. 2009. Radiation-based weigh systems for conveyors. W4800. 8 sivua.

Parkkonen Riku. 2007. Kattilan käyttö- ja huolto-ohjeet. KauVo-projekti järjestelmäkuvaus. Foster Wheeler Energia Oy. 32 sivua.

Pohjolan Voima. 2010. Kaukaan Voiman voimalaitos. Voimalaitoksen esite. 2 sivua.

Pohjolan Voima. 2012. [Internet-sivut] Viitattu: 13.6.2013 Saatavilla: http://www.pohjolanvoima.fi/

Saalasti Oy. 2009. Käyttö- ja huolto-ohje Saalasti Murska 1224 HF. 23 sivua.

Vakkilainen Esa. 2010. Leijukerroskattilat. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto.Kurssimateriaalit: BH50A0800 Höyrykattilatekniikka. 29 sivua.

Väkeväinen Siru, UPM. Palaveri Kaukaan Sahan konttorissa 7.6.2013.

Väliaho Kimmo. 2009. Syve venttiiliryhmä paine-ero toimintakuvaus. Foster Wheeler. 2 sivua.

Äikää Timo, UPM. Keskustelu Kaukaan Sellutehtaan konttorissa 18.7.2013.

Liite 1. Sahan kuorimäärätestin tulokset ja kuorimäärän laskenta.

UPM-Kymmene Oyj, Kaukas

Lähtöpaikka jätelajeittain eriteltynä / JÄTE

24.06.2013 - 30.06.2013 (molemmat suunnat)

Kosteus mukana

				Kuormien lkm	Kulvapaino (kg)	Paino(kg)
Saha		114555000		29	451960	451960
Kuorijäte Sahalta		**03030**		**18**	**405900**	**405900**
24.06.2013 12:19:05	KH2	278486	278486		23840	23840 tu
25.06.2013 12:24:49	KH1	278540	278540		26040	26040 tu
25.06.2013 13:08:32	KH1	278542	278542		24000	24000 tu
26.06.2013 7:20:02	KH1	278589	278589		22980	22980 tu
26.06.2013 7:32:56	KH5	278590	278590		21700	21700 tu
26.06.2013 7:56:28	KH1	278591	278591		24560	24560 tu
26.06.2013 8:10:54	KH5	278593	278593		22480	22480 tu
26.06.2013 10:37:50	KH5	278602	278602		25280	25280 tu
26.06.2013 14:34:56	KH1	278617	278617		22020	22020 tu
26.06.2013 19:44:36	KH1	278646	278646		25740	25740 tu
26.06.2013 19:50:20	KH4	278648	278648		16280	16280 lä
26.06.2013 20:15:45	KH1	278650	278650		27960	27960 tu
27.06.2013 16:43:24	KH5	278741	278741		20220	20220 tu
27.06.2013 17:13:35	KH5	278745	278745		23440	23440 tu
27.06.2013 17:58:08	KH5	278748	278748		22040	22040 tu
28.06.2013 3:30:06	KH5	278765	278765		23900	23900 tu
28.06.2013 16:01:52	KH4	278835	278835		14920	14920 lä
30.06.2013 23:57:51	KH5	278961	278961		18500	18500 tu
Kutteripuru Sahalta auto		**030304**		**3**	**37240**	**37240**
27.06.2013 15:43:19	KH2	278735	278735		13200	13200 tu
27.06.2013 16:30:17	KH2	278740	278740		11780	11780 tu
27.06.2013 17:01:20	KH2	278742	278742		12260	12260 tu
Muu puujäte ei kulu		**0303012**		**8**	**8820**	**8820**
24.06.2013 12:48:24	YES704	278488	278488		640	640 tu
24.06.2013 13:56:28	YES704	278492	278492		760	760 tu
24.06.2013 14:47:56	YES704	278493	278493		1960	1960 tu
25.06.2013 13:32:38	YES704	278538	278538		1160	1160 tu
26.06.2013 13:22:02	YES704	278604	278604		960	960 tu
27.06.2013 12:47:17	YES704	278717	278717		760	760 tu
27.06.2013 14:36:31	YES704	278726	278726		2100	2100 tu
28.06.2013 14:28:36	YES704	278821	278821		480	480 tu
Yhteensä:				**29**	**451960**	**451960**

KA – Prosentti sahan kuori

Ma 48,58 %
Ti 37,39 %
Ke 42,72 %
To 38,40 %
Pe 38,33 %

Kutteri kiinteä ~ 83 % tms.

Käytetty sahan kuorelle 19,69 m³/kg

02.07.2013 9:24:07 Page 1 of 1

Laskennallisen kuoriprosentin 6,0 % mukaan kuorta olisi pitänyt syntyä:

$$20\,868\,m^3 * 0{,}60 = 1252{,}08\,m^3$$

Kuormien yhteispainoksi järjestelmään kirjautui 405 900 kg. Tämä muutetaan kuutiometreiksi käyttämällä kuoren tiheydelle aikaisemmin käytössä ollutta arvoa 350 kg/m^3:

$$405\,900\,kg * 350\frac{kg}{m^3} = 1159{,}71\,m^3$$

Syntyneen kuoren osuus prosentteina sahattujen tukkikuutioiden määrästä saadaan näin ollen selville jakamalla syntynyt kuoren kuutiomäärä sahattujen tukkikuutioiden määrällä:

$$\frac{1159{,}71m^3}{20\,868\,m^3} = 0{,}0556 = 5{,}56\,\%$$

Tuloksesta nähdään, että syntynyt todellinen kuoriprosentti on 0,44 % pienempi kuin laskennallinen prosentti. Kyseisellä viikolla tehtiin kuoresta kosteusanalyysit normaalin toimintatavan mukaisesti kerran päivässä. Keskimääräiseksi kosteuspitoisuudeksi saatin 58,92 %. Sahan kuorelle kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona on käytetty arvoa 19,69 MJ/kg. Yhtälöstä X saadaan näin ollen laskettua tehollinen lämpöarvo saapumistilassa:

$$Q_{net,ar} = 19{,}69\,\frac{MJ}{kg} * \frac{100 - 58.92}{100} - 0{,}02441 * 58.92 = 6{,}65\,\frac{MJ}{kg}$$

Testiviikon aikana syntynyt polttoaineen laskennallinen lämpömäärä on siis:

$$1252{,}08\,m^3 * 350\,\frac{kg}{m^3} * \frac{6{,}65\,\frac{MJ}{kg}}{3{,}6} = 809663\,kWh = 810\,MWh$$

Ja todellisuudessa syntynyt:

$$1159{,}71\,m^3 * 350\,\frac{kg}{m^3} * \frac{6{,}65\,\frac{MJ}{kg}}{3{,}6} = 749934\,kWh = 750\,MWh$$

Erotus laskennallinen - todellinen testiviikon aikana:

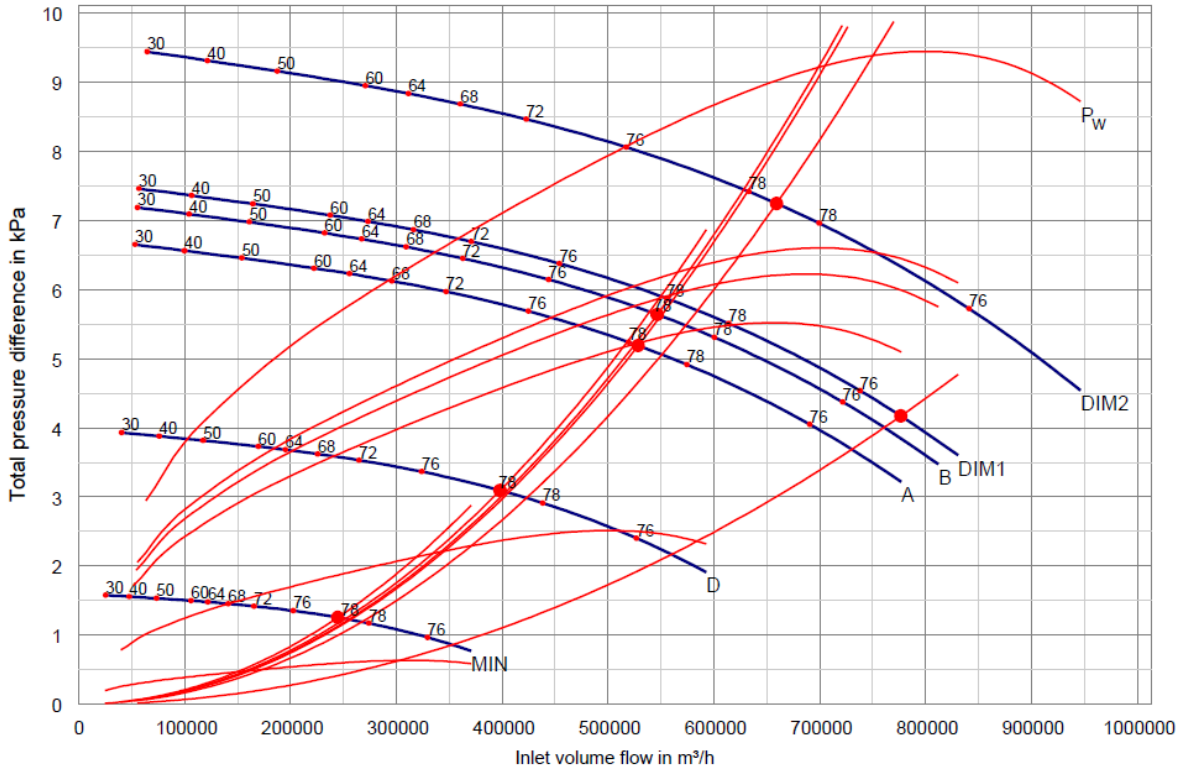
$$810\ MWh - 750\ MWh = 60\ MWh$$

Todellisen syntyneen kuorimäärän energiasisältö on 60 MWh pienempi kuin laskennallisesti käytetyllä.

Liite 2. Savukaasupuhaltimen ominaiskäyrä.

Fan characteristic curve

Fan with speed control



Type
DHRV 50-1800/K

Customer
Foster Wheeler

Remarks
ID-Fan, Rev.7

Job Number
UPM-Kymmene,Kaukas

Person responsible
KOW

Date
18.10.07

Operating point		DIM2	DIM1	A	MIN	B	D	
Volume flow, fan inlet	V_E	659.241	776.676	528.466	244.813	546.563	398.049	m³/h
Total pressure increase (E - A)	Δp_t	7.244	4.171	5.188	1.255	5.638	3.094	Pa
Speed of rotation	n_v	993	871	815	389	852	622	1/min
Drive power, fan shaft input	P_W	1.654,49	1.182,00	957,73	109,02	1.075,00	433,69	kW
Density (at fan inlet)	ρ_E	0,725	0,749	0,765	0,812	0,755	0,784	kg/m³

10022782-11120730-0003

Liite 3. Makrovesipumppu 6:n ominaiskäyrä.

AHLSTAR™ *A_P61-600 (600-600-700)*
Speed Curve K14358

SULZER

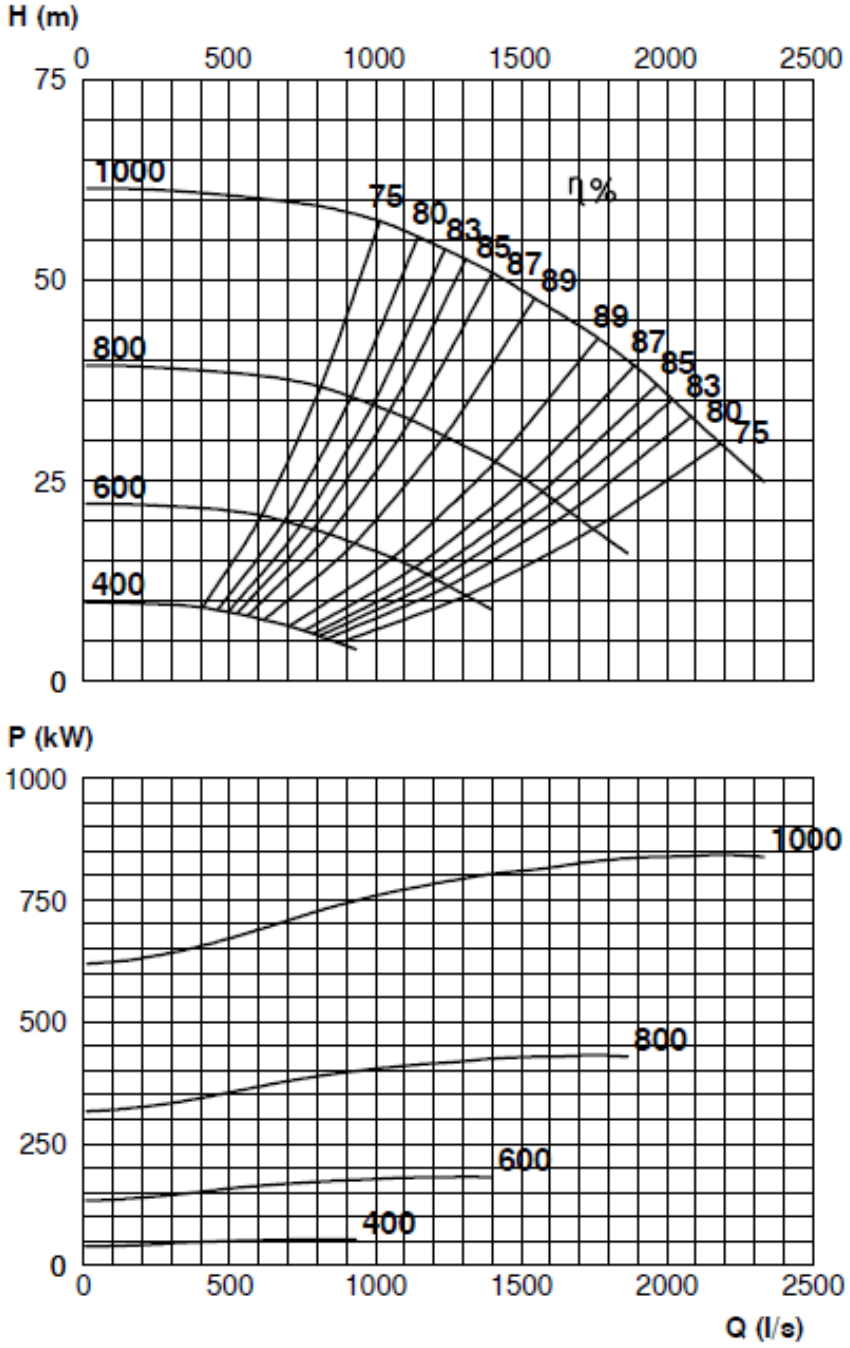
COPYRIGHT © SULZER PUMPS FINLAND OY

Version 01 > / 990115 / **K14358**

APP: Impeller 286875 OPEN B133 Z6

ARP: Impeller 287350 OPEN B133 Z6, Please add the power demand of the degassing unit

400 ... 1000 rpm



IMPELLER DIA	
(mm)	deg
700	15

Liite 4. KL-kiertopumpun ominaskäyrä.

SULZER

AHLSTAR^{UP} *A43-250 (300-250-315)*

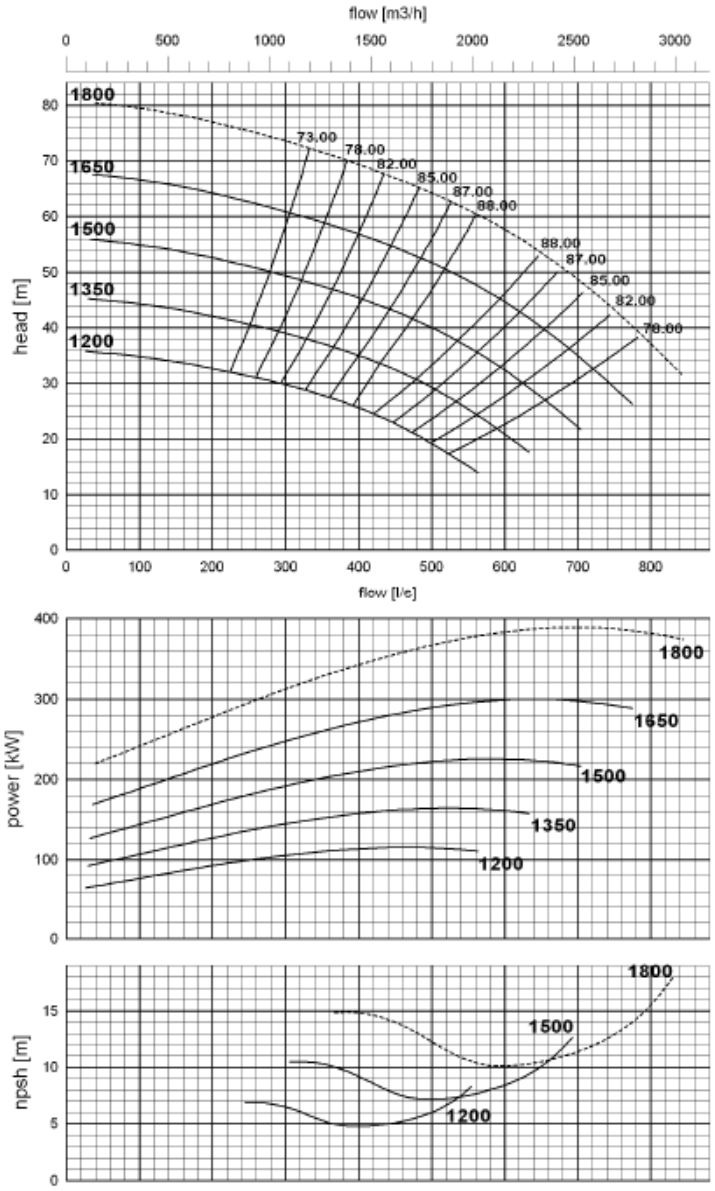
Speed Curve K53386

COPYRIGHT © SULZER PUMPS FINLAND OY

Version 13 > / 20060501 / **K53386** / 1.0

Impeller type: Open1 / 920519 B84 Z6

Variable rotational speed: 1200 ... 1800 rpm

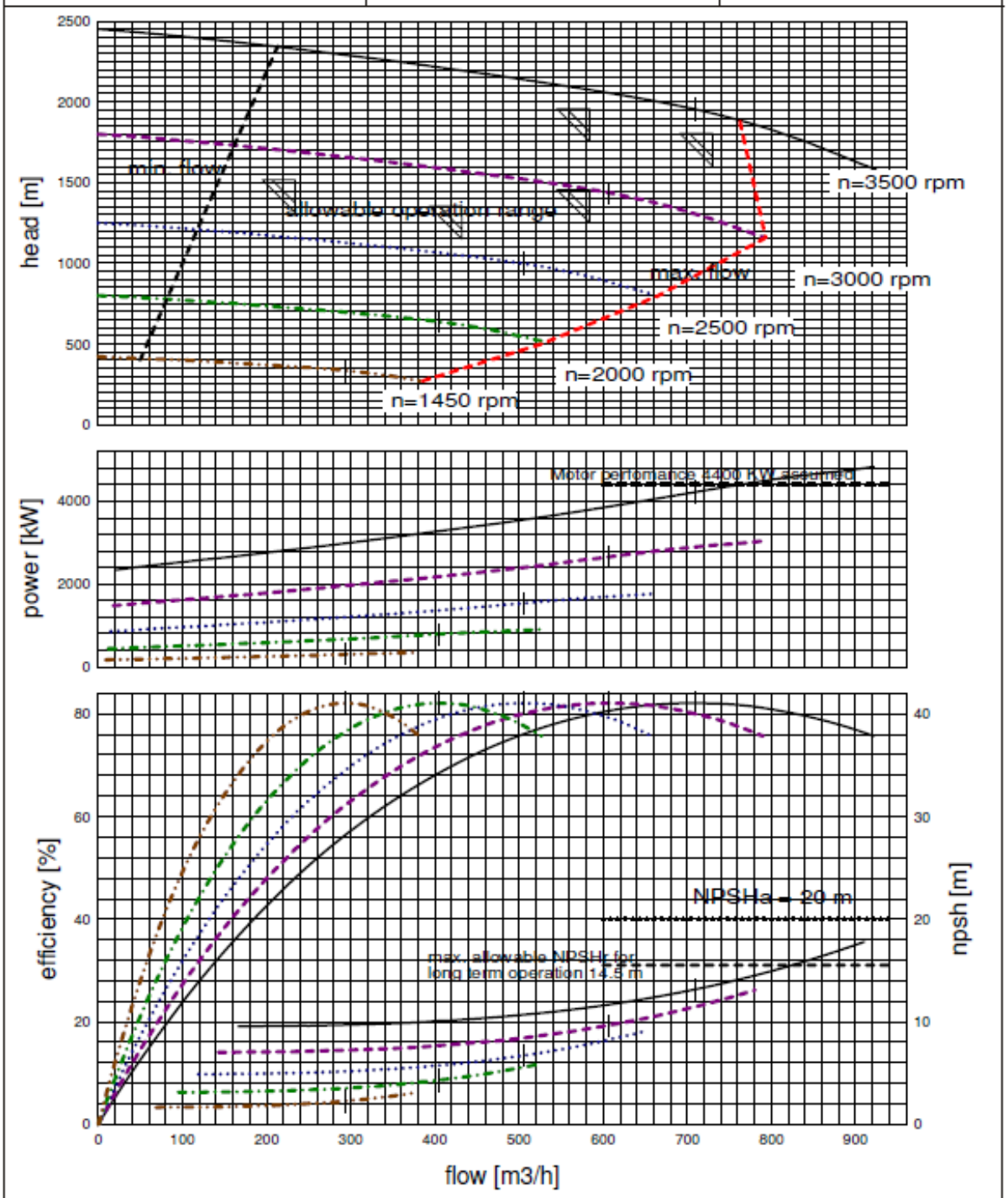


IMPELLER DIA
(mm)
410

COPYRIGHT © SULZER PUMPS FINLAND OY

Liite 5. Syöttövesipumpun ominaiskäyrä.

Pump type and plant: MD 200-400/7		4L039772-001 12/22 SULZER
Pump Medium: Water Density: 918.6 kg/m3 Temperature: 148.00 °C kinem. Viscosity: 0.200 mm2/s	Impeller dia: 385.0mm Stage Number: 7 nq: 22.7 Basis: D 24610	Project: Kauvo Boiler feed pumps SPDE: 103158-100



Revision:	0	1	2	Drwg No: D 24542-1
Name/Date:	26.07.07/R	19.09.07/R		