

Prosessihöyrykattilan ylöslämmityksen energiatehokkuus

Topi Saarenpää

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2015

Energiatekniikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala





Tekijä(t) Saarenpää, Topi	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 22.04.2015
	Sivumäärä 64	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty (X)
Työn nimi Prosessihöyrykattilan ylöslämmityksen energiatehokkuus		
Koulutusohjelma Energiatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Marjukka Nuutinen Matti Kurki		
Toimeksiantaja(t) Kokkolan Energia Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö tehtiin Kokkolan kaupungin omistamalle energiayhtiölle Kokkolan Energialle, joka tuottaa prosessihöyryä, kaukolämpöä ja sähköä Kokkolan kaupungille sekä Kokkolan teollisuusalueen yrityksille. Opinnäytetyön ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää, voisiko toimeksiantajan K2-prosessihöyrykattilan ylöslämmityksiä nopeuttaa tukemalla käynnistyspoltinta esilämmittämällä leijutusilmaa. Toisena tavoitteena oli analysoida vuoden 2014 ylöslämmitysten mittausdataa ja etsiä syitä ylöslämmitysten kestoeroihin. Kolmantena tavoitteena oli esittää kehitysideoita ylöslämmitysten nopeuttamiseksi ja energiatehokkuuden parantamiseksi.</p> <p>Opinnäytetyön tietoperusta koottiin kirjallisuuden sekä kattilavalmistaja Putkimaan kattilan käyttö- ja hoito-ohjeiden avulla. Kattilan ylöslämmitysten energiatehokkuuden arviointia varten tutkittiin energia- ja prosessitietojen hallintajärjestelmään TOPiin tallentuneita mittatietoja vuodelta 2014. Mittatietojen, tietoperustaan liittyvien yhtälöiden ja kattilavalmistajan tietojen avulla tehtiin laskelmia ylöslämmitysten energiatehokkuudesta.</p> <p>Opinnäytteen merkittävin tulos on ylöslämmitysten mittatietojen yhteen kokoaminen ja niiden analysoiminen. Analysoinnin tuloksena Kokkolan Energia sai tietoa prosessihöyrykattilan vuoden 2014 ylöslämmitysten energiatehokkuuksista. Tietojen analysoinnin tuloksena selvisi, että erilaiset kattilan operointitavat ylöslämmityksissä ovat aiheuttaneet sekä suuria eroja energiatehokkuuteen että kattilan käyttöiän lyhenemistä. Opinnäytetyön tuloksia voidaan jatkossa käyttää nykyisten operaattoreiden tukena ylöslämmityksissä sekä myös apuna uusien operaattoreiden koulutuksessa.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Höyrykattila, leijupeti, leijupoltto, lämmönsiirto, ylösajo, ylöslämmitys		
Muut tiedot		



Author(s) Saarenpää, Topi	Type of publication Bachelor's thesis	Date 22.04.2015
		Language Finnish
	Number of pages 64	Permission for web publication (X)
Title of publication Energy efficiency of steam boiler on startup		
Degree Programme Degree Programme in Energy Technology		
Tutor(s) Nuutinen, Marjukka Kurki, Matti		
Assigned by Kokkolan Energia Ltd		
Abstract <p>The thesis was assigned by Kokkolan Energia Ltd which is an energy company owned by the city of Kokkola. Kokkolan Energia produces process steam, district heating and electricity for both the city of Kokkola and companies in in the industry area in Kokkola. The first goal of the thesis was to examine if preheating primary air of the steam boiler would speed up the startup of the K2 boiler. The second goal was to analyze the K2 startup data from 2014 and find the reasons for differences in durations. The third goal was to present ideas to increase energy efficiency of startups and to accelerate them.</p> <p>The information of the technical and theoretical matters of steam boilers was studied through literature and user manuals and maintenance guides provided by the manufacturer of K2 boiler, Putkimaa Ltd. The measurement data were collected through the energy and process management program TOPI in order to examine the energy efficiency of the startups. Together with the measurement data, equations based on the theoretical part of the thesis and the handing guide provided by the boiler manufacturer, calculations were made to determine the energy efficiency of the startups.</p> <p>The most important result of the thesis is gathering the measurement data on startups together and analyzing them. This was done to provide information on the energy efficiency of startups for Kokkolan Energia. The results pointed out that different boiler operating methods have caused both big differences in energy efficiency and decreased the boilers' life cycle. In the future, the results can be used both to assist the current operators on startups and to train new operators.</p>		
Keywords/tags (subjects) Steam boiler, fluidized bed, fluidized bed combustion, heat transfer, startup		
Miscellaneous		

Sisältö

1 Energiatehokkuuden merkitys	4
2 Opinnäytetyön tilaaja	5
2.1 Kokkolan Energia Oy	5
2.2 Voimalaitosprosessi	7
3 Höyrykattilan toimintaperiaate	8
3.1 Höyrykattilan vedenkeittoprosessi	8
3.2 Suurvesitilakattilat	10
3.3 Vesiputkikattilat	10
3.3.1 Luonnonkiertokattila	11
3.3.2 Pakkokiertokattila	12
3.3.3 Läpivirtauskattila	12
4 Vesiputkikattilan ylösajon vaiheet	14
4.1 Esivalmistelut	14
4.2 Kattilan täyttö	15
4.3 Puhaltimien käynnistäminen ja kattilan tuuletus	16
4.4 Käynnistyspolttimen sytyttäminen	16
4.5 Kattilan ylöslämmitys ja kiinteän polttoaineen syötön aloitus	17
4.6 Päähöyrylinjan lämmitys ja päähöyryventtiilin avaus	18
5 Höyrykattilan energiatehokkuus ja hyötysuhde	19
5.1 Energiatehokkuuden rakentuminen	19
5.2 Palamattomien kaasujen ja kiintoaineiden häviöt	20
5.3 Savukaasujen ja tuhkan termisen lämmön häviö	22
5.4 Säteilyhäviöt	23
6 Leijukerros poltto	24
6.1 Leijupolton periaate	24
6.2 Petimateriaalit	25
6.3 Leijupetityypit	26
6.4 Leijupolton hyötysuhde	27
7 Lämmönsiirtyminen	27
7.1 Johtuminen eli konduktio	27
7.2 Lämpösäteily	28
7.3 Konvektio	29
8 Palaminen	30
9 Lämpökapasiteetti	32

10 Kokkolan Energian K2-prosessihöyrykattila	34
11 Ylöslämmitysten mittausdatan analysointi	35
11.1 Mittausdatan kokoaminen	35
11.2 Petihiekan kunnon merkitys	36
11.3 Kiinteän polttoaineen laatu	37
11.4 Kattilan operointi ylöslämmityksessä	38
12 Ylöslämmitysten kustannusten arvioiminen	40
12.1 Petihiekan lämpökapasiteetti ja lämmönsiirtyminen petiin	40
12.2 Kiinteän polttoaineen käytön vaikutus kustannuksiin	42
12.3 Keskimääräisen ylöslämmityksen kustannusten kehittyminen	43
13 K2-kattilan ylöslämmityksen nopeuttaminen primääri-ilmaa esilämmittämällä	44
14 Tulosten pohdinta	46
14.1 Tavoitteiden saavuttaminen ja luotettavuus	46
14.2 Jatkoselvitykset ja -toimenpiteet.....	47
Lähteet.....	49
Liitteet	51
Liite 1. Kattilan ylöslämmitysten tunnusluvut vuodelta 2014.....	51
Liite 2. Ylöslämmityskäyrät 11.1. ja 1.3.	52
Liite 3. Ylöslämmityskäyrät 7.3. ja 5.4.	53
Liite 4. Ylöslämmityskäyrät 2.5. ja 4.5.	54
Liite 5. Ylöslämmityskäyrät 15.5. ja 5.6.	55
Liite 6. Ylöslämmityskäyrät 28.6. ja 18.7.	56
Liite 7. Ylöslämmityskäyrät 7.8. ja 18.8.	57
Liite 8. Ylöslämmityskäyrät 14.10. ja 20.10.	58
Liite 9. Ylöslämmityskäyrät 31.10. ja 5.11.	59
Liite 10. Ylöslämmitykset 17.11. ja 20.11.	60
Liite 11. Ylöslämmityskäyrät 23.11. ja 12.12.	61
Liite 12. Ylöslämmityskäyrät 23.12. ja 29.12.	62
Liite 13. Tulipesän muurauskuva	63
Liite 14. KPA-syötön lukitusivu	64

Kuviot

Kuvio 1. Höyrynjakelu Kokkolan teollisuusalueella	8
Kuvio 2. Höyrykattilan toimintaperiaate	9
Kuvio 3. Tulitorvikattilan toimintaperiaate	10
Kuvio 4. Luonnonkiertokattilan vesihöyrypiiri	11
Kuvio 5. Clausius-Rankine kierto-prosessi	13
Kuvio 6. Vesi-höyrykierto höyryn jälkitulistuksella ja syöttöveden esilämmityksellä .	13
Kuvio 7. Esimerkkikäyrästä tyypillisestä leijukattilan yöslämmityksestä.....	18
Kuvio 8. Lieriökattilan kylmäkäynnistyskäyrästä	19
Kuvio 9. Leijukerros poltto	25
Kuvio 10. Biomassan palaminen.....	31
Kuvio 11. K2-kattilan ylösajojen kestot vuonna 2014	36
Kuvio 12. Hiekansyöttö kattilaan vuonna 2014	37
Kuvio 13. Kustannusten kehittyminen yöslämmityksessä	44

Taulukot

Taulukko 1. Kokkolan Energian käytettävissä oleva tuotantokapasiteetti	6
Taulukko 2. Leijupolton fyysiset ominaisuudet verrattuna muihin polttotekniikoihin	26
Taulukko 3. Yleisten aineiden ominaislämpökapasiteetit.....	33
Taulukko 4. K2-kattilan optimaaliset operointiarvot	39
Taulukko 5. Polttoaineiden lämpöarvot ja hinnat.....	42
Taulukko 6. Pedin lämpökapasiteetti ja polttoainekustannukset.....	43

1 Energiatehokkuuden merkitys

Energiatehokkuuden parantamista yleisesti pidetään avaintekijänä energiankulutuksen ja kasvihuonepäästöjen vähentämisessä. Monet kansalliset ja kansainväliset tahot suosittelevat panostusta energiatehokkuuteen. Energiatehokkuuden parantaminen kasvattaa kuluja hetkellisesti, mutta pitkällä aikavälillä vähentää niitä. (Khan, Khan, Zaman & Naz 2013, 336.)

Maailman energiankulutuksen arvioidaan kasvavan kymmeniä prosentteja seuraavien vuosikymmenien aikana. Öljy tulee pysymään maailman pääasiallisena energianlähteenä vuosikymmenten ajan ja sen kulutus on kasvussa erityisesti taloudellisesti kasvavissa kehitysmaissa. Öljyn kysynnän ennustetaan kasvavan nykyisestä 80 miljoonasta barrelistä lähes 100 miljoonaan barreliin päivässä vuoteen 2035 mennessä. (Öljyn kulutus 2013.) Vaikka öljyn hinnalle on ominaista heilahdella, pitkällä aikavälillä öljyn hinta tulee todennäköisesti kallistumaan. Uusia energiantuotantomuotoja kehitetään jatkuvasti, mutta maailma tulee olemaan riippuvainen öljystä ja muista fossiilisista polttoaineista pitkään. Jatkuva energian hintojen nousu pakottaa yritykset panostamaan energiatehokkuuteen, jotta ne pysyvät kilpailukykyisinä.

Opinnäytetyön toimeksiantajan Kokkolan Energian voimalaitokset sijaitsevat Kokkolassa, Pohjois-Euroopan suurimman epäorgaanisen kemian keskittymässä, Kokkola Industrial Parkin alueella. Voimalaitoksille energiatehokkuuden kehittäminen on arkipäivää. Voimalaitoksen hyötysuhdetta parantamalla saadaan ostetusta energiamäärästä tuotettua enemmän myytävää energiaa, kuten kaukolämpöä, sähköä ja prosessihöyryä. Kokkolan Energian voimalaitoksilla käytetään öljyä varapolttoaineena sekä höyrykattiloiden ylöslämmityksissä sytytyspolttoaineena. Voimalaitokset tuottavat prosessihöyryä, kaukolämpöä ja sähköä Kokkolan kaupungille ja teollisuusalueen yrityksille.

Kokkolan Energia pyrkii tasaamaan kaukolämmön ja prosessihöyryn kulutushuippuja prosessihöyrykattila K2:lla. Kattilaa joudutaan käynnistämään ja sammuttamaan useita kymmeniä kertoja vuodessa. Ylöslämmitysten aikana kevyttä polttoöljyä palaa

merkittäviä määriä. Opinnäytetyön tehtävänä oli tutkia yöslämmitysten mittausta-
taa vuodelta 2014 ja analysoida kattilan energiatehokkuutta sekä tehdä parannuseh-
dotuksia energiatehokkuuden parantamiseksi.

Toimeksiantajayrityksellä Kokkolan Energialla on tavoitteena parantaa prosessihöyry-
kattila K2:n hyötysuhdetta. Ulkoilman lämpötilan vaihtelut sekä asiakkaiden toisinaan
nopeasti muuttuvat kaukolämmön ja prosessihöyryn tarpeet kompensoidaan useim-
miten Kokkolan Voiman prosessihöyrykattila K2:lla. K2 on höyryteholtaan 15 MW:n
leijukerroskattila, jossa poltetaan pääasiassa turvetta ja metsähaketta. Kattila on
Kokkolan Energian pienitehoisin kiinteän polttoaineen kattila ja se useimmiten riittää
kattamaan kulutushuiput. Vuonna 2014 K2-kattila kylmäkäynnistettiin yli 20 kertaa.
Kylmäkäynnistyksissä kattila joudutaan lämmittämään kevyellä polttoöljyllä, joten
vuoden aikana öljyä kuluu tuhansia litroja.

Opinnäytetyön päätavoitteena oli selvittää, nopeutuisiko K2-kattilan yöslämmitys,
mikäli käynnistyspoltinta tuettaisiin leijutusilman eli primääri-ilman esilämmityksellä.
Tällöin petihiekka oletettavasti saataisiin nopeammin sopivaan lämpötilaan kiinteän
polttoaineen syötön aloitusta varten. Tavoitteena oli myös selvittää lämpötila, johon
primääri-ilma kannattaisi kuumentaa. Toisena tavoitteena oli kerätä tietoa voimalai-
toksen henkilökunnalle vuoden 2014 ylösajoista ja selvittää syitä niiden kestoihin.
Kolmantena tavoitteena oli esittää parannusehdotuksia kattilan yöslämmitysten no-
peuttamiseksi ja energiatehokkuuden parantamiseksi yöslämmityksissä. Opinnäyte-
työ rajattiin koskemaan petihiekan lämmitystä.

2 Opinnäytetyön tilaaja

2.1 Kokkolan Energia Oy

Kokkolan Energian juuret juontavat yli 100 vuoden päähän, sillä vuonna 1904 Kokko-
lan kaupunginvaltuusto päätti rakennuttaa sauna- ja sähkölaitoksen. Samoihin aikoi-
hin tulivat ensimmäiset sähköllä toimivat katulamput Kokkolaan. (Sähkö tulee Kokko-
laan n.d.) Nykyään Kokkolan Energian liiketoiminnan muodostavat sähkönmyynti- ja

hankintayksikkö, sähkönsiirtoyhtiö KENET Oy, kaukolämpöyksikkö, tekniikkaosasto sekä talousosasto. Kokkolan kaupunki omistaa Kokkola Energia Oy:n, joka huolehtii Kokkolan kaupungin energiahuollosta sekä harjoittaa energia-alan liiketoimintaa. Kokkolan Energia hankkii energiaa omasta tuotantolaitoksestaan, hallitsemiensa tuotantolaitososuuksien kautta sekä muista lähteistä ja toimittaa energiaa loppukäyttäjille ja tukkumarkkinoille. Kokkolan Energia toimii käynnissäpitopalveluiden tuottajana omalle tuotantolaitokselleen, Kokkolan Voima Oy:lle sekä KIP-Servicen vesilaitokselle. Kokkolan Voima Oy on Pohjolan Voiman omistama tuottajayhtiö. Kokkolan kaupungilla on Pohjolan Voimasta 2,4 %:n omistusosuus, jota kautta Kokkolan kaupunki omistaa oikeudet Kokkolan Voiman tuottamiin tuotteisiin. (Energiakonserni n.d.) Kokkolan Energian käytettävissä oleva tuotantokapasiteetti on kuvattu taulukossa 1.

Taulukko 1. Kokkolan Energian käytettävissä oleva tuotantokapasiteetti (Energiakonserni n.d.)

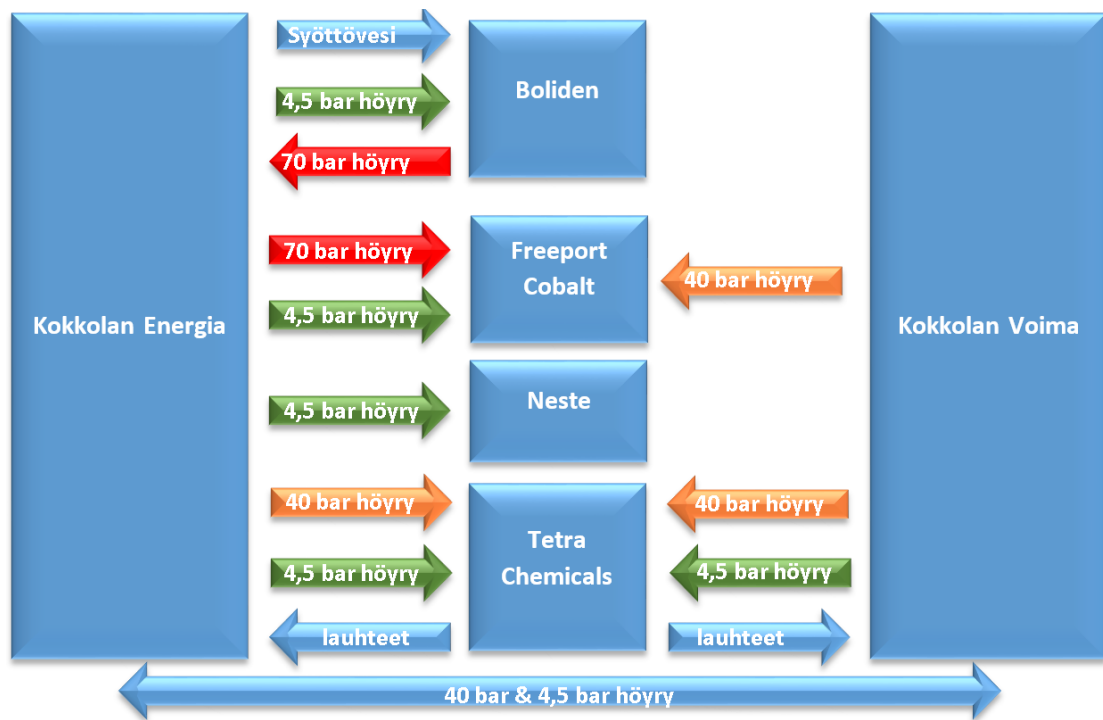
Voimalaitos	Polttoaine-teho	Sähkö-teho	Kauko-lämpö	Prosessi-höyry
Kokkolan Energia Oy				
C5 kiertoleijukattila & T3 turbiini	108 MW	35 MW (52 MW)	80 MW	35 MW (100 MW)
C4 öljykattila	200 MW			
C6 & C7 öljykattilat	12,5 MW x 2			
Kokkolan Voima Oy				
K1 kerrosleijukattila & T1 turbiini	80 MW	20 MW	50 MW	
K2 kerrosleijukattila	18 MW			15 MW
Lämminvesikattila (öljy)	12 MW			
Prosessteollisuuden LTO			15 MW	
Lämpökeskukset (5 kpl)			80 MW	

2.2 Voimalaitosprosessi

Kokkolan Energian voimalaitosten voimalaitosprosessi eroaa perinteisen yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotantolaitoksen toiminnasta, sillä laitosten energiantuotannosta suuri osa jakautuu prosessihöyrynä, kaukolämpönä ja syöttövetenä Kokkola Industrial Parkin yrityksille. Kokkolan Energian höyrynkäyttäjät ovat Boliden Kokkola, Freeport Cobalt Oy, Tetra Chemicals Oy sekä Neste Oil Oyj. Suurin höyrynkäyttäjä on Boliden. Kuvio 1 kuvaa Kokkolan Energian höyrynjakelua teollisuusalueen yrityksille.

Kokkolan Energian tuotantolaitokselta pumpataan Bolidenille syöttövetä, jota se käyttää omissa jätelämpökattiloissaan. Syöttövesi palaa Bolidenilta kylläisenä höyrynä, joka tulistetaan C5-kattilassa. Samalla nostetaan sähkön ja lämmöntuotannon kapasiteettia. Normaalisissa ajotilanteissa suurin osa höyrystä menee 70 bar:n jakotukille, josta edelleen redusoituna 4,5 bar:n jakotukin kautta takaisin prosessihöyrynä Bolidenille, josta ei saada lauhteita takaisin.

Suuren osan prosessihöyryntuotannosta käyttävä Freeport käyttää Kokkolan Energian 70 bar:n tulistettua höyryä sekä 4,5 bar:n prosessihöyryä. Normaalisissa ajotilanteissa Tetra Chemicals on Kokkolan Voiman ainoa suora höyrynkäyttäjä, mutta poikkeustilanteissa, kuten huoltoseisokkien aikana, höyryä on mahdollista siirrellä Kokkolan Voiman ja Kokkolan Energian tuotantolaitosten välillä siirtoputkiston avulla. Eri-laisia laitosten ajomalleja useita, mikä osaltaan erottaa Kokkolan laitosten toiminnan perinteisestä sähkön- ja lämmön yhteistuotantomallista.

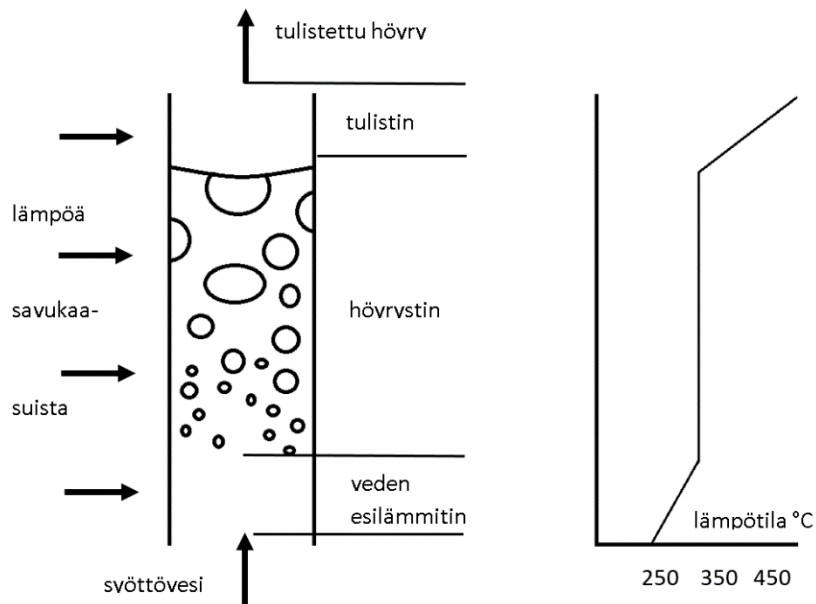


Kuvio 1. Höyryjakelu Kokkolan teollisuusalueella (Energiakonserni n.d.)

3 Höyrykattilan toimintaperiaate

3.1 Höyrykattilan vedenkeittoprosessi

Höyrykattilan tehtävä on tuottaa kattilaan syötetystä vedestä höyryä sähköntuotantoon, prosesseihin sekä kaukolämmön tuotantoon. Vedenkierron kannalta nykyaikaista höyrykattilaa voi ajatella pitkänä mutkaisena putkena, jolla on suuri lämpöpinta-ala. Kuvion 2 mukaisesti syöttövesi syötetään kattilaan, jolloin siihen sitoutuu polttoaineen palamisprosessissa vapautuvaa lämpöenergiaa. Syöttövesi saavuttaa ensin höyrystyslämpötilan, jolloin se höyrystyy. Kun kaikki syöttövesi on höyrystynyt, höyryä edelleen tulistetaan höyrystyslämpötilaa korkeampaan lämpötilaan. Tulistettu höyry johdetaan turbiiniin sähköntuotantoa varten sellaisenaan, redusoituna prosessihöyryksi tai redusoituna kaukolämmönvaihtimelle. Voimalaitosten höyrykattiloissa käytetyt höyrynpaineet ovat tyypillisesti 150–220 bar ja lämpötilat 450–550 °C. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen, Pakkanen 2000, 7.) Myös matalampia höyrynpaineita käytetään.



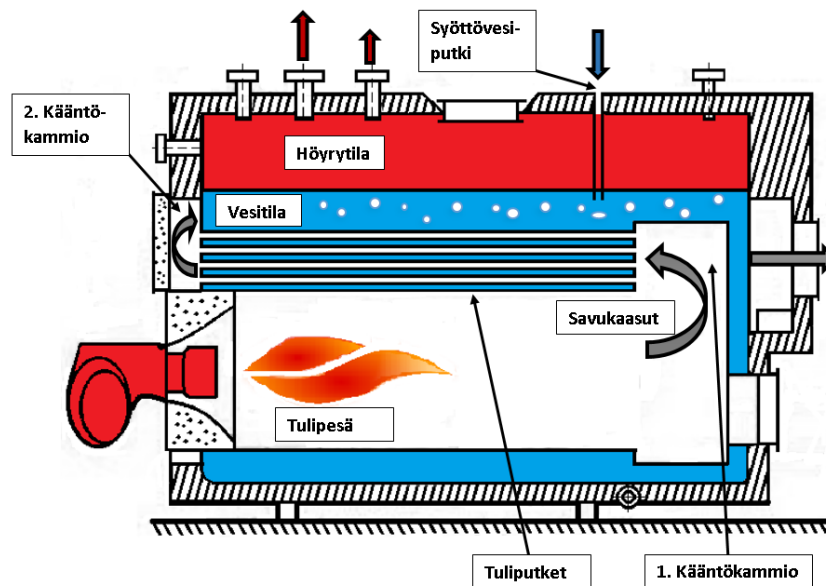
Kuvio 2. Höyrykattilan toimintaperiaate (alkup. kuvio ks. Huhtinen ym. 2000, 7)

Vedenkeittoprosessi on erittäin energiantensiivinen, joten voimalaitoksissa pyritään käyttämään ylimääräinen lämpöenergia hyväksi. Kattilaan syötetyn polttoaineen kemiallinen energia saadaan palamisprosessin kautta sidottua lämpönä savukaasuihin. Savukaasuihin sitoutunut lämpöenergia pyritään hyödyntämään mahdollisimman tarkkaan erilaisten lämmönvaihdinten avulla, joita ovat: höyrystin, tulistin, syöttöveden esilämmitin ja ilman esilämmitin. (Huhtinen ym. 2000, 7.)

Nykyaikaiset höyrykattilat jaotellaan suurvesikattiloihin eli tulitorvikattiloihin ja vesiputkikattiloihin. Kattilat eroavat toisistaan siinä miten lämpöenergia siirretään savukaasuista syöttövedeen. Yksinkertaisimmillaan kattiloiden eroa voisi kuvailla siten, että tulitorvikattilassa putkissa virtaa tuli ja voimalaitoksissa käytettävissä vesiputkikattiloissa virtaa vesi. Tässä opinnäytetyössä syvennyttiin voimalaitoksissa käytettävään vesiputkikattiloihin ja suurvesikattilat jäivät vähemmälle huomiolle.

3.2 Suurvesitilakattilat

Tulitorvikattila on suurvesitilakattila, jossa savukaasut johdetaan tulitorvesta kääntökammion kautta vierekkäin aseteltuihin tuliputkiin. Kuten kuviosta 3 nähdään, tulitorvi ja tuliputket ovat syöttöveden ympäröimiä, jolloin savukaasujen lämpöenergia siirtyy syöttövedeen johtumalla ja kuljettumalla. Lämpenevä syöttövesi saavuttaa höyrystymispisteen ja höyrystyy. (Teir 2002a, 9.) Tulitorvikattiloissa höyrinpainne on paljon matalampi kuin vesiputkikattiloissa, minkä vuoksi niitä käytetäänkin teollisuudessa matalapainehöyryn tuotantoon, kun höyryntarve on niin pieni, ettei sähköntuotanto kannata. Mikäli tulitorvikattilalla haluttaisiin päästä suurempiin paineisiin, täytyisi vesi-höyrytilaa rajoittavissa tulitorvissa ja painekuorissa olla paksummat seinämät, mikä taas tekisi tulitorvikattilasta kalliin vaihtoehdon. Tulitorvikattiloissa suurimpana höyrinpaineenä ja tehona voidaan pitää 20 bar ja 12 MW. (Huhtinen ym. 2000, 111–112.)



Kuvio 3. Tulitorvikattilan toimintaperiaate (alkup. kuvio ks. Teir 2002a, 9)

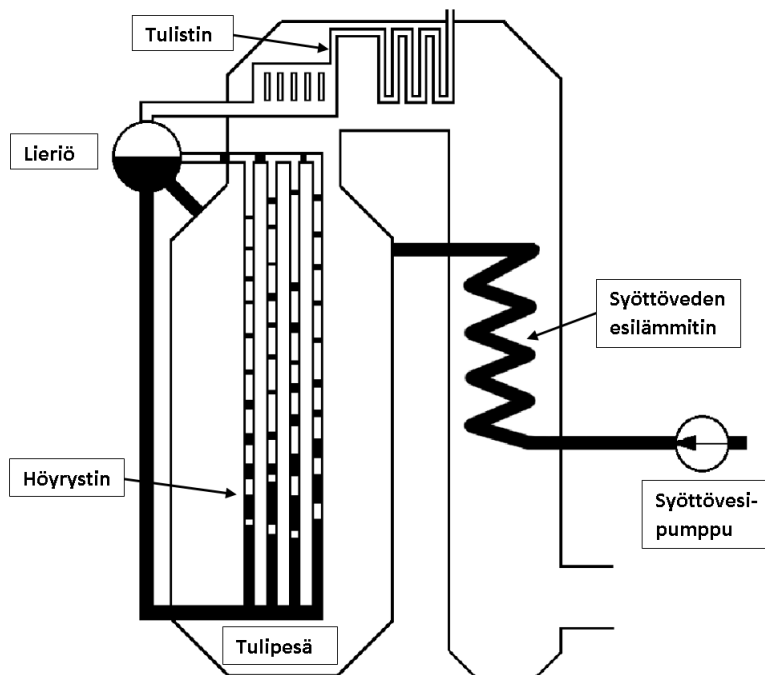
3.3 Vesiputkikattilat

Vesiputkikattilat jaetaan luonnonkiertokattiloihin, pakkokierto-kattiloihin sekä läpivirtauskattiloihin tai näiden yhdistelmiin. Nykyisin kaikki sähkön- ja lämmön yhteistuotannon kattilat ovat vesiputkikattiloita. (Huhtinen ym. 2000, 111–112)

3.3.1 Luonnonkiertokattila

Luonnonkiertokattilan toimintaperiaate on yksi höyrykattiloiden vanhimpia periaatteita vesi- ja höyrykierrossa. Luonnonkiertoa käytetään pienissä ja keskikokoisissa kattiloissa. Käytännössä lopullisen höyrynpaineen tulee olla alle 170 bar, jotta luonnonkierto toimii kunnolla. Tyypillisesti painehäviö luonnonkiertokattilassa on noin 5–10 % höyrynpaineesta lieriössä. Maksimilämpötila tällä kattilatyypillä on noin 540–560 °C. (Kulla & Teir 2002, 6.)

Luonnonkiertokattilassa vesi pumpataan syöttövesisäiliöstä suoraan haluttuun höyrynpaineeseen. Syöttövesi pumpataan esilämmittimen kautta lieriöön, jolloin syöttövesi miltei saavuttaa kiehumispisteen. Lieriössä syöttövesi sekoittuu hyvin kattilassa jo olevan veden kanssa. Kylläinen vesi virtaa kuvion 4 mukaisesti lieriöstä laskuputkea pitkin keittoputkistoon eli höyrystimelle, jolloin osa vedestä höyrystyy. Tiheydeltään alhaisempi vesihöyryseos kulkeutuu takaisin lieriöön, jossa vesi ja höyry erotetaan toisistaan. Höyry jatkaa tulistimelle ja vesi takaisin höyrystimelle. (Mts. 6–7.)



Kuvio 4. Luonnonkiertokattilan vesihöyrypiiri (alkup. kuvio ks. Huhtinen ym. 2000, 113)

3.3.2 Pakkokierto-kattila

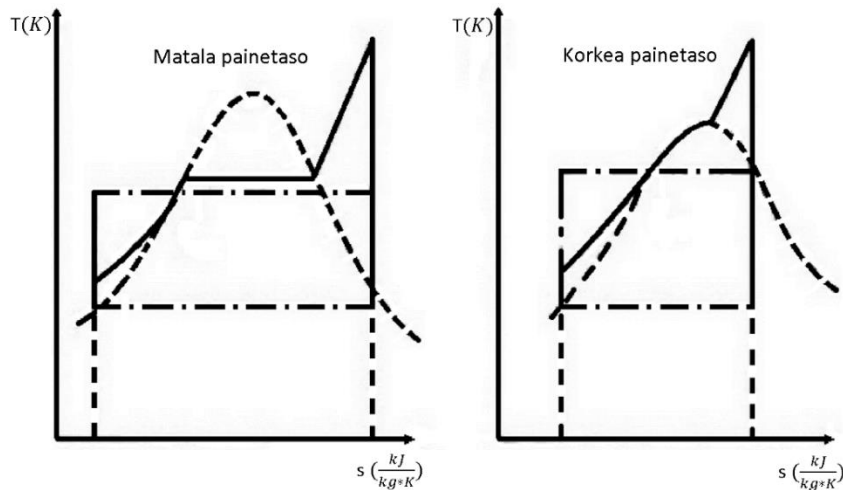
Pakkokierto-kattila ei poikkea paljon luonnonkierto-kattilasta. Pääero on se, että pakkokierto-kattilassa fluidia liikuttaa tai fluidin liikkumista edesauttaa pakkokierto-pumppu. Fluidiksi nimitetään väliainetta, jossa aineen rakenneosat voivat liikkua vapaasti toistensa suhteen. Pakkokiertopumpun käyttö mahdollistaa hivenen korkeamman höyrynpaineen verrattuna luonnonkierto-kattilaan. Lieriön toimintaperiaate erottaa vesi ja höyry toisistaan tiheyden perusteella on syy miksi pakkokierto-kattila kuitenkin soveltuu yli 221 bar:n kriittisille paineille. Käytännössä suurin mahdollinen höyryn käyttöpaine pakkokierrossa on 190 bar ja painehäviö kattilassa on noin 2 – 3 bar. Pakkokiertopumpun käyttö mahdollistaa myös keittoputkiston sijoittamisen tulipesään lähes mihin asentoon tahansa, sillä pumpulla pystytään kompensoimaan painehäviöitä. Samasta syystä keittoputkisto voidaan tehdä pienemmällä halkaisijalla, mikä taas säästää materiaalikustannuksissa. (Kulla & Teir 2002, 14.)

3.3.3 Läpivirtauskattila

Läpivirtauskattilat jaetaan kiinteän höyrystymispisteen ja muuttuvan höyrystymispisteen kattiloihin. Teoriassa läpivirtauskattila koostuu yhdestä putkesta, jossa vesi esilämmitetään, höyrystetään ja tulistetaan. Läpivirtauskattila sisältää pääosin kaikki samat komponentit kuin luonnonkierto- ja pakkokierto-kattilat, mutta sillä ei ole lieriötä vaan vesi erotetaan höyrystä vedenerotuspullossa. Näin ollen läpivirtauskattilassa ei ole sisäistä vesi-höyrykiertoa. Voimalaitosprosesseissa suositaan enemmän liukuvaa paineensäätöä, jolloin kuorman pienetessä pienenee myös höyrynpaine. Liukuvan paineen ajotavalla hyötysuhde paranee, sillä turbiinirakenne yksinkertaistuu säätövyöhykkeen ollessa tarpeeton. Lisäksi osakuormissa syöttövesipumppu vaatii vähemmän tehoa, koska sen tarvitsee tuottaa vähemmän painetta. Muuttuvan höyrystymispisteen kattiloissa perusajatuksena onkin säätää tulistuksen loppulämpötila sopivalla polttoainevirran ja syöttövesivirran suhteella. (Huhtinen ym. 2000, 120.)

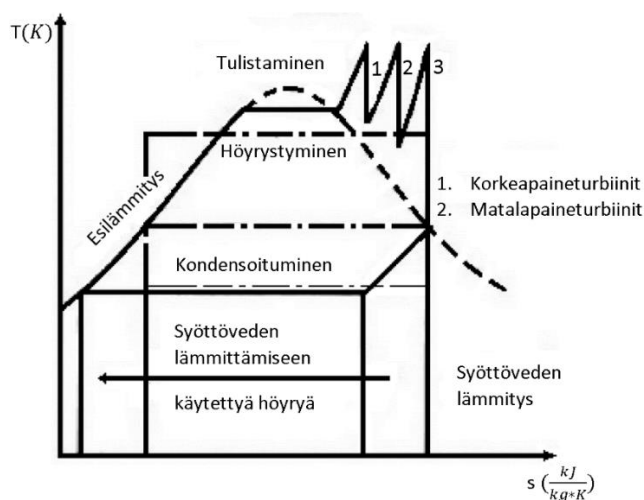
Läpivirtauskattiloita suositaan kahdesta syystä. Ensinnäkin ne mahdollistavat korkeampien höyrynpaineiden käytön, mikä johtaa parempaan kattilan hyötysuhteeseen. Kuvio 5 kuvaa Clausius-Rankine-kiertoprosessin kulkua matalalla ja korkealla painetasolla. Kuvioista huomataan, että korkeammalla painetasolla entropian kasvu on pienempää kuin matalammalla painetasolla, jolloin vastaavasti hyötysuhde on parempi.

Kuviosta 6 taas nähdään, että kun korkean painetaso prosessiin lisätään höyryn väli-
tulistus ja syöttöveden esilämmitys väliottohöyryllä, muuttuu prosessi enemmän car-
not-kierto-prosessin kaltaiseksi eli lähemmäksi ideaalista vesi-höyryprosessia. (Kakaç.
1991, 279.)



Kuvio 5. Clausius-Rankine kierto-prosessi (alkup. kuvio. ks. Kakaç. 1991, 280)

Toinen syy on se, että läpivirtauskattilat mahdollistavat suuremman höyryntuotan-
non kapasiteetin johtuen pienemmistä pääomakustannuksista sekä henkilöstökus-
tannuksista. Molemmat syyt liittyvät siihen, että läpivirtauskattilassa ei tarvita lie-
riötä eikä halkaisijaltaan suurempaa höyrystinputkistoa, millä taas on merkittävä vai-
kus kattilan materiaalikustannuksiin. (Kakaç. 1991, 280.)



Kuvio 6. Vesi-höyrykierto höyryn jälkitulistuksella ja syöttöveden esilämmityksellä (al-
kup. kuvio. ks. Kakaç. 1991, 285)

4 Vesiputkikattilan ylösajon vaiheet

Höyrykattila pyritään käynnistämään turvallisesti ja mahdollisimman pienin lämpöhäviöin. Kattilan käynnistyksessä on tärkeää löytää tasapaino, koska liian nopeassa käynnistyksessä kattilamateriaaleihin voi syntyä haitallisia vetojännityksiä ja liian hitaassa käynnistyksessä muodostuu liikaa lauhteita. (Huhtinen ym. 2000, 310.)

Ylösajotyyppinä on kahdenlaisia: kuuma- ja kylmäkäynnistys. Kuumakäynnistyksestä puhutaan, kun kattila on ollut alhaalla vain muutamia tunteja eikä ole ehtinyt jäähtyä merkittävästi. Kun lähdetään ajamaan vuorokausia alhaalla ollutta kattilaa, puhutaan kylmäkäynnistyksestä. (Mts. 310.)

Huhtisen ja muiden (2000, 310) mukaan lieriökattiloiden käynnistys voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin:

- esivalmistelut
- kattilan täyttö
- puhaltimien käynnistäminen
- tuuletus
- käynnistyspolttimien käynnistäminen
- kattilan ylöslämmitys
- kiinteän polttoaineen syötön aloitus
- päähöyrylinjan lämmitys ohitusventtiilin kautta
- päähöyryventtiilin avaus.

4.1 Esivalmistelut

Ennen höyrykattilan ylösajoa käydään läpi tarvittavat esivalmistelut, joiden läpikäymiseen menee aikaa aina muutamasta tunnista vuorokauteen asti. Esivalmistelut tehdään, jotta kattila voidaan käynnistää turvallisesti. Kattilan käynnistyksessä pääkattilan apujärjestelmille täytyy saada höyryä. Matalapainehöyryä tarvitaan muun muassa syöttöveden lämmitykseen ja syöttövesisäiliön paineistamiseen. Useimmiten höyry tuotetaan apukattilalla polttamalla esimerkiksi kevyttä polttoöljyä. Apukattila

käynnistetään yleensä muutamaa tuntia ennen pääkattilan käynnistyksen aloittamista. Silmämääräisten tarkistusten avulla varmistutaan kattilan ja sen apulaitteiden kunnosta. Silmämääräisten tarkistusten apuna usein käytetään aputaulukkoa, johon on merkitty kaikki yksinkertaisimmatkin kohdat, jotta itsestään selvät asiat eivät jää tarkistamatta. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2013, 162.)

Vesilaitoksen tulee olla käyttökunnossa kattilan ylösajossa vaikka lisävesisäiliöt olisivat täynnä, sillä lisäveden saanti on turvattava ylösajon aikana. Lisävettä kuluu perinteisesti kaukolämpö- ja lauhdevoimalaitoksissa muutama prosentti tuorehöyryvirta määrästä. Vastapainevoimalaitoksissa kulutus voi olla jopa kymmeniä prosentteja tuorehöyry virtamäärästä. Tärkeässä osassa esivalmisteluja on myös käynnistyspolttimen toiminnan varmistaminen. Kattilan ylösajo vaatii tietyn määrän käynnistyspolttainetta, jonka määrän kattilavalmistaja on laskenut. Käynnistyspolttainetta kuluu kunnes voidaan siirtyä kiinteän polttoaineen polttoon. (Mts. 162.)

4.2 Kattilan täyttö

Ennen kattilan täytön aloittamista tarkistetaan syöttövesisäiliön paine, joka yleensä on 2 - 4 bar, ja lämpötila, joka on noin 120 °C. Useimmiten kattilan täytön aikana tarvitaan vain yhtä syöttövesipumppua. Pumpun käynnistyttyä kiertolinjan venttiilit aukeavat yleensä automaattisesti tai operaattori avaa ne. Kattilan täyttö aloitetaan varovasti avaamalla venttiiliä hiljalleen kunnes saavutetaan haluttu vesivirta. Pientä vesivirtaa pidetään niin kauan yllä kunnes syöttöveden esilämmitin saavuttaa saman lämpötilan kuin syöttövesi, minkä jälkeen venttiiliä voidaan edelleen avata hieman lisää. Kattilan täyttö lopetetaan kun kattilan lieriön pinta saavuttaa halutun korkeuden. (Huhtinen ym. 2013, 163.)

4.3 Puhaltimien käynnistäminen ja kattilan tuuletus

Nykyaikaisen höyrykattilan ylösajossa puhaltimet käynnistetään ryhmäkäynnistyksellä. Ryhmäkäynnistys antaa kattilan automaatiolle käskyn käynnistää kaikki tarvittavat puhaltimet ja asettaa ilmasäätimet säädölle. Riippuen kattilan automaatiojärjestelmästä, ryhmäkäynnistykseen etenemistä voidaan seurata graafisesti tai askelnumeroitten perusteella. Ryhmäkäynnistys voi helposti epäonnistua, jos esimerkiksi jokin puhallin on asetettu manuaalijolle. Operaattorin on tarpeen osata käynnistää puhaltimet myös manuaalisesti, jos ryhmäkäynnistys ei jostain syystä toimi. (Huhtinen ym. 2013, 166.)

Kattilan automaatio hoitaa tuuletuksen yhdellä käskyllä. Tuuletus tehdään pääasiassa sekundääripuhaltimen avulla. Yleensä tuuletusaika on noin 10 minuuttia. Monissa kattiloissa tuuletusautomaatio osaa tarvittaessa käynnistää puhaltimet sekä mahdollisesti myös kiinteän polttoaineen syötön alimmat kuljettimet ja sulkusyöttimet. Kun kattilan tuuletus on suoritettu, saadaan kattilalle käynnistyslupa. (Mts. 166–167.)

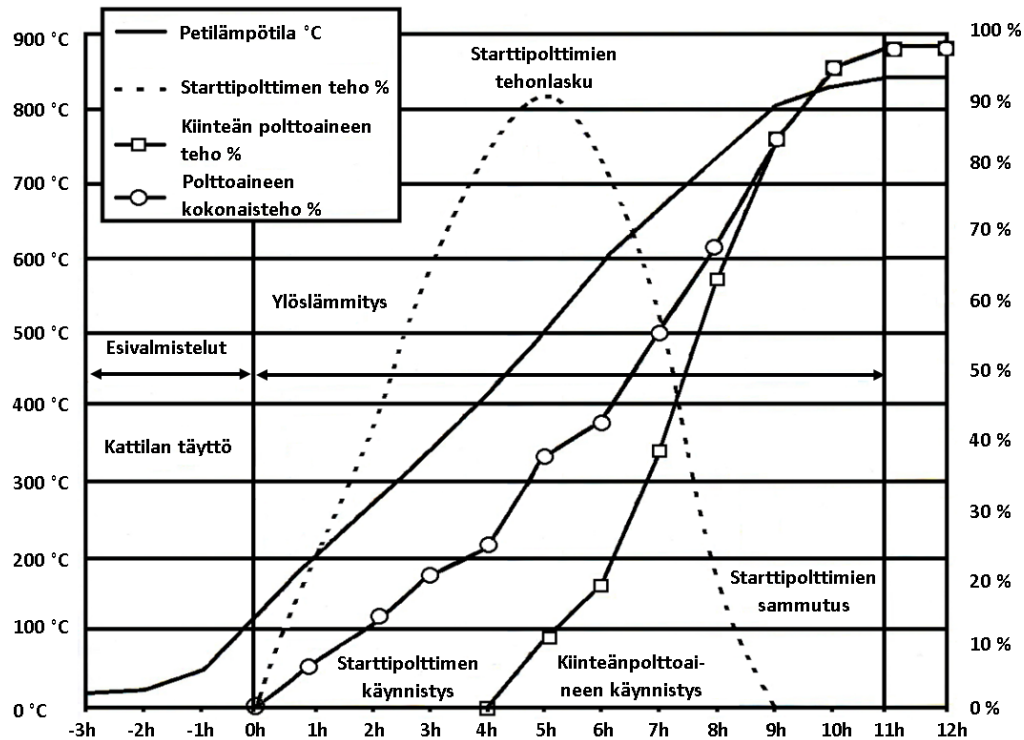
4.4 Käynnistyspolttimen sytyttäminen

Käynnistyspoltin voidaan yleensä sytyttää valvomosta operointijärjestelmän avulla. Jotta käynnistyspoltin voidaan sytyttää, kattilan täytyy olla riittävästi tuuletettu sekä sytytysaikaa tulee olla riittävästi jäljellä. Poltin käynnistetään ryhmäkäynnistykseen avulla, joka saattaa huolehtia myös polttoainepumppujen käynnistyksestä ja säätimien asettamisesta oikeisiin asetusarvoihin ja tiloihin. Mikäli ryhmäkäynnistys ei edellä mainittuja asioita tee, ne tulee tehdä käsin. Polttimen käynnistyspolttoaineena käytetään usein nestekaasua. Käynnistyspolttimilla kattilaa lämmitetään siihen asti, että voidaan siirtyä kiinteän polttoaineen syöttöön. Kiinteän polttoaineen syöttö aloitetaan yleensä petilämpötilan ollessa välillä 400–500 °C. Käynnistyspoltinta pidetään kiinteän polttoaineen syötön rinnalla päällä, kunnes petilämpötila saavuttaa noin 600 °C. (Huhtinen ym. 2013, 168–169.)

4.5 Kattilan ylöslämmitys ja kiinteän polttoaineen syötön aloitus

Kattilan ylöslämmityksessä on tärkeää seurata kattilan lämpötilojen ja paineiden kehittymistä. Leijupetikattiloissa kattilavalmistaja on ohjeistanut petilämmön osalta ylöslämmitysnopeuden, jota ei saa ylittää. Liian nopea ylöslämmitys saattaa vaurioittaa tulipesän suojamuurauksia ja saattaa aiheuttaa lämpöjännityksiä höyryverkossa, tulipesässä tai höyryturbiinissa. Tyypillinen kattilan petihiekan lämpötilan nostonopeus on noin 1-1,2 °C/min. Kuvio 7 esittää tyypillisen leijupetikattilan petilämpöjen kehittymisen ylöslämmityksen aikana. (Huhtinen ym. 2013, 163–164.)

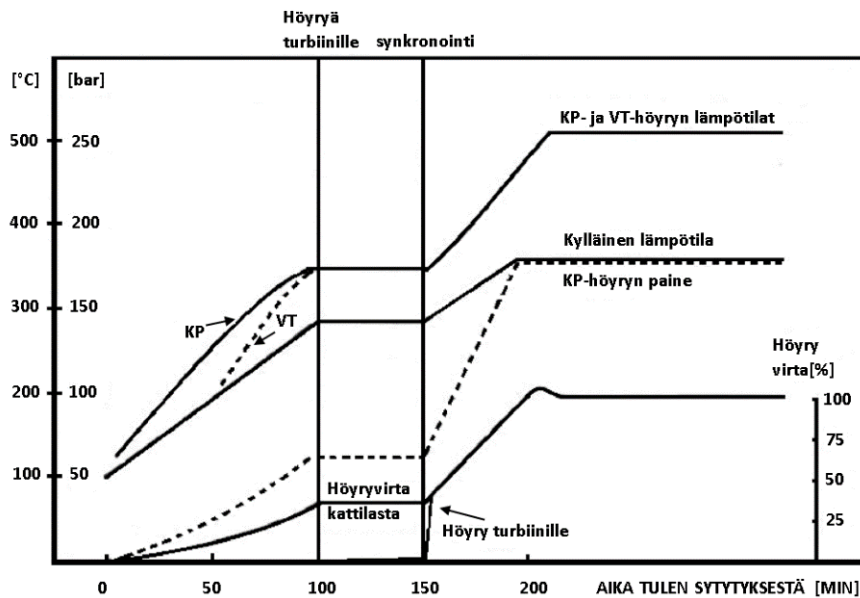
Kun riittävä petilämpötila on saavutettu, voidaan aloittaa kiinteän polttoaineen syöttö kattilaan. Kiinteän polttoaineen syöttö aloitetaan ryhmäkäynnistyksellä, mutta se voidaan aloittaa myös käsin. Kun polttoaineen syöttö aloitetaan, käynnistetään myös pohjatuhkan poisto. Usein tavoitellaan petilämpötilan hetkellistä kiihtymistä kiinteän polttoaineen syötön aloituksen yhteydessä. Kuljettimien käynnistyksen jälkeen palataan jälleen normaaliin ylösajonopeuteen. Laitostyypistä riippuen operaattorin toimet vaihtelevat. Esimerkiksi polttoaineen ollessa rikki-pitoista, käynnistetään rikinpoistojärjestelmät samalla polttoaineen syötön kanssa. (Mts. 169.)



Kuvio 7. Esimerkkikäyrästä tyypillisestä leijukattilan yöslämmityksestä. (alkup. kuvio. ks. Huhtinen ym. 2013, 165)

4.6 Päähöyrylinjan lämmitys ja päähöyryventtiilin avaus

Kun kattilassa alkaa kehittyä höyryä, käynnistysventtiili eli starttiventtiili avataan. Höyrynpainetta ohjataan tällöin polttoainevirtaa ja starttiventtiiliä säätämällä. Höyrynpaineen kohotessa kattilavesi puristuu kokoon ja hieman myöhemmin myös vettä höyrystyy. Tässä vaiheessa syöttövesipumppua ei tarvitse pitää jatkuvasti päällä, vaan vettä voidaan pumpata muutamia kertoja samalla tarkkaillen lieriön vesipintaa. Kun höyryä alkaa kehittyä tarpeeksi, voidaan syöttövesipumppu jättää käyntiin minimierolle. Starttiventtiilin kautta höyryä virtaa suoraan katolle tai käynnistyssäiliölle, jolloin lämpö saadaan talteen. Kun höyryn laatu ja paine saavuttavat halutut arvot, avataan päähöyryventtiilin ohitus ja höyryputken annetaan lämmitä hiljalleen. Kun höyryn käyttöpaine saavutetaan, päähöyryventtiili avataan. (Huhtinen ym. 2000, 311–312.) Kuvio 8 kuvaa kattilan höyrynpaineen ja lämpötilan kehityksen ylösajossa.



Kuvio 8. Lieriökattilan kylmäkäynnistyskäyrästä (alkup. kuvio. ks. Huhtinen ym. 2000, 311)

5 Höyrykattilan energiatehokkuus ja hyötysuhde

5.1 Energiatehokkuuden rakentuminen

Voimalaitoksissa höyrykattila on usein käynnissä ympäri vuoden kesäseisokkia lukuun ottamatta. Tällöin kattilan yöslämmityksellä on kattilan hyötysuhteeseen erittäin pieni vaikutus. Mitä enemmän yöslämmityksiä tehdään, sitä suurempi vaikutus niillä on kattilan hyötysuhteeseen. Yöslämmityksessä lämpöenergiaa siirtyy käynnistyspolttimen polttamasta kevyestä polttoöljystä petihiekkaan, höyrykattilan rakenteisiin sekä syöttöveden lämmittämiseen. Yöslämmityksessä menee hukkaan energiaa savukaasuihin sitoutuneena lämpöenergiana ja käynnistysventtiilin kautta höyrynä. Jotta voidaan paremmin ymmärtää mitkä asiat vaikuttavat höyrykattilan energiatehokkuuteen, tarkastellaan höyrykattilan hyötysuhteen laskemista.

Höyrykattilan hyötysuhteen voi määrittää suoralla tai epäsuoralla menetelmällä. Menetelmät noudattavat saksalaista DIN 1942-standardia, joka eroaa amerikkalaisten käyttämästä standardista lähinnä polttoaineiden lämpöarvojen osalta (Huhtinen ym. 2000, 110). Suorassa menetelmässä hyötysuhde lasketaan yksinkertaistettuna katti-

lasta hyödyksi saadun lämpötehon ja kattilaan tuodun tehon suhteella. Tässä opin-
näytetyössä käydään tarkemmin läpi hyötysuhteen laskeminen epäsuoralla menetel-
mällä, sillä sitä pidetään tarkempana laskutapana.

Epäsuora menetelmä perustuu hyötysuhteen laskemiseen häviöiden kautta. Mene-
telmä antaa siten tietoa siitä, mitkä tekijät huonontavat höyrykattilan energiatehok-
kuutta ja mitä toimenpiteitä voidaan halutessa tehdä energiatehokkuuden paranta-
miseksi. Kattilan häviöt koostuvat palamattomista häviöistä, tuhkan termisestä läm-
möstä, savukaasujen termisestä lämmöstä sekä säteily- ja johtumishäviöistä. Näiden
lisäksi kattilan hyötysuhdetta huonontavat nuohous, ulospuhallus, pysäytyshäviöt,
läpivirtaushäviöt sekä käynnistyshäviö. (Mts. 104–105.) Höyrykattilan hyötysuhde
voidaan laskea yhtälöstä 1.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{hyöty} &= \dot{Q}_{tuotu} - \dot{Q}_{häviö} \\ \eta &= \frac{\dot{Q}_{tuotu} - \dot{Q}_{häviö}}{\dot{Q}_{tuotu}} \rightarrow \eta = 1 - \frac{\dot{Q}_{häviö}}{\dot{Q}_{tuotu}} = 1 - \sum q \end{aligned} \quad (1) \text{ (Mts. 104)}$$

5.2 Palamattomien kaasujen ja kiintoaineiden häviöt

Nykyaikaisissa höyrykattiloissa polttoaine palaa lähes sataprosenttisesti. Jos osa polt-
toaineesta kuitenkin jää palamatta, se voi poistua kattilasta joko pohjatuhkan mu-
kana tai kaasumaisessa muodossa savukaasujen mukana. Palamishyötysuhde laske-
taan näin ollen määrittämällä savukaasuissa olevien palamattomien kaasujen ja tuh-
kan sisältämän, palamatta jääneen polttoaineen määrä. (Huhtinen ym. 2000, 105.)

Palamattomien kaasujen häviöt

Palamatta jääneet kaasut ovat käytännössä häkää eli hiilimonoksidia tai hiilivetyjä.
Voimalaitostason höyrykattiloissa palamatta jääneet kaasut ovat häkää. Palamatto-
mia hiilivetyjä sen sijaan esiintyy lähinnä vain pienemmissä kattiloissa. (Mts. 105.) Pa-
lamattomien kaasujen häviöt voidaan laskea yhtälöstä 2.

$$q_{CO} = (1 - q_{pal}) * \frac{x_{CO} * H_{CO} * V_{sk}}{m_{pa} * H_u + Q_{pa} + Q_i + Q_{muu}} \quad (2)$$

missä

q_{CO} on palamattomien kaasujen (CO) häviö

q_{pal} on palamattoman kiintoaineen häviö

x_{CO} on palamattomien kaasujen (CO) pitoisuus kuivissa savukaasuissa
(kg CO/m³sk)

H_{CO} on palamattomien kaasujen lämpöarvo (CO:lle 10,7 MJ/kg CO)

V_{sk} on kuiva savukaasuvirta (m³sk/s)

H_u on polttoaineen lämpöarvo

Q on kattilaan tuotuja energiavirtoja

m_{pa} on polttoaineen massavirta, kg/s (Mts. 105)

Palamattomien kiintoaineiden häviöt

Palamatonta kiintoainetta voi poistua kattilasta pohjatuhkan tai lentotuhkan mukana. Palamatta jääneen polttoaineen osuus tuhkassa voidaan selvittää laboratoriossa polttamalla tuhkaa, jolloin saadaan selville sen hehkutushäviö. (Mts. 106.) Tuhkan mukana poistuvan palamatta jääneen polttoaineen häviö voidaan laskea yhtälöstä 3.

$$q_{pal} = \frac{m_{pal} * H_{tuhka}}{m_{pa} * H_u + Q_{pa} + Q_i + Q_{muu}} \quad (3)$$

missä

q_{pal} on palamatta jääneen polttoaineen häviö

H_{tuhka} on palamattoman lämpöarvo (MJ/kg)

H_u on polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)

Q on kattilaan tuotuja energiavirtoja

Palamattoman polttoaineen ja kattilaan syötetyn polttoaineen välinen suhde voidaan laskea yhtälöstä 4.

$$\frac{m_{pal}}{m_{pa}} = p * \frac{x_t}{1-p} * (1 - x_{H2O}) \quad (4)$$

missä

m_{pal} on palamatta jäänyt kiintoaineena poistuva polttoaine (kg/s)

m_{pa} on polttoainevirta (kg/s)

ρ on tuhkan hehkutushäviö, %/100

x_t on polttoaineen tuhkapitoisuus, %/100

x_{H2O} on polttoaineen kosteus, %/100 (Mts. 106)

5.3 Savukaasujen ja tuhkan termisen lämmön häviö

Savukaasujen terminen lämpöhäviö

Savukaasujen terminen lämpöhäviö on normaalissa ajotilanteessa suurin yksittäinen syy kattilan hyötysuhteen laskemiseen, sillä kuumen savukaasun mukana poistuu paljon lämpöenergiaa. Rikkiä sisältävää polttoainetta polttavissa kattiloissa savukaasun loppulämpötilan tulee olla riikin happokastepistelämpötilan 145 °C yläpuolella, jotta vältyttäisiin lämpöpintojen syöpymiseltä. Lämpöpintojen syöpyminen aiheuttaa lämmönsiirron huononemista kattilasta, jolloin savukaasujen lämpötila nousee edelleen ja savukaasuhäviö kasvaa. (Huhtinen ym. 2000, 108.) Savukaasujen terminen lämpöhäviö voidaan laskea yhtälöstä 5.

$$q_{sk} = (1 - q_p) * \frac{\dot{m}_{sk} * c_{p(sk)} * (t_{sk} - t_o)}{\dot{m}_{pa} * H_u + \dot{Q}_{pa} + \dot{Q}_i + \dot{Q}_{muu}} \quad (5)$$

missä

q_{sk} on savukaasuhäviö

q_p on savukaasujen muodostaman polttoaineen osuus

m_{sk} on savukaasun massavirta

m_{pa} on polttoaineen massavirta

c_{psk} on savukaasujen ominaislämpötila

t_{sk} on savukaasujen loppulämpötila

t_o on vertailulämpötila

H_u on polttoaineen lämpöarvo

Q on kattilaan tuotuja energiavirtoja. (Mts. 108.)

Tuhkan terminen lämpöhäviö

Tuhkan mukana poistuva terminen lämpöhäviö voidaan laskea yhtälöstä 6.

$$q_{tuhka} = \frac{\dot{m}_{tuhka} * c_{p(tuhka)} * (t_{tuhka} - t_o)}{\dot{m}_{pa} * H_u + \dot{Q}_{pa} + \dot{Q}_i + \dot{Q}_{muu}} \quad (6)$$

missä

$c_{p(tuhka)}$ on tuhkan ominaislämpö (lentotuhka 0,84 kJ/kgK; pohjatuhka 1,00 kJ/kgK)

t_{tuhka} on tuhkan lämpötila, °C

t_o on vertailulämpötila, °C

Tulipesästä poistuvan pohjatuhkan ja lentotuhkan aiheuttama häviö voidaan laskea yhtälöstä 7.

$$\frac{\dot{m}_{tuhka}}{\dot{m}_{pa} * H_u} = \frac{x_t}{1-p} * (1 - x_{H2O}) \quad (7)$$

x_{tuhka} on polttoaineen tuhkapitoisuus kuivasta polttoaineesta, %/100

x_{H2O} on polttoaineen kosteus, %/100

p on tuhkan hehkutushäviö, %/100. (Mts. 108–109.)

5.4 Säteilyhäviöt

Höyrykattilat ovat yleensä hyvin eristettyjä, mutta lämpöä vapautuu silti aina häviöinä ympäristöön. Hyvin eristetyssä kattilassa, jonka ulkoseinämän lämpötila on alle 55 °C, lämpöhäviöt ovat luokkaa 200–300 W/m²K. Kattilan ulkoseinämän pinta-ala ei välttämättä kasva suhteessa kattilan tehoon, mistä aiheutuu se, että pienemmillä kattiloilla lämpöhäviöt ovat suhteessa suuremmat kuin suuremmilla kattiloilla. (Huh-tinen ym. 2000, 110.) Mikäli kattilan lämpötilat, lämmönsiirtokertoimet ja lämmön-siirtopinta-alat tiedetään, voidaan lämpöhäviöt laskea yhtälöstä 8.

$$q_{lh} = (\alpha_k + \alpha_t) * A * (t_{seinä} - t_{ymp}) \quad (8)$$

missä

a_k on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin

a_t on säteilyn lämmönsiirtokerroin

A on kattilan ulkoseinän pinta-ala

$t_{seinä}$ on kattilan ulkoseinän lämpötila

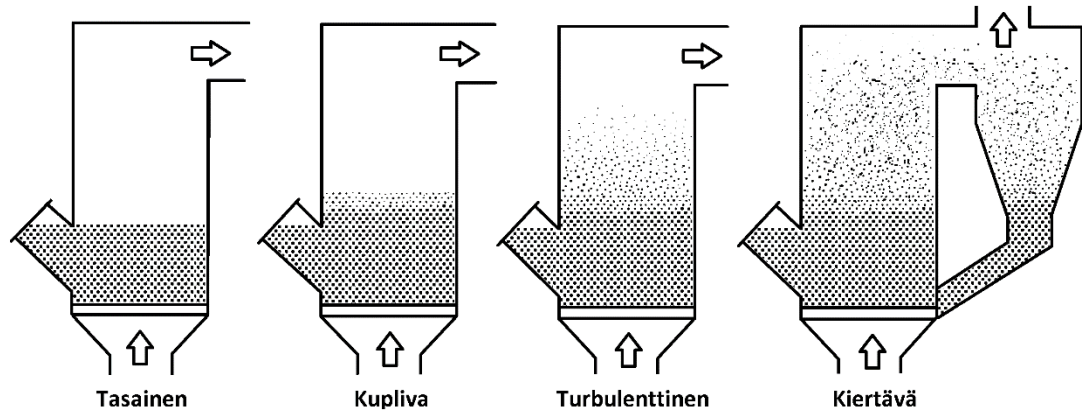
t_{ymp} on ympäristön lämpötila. (Mts. 110.)

6 Leijukerros poltto

Leijupolttoteknologia on viime vuosikymmeninä nostanut suosiotaan. Suurin syy on se, että leijupolttoteknologia mahdollistaa erityyppisten ja myös huonolaatuistenkin polttoaineiden polttamisen samassa kattilassa hyvällä palamisen hyötysuhteella. Leijupolttoteknologia mahdollistaa polttoaineen raekoon laajan skaalautuvuuden ja näin ollen polttoainetta ei tarvitse esimerkiksi jauhaa. (Teir 2002b, 4.)

6.1 Leijupolton periaate

Leijupetikattilan toiminta perustuu hiekkakerrokseen, jonka päälle polttoaine syötetään palamaan. Leijupolttoteknologia mahdollistaa erittäin kosteiden polttoaineiden palamisen korkealla palamisen hyötysuhteella. Leijupetikattilassa palaminen tapahtuu matalilla lämpötiloilla, mikä johtaa suoraan mataliin typpioksidien päästöihin. Polttotekniikka mahdollistaa myös kalkin syöttämisen suoraan tulipesään ja vähentää näin rikkioksidien määrää. (Teir 2002b, 4–5.) Palamisilma puhalletaan hiekkakerroksen läpi kattilan pohjasta ylöspäin. Kuten kuviosta 9 nähdään, hiekkapatja käyttäytyy eri tavoin riippuen palamisilman puhallusnopeudesta.



Kuvio 9. Leijukerros poltto (alkup. kuvio. ks. Teir 2002b, 5)

6.2 Petimateriaalit

Leijupetikattilan tulipesän hiekkapeti koostuu rakeisesta materiaalista, yleensä partikkelikoosta 0,1 - 0,3 mm aina 1,0 mm asti kattilan tyyppin mukaan. Yleisimmät petimateriaalit jaetaan seuraavasti:

- Vähän tuhkaa tuottavissa, esimerkiksi haketta polttavissa kattiloissa, petimateriaalina voidaan käyttää hiekkaa tai soraa.
- Hyvin rikki- tai hiiltä sisältävissä polttavissa kattiloissa petimateriaalina voidaan käyttää tuoretta tai käytettyä kalkkikiveä.
- Kattiloihin, joissa poltetaan korkea- tai keskipitoisen tuhkaosuuden sisältävää hiiltä, voidaan petimateriaalina käyttää juurikin hiilen poltosta syntynyttä tuhkaa. (Basu 2006, 6.)

Biomassaa polttavissa kattiloissa petimateriaalina joudutaan mahdollisesti käyttämään synteettisiä erikoismateriaaleja, jotta vältettäisiin petihiekan sintraantuminen eli kasaantuminen. Toisinaan käytetään erilaisia materiaaliyhdistelmiä. Polttoainepartikkelien koolla ei aina ole suurta merkitystä petihiekan partikkelikokoon, sillä kattilaan syötetyn polttoaineen tilavuus on vain 1-3 prosenttia petihiekan tilavuudesta. Tästä huolimatta paljon tuhkaa tuottavilla polttoaineilla polttoaineen ominaisuuksilla on suuri merkitys sekä petihiekan partikkelikokoon, että materiaalityyppiin. (Mts. 6.) Taulukko 2 kuvaa leijupedin ja muiden polttotekniikoiden eroja.

Taulukko 2. Leijupolton fyysiset ominaisuudet verrattuna muihin polttotekniikoihin (alkup. kuvio ks. Basu 2006, 6)

Ominaisuudet	Stokeri	Leijupeti	Kiertoleiju	Pölypoltto
Pedin korkeus tai polttoaineen palamiskorkeus (m)	0,2	1–2	10–30	27–45
Pintapuolinen nopeus (m/s)	1–2	1,5–2,5	3–5	4–6
Ylimääräinen happi (%)	20–30	20–25	10–20	15–30
Lämmöntuotto (MW/m ²)	0,5–1,5	0,5–1,5	3,0–4,5	4–6
Hiilen palakoko (mm)	32–6	6–0	6–0	<0,1
Maksimikapasiteetti/minimikapasiteetti	4:1	3:1	3–4:1	3:1
Palamisen höytysuhde (%)	85–90	90–60	95–99,5	99–99,5
Typen oksidit (ppm)	400–600	300–400	50–200	400–600
Rikkidioksidin sidottavuus (%)	-	90	80–90	-

6.3 Leijupetityypit

Leijupetityypit jaetaan kupliviin leijukerroskattiloihin (BFB) sekä kiertoleijukattiloihin (CFB). Leijukerroskattilassa ilman virtausnopeus on pieni, jolloin hiekkapartikkelit eivät nouse merkittävästi petihiekan pinnan yläpuolelle. Pedin alta syötettävä leijuilma saa petihiekan käyttäytymään ikään kuin kuplivan fluidin tavoin. Palaminen leijukerroskattiloissa tapahtuu pedin päällä, johon polttoaine syötetään. (Teir 2002b, 5.)

Kiertoleijukattilatyyppissä leijuilma syötetään suuremmalla paineella ja nopeudella petihiekan lävitse, mikä saa hiekan pölymään turbulentsesti tulipesässä. Palamisilman ja polttoainemassan sekoittuminen kiertopetikattiloissa on tehokasta, mikä osaltaan korottaa palamisen höytysuhdetta. Lisäksi rikkipitoisten aineiden poltto helpottuu, koska kattilaan syötettävä kalkki sekoittuu kattilassa hyvin ja sitoo rikkiä tehokkaasti. (Mts. 6.)

6.4 Leijupolton hyötysuhde

Palamisen hyötysuhde leijukerroskattilassa on tyypillisesti noin 90 %. Leijukerroskattilan hyötysuhdetta voitaisiin tiettyyn pisteeseen asti parantaa kierrättämällä palamattomia hiilipartikkeleita, toisin sanoen lentotuhkaa, takaisin palotilaan. Palamattomat hiilipartikkelit eivät kuitenkaan pala jäähtyttyään yhtä hyvin kuin kuumana. Kiertoleijukattilassa paloalue ylettyy paljon korkeammalle kuin kerrosleijukattilassa ja sykloni kierrättää lentotuhkan takaisin palotilaan poltettavaksi. Kiertoleijukattilan palamisen hyötysuhde sen sijaan asettuu yleensä 97,5 – 99,5 % välille. Toisin kuin kerrosleijukattilat, kiertoleijukattilat säilyttävät paremmin palamisen korkean hyötysuhteensa erilaisilla kuormilla. (Basu 2006, 117.)

7 Lämmönsiirtyminen

Lämpöopissa lämmönsiirtyminen jaetaan pääsääntöisesti kolmeen pääkohtaan: konduktio eli johtuminen, radiaatio eli säteily ja konvektio eli kuljetus. Näistä johtuminen ja säteily vaativat toteutuakseen lämpötilaeron. Konvektio sen sijaan on lämpötilaeron lisäksi riippuvainen mekaanisesta massan siirtymisestä. (Bohn, Kreith & Manglik 2003, 7.) Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpötilaerot pyrkivät aina tasoittumaan. Lämmönsiirtyminen tapahtuu aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan, ellei tehdä työtä esimerkiksi lämpöpumpulla.

7.1 Johtuminen eli konduktio

Lämmönsiirtymisessä johtuminen tapahtuu kahden materiaalin välillä korkeammasta lämpötilasta matalampaan eli aineesta, jossa atomien värähtelyliike on suurempi, aineeseen, jossa atomien värähtelyliike on pienempi. Johtumista tapahtuu kiinteillä aineilla, nesteillä ja kaasuilla. Kaasuissa ja nesteissä johtuminen on seurausta molekyylien törmäämisestä toisiinsa niiden liikkeessä arvaamattomasti systeemin sisällä. Kiinteissä aineissa johtumista tapahtuu molekyylien värähtelyn ja vapaiden elektronien energian siirtymisen yhdistelmän seurauksena. On tutkittu, että johtuva lämpöteho

vakiopaksuisen väliaineen läpi on verrannollinen lämpötilaeroon väliaineen ja ympäristön välillä. (Boles & Çengel 2011, 92.) Johtuvaa lämpötehoa voidaan kuvata yhtälöllä 9.

$$\dot{Q}_{cond} = k_t A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (9)$$

missä

\dot{Q}_{cond} on johtuva lämpöteho, W

k_t on materiaalin lämmönjohtavuuskerroin, $\frac{W}{mK}$

A on materiaalin pinta-ala, m^2

T_1 on korkeampi lämpötila, ° C tai K

T_2 on matalampi lämpötila, ° C tai K

Δx on väliaineen paksuus, m. (Mts. 93.)

7.2 Lämpösäteily

Kun termodynamiikassa puhutaan säteilystä, tarkoitetaan materiaalin emittoimaa eli lähettämää sähkömagneettista lämpösäteilyä, joka johtuu muutoksista materiaalin molekyyalitasolla. Toisin kuin johtuminen ja konvektio, säteily ei tarvitse energian siirtymiseen väliainetta. Energian siirtyminen säteilynä on nopein energian siirtymisen tapa sen liikkuessa valonnopeudella. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, emittoivat eli lähettävät lämpösäteilyä. (Boles & Çengel 2011, 94.)

Lämpösäteily on tilavuuskeskeinen ilmiö ja kaikki kiinteät aineet, nesteet ja kaasut emittoivat ja absorboivat säteilyä. Tästä huolimatta säteilyn ajatellaan olevan pinta-alakeskeinen ilmiö läpinäkymättömille kiinteille aineille, kuten metallille, puulle ja kiville. Tämä selittyy sillä, että näiden kiinteiden aineiden sisäosien lähettämä säteily absorboituu muutamien mikronien etäisyyden päässä kappaleen pinnasta eikä näin ollen koskaan saavuta kappaleen pintaa. (Mts. 94.) Maksimi säteilyteho, jonka kappaleen pinta voi lähettää, voidaan laskea yhtälöstä 10.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (10)$$

missä

\dot{Q}_{rad} on lämpösäteilyn teho, W

ε on kappaleen emissiivisyyskerroin, $0 \leq \varepsilon \leq 1$

σ on Stefan-Boltzmannin vakio $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

A on kappaleen pinta-ala, m^2

T_s on kappaleen pinnan lämpötila, K

T_{surr} on ympäristön lämpötila, K. (Mts. 95.)

7.3 Konvektio

Konvektio eli kuljetus vaatii tapahtuakseen lämpötilaeron lisäksi massan siirtymisen paikasta toiseen. Massan siirtyminen voi olla nesteen tai kaasun virtaamista. Jos neste etenee suoraviivaisesti pyörteilemättä, puhutaan laminaarisesta virtauksesta. Jos nesteen virtaus on suunnaltaan vaihtelevaa ja pyörteilevää, puhutaan turbulentsista virtauksesta. (Kaviany 2002, 483.) Nesteen virtaustyyppillä on lämmönsiirtymisen kannalta suuri merkitys, sillä turbulentsissa virtauksessa lämpötilaerot tasoittuvat paremmin kuin laminaarisessa virtauksessa. Laminaarisessa virtauksessa nesteen lämpötila putken sisäpinnan lähellä voi olla eri kuin putken keskellä, mikä vaikuttaa lämmönjohtumiseen nesteen ja putken sisäpinnan välillä. Ilmiössä onkin kyse konvektion ja lämmönjohtumisen yhteisvaikutuksesta.

Niin sanottu vapaa konvektio ilmenee, kun kappale laitetaan nesteeseen, jossa on korkeampi tai matalampi lämpötila kuin itse kappaleessa. Lämpötilaero aiheuttaa tiheyseron, jolloin nesteen tiheys muuttuu riippuen etäisyydestä kappaleen pintaan. Kuumempi eli harvempi neste nousee ylöspäin ja viileämpi eli tiheämpi neste laskeutuu alaspäin, mikä johtaa siihen, että neste liikkuu. Mikäli nestettä liikutetaan pumppun avulla, puhutaan pakotetusta konvektiosta. (Bohn, Kreith & Manglik 2003, 297.)

Vaikka vapaan konvektion tehokkuuskerroin on suhteellisen pieni, käytetään sitä teollisuudessa laajalti hyväksi esimerkiksi höyryjäähdyttimissä, muuntajissa ja elektronisissa laitteissa. Edellä mainituissa esimerkeissä painovoima mahdollistaa vapaan konvektion tapahtumisen. Tästä huolimatta painovoima ei ole ainoa voima, joka mahdollistaa vapaan konvektion. Tietyissä lentoteollisuuden sovellutuksissa, kuten kaasuturbiinien siivissä ja helikoptereiden lavoissa, vapaan konvektion aiheuttavat korkeat keskipakovoimat, joilla painovoiman tapaan on vaikutus fluidin tiheyteen. (Mts. 297.) Konvektion avulla siirtyvä lämpöteho voidaan laskea yhtälöstä 11.

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_f) \quad (11)$$

missä

\dot{Q}_{conv} on konvektion lämmönsiirtoteho, W

h on lämmönsiirtokerroin, W/m²*K

A on pinta-ala, m²

T_s on pinnan lämpötila, ° C tai K

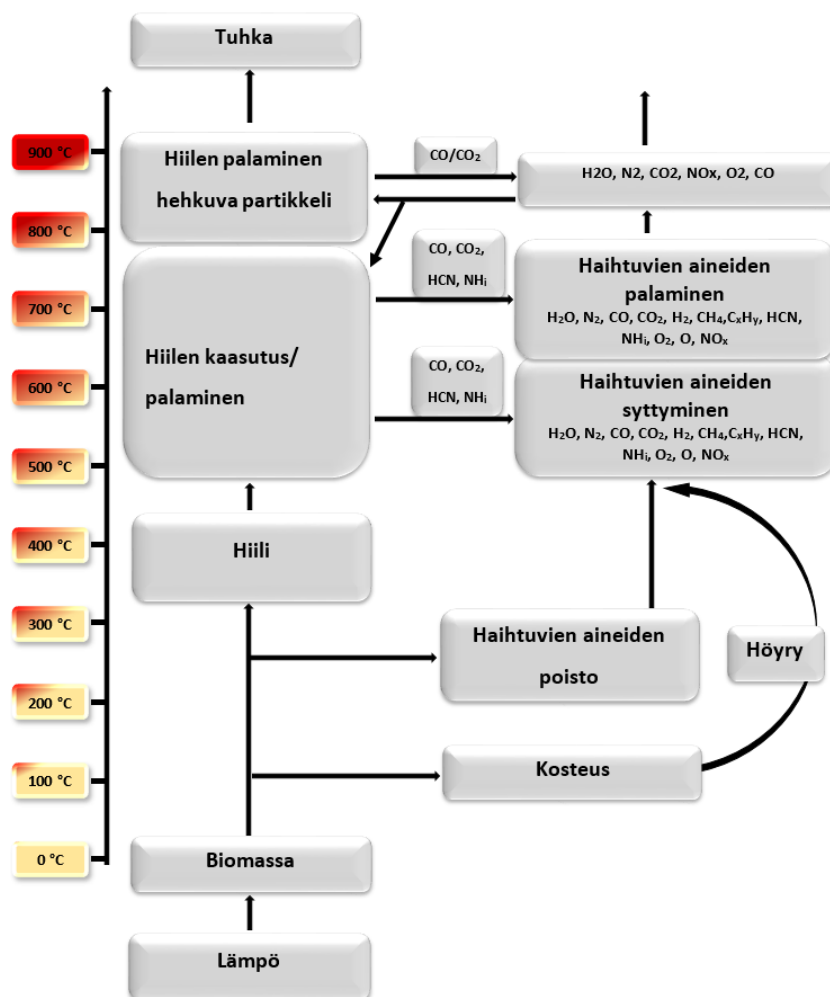
T_f on fluidin lämpötila kaukana pinnasta, ° C tai K. (Boles & Çengel 2011, 93)

Fluidin ja pinnan rajapinnassa lämpötilat oletetaan samoiksi. Lämmönsiirtokerroin h ei ole fluidin ominaisuus. Se on kokeellisesti määritetty parametri, jonka arvo riippuu pinnan tasaisuudesta sekä fluidin virtaustyyppistä, virtausnopeudesta sekä fluidin ominaisuuksista. (Mts. 93)

8 Palaminen

Biomassan palamisprosessi on monimutkainen ja sisältää peräkkäisiä homogeenisiä ja heterogeenisiä reaktioita. Prosessin pääkohdat sisältävät kuivatuksen, haihtuvien aineiden poistamisen materiaalista, kaasutuksen, hiilen palamisen ja kaasufaasin reaktiot. Biomassan palamisprosessin vaiheet nähdään kuviosta 10. Kun puuta tai biomassaa yleisesti kuumennetaan, se hapettuu ja kuivuu. Sen rakenneosat alkavat rea-

goida veden kanssa ja alkavat hajota takaisin lähtöainekseen, jolloin puhutaan hydrolyysistä. Lisäksi tapahtuu pyrolyysi, jolloin puun rakenteet hajoavat lämpötilan noustessa, kun happi ei pääse vaikuttamaan prosessiin. Tällöin muodostuu haihtuvia kaasuja, pikeä ja erittäin reaktiivisia, hiilipitoista puuhiiltä. Haihtuvien kaasujen ja pien leimahtamislämpötilassa eksoterminen reaktio eli palaminen alkaa. Pihkaiset yhdisteet ja selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin hajoaneet tuotteet erotetaan puusta yhdessä vesihöyryn kanssa. Kytemisprosessin aikana vapautuu tarpeeksi lämpöä ketjuprosessin jatkumiseen kuten myös puun hajoamisessa muodostuvien haihtuvien kaasujen vapautumiseen. (Jansens, de Jong, Khan & Spliethoff 2008, 28.)



Kuvio 10. Biomassan palaminen (alkup. kuvio ks. Jansens ym. 2008, 29)

Täydellinen palaminen saavutetaan, kun kaikki polttoaine palaa käyttämällä vain juuri palamisprosessin vaatiman teoreettisen määrän ilmaa. Höyrykattilalla täydell-

listä palamista ei kuitenkaan koskaan voida saavuttaa. Mahdollisimman puhdas palaminen saavutetaan, kun polttoaine palaa käyttämällä minimi ilmamäärän teoreettisen ilmamäärän lisäksi. Tavoitteena onkin, että polttoaine palaa aina mahdollisimman puhtaasti, jolloin palamisen hyötysuhde on korkein mahdollinen, ja päästöt ovat matalat. Epätäydellinen palaminen tapahtuu nimensä mukaisesti silloin, kun polttoaine ei pala täydellisesti. (Teir 2002a, 8.) Syy voi olla esimerkiksi liian vähäinen hapen määrä tai liian alhainen lämpötila.

9 Lämpökapasiteetti

Jotta voidaan täysin ymmärtää lämmönsiirtyminen kahden systeemin välillä, täytyy ymmärtää lämpökapasiteetin merkitys lämmönsiirtymisessä. On kokeellisesti osoitettu, että systeemin absorboima lämpömäärä ja sitä vastaava lämpötilan muutos ovat suoraan verrannollisia keskenään: $q \propto \Delta T$. Verrannollisuuskertoimena lämpömäärän ja lämpötilan muutoksen välillä toimii systeemin lämpökapasiteetti. (Tro 2011, 240.) Lämpömäärä voidaan laskea yhtälöstä 12.

$$q = C \times \Delta T \quad (12)$$

missä

q on lämpömäärä, J

C on lämpökapasiteetti, J/K

ΔT on lämpötilan muutos, °C tai K. (Mts. 240.)

Yhtälöstä huomataan, että mitä suurempi lämpökapasiteetti systeemillä on, sitä pienempi on lämpötilan muutos absorptoitua lämpömäärää kohti. Lämpökapasiteettia kuvataan tarvittavana lämpömääränä nostamaan systeemin lämpötilaa 1 °C. Lämpökapasiteetti on laaja-alainen ominaisuus, joka riippuu lämmitettävän kappaleen massasta. (Mts. 240–241.) Lämpökapasiteettia voidaan kuvata myös moolitasolla, jolloin lämpökapasiteetti kuvaa tarvittavaa lämpömäärä lämmittämään 1 mol verran ainetta 1 °C. Tällöin puhutaan molaarisesta lämpökapasiteetista. (Kotz, Treichel, Treicherl & Ownsend 2012, 185.)

Ominaislämpökapasiteetti kuvaa aineen luontaista kykyä absorptoida lämpöenergiaa. Ominaislämpökapasiteettia kuvataan tarvittavana lämpömääränä nostamaan aineen lämpötilaa 1 °C, kun aineen massa on 1 g. Taulukosta 3 nähdään joidenkin yleisimpien aineiden ominaislämpökapasiteetit. Taulukosta 3 huomataan myös, että veden lämmittämiseen kuluu paljon lämpöenergiaa. Vesi pystyy absorptoimaan suuren määrän lämpöenergiaa ilman, että sen lämpötila nousee huomattavasti. (Tro 2011, 241)

Taulukko 3. Yleisten aineiden ominaislämpökapasiteetit (alkup. taulukko ks. Tro 2011, 241)

Aine	Ominaislämpökapasiteetti, c (J/g*K)
Alkuaineet	
Lyijy	0,128
Kulta	0,128
Hopea	0,235
Kupari	0,385
Rauta	0,449
Alumiini	0,903
Yhdisteet	
Etanoli	2,42
Vesi	4,18
Materiaalit	
Lasi (Pyrex)	0,75
Graniitti	0,79
Hiekka	0,84

Aineen ominaislämpökapasiteettia voidaan käyttää kuvaamaan aineeseen lisätyn lämpömäärän ja aineen määrän sekä vastaavan lämpötilan nousun suhdetta. Kun saadaan tietoon aineen ominaislämpökapasiteetti ja massa, voidaan lämpömäärä laskea yhtälöstä 13.

$$q = m \times c \times \Delta T \quad (13)$$

missä

q on lämpömäärä, J

m on aineen massa, kg

c on aineen ominaislämpökapasiteetti, J/(g *°C)

ΔT on lämpötilan muutos, °C tai K. (Mts. 241.)

10 Kokkolan Energian K2-prosessihöyrykattila

Toimeksiantajan Kokkolan Energian prosessikattila K2 on keväällä 2009 valmistunut 15 MW:n luonnonkiertoinen lieriökattila. Polttotekniikaltaan kattila on kupliva leijupeti. Kattilassa on 4 MW:n käynnistyspoltin sekä 10 MW:n kuormapoltin, jotka käyttävät polttoaineena kevyttä polttoöljyä. Kattilan höyrynpaine on 40 bar, lämpötila 270 °C ja virtaus 6,5 kg/s. Polttoaineina kattila käyttää turvetta ja biomassaa. Kattilassa on myös ekonomaiserin yläpuolelle sijoitettu pieni kuivaustulistin, jolla pyritään vähentämään höyrynsiirtoputkistossa tapahtuvaa lauhtumista. Tulistus nostaa höyryn lämpötilaa noin 15 - 20 °C. (Käyttö- ja hoito-ohjeet. 2008.)

Kattilan leijukerros muodostuu hienorakeisesta, noin 0,5 - 1,5 mm:n partikkelikoon materiaalikerroksesta, joka on käynnistysvaiheessa puhdasta hiekkaa. Normaalikäytössä hiekan seassa on polttoaineen tuhkaa. Kattilan hiekkapatjan korkeus on noin 300 - 600 mm. Leijukerroksessa on tuhkanpoistoputki karkeamman materiaalin poistamiseksi. Uutta petihiekkaa lisätään hiekkasiilosta sulkusyöttimellä. Oikeaa petikorkeutta tarkkaillaan leijutusilman paineen avulla, jonka tulisi olla 5 - 10 kPa. (Mt.)

K2-kattilassa on yksi leijupedin yläpuolinen, painehajoitteinen käynnistyspoltin, jonka maksimi teho on 4219 kW. Käynnistyspoltin on suunnattu leijupetiä kohden. Polttimen palamisilma otetaan sekundääri-ilmakanavasta. Käynnistyspoltin on varustettu omalla öljynpaineen korotuspumpulla. Poltin käyttää polttoaineena kevyttä polttoöljyä, jonka maksimivirtaus on 355 kg/h eli noin 5,9 kg/min. Poltinta ohjataan digitaalisella poltinohjauksella, joka on Profibus-väylän kautta liitetty Siemens PC S7-pääohjausjärjestelmään. (Mt.) Ylöslämmityksessä kiinteän polttoaineen syöttö voidaan käynnistää petilämpöjen saavutettua 340 °C. Poltinta tulee käyttää kiinteän polttoaineen syötön rinnalla vähintään ¾-teholla tulipesän räjähdysvaaran vuoksi. Petilämpöjen saavutettua 750 - 800 °C voidaan käynnistyspoltin pysäyttää. (Mt.)

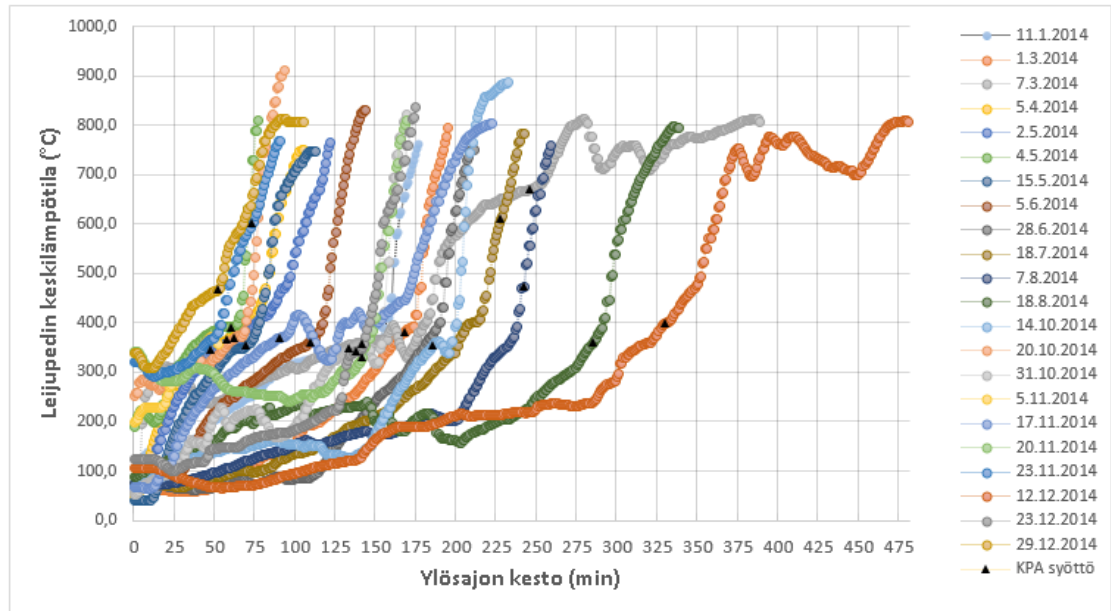
11 Ylöslämmitysten mittausdatan analysointi

11.1 Mittausdatan kokoaminen

K2-Kattilan ylösajoja analysoitiin Kokkolan Energian TOPi-tietokannan tietojen avulla. Tietojen saamiseksi otettiin Kokkolan Voiman valvomon näytöltä laskuissa tarvittavat positiot ylös. Nämä positiot syötettiin TOPi-järjestelmään, josta saatiin mittatiedot vuodelta 2014 Excel-muodossa tunnin tarkkuudella. Petilämpöjen ja öljyn virtausarvojen perusteella mittausdatasta ilmeni, että ylösajoilta vaikuttavia päiviä vuonna 2014 oli 22 kappaletta. Näiltä 22 päivältä otettiin vastaavat mittatiedot suurimmalla mahdollisella tarkkuudella eli minuutin välein.

Mittausdatasta selvisi, että vuonna 2014 kevyttä polttoöljyä K2-kattilan ylöslämmityksissä kului noin 25 000 litraa. Kattilan ylöslämmitys aloitettiin petihiekan lämpötilan ollessa alhaisimmillaan 39,4 °C ja korkeimmillaan 341,8 °C. Mittausdatan perusteella mallinnetusta kuvioista 11 nähdään kaikki K2-kattilan ylösajot vuodelta 2014. Kuvioon on merkitty myös pienellä mustalla kolmiolla lämpötila ja aika, jolloin kiinteän polttoaineen syöttö kattilaan on aloitettu. Liitteestä 1 huomataan, että kattilaa lämmitettiin keskimäärin 3h 10 min, kunnes päästiin täysin kiinteälle polttoaineelle. Keskimääräiseksi petilämmön nousuksi selvisi 4,17 °C/min, mikä ylittää kattilavalmistajan suosituksen 3 °C/min. Kuten luvussa 4.5 todettiin, kattilavalmistajan ylöslämmitysnopeussuosituksen ylittäminen rasittaa kattilan tulipesän suojamuurauksia sekä luo lämpöjännityksiä tulipesään, tulistimiin ja keittoputkistoon. Kattila on ollut käytössä jo vuodesta 2008, joten se ei ole enää kattilavalmistajan takuun piirissä, mutta tasapainon löytäminen ylöslämmityksessä olisi erityisen tärkeää kattilan käyttöiän kannalta. Mittausdatasta selvisi myös, että nopeimmassa ylöslämmityksessä kattilan petilämmöt nousivat keskimäärin 8,1 °C/min ja hitaimmassa 1,5 °C/min. Tässä vaiheessa opinnäytetyöprosessia päätettiin keskittyä selvittämään syitä eroihin ylöslämmitysnopeuksien välillä. Syitä ylöslämmitysten kestoihin on monia:

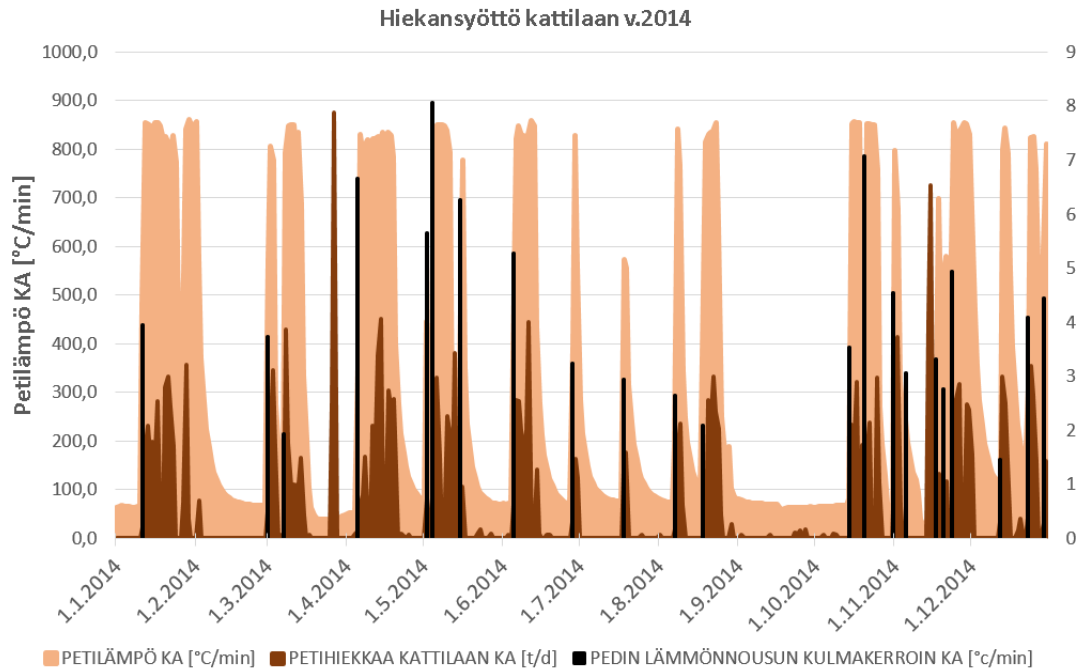
- petihiekan kunto
- kiinteän polttoaineen laatu
- vuorojen tyyli operoida kattilaa



Kuvio 11. K2-kattilan ylösajojen kestot vuonna 2014

11.2 Petihiekan kunnan merkitys

Tutkimusten mukaan on suositeltavaa polttaa puupolttoaineiden seassa 10–30 % turvetta tai muuta rikkipitoista polttoainetta, jotta ehkäistään pedin agglomeroitumista, alkalikloridien muodostumista tulistinpinnoille sekä kattilan nuohouksen tarvetta. Turpeen rikki sitoo puupolttoaineen klooria ja vastaavasti puupolttoaine sitoo turpeen rikkiä. (Hämäläinen & Makkonen 2003, 1.) On selvää, että petihiekan leijumisominaisuudet heikkenevät ajan myötä hiekkaan sekoittuessa palamisessa syntyntä tuhkaa. Tästä syystä hiekkaa pitää vaihtaa jatkuvasti. Kuviossa 12 on kuvattu kaikki vuoden 2014 petihiekan lisäykset kattilaan päivätasolla. Kuvioista on nähtävissä pedin lämmön nousun kulmakertoimen laskeminen maaliskuun lopun huoltoseisokin hiekanvaihdon jälkeen. Tästä huolimatta on mahdotonta arvioida luotettavasti petihiekan laadun vaikutusta vuoden 2014 ylöslämmityksiin, sillä muuttujia, jotka vaikuttavat petilämpöjen nousuun, on monia.



Kuvio 12. Hiekansyöttö kattilaan vuonna 2014

11.3 Kiinteän polttoaineen laatu

E erityisen kostean tai muuten huonon lämpöarvon omaavan polttoaineen syöttö kattilaan ylöslämmitystilanteessa saattaa kääntää pedin lämpötilan nousun laskuksi. Kosteaa polttoainetta vaatii paljon energiaa sisältämänsä veden höyrystämiseen, jolloin kiinteän polttoaineen syöttö voi ylöslämmitystilanteessa laskea petihiekan lämpötilaa.

Kokkolan voimalaitoksilla pyritään käyttämään polttoaineena metsäbiomassan ja turpeen sekoitusta. Polttoainetta sekoitetaan pyöräkuormaajalla, joten tarkka kattilaan menevä polttoaineseos ei ole tiedossa. Tammikuun 2014 polttoaineraporttien punnitus-tiedoista käy kuitenkin ilmi, että tammikuun polttoaine koostui keskimäärin noin 25 % turpeesta ja 75 % metsäbiomassasta. Kokkolan voimalaitosten polttoaineseoksen pitäisi siis olla hyvä petiseoksen laadun säilymisen kannalta. Polttoaineen laadussa ja kosteudessa esiintyy tosin luonnollista vaihtelevuutta.

11.4 Kattilan operointi ylöslämmityksessä

Kokkolan Energian käynnissäpitomestarin mukaan operaattorien ainoa ohjeistus K2-kattilan ylöslämmitykselle on sen hoitaminen mahdollisimman nopeasti. Varsinkin talvikuukausina lämmön- ja höyryntarve saattaa yllättää nopeasti ja kattila halutaan saada nopeasti käyttöön. (Niemonen 2015.) Ylöslämmityksiä tarkastelemalla liitteistä 2 - 12 huomataan, että suurimmat erot operoinnissa tulevat käynnistyspolttimen käytössä, primääri-ilman käytössä ja kiinteän polttoaineen syötön aloituksessa. On tapauksia, joissa kiinteän polttoaineen syöttö kattilaan on aloitettu erittäin myöhäisessä vaiheessa, mikä osaltaan on huonontanut kattilan energiatehokkuutta. Liitteestä 14 huomataan, että kiinteän polttoaineen syöttö voidaan aloittaa petilämpöjen saavutettua 340 °C lämpötilan.

Kuten luvun 12.1 kuviosta 12 nähdään, kattila on vuonna 2014 ajettu ylös kaksi kertaa täysin puhtailla hiekoilla. Näiden ylöslämmitysten vertailemisen pitäisi näin ollen antaa luotettavaa tietoa kattilan operoinnin erojen seurauksista, koska petihiekan laadun vaikutusta ei tarvitse arvioida. Ylöslämmityksessä 5.4. öljyä on kulunut 431 kg ja petilämmöt ovat nousseet 6,7 °C/min. Ylöslämmityksessä primääri-ilman paine on pidetty vakiona, lämpöjen nousua on säädetty käynnistyspolttimella ja kiinteän polttoaineen syöttö on aloitettu heti kattilasuojan salliessa. 17.11. tapahtuneessa ylöslämmityksessä öljyä on kulunut 849 kg ja petilämmöt ovat nousseet 3,3 °C/min. Petilämpöjen nousua on säädetty käynnistyspolttimella ja primääri-ilman painetta muuttamalla. Kiinteän polttoaineen syöttö on aloitettu kattilasuojan salliessa, mutta tuntemattomasta syystä käynnistyspolttin on sammunut lähes portaattomasti, ennen kuin petilämmöt ovat saavuttaneet 400 °C lämpötilan, mikä on johtanut petilämpöjen romahtamiseen ja näin ollen ylöslämmityksen pidentymiseen 60 minuutilla.

Jokaisella vuorolla on oma tapansa operoida kattilaa normaalissa käyttötilanteessa ja niin myös ylöslämmityksessä. K2-kattilaa operoivilla työntekijöillä on kokemuksen tuoma tieto, että lämpö siirtyy käynnistyspolttimesta petiin tehokkaasti, kun käytetään kattilavalmistajan ohjeistusta 60 - 90 mbar korkeampaa leijutuspainetta. Keski-

määräinen leijutusaine vuonna 2014 oli 121,5 mbar. Taulukko 4 koottiin kahden tärkeimmän kriteerin mukaan: yölämmityksen nopeus ja öljyn kulutus. Ensimmäiseen sarakkeeseen koottiin lämmönnousun keskiarvoa 4,3 °C/min suurempien ja pienempien yölämmityskertojen keskiarvot, jolloin nähdään, millaisilla arvoilla yölämmitys on ollut keskiarvoa nopeampi ja hitaampi. Toiseen sarakkeeseen koottiin öljynkulutuksen keskiarvoa 4,7 kg/min suurempien ja pienempien yölämmityskertojen keskiarvot, jolloin nähdään, millaisilla arvoilla öljyä on kulunut keskimääräistä enemmän ja vähemmän. Tavoiteltavat arvot esitetään taulukossa vihreällä taustalla.

Ylälämmitysten energiatehokkuuden parantamisen kannalta taulukosta nousevat esiin tietyt asiat. Ylälämmitys on keskimäärin nopeampi ja öljyn kulutus on pienempi, kun primääri-ilman paine on alle keskiarvon 121,5 mbar, kiinteän polttoaineen syöttö aloitetaan keskimääräistä aloituslämpötilaa 434,5 °C aikaisemmin ja kiertokaasun virtaus on alle keskiarvon 0,5 Nm³/s. Taulukosta huomataan myös, että yölämmityksen energiatehokkuus kärsii, kun petihiekan alkulämpötila on alle 112 °C, mikä on kattilan operoinnista riippumaton asia.

Taulukko 4. K2-kattilan optimaaliset operointiarvot

	Pedin lämpötilan nousun kannalta optimaaliset arvot			Öljynkulutuksen kannalta optimaaliset arvot		
	>4,3 °C/min	KESKIARVO	<4,3 °C/min	<4,7 kg/min	KESKIARVO	>4,7 kg/min
Alkulämpötila KA [°C]	154,0	112,0	77,7	136,1	112,0	87,9
Loppulämpötila KA [°C]	801,1	799,8	798,6	799,2	799,8	800,3
Lämpötilaero [°C]	647,1	687,7	721,0	663,1	687,7	712,4
Pedin lämpötilan nousu [°C/min]	5,9	4,3	3,0	4,5	4,3	4,1
Tulipesän paine KA [mbar]	-1,91	-1,9	-1,96	-1,92	-1,9	-1,95
KPA-syöttö aloitettu [°C]	400,8	434,5	462,1	430,3	434,5	438,7
P-ilman paine [mbar]	119,3	121,5	123,2	119,8	121,5	123,1
P-puhallin taajuus [%]	86,8	89,5	91,7	86,9	89,5	92,0
S-ilman paine [mbar]	29,3	29,3	29,3	29,5	29,3	29,1
S-puhallin taajuus [%]	61,0	61,2	61,4	61,5	61,2	60,9
Ylälämmityksen kesto [h:min]	0:01:53	0:03:17	0:04:26	0:03:12	0:03:17	0:03:22
Öljynkulutus [kg/min]	4,5	4,7	4,8	4,1	4,7	5,2
Öljynkulutus [kg]	508,0	911,2	1241,1	767,7	911,2	1054,7
Starttipolttimen teho [%]	75,7	78,7	81,2	70,1	78,7	87,4
Kiertokaasun virtaus [Nm ³ /s]	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,7
Jäännöshappi [%]	13,7	14,0	14,2	13,4	14,0	14,6

12 Ylöslämmitysten kustannusten arvioiminen

Ylöslämmityksessä petihiekkaan siirtyy lämpöenergiaa konvektiolla, konduktiolla ja säteilemällä. Käynnistyspolttimesta suuri osa lämpöenergiasta siirtyy petihiekkaan säteilemällä, mutta lämpöä siirtyy myös konvektiolla ja konduktiolla. Kiinteän polttoaineen palaessa pedin pinnalla lämpöä siirtyy johtumalla ja säteilemällä sekä primääri-ilman avulla konvektiolla. Jotta voidaan arvioida lämmönsiirtymistä polttoaineista petihiekkaan, petihiekalle täytyy laskea lämpökapasiteetti.

12.1 Petihiekan lämpökapasiteetti ja lämmönsiirtyminen petiin

Kattilassa käytetään raekooltaan 0,8 -1,5 mm olevaa luonnonhiekkaa, jonka voimalaitokselle tuottaa Hiekkapojat Oy (Niemonen 2015). Hiekkapojien HP1200- petihiekka on ominaisuuksiltaan K2-kattilaan sopivaa hiekan raekoon ja irtotiheyden ollessa 0,5-1,5 mm ja 1,3 t/m³ (Voimalaitosmateriaalit n.d). Kattilassa käytettävän petihiekan irtotiheydeksi oletettiin 1,3 t/m³.

Mittausdatan perusteella K2-kattilan hiekkasiilon massa on 26 - 27.3 vähentynyt 10,4 tonnilla, jolloin kattilan petihiekka on todennäköisesti vaihdettu. Näin ollen petihiekan massan oletetaan myös olevan 10,4 tonnia. Jotta voitiin varmistua mittausdatan luotettavuudesta, laskettiin petihiekan massa liitteen 13 tulipesän muurauskuvan perusteella. Tulipesän muurauskuvan perusteella tulipesän sisäpuolen mitat ovat 3067 mm x 3057 mm, jolloin hiekkapatsaan pohjan pinta-alaksi saatiin noin 9,38 m². Kattilavalmistajan käyttö- ja hoito-ohjeissa mainitaan petikerroksen korkeudeksi lepotilassa ilmasuuttimien yläpinnasta mitattuna 300–400 mm ja toisessa yhteydessä 300 – 600mm. Laskuissa oletettiin petikerroksen korkeudeksi 600 mm, jotta saatiin laskettua suurin mahdollinen lämpökapasiteetti. Edellä mainituilla tiedoilla petihiekan tilavuudeksi saatiin 5,63 m³, joka irtotiheyden arvolla 1,3 t/m³ tarkoittaa 7,31 tonnin massaa. Eroa näin ollen siilon massan ja laskennallisen massan välillä tulee noin 3 tonnia. Ero voi selittyä sillä, että korkeampi hiekkakerros on koettu paremmaksi, huoltoseisokissa kattilaan on laitettu liikaa hiekkaa tai hiekan irtotiheys on todellisuudessa suurempi kuin 1,3 t/m³. Laskuissa käytettiin massojen keskiarvoa 8,9

tonnia. Petihiekan lämpökapasiteetti laskettiin yhtälöllä 14 käyttäen taulukossa 3 ilmoitettua hiekan ominaislämpökapasiteettia.

$$C = c \times m \quad (14)$$

missä

$$c = 0,84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$m = 8900 \text{ kg}$$

$$C = 0,84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 8900 \text{ kg} = 7476 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

Petihiekan lämmittäminen 1 °C vaatii lämpöenergiaa siis 7476 kJ, joka vastaa 2,07 kWh. Taulukkoon 6 laskettiin ylöslämmitysten petihiekan lämpömäärät yhtälön 12 avulla jättäen kuitenkin punaisella merkityt ajankohdat pois laskuista. Taulukon lämpömääriä voidaan pitää suuntaa antavina, sillä petihiekan lämpökapasiteetti muuttuu tuhkan sekoituessa petihiekkaan. Polttoaineista petihiekkaan siirtyneen lämpöenergian osuus laskettiin kaavalla 15.

$$n = \frac{q_{\text{petihiekka}}}{m_{\text{öljy}} * Q_{\text{net,ar,öljy}} + m_{\text{kpa}} * Q_{\text{net,ar,kpa}}} \quad (15)$$

missä

n on lämmönsiirtyminen polttoaineista petihiekkaan, %

$q_{\text{petihiekka}}$ on petihiekan lämpömäärä, MJ

$m_{\text{öljy}}$ on ylöslämmityksessä kulunut öljy, kg

$Q_{\text{net,ar,öljy}}$ on öljyn lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg

m_{kpa} on ylöslämmityksessä kulunut kiinteä polttoaine, kg

$Q_{\text{net,ar,kpa}}$ on kiinteän polttoaineen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg

12.2 Kiinteän polttoaineen käytön vaikutus kustannuksiin

Kattilaan syötettävän polttoaineseoksen arvioitiin koostuvan 75 % metsähakkeesta ja 25 % jyrshinturpeesta. Kustannusten laskemisessa käytettiin apuna taulukon 5 tietoja.

Taulukkoon 6 laskettiin polttoainekustannukset seuraavalla kaavalla:

$$pa_{kustannukset} = m_{öljy} * x_{öljy} + m_{kpa} * x_{kpa} \quad (16)$$

missä

$pa_{kustannukset}$ on polttoainekustannukset, €

$m_{öljy}$ on ylöslämmityksessä kulunut öljy, kg

$x_{öljy}$ on kevyen polttoöljyn keskihinta vuonna 2014, €

m_{kpa} on ylöslämmityksessä kulunut kiinteä polttoaine, kg

x_{kpa} kiinteän polttoaineseoksen hinta vuonna 2014, €

Taulukko 5. Polttoaineiden lämpöarvot ja hinnat (Energian hinnat n.d; Biopolttoaineiden lämpöarvoja 2013)

Polttoaine	Tehollinen lämpöarvo MJ/kg	hinta €/MWh
Kevyt polttoöljy	43,2	102,1
Bio	10,3	20,61
Metsähake (75%)	10,5	21,26
Jyrshinturpe (25 %)	9,7	18,68

Kiinteän polttoaineen käytön tuomat säästöt arvioitiin laskemalla kevyen polttoöljyn ja biopolttoaineen tuottamat lämpöenergiat yhteen. Tämän jälkeen laskettiin tuotetun lämpöenergian hinta, jos lämpöenergia olisi tuotettu pelkästään öljyllä. Taulukosta 5 huomataan, että keskimääräisen ylöslämmityksen polttoainekustannukset ovat noin 1180 €. Taulukosta 5 huomataan myös, että kiinteän polttoaineen käyttö tuo keskimäärin noin 250 € säästön verrattuna tilanteeseen, jossa ylöslämmitys olisi hoidettu pelkästään polttamalla kevyttä polttoöljyä.

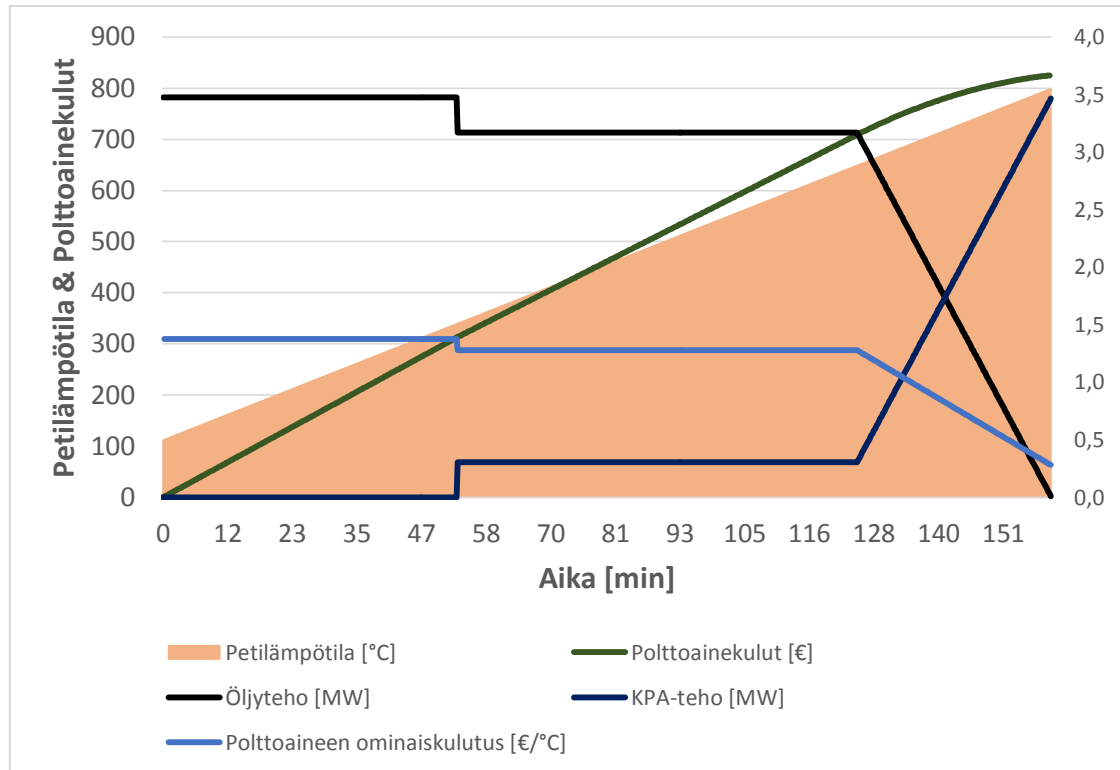
Taulukko 6. Pedin lämpökapasiteetti ja polttoainekustannukset

Päivämäärä	Pedin ΔT [°C]	Ylöslämmi- tyksen kesto [h;min]	Pedin lämpö- määrä [MJ]	Öljynku- lutus [kg]	Käynnistys- polttimen teho [%]	KPA:n kulutus [kg]	S- ruuvin taajuus [%]	Lämmön siirtyminen polttoaineista petiin [%]	Polttoainekus- tannukset [€]	KPA:n tuoma säästö [€]	Huomioitavaa
11.1.2014	699,5	177,0	5229,8	838,5	80,1	355,1	2,1	13,1	1048,3	82,8	
1.3.2014	727,2	195,0	5436,9	1029,5	89,2	290,9	1,6	11,4	1278,5	67,8	
7.3.2014	751,1	389,0	5615,6	1388,3	60,3	5687,1	15,2	4,7	2036,3	1325,6	
5.4.2014	700,2	105,0	5234,4	430,9	69,4	170,8	1,7	25,6	538,0	39,8	Petihiekka vaihdettu
2.5.2014	690,4	122,0	5161,5	625,6	86,7	162,3	1,4	18,0	776,1	37,8	
4.5.2014	621,9	77,0	4649,3	373,1	81,9	379,9	5,1	23,1	479,6	88,5	
15.5.2014	707,6	113,0	5290,0	478,8	71,6	241,0	2,2	22,8	600,8	56,2	
5.6.2014	760,3	144,0	5683,7	584,7	68,6	584,9	4,2	18,1	750,8	136,3	
28.6.2014	681,5	211,0	5094,9	1100,5	88,1	0,0	0,0	10,7	1348,3	0,0	
18.7.2014	709,8	242,0	5306,4	1322,8	92,4	147,0	0,6	9,0	1629,4	34,3	
7.8.2014	685,6	259,0	5125,6	1412,2	92,2	236,9	1,0	8,1	1744,2	55,2	
18.8.2014	704,3	338,0	5265,4	1828,1	91,4	358,4	1,1	6,4	2260,9	83,5	
14.10.2014	819,6	232,0	6127,4	1134,5	82,6	747,7	3,4	10,8	1434,1	174,3	
20.10.2014	658,8	93,0	4924,9	421,0	76,5	541,9	6,1	20,6	547,7	126,3	
31.10.2014	769,5	169,0	5752,9	819,0	81,9	307,5	1,9	14,9	1021,6	71,7	
5.11.2014	158,9	52,0	1187,7	227,1	73,8	0,0	0,0	12,1	278,2	0,0	Ylösajo keskeytyvät
17.11.2014	734,8	222,0	5493,2	848,8	64,6	47,4	0,2	14,8	1042,7	11,0	Petihiekkaa vaihdettu
20.11.2014	468,5	169,0	3502,4	1502,8	150,3	580,0	3,6	4,9	1875,5	135,2	Kuormapoltinta poltettu
23.11.2014	449,6	91,0	3361,5	405,1	75,2	182,3	2,1	17,3	507,1	42,5	
12.12.2014	702,6	481,0	5252,7	1847,4	64,9	8093,5	17,5	3,2	2740,7	1886,5	
23.12.2014	714,5	175,0	5341,8	901,9	87,1	287,2	1,7	12,7	1122,0	66,9	
29.12.2014	466,0	105,0	3484,0	434,0	69,9	2163,0	21,5	8,4	659,3	504,2	
Keskiarvo	687,7	197,0	5141,6	911,2	78,7	1049,2	4,5	13,7	1178,3	244,6	

12.3 Keskimääräisen yöslämmityksen kustannusten kehittyminen

Kuvio 13 kuvaa keskimääräisen yöslämmityksen kustannusten kehittymistä. Keskimääräinen yöslämmitys alkaa petilämpötilan ollessa 112 °C ja päättyy, kun lämpötila on 800 °C. Tällöin lämmitysjakson kestoksi muodostuu 160 minuuttia, mikäli petilämmöt nousevat 4,3 °C/min. Petihiekan vaatima keskimääräinen lämpömäärä on noin 5141,6 MJ ja lämmönsiirtymisen hyötysuhde 13,7 %. Tämä tarkoittaa sitä, että petihiekan lämmittämiseen tarvitaan 37530 MJ lämpöenergiaa. Lämmitys kestää noin 160 minuuttia, joten jatkuva lämpötehon tarve on 3,475 MW. Kattilasuoja sallii kiinteän polttoaineen syötön kattilaan, kun lämpötila on 340 °C. Tämän jälkeen käynnistyspolttimen tulee olla vähintään ¾-teholla 650 °C:seen asti (Käyttö- ja hoito-ohjeet. 2008). Tämän jälkeen kiinteän polttoaineen osuutta aletaan kasvattaa ja öljyn osuutta vastaavasti vähentää. Todellisuudessa petilämmöt ja lämmönsiirtyminen ei-

vät kehity lineaarisesti, mutta kuvion 13 kautta saadaan hyvä käsitys polttoainekustannusten kehittymisestä yöslämmityksessä. Kuviosta nähdään, että yöslämmityksen kustannukset alkavat laskea, kun kiinteä polttoaine alkaa korvata kevyttä polttoöljyä.



Kuvio 13. Kustannusten kehittyminen yöslämmityksessä

13 K2-kattilan yöslämmityksen nopeuttaminen primääri-ilmaa esilämmittämällä

Primääri-ilman esilämmitys oletettavasti auttaa petihiekan lämpenemisen nopeuttamisessa. Luvun 7.3 kaavasta 11 huomataan, että kun petihiekkaa kuumennetaan kuumalla primääri-ilmalla, siirtyvä lämpöteho on suurin prosessin alkuvaiheessa johtuen suurimmasta mahdollisesta lämpötilaerosta ilman ja hiekan välillä. Lämpöteho laskee lämpötilaeron kaventuessa, mutta toisaalta ilman lämmityksen tarve laskee myös savukaasujen lämmittäessä primääri-ilmaa palamisilman esilämmittimessä.

Aiheeseen liittyvä kirjallisuus käsittää yleensä petihiekan ja leijutusilman yhteisen konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen laskemisen leijukerroksen pinnalla, mutta ei

niinkään lämpöenergian siirtymistä itse petihiekkaan. Raikon, Saastamoisen, Hupan ja Kurki-Suonion (2002, 504) mukaan petihiekan ja ilman yhteiselle konvektiiviselle lämmönsiirtokertoimelle on lähes mahdotonta antaa kunnollista korrelaatiota, sillä lämmönsiirtoon vaikuttavat lukuiset asiat. Oletettavasti myös primääri-ilman esilämmityksen vaikutus petihiekan lämpenemiseen täytyisi siis todeta kokeilemalla, mikä ei tämän opinnäytetyön tekoprosessin aikana ollut mahdollista.

Apua ongelman ratkaisussa pyydettiin suomalaisilta kattilavalmistajilta, joista Amec Foster Wheeler vastasi avunpyyntöön. Koskisen (2015) mukaan leijupetikattiloiden ylöslämmityksiä hoidetaan monella tapaa pedin yläpuolisilla polttimilla ja/tai primääri-ilmaa esilämmittämällä, mutta edellä mainittujen samanaikaiseen käyttöön hän ei ole törmännyt. Käynnistyspolttimen ja esilämmitetyn primääri-ilman samanaikainen käyttö hänen mukaansa olisi kuitenkin tehokasta pedin lämpenemisen kannalta. Käytännön tasolla primääri-ilmalla pedin lämmittämisen etu verrattuna pedin yläpuolisen polttimen käyttöön on petihiekan sintraantumisen välttäminen. Pedin yläpuolisen käynnistyspolttimen liekki voi sulattaa hiekan seassa olevaa tuhkaa, joka aiheuttaa sintraantumista eli paakkuuntumista. (Mt.)

Tavoiteltava primääri-ilman lämpötila riippuu kattilan ilmakaapin ja arinan rakenteesta. Jos petilämpötila haluttaisiin nostaa esimerkiksi 600 °C:seen pelkästään primääri-ilmaa lämmittämällä, täytyisi primääri-ilma kuumentaa yli 700 °C:n. Jos petilämmöt haluttaisiin nostaa 350 °C:seen, täytyisi primääri-ilma kuumentaa noin 400 °C:seen. (Mt.) K2-kattilan tapauksessa primääri-ilma kannattaisi lämmittää juurikin 400 °C:seen, jolloin petihiekka saataisiin nopeammin kiinteän polttoaineensyötön aloittamislämpötilaan 340 °C. Liitteistä 2 - 12 huomataan, että petilämmöt ovat yleensä nousseet kelvollisesti kiinteän polttoaineen syötön aloittamisen jälkeen.

Amec Foster Wheeler käyttää nykyään rakentamissaan kattiloissa pedin yläpuolisia polttimia johtuen heidän käyttämästään arinarakenteesta. Pienemmän kokoluokan kattiloissa muurattu ilmakaappi on helppo toteuttaa, mutta kattilan koon kasvaessa ilmenee rakenteellisia ongelmia. Primääri-ilman esilämmittämisestä yleensä Amec

Foster Wheelerillä on hyviä kokemuksia. (Mt.) Primääri-ilman esilämmitystä käytetään ainakin muun muassa Kainuun Voima Oy:n kiertopetikattilassa, jossa esilämmitys tehdään primääri-ilmakanavassa olevalla kanavapolttimella. Esilämmityksellä tavoitellaan petihiekan tasaista lämpenemistä. (Mursu 2011, 9.)

14 Tulosten pohdinta

14.1 Tavoitteiden saavuttaminen ja luotettavuus

Idea opinnäytetyön aiheesta sai alkunsa Kokkolan Energian ajatuksesta nopeuttaa K2-prosessihöyrykattilan ylöslämmityksiä tukemalla käynnistyspoltinta esilämmittämällä leijutusilmaa. Ylöslämmitykset koettiin siis toimeksiantajan näkökulmasta liian hitaiksi. Opinnäytetyön päätavoitteeksi muodostui leijutusilman esilämmittämisen vaikutuksen selvittäminen ylöslämmitysnopeuteen nähden. Toisena tavoitteena oli koota vuoden 2014 ylöslämmitysten mittadata yhteen ja analysoida tiedot. Kolmantena tavoitteena oli esittää parannusehdotuksia, jotta ylöslämmitykset saataisiin nopeammiksi ja energiatehokkaammiksi.

Tulosten mukaan kattilan ylöslämmitykset vuonna 2014 keskimäärin ylittivät kattilavalmistajan enimmäissuosituksen petilämpöjen nousun 3 °C/min. Osassa ylöslämmityksistä lämmönnousua koskeva suositus 3 °C/min ylitettiin moninkertaisesti ja osassa taas puolitettiin. Kattilan operointia ylöslämmityksissä vertailtiin, jolloin huomattiin, että pienikin virhe voi johtaa ylöslämmityksen venymiseen ja öljyn kulutuksen kaksinkertaistumiseen. Tulosten perusteella ylöslämmitykset olivat energiatehokkaampia ja nopeampia, kun primääri-ilman paine oli alle vuoden keskiarvon 121,5 mbar ja kiinteän polttoaineensyöttö aloitettiin petilämpöjen vuoden keskiarvoa 434,5 °C aikaisemmin. Kiinteän polttoaineen käyttö toi keskimäärin noin 250 € säästön verrattuna tilanteeseen, jossa ylöslämmitys olisi hoidettu pelkästään polttamalla kevyttä polttoöljyä. Lisäksi petihiekan korkean alkulämpötilan todettiin vaikuttavan energiatehokkuuteen ja ylöslämmitysnopeuteen positiivisesti, mikä on kattilan operoinnista riippumaton asia.

Opinnäytetyön tavoitteissa onnistuttiin pääasiassa hyvin. Ylöslämmitysten mittadata koottiin yhteen ja analysoitiin niin hyvin kuin mahdollista. Opinnäytteen päätavoitetta eli leijutusilman esilämmityksen vaikutusta ylöslämmitysnopeuteen ei saavutettu laskennallisesti, niin kuin toimeksiantaja olisi halunnut. Amec Foster Wheelerin avustuksella kuitenkin selvisi, että leijutusilma tulisi lämmittää noin 50 °C korkeampaan lämpötilaan kuin petihiekan halutaan lämpenevän. K2-kattilan tapauksessa sopivaksi lämpötilaksi todettiin siis 400 °C, jolloin petihiekka lämpenisi nopeammin ja tasaisemmin kiinteän polttoaineensyötön aloittamislämpötilaan 340 °C. Primääri-ilman esilämmitys myös mahdollistaisi sen, että käynnistyspoltinta voitaisiin käyttää pienemmällä teholla. Edellä mainittu yhdistelmä vähentäisi petihiekan sintraantumista ja petihiekka pysyisi pidempään parempilaatusena. Ylöslämmitysten energiatehokkuutta ja nopeuttamista tulisi lähteä parantamaan pääasiassa kattilan operoinnin kautta.

Optimaalisia kattilan operointiarvoja on erittäin hankala arvioida, koska petihiekan lämpenemiseen vaikuttavia muuttujia on monia. Epäluotettavuutta löytyy myös liitteiden 2 - 12 ylöslämmityskäyrästä hiekansyötöstä ja tuhkanpoistosta. Ne toimivat sekuntien sekvensseissä, ja mittatiedot tallentuvat TOPiin minuutin välein. Tästä aiheutuu se, että hiekansyöttö tai tuhkanpoisto ei näy TOPissa, jos ne eivät ole tapahtuneet minuutin vaihtumisen aikana. Esimerkiksi kuvaajista ei siis näe luotettavasti, että onko ylöslämmitystä hidastanut liian vähäinen petihiekan määrä kattilassa.

14.2 Jatkoselvitykset ja -toimenpiteet

Tuloksia voidaan hyödyntää kattilan energiatehokkuuden parantamiseen. Kattila ajetaan useita kertoja vuodessa ylös eikä prosessin kulkua ole välttämättä analysoitu. Nyt ylösajojen etenemiset on koottu yhteen ja tuloksista nähdään selkeästi, millaisilla ajoarvoilla ylöslämmitys on onnistunut hyvin. On toivottavaa, että opinnäytteen tulokset johtavat kattilan energiatehokkaampaan ja yhdenmukaisempaan operointiin sekä ylöslämmitysten nopeutumiseen.

Jos kattilan operoinnin parantamisella ei päästä haluttuihin tuloksiin, voidaan harkita primääri-ilman esilämmittämistä. Esilämmitys voidaan toteuttaa esimerkiksi kanavapolttimella tai höyryllä lämmönvaihtimen kautta. Näitä vaihtoehtoja harkitessa täytyy tutkia tarkemmin kattilan ilmakaapin, arinan ja primääri-ilmaputkiston mahdolliset rajoitteet ilman esilämmityksen tuoman lämpötilan nousun suhteen. K2:n primääri-ilma voitaisiin käytännössä lämmittää höyryllä tilanteessa, jossa saatavilla on yli 400 °C:n höyryä. Tällainen tilanne on mahdollinen, kun Kokkolan Energialla on liikaa höyryntuotantoa ja K1-kattilaa ollaan ajamassa alas. Höyryä voitaisiin siirtää myös Kokkolan Energian tuotantolaitokselta 40 bar:n siirtoputkistolla, mutta tällöin höyryn lämpötilataso ei olisi riittävä lämmittämään ilmaa 400 °C:seen asti.

Lähteet

Basu, P. 2006. Combustion and Gasification in fluidized beds. Boca Raton: CRC Press.

Bohn, M., Manglik, R. & Kreith, F. 2003. Principles of Heat transfer. Seventh Edition. Global Engineering.

Boles, M. & Çengel, Y. 2011. Thermodynamics: An Engineering Approach. Seventh Edition in SI Units. New York: McGraw-Hill.

Energiakonserni. N.d. M-Files. Kokkolan Energian yritysinfo uudelle työntekijälle.

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P., Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. p., uud. p. Helsinki: Edita.

Huhtinen, M. Korhonen, R. Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka. 2. p. Helsinki: Opetushallitus.

Hämäläinen, J. & Makkonen, P. 2003. Leijupolttoteknologia: vihreää energiaa. VTT:n raportti. Viitattu 26.2.2015. <http://koti.mbnet.fi/ppom/PDF/RY.pdf>

Jansens, P., de Jong, W., Khan, A. & Spliethoff, H. 2008. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. Fuel Processing Technology. Volume 90, 21 - 50. Viitattu 15.4.2015. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382008001963>

Kakaç, S. 1991. Boilers, Evaporators and Condensers. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Kaviany, M. 2002. Principles of Heat Transfer. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Khan, M. A., Khan, M. Z., Zaman, K & Naz, L. 2013. Global estimates of energy consumption and greenhouse gas emissions. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 29, 336 - 344. Viitattu 15.4.2015 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211300631X>

Koskinen, K. 2015. Manager TMU Amec Foster Wheelerillä. Sähköpostiviesti 25.3.2015. Vastaanottaja T. Saarenpää.

Kotz, J., Treichel, D., Treichel, P. & Townsend, J. 2012. Chemistry and Chemical Reactivity. Stamford: Cengage Learning.

Kulla, A. & Teir, S. 2002. Steam/Water Circulation Design. Viitattu 3.2.2015. [http://www.energy.kth.se/compedu/webcompedu/ManualCopy/Steam Boiler Technology/Steam water circulation/steam water circulation.pdf](http://www.energy.kth.se/compedu/webcompedu/ManualCopy/Steam%20Boiler%20Technology/Steam%20water%20circulation/steam%20water%20circulation.pdf)

Käyttö- ja hoito-ohjeet. 2008. Kattilavalmistaja Putkimaa Oy:n ohjekirja Kokkolan Voimalalle.

Mursu, S. 2011. Voimalaitoksen syöttövesipumppujen automaatiotekniikan modernisointi. Opinnäytetyö. Oulun seudun ammattikorkeakoulu, automaatiotekniikan koulutusohjelma. Viitattu 23.3.2015. http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/36572/Mursu_Sami.pdf?sequence=1

Niemonen, V. 2015. Oy Kokkola Power Ab:n käynnissäpitomestari. Puhelinkeskustelu 12.3.2015.

Energian hinnat. N.d. Tilastokeskuksen polttoaineiden hintojen keskiarvot vuodelta 2014. Viitattu 8.4.2015. <http://193.166.171.75/Database/StatFin/ene/ehi/ehi.fi.asp>

Biopolttoaineiden lämpöarvoja. 2013. Motivan kokoama tietopaketti polttoaineista. Viitattu 28.2.2015. http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden_lampoarvoja

Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. Toinen täydennetty painos. Jyväskylä: International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto.

Sähkö tulee Kokkolaan. N.d. Kokkolan Energian 100-vuotishistoria. Viitattu 23.2.2015. <http://www.kokkolanenergia.fi/fi/historia.htm>

Teir, S. 2002a. Basics of Steam Generation. Viitattu 3.2.2015. http://www.energy.kth.se/compedu/webcompedu/ManualCopy/Steam_Boiler_Technology/Basics_of_steam_generation/basics_of_steam_generation.pdf

Teir, S. 2002b. Modern Boiler Types and Applications. Viitattu 3.2.2015 http://www.energy.kth.se/compedu/webcompedu/ManualCopy/Steam_Boiler_Technology/Modern_boiler_applications/modern_boiler_types_and_applications.pdf

Tro, N. 2011. Chemistry: A Molecular Approach. Second Edition. New Jersey: Pearson Education, Inc.

Voimalaitosmateriaalit. N.d. Hiekkapoikien voimalaitosten petihiekkamateriaalit. Viitattu 25.3.2015. <http://hiekkapoijat.fi/tuotteet/voimalaitosmateriaalit/>

Yritysesittely. N.d. Kokkolan Energian verkkosivut. Viitattu 23.2.2015. <http://www.kokkolanenergia.fi/fi/yritysesittely.htm>

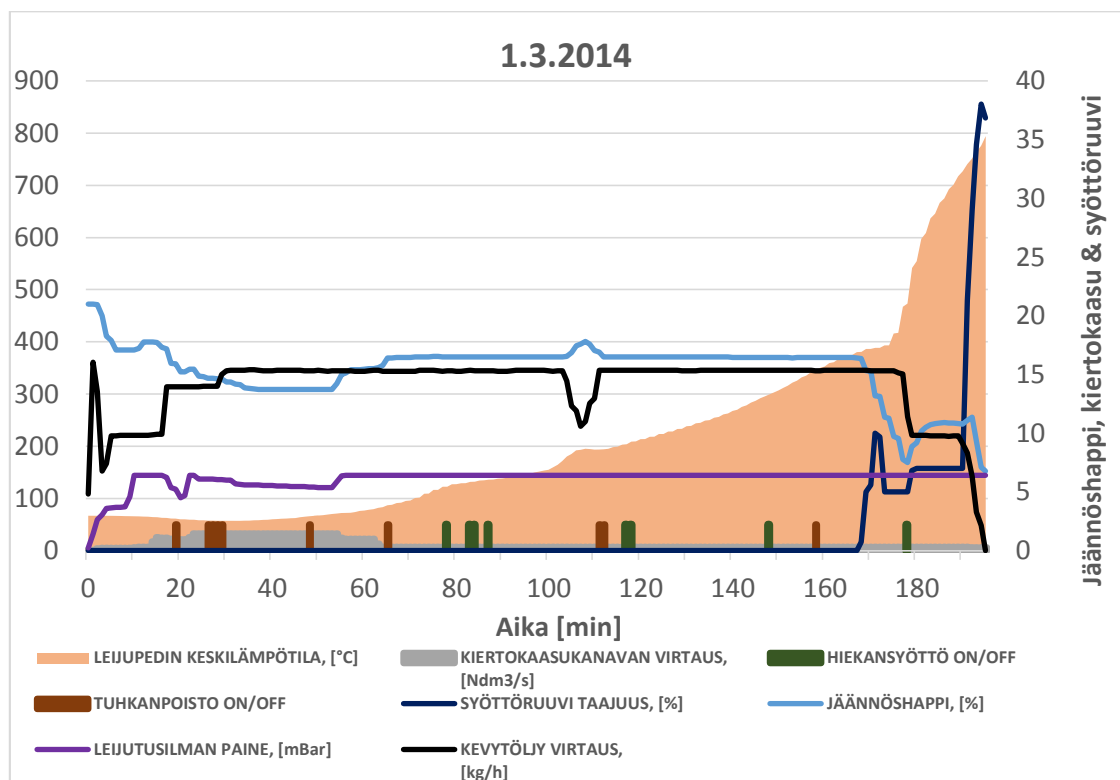
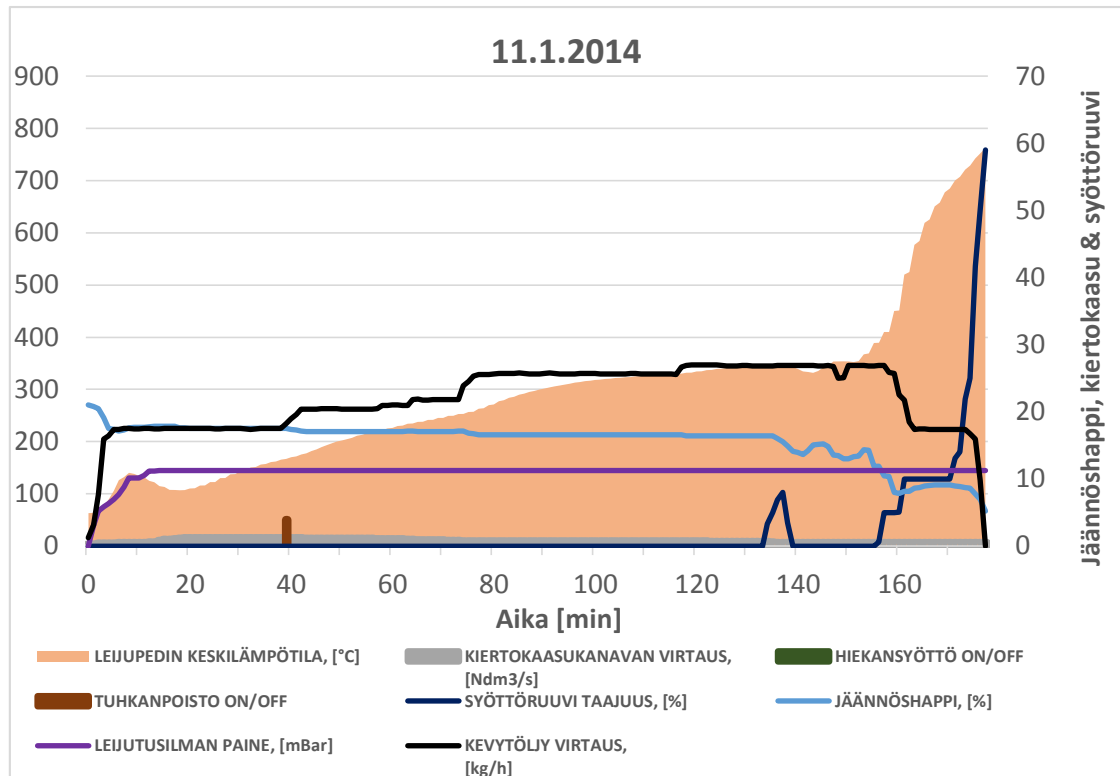
Öljyn kulutus. 2013. Öljy- ja biopolttoaineala ry:n kokoama tietopaketti maailman öljynkulutuksesta. Viitattu 22.2.2015. <http://www.oil.fi/fi/oljymarkkinat/maailman-energian-kulutus>

Liitteet

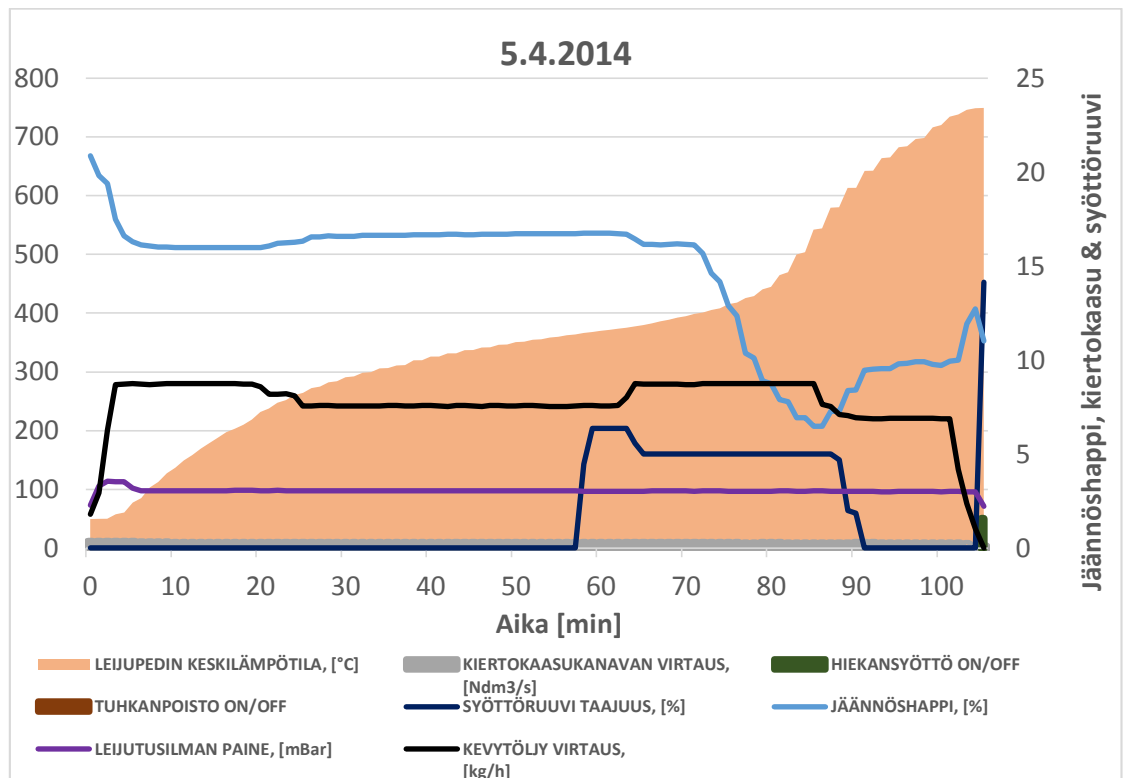
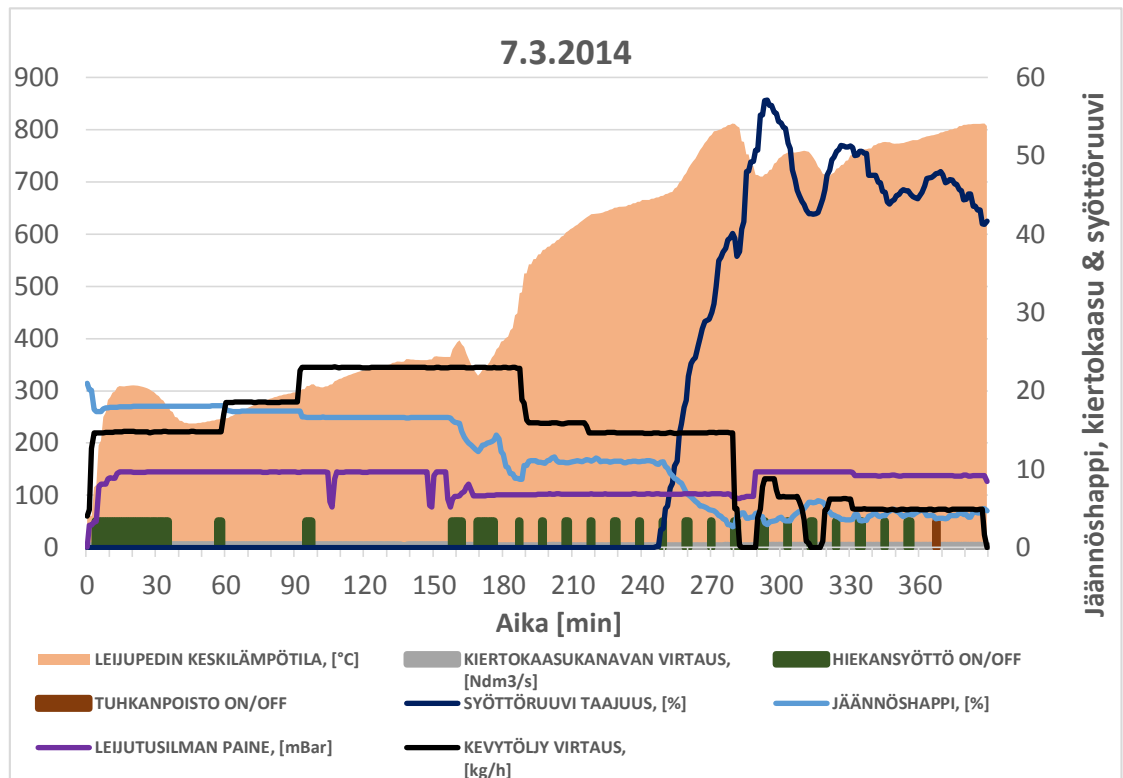
Liite 1. Kattilan ylöslämmitysten tunnusluvut vuodelta 2014

Päivämäärä	Alkulämpötila [°C]	Loppulämpötila [°C]	Lämpötilaero [°C]	Pedin lämpötila nouse [°C/min]	Tulipesän paine [mbar]	KPA-syöttöalotettu [°C]	Syöttöviin taaajuus [%]	P-ilmian paine [mbar]	S-puhallin taaajuus [%]	S-ilmian paine [mbar]	S-puhallin taaajuus [%]	Ylöslämmityksen kesto [h:min]	Öljynkulutus [kg/min]	Öljynkulutus [kg]	Starttipolttimen teho [%]	Kiertokäskun virtaus [Nm³/s]	Jäännöshappi [%]	Huomioitavaa
11.1.2014	63,0	762,5	699,5	4,0	-1,9	346,8	2,1	140,8	98,0	29,1	59,7	0:02:57	4,7	838,5	80,1	0,6	15,7	
1.3.2014	66,8	794,0	727,2	3,7	-1,9	380,8	1,6	137,1	97,6	29,0	60,7	0:03:15	5,3	1029,5	89,2	0,5	15,4	
7.3.2014	56,4	807,5	751,1	1,9	-2,0	670,4	15,2	126,1	91,3	30,1	61,7	0:06:29	3,6	1388,3	60,3	0,3	11,4	
5.4.2014	49,4	749,5	700,2	6,7	-1,9	366,3	1,7	97,3	75,7	29,1	60,2	0:01:45	4,1	430,9	69,4	0,2	14,4	Tuore pethiekka
2.5.2014	75,2	765,6	690,4	5,7	-1,9	343,3	1,4	126,6	96,6	29,2	61,0	0:02:02	5,1	625,6	86,7	0,9	13,3	
4.5.2014	188,8	810,7	621,9	8,1	-1,9	390,9	5,1	135,7	95,2	29,2	60,9	0:01:17	4,8	373,1	81,9	0,3	14,6	
15.5.2014	39,4	747,0	707,6	6,3	-1,9	352,7	2,2	129,3	88,2	29,0	59,1	0:01:53	4,2	478,8	71,6	0,3	13,9	
5.6.2014	69,3	829,6	760,3	5,3	-1,9	360,8	4,2	119,9	87,4	29,2	61,1	0:02:24	4,1	584,7	68,6	0,3	14,8	
28.6.2014	69,5	751,0	681,5	3,2	-2,0	778,6	0,0	109,5	87,0	29,0	60,7	0:03:31	5,2	1100,5	88,1	0,7	14,8	
18.7.2014	74,3	784,1	709,8	2,9	-2,0	609,4	0,6	124,4	95,0	29,0	61,5	0:04:02	5,5	1322,8	92,4	0,9	14,6	
7.8.2014	72,2	757,8	685,6	2,6	-2,0	473,7	1,0	115,8	94,9	29,1	61,8	0:04:19	5,5	1412,2	92,2	1,2	13,7	
18.8.2014	89,1	793,4	704,3	2,1	-1,9	359,8	1,1	115,7	87,5	29,0	61,4	0:05:38	5,4	1828,1	91,4	0,7	14,6	
14.10.2014	67,3	886,9	819,6	3,5	-2,0	352,3	3,4	113,7	83,8	29,1	60,4	0:03:52	4,9	1134,5	82,6	0,3	14,7	
20.10.2014	251,4	940,2	658,8	7,1	-2,0	368,6	6,1	101,7	78,7	29,2	61,4	0:01:33	4,5	421,0	76,5	0,2	13,3	
31.10.2014	53,1	822,6	769,5	4,6	-1,9	355,4	1,9	126,0	90,4	29,2	60,1	0:02:49	4,8	819,0	81,9	0,5	15,8	
5.11.2014	198,2	357,1	158,9	3,1	-1,9	-	0,0	91,2	73,3	28,7	60,7	0:00:52	4,4	227,1	73,8	0,2	16,9	Ylöslämmitys keskeytynyt
17.11.2014	68,1	802,8	734,8	3,3	-2,0	369,8	0,2	121,6	85,0	28,9	60,0	0:03:42	3,8	848,8	64,6	0,2	15,4	Tuore pethiekka
20.11.2014	341,8	810,3	468,5	2,8	-1,9	331,0	3,6	118,0	83,2	29,2	64,7	0:02:49	8,9	1502,8	150,3	0,2	12,9	Kuumapoltinta poltettu
23.11.2014	319,4	769,1	449,6	4,9	-1,9	600,6	2,1	121,6	86,6	29,1	59,9	0:01:31	4,5	405,1	75,2	0,5	13,0	
12.12.2014	105,0	807,6	702,6	1,5	-2,0	399,1	17,5	123,8	95,7	30,4	66,8	0:08:01	3,8	1847,4	64,9	1,0	11,3	
23.12.2014	122,8	837,3	714,5	4,1	-2,0	342,4	1,7	127,1	92,5	29,1	61,0	0:02:55	5,2	901,9	87,1	0,7	14,1	
29.12.2014	339,7	805,7	466,0	4,4	-1,8	468,2	21,5	115,9	82,5	30,6	65,6	0:01:45	4,1	434,0	69,9	0,3	10,4	
KESKIARVO	112,0	799,8	687,7	4,3	-1,9	434,5	4,3	121,5	89,5	29,3	61,2	0:03:17	4,7	911,2	78,7	0,5	14,0	

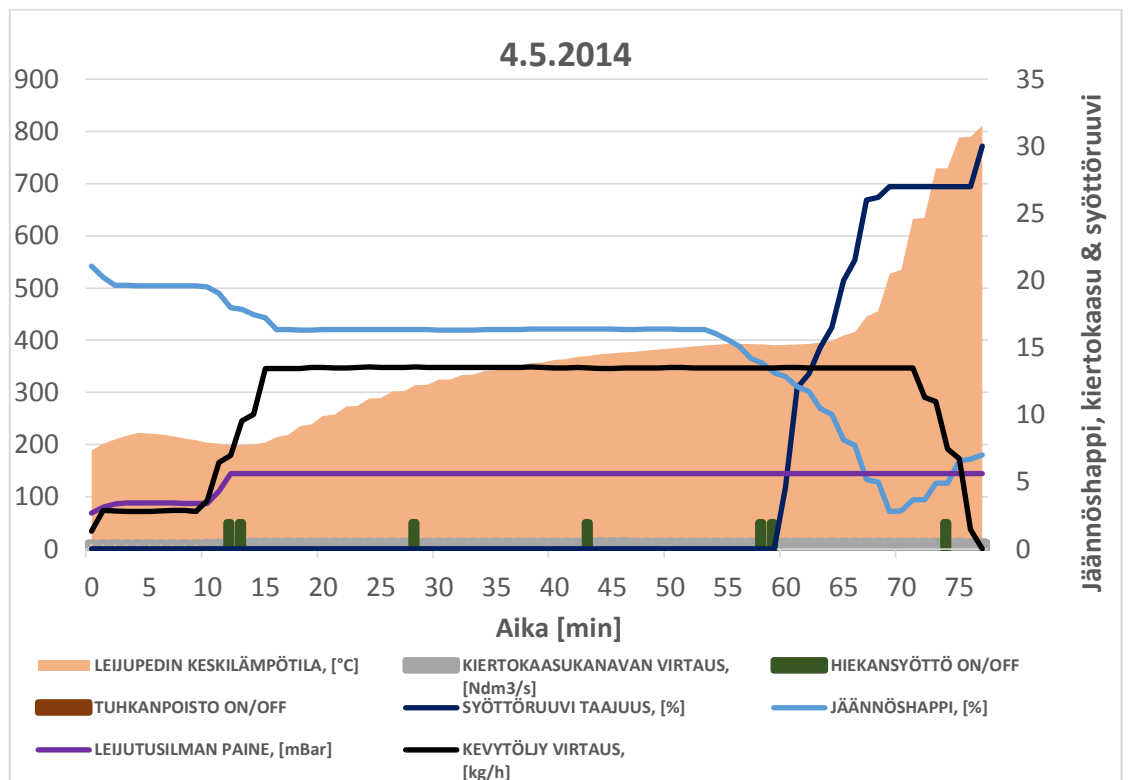
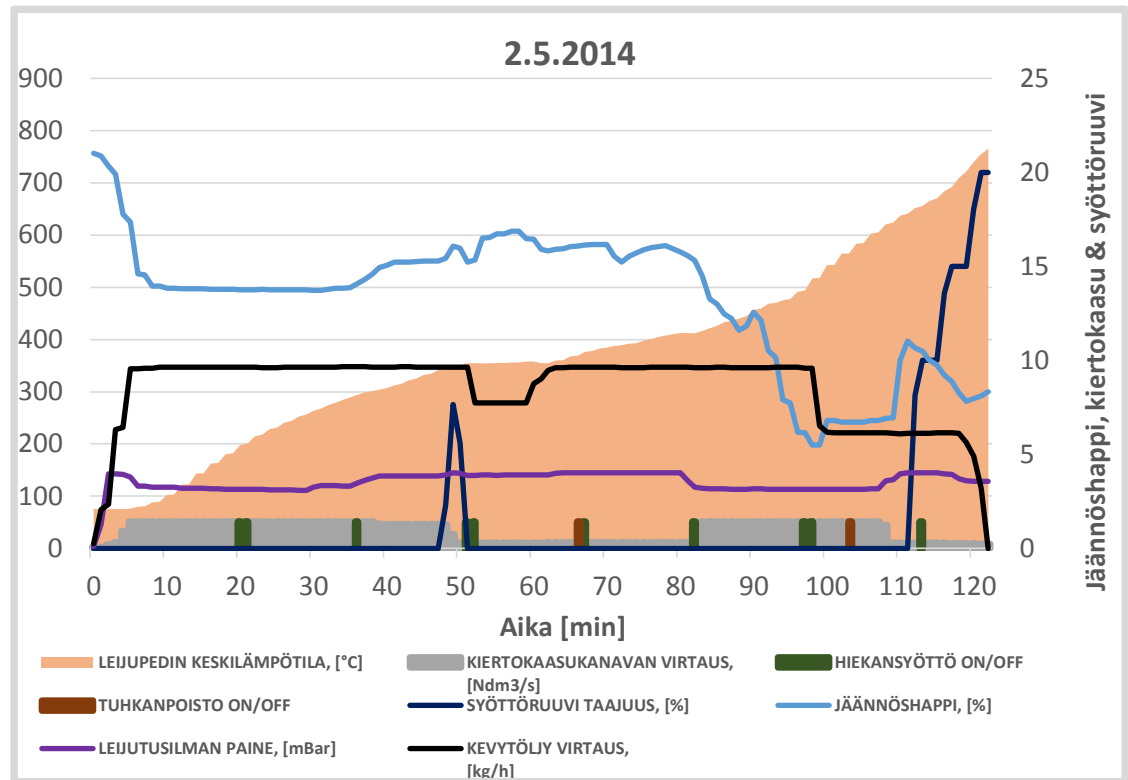
Liite 2. Ylöslämmityskäyrät 11.1. ja 1.3.



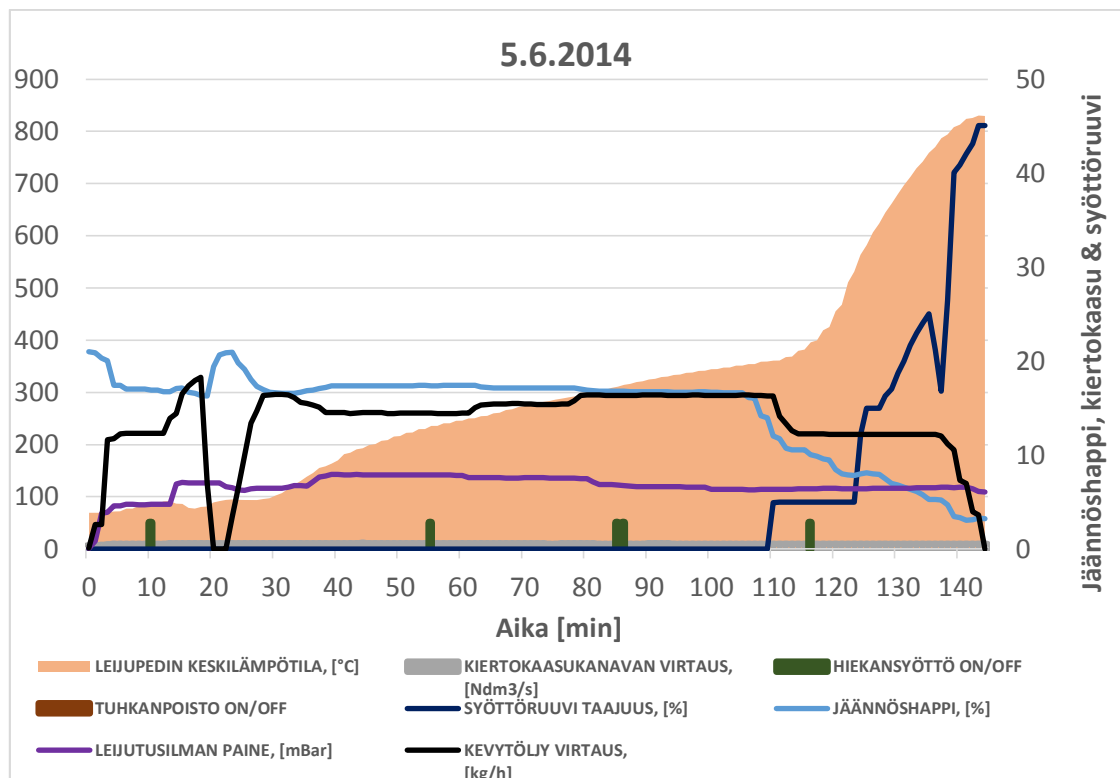
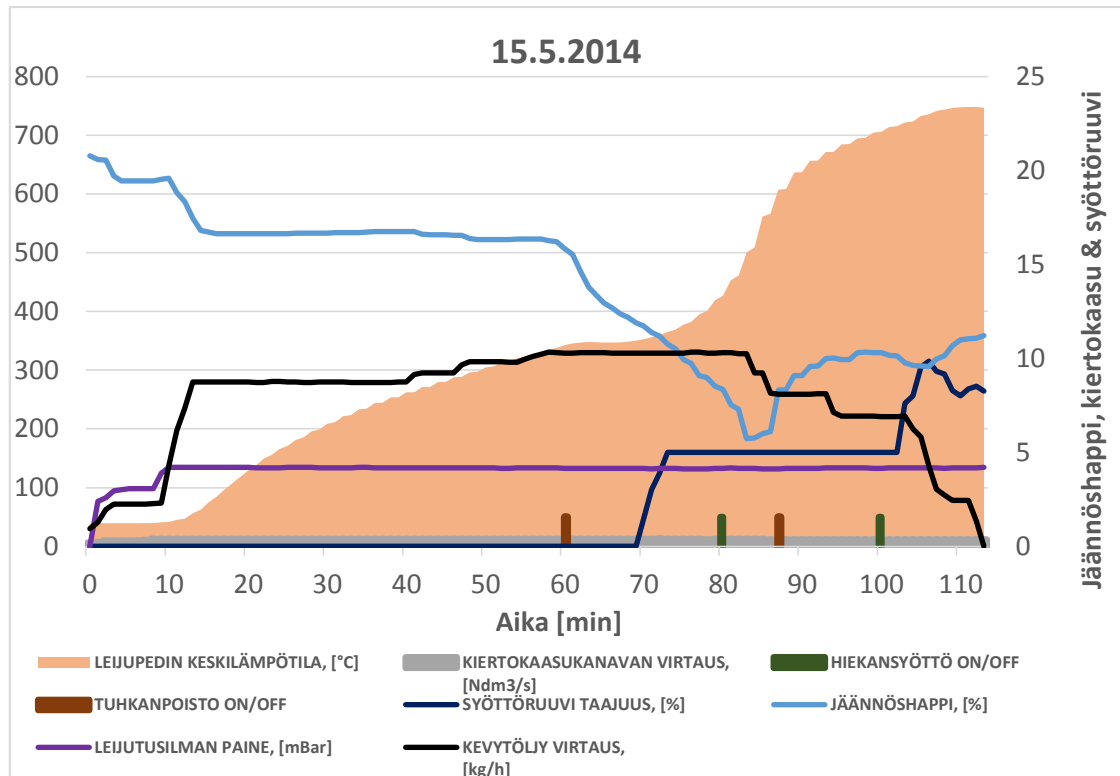
Liite 3. Ylöslämmityskäyrät 7.3. ja 5.4.



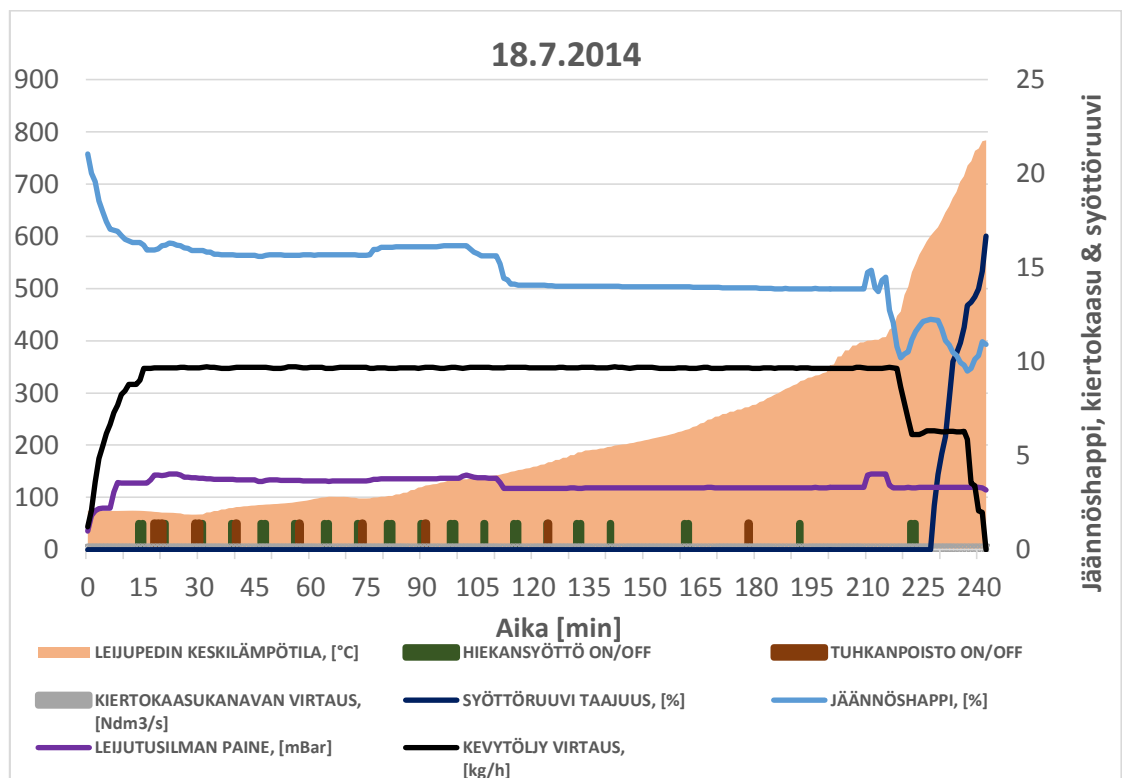
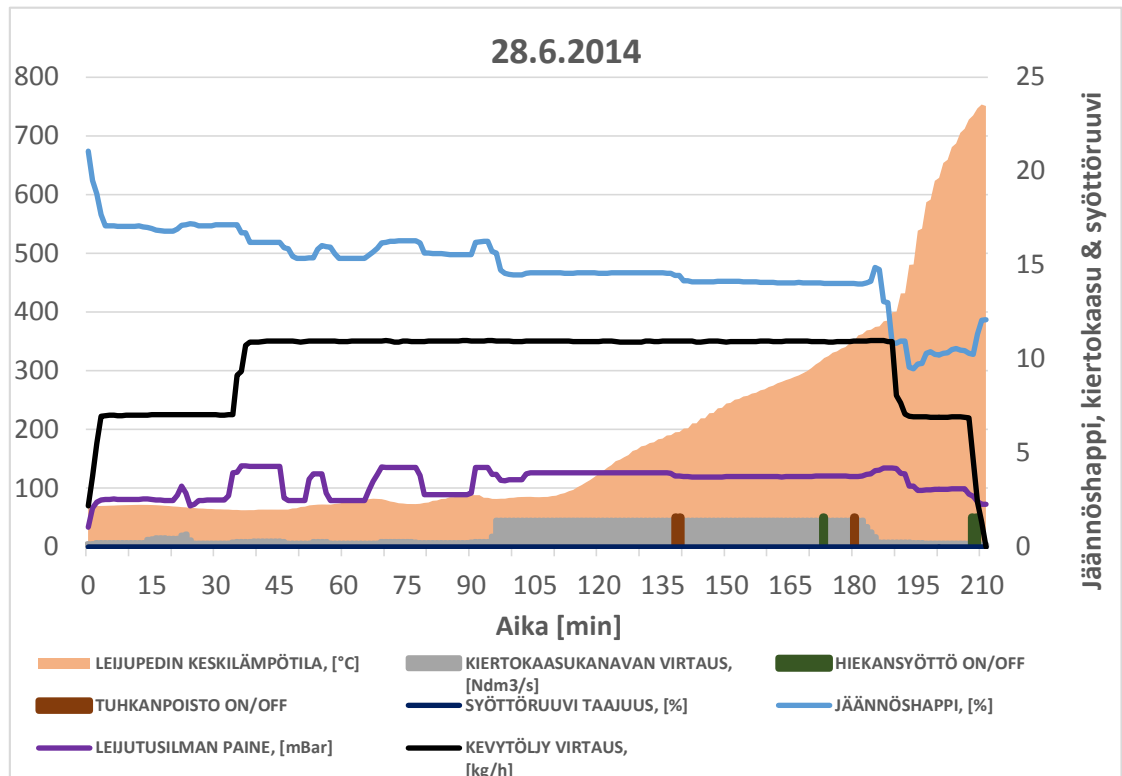
Liite 4. Ylöslämmityskäyrät 2.5. ja 4.5.



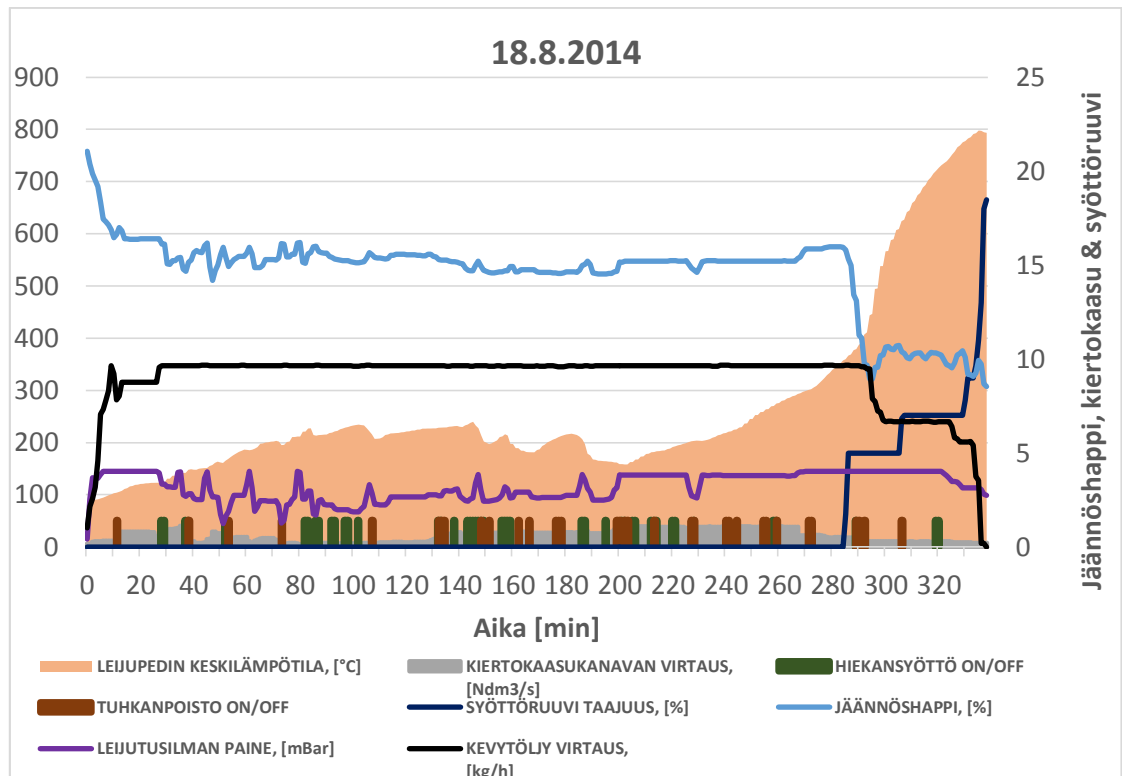
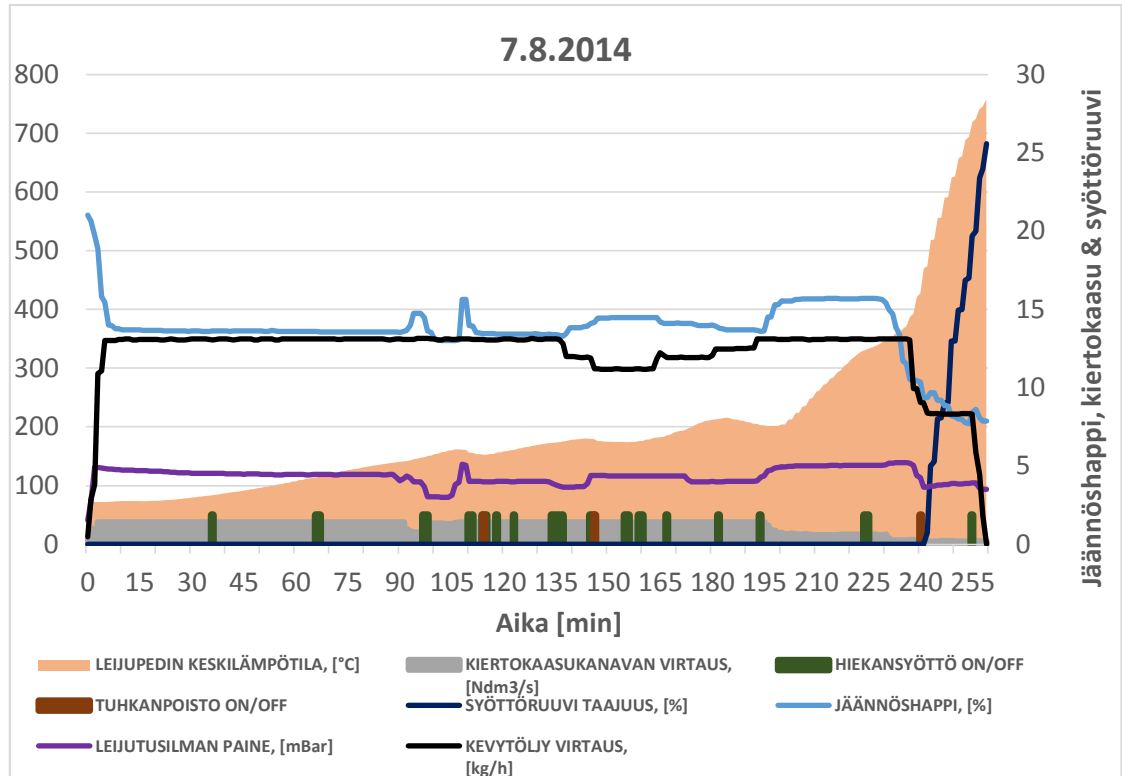
Liite 5. Ylöslämmityskäyrät 15.5. ja 5.6.



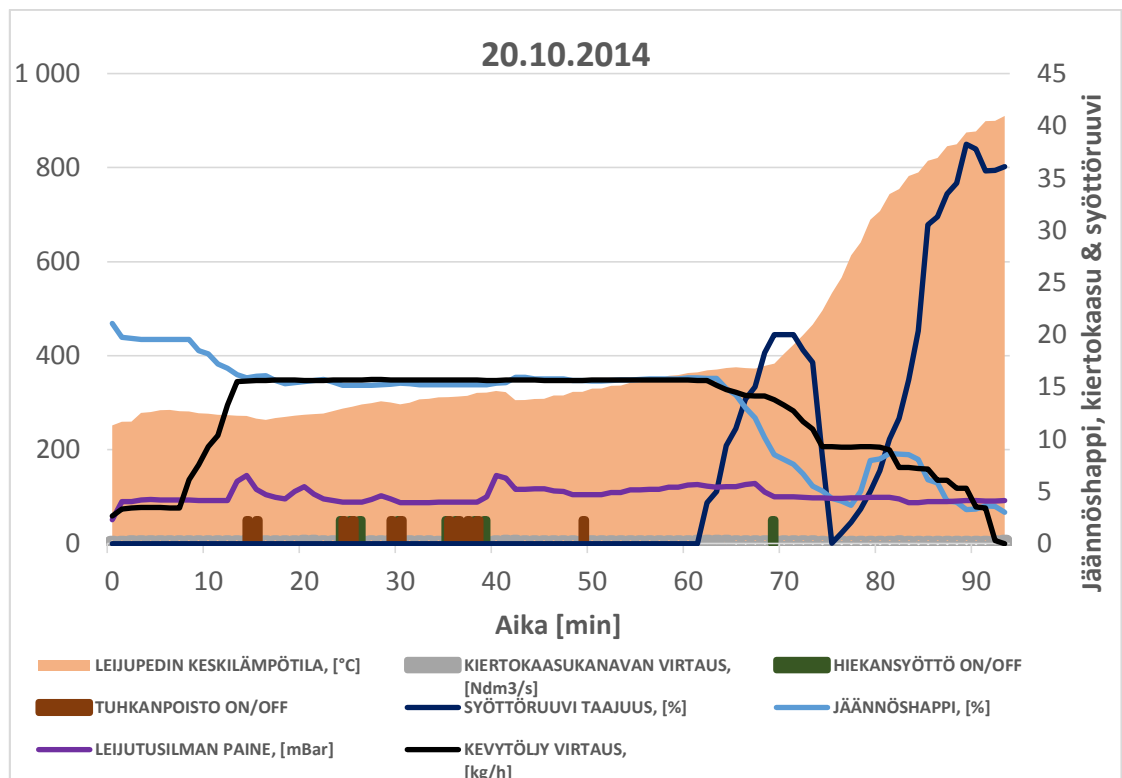
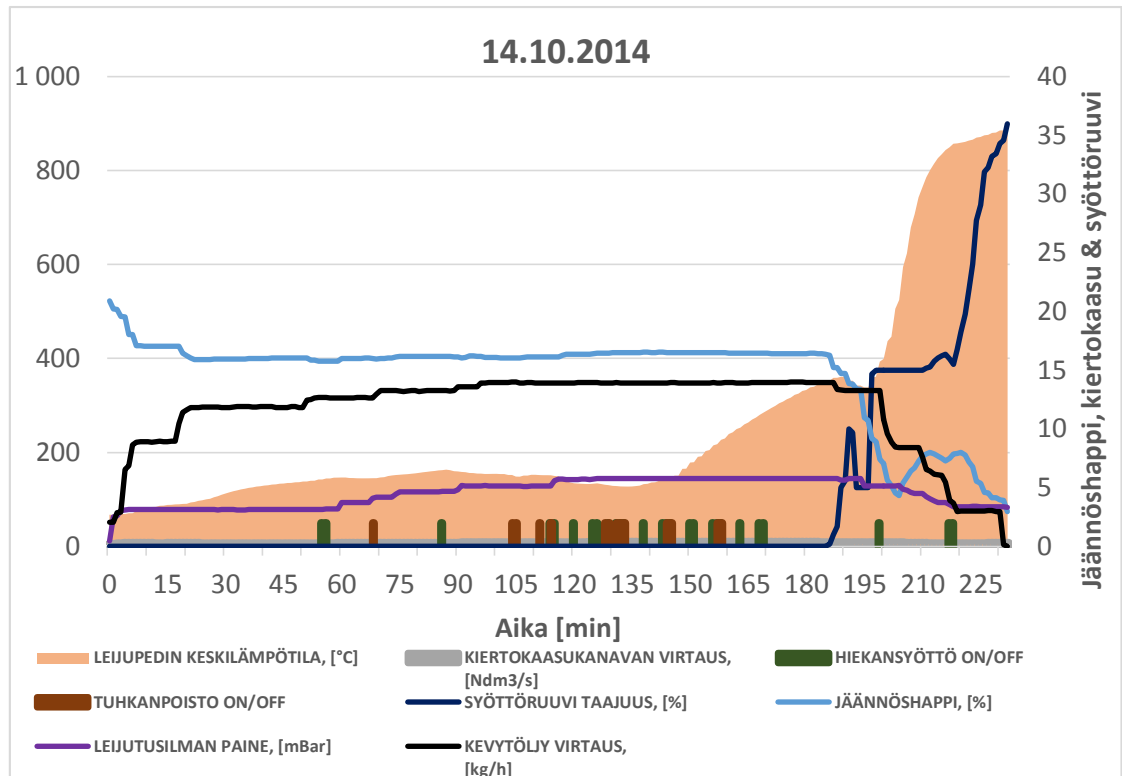
Liite 6. Ylöslämmityskäyrät 28.6. ja 18.7.



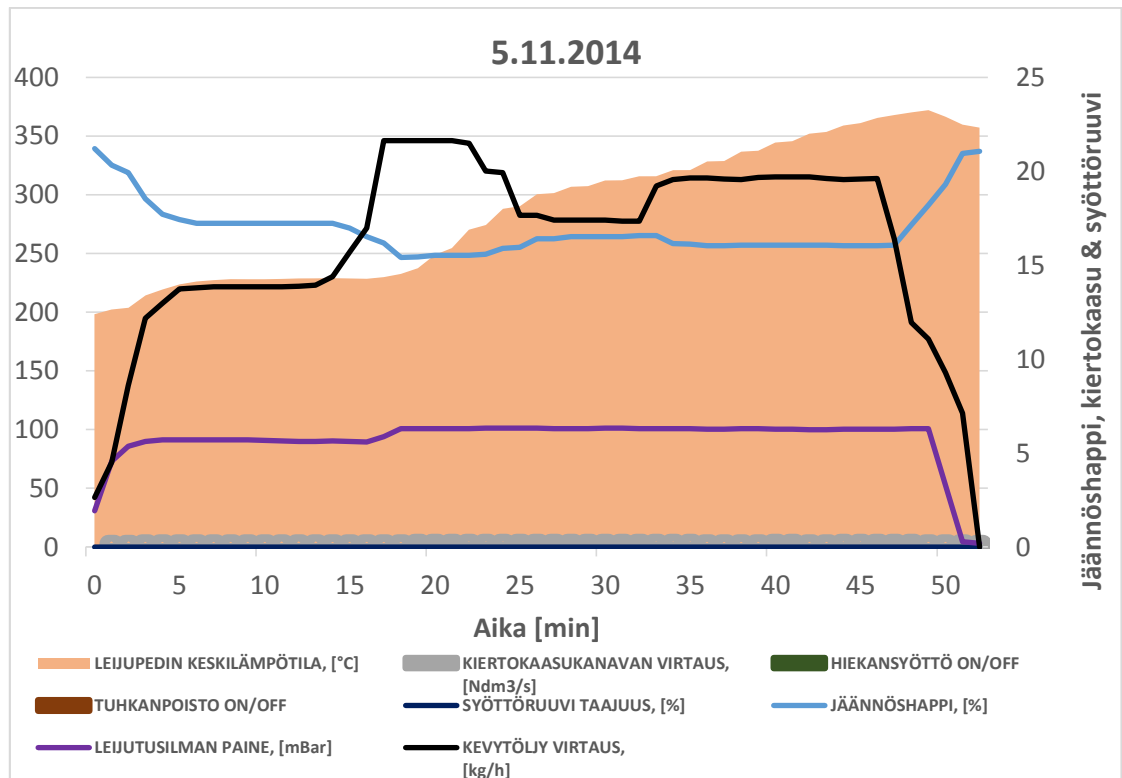
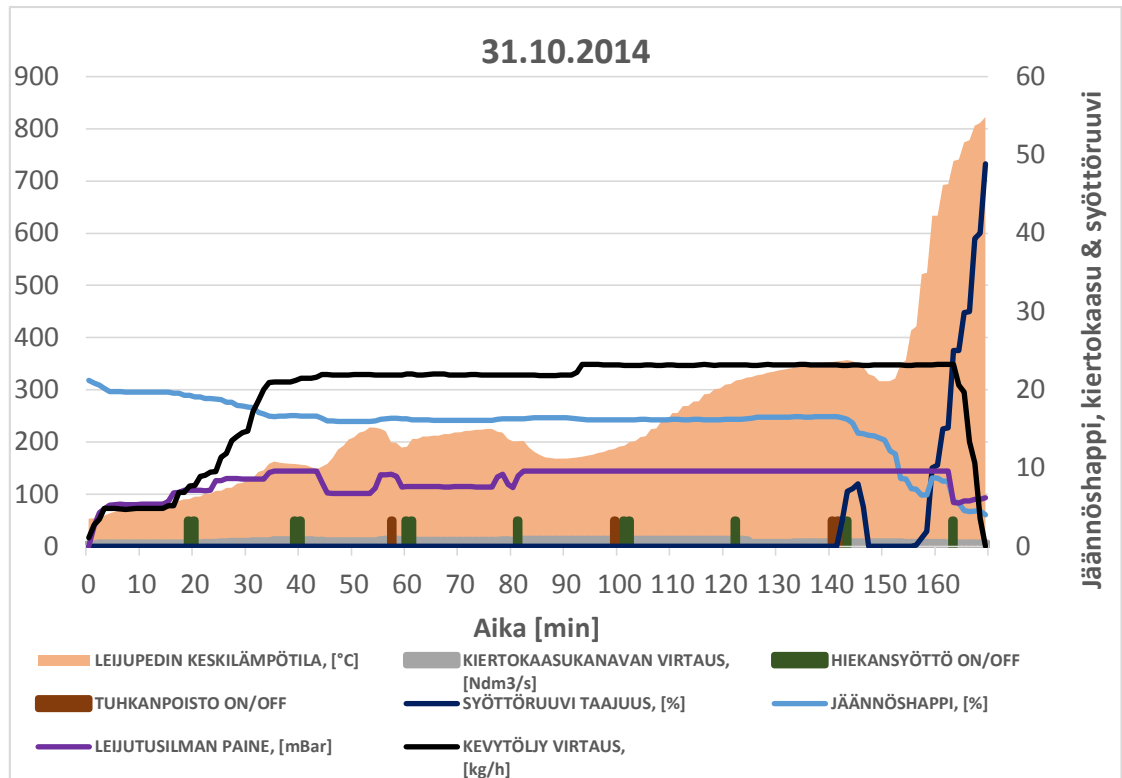
Liite 7. Ylöslämmityskäyrät 7.8. ja 18.8.



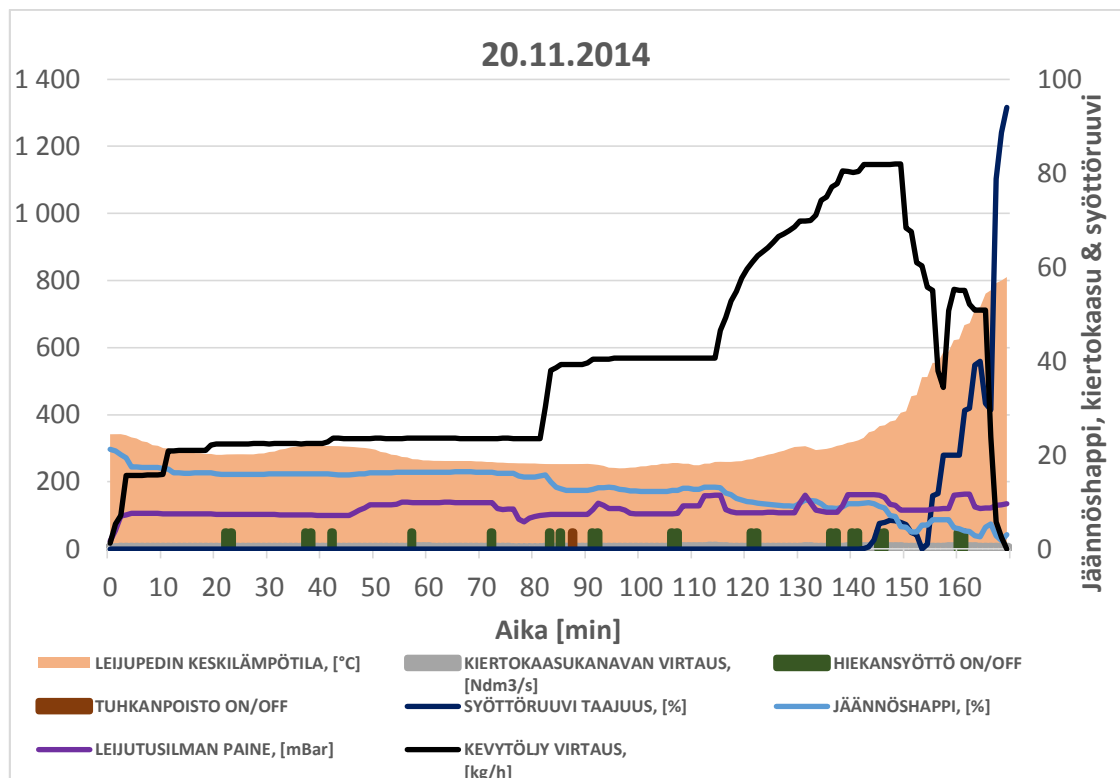
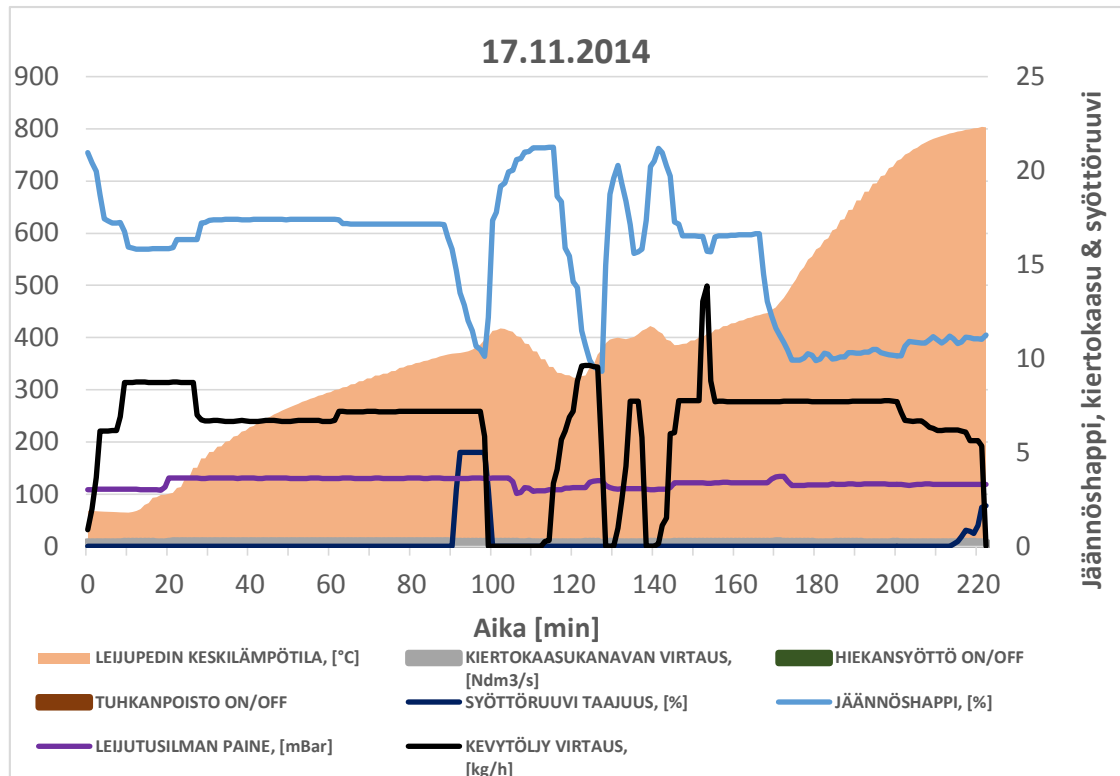
Liite 8. Ylöslämmityskäyrät 14.10. ja 20.10.



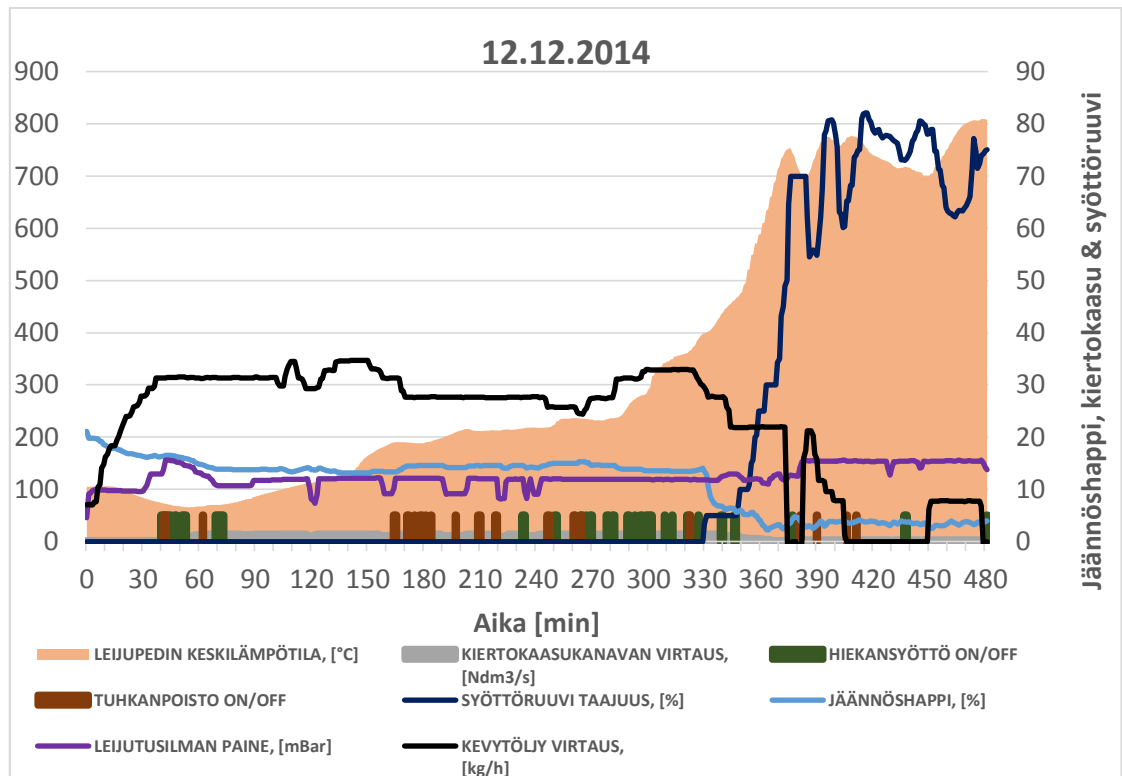
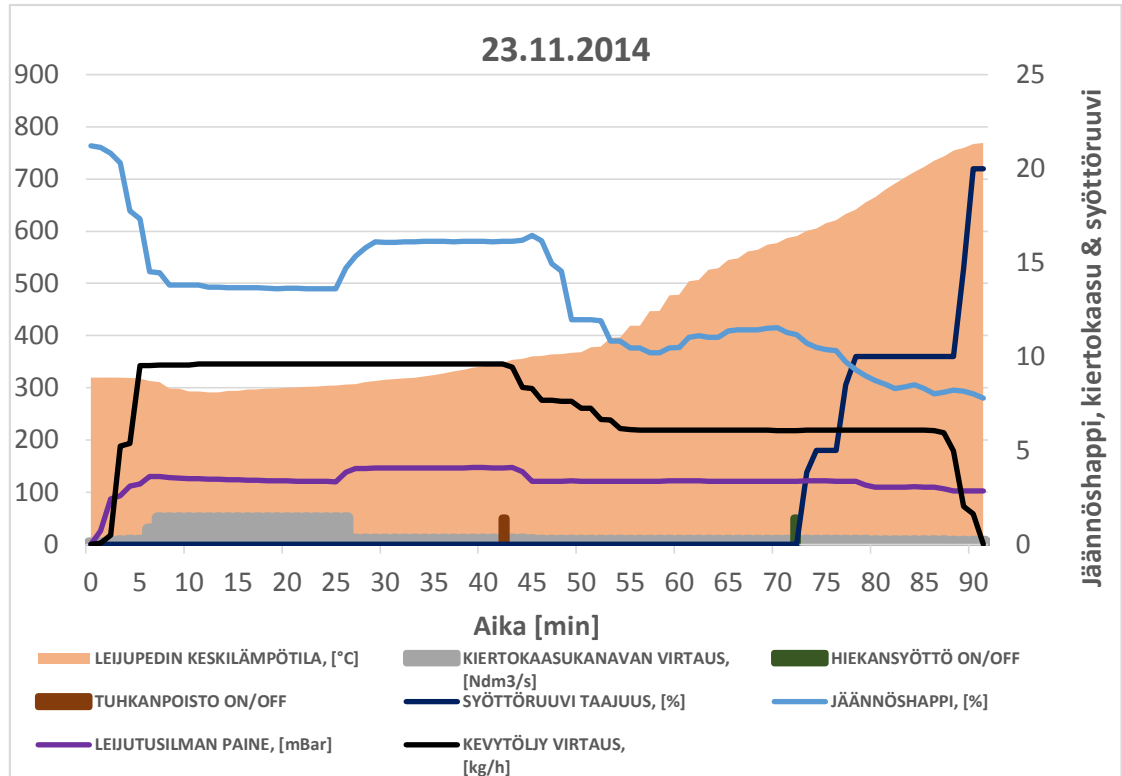
Liite 9. Ylöslämmityskäyrät 31.10. ja 5.11.



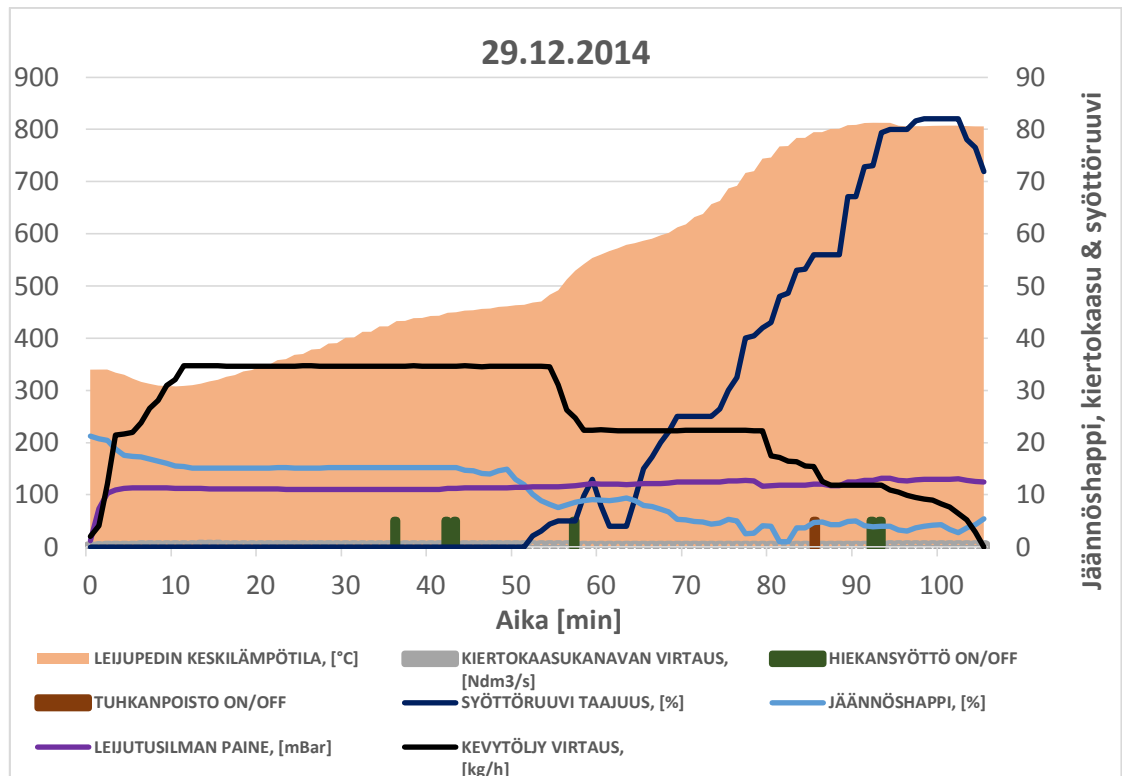
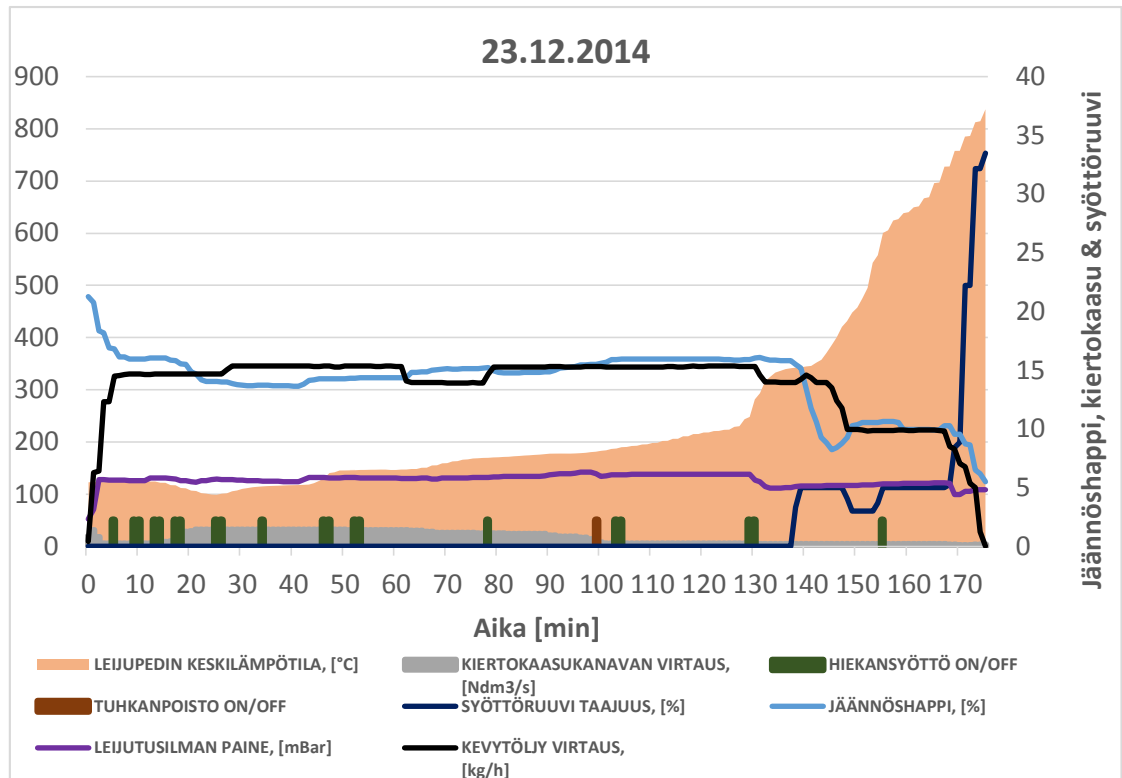
Liite 10. Ylöslämmitykset 17.11. ja 20.11.



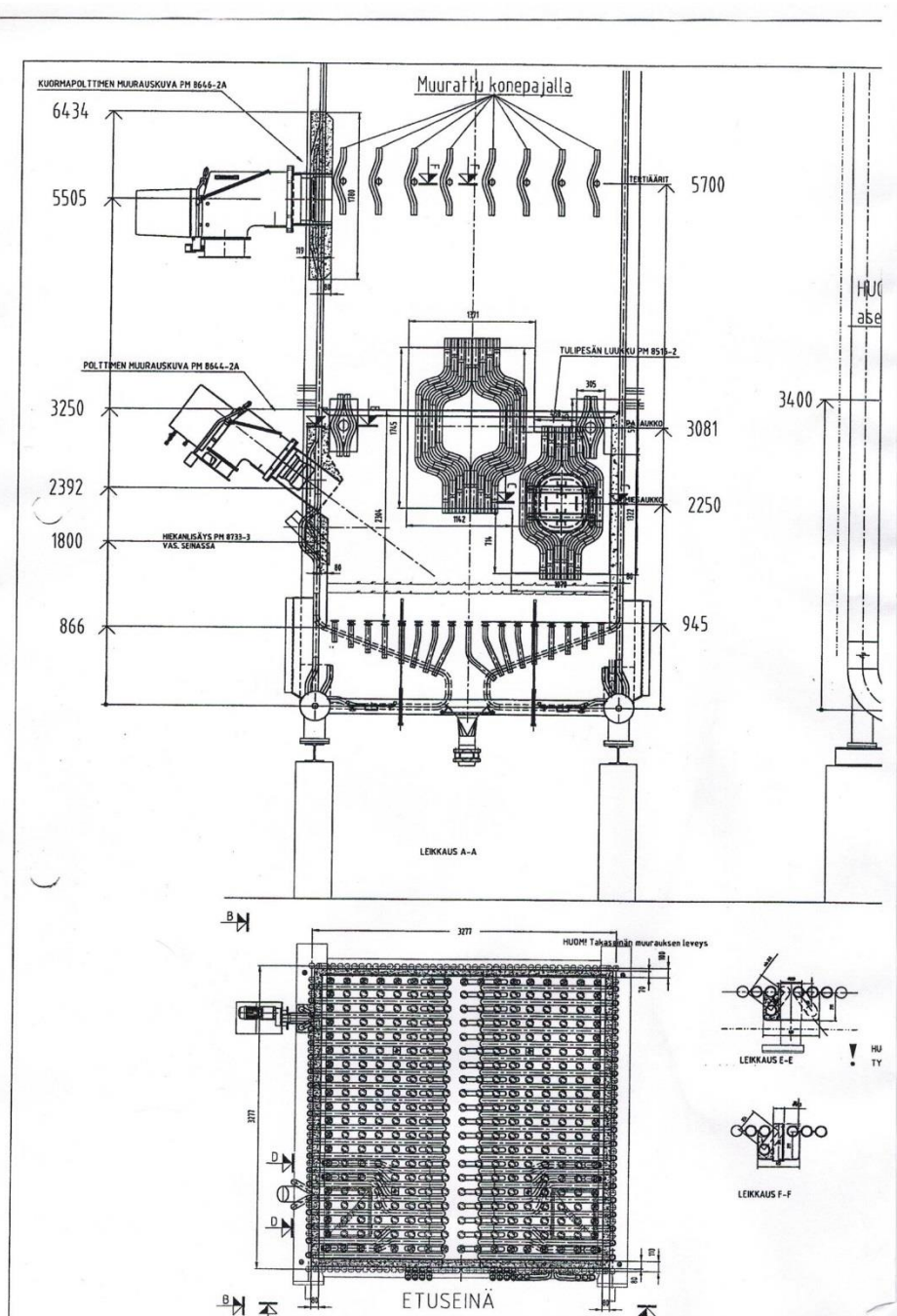
Liite 11. Ylöslämmityskäyrät 23.11. ja 12.12.



Liite 12. Ylöslämmityskäyrät 23.12. ja 29.12.



Liite 13. Tulipesän muurauskuva



Liite 14. KPA-syötön lukitussivu

17.02.2015 11:00:02

17.02.15 10:23:10.735 0 ETA30AF001TUHKAN_KOSTRUUJ mittaushäiriö

YLEISKUVA	S	ILMA-SÄVUKAASU		P-AINE / NIEMÄ	M	S	STARTTI / ÖLJY			
SÄHKYSUODIN	S	KPA-ASEMA	R	W	S	S	VESILAITOS	R	W	S
PROSESSI-LVI	S	TRENDIT		TURBIDI			TURBIDIIN-ÖLJY			
K2-Ilmat	R	W	S	K2-PA-SYÖT/KUOMA	R	W	S	K2-GLJYP/SÄHKGS		
K2-ILU				VESSIE						
				K2-LVI						

USER