

Joni Tolonen

Lassilan huippu- ja varalämpökeskuksen energiatehokkuus kaasukäytöllä

Energiatehokkuuden selvitysraportti



ALKULAUSE

Tämä insinöörityö tehtiin Helsingin Energian kaukolämpökeskusten kunnonhallintayksikölle. Haluan kiittää kaikkia projektissa auttaneita ja mukana olleita henkilöitä. Erityisesti haluan kiittää työni ohjaajaa ylikonemestari Pekka Teittistä, joka ideoi insinöörityön sekä auttoi ja opasti sen tekemisessä. Haluan kiittää myös kunnossapitopäällikkö Jukka Örneä, joka mahdollisti insinöörityön tekemisen, prosessiasiantuntijoita Martti Kuoppaa ja Veli-Matti Mähöstä, jotka auttoivat lämpökeskuksen käyttöön liittyvissä asioissa, sekä koko Patolan lämpökeskuksen henkilökuntaa tuesta ja avusta.

Helsingissä 6.3.2012

Joni Tolonen

Tekijä Otsikko	Joni Tolonen Lassilan huippu- ja varalämpökeskuksen energiatehokkuus kaasukäytöllä
Sivumäärä Aika	61 sivua + 10 liitettä 6.3.2012
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaajat	ylikonemestari Pekka Teittinen lehtori Jarmo Perttula
<p>Tämän insinööryön tavoitteena oli tarkastella Lassilan huippu- ja varalämpökeskuksen energiatehokkuutta kattiloiden 3 ja 4 maakaasukäytöllä. Energiatehokkuutta tarkasteltiin hyötysuhteen kautta, missä otettiin kattilahyötysuhteen lisäksi huomioon sähkölaitteiden käyttämät tehot, vesitehosta omakäyttöön menevä osuus sekä savukaasuhäviöt.</p> <p>Teoriaosuudessa kerrotaan aluksi Helsingin Energiasta ja käydään läpi kaukolämmöntuotannon peruseriaatteet. Lassilan kaukolämpökeskus ja sen laitteet esitellään yksityiskohtaisesti ja teoriaosuuden lopuksi käydään läpi kattiloiden hyötysuhdelaskennan kannalta oleelliset teoriat.</p> <p>Hyötysuhdelaskennan teoriatietoihin ja Lassilan lämpökeskukseen tutustuminen oli välttämätöntä työn ymmärtämisen takia. Myös lähtötietojen kerääminen ja laskentataulukoiden luominen olivat tärkeä osa työtä.</p> <p>Työn tuloksena saatiin selville, millä tehoalueilla kattiloiden hyötysuhde on paras, milloin on hyvä käyttää yhtä kattilaa ja milloin on aika käynnistää toinen kattila. Saatiin myös selville, millä polttoaineteholla savukaasuhäviöt rupeavat kasvamaan merkittävästi ja minkä suuruisia sähkötehoja sähkölaitteet kuluttavat.</p> <p>Vaikka insinööryö valmistuukin tämän raportin myötä, tulosten selvittelyä jatketaan vielä. Jatkossa tullaan selvittämään kannattaako automaatioon rakentaa laskentaohjelma kattiloiden energiatehokkaasta käytöstä vai ohjeistetaanko kattiloiden käyttäjiä käyttämään kattiloita energiatehokkaasti.</p>	
Avainsanat	Lassilan huippu- ja varalämpökeskus, energiatehokkuus, maakaasu, hyötysuhde, Helsingin Energia, kaukolämpö

Author Title	Joni Tolonen Lassila Heating Plant's Energy Efficiency On Gas Use
Number of Pages Date	61 pages + 10 appendices 6 March 2012
Degree	Bachelor of Science
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Energy Engineering and Environmental Technology
Instructors	Pekka Teittinen, Chief Engineer Jarmo Perttula, Senior Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's Thesis was to examine the Lassila heating plant's energy efficiency by using boilers 3 and 4 with natural gas. The energy efficiency was examined through the boiler's efficiency, and in addition, attention was paid to the power input of the electrical equipments, the self usage from district heating power and the loss of the flue gas.</p> <p>Firstly, the theoretical part of the thesis first presents Helsingin Energia and the main principles of district heat production. Secondly, the Lassila heating plant and its equipment are presented and finally, the essential theories of boiler efficiency are discussed.</p> <p>At the beginning of this Bachelor's Thesis time was spent to study the boiler efficiency theory and to explore the heating plant. In addition, the initial data from different sources was collected and the spreadsheet and the indexes were created.</p> <p>As the result of this Thesis, it was found out what the most efficient power areas are, and when it is good to use just one boiler and when it is time to start another boiler. Also, it was detected when the loss of the flue gas starts to rise significantly and how big the electrical equipment's input powers are.</p> <p>This project was completed with this Bachelor's Thesis report, but the results of this Thesis will be analyzed in the future, however. In the future it will be clarified, if it is useful to create a program for the automation which uses the boilers energy efficiently, or if the boiler users will be guided to use them energy efficiently.</p>	
Keywords	Lassila heating plant, energy efficiency, natural gas, efficiency, Helsingin Energia, district heating

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Helsingin Energia	2
2.1	Organisaatio	2
2.2	Historia	4
2.3	Nykyhetki	4
2.4	Tulevaisuus	5
3	Kaukolämpö	6
3.1	Perusteet	6
3.1.1	Hyödyt ja haitat	6
3.1.2	Mahdollisuudet ja uhkatekijät	7
3.2	Tuotantotavat	7
3.2.1	Yhteistuotanto	8
3.2.2	Huippu- ja varatuotanto	10
3.3	Jakelujärjestelmä	11
3.4	Kaukolämpö Helsingissä	11
4	Lassilan huippu- ja varalämpökeskus	13
4.1	Lämpökeskuksen esittely ja käyttötarkoitus	13
4.2	Lämpökeskuksen konetekninen laitteisto	14
4.2.1	Kattilat	14
4.2.2	Polttimet	15
4.2.3	Pumput	17
4.2.4	Puhaltimet	19
4.3	Polttoaineet	21
4.3.1	Polttoöljy	21
4.3.2	Maakaasu	22
4.4	Lämpökeskuksen automaatiojärjestelmä	23
4.5	Taajuusmuuntajat	24
4.6	Lämpökeskuksen säädöt	25
4.6.1	Kattilaan palaavan veden säätö	25
4.6.2	Kaukolämpöverkoston lämpötilasäätö	25

5	Hyötysuhteen määrittämisen teoria	26
5.1	Perusteet	26
5.2	Taseraja	29
5.3	Hyötysuhde suoralla menetelmällä	30
5.3.1	Hyödyksi saatu lämpöteho	30
5.3.2	Kattilaan tuotu lämpö- ja sähköteho	30
5.4	Savukaasuhäviö	33
6	Lähtötiedot ja mittaukset	34
6.1	Lähtötietojen hankinta ja lämpökeskukseen tutustuminen	34
6.2	Automaatiojärjestelmän hyödyntäminen	34
6.3	Sähkölaitteiden tehotietojen kerääminen	35
6.4	Mittausten suorittaminen	35
7	Hyötysuhteen määrittäminen laskemalla	36
7.1	Hyödyksi saatu lämpöteho	36
7.2	Kattilaan tuotu lämpöteho	37
7.2.1	Polttoaineteho	38
7.2.2	Palamisilman mukana tuleva energia	39
7.3	Kattilaan tuotu sähköteho	40
7.3.1	Kaukolämpöpumppu	40
7.3.2	Palamisilmapuhaltimet	42
7.3.3	Hajotusilmapuhaltimet	45
7.3.4	Sekoitusvesipumput	46
7.3.5	Lämminilmapuhaltimet	47
7.3.6	Puhaltimien kiertovesipumput	47
7.3.7	Kattilaan tuotu sähköteho yhteensä	48
7.4	Savukaasuhäviö	49
7.5	Kattiloiden hyötysuhteet	50
8	Lopputulokset ja päätelmät	52
8.1	Hyötytehot	52
8.2	Sähkötehot	54
8.3	Savukaasuhäviö	55
8.4	Vesivirran omakäyttöön menevä teho	56
8.5	Kattiloiden hyötysuhde	56
8.6	Optimaalisin ajotapa	57

8.7	Parannuskohteet	57
8.8	Virhetarkastelu	58
9	Yhteenveto	59

	Lähteet	60
--	---------	----

Liitteet

- Liite 1. Helsingin Energian kaukolämpöverkon kartta
- Liite 2. Kattiloiden 3 ja 4 kuvat ja mitoitusarvot
- Liite 3. Kaukolämpöpumppujen mitoitusarvot ja käyrästä
- Liite 4. Palamisilmapuhaltimen mitoitusarvot ja käyrästä
- Liite 5. Hajotusilmapuhaltimen mitoitusarvot ja käyrästä
- Liite 6. Taajuusmuuntajien kootut tiedot
- Liite 7. Esimerkki automaatiosta saatavasta käyrästä
- Liite 8. Kattiloiden 3 ja 4 sähkötehojen Excel-taulukko
- Liite 9. Polttoaineiden tyypillisiä lämpöarvoja
- Liite 10. Öljy- ja kaasupolttoaineiden polton kaasuvirrat

1 Johdanto

Sain tämän insinöörityönaiheen ylikonemestari Pekka Teittiseltä, ja se on tehty Helsingin Energian kaukolämpökeskusten kunnonhallinnan toimeksiantona. Insinöörityön kohteena on Lassilan kaukolämpökeskus, joka rakennettiin vuonna 1977 (kaupalliseen käyttöön 1978) vastaamaan sen aikaista huippu- ja varatehon tarvetta kahdella 120 megawatin öljykattilalla. Kaukolämpökeskusta laajennettiin vuonna 1995 kahdella 50 megawatin kattilalla, jotka kumpikin varustettiin sekä öljyn- että maakaasunpolttolaitteistolla. Kaukolämpökeskus modernisoitiin vuonna 2010, pääasiassa automaation ja sähkön osalta, vastaamaan nykyajan tarpeita. Samalla tuli myös ajankohtaiseksi tarkastella kaukolämpökeskuksen energiatehokkuutta ja varsinkin sen nykyistä hyötysuhdetta kaasukäytöllä.

Insinöörityön tavoitteena on selvittää, minkälaisella hyötysuhteella kaksi pienempää 50 megawatin maakaasukattilaa toimivat ja miten niitä kannattaa käyttää, että ne toimisivat mahdollisimman optimaalisella tavalla. Hyötysuhteen määrittämisessä otetaan huomioon itse kattilatehojen lisäksi suurimmat mahdolliset häviöt, joita ovat sähkölaitteiden kuluttamat sähkötehot ja omakäyttölämmitykseen kuuluva vesiteho. Toisena tavoitteena on tarkastella kaukolämpökeskuksen automaatio-ohjelman muutoksen kannattavuutta kattiloiden hyötysuhteen optimoinnin kautta. Insinöörityön on tarkoitus toimia tulevaisuudessa ohjeena laitosta käyttäville henkilöille.

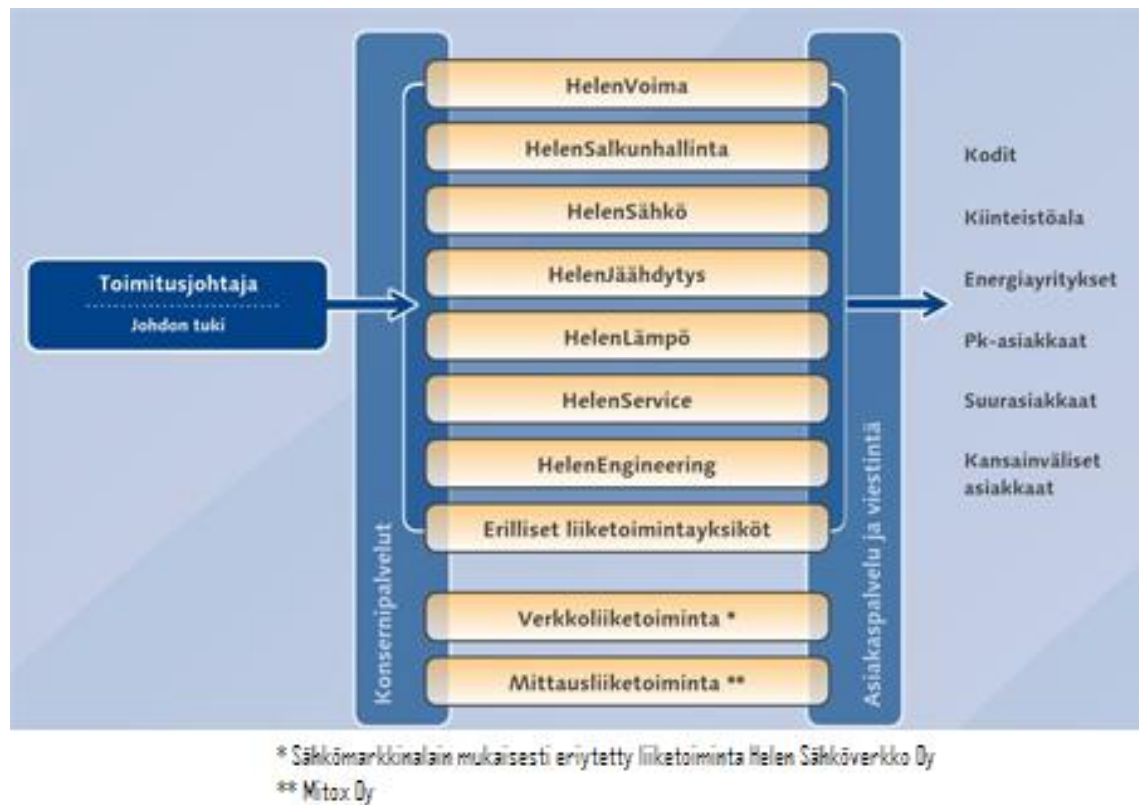
Itse insinöörityössä kerrotaan aluksi hieman Helsingin Energiasta, käydään läpi yrityksen historiaa ja tulevaisuuden suunnitelmia, kerrotaan kaukolämmön perusperiaatteet ja esitellään insinöörityön kohde Lassilan lämpökeskus. Tämän jälkeen kerrotaan hyötysuhdelaskennan kannalta oleelliset teoriat, käydään läpi mittausten suorittaminen ja esitetään laskennan tulokset esimerkkilaskuineen ja taulukoineen. Lopuksi käydään laskennan tulokset läpi, analysoidaan niitä ja tehdään lopputuloksista päätelmät.

2 Helsingin Energia

Kappaleessa käydään läpi yrityksen rakennetta, historiaa, nykyhetkeä ja hieman myös tulevaisuuden näkymiä.

2.1 Organisaatio

Helsingin Energia on liiketoimintaorganisaatio, joka muodostuu seitsemästä pääliiketoiminnosta, viidestä erillisestä liiketoimintayksiköstä ja palvelutoiminnoista (kuva 1). Helsingin Energia on Helsingin kaupungin omistama energiayritys ja yritysmuodoltaan liikelaitos. Helsingin energian toimintaa kehittää ja valvoo Helsingin Energian johtokunta. [1.]



Kuva 1. Helsingin Energian toiminnallinen rakenne [1].

Helen-konserniin kuuluvat lisäksi tytä- ja osakkuusyhtiöt Helen Sähköverkko Oy, Mitox Oy, Suomen Energia-Urakointi Oy (SEU), Vantaan Energia ja Oy Mankala Ab. Helsingin Energialla on lisäksi vähäisiä omistusosuuksia muissa yhtiöissä (kuva 2). [1.]



Kuva 2. Helsingin Energian konsernirakenne [1].

Helsingin Energian organisaatio 1.2.2012, on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Helsingin Energian organisaatio [1].

2.2 Historia

Helsingissä on tuotettu, jaettu ja myyty sähköä aina 1800-luvun lopulta lähtien. Alkuaikojen sähkölaitokset saivat energiaa lukuisista pienistä hiilikäyttöisistä voimalaitoksista, jotka sijaitsivat usein tiheän asutuksen tuntumassa. [2.]

Helsingin kaupungin sähkölaitos perustettiin vuonna 1909, jolloin kaikki kaupungissa toimineet yksityiset sähköyhtiöt hankittiin lyhyessä ajassa kaupungille. Vuodesta 1953 lähtien sähkölaitos on tuottanut sähkön lisäksi myös kaukolämpöä. Vuonna 1977 sähkölaitos yhdistettiin kaupunkikaasua tuottaneen Helsingin kaupungin kaasulaitoksen kanssa. Tällöin laitos sai nimen Helsingin kaupungin energialaitos. Myöhemmin kaupunkikaasun tuotanto on lopetettu. Nykyinen nimi Helsingin Energia otettiin käyttöön vuonna 1995. [3.]

2.3 Nykyhetki

Helsingin Energia on yksi Suomen suurimmista energiayrityksistä, joka myy sähköenergiaa noin 400 000 asiakkaalle ja kattaa kaukolämmöllä yli 90 prosenttia Helsingin lämmöntarpeesta. Helsingin Energian tärkeimmät tuotteet ovat sähkö, kaukolämpö ja kaukojäähdytys. Helsingin Energian avainlukuja on esitetty kuvassa 4. [4.]

Helsingin Energian avainlukuja		
	2010	2009
Liikevaihto, milj. euroa	716	723
Tulos ennen satunnaisia eriä ja tilinpäätössiirtoja milj. euroa	245	247
Taseen loppusumma, milj. euroa	1501	1 490
Investoinnit, milj. euroa	91	71
Henkilökunnan määrä 31.12.	1227	1 262

Kuva 4. Helsingin Energian avainlukuja [4].

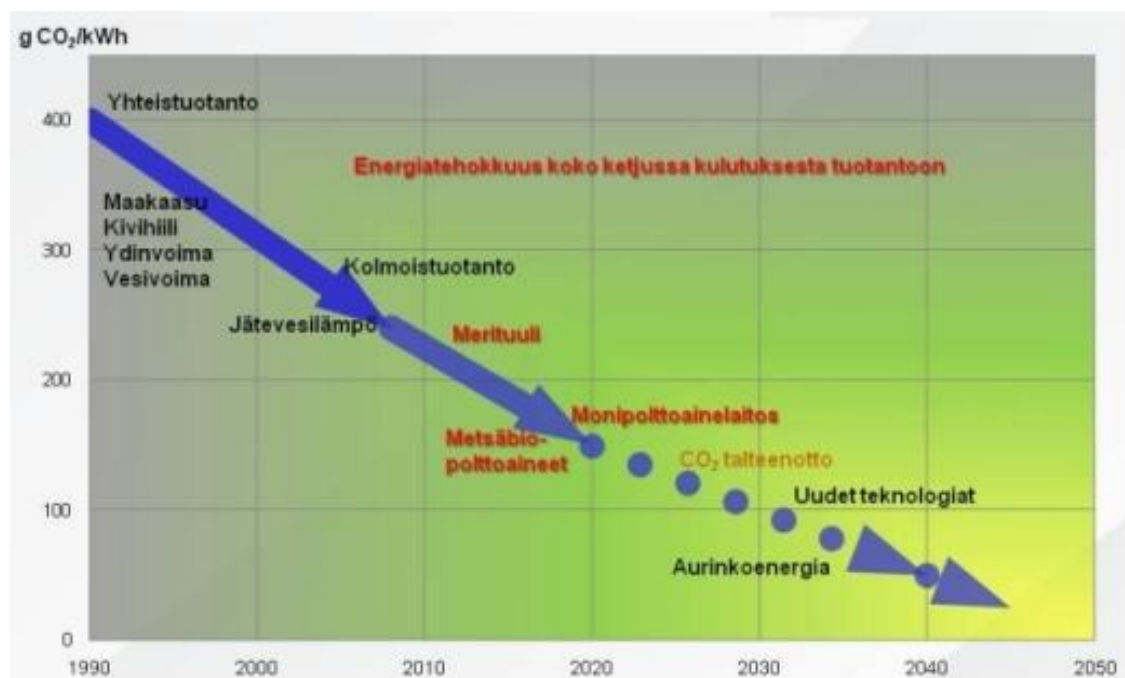
2.4 Tulevaisuus

Helsingin Energia on mukana Östersundomin alueen suunnittelussa ja rakentamisessa. Uusi kaupunginosa tarjoaa Helsingin Energialle mahdollisuuden kokeilla uudenlaisia energiaratkaisuja. Östersundomin kohdalla tutkitaan mahdollisuuksia aurinkoenergian, maalämmön ja biopolttoaineiden käyttöön sekä lämmön varastointiin. [5, s. 3.]

Keskustan liepeillä sijaitsevassa Jätkäsaressa on käynnissä erityinen kehityshanke. Siellä kaukolämpö- ja kaukojäähdytysverkot hyödynnetään maksimaalisesti ja ne integroidaan niin, että ne voivat käyttää toistensa hukkaenergioita. Tällaisia älykkäitä järjestelmiä on ollut jo käytössä tietokonesaleissa ja kaukojäähdytyksessä. [5, s. 3.]

Helsingin Energia on mukana myös Joutsenon biojalostamo hankkeessa sekä Olkiluoto 4:n suunnitteluvaiheessa. Näiden lisäksi Helsingin Energian omistama Suomen Merituuli Oy suunnittelee merituulipuistoja Inkoo-Raaseporissa ja Siipyyssä. [6, s. 4 – 7.]

Nämä kaikki projektit ovat askelia kohti hiilineutraalia tulevaisuutta, jota Helsingin Energia tavoittelee vuoteen 2050 mennessä (kuva 5). [7.]



Kuva 5. Helsingin Energian kehitysaskleet kohti hiilineutraalia tulevaisuutta. Kuviossa esitellään tiedossa olevia teknologioita, jotka voisivat kohti hiilineutraalia tavoitetta. [7.]

3 Kaukolämpö

3.1 Perusteet

Kaukolämmityksen perusideana on tarvittavan lämmön keskitetty tuotanto ja julkinen jakelu asiakkaina oleville kiinteistöille, joissa lämpöä käytetään rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen. Kaukolämmitykselle organisoitu toiminta toteutetaan liiketoiminnan muodossa. [8, s. 25.]

Aluelämmityksellä taas tarkoitetaan yleensä liiketoiminnan ulkopuolelle keskitettyä lämmön tuotantoa ja jakelua yksityiseen tai esimerkiksi tuotantoryhmän osakkaiden omaan käyttöön. Aluelämmityksen ja kaukolämmityksen tuotanto- ja jakeluteknologia voivat olla kuitenkin melko samanlaisia. [8, s. 25.]

Kaukolämmitykselle tyypilliset ominaisuudet ovat seuraavat [8, s. 25]:

- Lämmön tuotanto on keskitettyä (tuotetaan yhdessä tai useammassa kohteessa) ja sitä siirretään kaukolämpöputkiston välityksellä asiakkaille.
- Siirtoaineena käytetään vettä tai höyryä.
- Asiakkaina ovat niin asuintalot (kerrostalot, pientalot), liikerakennukset, julkiset rakennukset kuin teollisuuskin.
- Lämpöä asiakkaat käyttävät rakennuksen tilojen ja käyttöveden lämmitykseen.

3.1.1 Hyödyt ja haitat

Kaukolämmityksen hyödyt ovat [8, s. 25]

- energiatehokkuus ja ympäristöystävällisyys
- mahdollisuus jakaa tuotanto tehokkaasti eri tuotantomuotojen kesken
- yhteisesti hyödynnettävissä oleva varakapasiteetti
- käyttövarmuus
- ei asiakaskohtaista käyttö- ja huoltotyötä → helppokäyttöisyys.

Kaukolämmityksen haitat ovat [8, s. 25]

- suuret investointikustannukset, pitkät takaisinmaksuajat
- vuodenaikojen välillä suuret kulutusvaihtelut
- soveltumattomuus käytännössä harvaan asutuille alueille
- lämmönsiirtohäviö.

3.1.2 Mahdollisuudet ja uhkatekijät

Kaukolämmityksen mahdollisuudet ovat [8, s. 25]

- halvat ja puhtaammat polttoaineet
- sähköntuotannon hyöty yhteistuotannosta
- prosessien jätelämpölähteiden käytön mahdollisuus
- kaukojäähdytys
- matalalämpöisen lämmön hyötykäyttö (mm. sulanapito).

Kaukolämmitykset uhkatekijät ovat [8, s. 25]

- kalleus ja rahoituksen puute
- epäterve kilpailutilanne
- epäterve sääntely
- lämmitysratkaisua ei valitse käyttäjä vaan rakennuttaja.

3.2 Tuotantotavat

Kaukolämmön tehontarve riippuu hyvin voimakkaasti vuodenajasta. Kun kyseessä on keskitetty järjestelmä, on hankinta yleensä edullisinta jakaa eri tuotantomuotojen kesken, jolloin saavutetaan taloudellisesti edullisin lopputulos. Suuremmissa järjestelmissä kannattaa perus- ja huipputeho yleensä tuottaa erillisillä yksiköillä. Tämän lisäksi pitää ottaa huomioon varateho, jota käytetään huoltojen ja yllättävien seisokkien aikana. [8, s. 259.]

Perustehona toimivat parhaiten yhteistuotantolaitokset, jotka tuottavat sekä sähköä että lämpöä. Näiden laitosten kokonaishyötysuhde on varsin korkea, jopa 90 %. Rakennussuhdekin on luokkaa 0,5, mikä on kaksinkertainen teollisuusvoimalaitokseen verrattuna. Yhteistuotanto soveltuu parhaiten tiheästi asutuille alueille. [8, s. 300.]

Tuotantolaitosten soveltuvuus eri tilanteisiin selviää taulukosta 1.

Taulukko 1. Lämmön tuotantolaitosten soveltuvuus [8, s. 259].

Tehoryhmä	Vaaditut ominaisuudet	Tyypilliset laitokset
Perusteho	<ul style="list-style-type: none"> • Jatkuva käyttö • Edulliset käyttökustannukset • Hyvä käytettävyys 	<ul style="list-style-type: none"> • Yhteistuotantolaitokset • Kiinteän polttoaineen kattilat
Keskiteho	<ul style="list-style-type: none"> • Lähes jatkuva käyttö • Taloudellinen myös osateholla • Edullinen hinta tehoa kohti 	<ul style="list-style-type: none"> • Kiinteän polttoaineen kattilat • Maakaasukattilat
Huipputeho	<ul style="list-style-type: none"> • Edullinen hinta tehoa kohti • Nopea ja helppo käynnistys 	<ul style="list-style-type: none"> • Öljykattilat • Maakaasukattilat
Varateho	<ul style="list-style-type: none"> • Edullinen hinta tehoa kohti • Nopea ja helppo käynnistys 	<ul style="list-style-type: none"> • Öljykattilat • Maakaasukattilat

3.2.1 Yhteistuotanto

Voimalaitoksella tarkoitetaan joko sähköä tai sähköä ja lämpöä (tai höyryä) tuottavaa laitosta. Erilaisia voimalaitostyyppisiä ovat [8 s. 47]

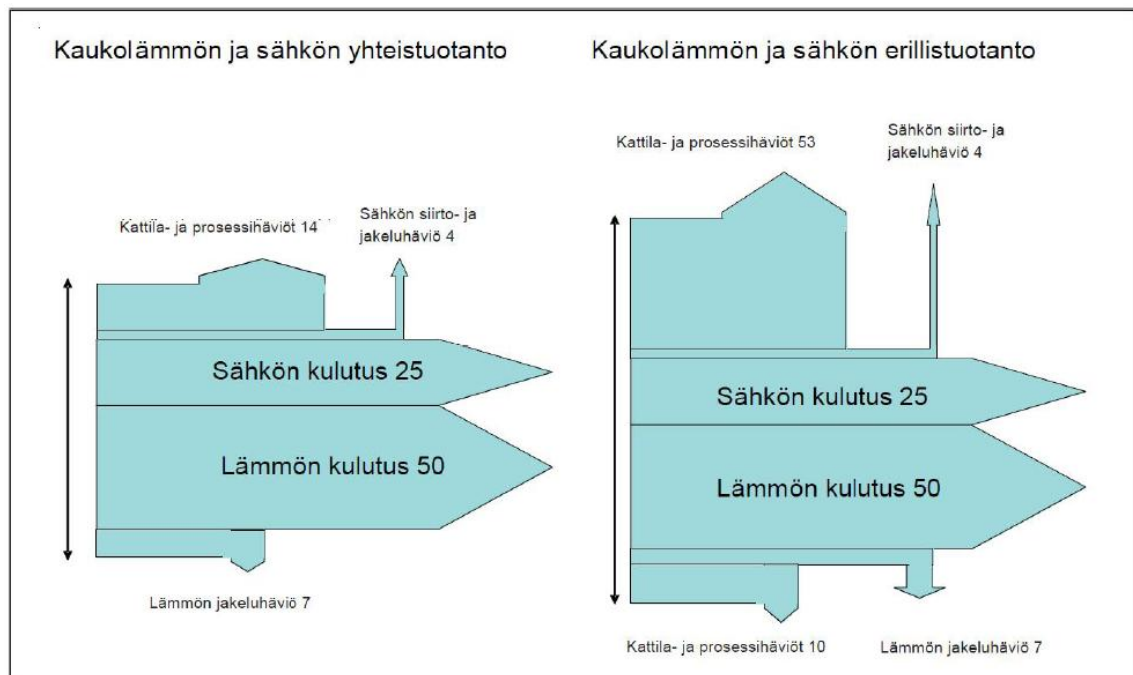
- höyryvoimalaitos (vastapaine- tai väliottolauhduuslaitos)
- kaasuturbiinilaitos
- kombivoimalaitos (yhdistetty höyry- ja kaasuturbiiniprosessilaitos)
- moottorivoimalaitos (diesel- tai kaasumoottorilaitos).

Höyryvoimalaitokset voivat olla lauhdutus- tai vastapainevoimalaitoksia. Lauhdutusvoimalaitoksella tuotetaan pelkästään sähköä. Lauhduttimella jäähdytetään osa kattilassa kehitetyn höyryn energiasta, ja jäähdytysvedet johdetaan vesistöön. Jos alueella on

vedestä pulaa, voidaan rakentaa jäähdytystorneja, mitkä siirtävät lämmön ilmaan. Lauhdutusvoimalaitoksessa on höyryturbiinin välioton kautta mahdollista saada lämpöä kaukolämpöprosessin käyttöön. [8, s. 47.]

Vastapainevoimalaitos tuottaa sähköä ja lämpöä tai höyryä. Prosessissa höyry johdetaan höyryturbiinin loppupäästä kaukolämmönsiirtimeen tai höyryn käyttäjille toimitetaan väliotosta suoraan otettu höyry. [8, s. 47.]

Lämpöä ja sähköä yhdessä tuottavat laitokset ovat yleistymässä monissa maissa, niiden energiataloudellisuuden ja ympäristöystävällisyyden takia. Kuva 6 esittää säästäväistä polttoaineen kulutusta, missä yhteistuotantoa verrataan lämmön ja sähkön erillistuotantoon. [8, s. 47.]



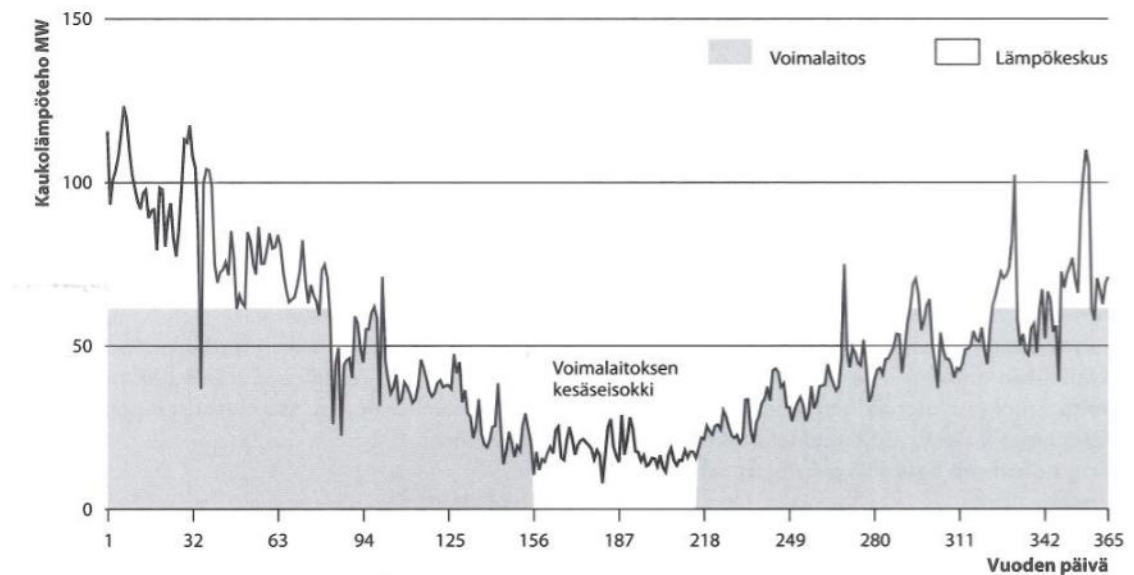
Kuva 6. Yhteis- ja erillistuotannon vertailua. Voimalaitos tuottaa yhteistuotannossa 25 yksikköä sähköä ja 50 yksikköä lämpöä, johon kulutetaan 100 yksikköä polttoainetta. Erillistuotannossa polttoainetta kulutetaan 149 yksikköä vastaavien energioiden tuottamiseen. Yhteistuotanto kuluttaa polttoainetta tästä 67 %. Tämä esimerkki kattaa kiinteän polttoaineen laitokset, mutta öljyä ja maakaasua polttoaineenaan käyttävien laitosten polttoainehyöty on suhteellisen samansuuruinen, vaikka lopputuotteiden suhde saattaakin olla hieman erilainen. [8, s. 48.]

3.2.2 Huippu- ja varatuotanto

Huippu- ja varatuotantolaitokset tuottavat vain lämpöä. Tällaisten laitosten laitteita ovat [9, s. 14]

- kattila (useimmiten tuliputki-tulitorvikattila)
- öljy- ja/tai maakaasupoltin
- polttoaineputkistot ja polttoaineet
- erilaiset pumput, puhaltimet ja muut apulaitteet
- automaatio- ja sähkölaitteet
- paineenpito- ja paisuntajärjestelmät
- savupiippu ja savukaasujen puhdistuslaitteet
- ilmanvaihto- ja rakennuksen lämmityslaitteet.

Huippu- ja varatuotantolaitokset ovat yleensä vähäisellä käytöllä. Niitä käytetään voimalaitosten seisokkien aikana kesällä, pahimmilla pakkasilla talvella ja voimalaitosten yllättävien käyttökatkojen aikana (kuva 7).



Kuva 7. Kaukolämpötehon tarpeen vuorokausivaihtelut [9, s. 12].

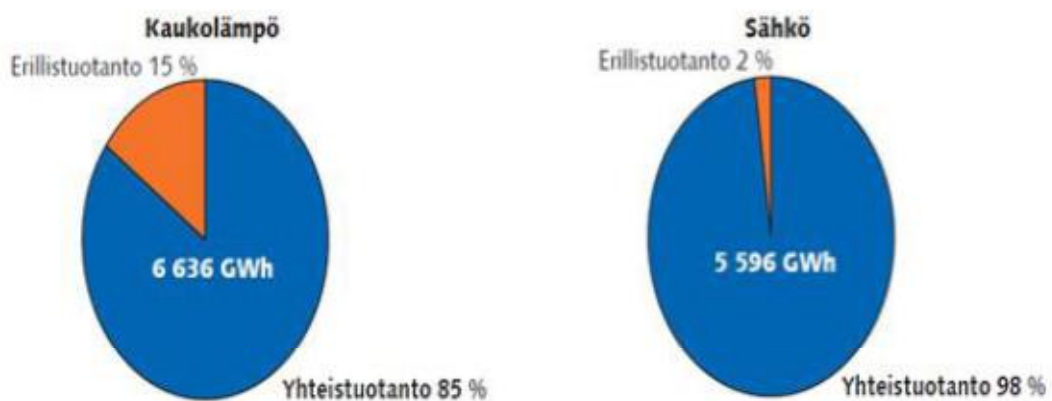
3.3 Jakelujärjestelmä

Tuotantolaitoksilta kaukolämpö, eli kuuma vesi, siirretään asiakkaille suljetussa kaksiputkisessa (meno- ja paluuputki) kaukolämpöverkossa. Menoputkessa kiertävä kaukolämpövesi, jonka lämpötila vaihtelee välillä 65 – 115 °C, luovuttaa lämpöä asiakkaalle kaukolämpölaitteiden välityksellä. Luovutettuaan lämmön, kaukolämpövesi palaa paluuputkessa takaisin tuotantolaitokselle 25 – 50 °C:n lämpötilassa. Kuitenkaan itse kaukolämpövesi ei kierrä talojen lämmitysverkoissa vaan ainoastaan lämmittää sitä. [9, s. 156.]

Kaukolämpöputket ovat hyvin eristettyjä ja niiden lämpöhäviöt ovat keskimäärin alle 10 % [9, s. 157].

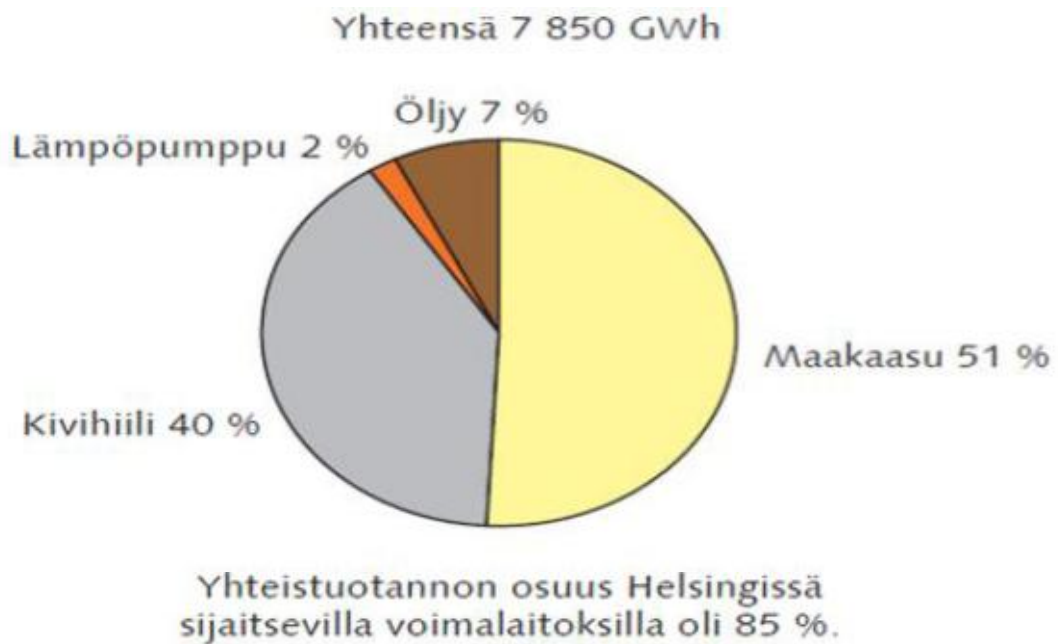
3.4 Kaukolämpö Helsingissä

Helsingin energia kattaa kaukolämmöllä yli 90 % Helsingin lämmöntarpeesta. Kaukolämpöä ja sähköä tuotetaan pääosin yhteistuotantona kolmella voimalaitoksella ja kymmenellä kaukokäytettävällä lämpölaitoksella (kuva 8). Kaukokäytettäviä laitoksia ohjataan Helsingin Energian pääkonttorin, sähkötalon, kellarissa sijaitsevasta valvomosta. [4].



Kuva 8. Yhteistuotanto vuonna 2010 [10, s. 17].

Pääpolttoaineina toimivat maakaasu, kivihiili sekä raskas polttoöljy (kuva 9) [4].



Kuva 9. Kaukolämmön tuotanto eri polttoaineilla [10, s. 8].

Helsingissä risteilee maan alla yli 1230 kilometriä kaukolämpöputkea, ja se kattaa melkein koko kaupungin (liite 1). Kaukolämpöverkko on rakennettu silmukkamaisesti, joten asiakkaalle voi tarvittaessa toimittaa lämpöä myös vaihtoehtoista reittiä pitkin. Osin tästä johtuen on kaukolämmön toimintavarmuus Helsingissä erittäin korkea ja keskimääräinen käyttökeskeytys onkin vuodessa alle 3 tuntia. [11; 12.]

4 Lassilan huippu- ja varalämpökeskus

4.1 Lämpökeskuksen esittely ja käyttötarkoitus

Lassilan lämpökeskuksen (kuva 10), joka valmistui vuosina 1977 - 1978, tehtävänä on tuottaa kaukolämpöä huippukulutuksen aikana ja varalämpöä voimalaitosten huoltokatkosten aikana. Lämpökeskuksen polttoaineena käytetään raskasta polttoöljyä ja maakaasua. Kattilat 1 ja 2 käyttävät polttoaineena öljyä ja kumpikin kattila on kaukolämpöteholtaan 120 MW. Uudemmat kattilat 3 ja 4 voivat käyttää vaihtoehtoisesti joko öljyä tai maakaasua, ja molempien kattiloiden kaukolämpöteho on 47 MW. Pääasiassa lämpökeskuksella käytetään kattiloita 3 ja 4 kaasulla. Jäljempänä keskitymme vain kattiloiden 3 ja 4 laitteistoihin. [13.]



Kuva 10. Lassilan huippu- ja varalämpökeskus.

Lämpökeskuksen kaukolämpöveden siirtämiseksi verkkoon käytetään kolmea kaukolämpöveden paluupumppua ja kolmea menopumppua, jotka ovat kaikki taajuusmuuntajakäyttöisiä. Lämpökeskusta voidaan käyttää myös pumppuasemana. Lämpökeskuksesta lähtee kaukolämpölinjat viiteen eri verkonosaan: VuT- tunneliin, Kannelmäkeen, Espooseen, Pitäjänmäkeen ja Ruskeasuolle ja niissä jokaisessa on sulkuventtiilit, joilla voidaan tehon siirtosuuntia jakaa. [13.]

Lämpökeskusta voidaan ohjata joko paikallisvalvomosta tai kaukokäytöllä sähkötalon lämpövalvomosta. Ohjauspaikka valitaan kytkimellä paikallisvalvomosta. [13.]

Lämpökeskus modernisoitiin pääasiassa automaation ja sähkön osalta vuonna 2010. Konetekniikan osalta muutoksia tehtiin pääasiassa puhaltimien, pumppujen, putkistojen ja öljyjärjestelmän kohdalla. [13.]

4.2 Lämpökeskuksen konetekninen laitteisto

4.2.1 Kattilat

Kattilat 3 ja 4 ovat TF35-mallisia kattiloita, ja ne on valmistanut Foster Wheeler Energia Oy (liite 2). TF-35-kattila on yhdistetty vesiputki-tuliputkikattila (tulitorvi-tuliputki), jota voidaan käyttää lämmin- tai kuumavesikattilana. Kattilan tulipesä on mitoitettu raskaan polttoöljyn ja maakaasun polttovaatimukset huomioiden. Kattilan pääosat ovat tulipesä, välikanava sekä konvektio-osa turbulenssielimineen. [15.]

Tulipesän muodostavat kaasutiiviit, yhteen hitsatut seinät ja vastakkain asetetut lautaspäädtyt. Nämä muodostavat yhdessä pohjan ja katon sekä samalla ala- ja yläkokoojan. Tulipesän pohjalla on vielä irtotiilivuoraus, jolla varmistetaan öljyssä olevien suurien partikkeleiden loppuun palaminen. Myös välikanava on valmistettu vesiputkiseinämistä. [15.]

Konvektio-osa sisältää pystyssä olevan vesilierön, minkä sisällä on tarpeellinen määrä pystysuoria tuliputkia. Konvektio-osan yläosassa sijaitsee nokikaappi turbulenssielimineen, jonka sisällä on vesinuohousputkisto. [15.]

Poltin sijaitsee kattilan tulipesän katossa. Tulipesässä vallitsevan ylipaineen takia palamiskaasut kulkevat välikanavaan kattilan alaosassa sijaitsevan aukon kautta. Täältä välikanava ohjaa savukaasut konvektio-osaan. Konvektio-osassa savukaasut virtaavat tuliputkien kautta nokikaappiin ja sieltä edelleen savukanavaan. [15.]

Vesipuolen kierto alkaa, kun vesi tulee vedenohjauskoteloon, joka sijaitsee konvektio-osan sisällä, ja kulkeutuu sieltä vedenohjauslevyjen ohjaamana alas välikanavaan. Välikanavasta vesi johdetaan tulipesän alakokoojaan, josta vesi jakautuu tasaisesti seinämäputkiin. Seinämäputkista vesi nousee tulipesän yläkokoojaan, josta se johdetaan pois kokoojaputkien kautta. Tällä tavalla saavutetaan varma ja tasainen vedenkierto kattilaan kaikissa olosuhteissa. [15.]

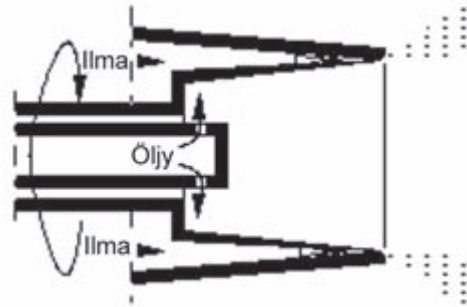
4.2.2 Polttimet

Kattilat 1 ja 2 (120 MW) on molemmat varustettu kolmella pyöriväkuppisella polttimella, malliltaan PETRO R- 40. Kattilat 3 ja 4 (47 MW) on molemmat varustettu yhdellä pyöriväkuppisella polttimella PETRO R- 47 (kuva 11) sekä maakaasun polttolaitteistolla. [13.]



Kuva 11. Edessä poltin päältä kuvattuna ja taustalla maakaasuputkisto.

Pyöriväkuppisessa polttimessa öljy johdetaan noin 100 kierrosta sekunnissa pyörivän kupin sisälle, josta se sinkoutuu keskipakovoiman johdosta ohuena kalvona ulospäin. Hajotusilma, joka otetaan palamisilmakanavasta paineenkorotuspuhaltimen kautta, johdetaan kupin reunalle ($p=15\text{ kPa}$ ja nopeus $v=110\text{ m/s}$), missä se hajottaa öljyn pisaroiksi (kuva 12). [16, s. 133.]



Kuva 12. Pyöriväkuppisen polttimen toimintaperiaate [15, s. 129].

Raskaan polttoöljyn sytytykseen käytetään omaa sytytyspoltinta, joka toimii joko kevytöljyllä tai nestekaasulla [16, s. 133].

Pyöriväkuppisella polttimella saavutetaan yleensä parempi palamistulos kuin paineilma-hajoitteisella polttimella. Pyöriväkuppisen polttimen säätöalue on myös laaja, parhaimmillaan jopa 1:8. [16, s. 133.]

Polttimen säätö tapahtuu polttimelle tulevan öljylinjan säätöventtiilin avulla. Kattiloiden ollessa pois päältä öljyn jäähtyminen estetään kierrättämällä lämmintä öljyä niin läheltä poltinta kuin mahdollista. Tämän lisäksi öljylinjoja lämmitetään sähköllä. [16, s. 133.]

4.2.3 Pumput

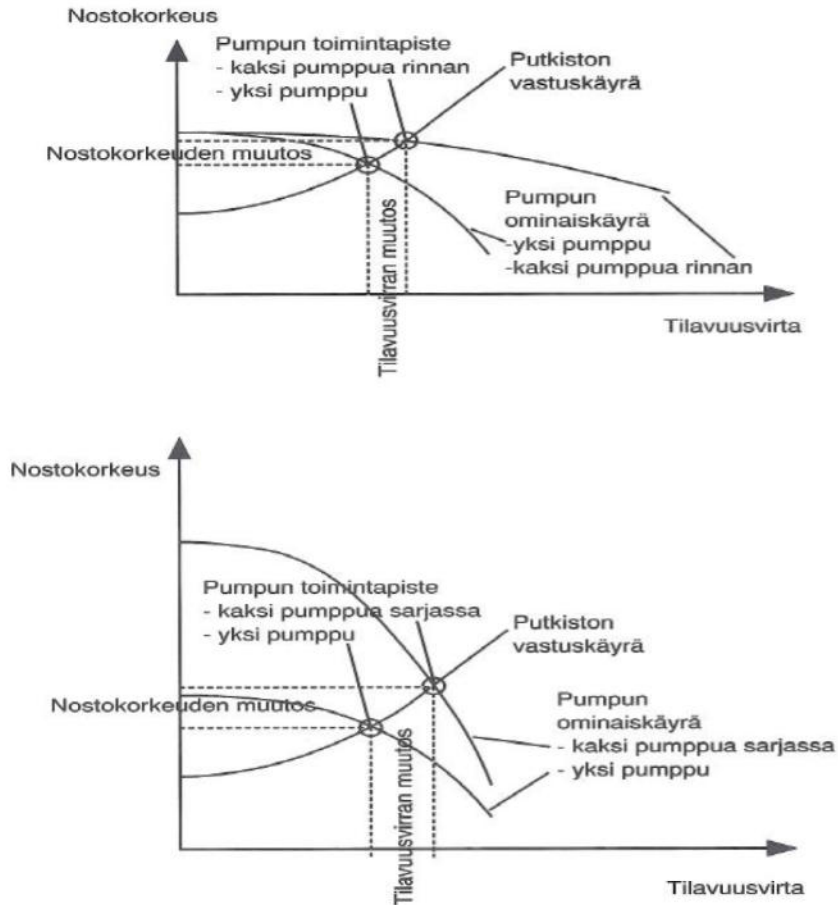
Niin kaukolämmön meno- kuin paluupumputkin (kuva 13) ovat keskipakopumppuja ja niitä käytetään taajuusmuuntajasäätöisillä moottoreilla (liite 3).



Kuva 13. Kaukolämpöpumppuja moottoreineen.

Keskipakopumput ovat yleisimpiä käytössä olevia pumppuja, koska ne sopivat mitä moninaisimpiin käyttökohteisiin. Keskipakopumpussa akseli välittää tehon kytkimestä juoksu- eli siipipyörään, mikä antaa nesteelle kehän tangentin suuntaisen nopeuskomponentin. Tällöin neste saa keskipakovoiman vaikutuksesta pyörässä tietyn painelisän, jonka ansiosta se tunkeutuu paineputkeen, missä se voittaa korkeuseron, virtausvastukset ja vastassa olevan paineen. Nesteen poistuessa juoksupyörän kehältä, tilalle virtaa uutta nestettä imujohdon alkupään paineen vuoksi, jolloin syntyy jatkuva virtaus pumpun lävitse. [9, s. 136.]

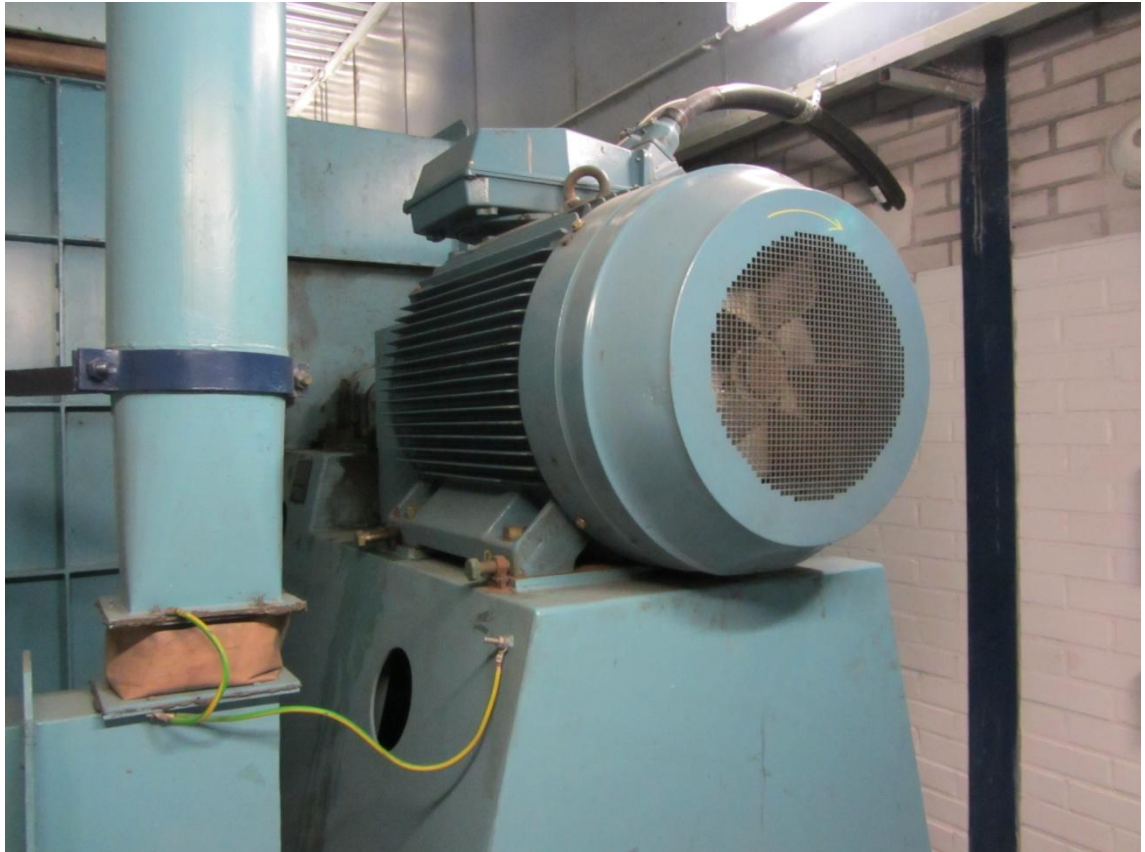
Niin kaukolämmön meno- kuin paluupuolenkin pumpput on kytketty rinnan. Rinnan kytkennällä päästään suurempiin tilavuusvirtoihin kuin sarjaan kytkennällä, jolla taas päästään parempaan nostokorkeuden arvoon (kuva 14). [9, s. 144.]



Kuva 14. Ylempänä pumpun ominaiskäyrä rinnankytkennässä ja alempana pumpun ominaiskäyrä sarjaan kytkennässä [9, s. 144].

4.2.4 Puhaltimet

Kattilahalliin tuleva ilma hoidetaan neljällä lämmitettävällä keskipakopuhaltimilla, jotka ovat taajuusmuuntajasäätöisiä, ja viidellä korvausilmapuhaltimella. Puhaltimet ohjautuvat automaattikäytöllä kattiloiden määrän, tehon ja kattilahallin paine-eron mukaan. Kummallakin kattilalla 3 ja 4 on palamisilmapuhallin (kuva 15), joka on taajuusmuuntajasäätöinen keskipakopuhallin (liite 4). [13.]



Kuva 15. Kattilan 4 palamisilmapuhallin ja sen moottori.

Palamisilmapuhaltimien lisäksi kattiloilla 3 ja 4 on omat taajuusmuuntajasäätöiset hajotusilmapuhaltimensa (kuva 16) (liite 5).



Kuva 16. Kattilan 4 hajotusilmapuhallin ja sen moottori.

Keskipakopuhaltimia käytetään tarvittaessa korkeita puhalluspaineita (jopa 50 kPa). Keskipakopuhaltimen imuaukko on akselin ympärillä ja ilman ulostuloaukko juoksupyörän ulkoreunalla, mistä ilma poistuu juoksupyörää ympäröivään spiraalipesään.

Puhaltimien lämmityspattereissa kiertää glykoliliuos, jota lämmitetään kaukolämpövedellä. Pattereissa kiertävän liuoksen lämpötilaa ohjataan puhaltimien käydessä ilman lämpötilan mukaan ja puhaltimien ollessa seis glykoliliuoksen lämpötilan mukaan. [13.]

4.3 Polttoaineet

4.3.1 Polttoöljy

Raskasöljysäiliöitä laitoksella on 2 kpl tilavuudeltaan 4000 m³ (kuva 17) ja yksi kevytöljysäiliö kooltaan 125 m³. Säiliöt ovat laitoksen sivulla suojatussa vallitilassa. Polttimien sytytykseen on 600 litran kevytöljysäiliö neutralointihuoneessa. Raskasöljysäiliöitä pidetään lämpökierrossa glykoliliuoksella, joka lämmitetään kaukolämpövedellä. Öljyn siirtoon on käytettävissä kolme öljypumppua. Öljyn lämmitys hoidetaan säiliöiden imu-kuumentimilla, kolmella vesiesilämmittimellä ja kahdella sähköesilämmittimellä. Putkistoissa on lisäksi myös sähkösaattolämmityksiä. [13.]



Kuva 17. Öljysäiliöt kuvattuna piipusta.

4.3.2 Maakaasu

Maakaasulinja tulee paineenalennusaseman kautta laitoksen ulkopuolella olevaan pääsulkuventtiiliin. Venttiili pidetään suljettuna aina, kun kaasukattilat eivät ole tuotannossa. Laitoksen sisäpuolella on kummankin kattilan kaasulinjassa turvasulkuventtiilit (kuva 18). [13.]



Kuva 18. Maakaasulinjasto turva- ja säätölaitteistoineen.

4.4 Lämpökeskuksen automaatiojärjestelmä

Lämpökeskuksen automaatiojärjestelmä on Insta Automationin valmistama, ja sen perustana toimii Siemens S7 -järjestelmä. Lämpökeskusta ohjataan tämän järjestelmän avulla paikallisvalvomosta (kuva 19) tai kaukokäytöllä kaukolämpövalvomosta omalla järjestelmällään. [14.]



Kuva 19. Paikallisvalvomonäkymä.

4.5 Taajuusmuuntajat

Taajuusmuuntajat ovat ABB Oy:n valmistamia ja toimittamia. Taajuusmuuntajat ovat kooltaan 1,5 kilowattista aina 315 kilowattiin asti. Taajuusmuuntajat ovat omissa ilma-
jäähdytteisissä huoneissaan (kuva 20). [14.]



Kuva 20. Taajuusmuuntajahuone.

4.6 Lämpökeskuksen säädöt

4.6.1 Kattilaan palaavan veden säätö

Kattiloilla on sisäiset kierrätysvesipumput, joilla säädetään kattiloiden paluuvesi kattiloille sopivaksi niin, että konvektioon ei synny korroosiota. Savukaasujen loppulämpötilaa voidaan vielä säätää turbulenssielimillä. [13.]

4.6.2 Kaukolämpöverkoston lämpötilasäätö

Keskusvalvomossa määritetään ulkolämpötilan ja muiden arvojen mukaan, kuinka lämmintä vettä laitokselta tuotetaan ulos verkkoon. Tätä lämpötilaa voidaan säätää koko laitoksen sekoitusvesivirtauksella. Kattiloilta tuotetun veden lämpötila on yleensä noin 115 astetta, ja jos laitokselta halutaan ulos 90-asteista menovettä, on tätä kattiloilta tulevaa 115-asteista vettä viilennettävä paluuvedellä. Meno- ja paluuveden yhdistävässä putkessa on venttiili, mikä säätyy automaattisesti halutun menoveden lämpötilan mukaan. [13.]

5 Hyötysuhteen määrittämisen teoria

5.1 Perusteet

Kattilan hyötysuhteella tarkoitetaan kaavan 1 mukaisesti kattilasta hyödyksi saatavan lämpöenergian suhdetta kattilaan vietyyn energiaan [17, s. 91]:

$$\eta = \frac{\phi_{hyöty}}{\phi_{tuotu}} \quad (1)$$

η on kattilan hyötysuhde

$\phi_{hyöty}$ on hyödyksi saatava lämpöteho [kW]

ϕ_{tuotu} on kattilaan tuodut energiavirrat [kW]

Kyseistä menetelmää kutsutaan kattilan hyötysuhteen suoraksi määrittämenetelmäksi. Hyödyksi saatu energia on lämmintä tai kuumaa vettä, höyryä, kuumaöljyä tms. Kattilalaitokseen sisään lämpöä tuodaan polttoaineen ja palamisilman mukana (kuva 21). Sisään tuotu energia on pääosin polttoaineen kemiallista energiaa. Polttoaineen esilämmityksen vaikutus on alle 1 %. Palamisilma määräytyy ulkolämpötilan mukaan ja sen osuus on hyvin pieni. Energiaa tuodaan myös jonkin verran omakäyttösähkön muodossa. [17, s. 91.]

Tuotu energia voidaan jakaa polttoaineen kemialliseen energiaan ja muihin tuotuihin energioihin [17, s. 91]:

$$\phi_{tuotu} = \phi_p + \phi_{muut} \quad (2)$$

ϕ_{tuotu} on kattilaan tuodut energiavirrat [kW]

ϕ_p on polttoaineen kemiallinen energia [kW]

ϕ_{muut} on muut kattilaan tuodut energiavirrat [kW]

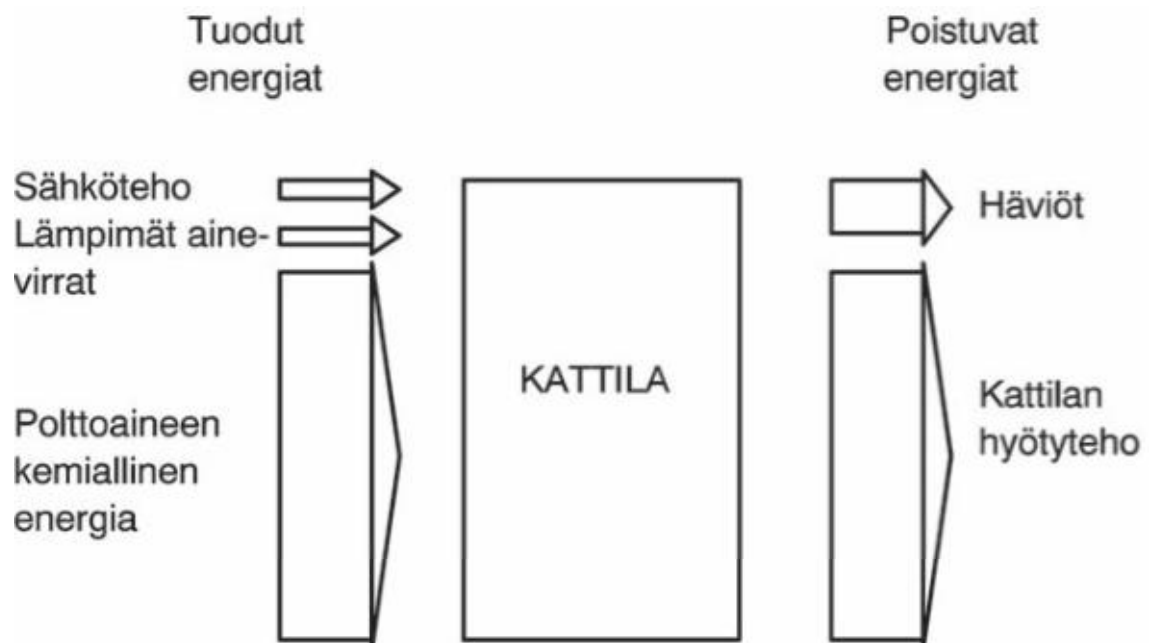
Usein tuotuna energiana voidaan hyvällä tarkkuudella käyttää pelkästään polttoaineen kemiallista energiaa ϕ_p . Muiden kattilaan tuotujen energiavirtojen vaikutus saadaan laskemalla niiden suhteellinen osuus polttoainetehoon verrattuna. Näin ollen edellä esitetty hyötysuhteen laskentakaava saadaan muotoon [17, s. 91]:

$$\eta = \frac{\phi_{hyöty}}{\phi_p(1+\Delta)} \quad (3)$$

$\phi_{hyöty}$ on hyödyksi saatava lämpöteho [kW]

ϕ_p on polttoaineen kemiallinen energia [kW]

Δ on ϕ_{muut} / ϕ_p



Kuva 21. Kattilan energiavirrat käytettäessä suoraa määrittymenettelyä [17, s. 91].

Öljy- ja kaasukattiloiden hyötysuhteen määrittämiseen riittää hyvin suora menetelmä, koska kyseisillä polttoaineilla polttoainevirran määrittäminen voidaan suorittaa riittävän tarkasti. Suoran menetelmän huono puoli on se, ettei sen avulla saada tietoa eri häviöiden vaikutuksista huonon hyötysuhteeseen, eikä se myöskään anna tietoa toimenpiteistä, jolla hyötysuhdetta voitaisiin parantaa. [17, s. 92.]

Toinen tapa, millä hyötysuhde voidaan määrittää, on epäsuora menetelmä, missä tarkastellaan kattilan häviöitä (kuva 22). Kun sijoitetaan aikaisemmin esitettyyn hyötysuhteen lausekkeeseen [17, s. 92]:

$$\phi_{hyöty} = \phi_{tuotu} - \sum \phi_{häviö} \quad (4)$$

Saadaan epäsuoran hyötysuhteen laskentakaavaksi

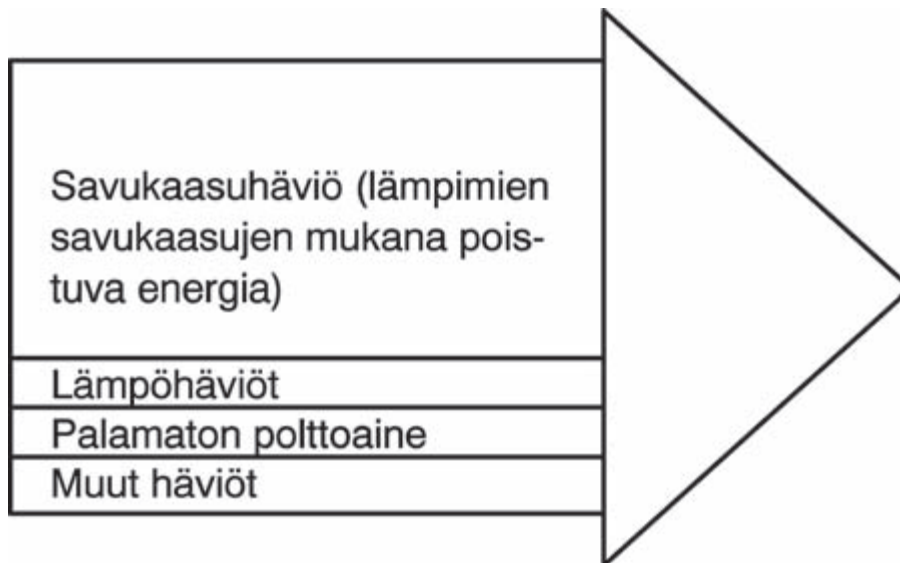
$$\eta = 1 - \frac{\sum \phi_{häviö}}{\phi_{tuotu}} \quad (5)$$

$\sum \phi_{häviö}$ on kattilanhäviöteho [kW]

ϕ_{tuotu} on kattilaan tuodut energiavirrat [kW]

Määritettävät häviöt, joista $\sum \phi_{häviö}$ muodostuu [17, s. 92]:

- savukaasuhäviö eli kuumien savukaasujen mukana poistuva energia (n. 75 % kokonaishäviöistä)
- palamatta jääneen polttoaineen häviö
- lämpöhäviöt (eristys- ja läpivirtaushäviö)
- käynnistys ja tuuletushäviö.



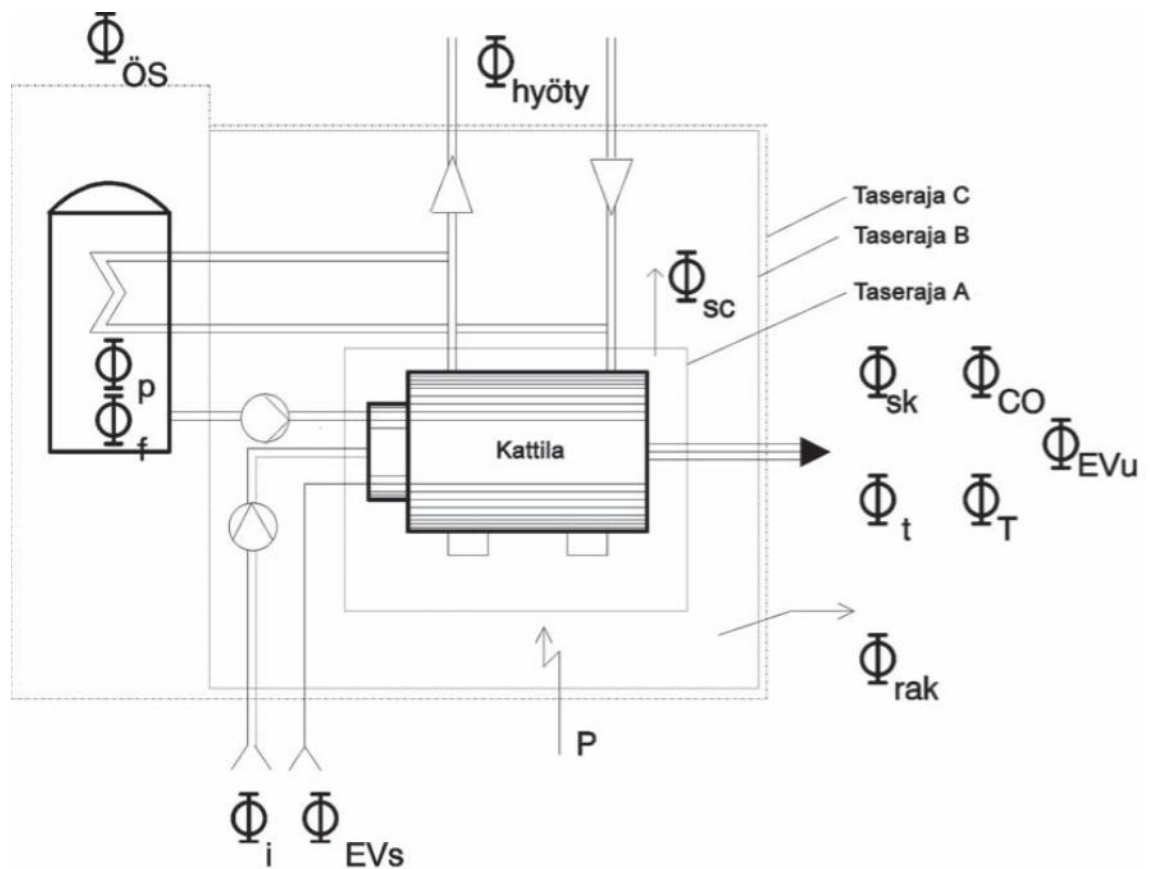
Kuva 22. Kattilan häviöt [17, s. 93].

5.2 Taseraja

Hyötysuhteen laskemiseksi pitää ensin määrittää taseraja (kuva 23). Taserajoja on

- kattilan seinät (taseraja A)
- kattilahuoneen seinät (taseraja B)
- kattilahuoneen seinät ja polttoainevarasto (taseraja C).

Yleensä kattilahuoneen lämpöhäviöt ovat vain n. 30 % kattilan lämpöhäviöistä. Osa kattilan lämpöhäviöistä saadaan otettua talteen palamisilman esilämmitykseen.



Kuva 23. Kattilan energiatase ja taserajat [17, s. 93].

5.3 Hyötysuhde suoralla menetelmällä

5.3.1 Hyödyksi saatu lämpöteho

Hyödyksi saatu lämpöteho lasketaan kaavasta [17, s. 94]:

$$\phi_{hyöty} = \dot{m}_{H_2O}(h_2 - h_1) + \Delta\phi_{UP} \quad (6)$$

$\phi_{hyöty}$ on hyödyksi saatava lämpöteho [kW]

\dot{m}_{H_2O} on veden massavirta [kg/s]

h_2 on entalpia kattilan jälkeen [kJ/kg]

h_1 on entalpia ennen kattilaa [kJ/kg]

$\Delta\phi_{UP}$ on ulospuhalluksesta, nuohouksesta aiheutuva energiavirta [kW]

Hyödyksi saatu lämpöteho voidaan laskea myös kaavalla:

$$\phi_{hyöty} = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_p(t_2 - t_1) \quad (7)$$

c_p on veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg·K]

$t_1 - t_2$ on kattilaan tulevan ja kattilasta lähtevän veden lämpötilaero [°C]

5.3.2 Kattilaan tuotu lämpö- ja sähköteho

Kattilaan tuotu lämpö ja sähköteho koostuu seuraavista osista [17, s. 94]:

$$\phi_{tuotu} = \phi_p + \phi_f + \phi_i + \phi_{EVS} + P \quad (8)$$

ϕ_{tuotu} on kattilaan tuodut energiavirrat [kW]

ϕ_p on polttoaineen kemiallinen energia [kW]

ϕ_f on lämmitetyn polttoaineen mukana tuleva lämpöteho [kW]

ϕ_i on lämmenneen ilman mukana tuleva lämpöteho [kW]

ϕ_{EVS} on mahdollisen emulsioveden mukana tuleva lämpöteho [kW]

P on taserajan sisällä olevien sähkölaitteiden ottama sähköteho [kW]

Polttoaineeseen sitoutuneen kemiallisen energian mukana tuleva lämpöteho lasketaan kaavalla [17, s. 94]:

$$\phi_p = \dot{m}_p \cdot H_u \quad (9)$$

\dot{m}_p on polttoainevirta [kg/s]

H_u on polttoaineen lämpöarvo [MJ/kg]

Esilämmitettyyn polttoaineeseen sitoutunut lämpöteho lasketaan kaavalla [17, s. 94]:

$$\phi_f = \dot{m}_p \cdot c_p \cdot (T_p - T_{ref}) \quad (10)$$

\dot{m}_p on polttoainevirta [kg/s]

c_p on polttoaineen ominaislämpö välillä $T_{ref} - T_p$ [kJ/kg·K]

T_p on polttoaineen lämpötila taserajalla [°C]

T_{ref} on vertailulämpötila 0 °C tai 25 °C [°C]

Palamisilman mukana tuleva energia lasketaan kaavalla [17, s. 95]:

$$\phi_i = \lambda \cdot c_i \cdot \mu_{i(teor)} \cdot \dot{m}_p \cdot (T_u - T_{ref}) \quad (11)$$

λ on ilmakerroin (lasketaan savukaasun happipitoisuuden mukaan)

c_i on ilman ominaislämpö [kJ/m³n· K]

$\mu_{i(teor)}$ on stökiometrisen polton ilman tarve polttoainekiloa kohti [m³n/kg_{pa}]

\dot{m}_p on polttoainevirta [kg/s]

T_u on ulkoilman lämpötila [°C]

T_{ref} on referenssilämpötila [°C]

Ilmakerroin lasketaan kaavalla [16, s. 87]:

$$\lambda = \frac{21}{21 - X_{O_2(mit)}} \quad (12)$$

$X_{O_2(mit)}$ on savukaasujen happipitoisuus

Mahdollisen emulsioveden mukana kattilaan tuleva lämpöteho lasketaan kaavalla [17, s. 95]:

$$\phi_{EVs} = \dot{m}_{EV} \cdot c_{H2O} \cdot (T_{EV} - T_{ref}) \quad (13)$$

\dot{m}_{EV} on emulsiovesivirta [kg/s]

c_{H2O} on veden ominaislämpö [4,19 kJ/kg·K]

T_{EV} on emulsioveden lämpötila taserajalla [°C]

T_{ref} on referenssilämpötila [°C]

Kattilaan tuodun sähkötehon hyötyteho määritetään kaavalla:

$$P_{Hyöty} = P \cdot \varphi \cdot \eta \quad (14)$$

P on taajuusmuuntajalta saatava todellinen teho [kW]

φ on laitteen moottorin hyötysuhde

η on laitteen hyötysuhdekäyrältä määritetty hyötysuhde

5.4 Savukaasuhäviö

Savukaasuhäviö tarkoittaa kattilasta kuumien savukaasujen mukana poistuvasta lämmöstä johtuvaa häviötä. Savukaasuhäviö on kattilan suurin käynninaikainen häviö. Savukaasuhäviö lasketaan kaavalla [17, s. 96]:

$$\phi_{sk} = (\mu_{sk(teor)} \cdot c_{sk} + (\lambda - 1) \cdot \mu_{i(teor)} \cdot c_i) \cdot m_p \cdot (T_{sk} - T_{ref}) \quad (15)$$

ϕ_{sk} on savukaasuhäviö [kW]

$\mu_{sk(teor)}$ on stökiometrisessä poltossa syntyvä savukaasuvirta / poltettu pa [kg_{sk}/kg_{pa}]

c_{sk} on savukaasun ominaislämpö [kJ/kg]

λ on ilmakerroin

$\mu_{i(teor)}$ on stökiometrisessä poltossa tarvittava ilmavirta / poltettu pa [kg_i/kg_{pa}]

c_i on ilman ominaislämpö [kJ/kg·K]

m_p on polttoainevirta [kg/s]

T_{sk} on savukaasun lämpötila [K]

T_{ref} on referenssilämpötila [K]

6 Lähtötiedot ja mittaukset

6.1 Lähtötietojen hankinta ja lämpökeskukseen tutustuminen

Ihan alkuun ohjaajan kanssa pidettiin palavereja, joissa kartoitettiin Lassilan lämpökeskuksen PI-kaavioiden kautta, mitkä sähkölaitteet otetaan huomioon mittauksissa. Tutustuttiin myös paikanpäällä tarkasti lämpökeskukseen, kattiloihin, pumppuihin, puhaltimiin, putkistoihin, taajuusmuuntajiin ja lähes kaikkeen insinööriyön kannalta oleelliseen. Tämän pohjalta lähdettiin keräämään lähtötietoja.

Lähtötietojen kerääminen aloitettiin tutustumalla Lassilan kaukolämpökeskuksen dokumentteihin Patolan kaukolämpökeskuksen arkistossa ja Helsingin Energian tietojärjestelmissä. Patolan arkistossa dokumentteja oli paljon, koska Lassilan lämpökeskus on rakennettu useassa eri vaiheessa. Dokumentit olivat kuitenkin hyvässä järjestyksessä ja tarvittavat dokumentit löytyivät lopulta aika helposti.

Lassilan kaukolämpökeskuksen taajuusmuuntajien tietoja oli aluksi hankala löytää. Lopulta tietojärjestelmästä löytyi lista kaikista kaukolämpökeskusten taajuusmuuntajista. Tästä listasta kerättiin tarvittavat kaukolämpökeskuksen taajuusmuuntajat ja niistä koottiin oma taulukkonsa (liite 6).

Lassilan lämpökeskuksen automaatiojärjestelmään perehtyminen vei myös oman aikansa. Automaatiojärjestelmä sisältää paljon erilaisia operointisivuja, ja niiden opettelu oli aikaa vievää. Automaatiojärjestelmä sisältää työkalun, millä on mahdollista tehdä mittaustiedoista omat käyrästänsä. Tämä työkalu helpotti huomattavasti tarvittavien mittaustietojen keruuta ja käsittelyä.

6.2 Automaatiojärjestelmän hyödyntäminen

Lämpökeskuksen automaatio hakee mittaustiedon suoraan mittalaitteelta, ja mittaustiedot päivittyvät järjestelmään jatkuvasti. Mittaustietoja analysoidaan paikallisvalvon näytöllä. Paikallisvalvomossa tarvittavista mittaustiedoista koottiin edellä mainitulla työkalulla käyrästä (liite 7). Kummallekin kattilalle tehtiin omat käyrästä, joihin tuo-

tiin hyötysuhdelaskuissa tarvittavat mittaustiedot. Mittausajanjaksoksi valittiin 10 minuuttia, ja tältä aikaväliltä automaatio laski haluttujen mittaustietojen keskiarvon.

6.3 Sähkölaitteiden tehotietojen kerääminen

Sähkömootoreiden tehotietoja ei saa paikallisvalvomosta vaan ainoastaan taajuusmuuntajilta kentältä. Taajuusmuuntaja antaa sähkötehon prosentteina nimellistehosta. Nimellisteho saadaan valmistajan toimittamasta manuaalista.

Lassilan lämpökeskuksen taajuusmuuntajien tietojen pohjalta tehtiin taulukko (liite 8), mihin koottiin taajuusmuuntajilta saatavat tehotiedot ja mittausten alku- ja loppuajat.

6.4 Mittausten suorittaminen

Ensimmäiset mittaukset suoritettiin 25.10.2011 ajamalla kattiloilla 3 ja 4 samanaikaisesti. Mittaukset aloitettiin aamulla kattiloiden lämmittämisellä minimi polttoaineteholle 16 MW ja ensimmäinen mittaus suoritettiin aikavälillä 08.47 – 08.57. Päivän mittaan suoritettiin kaikkiaan viisi mittausta polttoainetehoilla 16 MW:sta aina täydelle teholle 50 MW:iin.

Kun nämä tulokset oli analysoitu, päätettiin tehdä tuloksien pohjalta varmistusmittaus ajamalla vain toista kattilaa. Toiset mittaukset suoritettiin 25.1.2012 kattilalla 3. Mittaukset aloitettiin iltapäivällä ja ensimmäinen mittaus suoritettiin aikavälillä 13.12 – 13.22. Kaikkiaan mittauksia tehtiin iltapäivän aikana 5 kappaletta.

7 Hyötysuhteen määrittäminen laskemalla

Hyötysuhteen määrittämiseen käytettiin pelkkää suoraa menetelmää, koska se on riittävän tarkka käytettäessä polttoaineena maakaasua. Epäsuorasta menetelmästä määritettiin kuitenkin savukaasuhäviöt. Epäsuoran menetelmän muiden häviöiden määrät arvioitiin niin pieniksi, ettei niitä otettu määrittelyyn mukaan.

Myös suoraan menetelmään kuuluvat "polttoaineeseen sitoutunut energia" ja "emulsioveteen sitoutunut energia" jäivät määrittämättä, koska polttoaineena on maakaasu. "Palamisilman mukana tuleva energia" määritettiin omakäyttöön menevän vesivirtauksen avulla.

Taserajaksi valittiin 3 mihin sisältyy kattilahallin lisäksi myös öljysäiliöt. Vesivirran omakäyttötehoa ei pystytty rajaamaan pelkkään kattilahalliin, minkä vuoksi taserajaksi valittiin juuri 3.

Taulukoissa on ensiksi yhtä aikaa ajettujen kattiloiden 3 ja 4 mittaustiedot ja laskut. Sen jälkeen tulee yksin ajatun kattilan 3 mittaustiedot ja laskut.

7.1 Hyödyksi saatu lämpöteho

Hyödyksi saadun lämpötehon eli kaukolämpötehon määrittämiseen tarvittiin kattilasta ulos tulevan veden massavirta, veden ominaislämpötilakapasiteetti ja kattilaan sisään menevän että kattilasta ulos tulevan veden lämpötilat. Käyriltä saatiin veden tilavuusvirta, joka muutettiin massavirraksi veden tiheyden avulla (120 °C:n lämpötilassa veden tiheys on $942,9 \text{ kg/m}^3$). Loput mittaustiedot saatiin suoraan käyriltä tai ne ovat vakioita. Seuraavassa on esimerkkilasku (K3, 16 MW) ja loput laskut ovat taulukossa 2.

$$\phi_{\text{hyöty}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_p (t_2 - t_1) \quad (16)$$

$$\phi_{\text{hyöty}} = 49,37 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (116,3^\circ\text{C} - 40,3^\circ\text{C}) = 15721,38 \text{ kW} \approx 15,72 \text{ MW} \quad (17)$$

Taulukko 2. Hyötylämpöteho.

K3 hyötylämpöteho					
Pa teho	Lämpötila sisään	Lämpötila ulos	Veden tilavuusvirta	Veden massavirta	Q_hyöty
P	t_in	t_out	V_H2O	m_H2O	Q_hyöty
MW	C	C	m3/s	kg/s	MW
16	40,3	116,3	0,052	49,37	15,72
24	40,5	116,2	0,078	73,18	23,21
32	40,4	116,1	0,103	97,04	30,78
40	40,4	116,1	0,127	119,76	37,99
50	40,1	114,2	0,161	152,02	47,20

K4 hyötylämpöteho					
Pa teho	Lämpötila sisään	Lämpötila ulos	Veden tilavuusvirta	Veden massavirta	Q_hyöty
P	t_in	t_out	V_H2O	m_H2O	Q_hyöty
MW	C	C	m3/s	kg/s	MW
16	39,9	115,7	0,053	49,58	15,75
24	40,7	115,8	0,078	73,52	23,13
32	40,5	115,2	0,104	97,64	30,56
40	40,4	115,7	0,128	120,25	37,94
50	40,1	113,7	0,163	153,46	47,32

K3 hyötylämpöteho (yksi kattila)					
Pa teho	Lämpötila sisään	Lämpötila ulos	Veden tilavuusvirta	Veden massavirta	Hyötyteho
P	t_in	t_out	V_H2O	m_H2O	Q_hyöty
MW	C	C	m3/s	kg/s	MW
16	43,2	115,4	0,056	52,44	15,86
24	43,2	115,2	0,082	77,34	23,33
32	43,3	115,0	0,110	103,33	31,04
40	43,4	115,0	0,136	128,44	38,53
48	43,9	114,8	0,163	154,14	45,79

7.2 Kattilaan tuotu lämpöteho

Kattilaan tuotu lämpöteho koostuu lähes kokonaan polttoaineen tuottamasta tehosta. Kuitenkin pieniä määriä lämpötehoa tulee myös palamiseen tarvittavan ilman esilämmityksen mukana, mikä saadaan selville laskemalla vesivirran omakäyttöön kuluva teho.

7.2.1 Polttoaineteho

Polttoainetehon määrittämiseen tarvittiin maakaasun kulutus ja maakaasun lämpöarvo (liite 9). Polttoaineen kulutus saatiin käyristä tilavuusvirtana, jonka avulla voitiin laskea polttoaineteho. Jatkossa tarvitaan polttoaineen massavirtaa, joten polttoaineen tilavuusvirta muutettiin massavirraksi polttoaineen tiheyden avulla (liite 9). Seuraavassa on esimerkkilasku (K3, 16 MW) ja loput laskut ovat taulukossa 3.

$$\phi_p = \dot{m}_p \cdot H_u \quad (18)$$

$$\phi_p = 0,319 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 50 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} = 15,95 \text{ MW} \quad (19)$$

Taulukko 3. Polttoaineteho.

K3 polttoaineteho					
Pa teho	Polttoaineen tilavuusvirta	Polttoaineen tiheys	Polttoaineen massavirta	Polttoaineen lämpöarvo	Polttoaineteho
P	V _{pa}	δ _{pa}	m _{pa}	H _u	Q _{pa}
MW	m ³ /s	kg/m ³	kg/s	MJ/kg	MW
16	0,443	0,72	0,319	50	15,95
24	0,667	0,72	0,480	50	24,01
32	0,890	0,72	0,641	50	32,03
40	1,112	0,72	0,801	50	40,03
50	1,387	0,72	0,999	50	49,93

K4 polttoaineteho					
Pa teho	Polttoaineen tilavuusvirta	Polttoaineen tiheys	Polttoaineen massavirta	Polttoaineen lämpöarvo	Polttoaineteho
P	V _{pa}	δ _{pa}	m _{pa}	H _u	Q _{pa}
MW	m ³ /s	kg/m ³	kg/s	MJ/kg	MW
16	0,445	0,72	0,320	50	16,02
24	0,666	0,72	0,480	50	23,98
32	0,889	0,72	0,640	50	32,00
40	1,109	0,72	0,798	50	39,91
50	1,389	0,72	1,000	50	50,00

K3 polttoaineteho (yksi kattila)					
Pa teho	Polttoaineen tilavuusvirta	Polttoaineen tiheys	Polttoaineen massavirta	Polttoaineen lämpöarvo	Polttoaineteho
P	V _{pa}	δ _{pa}	m _{pa}	H _u	Q _{pa}
MW	m ³ /s	kg/m ³	kg/s	MJ/kg	MW
16	0,444	0,72	0,320	50	15,98
24	0,666	0,72	0,480	50	23,98
32	0,889	0,72	0,640	50	32,00
40	1,112	0,72	0,801	50	40,03
48	1,332	0,72	0,959	50	47,95

7.2.2 Palamisilman mukana tuleva energia

Palamisilman mukana tuleva energia saadaan laskemalla omakäyttöön kuluva vesiteho (omakäyttöteho). Se lasketaan samalla periaatteella kuin hyödyksi saatu lämpöteho. Seuraavassa on esimerkkilasku (K3, 16 MW) ja loput laskut ovat taulukossa 4.

$$\phi_{hyöty} = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_p (t_2 - t_1) \quad (20)$$

$$\phi_{hyöty} = 1,15 \frac{kg}{s} \cdot 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (115,0^\circ C - 47,2^\circ C) = 326,69 kW \approx 0,33 MW \quad (21)$$

Taulukko 4. Omakäyttöteho.

K3 ja K4 omakäyttöteho					
Pa teho	Lämpötila sisään	Lämpötila ulos	Veden tilavuusvirta	Veden massavirta	Omakäyttöteho
P	t _{in}	t _{out}	V _{H2O}	m _{H2O}	Q _{ok}
MW	C	C	m ³ /s	kg/s	MW
16	115,0	47,2	0,0012	1,15	0,33
24	116,7	41,3	0,0009	0,89	0,28
32	112,5	42,0	0,0016	1,50	0,44
40	111,4	44,5	0,0017	1,64	0,46
50	115,1	41,3	0,0014	1,34	0,42

K3 omakäyttöteho (yksi kattila)					
Pa teho	Lämpötila sisään	Lämpötila ulos	Veden tilavuusvirta	Veden massavirta	Omakäyttöteho
P	t _{in}	t _{out}	V _{H2O}	m _{H2O}	Q _{ok}
MW	C	C	m ³ /s	kg/s	MW
16	113,9	56,5	0,0024	2,28	0,55
24	116,7	55,8	0,0022	2,10	0,53
32	115,0	52,0	0,0026	2,44	0,64
40	115,0	50,7	0,0029	2,75	0,74
48	114,0	50,4	0,0031	2,88	0,77

7.3 Kattilaan tuotu sähköteho

7.3.1 Kaukolämpöpumppu

Mittauksissa käytössä oli vain yksi kaukolämpöpumppu. Tehojen prosentuaaliset osuudet saatiin taajuusmuuntajilta ja nimellistehojen avulla laskettiin käytetty sähköteho. Taulukossa 5 on kaukolämpöpumpun käytetyt sähkötehot.

Taulukko 5. Kaukolämpöpumpun käytetyt sähkötehot.

Kaukolämpöpumppu 4UN10D601					
Pa teho	Pyör.nop.		Näyttöteho	Nimellisteho	Teho
P	n	n	P _{näyttö}	P _{nim}	P
MW	%	rpm	%	kW	kW
32	69,2 %	1009	27,3 %	355	96,92
48	72,4 %	1056	32,0 %	355	113,49
64	82,4 %	1201	38,7 %	355	137,39
80	92,3 %	1346	46,4 %	355	164,72
100	95,2 %	1388	53,8 %	355	190,99

Kaukolämpöpumppu 4UN10D605 (yksi kattila)					
Pa teho	Pyör.nop.		Näyttöteho	Nimellisteho	Teho
P	n	n	P _{näyttö}	P _{nim}	P
MW	%	rpm	%	kW	kW
16	62,3 %	908	12,1 %	355	42,96
24	60,6 %	884	13,0 %	355	46,15
32	61,9 %	903	18,3 %	355	64,97
40	68,2 %	994	22,8 %	355	80,94
48	71,7 %	1045	28,1 %	355	99,76

Haluttiin määrittää myös pumpun hyötyteho, johon tarvittiin moottorin hyötysuhde ja pumpun hyötysuhde. Moottorin hyötysuhde saatiin valmistajan tiedoista ja pumpun hyötysuhde katsottiin pumpun ominaiskäyrästä (liite 3) tilavuusvirran ja pyörimisnopeuden avulla. Pumpun tuottamaan tilavuusvirtaan kuuluu kattiloiden tuottamat tilavuusvirrat, sekoitusvesivirtaus sekä omakäyttövesivirtaus. Taulukossa 6 on kaukolämpöpumpun hyötytehon laskut.

Taulukko 6. Kaukolämpöpumpun hyötyteho.

Kaukolämpöpumppu 4UN10D601					
Pa teho	Tilavuusvirta	Pumpun hyötysuhde	Moottorin hyötysuhde	Verkon paine-ero	Hyötyteho
P	Q	η_{pumppu}	η_{moottori}	ΔP	P
MW	l/s	%	%	mVp	kW
32	145,2	60 %	87 %	27,3	50,59
48	233,8	77 %	87 %	27,1	76,03
64	300,5	80 %	87 %	32,4	95,62
80	363,8	83 %	87 %	38,0	118,94
100	446,1	87 %	87 %	34,3	144,56

Kaukolämpöpumppu 4UN10D605 (yksi kattila)					
Pa teho	Tilavuusvirta	Pumpun hyötysuhde	Moottorin hyötysuhde	Verkon paine-ero	Hyötyteho
P	Q	η_{pumppu}	η_{moottori}	ΔP	P
MW	l/s	%	%	mVp	kW
16	85,1	50 %	87 %	18,4	18,69
24	115,3	60 %	87 %	17,1	24,09
32	144,6	68 %	87 %	19,4	38,43
40	179,8	70 %	87 %	21,9	49,29
48	213,3	75 %	87 %	22,9	65,09

7.3.2 Palamisilmapuhaltimet

Molemmilla kattiloilla on omat palamisilmapuhaltimet. Taulukossa 7 on palamisilmapuhaltimien käytetyt sähkötehot.

Taulukko 7. Palamisilmapuhaltimien käytetyt sähkötehot.

K3 Palamisilmapuhallin 4WG30D301					
Pa teho	Pyör.nop.		Näyttöteho	Nimellisteho	Teho
P	n	n	P_näyttö	P_nim	P
MW	%	rpm	%	kW	kW
16	55,0 %	817	25,5 %	250	63,75
24	60,0 %	891	30,7 %	250	76,75
32	67,0 %	995	38,0 %	250	94,95
40	77,0 %	1143	47,6 %	250	119,00
50	90,0 %	1337	59,4 %	250	148,50

K4 Palamisilmapuhallin 4WG40D301					
Pa teho	Pyör.nop.		Näyttöteho	Nimellisteho	Teho
P	n	n	P_näyttö	P_nim	P
MW	%	rpm	%	kW	kW
16	61,0 %	906	27,2 %	250	68,00
24	67,0 %	995	31,4 %	250	78,50
32	75,0 %	1114	38,3 %	250	95,75
40	84,0 %	1247	47,8 %	250	119,50
50	93,0 %	1381	59,8 %	250	149,50

K3 Palamisilmapuhallin 4WG30D301 (yksi kattila)					
Pa teho	Pyör.nop.		Näyttöteho	Nimellisteho	Teho
P	n	n	P_näyttö	P_nim	P
MW	%	rpm	%	kW	kW
16	55,7 %	827	10,7 %	250	26,75
24	62,1 %	922	17,2 %	250	43,00
32	66,0 %	980	29,6 %	250	74,00
40	77,5 %	1151	43,8 %	250	109,50
48	88,0 %	1307	68,3 %	250	170,75

Palamisilmapuhaltimen hyötytehon määrittämiseen tarvitaan moottorin ja puhaltimen hyötysuhteet. Palamisilmapuhaltimen hyötysuhde arvioitiin palamisilmapuhaltimen hyötysuhdekäyrästä (liite 4), palamisilmapuhaltimen tuottavan tilavuusvirran (palamisilman tarve) ja paineen avulla. Palamisilman tarpeen laskemiseen käytettiin liitteen 8 tietoja. Seuraavassa on esimerkkilasku (K3, 16 MW) ja loput laskut ovat taulukossa 8.

$$\dot{V} = m_p \cdot m_{O_2+N} / \rho_{ilma} \quad (22)$$

$$\dot{V} = 0,319 \frac{kg}{s} \cdot 17,3kg / 1,293 \frac{kg}{m^3} = 4,27 \frac{m^3}{s} \quad (23)$$

Taulukko 8. Palamisilmapuhaltimien hyötysuhteet.

K3 palamisilmapuhallin					
Pa teho	Pa massavirta	Ilmantarve	Paine		Hyötysuhde
P	m_pa		P		η
MW	kgpa/s	m3/s	mbar	kPa	%
16	0,319	4,27	36,6	3,66	30 %
24	0,480	6,43	45,2	4,52	38 %
32	0,641	8,57	53,8	5,38	43 %
40	0,801	10,71	67,8	6,78	60 %
50	0,999	13,36	88,9	8,89	75 %

K4 palamisilmapuhallin					
Pa teho	Pa massavirta	Ilmantarve	Paine		Hyötysuhde
P	m_pa		P		η
MW	kgpa/s	m3/s	mbar	kPa	%
16	0,320	4,29	42,9	4,29	35 %
24	0,480	6,42	47,2	4,72	42 %
32	0,640	8,56	58,5	5,85	52 %
40	0,798	10,68	70,8	7,08	62 %
50	1,000	13,38	89,0	8,9	75 %

K3 palamisilmapuhallin (yksi kattila)					
Pa teho	Pa massavirta	Ilmantarve	Paine		Hyötysuhde
P	m_pa		P		η
MW	kgpa/s	m3/s	mbar	kPa	%
16	0,320	4,28	36,6	3,66	30 %
24	0,480	6,42	44,2	4,42	38 %
32	0,640	8,56	53,1	5,31	45 %
40	0,801	10,71	65,6	6,56	52 %
48	0,959	12,83	82,1	8,21	73 %

Moottorin hyötysuhde saatiin valmistajan tiedoista. Moottorin ja puhaltimen hyötysuhdeiden sekä käytettyjen sähkötehojen avulla laskettiin palamisilmapuhaltimien hyötytehot. Seuraavassa on esimerkkilasku (K3, 16 MW) ja loput laskut ovat taulukossa 9.

$$P_{hyöty} = P_{puhallin\ teho} \cdot \varphi \cdot \eta \quad (24)$$

$$P_{hyöty} = 63,75kW \cdot 0,88 \cdot 0,30 = 16,83kW \quad (25)$$

Taulukko 9. Palamisilmapuhaltimien hyötytehot.

K3 Palamisilmapuhallin 4WG30D301					
Pa teho	Ilmantarve	Paine	Puhaltimen hyötysuhde	Moottorin hyötysuhde	Hyötyteho
P	Q	P	$\eta_{puhallin}$	$\eta_{moottori}$	P
MW	l/s	kPa	%	%	kW
16	4,3	4,3	30 %	88 %	16,83
24	6,4	4,7	38 %	88 %	25,67
32	8,6	5,9	43 %	88 %	35,93
40	10,7	7,1	60 %	88 %	62,83
50	13,4	8,9	75 %	88 %	98,01

K4 Palamisilmapuhallin 4WG40D301					
Pa teho	Ilmantarve	Paine	Puhaltimen hyötysuhde	Moottorin hyötysuhde	Hyötyteho
P	Q	P	$\eta_{puhallin}$	$\eta_{moottori}$	P
MW	l/s	kPa	%	%	kW
16	4,3	4,3	35 %	88 %	20,94
24	6,4	4,7	42 %	88 %	29,01
32	8,6	5,9	52 %	88 %	43,82
40	10,7	7,1	62 %	88 %	65,20
50	13,4	8,9	75 %	88 %	98,67

K3 Palamisilmapuhallin 4WG30D301 (yksi kattila)					
Pa teho	Ilmantarve	Paine	Puhaltimen hyötysuhde	Moottorin hyötysuhde	Hyötyteho
P	Q	P	$\eta_{puhallin}$	$\eta_{moottori}$	P
MW	l/s	kPa	%	%	kW
16	4,3	3,7	30 %	88 %	7,06
24	6,4	4,4	38 %	88 %	14,38
32	8,6	5,3	45 %	88 %	29,30
40	10,7	6,6	52 %	88 %	50,11
48	12,8	8,2	73 %	88 %	109,69

7.3.3 Hajotusilmapuhaltimet

Molemmilla kattiloilla on omat hajotusilmapuhaltimet. Taulukossa 10 on hajotusilmapuhaltimien käytetyt sähkötehot.

Taulukko 10. Hajotusilmapuhaltimien käytetyt sähkötehot.

K3 Hajotusilmapuhallin 4WG31D311					
Pa teho	Pyör.nop.		Näyttöteho	Nimellisteho	Teho
P	n	n	P_näyttö	P_nim	P
MW	%	rpm	%	kW	kW
16	38,0 %	1113	42,9 %	15	6,44
24	42,0 %	1231	47,3 %	15	7,10
32	43,0 %	1260	47,1 %	15	7,07
40	39,0 %	1143	47,4 %	15	7,11
50	18,0 %	527	48,2 %	15	7,23

K4 Hajotusilmapuhallin 4WG41D311					
Pa teho	Pyör.nop.		Näyttöteho	Nimellisteho	Teho
P	n	n	P_näyttö	P_nim	P
MW	%	rpm	%	kW	kW
16	44,0 %	1289	45,5 %	15	6,83
24	43,0 %	1260	43,4 %	15	6,51
32	46,0 %	1348	45,7 %	15	6,86
40	38,0 %	1113	46,5 %	15	6,98
50	20,0 %	586	50,1 %	15	7,52

K3 Hajotusilmapuhallin 4WG31D311 (yksi kattila)					
K Tehot	Pyör.nop.		Näyttöteho	Nimellisteho	Teho
P	n	n	P_näyttö	P_nim	P
MW	%	rpm	%	kW	kW
16	50,0 %	1465	13,4 %	15	2,01
24	51,0 %	1494	15,2 %	15	2,28
32	50,0 %	1465	15,4 %	15	2,31
40	50,0 %	1465	14,2 %	15	2,13
48	51,0 %	1494	18,3 %	15	2,75

7.3.4 Sekoitusvesipumput

Kattiloilla on omat sekoitusvesipumput. Taulukossa 11 on sekoitusvesipumppujen käytetyt sähkötehot.

Taulukko 11. Sekoitusvesipumppujen käytetyt sähkötehot.

K3 Sekoitusvesipumppu 4WB39D001					
Pa teho	Pyör.nop.		Näyttöteho	Nimellisteho	Teho
P	n	n	P_näyttö	P_nim	P
MW	%	rpm	%	kW	kW
16	49,0 %	722	19,6 %	45	8,82
24	32,0 %	471	16,6 %	45	7,47
32	42,0 %	619	17,6 %	45	7,92
40	52,0 %	766	19,2 %	45	8,64
50	58,0 %	854	21,4 %	45	9,63

K4 Sekoitusvesipumppu 4WB49D001					
Pa teho	Pyör.nop.		Näyttöteho	Nimellisteho	Teho
P	n	n	P_näyttö	P_nim	P
MW	%	rpm	%	kW	kW
16	51,0 %	751	20,9 %	45	9,41
24	31,0 %	457	16,7 %	45	7,52
32	40,0 %	589	17,6 %	45	7,92
40	50,0 %	737	19,0 %	45	8,53
50	61,0 %	899	22,1 %	45	9,95

K3 Sekoitusvesipumppu 4WB39D001 (yksi kattila)					
K Tehot	Pyör.nop.		Näyttöteho	Nimellisteho	Teho
P	n	n	P_näyttö	P_nim	P
MW	%	rpm	%	kW	kW
16	51,4 %	757	9,0 %	45	4,05
24	48,4 %	713	7,6 %	45	3,42
32	48,0 %	707	7,8 %	45	3,51
40	46,9 %	691	7,2 %	45	3,24
48	55,6 %	819	12,3 %	45	5,54

7.3.5 Lämminilmapuhaltimet

Lämminilmapuhaltimia on yhteensä 4. Ne käynnistyvät vain, kun molemmat kattilat olivat päällä. Tämän vuoksi taulukossa ei ole lämminilmapuhaltimien käytettyjä tehoja vain yhden kattilan ollessa päällä. Taulukossa 12 on lämminilmapuhaltimien käytetyt sähkötehot.

Taulukko 12. Lämminilmapuhaltimien käytetyt sähkötehot.

Lämminilmapuhallin 4UW27D442					
Pa teho	Pyör.nop.		Näyttöteho	Nimellisteho	Teho
P	n	n	P_näyttö	P_nim	P
MW	%	rpm	%	kW	kW
32	0,0 %	0	0,0 %	15	0,00
48	0,0 %	0	0,0 %	15	0,00
64	51,0 %	747	54,7 %	15	8,21
80	100,0 %	1465	100,0 %	15	15,00
100	100,0 %	1465	100,0 %	15	15,00

Lämminilmapuhaltimet 1,2,3						
	4UW24D142		4UW24D242		4UW24D342	
P	Näyttöteho	Teho	Näyttöteho	Teho	Näyttöteho	Teho
MW	%	kW	%	kW	%	kW
32	0,0 %	0,00	0,0 %	0,00	0,0 %	0,00
48	0,0 %	0,00	0,0 %	0,00	0,0 %	0,00
64	0,0 %	0,00	0,0 %	0,00	0,0 %	0,00
80	0,0 %	0,00	0,0 %	0,00	0,0 %	0,00
100	0,0 %	0,00	0,0 %	0,00	31,9 %	9,57

7.3.6 Puhaltimien kiertovesipumput

Kaikilla lämminilmapuhaltimilla on oma kiertovesipumppu. Kiertovesipumput toimivat yhtäjaksoisesti noin 1 kW:n teholla. Ne vievät niin pienen osan koko sähkötehosta, että ne jätettiin huomioimatta.

7.3.7 Kattilaan tuotu sähköteho yhteensä

Kattilaan tuodut, yhteenlasketut, sähkötehot löytyvät taulukosta 13.

Taulukko 13. Sähkötehot yhteensä.

K3 ja K4 sähkötehot yhteensä					
Pa teho	4UW27D442	4UN10D601	4WG30D301	4WG40D301	4WG31D311
P	P	P	P	P	P
MW	kW	kW	kW	kW	kW
32	0,00	96,92	63,75	68,00	6,44
48	0,00	113,49	76,75	78,50	7,10
64	8,21	137,39	94,95	95,75	7,07
80	15,00	164,72	119,00	119,50	7,11
100	15,00	190,99	148,50	149,50	7,23
Pa teho	4WG41D311	4WB39D001	4WB49D001	4UW24D342	YHTEENSÄ
P	P	P	P	P	P
MW	kW	kW	kW	kW	MW
32	6,83	8,82	9,41	0,00	0,25
48	6,51	7,47	7,52	0,00	0,29
64	6,86	7,92	7,92	0,00	0,36
80	6,98	8,64	8,53	0,00	0,44
100	7,52	9,63	9,95	9,57	0,54
K3 (yksi kattila) sähkötehot yhteensä					
Pa teho	4UN10D601	4WG30D301	4WG31D311	4WB39D001	YHTEENSÄ
P	P	P	P	P	P
MW	kW	kW	kW	kW	MW
16	42,96	26,75	2,01	4,05	0,08
24	46,15	43,00	2,28	3,42	0,09
32	64,97	74,00	2,31	3,51	0,14
40	80,94	109,50	2,13	3,24	0,20
48	99,76	170,75	2,75	5,54	0,28

7.4 Savukaasuhäviö

Savukaasuhäviö muodostaa suuren osan kattilan häviöistä, minkä johdosta se haluttiin myös määrittää. Savukaasuhäviön määrittämiseen tarvittiin vakioita, joita ovat stökiometrisessä poltossa syntyvä savukaasuvirta poltettua polttoainetta kohti, stökiometrisessä poltossa tarvittava ilmavirta poltettua polttoainetta kohti ja ilman ominaislämpö (liite 10). Muut tarvittavat mittaustiedot ovat savukaasun loppulämpötila, ominaislämpö ja ilmakerroin sekä polttoaineen massavirta. Savukaasukanavan korroosiovaaran takia savukaasun vertailulämpötilaksi asetettiin veden kastepiste 100 °C:sta. Seuraavassa on esimerkkilasku (K3, 24 MW) ja loput laskut ovat taulukossa 14.

$$\phi_{sk} = (\mu_{sk(teor)} \cdot c_{sk} + (\lambda - 1) \cdot \mu_{i(teor)} \cdot c_i) \cdot m_p \cdot (T_{sk} - T_{ref}) \quad (25)$$

$$\phi_{sk} = \left(15,9 \frac{kg_{sk}}{kg_{pa}} \cdot 1,4272 \frac{kJ}{kg \cdot K} + (1,09 - 1) \cdot 17,2 \frac{kg_i}{kg_{pa}} \cdot 1 \frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot 0,480 \frac{kg}{s} \cdot (374,6K - 373K)$$

$$= 18,7 kW \quad (26)$$

Taulukko 14. Savukaasuhäviöt.

K3 savukaasuhäviöt					
Pa teho	Savukaasun ominaislämpö	Ilmakerroin	Polttoaineen massavirta	Savukaasun loppulämpötila	Savukaasuhäviö
P	c_sk	λ	m_pa	T_sk	Q_sk
MW	kJ/kgK		kg/s	K	kW
16	1,4272	1,10	0,319	373	0
24	1,4272	1,09	0,480	374,6	18,68
32	1,43105	1,09	0,641	382,3	145,03
40	1,43325	1,09	0,801	389,7	325,53
50	1,43435	1,09	0,999	392,2	466,22

K4 savukaasuhäviöt					
Pa teho	Savukaasun ominaislämpö	Ilmakerroin	Polttoaineen massavirta	Savukaasun loppulämpötila	Savukaasuhäviö
P	c_sk	λ	m_pa	T_sk	Q_sk
MW	kJ/kgK		kg/s	K	kW
16	1,4272	1,10	0,320	373,1	0,78
24	1,4283	1,09	0,480	376,7	43,04
32	1,42995	1,09	0,640	380,7	119,64
40	1,43215	1,09	0,798	386,6	263,66
50	1,43435	1,08	1,000	391,5	447,37

K3 savukaasuhäviöt (yksi kattila)					
Pa teho	Savukaasun ominaislämpö	Ilmakerroin	Polttoaineen massavirta	Savukaasun loppulämpötila	Savukaasuhäviö
P	c _{sk}	λ	m _{pa}	T _{sk}	Q _{sk}
MW	kJ/kgK		kg/s	K	kW
16	1,4272	1,11	0,320	373	0
24	1,4272	1,10	0,480	374	11,67
32	1,43105	1,09	0,640	376,2	49,68
40	1,43325	1,09	0,801	380,1	137,90
48	1,43325	1,08	0,959	388	348,15

7.5 Kattiloiden hyötysuhteet

Kattilaan tuodut yhteenlasketut tehot löytyvät taulukosta 15.

Taulukko 15. Kattilaan tuodut yhteenlasketut tehot.

K3 ja K4				
Pa teho	Polttoainetehto	Omakäyttöteho	Sähköteho	Tuotu teho
P	Q _{pa}	Q _{ok}	Q _s	Q _{tuotu}
MW	MW	MW	MW	MW
32	31,96	0,33	0,25	32,54
48	47,99	0,28	0,29	48,56
64	64,04	0,44	0,36	64,84
80	79,94	0,46	0,44	80,84
100	99,94	0,42	0,54	100,89

K3 (yksi kattila)				
Pa teho	Polttoainetehto	Omakäyttöteho	Sähköteho	Tuotu teho
P	Q _{pa}	Q _{ok}	Q _s	Q _{tuotu}
MW	MW	MW	MW	MW
16	15,98	0,55	0,08	16,61
24	23,98	0,53	0,09	24,61
32	32,00	0,64	0,14	32,79
40	40,03	0,74	0,20	40,97
48	47,95	0,77	0,28	49,00

Kattilan hyötyteho, hyötysuhde ja savukaasuhäviö löytyvät taulukosta 16.

Taulukko 16. Kattilan hyötyteho, hyötysuhde ja savukaasuhäviö.

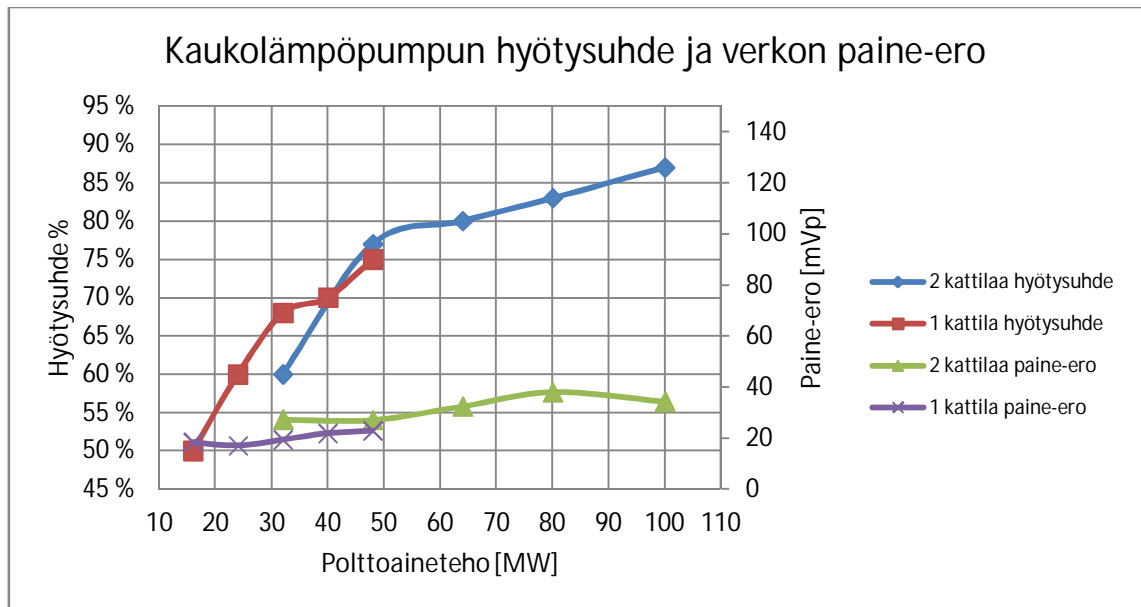
K3 ja K4			
Pa teho	Hyötylämpöteho	Hyötysuhde	Savukaasuhäviö
P	Q_hyöty	η	Q_sk
MW	MW		MW
32	31,47	96,7 %	0,00
48	46,35	95,4 %	0,06
64	61,34	94,6 %	0,26
80	75,93	93,9 %	0,59
100	94,52	93,7 %	0,91

K3 (yksi kattila)			
Pa teho	Hyötylämpöteho	Hyötysuhde	Savukaasuhäviö
P	Q_hyöty	η	Q_sk
MW	MW		MW
16	15,86	95,5 %	0,00
24	23,33	94,8 %	0,01
32	31,04	94,7 %	0,05
40	38,53	94,1 %	0,14
48	45,79	93,5 %	0,35

8 Lopputulokset ja päätelmät

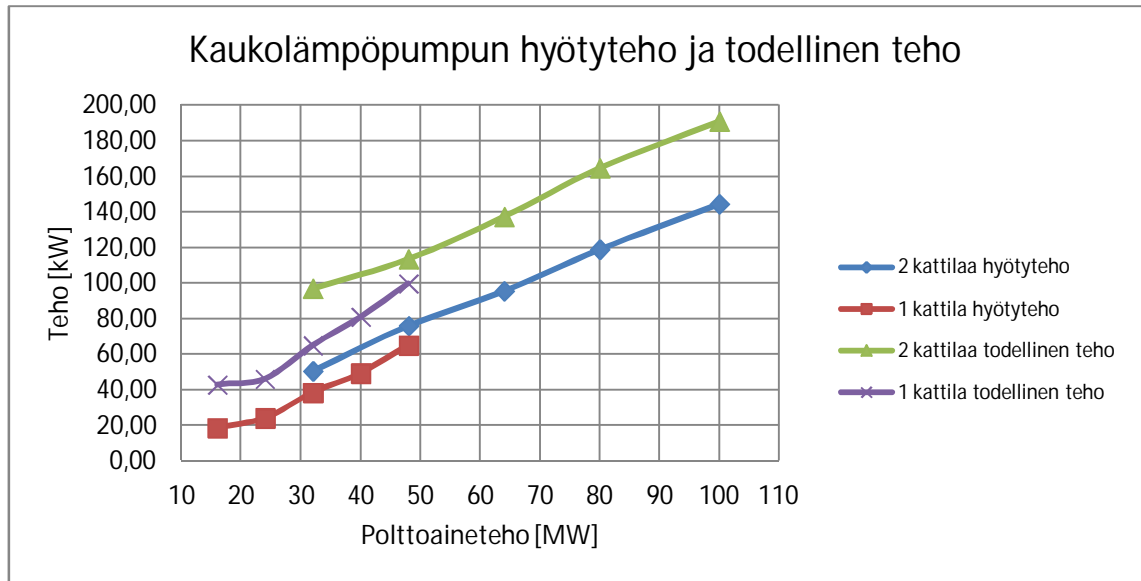
8.1 Hyötytehot

Kaukolämpöpumpun hyötysuhde parani pumpun tilavuusvirran kasvun mukaan. Kahden kattilan käytön aikana kaukolämpöpumpun hyötysuhde vaihteli minimi polttoainetehon (16 MW) 60 %:sta maksimi polttoainetehon (50 MW) 87 %:iin. Käytettäessä vain yhtä kattilaa hyötysuhde vaihteli 50 %:sta 75 %:iin (kuva 24).



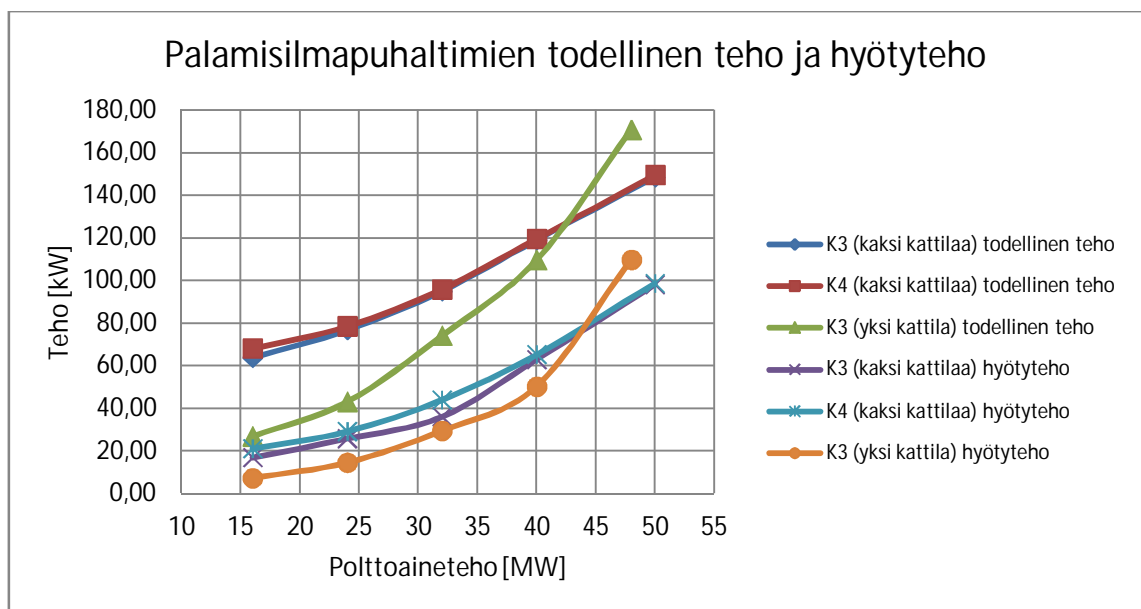
Kuva 24. Kaukolämpöpumpun hyötysuhde ja verkon paine-ero.

Hyötytehoon ja yleensäkin pumpun kuormitukseen vaikutti myös verkon paine-ero. Mitä suurempi paine-ero verkossa oli, sitä suuremman työn pumppu joutui tekemään voittaakseen verkon paine-eron. Käytettäessä yhtä kattilaa, pumppu tuotti 144,6 m³/h tilavuusvirran 32 MW:n polttoaineteholla. Käytettäessä kahta kattilaa, pumppu tuotti 145,2 m³/h tilavuusvirran samalla polttoaineteholla. Tilavuusvirrat ovat lähes yhtä suuret, mutta pumppujen käytetyissä tehoissa on kuitenkin havaittavissa eroa (n. 32 kW). Se selittyy kuitenkin verkon erisuuruisilla paine-eroilla (27,1 mVp ja 19,4 mVp) (kuva 25). Osaltaan vaikutti myös virtausvastusten kasvaminen kahden kattilan ollessa käytössä.



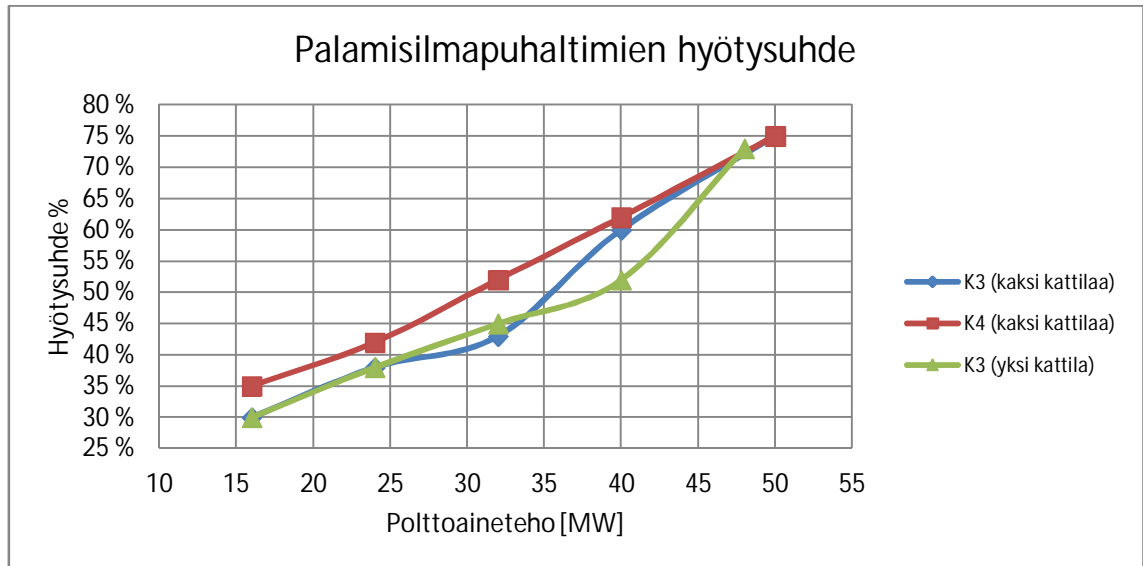
Kuva 25. Kaukolämpöpumpun hyötyteho.

Palamisilmapuhaltimien käytetyt sähkötehot ovat 15 MW:sta 45 MW:iin pienempiä käytettäessä kahta kattilaa. 45 MW:sta 50 MW:iin suurempia käytettäessä vain yhtä kattilaa (kuva 26). Tämä johtuu kattilan palamisilmakäyrän muutoksista automaatiojärjestelmässä.



Kuva 26. Palamisilmapuhaltimien todellinen teho ja hyötyteho.

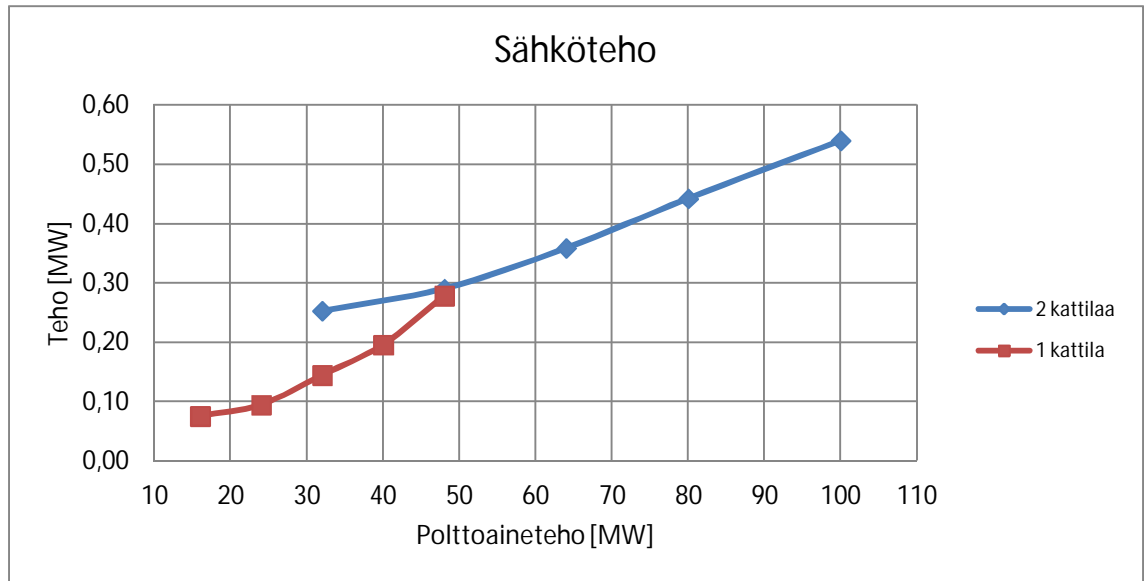
Palamisilmapuhaltimien kohdalla hyötysuhteet eivät eronneet juurikaan toisistaan, kun käytettiin kahta kattilaa. Käytettäessä vain yhtä kattilaa hyötysuhde oli kuitenkin melkein koko ajan noin 5 % huonompi kuin käytettäessä kahta kattilaa (kuva 27). Tämäkin johtuu kattilan palamisilmakäyrän muutoksista automaatiojärjestelmässä.



Kuva 27. Palamisilmapuhaltimien hyötysuhde.

8.2 Sähkötehot

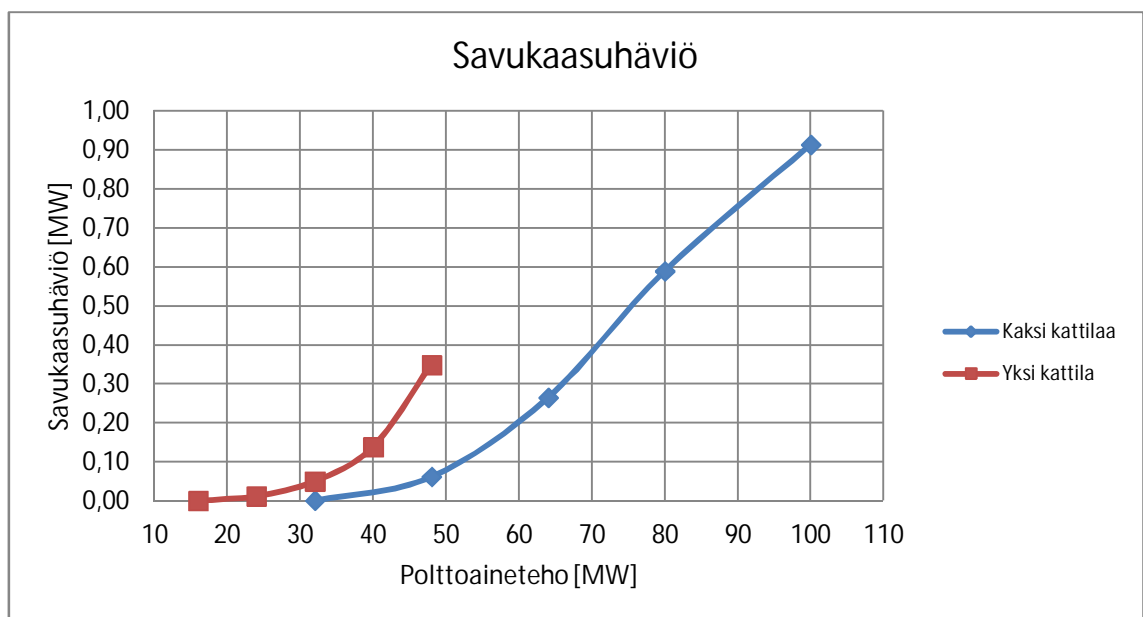
Kattiloiden sähkölaitteiden kuluttamat tehot ovat 48 MW:iin asti selvästi pienemmät käytettäessä vain yhtä kattilaa, mutta 48 MW:n kohdilla ne ovat jo melkein yhtä suuret (kuva 28). Tämä johtuu osittain verkon paine-erosta ja kattiloiden palamisilmakäyrien muutoksista automaatiassa.



Kuva 28. Kattiloiden sähkötehot.

8.3 Savukaasuhäviö

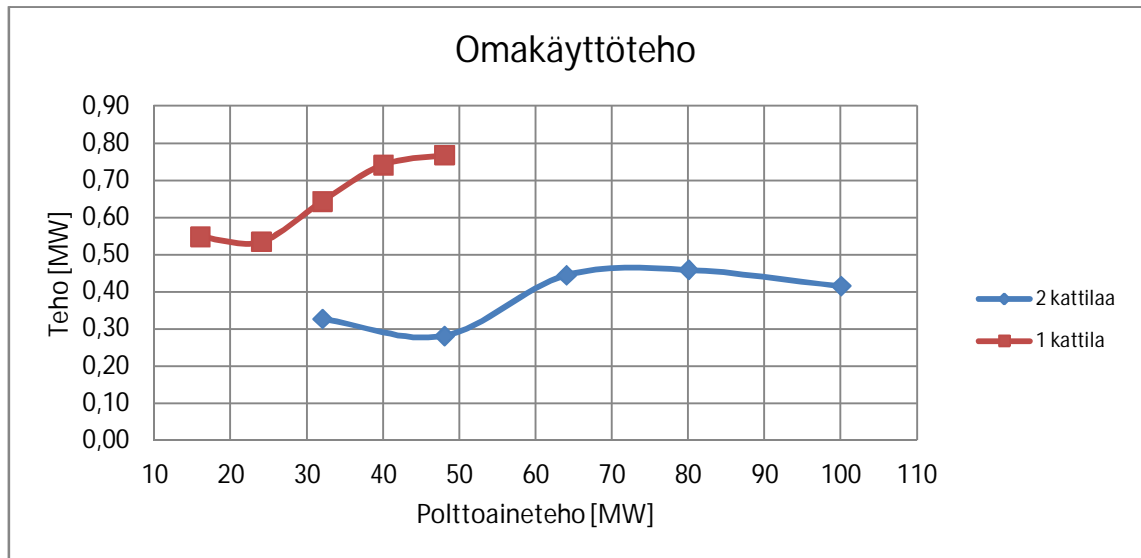
Savukaasuhäviöt rupeavat kasvamaan huomattavasti kattiloiden käydessä noin 30 MW:n teholla. Tästä johtuen yhtä kattilaa käytettäessä esim. 48 MW:n teholla savukaasuhäviöt ovat noin 0,3 MW suuremmat kuin käytettäessä kahta kattilaa samalla polttoaineteholla (kuva 29).



Kuva 29. Kattiloiden savukaasuhäviöt.

8.4 Vesivirran omakäyttöön menevä teho

Yhtä kattilaa käytettäessä omakäyttöteho on selvästi suurempi kuin käytettäessä kahta kattilaa (kuva 30). Omakäyttöön kuluvat erisuuruiset lämpötehot selittyvät ulkolämpötilaeroilla. Ensimmäisen mittauksen aikana ulkona oli +5 °C ja toisen mittauksen aikana -5 °C. Toisen mittauksen aikana omakäyttölämpötehoa meni enemmän puhaltimien ilman ja öljysäiliöiden lämmittämiseen kuin ensimmäisen mittauksen aikana.



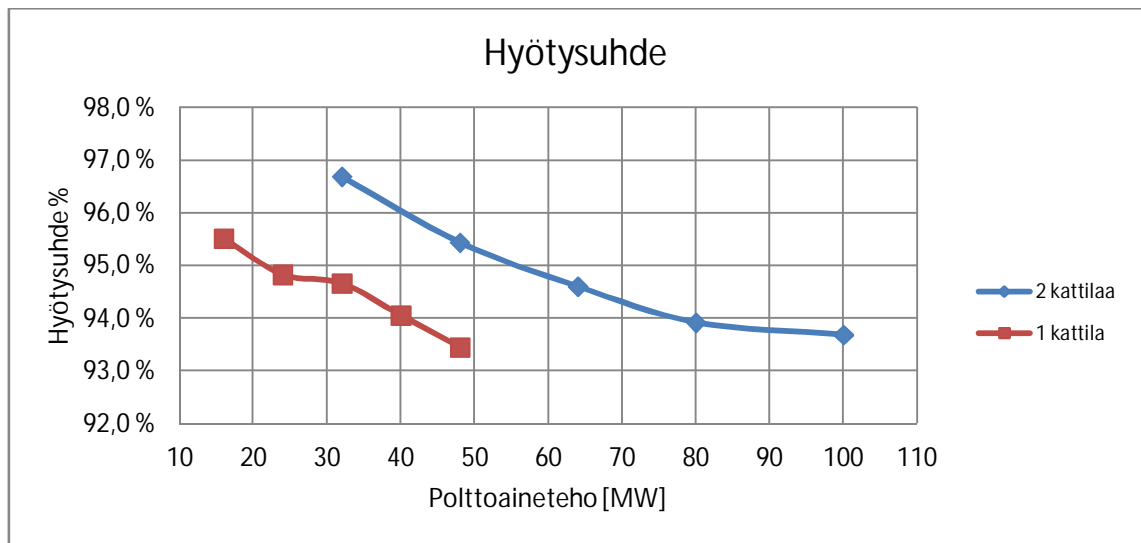
Kuva 30. Vesivirran omakäyttöön menevät tehot.

8.5 Kattiloiden hyötysuhde

Käytettäessä lämpökeskusta tehoalueella 32 – 48 MW, yhdellä kattilalla hyötysuhde on noin 2 %:a huonompi kuin käytettäessä kahta kattilaa (kuva 31). Hyötysuhde-ero selittyy suurimmaksi osaksi savukaasuhäviöiden suurella kasvamisella, kun kattiloita käytetään yli 32 MW:n polttoaineteholla. Jos kahta kattilaa käytetään molempia 24 MW:n (yhteensä 48 MW) polttoaineteholla, savukaasuhäviöt ovat noin 0,06 MW. Jos taas käytetään yhtä kattilaa 48 MW:n teholla, ovat savukaasuhäviöt jo 0,35 MW.

Osaltaan hyötysuhde-eroihin vaikuttivat myös olosuhde-erot. Mittauksissa ulkolämpötilojen ero oli noin 10 °C, mikä vaikutti omakäyttötehoon. Käytettäessä yhtä kattilaa suurempi omakäyttöteho laskee hiukan hyötysuhdetta.

Sähkötehot pysyivät melko tasaisina molemmissa tapauksissa. Polttoainetehoa nostettaessa sähköteho nousee polttoainetehon suhteen aika lineaarisesti.



Kuva 31. Kattiloiden hyötysuhteet.

8.6 Optimaalisin ajotapa

Optimaalisin käytötapa kattiloilla on käyttää vain yhtä kattilaa 32 MW:iin asti. Kun tämä polttoaineteho on saavutettu, tulee ottaa toinen kattila rinnalle, jolloin molempien kattiloiden polttoaineteho säätyy minimiteholle eli 16 MW:iin. Tästä eteenpäin käytetään kahta kattilaa maksimiteholle asti verkon tarpeen mukaan.

8.7 Parannuskohteet

Savukaasun loppulämpötilaan pitää kiinnittää erityistä huomiota, koska savukaasuhäviö muodostaa suurimman osan kattilan häviöistä. Savukaasujen loppulämpötila tulee yrittää pitää mahdollisimman alhaisena, kuitenkin yli 100 °C:ssa.

Kattiloiden tehonvaihtelut alentavat myös hyötysuhdetta. Kahta kattilaa käytettäessä ongelmana on ollut kattiloiden hakeutuminen eri tehoille, vaikka niiden samaan aikaan päällä ollessaan kuuluisi olla suunnilleen samalla teholla. Tämä alentaa hyötysuhdetta ja siksi kattiloiden tehot tulisi pitää tasaisena mahdollisimman pitkään.

Kattiloiden käynnistykset aiheuttavat häviöitä ja alentavat hyötysuhdetta. Laskennalliset käynnistyshäviöt kattiloilla 3 ja 4 ovat olleet luokkaa 0,5 MWh – 1 MWh. Turhat käynnistykset pitääkin minimoida.

Polttoainekustannukset muodostavat suurimmat kaukolämpölaitoksen kulut. Tämän vuoksi palamiseen tulee kiinnittää huomiota. Palamista voidaan seurata silmämääräisesti tai analysoimalla savukaasuja savukaasuanalysaattorilla. Silmämääräisessä seuraamisessa tulee kiinnittää huomiota savukaasujen väriin sekä liekin väriin ja muotoon. Maakaasun liekin tulisi olla sininen ja palaa tasaisena. Jotta saataisiin mahdollisimman hyvä palamistulos, tulee polttoaine polttaa mahdollisimman pienellä yli-ilmamäärällä. Pieni yli-ilmamäärä merkitsee tavallisesti korkeampaa hyötysuhdetta. Yli-ilmamääränsäätöjen toimivuutta tulee tarkkailla automaatiosta.

8.8 Virhetarkastelu

Virhetarkastelu on syytä aloittaa mittalaitteista. Mittalaitteet ovat moneen kertaan tarkastettuja ja samanlaisia käytetään muillakin laitoksilla. Mittalaitteilla on +/- 0,5 % mittatarkkuus, tästä johtuen mittalaitteet ovat tuottaneet oman virheen, mitä ei ole otettu laskennoissa huomioon.

Automaatiojärjestelmästä saatujen käyrien tiedot siirrettiin Excel-taulukkoon ja tiedot tarkastettiin useaan kertaan, joten virhettä ei ole päässyt syntymään.

Sähkölaitteiden tehotietojen keruussa taajuusmuuntajilta on varmasti syntynyt virhettä. Tehotiedot vaihtelivat mittausten ajan vähintään muutaman kilowatin kymmenyksen verran. Pahimmillaan lukujen vaihtelu oli muutamia kilowatteja.

Laskennoissa ei ole tullut virhettä, koska ne on tehty Excel-ohjelmalla ja laskut on tarkastettu useampaan kertaan. Laskuista saadut kattiloiden hyötysuhteet olivat kuitenkin odotetulla tasolla, mikä eliminoi virheen syntymisen.

9 Yhteenveto

Insinööriyössä tarkasteltiin Lassilan huippu- ja varalämpökeskuksen energiatehokkuutta kattiloiden 3 ja 4 kaasukäytöllä. Energiatehokkuutta käsiteltiin hyötysuhteen kautta, missä otettiin kattilahyötysuhteen lisäksi huomioon sähkölaitteiden käyttämät tehot, vesitehosta omakäyttöön menevä osuus ja savukaasuhäviöt.

Teoriaosuudessa kerrottiin aluksi hieman yrityksestä ja käytiin läpi kaukolämmöntuotannon peruseräteet. Lassilan kaukolämpökeskus ja sen laitteet esiteltiin varsin kattavasti ja teoriaosuuden lopuksi käytiin läpi kattiloiden hyötysuhdelaskennan kannalta oleelliset teoriat.

Työn kulusta kerrottiin pääpiirteittäin ja hyötysuhdelaskut esitettiin esimerkein ja selvin taulukoin. Laskujen perusteella luotiin kuvaajat, joita analysoitiin lopputuloksissa ja päätelmissä.

Työn tavoitteet saavutettiin hyvin. Työn tuloksena saatiin selville, millä tehoalueilla kattiloiden hyötysuhde on paras ja milloin on hyvä käyttää yhtä kattilaa ja milloin on aika käynnistää toinen kattila. Saatiin selville millä polttoaineteholla savukaasujen loppulämpötilat alkavat kasvaa ja alkaa muodostua merkittäviä savukaasuhäviötä.

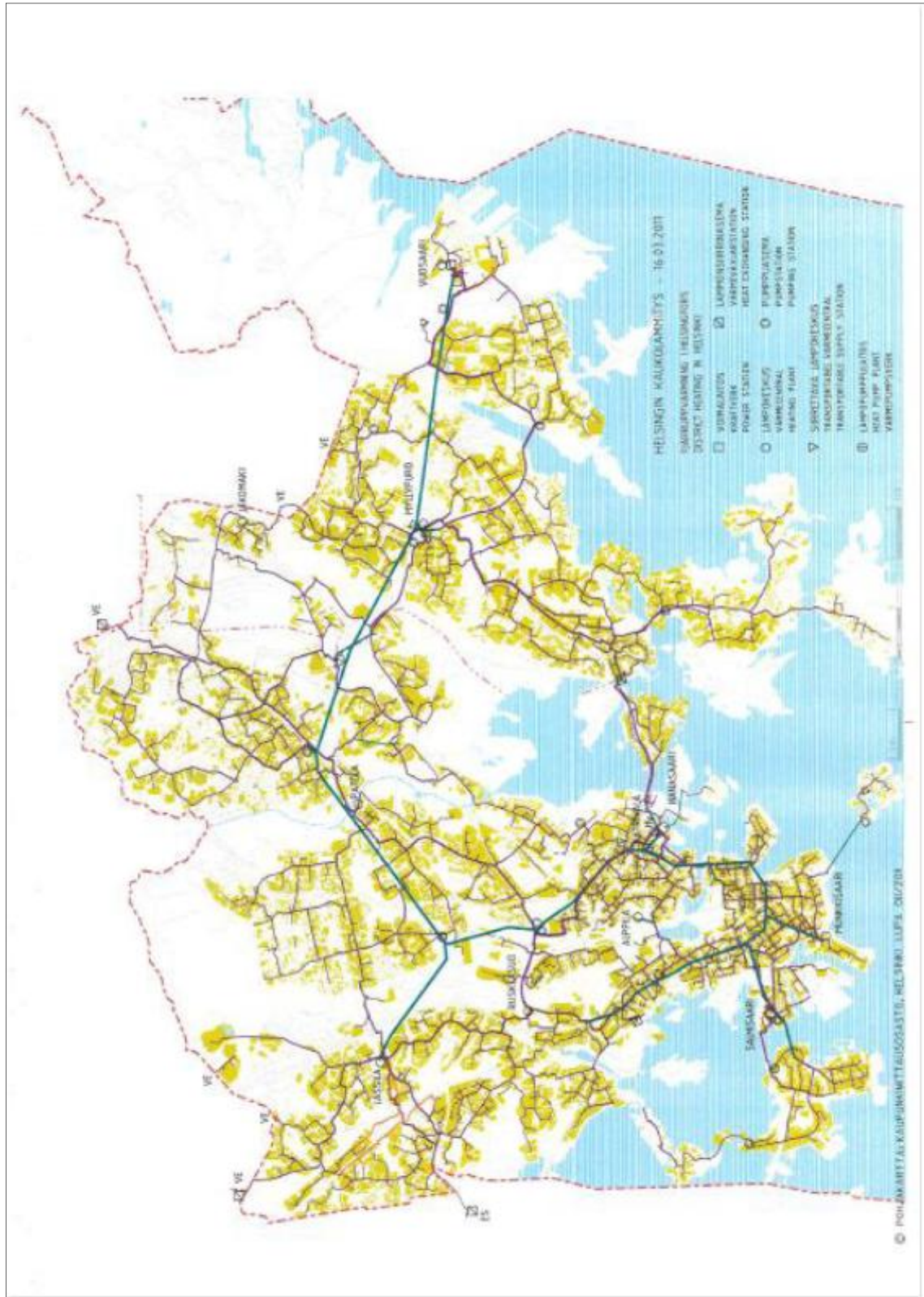
Vaikka insinööriyö valmistuukin tämän raportin myötä, jatketaan tulosten selvittelyä vielä jatkossa. Tulevaisuudessa tullaan selvittämään, kannattaako automaatioon tehdä ohjelma kattiloiden energiatehokkaasta käytöstä vai ohjeistetaanko kattiloiden käyttäjiä käyttämään kattiloita energiatehokkaasti.

Lähteet

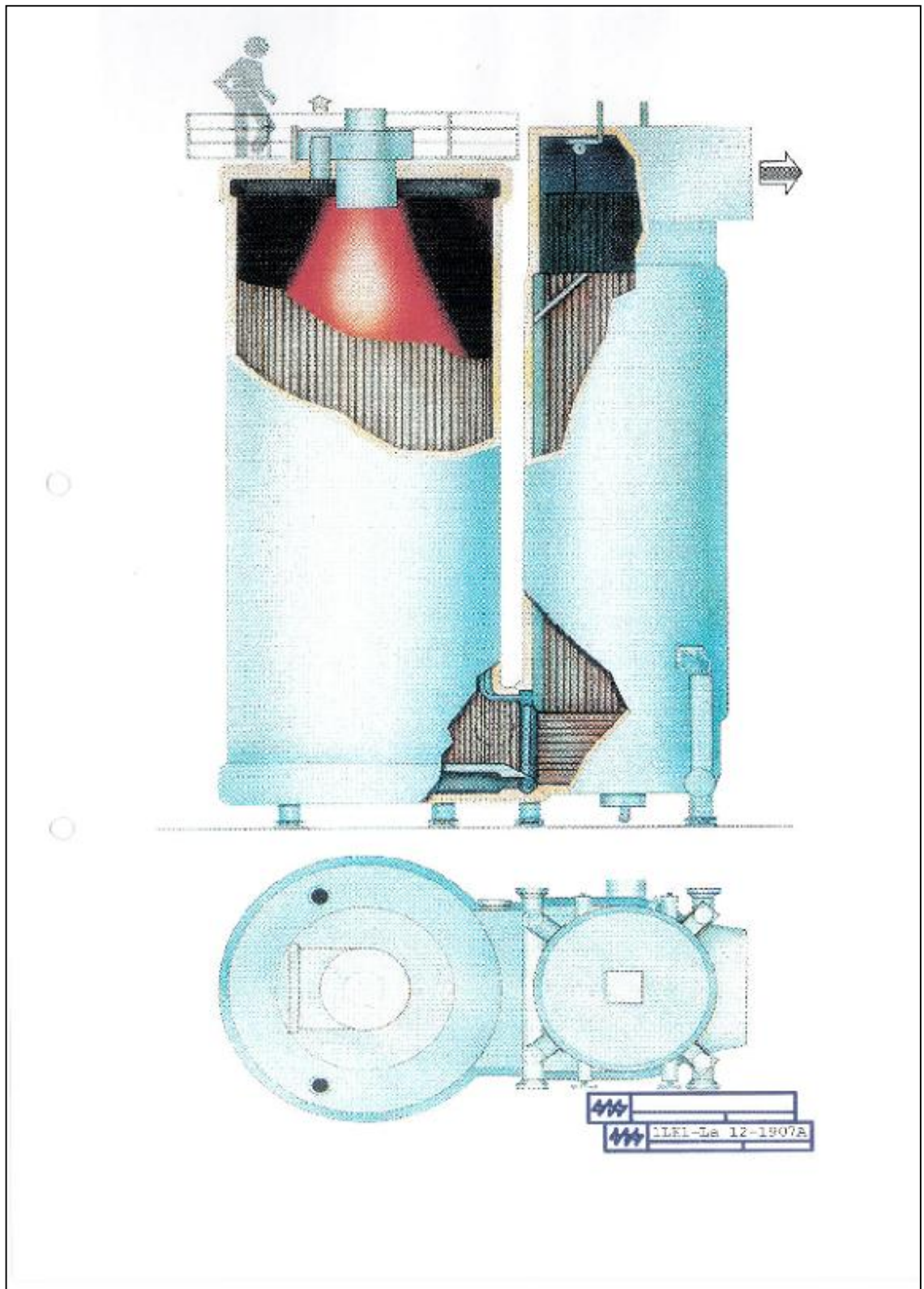
- 1 Organisaatio. 2011. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <<http://helen.fi/yritys/organisaatio.html>>. Luettu 14.11.2011.
- 2 Historian pääkohdat. 2011. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <<http://helen.fi/yritys/historia.html>>. Luettu 14.11.2011.
- 3 Helsingin Energia 100 vuotta, miten tänne tultiin. 2011. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <<http://www.helen.fi/yritys/arkisto/aikajana.html>>. Luettu 14.11.2011.
- 4 Helen-konserni. 2011. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <<http://www.helen.fi/yritys/helen.html>>. Luettu 14.11.2011.
- 5 Aurinkoenergiaa, maalämpöä ja biopolttoaineita. 2011. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <http://www.helen.fi/palvelut/helen/1102Helenb.pdf> . Luettu 18.11.2011.
- 6 Galkin-Aalto, Marina. 2011. Tuulta päin. Impulssi 6/2011, s.4 - 7.
- 7 Helenin energiatulevaisuus. 2011. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <<http://intra/tjak/Sivut/Default.aspx>>. Luettu 18.11.2011.
- 8 Koskelainen, Lasse, Saarela, Lauri & Sipilä, Kari. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus ry.
- 9 Huhtinen, Markku, Korhonen, Risto, Pimiä, Tuomo & Urpalainen, Samu. 2008. Voimalaitostekniikka. Helsinki: Opetushallitus.
- 10 Helen-konsernin vuosikertomus. 2010. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <http://www.helen.fi/vuosi2010/Helen_vuosikertomus_2010.pdf>. Luettu 21.11.2011.
- 11 Kaukolämpö. 2011. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <<http://www.helen.fi/kaukolampo/index.html>>. Luettu 21.11.2011.
- 12 Kaukolämpöverkko. 2011. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <http://www.helen.fi/kaukolampo/kl_verkko.html>. Luettu 21.11.2011.
- 13 Teittinen, Pekka. 2011. Kunnossapidon asiantuntija, Laitosten kunnonhallinta, Helsingin Energia, Helsinki. Haastattelu 2.12.2011.
- 14 Kuoppa, Martti. 2011. Prosessiasiantuntija, Laitosten kunnonhallinta, Helsingin Energia, Helsinki. Haastattelu 9.12.2011.
- 15 Sairanen, Martti. 1995. TF35 -kattilan huolto- ja käyttöohjeet. Kaarina: Foster Wheeler Energia Oy.
- 16 Huhtinen, Markku, Kettunen, Arto, Nurminen, Pasi & Pakkanen, Heikki. 2000. Höyrykattilatekniikka 5. painos. Helsinki: Edita Prima Oy.

- 17 Huhtinen, Markku, Virkki, Jorma, Kaurala, Ossi & Orpana, Kari. 2006. Raskaan polttoöljyn käyttöopas. Espoo: Neste Oy.
- 18 Sulzer Pumps Finland Oy. 2010. Pumpun tekninen erittely. Helsinki: Sulzer Pumps Finland Oy.
- 19 Processair Oy. 1995. Palamisilmapuhaltimentekninen erittely. Helsinki: Processair Oy.
- 20 Processair Oy. 1995. Hajotusilmapuhaltimen tekninen erittely. Helsinki: Processair Oy.
- 21 Maakaasun koostumus ja ominaisuudet. 2010. Verkkodokumentti. Suomen kaasuyhdistys. <<http://www.maakaasu.fi/kirjat/maakaasukasikirja/maakaasun-koostumus-ja-ominaisuudet>>. Luettu 17.10.2011.

Helsingin Energian kaukolämpöverkon kartta [12]



Kattiloiden 3 ja 4 kuvat ja mitoitusarvot [15]




FOSTER WHEELER ENERGIA OY

 Suunnittelu/
 M Sairanen/NÖs

HUOLTO- JA KÄYTTÖOHJEET 9 (29)

TF 35

Lassilan huippulämpökeskus

Kuurina

16.11.1995

 3
 MITOITUSARVOT

Lämpöteho jatk kuormalla maks.	47 MW/kattila
Lämpöteho jatk kuormalla min	8 MW/kattila
Suunnittelupaine (ylipaine)	1,6 MPa
Suunnittelulämpötila	160°C
Kuormitusalue, jatkuva	20-100 %
Polttoaine	MASTERA LS 180
- tehollinen lämpöarvo	41 MJ/kg
Menoveden lämpötila	120°C
Paluuveden lämpötila	70°C
Paluuveden lämpötila	
- kaasulla	60°C
- öljyllä	80°C
Savukaasujen lämpötila (ohj.)	160°C
Savukaasujen lämpötila min.	125°C

Kattilan muut arvot

Päämitat	
- pituus	6,6 m
- leveys	3,7 m
- korkeus	11,3 m
- paino tyhjänä sis. crist.	64 tn
Vesitilavuus	31,3 m ³

Talipesä	
- korkeus	9,6 m
- halkaisija	3,2 m
- tilavuus	77 m ³
- pinta-ala	110 m ²

Tilavuuskuormitus 100 %:n kuormalla	650 kW/m ³
Välikanavan pinta-ala	15,0 m ²
Konvektio-osan pinta-ala	850 m ²
- varustettu turbulenssielimillä	
Kokonaistilipinta	960 m ²
Vesipuolen painehäviö täydellä teholla, kun delta t = 45°C	50 kPa

Rakennusaineet

Seinäputkien mitat	ø 57x4 mm
Konvektioputkien mitat	ø 51x4 mm
Putkimateriaali	St 37.8/1
Levy materiaali	Raxx 383P



FOSTER WHEELER ENERGIA OY

Suunnittelu/
M Sairanen/NÖa

HUOLTO- JA KÄYTTÖOHJEET 10 (29)

TT 35
Lassilan huippulämpökeskus

Kaarina
16.11.1995

4 KÄYTTÖARVOT

4.1 Lasketut käyttöarvot puhtaal kattilalle

		Kaasu	Öljy
Kattilan kuormitus	MW	47	47
Kattilan hyötysuhde (ohjearvo)	%	95,1	94,2
Savukaasun lämpötila	°C	126	153
O ₂ -pitoisuus	%	2,5	2,5
Nokiluku Bacharach		1-3	1-3
Vesimäärä	kg/s	187	280
Kattilan menoveden lämpötila	°C	120	120
Paluuv veden lämpötila kattilaa	°C	60	80
Savukaasupuolen painehäviö (kattila)	Pa	4500	3000
Vesipuolen painehäviö	kPa	28	50

Kaukolämpöpumppujen mitoitusarvot ja käyrästä [19]

SULZER	
Sulzer Pumps Finland Oy	
TOIMITUSERITTELY	
Asiakas Helsinki Energia Lassilan lämpökeskus/ Sääkselähti Rant Kauppianta 1 FI-00440 HELSINKI As. tilaenumero: 09:03:0940 As. postiosoikeus: Maa- ja kunnat: FI	Kuvitus: A51-3001 Valmistusnumero: 100076585 Viitenumero: 137723910010 Toimituspaikka: 23.04.2016 Toimituspäivä: 03.06.2016 Sivu 1
Helsingin Energia FI-00000 HELEN	Helsingin Energia FI-00000 HELEN
Toimitusnumero: 0601	
TOIMITUSAAJATUS Tuotekategoria: Pumppu tuote Tuotteen toimintatila: Pumppu Tuotteen toimintatila: Asennusosat Asennusvaihe: Kytkeyksikkö Pumpun toimintatila: Pumpausosat Pumpun toimintatila: Laakerointiyksikkö	Käyttömoottorin toimintatila: Toimittajan moottori Tuotteen toimintatila: Käyttömoottori Tuotteen toimintatila: Dokumentit Asennusvaihe: Perustustyö Pumpun toimintatila: Tiivisteyksikkö Dokumenttien toimintatila: Toimituksen mukana
HWGSH-SSU79-0201 Painesäiliö: 1300 Yksiköt: SE Pumpattava neste: KAUKOLÄMPÖVESI Tiheys: 942,9 kg/m ³	Lämpötila: 120,0 °C NPSH käytännössä: 10,0 m Tiivisteaine C: 444,0 litraa Nestekorkeus H: 65,0 m
TUOTE Pumputyyppi: A, Prosessipumppu Versio: Versio 12 Luovutusnimike: 2000/42EY Sääntöjen käsittely: Standardi pintakäsittely Ulkopinnat käsittely: Standardi pintakäsittely Testi: Materiaalitestit EN 10204-2.2 Testi: Materiaalitestit Luokitus: B, Esisuunniteltu	Hikekäsittely ja materiaalit: Koeponnistustodistus testien testit: Pumpausosien ominaisuus testi Luovutusnimike: EN ISO 5199:2002, 9001:2000 Materiaaliluokka: Luokka B1 Ulkopinnat käsittely: Pintakäsittelytodistus Testit: Pumpausosien testit Sulzer Testit: Pumpausosien ominaisuus todistus
PUMPPU Pumpun versio: Versio 12 Pumpausosan versio: Versio 12 Pumpukoko: 51-300 Jakausjärjestelmä: Suljettu 1 Jakausjärjestelmä: 283928 Jakausjärjestelmä: Tasapainorelat Jakausjärjestelmä: halkaisija: 456,0 mm Jakausjärjestelmä: max.halkaisija: 456,0 mm Jakausjärjestelmä: halkaisija: 390,0 mm	Pesäkkeiden määrä: (41) A830 3A Pesäkkeiden halkaisijat: EI sisälly toimitukseen SU, laadi väleön materiaali: (E3) Klingler SIL C-4430 Akseliliityksen materiaali: C/SiC Akseliliityksen materiaali: SiC, kierto, huuhleto neste Tiivisteputki: Sisäisenkierron putki Tiivisteputkien väli: EI lämpökäsitellyllä C46 Tiivisteputkien halkaisija: 683, Seojat Pumpausosan pintakäsittely: Standardi pintajen käsittely
Sulzer Pumps Finland Oy Kabinan myynti PO Box 66 00981 KOTKA	Yhteystiedot: Jorma Naukkanen Myyntilähtö: 000157723 Myyntilähtö: 000191 Viitenumero: 137723910010 Puhelin: 010 2543303 Faksi: 010 2343351

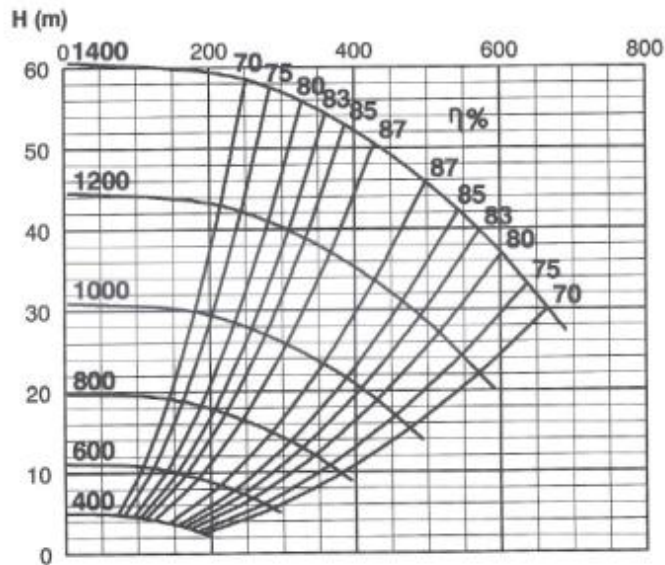
AHLSTAR^{UP} A51-300 (350-300-400) Speed Curve K51826

SULZER

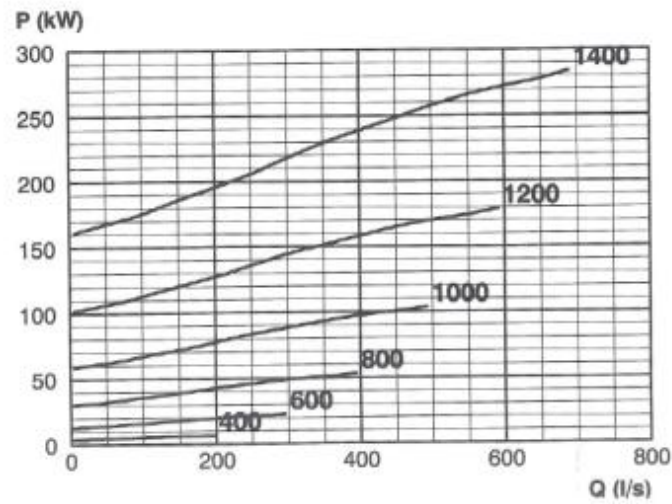
COPYRIGHT © SULZER PUMPS FINLAND OY

Version 12 / 20060501 / K51826 / 1.0

Impeller type: Closed1 / 283928 B69 Z7
Variable rotational speed: 400 ... 1400 rpm



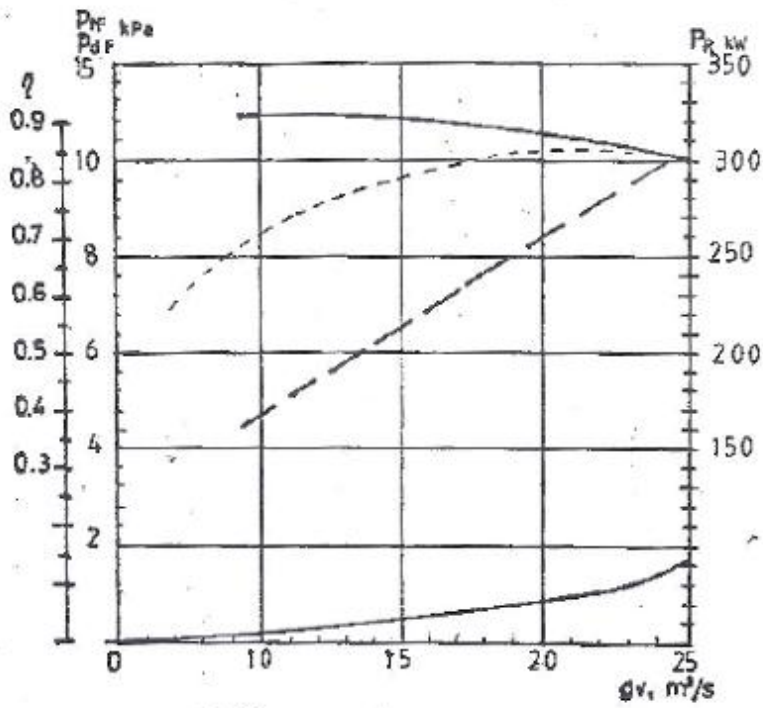
IMPELLER DIA	
(mm)	deg
456	6



Palamisilmapuhaltimien mitoitusarvot ja käyrästä [20]

00-11-1995 ERF40		PROY PROCESSAIR OY		TJ 541642232		S.21	
PROCESSAIR OY YLISTÖRMÄENTIE 3140500 JYVÄSKYLÄ Puh 041-642223 FAX 041-642218 ESNOJALATIE 12 0440700 HELSINKI Puh 00-3472755 FAX 00-3472755				TEKNINEN ERITTELY TECHNICAL SPECIFICATION		Merkki Destination <i>Lassila</i>	
As. ville Clients ref. <i>512141/MLÖ</i>				Villäsnime Cur. ref. <i>T-95158</i>		Pvm. Date <i>27.04.95</i>	
Asiakas Customer							
Tönn. Deliv.	Til. Order	Käyttö Application <i>Palamisilmapuhaltin</i>					
2		Puhaltin Fan <i>PFC-B-85/1663-K-c</i>					Asento Discharge <i>RDO</i>
Suoritusarvot Performance		Qv <i>17.47</i> m ³ /s	Pv <i>11635</i> Pa	Pz <i>535</i> Pa	Pz <i>237.7</i> kW		
		Fso <i>100000</i> Pa	Pi <i>1.168</i> kg/m ³	n <i>1485</i> 1/min	t _i <i>25</i> °C		
2		Moottori Motor <i>ABB HXR-355S4 B3 250kW 1485 1/min</i>				<input type="checkbox"/> Kristyhdiskot Slide rails	
2		<input type="checkbox"/> Ihmekäyttö Belt drive	<input checked="" type="checkbox"/> Kytkin Coupling	<input type="checkbox"/> Vahdelt Gear box	<input type="checkbox"/> Suora käyttö Direct drive	<input type="checkbox"/> Jäähdytyslaitteisto Cooling unit	<input checked="" type="checkbox"/> Suojakäsi Ing. guard
2		Johtolinjoitus Inlet valve control <i>PIS-85</i>		Kotimateriaali Material <i>Fe</i>	Säädin Control <i>AUMA SAR 07.5-E11-10</i>		
2		Joustava liitin Flex. connector		<input checked="" type="checkbox"/> Inlet	<input checked="" type="checkbox"/> Poistop. Outlet	Tyyppi Type <i>KE Burqmann</i>	
2		<input checked="" type="checkbox"/> Inlet laippa Inlet flange	<input checked="" type="checkbox"/> Poistop. Outlet flange	<input type="checkbox"/> Tulonauha Inlet nozzle	<input type="checkbox"/> Diffusori Diffuser	<input type="checkbox"/> Imuistatko Suction chamber	
2		Laakerointi Bearing	<input checked="" type="checkbox"/> Väärittö Roller type	<input type="checkbox"/> Muu Notes			
		2 kpl peusi 2 bearing housing <i>SNH-524</i>		Ohjauksenauha Locating ring <i>FRB 5/215</i>	2 kpl liivisepari 2 seal set <i>TA</i>		
		2 kpl laakeri 2 bearing <i>23224 CC3/W33</i>		2 kpl Kristyhdiskö 2 adapter sleeve <i>H 2324</i>			
		Tiviste Shaft seal		<input type="checkbox"/> Bakki Box	<input checked="" type="checkbox"/> x	<input type="checkbox"/> Luterangan Mechanical	<input type="checkbox"/>
2		<input checked="" type="checkbox"/> Tark. luuku Access door /		Sijainti Position	<input checked="" type="checkbox"/> Vedonauha Drain	<input type="checkbox"/> Suutin Nozzle /	
2		<input checked="" type="checkbox"/> Teräskäyttö Base frame	<input checked="" type="checkbox"/> Valmistettu Ready installed	<input checked="" type="checkbox"/> Kappelin Mechanical testing	<input type="checkbox"/>		
2		Tärinämitoit. Antivibration mounting		<input type="checkbox"/> 1 LV	<input checked="" type="checkbox"/> 3 LV	<input type="checkbox"/>	
		Muuta Others					
Materiaali Materials		Sieppi Impeller <i>Hardox 400</i>	Akseli Shaft <i>Fe 62</i>	Käsi Housing <i>Fe 37 B</i>	Jäykkäys Stiffeners <i>Fe 37 B</i>		
		Tulokätkö Inlet cone	Runko Frame <i>Fe 37 B</i>	Muuta Others			
Pintakäs. Finish		Käsi/runko - ulkopuol. Housing/frame - outside	<input checked="" type="checkbox"/> Madolux stand Accord stand <i>A 80/2 Fe Pe</i>	Sävy Colour <i>TM-325</i>			
		Käsi/runko - sisäpuol. Housing/frame - inside	<input checked="" type="checkbox"/> Madolux stand Accord stand <i>A 80/2 Fe Pe</i>	Sävy Colour <i>!</i>			
		Ihmesuojus Drive guard	Sävy Colour <i>!</i>				
Pakkausnumero Number of packages		Bruttopaino Gross weight			Nettopaino Net weight		
Käsit. Measure		Määrä Volume					

PFC-B-85/1663-K-e



$D = 1663 \text{ mm}$
 $n = 1485 \text{ 1/min}$
 $\rho_s = 1168 \text{ kg/m}^3$
 $P_{at} = 100000 \text{ Pa}$

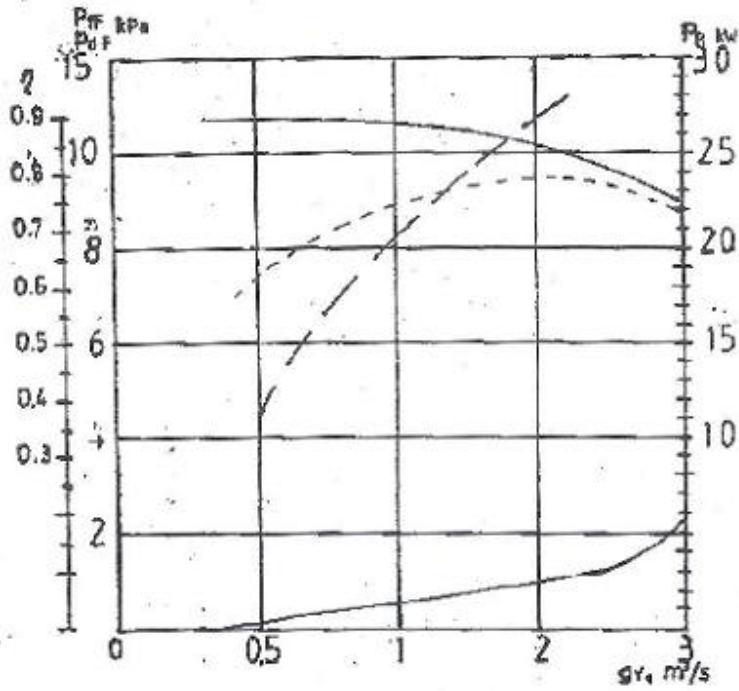
——— P_{1F}, P_{0F}
 - - - P_R
 ····· η

PROCESSAIR OY
Yhteisö Yhtiöt

Hajotusilmapuhaltimien mitoitusarvot ja käyrästä [21]

PROCESSAIR OY		TEKNINEN ERITTELY TECHNICAL SPECIFICATION	
YLISTÄÄNTIE 31,00200 JYVÄSKYLÄ Puh 011-542203 FAX 011-542203		Merkki Destination <i>Lassila</i>	
ESKELÄNTIE 12-14,00200 HELSINKI Puh 00-3472759 FAX 00-3472759		Toimitusajankohta Deliv. date	
As. vllle Client ref. <i>512141/ML0</i>		Valtuutus Our ref. <i>T-95158</i>	
		Pak. Item <i>2</i>	
		Pvm. Date <i>27.04.95</i>	
Asiakas Customer			
Item Deliv.	TL Order	Kohde Application <i>Palamisilmapuhallin</i>	
	<i>2</i>	Puhallin Fan <i>PFH-B-22/761-M-e</i>	Asento Discharge <i>LG0</i>
Suoritusarvot Performance		Q_v <i>1.02 m³/s</i>	P_v <i>11565 Pa</i>
		P_e <i>465 Pa</i>	P_s <i>15.7 W</i>
		P_{10} <i>11100 Pa</i>	n <i>2930 1/min</i>
		P_1 <i>1.27 kg/m³</i>	t_1 <i>35.0 °C</i>
	<i>2</i>	Kooltori Motor <i>HXA18AM2 B5 22.0kW 2930/min</i>	<input type="checkbox"/> Kristalliset Slide rails
	<i>2</i>	<input type="checkbox"/> Hihkäsäädöllä Belt drive <input type="checkbox"/> Kytkinkäyttö Coupling <input type="checkbox"/> Vaihde Gear box <input checked="" type="checkbox"/> Suora käyttö Direct drive <input type="checkbox"/> Jäähdytyskierros Cooling disc <input type="checkbox"/> Puojärjestelmä Ing. guard	
		Joustosäätö Inlet valve control	Materiaali Material
	<i>2</i>	Joustava liitin Flex. connector <input checked="" type="checkbox"/> Inp. liitin Inlet <input checked="" type="checkbox"/> Pääp. liitin Outlet <input type="checkbox"/> Tyyppi Type <i>KE Burgmann</i>	<input type="checkbox"/> Kulutuslevyt Wearing plates
	<i>2</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Inp. loppu Inlet flange <input checked="" type="checkbox"/> Pääp. loppu Outlet flange <input type="checkbox"/> Tulosuutin Inlet nozzle <input type="checkbox"/> Diffusori Diffuser <input type="checkbox"/> Imusäiliö Suction chamber	
		Loakerahitit Bearing <input type="checkbox"/> Vierintä Roller type <input type="checkbox"/> Huom. Notes	
		2 kpl pesä 2 bearing housing	Ohjusringas Locating ring
		2 kpl tiivistys 2 seal set	2 kpl tiivistysosat 2 seal set
		Tiiviste Shaft seal <input type="checkbox"/> Boks Box <input type="checkbox"/> Lukkurengas Mechanical <input type="checkbox"/>	
		<input type="checkbox"/> Tark. lukku Access door <input type="checkbox"/> Sijainti Position <input type="checkbox"/> Vedon yläosa Inlet <input type="checkbox"/> Suutin Nozzle <input type="checkbox"/>	
	<i>2</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Teräsrunko Base frame <input checked="" type="checkbox"/> Valmiiksi koottu Ready installed <input checked="" type="checkbox"/> Keskitystestaus Mechanical testing <input type="checkbox"/>	
	<i>2</i>	Tärinävoimennäköiset Anti-vibration mountings <input type="checkbox"/> 1LY <input checked="" type="checkbox"/> 3LY <input type="checkbox"/>	
Muuta Others			
Materiaalit Materials			
Säppö Impeller <i>Hardox 400</i>		Akseli Shaft <i>-</i>	Koivu Housing <i>Fe 37 B</i>
Tulokanala Inlet cone		Runko Frame <i>Fe 37 B</i>	Muuta Others
Käsi/runko - ulkopuol. Housing/frame - outside		<input checked="" type="checkbox"/> Nodulus stand. Accord. stand. <i>A 80/2 Fe Pe</i>	Sävy Colour <i>1 TM 325</i>
Käsi/runko - sisäpuol. Housing/frame - inside		<input checked="" type="checkbox"/> Nodulus stand. Accord. stand. <i>A 80/2 Fe Pe</i>	Sävy Colour <i>1</i>
Häviösuoja Drive guard			Sävy Colour <i>1</i>
Pakkauksen määrä Number of packages		Bruttopaino Gross weight	Nettopaino Net weight
Mitat Measures		Tilavuus Volume	

PFH-B-22/761-M-x



$D = 761 \text{ mm}$
 $n = 2930 \text{ /min}$
 $\rho_a = 1.27 \text{ kg/m}^3$
 $P_{at} = 111100 \text{ Pa}$

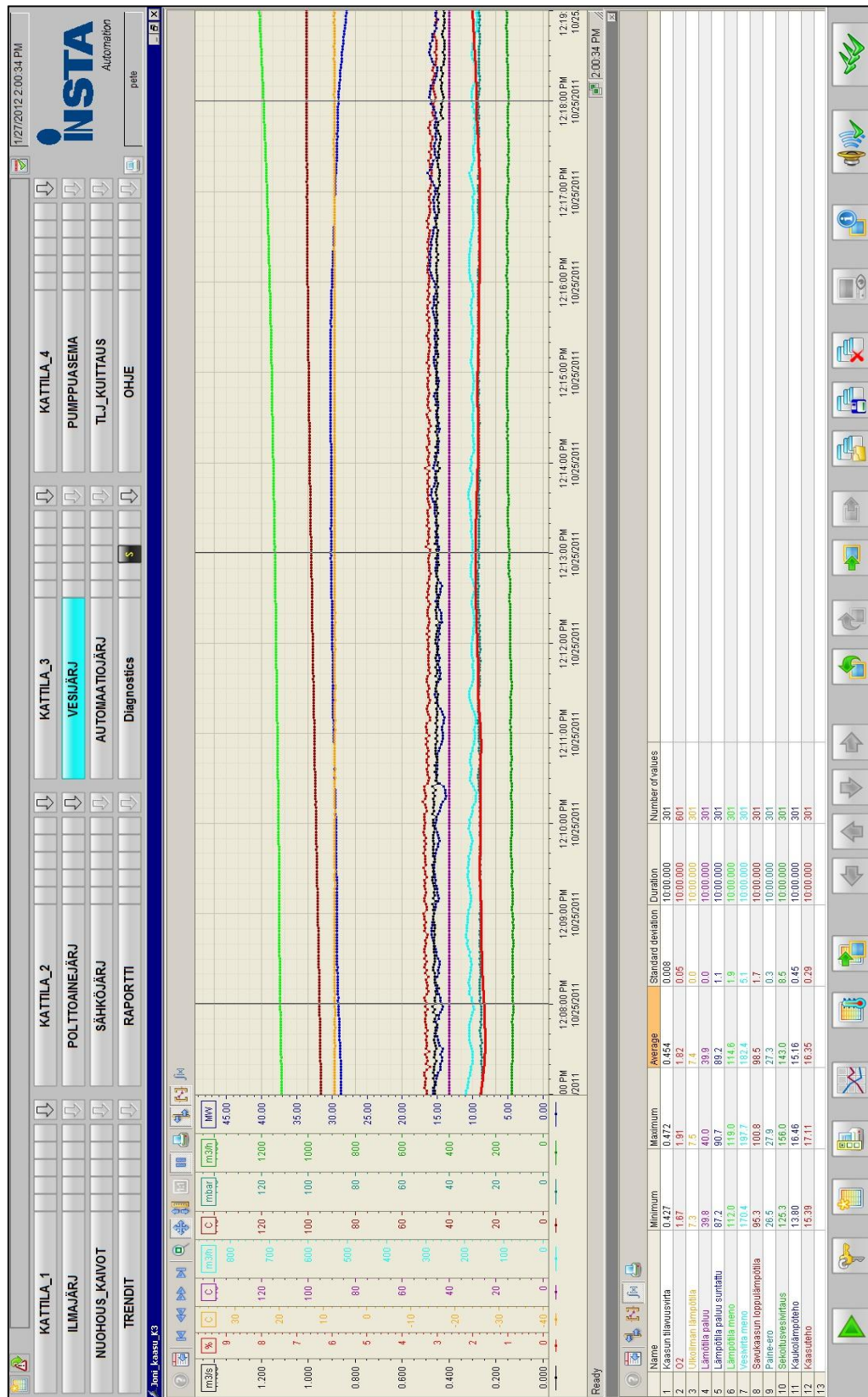
——— $P_{r,F}, P_{d,F}$
 - - - - P_r
 η

PROCESSION OY
 VEIKO Varkaus

Taajuusmuuntajien kootut tiedot

	Koodi #	Moottorit					Taajuusmuuntajat				
		Teho	Jännite	Virta	Pyörimisnopeus	Teho	Jännite	Virta	Keskus	Koodi	
		kW	U	A	rpm	kW	U	A	#	#	
Pakupumppu D601	4UN10D601	315	690	660	1500	355	690	344	4FL10	ACS800-04-0400-7	
Menopumppu D602	4UN10D602	315	690	660	1500	355	690	344	4FL10	ACS800-04-0400-7	
Pakupumppu D603	4UN10D603	315	690	660	1500	355	690	344	4FL20	ACS800-04-0400-7	
Menopumppu D604	4UN10D604	315	690	660	1500	355	690	344	4FL20	ACS800-04-0400-7	
Pakupumppu D605	4UN15D605	315	690	660	1500	355	690	344	4FL30	ACS800-04-0400-7	
Menopumppu D606	4UN15D606	315	690	660	1500	355	690	344	4FL30	ACS800-04-0400-7	
Lämminilmapuhallin LP kiertovesipumppu	4UW27D442 4UN35D804	23 0,36	400	59	975	0,36??			4FD40 4FD41	ACS550-01-03A3-4	
K3 palamisilmapuhallin D301	4WG30D301	250	400	450		250	400	516	4DA30	ACS800-04-0320-3	
K3 Sekoitusvesipumppu D001	4WB39D001	35	400	75		45	400	80	4DA30	ACS800-04-0050-3	
K3 hajotusilmapuhallin D311	4WG31D311	25	400	42		15	400	42	4DA30	ACS800-04-0020-3	
K4 palamisilmapuhallin D301	4WG40D301	250	400	450		250	400	516	4DA40	ACS800-04-0320-3	
K4 Sekoitusvesipumppu D001	4WB49D001	35	400	75		45	400	80	4DA40	ACS800-04-0050-3	
K4 hajotusilmapuhallin D311	4WG41D311	25	400	42		15	400	42	4DA40	ACS800-04-0020-3	
Lämminilmapuhallin D142	4UW24D142	27,5	400	57,5	975	30	400	57	4CL10	ACS800-04-0035-3	
Lämminilmapuhallin D242	4UW25D242	27,5	400	57,5	975	30	400	57	4CL10	ACS800-04-0035-3	
Lämminilmapuhallin D342	4UW26D342	27,5	400	57,5	975	30	400	57	4CL10	ACS800-04-0035-3	
LP kiertovesipumppu D801	4UN34D801	3	400	3,3		1,5	400	3,4	4CL10	ACS800-04-0003-3	
LP kiertovesipumppu D803	4UN34D803	3	400	3,3		1,5	400	3,4	4CL10	ACS800-04-0003-3	
LP kiertovesipumppu D805	4UN34D805	3	400	3,3		1,5	400	3,4	4CL10	ACS800-04-0003-3	

Esimerkki automaatiosta saatavasta käyrästä



Kattiloiden 3 ja 4 sähkötehojen Excel-taulukko

25.10.2011

Mittaus	PA TEHO P MW	K3 palamisilmapuhallin 4WG30D301 %	K3 hajotusilmapuhallin 4WG31D311 %	K3 sekoitusvesipumppu 4WB39D301 %	Aloitusaika klo	Lopetusaika klo
1	16	25,5	42,9	19,6	12.08	12.18
2	24	30,7	47,3	16,6	09.18	09.28
3	32	38,0	47,1	17,6	09.44	09.54
4	40	47,6	47,4	19,2	10.05	10.15
5	50	59,4	48,2	21,4	11.09	11.19

Mittaus	PA TEHO P MW	K4 palamisilmapuhallin 4WG40D301 %	K4 hajotusilmapuhallin 4WG41D311 %	K4 sekoitusvesipumppu 4WB49D301 %
1	16	27,2	45,5	20,9
2	24	31,4	47,4	16,7
3	32	38,3	45,7	17,6
4	40	47,8	46,5	19,0
5	50	59,8	50,1	22,1

Mittaus	PA TEHO MW	KL-paluuumpu D601 4UN10D601 %	KL-paluuumpu D603 4UN10D603 %	KL-menopumppu D602 4UN10D602 %	KL-menopumppu D604 4UN10D604 %
1	16	27,3	-	-	-
2	24	32,0	-	-	-
3	32	38,7	-	-	-
4	40	46,4	-	-	-
5	50	53,8	-	-	-

Mittaus	PA TEHO P MW	Lämmintilmapuhallin 4UW27D442 %	LI kiertovesipumppu 4UN35D804 %	Lämmintilmapuhallin 1 4UW24D142 %	L11 kiertovesipumppu 4UN34D801 %
1	16	0	66,7	0	66,7
2	24	0	66,7	0	66,7
3	32	54,7	66,7	0	66,7
4	40	100	66,7	0	66,7
5	50	100	66,7	0	66,7

Mittaus	PA TEHO P MW	Lämmintilmapuhallin 2 4UW25D242 %	L12 kiertovesipumppu 4UN34D803 %	Lämmintilmapuhallin 3 4UW26D342 %	L13 kiertovesipumppu 4UN34D805 %
1	16	0	66,7	0	66,7
2	24	0	66,7	0	66,7
3	32	0	66,7	0	66,7
4	40	0	66,7	0	66,7
5	50	0	66,7	31,9	66,7

2.5.01.2012

Mittaus	PA TEHO P MW	K3 palamisilmapuhallin 4WG30D301 %	K3 hajotusilmapuhallin 4WG31D311 %	K3 sekoitusvesipumppu 4WB39D301 %	Aloitusaika klo	Lopetusaika klo
1	16	10,7	13,4	9,0	13,12	13,22
2	24	17,2	15,2	7,6	14,02	14,12
3	32	29,6	15,4	7,8	14,23	14,33
4	40	43,8	14,2	7,2	14,46	14,56
5	48	68,3	18,3	12,3	15,12	15,22

Mittaus	PA TEHO P MW	K4 palamisilmapuhallin 4WG40D301 %	K4 hajotusilmapuhallin 4WG41D311 %	K4 sekoitusvesipumppu 4WB49D301 %
1	16	-	-	-
2	24	-	-	-
3	32	-	-	-
4	40	-	-	-
5	48	-	-	-

Mittaus	PA TEHO MW	KL-paluuumpumppu D605 4UN10D601 %	KL-paluuumpumppu D603 4UN10D603 %	KL-menopumppu D602 4UN10D602 %	KL-menopumppu D606 4UN10D604 %
1	16	12,1	-	-	-
2	24	13,0	-	-	-
3	32	18,3	-	-	-
4	40	22,8	-	-	-
5	48	28,1	-	-	-

Mittaus	PA TEHO P MW	Lämmintilmapuhallin 4UW27D442 %	LI kiertovesipumppu 4UN35D804 %	Lämmintilmapuhallin 1 4UW24D142 %	LI1 kiertovesipumppu 4UN34D801 %
1	16	0	66,7	0	66,7
2	24	0	66,7	0	66,7
3	32	0	66,7	0	66,7
4	40	0	66,7	0	66,7
5	48	0	66,7	0	66,7

Mittaus	PA TEHO P MW	Lämmintilmapuhallin 2 4UW25D242 %	LI2 kiertovesipumppu 4UN34D803 %	Lämmintilmapuhallin 3 4UW26D342 %	LI3 kiertovesipumppu 4UN34D805 %
1	16	0	66,7	0	66,7
2	24	0	66,7	0	66,7
3	32	0	66,7	0	66,7
4	40	0	66,7	0	66,7
5	48	0	66,7	0	66,7

Polttoaineiden tyypillisiä lämpöarvoja [21]

Polttoaineiden lämpöarvoja

	Maakaasu	Propani	Kevyt pö	Raskas pö
Tiheys	0,72 kg/m ³	2,01 kg/m ³	0,85 kg/dm ³	0,96kg/dm ³
Ylempi lämpöarvo MJ/m ³ n	39,8	101,2		
Ylempi lämpöarvo MJ/kg	55,3	50,3	44,6	44,4
Tehollinen lämpöarvo MJ/m ³ n	36,0	93,0		
Tehollinen lämpöarvo MJ/kg	50,0	46,0	42,7	40,6
Tehollinen lämpöarvo kWh/kg	13,9	12,8	11,8	11,3
Tehollinen lämpöarvo kWh/m ³ n	10,0	28,8		

Öljy- ja kaasupolttoaineiden polton kaasuvirrat [16, s. 88]

		Raskas polttoöljy	Kevyt polttoöljy	Maakaasu	Nestekaasu propani
Hapentarve	kmol/kgpa	0.0984	0.106	0.124	0.113
	kg/kgpa	3.15	3.39	3.97	3.63
Ilmantarve	kmol/kgpa	0.471	0.505	0.594	0.545
	m ³ n/kgpa	10.6	11.3	13.3	12.2
	kg/kgpa	13.7	14.6	17.2	15.7
Kostea savukaasuvirta	kmol/kgpa	0.498	0.540	0.653	0.591
	m ³ n/kgpa	11.1	12.1	14.7	13.2
	kg/kgpa	14.6	15.6	18.1	16.7
Kuiva savukaasuvirta	kmol/kgpa	0.459	0.467	0.530	0.496
	m ³ n/kgpa	10.0	10.5	11.9	11.1
	kg/kgpa	13.7	14.3	15.9	15.0
Savukaasun molekyylipaino kg/kmol	kosteat kaasut	29.3	28.9	27.7	28.4
	kuivat kaasut	30.8	30.6	30.0	30.3
Savukaasun mooliosuudet	N ₂	0.751	0.741	0.716	0.724
		0.836	0.847	0.883	0.862
	H ₂ O	0.101	0.126	0.189	0.161
		0.0	0.0	0.0	0.0
<u>kosteat</u> kuivat	CO ₂	0.147	0.133	0.095	0.116
		0.164	0.152	0.117	0.138
Savukaasun tiheys kg/m ³ n	kosteat kaasut	0.0006	0.0001	0.0	0.0
		0.0007	0.0001	0.0	0.0
Savukaasun tiheys kg/m ³ n	kuivat kaasut	1.31	1.29	1.23	1.26
		1.37	1.36	1.34	1.35
X _{CO2maks} mooliosuus	kosteat kaasut	0.147	0.133	0,095	0.116
		0.164	0.152	0.117	0.138