

**SAVONIA**



OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN ALA

# LEIJUKERROSKATTILAN PALA- MISEN HALLINTA ENERGIAYRI- TYKSESSÄ

TEKIJÄ Erika Virtaharju

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala		
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn tekijä Erika Virtaharju		
Työn nimi Leijukerroskattilan palamisen hallinta energiayrityksessä		
Päiväys	24.4.2025	31/11
Yhteistyötaho Adven Oy		
Tiivistelmä		
<p>Tämä opinnäytetyö toteutettiin Adven Oy:n toimeksiannosta, ja sen tavoitteena oli löytää keinoja Sastamassa sijaitsevan LK199-lämpölaitoksen K4-kattilan toimintavarmuuden ja tehokkuuden parantamiseksi sekä polttoaineen laadusta aiheutuvien häiriöiden ja kevytöljyn kulutuksen vähentämiseksi. Kattila on altis sammumiselle erityisesti silloin, kun polttoaineena käytetään kosteaa haketta, mikä voi johtaa polttoaineen kertymiseen leijupetiin ja epätäydelliseen palamiseen. Häiriöitä on pyritty hallitsemaan rajoittamalla kattilan tehoa, mutta tämä ei ole kestävä ratkaisu, sillä tehorojoitusta joudutaan kompensoimaan kasvattamalla kevytöljyn käyttöä, mikä lisää sekä kustannuksia että ympäristökuormitusta.</p> <p>Tutkimuksessa selvitettiin K4-kattilan toimintaa useilla eri menetelmillä. Primääri-ilman riittävyttä arvioitiin kattilatoimittajan dokumenttien ja savukaasulaskurin avulla, jotta voitiin määrittää, pystyykö primääripuhallin tuottamaan tarvittavan ilman määrän. Ajokokeita suoritettiin kolme helmi-maaliskuussa 2025, ja niissä analysoitiin kattilan trendejä, polttoaineen syöttöä ja palamisolosuhteita. Viimeisessä kokeessa tutkittiin myös kiertokaasupellin vaikutusta. Polttoaineen kosteutta seurattiin ottamalla näytteitä tunnin välein ajokokeiden aikana. Näytteet analysoitiin uunikuivausmenetelmällä. Kesällä 2024 tutkittiin pudotustorvien ominaisuuksia vertailemalla eri kattiloiden torvia mittauksilla.</p> <p>Ajokokeissa ilmeni, että K4-kattilan ilmamäärä on riittävä, mutta säätöongelmat ja laitteistoviat heikentävät toimintaa ja estävät automaattikäytön. Polttoaineen kosteus pysyi sallitussa haarukassa, mutta jatkuvaa mitausta suositellaan. Korkeat peti- ja savukaasulämpötilat viittaavat mittausvirheisiin tai huoltotarpeeseen. Tehorojoitusten seurauksena on syntynyt ylimääräisiä öljykustannuksia.</p>		
Avainsanat BFB, leijukerros poltto, palaminen, hakevoimalat, kiinteät polttoaineet, polttohake		

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Opinnäytetyön tausta, tarkoitus ja tavoite .....	6
1.2	Toimeksiantajan esittely .....	6
1.3	Rajaukset.....	7
2	LEIJUPETITEKNIikka .....	8
2.1	Keskeiset käsitteet .....	8
2.2	Leijupolton historiaa .....	9
2.3	Kerrosleijupoltto .....	9
2.3.1	Luonnonkiertokattilan vesihöyrypiiri .....	12
2.3.2	Kerrosleijupolton etuja.....	13
2.3.3	Kerrosleijupolton haasteita .....	13
3	POLTTOAINE.....	14
3.1	Laitoksella käytettävien kiinteiden biopolttoaineiden ominaisuuksia .....	14
3.2	Kiinteiden polttoaineiden palaminen .....	15
3.2.1	Epätäydellinen palaminen ja palamisen arviointi .....	16
3.3	Kostean biopolttoaineen yhteys polttoon.....	17
3.4	Kosteusnäytteiden merkitys.....	19
4	TUTKIMUKSEN TOTEUTUS.....	21
4.1	Lähtökohdat ja aikataulu .....	21
4.2	Tutkimuskohteet.....	21
4.2.1	Primääri-ilman riittävyyden arviointi .....	21
4.2.2	Ajokokeet.....	22
4.2.3	Kosteusnäytteet .....	22
4.2.4	Öljynkulutus .....	23
4.2.5	Hiekankulutus .....	23
4.3	Vähemmälle huomiolle jääneet aihealueet.....	24
4.3.1	Pudotustorvien vertailu.....	24
4.3.2	Ohje polttoaineen kuljettajalle.....	24
4.3.3	Tuhkanäytteet .....	24

5	TULOKSET .....	25
5.1	Primääri-ilman riittävyyden arviointi .....	25
5.2	Ajokokeet.....	25
5.3	Kosteusnäytteet .....	25
5.4	Öljynkulutus .....	26
5.5	Hiekankulutus .....	26
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	27
6.1	Oma oppiminen.....	28
	LÄHTEET.....	30
	LIITE 1: PUDOTUSTORVIEN VERTAILU .....	32
	LIITE 2: HAKKEEN KOSTEUDEN MÄÄRITTÄMINEN.....	33
	LIITE 3: OTE OHJEESTA POLTTOAINEEN KULJETTAJALLE.....	35
	LIITE 4: AJOKOKEIDEN KOSTEUSNÄYTTEET JA MITTAUSTULOKSET .....	36
	LIITE 5: 17.3.2025 AJOKOKEEN KULKU.....	37
	LIITE 6: AJOKOE TRENDIT .....	38
	LIITE 7: ÖLJYNKULUTUS.....	41
	LIITE 8: PRIMÄÄRIPUHALTIMEN TIEDOT.....	42
	LIITE 9: SAVUKAASULASKENTA .....	44
	LIITE 10: AJOKOKEIDEN TULOKSET .....	45
	LIITE 11: HIEKANKULUTUS .....	46

## KUVALUETTELO

Kuva 1.	K4 Kerrosleijukattilan osat (Huhtinen, et al., 2004, p. 158) Piirretty lähteen pohjalta vastaamaan työssä käsiteltävää kattilaa.....	11
Kuva 2.	K4 Luonnonkietokattilan vesihöyrypiiri (Huhtinen, et al., 2004, p. 113) (Vakkilainen, 2017, p. 90) Piirretty lähteiden pohjalta. ....	12
Kuva 3.	Puun koostumus, muokattu alkuperäisestä. (Alakangas, et al., 2016, p. 55).....	15
Kuva 4.	Puun palaminen ja lämmönkehitys (Alakangas, 1992, p. 68). ....	16
Kuva 5.	LK199-laitoksen polttoainejakauma vuonna 2024 (Adven Oy, 2025) (Tilastokeskus, 2024) .....	20
Kuva 6.	Laitoksen öljyn kulutus tarkkailujaksolla. (Adven Oy, 2025).....	23

## TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1 Leijupetikattilalle ominaisia toimintaparametreja. (Huhtinen, et al., 2004, p. 159) .....	10
Taulukko 2. Polttoaineiden lämpöarvon, kosteuden ja irtotiheyden, energiatihyden ja tuhkapitoisuuden vertailu. Lyhennetty alkuperäisestä (Alakangas, et al., 2016, p. 205).....	15
Taulukko 3. Kiinteän polttoaineen palamista voidaan arvioida liekin ja savukaasun värin perusteella (Jalovaara, et al., 2003, p. 71).....	17
Taulukko 4. Kiinteiden polttoaineiden tärkeimmät laatuvaatimukset eri käyttäjäryhmille ja tekniikoille. Lyhennetty alkuperäisestä. (Alakangas, et al., 2016, p. 204).....	18
Taulukko 5. Laitoksella vuosittain käytettävien polttoaineiden painotettuja keskikosteuksia Mscales ohjelmasta. (Adven Oy, 2025) (Tilastokeskus, 2024) .....	19

## 1 JOHDANTO

### 1.1 Opinnäytetyön tausta, tarkoitus ja tavoite

Adven Oy:n Sastamalan LK199-laitoksen käyttäjien havaintojen mukaan yksi kattiloista on erityisen altis sammumaan, jos polttoaineena käytetään liian kosteaa haketta. Tämä havainto toimii tutkimuksen taustana ja korostaa polttoaineen ominaisuuksien merkitystä laitoksen toiminnan kannalta. Palamattoman polttoaineen kertyminen leijukerrokseen on haitallinen ilmiö ja voi aiheuttaa vaaratilanteita sekä taloudellisia tappioita.

Laitoksella ongelmaa on tällä hetkellä pyritty korjaamaan käytännöllisellä ratkaisulla, jossa kattilan maksimitehoa on rajoitettu polttoaineen laadusta johtuvien ongelmien hallitsemiseksi. Tämä toimenpide on kuitenkin lisännyt kustannuksia, sillä tehorojoitusta kompensoidaan kevytöljyn käytöllä. Tehorojoituksen vaikutus laitoksen taloudelliseen kannattavuuteen on merkittävä, joten ongelman ratkaiseminen voisi tuoda kustannussäästöjä.

Polttoaineen kertymiseen leijupetiin vaikuttavat muun muassa kosteuspitoisuus, partikkelikoko, ilmanjaon tehokkuus ja leijupedin lämpötila. Liian märkä hake voi jäädyttää petiä liikaa, mikä heikentää sen syttymistä ja johtaa epätäydelliseen palamiseen. Jos taas esimerkiksi hakkeen partikkelikoko on pieni, se palaa jo ennen petiin päätymistä.

Myös primääri-ilman riittävyys, leijukerroksen kunto ja pudotustorven rakenne ovat myös kriittisiä tekijöitä – jos ilmanjakautuminen on heikkoa tai syöttö epäoptimaalista, polttoaine voi kerääntyä petiin. Leijukerroksen kunto voi heikentyä esimerkiksi agglomeraation vuoksi, jolloin peti ei enää fluidisoidu tasaisesti, ja polttoaine kasaantuu tietyille alueille.

Tutkimuksessa selvitetään, voiko leijukerrokseen jäädä palamatonta polttoainetta, ja miten laitoksella voitaisiin parantaa prosessia. Tarkastellaan riittääkö primääri-ilmavirta tuottamaan leijukerrokseen riittävästi lämpöä, jotta polttoaine kuivuu, pyrolysoituu ja kaasuuntuu tehokkaasti.

Työn tavoitteena on löytää keinoja parantaa K4-kattilan toimintavarmuutta ja varmistaa, että nimellisteho on käytettävissä myös huonolaatuisilla polttoaineilla. Tällä tavoin voidaan vähentää tuotantohäiriöitä ja minimoida polttoainekustannuksia. K4-kattilan toimintavarmuuden parantamisella saadaan suorassa suhteessa kevytöljyn käyttöä vähemmäksi.

### 1.2 Toimeksiantajan esittely

Adven Oy on energia-alan yritys, joka toimii Pohjoismaissa, Baltiassa ja Länsi-Euroopassa. Yritys perustettiin vuonna 2011, ja sen oma toiminta alkoi vuonna 2012, kun Fortum Oyj luopui tytäryhtiöstään Fortum Energiaratkaisut Oy:stä ja Fortum Termest AS:stä. Myöhemmin Adven ja ruotsalainen Värmevärden yhdistyivät, ja toiminta jatkui Adven-nimen alla (Wihlborg, 2021).

Adven tarjoaa kestävästä kehityksestä ja energiatehokkuudesta tukevia palveluja, kuten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmiä, vesien kierrätystä ja kiertotalouteen perustuvia energiaratkaisuja. Yritys työllistää noin 580 henkilöä ja toimii Suomessa, Ruotsissa, Virossa, Latviassa, Liettuassa sekä Hollannissa. (Adven, 2024)

Opinnäytetyö toteutettiin kiinteän polttoaineen lämpölaitoksella LK199, jossa energiaa tuotetaan kahdella kerrosleijukattilalla. Laitoksen polttoaineena käytetään pääasiassa haketta ja muita puupe-raisiä polttoaineita, ja huippu- sekä varapolttoaineena käytetään kevytöljyä. Vielä vuoden 2024 alussa laitos toimi rinnakkaispolttolaitoksena, ja siellä poltettiin myös siistauslietettä. Tällä hetkellä sen poltto on tauolla heikon saatavuuden vuoksi.

Laitoksella on 15 MW:n ja 9,5 MW:n kattilat, joilla tuotetaan kaukolämpöä sekä prosessihöyryä teollisuuden tarpeisiin (Matilainen, 2015, p. 2). Käsittelen opinnäytetyössäni laitoksen pienempää kiinteän polttoaineen 9,5 MW:n leijukattilaa K4. Aihe liittyy primääripuhaltimen ja pudotustorven uusintaan, joista tehdään hanke, jos niiden uusinta nähdään tarpeelliseksi. Tutkimus pudotustorvista löytyy liitteestä 1.

Laitoksella on häiriötilanteissa käytössä myös K2- ja K3-varakattilat. Kevytöljykäyttöinen höyrykattila K2, joka on teholtaan 10MW. Kevytöljykäyttöinen vesikattila K3 toimii varajärjestelmänä KPA-kattiloiden häiriötilanteissa ja huippukuormien aikana, ja sen teho on 10 MW. (Matilainen, 2015, pp. 20, 22.)

### 1.3 Rajaukset

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan 9,5 MW:n kerrosleijukattilaa, minkä vuoksi teoriaosuus keskittyy tämän kattilatyypin rakenteellisiin ominaisuuksiin, toimintaperiaatteisiin ja tyypillisiin toiminta-arvoihin. Kiertoleijukattilan (CFB) ominaisuuksia ei käsitellä tässä työssä tarkemmin, jotta enemmän tilaa jää kertoa kerrosleijukattilasta.

Kattilat voidaan myös luokitella vesihöyrypiirin rakenteen perusteella suurvesitilakattiloihin ja vesiputkikattiloihin. Voimalaitosprosesseissa käytettävät vesiputkikattilat jaotellaan vedenkierron perusteella läpivirtaus-, pakkokierto- ja luonnonkiertokattiloihin. (Huhtinen, et al., 2004, p. 111.) Tässä opinnäytetyössä keskitytään luonnonkiertokattilaan, joten teoriaosuudessa käsitellään sen toimintaperiaatetta.

Tässä työssä ei pyritä löytämään parasta polttoainetta ongelman poistamiseksi. Polttoaineiden valintaan vaikuttavat myös hinta, saatavuus ja logistiikka. Työssä ei tarkastella tarkemmin hakkeen hintaa, puun kulkua metsästä laitokselle tai sen tuoreutta. Laitokselle saapuu käytettäväksi pääasiassa sitä polttoainetta, mitä lähialueen markkinoilta on saatavilla, joten liian kostean polttoaineen saapumista ei voida täysin välttää. Lisäksi tarkastelun kohteena ovat ainoastaan laitoksella käytettävät polttoaineet, eivät kaikki mahdolliset polttoainevaihtoehdot.

## 2 LEIJUPETITEKNIikka

### 2.1 Keskeiset käsitteet

Agglomeraatio: Partikkelien yhdistyminen, esim. petihiekkapartikkelit.

BFB: (Bubble fluidized bed) suom. kupliva leijupetikattila.

CFB: (Circulating Fluidised Bed) suom. kiertoleijupetikattila.

Kiertokaasu: Sähkösuodattimessa puhdistettua vähähappista savukaasua, jota käytetään leijupetikattilassa palamisreaktion ja lämpötilan hallintaan. Se johdetaan puhaltimella primääri-ilmakanavaan ja edelleen suuttimien kautta tulipesään, missä se alentaa lämpötilaa ja hidastaa palamista. (Huhtinen, et al., 2013, p. 42–43.) (kuva 1. kohta 17 ja keltainen viiva)

Kosteusprosentti: Kosteus märkäpainosta ilmaisee veden osuuden aineen kokonaismassasta prosentteina. **Toimituskosteus** tarkoittaa kosteuspitoisuutta, joka polttoaineella on sen saapuessa kuluttajalle. **Käyttökosteus** tarkoittaa käyttövalmiin polttoaineen kosteutta. (Alakangas, et al., 2016, p. 12.)

Lämpöarvo: **Kalorimetrinen lämpö** (ylempi lämpöarvo) mittaa polttoaineen kokonaisenergian, mukaan lukien vesihöyryn energia. **Tehollinen lämpö** (alempi lämpöarvo) kertoo energiasta, joka voidaan hyödyntää suoraan energiantuotannossa. (Alakangas, et al., 2016, p. 28.)

Peti: Kattilan alaosassa oleva, tässä tapauksessa luonnonhiekkasta ja polttoaineesta peräsin olevasta tuhkasta koostuva kerros, jota leijutetaan puhaltimien avulla. (kuva 1. kohta 4)

Petilämpötila: Kattilan alaosassa petihiekan leijutuskerroksessa sijaitsevat lämpötilamittaukset. K4-kattilassa petilämpötila-antureita on neljä, ja ne ovat sijoitettu kattilassa lähelle pedin nurkkia.

Polttoainesekoitus: Kattilaan syötettävien polttoaineiden yhdistelmä, jonka koostumusta voidaan säätää muuttamalla syöttömääriä.

Primääri-ilma: Leijupetikattilassa käytettävä ilma, joka puhalletaan kattilan alaosaan hiekkapedin fluidisoitumisen aikaansaamiseksi. Se varmistaa pedin toiminnan, vaikuttaa lämpötilaan ja tukee polttoaineen palamista. (kuva 1. kohta 13 ja punainen linja)

Sekundääri-ilma: Leijupetikattilaan syötettävä ilma, joka johdetaan kattilan freeboardiin, eli leijupedin yläpuolelle. Sen tehtävänä on täydentää palamista ja parantaa palamistehokkuutta. (kuva 1. kohta 12 ja vihreä viiva)

Trendi: Aikasarjadataan perustuva kuvaaja, joka kuvaa kehityssuuntaa ajanjakson aikana. (Ready Solutions, 2024)

Tertiääri-ilma: Tertiääri-ilmaa voidaan käyttää polttoainekerroksesta vapautuvien palamiskelpoisten kaasujen polttamiseen. Tertiääri-ilma johdetaan tulipesään sekundääri-ilman yläpuolelle (Jalovaara, et al., 2003, pp. 31, 35). (kuva 1. kohta 6)

## 2.2 Leijupolton historiaa

Saksalaisen kemisti Fritz Winklerin vuonna 1922 kehittämä vesikaasun tuotantoprosessi ja ensimmäinen leijukerroskaasutin olivat merkittäviä askeleita leijupoltteknikassa. Kaasun avulla saatiin kiinteä aines leijumaan niin, että se näytti kiehuvalta ja käyttäytyi nesteen tavoin. (Lekner, 2022, p. 1. Introduction.) (Basu, 2006, p. 1.) Vaikka Fritz Winklerin kehittämä leijukerroskaasutin oli merkittävä edistysaskel energiateknikassa 1920-luvulla, myöhemmät insinöörit ja tutkijat kehittivät edelleen leijukerrostekniikkaa.

Leijupetikattilateknologian kehitys alkoi 1900-luvun puolivälin jälkeen, ja sitä käytettiin esimerkiksi teollisuusprosesseissa, kuten öljynjalostuksessa ja jätevesilietteiden käsittelyssä. 1960-luvulla tutkimus- ja kehitysyksiköt ympäri maailmaa alkoivat parantaa leijupetiteknikkaa, mikä lopulta mahdollisti kiinteiden polttoaineiden, kuten hiilen ja biomassan, tehokkaan ja ympäristöystävällisen polttamisen. (Engström, 2017, pp. 14-17.)

Leijukerros poltto otettiin energiantuotannossa käyttöön 1970-luvulla, ja sen suosio on kasvanut huomattavasti viime vuosikymmeninä. Tekniikan merkittävä etu on sen monipuolisuus polttoaineiden suhteen, sillä se soveltuu erityisen hyvin huonolaatuisille polttoaineille, joiden suuret tai nopeat laatuvahtelut eivät häiritse prosessin toimintaa. (Raiko, et al., 2002, p. 490.)

## 2.3 Kerrosleijupolttot

Leijupoltteknikoita ovat kupliva kerrosleiju (BFB) ja kiertoleiju (CFB), jotka ovat yleisesti käytettyjä ratkaisuja kiinteiden polttoaineiden poltossa. Työssä tarkastellaan 9,5 MW:n luonnonkierto BFB-kattilaa, ja teoriaosuudessa keskitytään tämän kattilatyypin rakenteellisiin ominaisuuksiin, toimintaperiaatteisiin sekä tyypillisiin toiminta-arvoihin.

Kerrosleijukattiloiden toiminta perustuu leijutusperiaatteeseen, jossa sekä polttoaine että inerttipetimateriaali käyttäytyvät fluidisoituneena kerroksena muistuttaen nesteen käyttäytymistä. Tämä saavutetaan, kun leijutusväliainetta, kuten ilmaa, höyryä, happea tai niiden seosta, johdetaan petimateriaalin läpi. (Sansaniwal, et al., 2017, p. 366.)

Leijutilla pedissä syntyy, kun kaasua johdetaan hiekan tai muun rakeisen materiaalin läpi riittävällä nopeudella, jolloin kaasun nopeus ylittää minimileijutusnopeuden. Tällöin kaasun nostevoima ylittää rakeiden painon, rakeiden välinen jatkuva kosketus häviää, ja kerrokseen muodostuu ylöspäin nousevia kuplia. (Raiko, et al., 2002, p. 491.)

Kun lähestytään maksimileijutusnopeutta, häviää leijukerroksesta sille ominaiset kuplat sekä selkeä pinta. Kun maksimileijutusnopeus ylitetään alkaa yhä suurempi osa hiukkasista kulkeutua kaasun mukana pois kerroksesta. Toisin sanoen kerrosleijukattiloissa leijukaasun virtausnopeus säädetään niin, että petimateriaali pysyy tulipesässä selvänä kuplivana kerroksena eikä pääse kulkeutumaan kaasujen mukana ulos kattilasta. (Raiko, et al., 2002, p. 490–491.)

Leijupetikattiloiden tyypillinen säätöalue on 30–100 %. Säätöaluetta määrittävät petilämpötilat ja leijutusnopeudet. Minimitehoa rajoittavat yleensä minimileijutusnopeus ja petilämpötila, joka on pidettävä vähintään 700 °C:ssa. Maksimitehoa puolestaan rajoittavat pedin enimmäislämpötila ja maksimileijutusnopeus. (Huhtinen, et al., 2004, p. 158–159.)

Mitä pienempi hiekan partikkelikoko on, sitä alhaisemmalla nopeudella peti saadaan fluidisoitumaan. BFB-kattilassa käytettävän petihiekan partikkelikoko on tyypillisesti 0,5–1,2 mm, mikä mahdollistaa leijutusnopeuden asettamisen 0,7–2 m/s tasolle. Hiekkakerroksen korkeus vaihtelee yleensä 0,4–0,8 metrin välillä, ja tämä aiheuttaa kattilassa painehäviön, joka on tyypillisesti 6–12 kPa. (Huhtinen, et al., 2004, pp. 155, 157.) Biopolttoaineilla voidaan saavuttaa reaktorin poikkipinta-alaa kohti enintään noin 3 MW/m<sup>2</sup> polttoaineteho (Raiko, et al., 2002, p. 490). Lisää leijupetikattilan toimintaparametrejä on kuvattu taulukossa 1.

Luonnonhiekkaa käytetään yleisimmin leijupetikattiloiden petimateriaalina sen alhaisen hinnan ja hyvän saatavuuden vuoksi. Muita vaihtoehtoja ovat esimerkiksi kvartsihiekkä, oliviinihiekkä, huokoinen alumiinioksidi ja masuunikuonasta tehty granuli. (He, 2015, p. 5.)

Taulukko 1 Leijupetikattilalle ominaisia toimintaparametreja. (Huhtinen, et al., 2004, p. 159)

Ominaisuudet	Toiminta-arvo
Tilavuusrasitus	0,1–0,5 MW/m <sup>3</sup>
Poikkipintarasitus	0,7–3 MW/m <sup>2</sup>
Petin painehäviö	6,0–12 kPa
Leijutusnopeus	0,7–2 m/s
Petin korkeus	0,4–0,8 m
Primääri-ilman lämpötila	20–400 °C
Sekundääri-ilman lämpötila	20–400 °C
Petin lämpötila	700–1000 °C
Kaasutilan lämpötila	700–1200 °C
Sekundääri-ilman osuus	30–70 %
Ilmakerroin	1,1–1,4
Petin tiheys	1000–1500 kg/m <sup>3</sup>

Kerrosleijukattilassa palamisilmat tuodaan kattilaan kolmessa vaiheessa. Esilämmitetty primääri-ilma syötetään tulipesään ilmakaapin ja arinasuuttimien kautta (kuva 1. kohta 13, 10). Sekundäärinen ja tertiäärinen ilma johdetaan tulipesään arinan pinnan yläpuolelle 1,5–4,0 metrin korkeudelta (kuva 1. kohta 6). (Jalovaara, et al., 2003, pp. 31, 35.) Polttoilmasta noin puolet tuodaan leijutusarinan kautta ja loput kerroksen yläpuoliseen jälkipalotilaan (Raiko, et al., 2002, p. 490).

Kerrosleijukattilassa polttoaineen palamista hallitaan kolmivaiheisella ilman syötöllä. Primääri ilman tehtävänä on kuivattaa polttoainekerros, käynnistää pyrolyysi, sekä ylläpitää leijukerros fluidisoituneena. (Koskelainen, et al., 2006, p. 288.) Primääri- ja sekundääri-ilman syöttöalueen välissä polttoaine pääasiassa kuivuu, haihtuu ja jäännöshiili palaa. Ylempänä, sekundääri-ilnavyöhykkeen yläpuolella, haihtuneet kaasut palavat loppuun. Tulipesän yläosaan syötetään vielä tertiääri-ilmaa, jotta lämpötilaa ja päästöjä voidaan hallita tehokkaammin. (Vakkilainen, 2017, p. 219–220.)

Pedin lämpötilaa voidaan tarvittaessa laskea lisäämällä kiertokaasua leijutusilman sekaan (kuva 1. kohta 17). Tämä vähentää leijutuskaasun happipitoisuutta, minkä seurauksena palamisessa syntyvän lämmön määrä pienenee ja pedin lämpötila laskee. Kiertokaasua käytetään pedin lämpötilan säätämiseen erityisesti silloin, kun osakuormat ovat pieniä ja polttoaineet kuivia. (Huhtinen, et al., 2013, p. 42.)

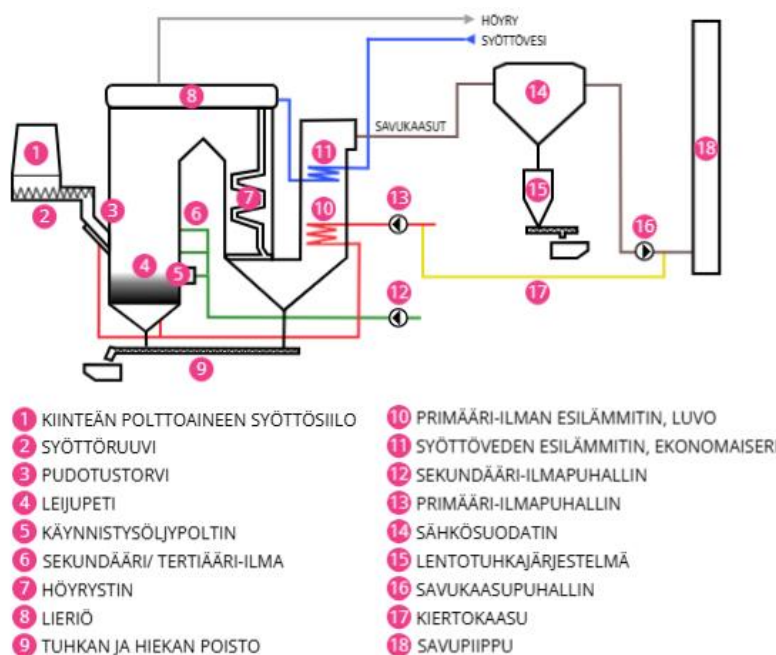
Leijukattila toimii lämmönsiirtimenä, jossa polttoaineen palaessa syntyvät kuumat savukaasut luovuttavat lämpöä kattilan lämpöpintojen kautta höyrystettävään veteen (Raiko, et al., 2008, p. 113–114). Lämmönsiirto kuplivassa leijukerroksessa lämpöpintaan tapahtuu pääasiassa hiukkasten ja kaasun konvektiivisessa lämmönsiirrossa, kun taas vain vähäinen määrä siirtyy säteilynä (Raiko, et al., 2002, p. 504). Kattilan lämpöpinnat jakautuvat neljään osaan: ilman esilämmittimeen (luvo), syöttöveden esilämmittimeen (ekonomaiseri), höyrytimeen ja tulistimeen (kuva 1. kohdat 10, 11 ja 7) (Raiko, et al., 2008, p. 113).

Polttoainesiilon alta kulkeva kuljetin siirtää polttoaineen sulkusyöttimen läpi pudotustorveen, josta se päätyy petiin. Pienemmät partikkelit palavat jo pudotessaan leijukerroksen yläpuolella. Suuremmat partikkelit sekoittuvat kuumaan hiekkakerrokseen ja kuivuvat nopeasti sekä lämpenevät syttymislämpötilaan. (Huhtinen, et al., 2004, p. 157) (Huhtinen, et al., 2013, p. 36)

Pudotustorven tehtävänä on jakaa polttoaine tasaisesti pedin alueelle, mikä toteutetaan yleensä useilla torvilla (Huhtinen, et al., 2004, p. 157). Pudotustorven alaosaan johdettu heittoilma jäädyttää torvea ja edistää polttoaineen tasaista leviämistä leijukerrokseen vähentämällä kitkaa torvessa. Polttoaineen syöttöjärjestelmästä on estettävä hallitsematon ilman pääsy tulipesään, jotta kaasuvirtaukset ja leijutus eivät häiriinny (Vesanto, 2006, p. 32)

Kattilan käynnistyksessä ennen polttoaineen syöttämistä, petimateriaali on esilämmitettävä 500–600°C, jotta polttoaine syttyy turvallisesti. Esilämmitys tapahtuu pedin päälle sijoitetulla öljy- tai kaasulämmitteisellä sytytyspolttimella, toiselta nimeltään starttipolttimella (kuva 1. kohta 5). (Huhtinen, et al., 2004, p. 158.)

Tuhka poistuu kattilasta kahdella eri tavalla. Osa tuhkaa kulkeutuu savukaasujen mukana niin sanottuna lentotuhkana, joka voidaan erottaa esimerkiksi sähkösuodattimella. Lisäksi tuhkaa kertyy kattilan pohjalle, josta se voidaan poistaa hiekan mukana arinan aukon kautta (kuva 1. kohdat 14, 15 ja 9). (Huhtinen, et al., 2004, p. 158.) Suurin osa kattilan tuhkasta poistuu lentotuhkana ja vain pieniosa pohjatuhkana. (Jalovaara, et al., 2003, p. 36)



Kuva 1. K4 Kerrosleijukattilan osat (Huhtinen, et al., 2004, p. 158) Piirretty lähteen pohjalta vastamaan työssä käsiteltävää kattilaa.

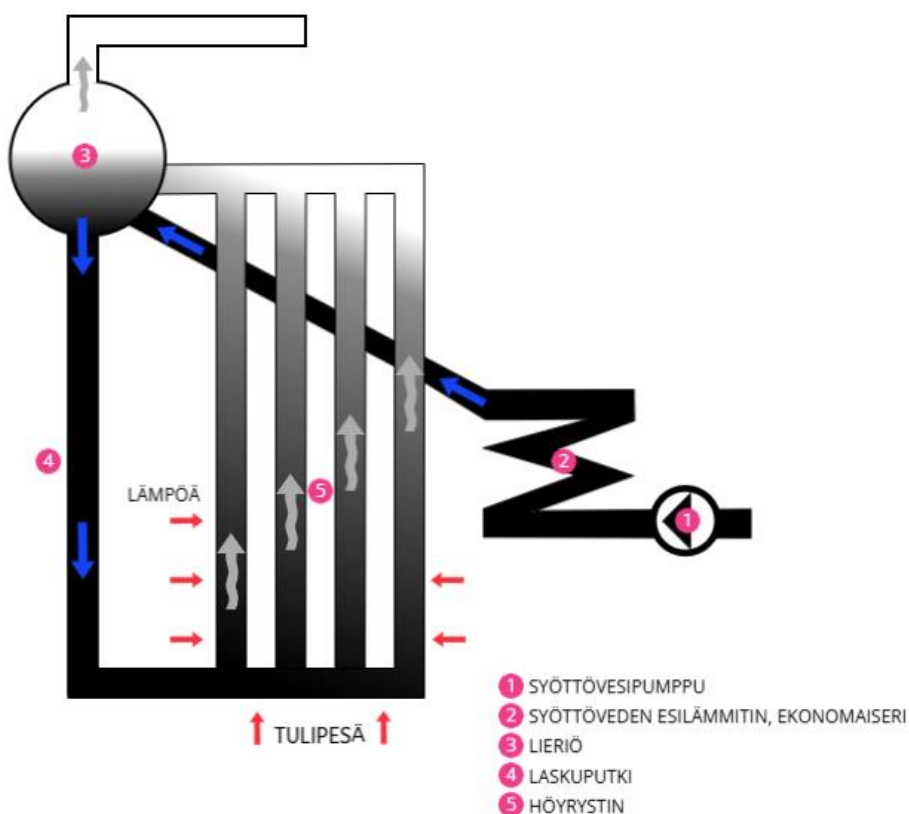
### 2.3.1 Luonnonkiertokattilan vesihöyrypiiri

Luonnonkiertokattila on vesiputkikattilatyypin, jossa höyrystyvä vesi kulkee putkien läpi. Yleisesti vesi-höyrypiiriin pääkomponentteihin kuuluvat veden esilämmitin, lieriö, höyrystin ja tulistin. (Huhtinen, et al., 2004, p. 113.) Opinnäytetyössä käsiteltävässä kattilassa K4 ei ole tulistinta.

Kattilaan syötetään vettä syöttövesipumpun avulla syöttövesisäiliöstä (kuva 2. kohta 1). Luonnonkiertokattilassa pumpun säätetään lieriön vedenpinnan tason perusteella. (Huhtinen, et al., 2013, p. 23.) Aluksi vesi ohjataan savukaasulämmitteiseen syöttöveden esilämmittimeen, jossa se lämpeenee lähes kyllästyslämpötilaan (kuva 2. kohta 2). Esilämmitin auttaa alentamaan savukaasujen lämpötilaa ja parantaa samalla kattilan hyötysuhdetta. (Huhtinen, et al., 2004, p. 113.)

Esilämmittimen jälkeen syöttövesi johdetaan lieriöön, josta se kulkee laskuputkia pitkin höyrystinputkien alaosiin (kuva 2. kohdat 3 ja 4). Putkissa osa vedestä höyrystyy, ja muodostuu seos kylläistä vettä ja höyryä, joka kulkeutuu lieriöön, jossa ne erotellaan (kuva 2, kohta 5 ja 3). Höyry nousee lieriön yläosaan ja siirtyy sieltä tulistimeen. Höyrystymätön vesi sekoittuu uuteen syöttövedeen ja kiertää takaisin höyrystinputkiin. (Huhtinen, et al., 2004, p. 113.)

Luonnonkiertokattilassa veden ja vesihöyryn kierto lieriön ja höyrystimen välillä tapahtuu niiden tiheyserojen takia. Lieriöstä lähtevä vedenlaskuputki ja höyrystinputkisto muodostavat kiertopiirin, jossa tulipesän lämpö höyrystää osan vedestä. Tiheyseron vuoksi kevyempi vesi ja höyryn seos nousee lieriöön, ja laskuputkea pitkin tilalle virtaa tiheämpää kylläistä vettä. (Vakkilainen, 2017, p. 89.)



Kuva 2. K4 Luonnonkiertokattilan vesihöyrypiiri (Huhtinen, et al., 2004, p. 113) (Vakkilainen, 2017, p. 90) Piirretty lähteiden pohjalta.

### 2.3.2 Kerrosleijupolton etuja

Leijukerrospoltoilla on useita etuja, kuten alhaiset typenoksidipäästöt ( $\text{NO}_x$ ), vähäinen palamattomien yhdisteiden määrä sekä kustannustehokas rikinpoisto (Raiko, et al., 2002, p. 490). Pienikokoisissa leijupolttolaitoksissa lisäaineita ei kuitenkaan yleensä käytetä rikkidioksidin sitomiseen. Lisäksi sen yksinkertainen rakenne, jossa ei ole syklonia tai palautusputkea, tekee siitä kustannustehokkaan vaihtoehdon erityisesti pienemmän kokoluokan polttolaitoksissa. (Jalovaara, et al., 2003, p. 36–37.)

Leijukerrospoltoissa polttoaineen esikäsittelytarve on vähäinen, mikä tekee siitä kustannustehokkaan ja yksinkertaisen vaihtoehdon. Kalliita esikäsittelylaitteistoja, kuten kuivaimia, ei tarvita, mikä vähentää sekä investointi- että käyttökustannuksia. (Basu, 2006, p. 216.) Polttoaineen käsittely rajoittuu pääasiassa raudan erotteluun, ja tarvittaessa voidaan suorittaa myös esikäsittelytoimia, kuten murskausta ja seulontaa, jotka ovat yksinkertaisia ja helposti toteutettavia prosesseja (Jalovaara, et al., 2003, p. 33).

Kerrosleijukattila soveltuu kierto-leijukattilaa paremmin märille ja matalalämpöarvoisille polttoaineille. Se käsittelee tehokkaasti korkeakosteuisia ja alhaisen lämpöarvon omaavia polttoaineita, pedin korkean lämpökapasiteetin ansiosta polttoaine kuivuu ja lämpenee nopeasti. Samalla myös polttoaineen laadun vaihtelut tasoittuvat tehokkaammin. (Jalovaara, et al., 2003, p. 36.) (Raiko, et al., 2002, p. 490.)

### 2.3.3 Kerrosleijupolton haasteita

Leijukerrospoltoissa käytetään suhteellisen alhaista palamislämpötilaa  $750\text{--}950^\circ\text{C}$ , lämpötilan yläraja on pidettävä tuhkan sulamispisteen alapuolella, jotta vältetään ongelmilta (Raiko, et al., 2002, p. 490). Leijukerroskattiloissa tuhkan aiheuttamat ongelmat johtuvat usein leijutusmateriaalin ja tuhkan välisten agglomeraatioiden muodostumisesta, mikä voi johtaa materiaalin sintraantumiseen. Tämä prosessi voi estää kattilan toiminnan ja pakottaa sen alasajoon. (Raiko, et al., 2002, p. 287.)

Agglomerointimekanismi voi syntyä leijutusmateriaalin ja polttoaineen välille, jolloin ne sulautuvat yhteen ja samalla muodostavat yhdisteitä, jotka sulavat matalissa lämpötiloissa. Nämä yhdisteet muodostavat kerrostumia eli sintraantuvat kattilan lämpöpinnoille, mikä heikentää lämmönsiirtoa. Leijukerroskattilan agglomerointimekanismit ovat suurelta osin samanlaisia kuin ne, jotka aiheuttavat kerrostumien syntymistä lämmönvaihtopinnoille. Yksi keskeisimmistä agglomerointiprosesseista on sulan faasin muodostuminen leijutusmateriaaliin. (Raiko, et al., 2002, p. 286–287.)

Sula voi muodostua joko pelkästään tuhkasta tai tuhkan ja leijutusmateriaalin seoksesta. Esimerkiksi biomassan, kuten kuoren tai puun, poltoissa kvartsihiekkaa leijutusmateriaalina käytettäessä polttoaineen alkaliyhdisteet reagoivat hiekan kanssa muodostaen matalalla sulavia alkalisilikaatteja. Agglomerointimekanismista voidaan ehkäistä molemmissa tapauksissa ylläpitämällä alhainen tuhkapitoisuus suhteessa leijutusmateriaaliin ja vaihtamalla leijutusmateriaalia säännöllisesti. (Raiko, et al., 2002, p. 287.)

Kerrosleijukattilassa eroosio on merkittävä haaste, joka johtuu pedin voimakkaasta sekoittumisesta sekä pelkistävästä ja hapettavista olosuhteista. Näissä olosuhteissa lämmönsiirto-putket altistuvat kulumiselle, mikä voi heikentää kattilan tehokkuutta ja luotettavuutta. Eroosiota voidaan vähentää pinnoittamalla putket kulutusta kestävämmällä materiaalilla, kuten muurauksilla. (Jalovaara, et al., 2003, p. 34.)

### 3 POLTTOAINE

#### 3.1 Laitoksella käytettävien kiinteiden biopolttoaineiden ominaisuuksia

Polttoaineiden ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi niiden käytettävyyteen ja polttoprosessin tehokkuuteen. Polttoaineiden keskeisiin ominaisuuksiin kuuluvat lämpöarvo, kosteus, tuhkapitoisuus, tuhkan koostumus ja sulamiskäyttäytyminen sekä kemiallinen koostumus (elementaarianalyysi), jauhautuvuus, viskositeetti, tiheys ja muut käsittelytekniset piirteet. (Alakangas, et al., 2016, p. 22.)

Biopolttoaineissa, kuten laitoksella käytettävässä hakkeessa, keskeisimmät ominaisuudet ovat lämpöarvo, kosteus, ja tuhkapitoisuus. Näiden lisäksi myös on hyvä pitää mielessä myös alkalimetallit, kuten kalium (K) ja natrium (Na), jotka edistävät kattilan likaantumista, tuhkan sulamista, korroosiota (yhdessä kloorin kanssa) sekä leijupetihiekan agglomeraatiota. (Alakangas, et al., 2016, p. 198.)

Tärkein polttoaineen ominaisuus on sen lämpöarvo, joka kuvaa täydellisessä palamisessa vapautuvan lämpöenergian määrää. Kiinteiden polttoaineiden energiamäärää kuvaa parhaiten alempi, eli tehollinen lämpöarvo. Tässä lämpöarvossa oletetaan, että kaikki polttoaineessa oleva vesi höyrystyy palamisen yhteydessä. Toisin kuin kalorimetrisessä lämpöarvossa, tehollisessa lämpöarvossa ei oteta huomioon tilannetta, jossa polttoaineen sisältämä vesi ja palamistuotteena syntyvä vesi jäävät palamisen jälkeen nestemäiseen olomuotoon. (Raiko, et al., 2002, p. 123.)

Kosteus on tavanomaisin ja helposti polttoaineesta mitattava ominaisuus. Kosteus vaikuttaa suoraan polttoaineen teholliseen lämpöarvoon, koska veden höyrystyminen kuluttaa energiaa. Tällöin laitoksen energiantuotto paranee hakkeen kuivamassan kasvaessa ja kosteuden vähetessä. (Alakangas, et al., 2016, p. 71.) Metsälehdessä Sami Karppinen toteaa, että yleisesti ottaen puun kosteuden puolittuessa sen lämpöarvo kasvaa noin 50 prosenttia (Metsälehti, 2022). Kuvassa 3 on havainnollistettu puun koostumusta.

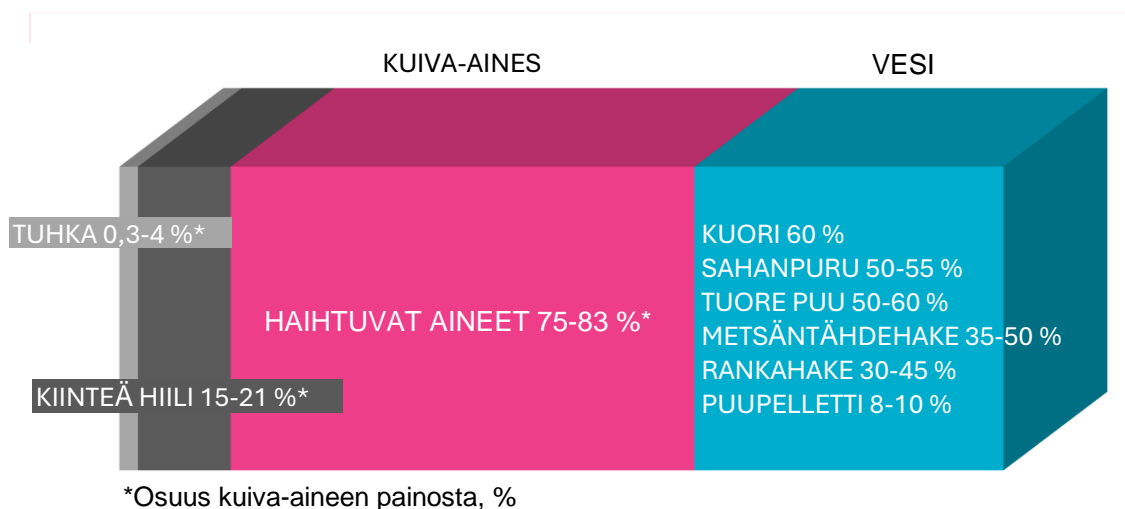
Tuhkapitoisuus vaikuttaa muun muassa polttoaineen lämpöarvon alenemiseen ja tuhkan käsittelylaitteistojen kapasiteettivaatimuksiin. Yleisesti ottaen puumaisilla polttoaineilla tuhkapitoisuus on alhaisempi kuin esimerkiksi heinämaisilla polttoaineilla. Hakkuutähteet voivat sisältää enemmän kuorta ja lehdistöä, jolloin niiden tuhkapitoisuus on korkeampi kuin puun rungon. Biopolttoaineiden tuhkapitoisuutta voivat kasvattaa myös epäpuhtaudet, kuten maa-aines, kivet, lasit ja metallit. (Alakangas, et al., 2016, pp. 59, 78, 132, 135, 197) Taulukossa 2 heinämaisiiä polttoaineita edustaa vertailun vuoksi olki.

Lämpöarvon, kosteuden ja tuhkapitoisuuden lisäksi on usein tarpeen selvittää myös polttoaineen tiheys, palakoko ja muut käsittelyyn liittyvät tekniset ominaisuudet. Ympäristö- tai polttoteknisistä syistä tutkitaan myös metallien ja epämetallien pitoisuuksia joko polttoaineessa tai sen tuhkassa. (Alakangas, et al., 2016, p. 23.)

Energiatiheys ilmaisee polttoaineen energiamäärän tilavuusyksikköä kohden. Tämä arvo vaikuttaa muun muassa polttoaineen varastointiin, käsittelyyn ja syöttölaitteiden kapasiteettivaatimuksiin sekä kuljetuskustannuksiin. (Alakangas, et al., 2016, p. 196.) Irtotiheys saapumistilassa (BD, kg/m<sup>3</sup>) lasketaan jakamalla kuorman paino sen tilavuudella (Alakangas & Impola, 2020, p. 24). Taulukossa 2 on vertailtu laitoksella käytettävien eri polttoainejakeiden aiemmin käsiteltyjä ominaisuuksia.

Taulukko 2. Polttoaineiden lämpöarvon, kosteuden ja irtotiheyden, energiatheyden ja tuhkapitoisuuden vertailu. Lyhennetty alkuperäisestä (Alakangas, et al., 2016, p. 205)

Polttoaine	Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo MJ/kg	Kosteusp-%	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg	Irtotiheys kg/irto-m <sup>3</sup>	Energiatiheys MWh/irto-m <sup>3</sup>	Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa p-%
Kevyt polttoöljy	35,2–35,9 MJ/litra	0,01–0,02	35,2–35,9 MJ/litra	820–840	-	< 0,001
Sahanpuru	19,0–19,2	45–60	2,2–10,0	250–350	0,45–0,70	0,4–0,5
Koivunkuori	21,0–23,0	45–55	8,0–11,0	300–400	0,60–0,90	1,0–3,0
Havupuun kuori	18,5–20,0	50–65	5,0–9,0	250–350	0,50–0,70	1,0–3,0
Vanerimurske	19,0–19,2	5–15	16,0–18,0	200–300	0,9–1,1	0,4–0,8
Rankahake	18,5–20,0	40–55	7,0–11,0	250–350	0,7–0,9	0,5–2,0
Hakkuutähdehake	18,5–20,0	50–60	6,0–9,0	250–400	0,7–0,9	1,0–3,0
Kokopuuhake	18,5–20,0	45–55	7,0–10,0	250–350	0,7–0,9	1,0–2,0
Puupelletit	18,9–19,5	6–9	7,0–18,2	600–650	2,8–3,3	0,1–0,5
Olki, silputtu	17,4	17–25	12,4–14,0	80	0,3–0,4	5,0



Kuva 3. Puun koostumus, muokattu alkuperäisestä. (Alakangas, et al., 2016, p. 55)

### 3.2 Kiinteiden polttoaineiden palaminen

Palaminen on kemiallinen reaktio, jossa aine yhdistyy happeen. Kiinteiden polttoaineiden palamisessa keskeiset reagoivat aineet ovat vety (H), hiili (C), typpi (N) ja rikki (S). Palamisnopeus riippuu näiden aineiden pitoisuuksista, niiden aktivoitumisenergiasta ja reaktion lämpötilasta. Lämpötilan nousu nopeuttaa palamista, ja riittävän korkea lämpötila saa aikaan polttoaineen ja ilman seoksen syttymisen. Reaktiossa polttoaine ja happi muuttuvat palamistuotteiksi nopeasti etenevien ja monivaiheisten reaktioketjujen kautta. (Huhtinen, et al., 2004, p. 79.)

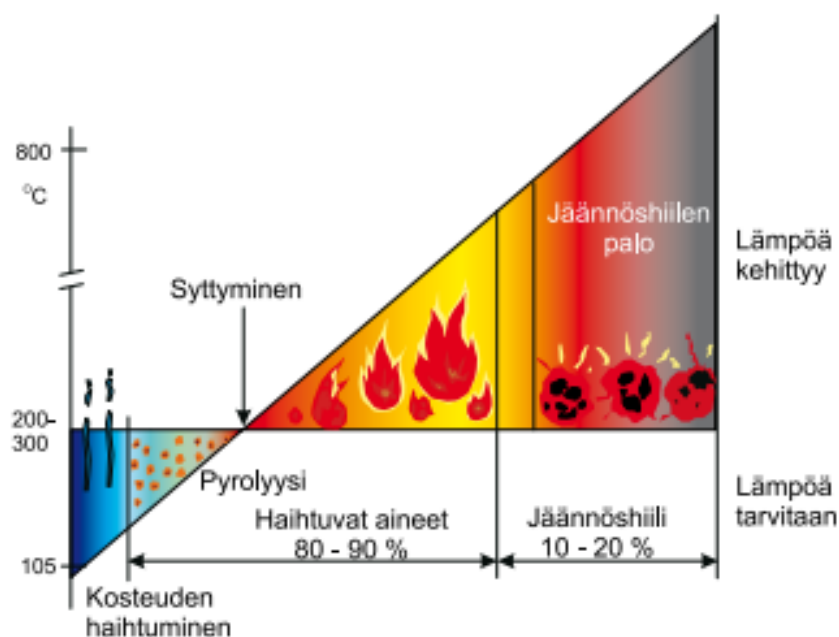
Jotta palo voi syttyä ja jatkua, tietyt edellytykset on täyttyttävä samanaikaisesti. Jos yksikin niistä puuttuu, palo sammuu. Liekkipalon ylläpitämiseksi tarvitaan polttoainetta, riittävä

lämpötila, happea sekä katkeamaton ketjureaktio. (Mangs & Keski-Rahkonen, 1997, p. 20.) (Raiko, et al., 2002, p. 186.)

Kiinteän polttoaineen palaminen etenee vaiheittain, ja nämä vaiheet tapahtuvat polttoainepartikkelissa osin peräkkäin ja osin samanaikaisesti. Palamisprosessin vaiheet ovat polttoaineen lämpeneminen ja kuivuminen, pyrolyysi sekä jäännöshiilen palaminen (kuva 4). Ensimmäisessä vaiheessa ulkoinen lämpö saa polttoainepartikkelin kuivumaan, ja siitä vapautuu kosteutta.

Toisessa vaiheessa, pyrolyysissä, kuivuneesta puusta vapautuu kaasumaisia haihtuvia aineita. Kolmannessa vaiheessa nämä kaasumaiset aineet syttyvät palamaan, mikä nostaa lämpötilaa polttoainepartikkelin ympäristössä ja kuumentaa sen. (Huhtinen, et al., 2004, p. 83.) (Raiko, et al., 2002, pp. 61,186.)

Viimeisessä vaiheessa, kun palavien kaasumaisten aineiden määrä on riittävä, niiden palaminen tuottaa lämpöä, joka sytyttää jäännöshiilipartikkelit. Tällöin hiilipartikkelien lämpötila nousee ympäristönsä lämpötilaa korkeammaksi, joten ne alkavat luovuttaa lämpöä ympärilleen. Lopputuotteeksi tulee tuhkaa. (Huhtinen, et al., 2004, p. 83.) (Raiko, et al., 2002, pp. 61,186.)



Kuva 4. Puun palaminen ja lämmönkehitys (Alakangas, 1992, p. 68).

### 3.2.1 Epätäydellinen palaminen ja palamisen arviointi

Puuaineksen palaminen voi tapahtua joko täydellisesti tai epätäydellisesti. Jotta saadaan hyödynnettyä kaikki puun mahdollinen energia, sen palamisen tulee olla niin puhdasta ja täydellistä kuin mahdollista. Yksinkertaisena esimerkkinä voidaan käyttää tulitikun epätäydellistä palamista. Kun tulitikku on palanut loppuun, jäljelle jää vielä hiilitikku. Tulitikun palamisessa puun lämpöä jää saamatta 67 %, koska palava tikku ei saavuta hiilen palamislämpötilaa, joka on +800 °C. Kun palaminen on tapahtunut täydellisesti jäljelle jää vain puhtas vaalean harmaa tuhka. (Bioenergianeuvoja, 2025)

Jotta polttoaine palaisi, sen ja palamisilman on päästävä polttolaitteessa tehokkaasti kosketuksiin keskenään, jolloin seos syttyy. Polttoaineen palamisen hyötysuhteen tulee olla hyvä, eli polttoaineen

pitää palaa mahdollisimman täydellisesti niin että ilma ylimäärä jää mahdollisimman vähäiseksi. Palamisen täytyy tapahtua polttolaitteessa tasaisesti ja halutulla teholla, ja lisäksi palamistehoa tulee voida säätää tarpeen mukaan. (Huhtinen, et al., 2004, p. 126.)

Epätäydellinen palaminen kiinteän polttoaineen kattiloissa lisää savukaasujen kiintoainepitoisuutta sekä palamattomia kaasuja, kuten häkää ja hiilivetyjä. Epätäydellinen palaminen voi myös johtaa hyötysuhteen laskemiseen sekä kattilan nopeaan likaantumiseen. Leijupoltossa palamattoman aineen osuus tuhkassa on yleensä luokkaa 1–15 %. (Jalovaara, et al., 2003, p. 72–73.)

Epätäydellinen palaminen voi johtua esimerkiksi tulipesän liian alhaisesta lämpötilasta, palamisilmojen vääränlaisista säädöistä, ylikuormituksesta tai minimitelholla ajamisesta. Myös normaalia kosteampi polttoaine tai polttoaineen syötön epätasaisuus voi johtaa epätäydelliseen palamiseen. (Jalovaara, et al., 2003, pp. 72, 76.)

Palamista voidaan arvioida esimerkiksi liekkiä katsomalla tai tutkimalla tuhkaa. Tuhkan väri kertoo tuhkan sisältämän palamattoman kiintoaineen osuuden. Mitä tummempaa tuhka on, sitä enemmän se sisältää palamatonta. Puhdas tuhka on väriltään hyvin vaaleaa. Taulukossa 3. on käsitelty palamisen arviointia liekin ja savukaasun värin perusteella kiinteää polttoainetta käytettäessä. (Jalovaara, et al., 2003, p. 70–71.)

Taulukko 3. Kiinteän polttoaineen palamista voidaan arvioida liekin ja savukaasun värin perusteella (Jalovaara, et al., 2003, p. 71).

Liekki	Syy	Säätö
Liekki on punainen ja siinä on mustia kiekkuroita.	Poltto ei saa sekundääri-ilmaa ollenkaan tai erittäin vähän. Savukaasut ovat mustia tai tumman harmaita. Ilmassa on kitkerä haju erityisesti turvetta poltettaessa.	Lisää sekundääri-ilmaa tai vähennä primääri-ilmaa tai tee molemmat toimenpiteet. Tarkkaile säädön vaikutusta savukaasuista.
Liekki on vaalean keltävä.	Primääri- ja sekundääri-ilmojen suhde on oikein säädetty. Savukaasut ovat lähes näkymättömiä tai vaalean harmaita. Ilmassa ei ole kitkerää hajua.	Säädöt ovat kohdallaan.
Liekki on valkoinen tai kirkkaan sininen ja lyhyt.	Poltto saa liikaa sekundääri-ilmaa. Savukaasut ovat valkoisia tai piipun päässä näkyy väritöntä väreilyä.	Vähennä sekundääri-ilmaa tai säädä primääri-ilmaa tai tee molempia, kunnes savukaasut muuttuvat värittömiksi tai vaalean harmiksi. Jos ilmassa tuntuu kitkerää hajua, on sekundääri-ilmaa vähennetty liikaa.

### 3.3 Kosteuden biopolttoaineen yhteys polttoon

Leijupetikattilan pedin suuri lämpökapasiteetti tasaa tehokkaasti polttoaineen laatuvariaatioita, mikä tekee mahdolliseksi kosteiden polttoaineiden käytön. Pienet partikkelit palavat nopeasti leijukerrokseen yläosassa ja suuremmat laskeutuvat petiin missä ne kuivuvat ja kaasuuntuvat. (Huhtinen, et al., 2013, p. 36.) Kosteus haihtuu nopeasti, kun polttoaine sekoittuu kuumaan hiekkakerrokseen, jossa se lämpenee nopeasti syttymislämpötilaan (Huhtinen, et al., 2004, p. 157).

Hakkeen korkea kosteus pienentää polttoaineen tehollista lämpöarvoa, ja ne yhdessä johtavat palamisilmojen laskemiseen ja heikentävät palamistulosta (Raiko, et al., 2002, p. 469). Polttoaine syttyy vasta, kun se on lämmitetty syttymislämpötilaan. Tämän lämmitysprosessin aikana polttoaine

myös kuivuu, mikä vaatii energiaa. Kosteat polttoaineet kuluttavat erityisen paljon energiaa, sillä pelkän lämmityksen lisäksi niiden kosteus on haihdutettava. (Huhtinen, et al., 2004, p. 152.) Saman kokoluokan eri polttotekniikoiden polttoaineiden kosteus- ja laatuvaatimuksia on esitetty taulukossa 4, käsiteltävää laitosta koskevat osiot ovat korostettu.

Polttoaineen korkea kosteus myös lisää savukaasujen määrää, mikä johtaa kattilan hyötysuhteen heikkenemiseen. Laitokset, joissa on savukaasunlauhduutin, voivat käyttää kostea polttoainetta tehokkaasti (yli 50 %), sillä tällöin savukaasujen sisältämä kosteus voidaan lauhduttaa ja lämpöenergia hyödyntää. (Alakangas, et al., 2016, pp. 61, 196.)

Kostea polttoaine voi myös aiheuttaa ongelmia polttoaineen syöttämisessä. Kostea polttoaine on talvella alttiimpi jäätymiselle, mikä voi johtaa ongelmiin polttoaineen syöttölaitteistoissa. (Alakangas, et al., 2016, p. 196.) Leijukattilatekniikka mahdollistaa polttoaineen syöttämisen mekaanisesti polttoainesiihon alapuolisella kuljettimella sulkusyöttimen kautta pudotustorveen. Järjestelmä on esimerkiksi pneumaattisiin kuljettimiin verrattuna käyttövarmempi rakenne hakkeen monipuolisemmalle kokojakaumalle ja kosteudelle. (Huhtinen, et al., 2004, p. 157.)

Taulukko 4. Kiinteiden polttoaineiden tärkeimmät laatuvaatimukset eri käyttäjäryhmille ja tekniikoille. Lyhennetty alkuperäisestä. (Alakangas, et al., 2016, p. 204)

Käyttäjäryhmä	Polttoaine	Käytetty teknologia	Polttoaineen tärkeimmät laatuvaatimukset
Kaukolämpölaitokset (< 5 MWth) tai pienet CHP-laitokset	Metsätähde- tai kokopuuhake, palaturve	Arinapoltto Leijupoltto	Kosteus < 40 p-% arina- ja leijupolttoon
	Erittäin hyvät, puhtaat polttoaineet	Myötävirtakaasutus (< 2 MW)	Kosteus < 25 p-%, palakoko 10–100 mm, tuhkapitoisuus < 1 p-%, korkea tuhkan sulalämpötila, suuri irtotiheys > 200 kg/m <sup>3</sup>
Lämpö- ja CHP-laitokset (5–10 MW)	Metsätähde-, kokopuu- tai rankahake	Arinapoltto (Leijukerrosolotto)	Kosteus < 50 p-%, (alkalit ja kloori)
	Suhteellisen laaja polttoainepohja	Vastavirtakaasutus (< 10 MW)	Palakoko 10–100 mm, kosteus < 50 %
	Puu- ja olkipelletit	Stokeripoltto, pölypoltto	Kattilakohtaiset laatuvaatimukset
	Olki- tai mm. peltobio-massapaalit	Arinapoltto (Leijukerrosolotto)	Isot paalit, kosteus < 20 p-%, Tuhkan sulamisominaisuudet ja korkeat alkali- ja klooripitoisuudet huomioitava kattilasuunnittelussa.
Lämpö- ja CHP-laitokset (10–50 MW)	Metsätähdehake, kantomurske, sahanpuru, kuori, jyrshinturve ja peltobiomassat	Leijupoltto	Kosteus 40–60 p-%. Selvitettävä alkuainepitoisuudet erityisesti alkali- ja kloori. Seospoltossa polttoaineseoksen ominaisuudet ratkaisevat, ei yksittäisten polttoaineiden.
	Kierrätyspuu (C-laatu)	Leijupoltto	Kattilakohtaiset laatuvaatimukset
	Joustava polttoaineiden suhteen: myös vaikeat biomassat ja jätepolttoaineet	Kupliva/ kiertoleijukaasutus (20–100 MW)	Palakoko < 30–50 mm, kosteus < 50 p-%. Kaasun puhdistustarve määräytyy polttoaineen epäpuhtauksien ja kattilatyyppin mukaisesti.

### 3.4 Kosteusnäytteiden merkitys

Polttoaineen kosteudella on merkittävä vaikutus voima- ja lämpölaitosten polttoainekustannuksiin. Laitoksella polttoainenäytteen ottaa pääasiassa toimittaja eli kuljettaja, ja laitoksen käyttäjät valvovat näytteiden laatua omilla vertailunäytteillään. On siis erittäin tärkeää, että näytteiden ottajat ovat hyvin perehdytettyjä oikeisiin näytteenottomenetelmiin ja toimivat niiden mukaisesti, jotta kosteuspitoisuuden määrittäminen on mahdollisimman tarkka ja luotettava. Tämä varmistaa polttoaineen laadun seurannan ja auttaa optimoimaan polttoainekustannuksia.

Hyvän näytteenoton perusajatus on, että näyte edustaa koko polttoaine-erää. Kaikilla erän partikkeleilla tulisi olla yhtä suuri mahdollisuus päätyä näytteeseen. Näytteen käsittelyn tarkoituksena on pienentää näytteen kokoa säilyttäen sen edustavuus. (Alakangas, et al., 2016, p. 41.)

Näytteenotto aiheuttaa eniten epätarkkuutta määritysten tuloksiin, joten se on suoritettava mahdollisimman järjestelmällisesti ja huolellisesti. Arvioiden mukaan noin 80 % analyysitulosten virheistä johtuu näytteenotosta, 15 % näytteen käsittelystä ja 5 % itse analyysistä. (Alakangas, et al., 2016, p. 41–42.)

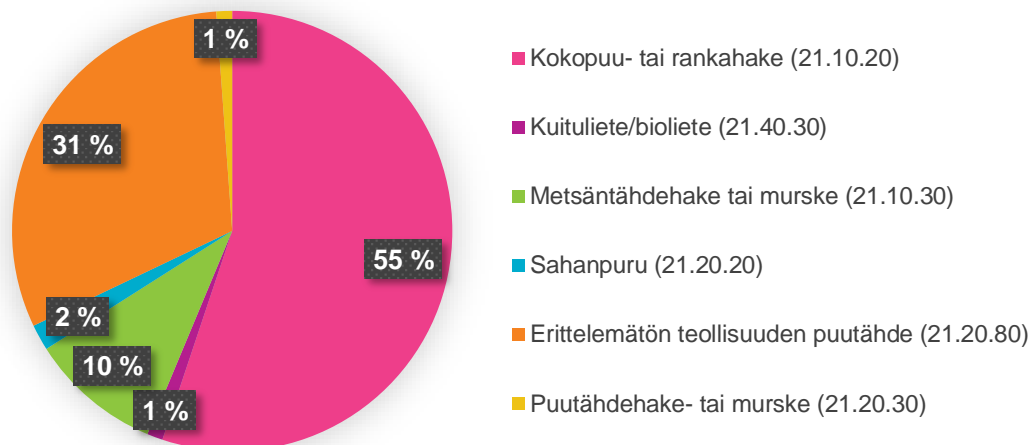
Tarkimmat tulokset saadaan jatkuvatoimisella koneellisella näytteenotolla polttoainevirrasta. Jos koneellista järjestelmää ei ole, näytteenotto on tehokkainta tehdä liikkuvasta tai usein putoavasta polttoainevirrasta. Viimeisenä vaihtoehtona on ottaa näyte varastokasasta useasta eri kohdasta heti kuorman purkamisen yhteydessä. (Alakangas, et al., 2016, p. 42–43.)

Laitoksella, jossa opinnäytetyö toteutetaan, käytetään MScales-punnitusohjelmaa, johon kuormien kosteus tulokset kirjataan. Ohjelma mahdollistaa polttoaineiden kosteuden tarkkailun ja datan keräämisen. Laitokselle saapuneiden eri polttoainejakeiden kosteuksia on vertailtu vuositasolla taulukossa 5 ja kuvassa 5 on esitetty polttoainejakaumaa vuodelta 2024. Luvut perustuvat Advenin sisäisiin tietoihin, ja polttoaineet on luokiteltu Tilastokeskuksen polttoaineluokituksen mukaisesti.

Taulukko 5. Laitoksella vuosittain käytettävien polttoaineiden painotettuja keskikosteuksia Mscalen ohjelmasta. (Adven Oy, 2025) (Tilastokeskus, 2024)

Tuote (tilastokeskuksen luokitus)	Painotettu keskikosteus (%) (5 % tarkkuudella)				Keskiarvo (%)
	2021	2022	2023	2024	
Kuori (21.20.10)	45	45	45	*	45
Kokopuu- tai rankahake (21.10.20)	40	45	45	45	43,75
Kutterilastu, hiontapöly ym. (21.20.40)	15	15	15	10	13,75
Kuituliete/bioliete (21.40.30)	*	60	60	60	60
Metsäntähdehake tai -murske (21.10.30)	40	45	50	50	46,25
Sahanpuru (21.20.20)	55	55	55	55	55
Erittelemätön teollisuuden puutähde (21.20.80)	55	55	50	50	52,5
Puutähdehake tai -murske (21.20.30)	45	50	45	45	46,25

\*Ei toimitettu yhtään.



Kuva 5. LK199-laitoksen polttoainejakauma vuonna 2024 (Adven Oy, 2025) (Tilastokeskus, 2024)

## 4 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

### 4.1 Lähtökohdat ja aikataulu

LK199-laitoksella K4 kattila sammuu herkästi kostealla hakkeella, mikä korostaa polttoaineen laadun merkitystä. Palamattoman polttoaineen kertyminen leijukerrokseen aiheuttaa turvallisuusriskejä ja taloudellisia tappioita. Ongelmaa on hallittu rajoittamalla kattilan tehoa, mutta tämä lisää kustannuksia kevytöljyn käytön myötä. Tavoitteena on parantaa K4-kattilan toimintavarmuutta, jotta nimellisteho säilyy myös heikkolaatuisilla polttoaineilla, vähentäen tuotantohäiriöitä ja kevytöljyn kulutusta.

Lämmin talvi vaikuttaa huippukuormiin vähentämällä lämmitystarvetta, mikä johtaa alhaisempiin kulutushuippuihin verrattuna kylmiin jaksoihin. Tämä tarkoittaa, että kattiloiden ei tarvitse käydä täydellä teholla yhtä usein, mikä voi pienentää polttoaineenkulutusta ja kevyen polttoöljyn käyttöä varatehona. Tänä vuonna lämmityskauden sää oli suhteellisen leuto, eikä merkittäviä pakkasjaksoja esiintynyt. Sää vaikuttaa myös osaltaan varastokentällä säilytettävän hakkeen kosteuteen. Jos sataa paljon, voi kosteus alkaa imeytyä varastoitavaan hakkeeseen.

Tutkimus toteutettiin useassa vaiheessa. Pudotustorvien vertailu on tehty jo kesällä 2024. Primääripuhaltimen riittävyttä tutkittiin kattilatoimittajan dokumenteista ja savukaasulaskurilla. K4 kattilan toimintaa seurattiin 3.12.2024-20.3.2025 välisenä aikana kun kattila oli tuotannossa. Kolme ajoa suoritettiin helmi-maaliskuun 2025 aikana. Aikatauluna kirjalliselle työlle syyskuusta 2024 maaliskuuhun 2025. Ohje polttoaineen kuljettajalle syntyi työn ohessa syksyllä 2024.

### 4.2 Tutkimuskohteet

#### 4.2.1 Primääri-ilman riittävyden arviointi

Primääri-ilma on leijupetikattilassa käytettävä ilma, joka johdetaan kattilan alaosaan hiekkapedin fluidisoimiseksi. Se ylläpitää pedin toimintaa, säätelee lämpötilaa ja tukee polttoaineen palamista. Primääri-ilman osuus vaihtelee polttoaineen mukaan ja on tyypillisesti välillä 45–80 %. Kosteampaa polttoainetta käytettäessä primääri-ilman osuus on suurempi. (Jalovaara, et al., 2003, p. 35.)

K4-kattilassa primääri-ilma esilämmitetään ennen sen syöttämistä kattilaan. Leijupetikattilaan syötetävän primääri-ilman esilämmitys nopeuttaa palamisreaktioita ja auttaa samalla vähentämään kattilan savukaasuhäviöitä (Jalovaara, et al., 2003, p. 31). Ilmamäärää säädetään taajuusmuuttajan avulla. K4-kattilassa kiinteän polttoaineen syöttöilma otetaan leijutusilmalinjasta. K4-kattilan primääripuhaltimen tietoja on esitetty liitteessä 8.

Savukaasulaskurin sekä primääripuhaltimen kapasiteettitietojen avulla pyrittiin arvioimaan, kykeneekö primääri-ilmapuhallin tuottamaan noin puolet kattilan tarvitsemasta kokonaispalamisilmamäärästä. Arvion laatimiseksi kerättiin tarvittavat lähtötiedot kattilan valmistajan ohjekirjasta sekä laitoksen henkilöstöltä. Näiden tietojen avulla voitiin muodostaa kokonaiskuva puhaltimen riittävydestä suhteessa kattilan ilmantarpeeseen.

#### 4.2.2 Ajokokeet

Kattilan ongelmia pyrittiin tunnistamaan ajokokeiden avulla analysoimalla trendejä. Tehoa siirrettiin K1-kattilalta K4-kattilalle estäen samalla varakattiloiden käynnistyminen. Polttoainemäärää kasvatettiin lisäämällä ruuvipurkaimien nopeutta, mikä nosti kattilan tehoa. Tavoitteena oli mahdollisimman täydellinen palaminen, jolloin savukaasun jäännöshapen tuli olla matala ja häikäpitoisuuden alhainen. Viimeisessä kokeessa arvioitiin kiertokaasupellin asennon vaikutusta, sekä tarkkailtiin palamista kattilan näkölasista. Ajokokeiden aikana arvioitiin myös työhön liittyvien laitteiden toimivuutta.

Ajokoe pyrittiin ajoittamaan olosuhteisiin, joissa kylmä sää kasvattaisi kaukolämpökuormaa, luoden parhaat edellytykset testille. Aluksi harkittiin tarkoituksella kerätyn kosteamman polttoaineen käyttöä, mutta sen järjestäminen osoittautui haasteelliseksi. Koska molemmilla kattiloilla on yhteinen kuljetinjärjestelmä ja suuret päiväsiilot, lopulta päädyttiin käyttämään laitoksella tavanomaisesti käytössä olevaa polttoaineseosta. Näin vältettiin, ettei ongelmia synny myös K1-kattilassa.

Kolmesta suoritetusta ajokokeesta raportissa on esitetty tulokset viimeisestä kokeesta. Haluttiin keskittyä viimeiseen, onnistuneeseen ajokokeeseen ja siihen liittyviin tuloksiin, jotka parhaiten kuvaavat tavoiteltua tilannetta ja johtopäätöksiä. Ensimmäinen ajokoe oli 19.2.2025 ja sen trendistä kuvakaappaus liitteessä 6. 20.2.2025 tehty toinen ajokoe jouduttiin keskeyttämään heti alkuvaiheessa, sillä toisella laitoksella tuli tilanne, joka vaati laitostyöntekijöiden välitöntä huomiota.

Kahden ajokokeen jälkeen sää lämpeni, joten kolmatta koetta jouduttiin hieman odottamaan, jotta saatiin kuormaa tarpeeksi. Viimeinen ajokoe järjestettiin 17.3.2025 ja sen trendeistä kuvakaappaus kuvassa 9 ja kuvaus kokeenkulusta liitteessä 5.

#### 4.2.3 Kosteusnäytteet

Ajokokeiden kosteusnäytteiden otto suoritettiin K1-kattilan syöttöruuvilta, johon on jo muodostunut lopullinen polttoaineseos (liite 2. kuva 3). Näytteitä otettiin ajokokeiden aikana tunnin välein. 10 litran näytteet kerättiin tiiviisiin omiin sankoihinsa ja astian pinnoille kertynyt kosteus hierottiin mukaan näytteeseen. Punnitus ja kuivaus tehtiin laitokselta löytyvillä laitteilla ja kosteus määritettiin käyttämällä yksinkertaistettua uunikuivausmenetelmää (SFS 18134-2, 2024, p. 7) (liite 2).

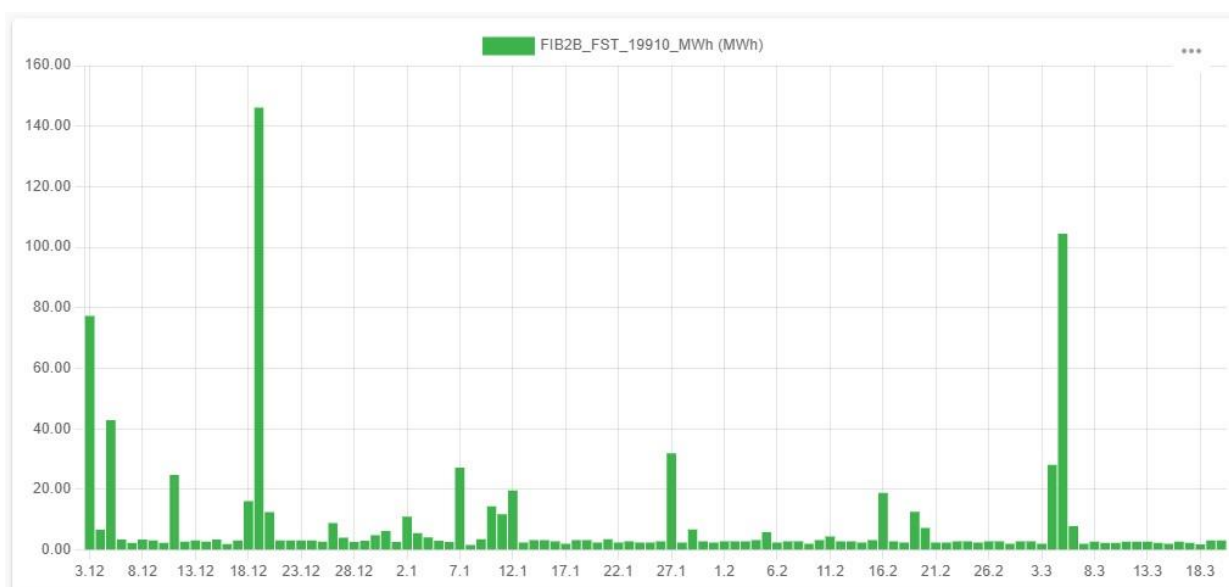
Näytteenotto suoritettiin K1-kattilan syöttöruuvilta turvallisuussyistä. Polttoaine kulkee siilosta ruuvipurkaimien kautta syöttöruuville, jossa K4-kattilan syöttöruuvi pyörii vakionopeudella mutta huomattavasti suuremmalla kierrosnopeudella kuin K1-kattilalla. Korkeamman pyörimisnopeuden vuoksi näytteenotto K4-kattilan ruuvilta olisi ollut riskialttiimpaa, joten näytteenotto tehtiin K1-kattilan ruuvilta. Molemmilla kattiloilla on sama polttoaineen kuljetinjärjestelmä, joten suuria eroavaisuuksia polttoaineseoksessa ei ole.

17.3.2025 kaikista näytteistä otettiin myös vertailunäyte. Kokoomanäyte valmistettiin yhdistämällä kaikki sinä päivänä otetut näytteet, minkä jälkeen seos sekoitettiin huolellisesti. Tästä seoksesta koostettiin kaksi erillistä näytettä vertailuksi. Kosteusnäytteiden tarkemmat tulokset on esitetty liitteessä 4. Laitoksella käytettävien polttoaineiden kosteustiedot ja määrät saatiin M Scales-ohjelmasta, ja niistä laadittiin taulukko 5 ja ympyrädiagrammi 5.

#### 4.2.4 Öljynkulutus

Kuvassa 8 on pylväsdiagrammina laitoksen öljynkulutusta tarkkailujaksolla. K4 kattila oli käytössä lämmityskaudella 3.12.2024-20.3.2025. Kulutushuippujen syyt on lueteltu liitteessä 7. Ne liittyvät tuotannossa ilmenneisiin ongelmatilanteisiin, joiden aikana varapolttoaineen käyttö on ollut tarpeen. Tarkkailujaksolla tällaisia tuotantohäiriöistä johtuneita kulutushuippuja esiintyi 25 päivänä. Näiden jaksojen aiheuttamaa öljynkulutusta ei lasketa mukaan siihen osaan kulutuksesta, joka olisi ollut korvattavissa K4-kattilalla. Pylväsdiagrammista kuitenkin nähdään, että öljyä palaa koko ajan taustalla. Arvioitu K2-varakattilan omakäynti taustalla on noin 2 MWh, joka on vähennetty öljyn kulutuksesta. Kulutustiedot on saatu Gweb ohjelmasta.

Advenilta saatujen polttoainehintojen perusteella laskettiin Excelillä, kuinka paljon olisi voitu säästää lämmityskauden aikana, jos kevytöljyn sijaan käytettäisiin metsähaketta. Polttoaineiden 2024 hinta historiaa ei esitellä kilpailullisista syistä, vaan niistä on laskettu keskiarvo. Vertailuun otettiin mukaan myös puupelletti, jota on poltettu pieniä eriä lämmityskauden aikana.



Kuva 6. Laitoksen öljyn kulutus tarkkailujaksolla. (Adven Oy, 2025)

#### 4.2.5 Hiekankulutus

Hiekan käyttöä tutkittiin sekä kulutuksen, että laitteiston toimivuuden kannalta. Hiekan käyttöä tutkittiin kattilavalmistajan dokumenteista, käyttöpäiväkirjan merkinnöistä sekä toimitus määrien tarkastelulla. Lisäksi arvioitiin hiekkajärjestelmän laitteiden toimivuutta. Tässä työssä ei vertailtu petimateriaalien kustannuksia tai ominaisuuksia, mikä olisi parempi tai kannattavampi materiaali.

Luonnon hiekka on edullisempaa, mutta sen vaihdontarve on masuunikuonaan verrattuna suurempi. Lämmityskaudelle otettiin käyttöön luonnonhiekkaa, jonka ominaisuuksien vuoksi vaihdontarve on erilainen, kuin aikaisemmin käytetyllä vesijäähdytetyllä masuunikuonalla. Tämän laitoksella tapahtuneen muutoksen vuoksi on hyvä tarkastella, toteutuuko hiekan vaihto uuden petimateriaalin vaatimalla tavalla.

### 4.3 Vähemmälle huomiolle jääneet aihealueet

#### 4.3.1 Pudotustorvien vertailu

Pudotustorvia tutkittiin mittaamalla ja vertaamalla eri kattiloiden torvia keskenään kesällä 2024. Tutkimuksessa mitattiin torvien kulmat, korkeudet petiin nähden sekä torvien pituudet. K4 pudotustorvesta mitattiin hieman tarkemmin ja kokeiltiin esimerkiksi, tuleeko kaikista torven heittoilman pykälistä tasaisesti ilmaa. Löydöksistä piirrettiin suuntaa antavat kuvat, sekä pudotustorvet valokuvattiin. Pudotustorvien vertailu löytyy liitteestä 1. Pudotustorven ongelmat korjataan kesällä 2025.

Pudotustorvessa havaittiin korjattavaa, sen muoto ei ole optimaalinen, mikä saattaa osaltaan vaikuttaa polttoaineen jakautumiseen tasaisesti petiin. K4 kattilassa on yksi pudotustorvi, mikä voi johtaa polttoaineen epätasaiseen jakautumiseen pedissä. Usein leijupetikattiloissa on pudotustorvia useampi kuin yksi, jotta polttoaine jakautuisi koko pedin alueelle.

Pudotustorven geometriset haasteet eivät yksin selitä havaittuja petilämpötilojen laskua kuorman lisäyksen yhteydessä. Polttoaineen jakautumiseen vaikuttavat myös esimerkiksi polttoaineen laatu, heittoilman tasaisuus sekä pedissä vallitsevat olosuhteet. Näihin pedin olosuhteisiin sisältyvät muun muassa lämpötilaprofiili, eli kuinka lämpötila jakautuu pedissä eri kohdissa, sekä virtausprofiili, joka kuvaa ilman ja kaasujen liikettä petin sisällä. Jos lämpötila tai virtaus ei jakaudu tasaisesti, voi se vaikuttaa merkittävästi polttoaineen palamiseen ja sitä kautta kattilan toimintaan. Näiden tekijöiden yhteisvaikutus tekee ilmiön tarkasta erittelystä haastavaa. Pudotustorven vaikutuksen tarkempi tutkiminen polttoaineen leviämiseen pedissä jätettiin tutkimuksessa vähemmälle huomiolle.

#### 4.3.2 Ohje polttoaineen kuljettajalle

Syksyllä Advenilta saatu päivitetty näytteenotto-ohje herätti tarpeen tarkistaa myös laitoksen oma ohjeistus. Koska ajantasainen ja selkeä ohje on olennainen näytteenoton luotettavuuden ja laadun varmistamiseksi, päätettiin laatia päivitetty versio, jossa huomioidaan laitoksen erityispiirteet – kuten näytteenottopisteiden sijainti, purkuliiikenteen kulku ja alueen kulunhallinta. Näin varmistetaan ohjeistuksen selkeys ja näytteenoton sujuvuus käytännön olosuhteissa. Liitteessä 3 on ote päivitetystä näytteenotto-ohjeesta.

Alkuperäinen dokumentti on seitsemän sivua ja sisältää muun muassa toimintaohjeista hätä- ja häiriötilanteissa sekä MScal-es-ohjelman käytöstä. Ohjeessa on lisäksi alueen kartta, johon on merkitty kuljettajien kannalta oleelliset tiedot, kuten öljynimeytysvälineiden paikat ja portit. Ohjetta ei tässä opinnäytetyössä käsitellä sen tarkemmin.

Näytteenotto on kuitenkin keskeisessä roolissa tässä työssä, sillä tutkimuksessa tarkastellaan polttoaineen ominaisuuksien vaikutusta laitoksen toimintaan. Luotettava näytteenotto varmistaa, että polttoaineesta saatu tieto on tarkkaa ja edustavaa, mikä puolestaan mahdollistaa oikeiden johtopäätösten tekemisen polttoaineen laadun ja sen vaikutusten osalta.

#### 4.3.3 Tuhkanäytteet

Palamattomien määrää ei voitu luotettavasti tutkia petihiekkanäytteistä. Samalle lavalle ajetaan myös lentotuhka kattilan konvektio osasta. Arinan muodon takia, näytteiden saaminen heti ongelman ilmettyä ei mahdollista koska pitäisi poistaa todella paljon hiekkaa. Näytteen saamisessa on vähintään vuorokauden viive ja lisäksi olisi erittäin vaikea arvioida milloin kuljettimella on ongelmallisten aikainen tuhka ja hiekka. Tämän vuoksi päätettiin luopua petihiekkanäytteiden tutkimisesta.

## 5 TULOKSET

### 5.1 Primääri-ilman riittävyden arviointi

Kattilatoimittajan dokumenttien tietojen perusteella arvioitiin primääripuhaltimen kykyä tuottaa tarvittava ilmamäärä K4-kattilan optimaalisen toiminnan varmistamiseksi. Tarkastelu osoitti, että puhallin pystyy tuottamaan riittävän ilmamäärän, mikä viittaa siihen, että primääri-ilmavirran määrän ei pitäisi olla kattilan toimintahäiriöiden ensisijainen syy. Tämä havainto korostaa tarvetta tarkastella muita tekijöitä, kuten kattilan yleistä kunnossapitoa, jotta voidaan tunnistaa ja ratkaista kattilan toimintaan vaikuttavat ongelmat. Kuvakaappaus savukaasulaskenta Excelistä on esitetty liitteessä 9.

### 5.2 Ajokokeet

17.3.2025 järjestetyssä kolmannessa ajokokeessa todettiin, että kattilan ajotilannetta ei voida ylläpitää ilman laitoksen miehitystä. Koska laitos toimii pääasiassa miehittämättömänä, kattilan tulisi kyetä toimimaan itsenäisesti. Vaikka kuorman lisäys voidaan hallita manuaalisesti, ongelmana on varmistaa kattilan jatkuva toiminta ilman jatkuvaa valvontaa.

Trendistä (liite 6. vaalean vihreä viiva) on nähtävissä, että kuorman nosto johtaa petilämpötilojen laskuun. Kun ruuvipurkaimen nopeus (liite 6. vaalean sininen viiva) laskee alkavat petilämmöt taas nousta. Tämä näkyy ajokokeen aikana kolmena nousupiikkinä petilämpötiloissa. Kun kiertokaasupelti saatiin melkein kiinni, huomataan sekin trendeissä petilämpöjen nousuna.

Petilämpöjen nousut ja laskut ovat jyrkkiä ajokokeen aikana. Tämä voisi viitata palamattomien jäämiin leijukerrokseen. Kun polttoainetta syötetään kattilaan ja kaikki polttoaine ei pala, se voi alkaa se kertyä leijukerrokseen ja syttyä vasta myöhemmässä vaiheessa melko saman aikaisesti, joten lämpötila nousee nopeasti. Trendiä katsottaessa polttoaineen kertyminen petiin voi olla mahdollista. Ajokokeiden muut tulokset on esitetty liitteessä 10.

### 5.3 Kosteusnäytteet

Ajokokeiden aikana polttoaineen kosteuspitoisuutta seurattiin ottamalla näytteitä suoraan syöttöruuvilta. Kosteusnäytteitä polttoaineesta kerättiin yhteensä 12 kappaletta. Kattilan valmistaja on luvannut, että kattila kestäisi 55 % kosteaa polttoainetta (GFE-Energy, 2013, p. 9). Ajokokeiden aikana ruuvilta otettujen näytteiden kosteus vaihteli välillä 47,7–54,3 %.

Olisi ollut arvokasta tarkastella, miten kattila toimii, kun siihen syötetään esimerkiksi 65 % kosteaa polttoainetta. Käytännön olosuhteissa polttoaineen kosteus voi vaihdella merkittävästi esimerkiksi sateisina kausina tai huonon varastoinnin laadun seurauksena. Tällöin olisi tärkeää tietää kattilan todellinen sietokyky ja varmistaa toimintavarmuus myös raja-arvojen ylityksissä. Jos tiedetään, että kattila kestää hetkellisesti korkeampaa kosteutta ilman merkittäviä ongelmia, voidaan ehkä välttää turhaa varapolttoaineen käyttöä, mikä toisi taloudellisia säästöjä.

Ajokokeiden aikana polttoaineseoksen laatu todettiin hyväksi. Kuitenkin polttoaineen kosteuden jatkuva mittaus olisi tarpeen, jotta saataisiin tarkkaa tietoa polttoaineen kosteuspitoisuudesta reaaliajassa. Ilman tätä tietoa käyttöpäiväkirjoihin ei voida luotettavasti kirjata polttoaineen kosteutta ongelmien syyksi, vaan tällaiset päätelmät perustuvat käyttäjien arvioihin. Jatkuva kosteuden seuranta mahdollistaisi polttoaineen laadun paremman hallinnan ja polttoprosessin optimoinnin, mikä vähentäisi kosteuden aiheuttamia ongelmia.

#### 5.4 Öljynkulutus

Laskettiin ylimääräinen öljynkulutus K4 kattilan ollessa käytössä lämmityskaudella 3.12.2024-20.3.2025. Öljynkulutus tulokset on esitetty liitteessä 7.

#### 5.5 Hiekankulutus

Laskettiin hiekankulutus K4 kattilan ollessa käytössä lämmityskaudella 3.12.2024-20.3.2025. Hiekankulutuksen tulokset on esitetty liitteessä 11.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli löytää keinoja parantaa K4-kattilan toimintavarmuutta ja varmistaa että nimellisteho olisi käytettävissä myös huono laatuilla polttoaineilla. Tällä tavoin voidaan vähentää tuotantohäiriöitä ja minimoida polttoainekustannuksia. K4 kattilan toimintavarmuuden parantamisella saadaan suorassa suhteessa kevytöljyn käyttöä vähemmäksi.

Kattilan toimintaa tarkasteltaessa on tunnistettu useita kehityskohteita, joilla voidaan parantaa sen tehokkuutta ja toimintavarmuutta. Kokonaisuutena voidaan todeta, että laitteiston toimivuus on riippuvainen useista tekijöistä, kuten primääri-ilmajärjestelmän, kiertokaasulaitteiston ja petilämpömittareiden toiminnasta. Kattilan jatkuva valvonta ja huolto ovat elintärkeitä toiminnan varmistamiseksi, mutta mikäli laitteiston ongelmat saadaan ratkaistua, kattilan tehoa voidaan myös lisätä.

Laitokselle on pyritty löytämään keinoja kuivemman polttoaineen hankintaan. Laitoksen viereen on perustettu vuonna 2023 terminaalikenttä, josta saadaan nopealla aikataululla hakettua hyvin kuivunutta rankapuuta laitoksen käyttöön. Myös polttoaineen lastaajat ovat aktiivisesti yhteistyössä laitoksen käyttäjien kanssa, jotta polttoaineseoksesta saataisiin mahdollisimman hyvä. Laitoksella puutetaan matalalla kynnyksellä polttoaineiden laatupoikkeamiin ja esimerkiksi uusille kuljettajille opetetaan laadukas näytteenotto henkilökohtaisesti.

Jos polttoaineessa on paljon kosteutta, se voi johtaa palamisen epätäydellisyyteen. Esimerkiksi kuvassa 4 tämä tarkoittaisi sitä, että vaakasuuralla kuvaajalla syttymisen piste siirtyisi enemmän oikealle, koska kosteuden haihduttamiseen menisi suurempi osa polttoaineen kuiva-aineen lämpösisällöstä. Samalla nouseva kuvaaja laskisi, eli ei saavutettaisi yhtä korkeaa palamislämpötilaa jäänhöhiilen palamisvaiheessa. Mikä johtaisi lopulta siihen, että palamattomia alkaisi kertyä leijukerrokseen.

Yhteenvetona polttoaineista voisi todeta, että moniin laitoksen polttoaineongelmiin on löydetty jo ratkaisuja. Lämmityskauden polttoaine on ollut laadultaan pääsääntöisesti hyvää. Polttoaineiden laadun seuranta on tärkeä osa laitoksen toimintaa ja laatu poikkeamiin on hyvä reagoida ajoissa ongelmien välttämiseksi. Lämmityskauden aikana kosteimman hakekuorman kosteuspitoisuus oli 66,6 %, tätä kattila ei varmaankaan kestäisi yksistään ilman, että se sekoitetaan kuivempaan polttoaineeseen.

Lämmityskaudelle on otettu käyttöön järjestelmä, jossa starttipoltin aktivoituu automaattisesti, kun petilämpötila laskee tietyn tason alle. Tämä on vähentänyt päivystyskäyntien tarvetta laitoksella ja estänyt kattilan lämpötilan liiallista laskua ongelmatilanteissa. Vaikka kevytöljyn kulutus on saattanut kasvaa, sen vaikutusta kokonaiskustannuksiin on vaikea arvioida, sillä automaattinen käynnistys on myös vähentänyt kattilan uudelleenkäynnistykseen liittyviä kustannuksia ja lyhentänyt tuotantokatkoksia.

Kevytöljyn käyttö ei vaikuta taloudellisesti kannattavalta ratkaisulta. Päätelmän olisi voinut jo tehdä myös kevytöljyn hintaa katsomalla. Öljynkulutuksen seurannan vuoksi saatiin kuitenkin myös hyvä yhteenveto laitoksen ongelmatilanteista ja niiden määristä. Isoin syy laitoksen haasteisiin ovat kuljetin ongelmat, molemmilla kattiloilla on yhteinen kuljetin järjestelmä, joten ongelmat näkyvät heti öljyn kulutuksena. Toiseksi suurimpana voitaisiin nostaa ongelmat petihiekassa, jota usein alettu vaihtamaan vasta sitten, petilämmöt alkavat roikkumaan tai kun kattila on tullut jo alas tuotannosta.

Jatkotutkimuksena voisi olla hyödyllistä suorittaa tehostettua seurantaä esimerkiksi erittäin matalan ulkolämpötilan aikana, jotta saataisiin tarkempaa tietoa laitoksen toiminnasta ääriolosuhteissa. Tämä auttaisi arvioimaan mahdollisia ongelmia ja kehittämään järjestelmän toimintavarmuutta kylmissä sääolosuhteissa. Kun vikaantuneet laitteet on korjattu, uudella ajokokeella voisi myös varmistaa, että kaikki toimii kuten pitää. Myös jatkossa polttoaineseoksen kosteuden seurantaä ruuvilta voisi tehdä niissä tilanteissa, kun epäillään polttoaineen kosteuden olevan ongelmien juurisyy.

## 6.1 Oma oppiminen

Laaja teoriaosuuden käsittely auttoi ymmärtämään asioita paremmin. Kerrosleijukattila, biopolttoaineiden ominaisuudet tai palamisprosessi ei ennen opinnäytetyötä ollut tässä laajuudessa tuttua. Asiakokonaisuuden saaminen ymmärrettävään muotoon vaati paljon työtä, ja teoriaosuuden tekeminen vei myös aikaa. Toivon, että teoriaosuudesta voisi olla jatkossa hyötyä myös muille.

Teoria ja käytäntö täydensivät toisiaan, ja tämä yhdistelmä syvensi ymmärrystäni kattilan toiminnasta. Teoriapohja auttoi ymmärtämään kattilan peruseräatteen, mutta laitoksella työskentely antoi mahdollisuuden tarkistaa ymmärrystäni ja keskustella käyttäjien kanssa siitä, miten teoria näkyy käytännössä. Tämä syvensi tietämystäni kattilan toiminnasta.

Teoriaosuus koottiin alan kirjallisuudesta ja kuvat piirrettiin vastaamaan käsiteltävää kattilaa. Halu oppia käsiteltävästä kattilasta enemmän, ajoi piirtämään kuvat itse. Teoriaosuutta kirjoittaessa, huomasi nopeasti, etteivät kirjallisuudesta löytämäni kuvat vastaa laitoksen järjestelmiä. Mielestäni tämä johti epä johdonmukaisuuksiin tekstissä, joten päädyin piirtämään kuvat itse. Samalla opin kyseisestä laitoksesta paljon enemmän ja teoretiedon sisäistäminen syveni.

Opinnäytetyö olisi voinut olla alkuvaiheessa tarkemmin rajattu, mutta lopulta oli hyödyllistä, ettei sitä tiivistetty liikaa. Laaja teoriaosuuden käsittely auttoi saamaan syvällisemmän ymmärryksen kerrosleijukattilan toiminnasta verrattuna siihen, mitä olisin pelkästään työelämässä ehkä oppinut. Aihe oli erittäin mielenkiintoinen ja antoi mahdollisuuden syventyä tarkemmin leijukerroskattilan, biopolttoaineiden ja palamisen teknisiin yksityiskohtiin. Vaikka tutkittavaa oli paljon, myös opittavaa riitti, ja tämä kokemus avasi uusia näkökulmia kaukolämpölaitoksen toimintaan.

Pudotustorvien vertailu toi paljon hyviä asioita, vaikka ei varsinaisessa laajuudessaan päätyntykään opinnäytetyöhön. Vertailujen ansiosta sain arvokasta kokemusta suljetuissa tiloissa työskentelystä ja näin useiden eri kattiloiden sisäisiä rakenteita. Opin myös paljon pudotustorvien toiminnasta ja suunnittelusta. Lisäksi vierailut eri laitoksissa toivat vaihtelua työpäiviin, mahdollistivat uusien ihmisten tapaamisen ja antoivat näkemyksiä eri laitosten käytännöistä.

Ajokokeiden suunnittelu ja toteutus olivat sekä mielenkiintoinen että palkitseva kokemus, ja olen kiitollinen siitä, että kokeet voitiin järjestää laitoksella. Tämä kokemus syvensi ymmärrystä kattilan toiminnasta käytännössä. Laitoksen henkilökunnan asiantunteva ja ammattitaitoinen panos oli korvaamaton kokeiden sujumuuden kannalta. Olen myös oppinut paljon eri kaukolämpölaitoksen prosessivaiheista ja haasteista, joita ei aina pysty täysin oppimaan pelkästään teoriaa lukemalla.

Välillä mietin itsekin, miten sain tämän työn valmiiksi, sillä matkan varrella kohtasin raskaita hetkiä, kuten työkaverin menehtymisen ja sen, että jouduin työskentelemään pitkään erossa kodista ja läheisistä. Myös omat terveysongelmat vaikuttivat jaksamiseen. Kokemukset toivat mukanaan suuria haasteita, mutta opettivat samalla paljon itsestäni – erityisesti siitä, kuinka tärkeää on huolehtia palautumisesta ja tunnistaa omat rajansa. Ne osoittivat, kuinka sitkeä lopulta olenkaan.

Laitoksen henkilökunnan asiantuntemus ja omistautuminen työhönsä tekivät suuren vaikutuksen, ja arvostan suuresti kaikkea saamaani tukea opinnäytetyöni aikana. Olen saanut vahvistusta siitä, että työskentelen oikealla alalla, mikä lisää varmuuttani jatkaa tällä urapolulla.

## LÄHTEET

Työssä on käytetty tekoälyä seuraavasti: ChatGPT 2024. OpenAI. GPT-3.5. Käytetty kielentarkistukseen, huhtikuu 2025. <https://chat.openai.com>

Adven Oy, 2025. GWeb, yrityksen sisäinen materiaali. [Online]  
[Haettu 1 huhtikuu 2025].

Adven Oy, 2025. Kuvakaappaus automatiikasta, yrityksen sisäinen materiaali, Vantaa: s.n.

Adven Oy, 2025. M-Scales, yrityksen sisäinen materiaali. [Online]  
Available at: <https://www.mscales.com/>  
[Haettu 15 maaliskuu 2025].

Adven, 2024. Adven tietoa meistä. [Online]  
Available at: <https://adven.com/fi/tietoa-meista/>  
[Haettu 3 helmikuu 2025].

Ahokas, J., Ståhlberg, P. & Ilkka, M., 1983. Olki polttoaineena, tutkimusselostus no 30., Vihti: Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos.

Alakangas, E., 1992. Taloustulisijojen käyttö, Rakennuskirja. s.l.:Rakennustieto.

Alakangas, E., Hurskanen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J., 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, Jyväskylä: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.

Alakangas, E. & Impola, R. e. a., 2020. Puupolttoaineiden laatuohje (VTT-M-07608-13), Helsinki: VTT.

Basu, P., 2006. Combustion and gasification in fluidilized beds. Boca Raton: Taylor & Francis Group.

Bioenergianeuvoja, 2025. [www.bioenergianeuvoja.fi](http://www.bioenergianeuvoja.fi). [Online]  
Available at: <https://www.bioenergianeuvoja.fi/faktaa/taydellinen-palaminen/>  
[Haettu 18 maaliskuu 2025].

Engström, F., 2017. Fluidized bed boilers - A Finnish world success., s.l.: Tekes.

GFE-Energy, 2013. Käyttöohje I, Adven Sastamala, Höyrykattila 9,5 MW. Sisäinen julkaisu. Tampere: s.n.

He, H., 2015. Layer Formation on Quartz Particles during Fluidized Bed Combustion and Gasification. Lisensiaatin tutkielma.. [Online]  
Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:999044/FULLTEXT01.pdf>  
[Haettu 7 maaliskuu 2025].

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H., 2004. Höyrykattilatekniikka. 6. muuttamaton painos toim. Helsinki: Edita Prima Oy.

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S., 2013. Voimalaitostekniikka. 2. tarkistettu painot toim. Tampere: Opetushallitus.

Jalovaara, J., Aho, J. & Hietämäki, E., 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50MW polttolaitoksissa Suomessa, Vammala: Suomen ympäristökeskus.

Koskelainen, L., Saarela, L., Sipilä, K. & Nuorkivi, A., 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiategollisuus ry.

- Lekner, B., 2022. Hundred years of fluidization for the conversion of solid fuels. Powder technology, Article 117935(411).
- Mangs, J. & Keski-Rahkonen, O., 1997. Palonsyyn selvittäimen 1, oppikirja osa 1., Espoo: VTT.
- Matilainen, J., 2015. Diplomityö: Kiinteän polttoaineen lämpölaitoksen yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotannon mallintaminen. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.
- Metsälehti, 2022. Hakkeen laatuun kannattaa panostaa. [Online]  
Available at: <https://www.metsalehti.fi/artikkelit/hakkeen-laatuun-kannattaa-panostaa/#563b3bad>  
[Haettu 4 helmikuu 2025].
- Raiko, R., Kirvelä, K. & Tolvanen, H. P. A., 2008. Energiatekniikan perusteet, luentomoniste. s.l.:Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikan laitos.
- Raiko, R. t. ym., 2002. Poltto ja palaminen. Toinen täydennetty painos toim. Jyväskylä: International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto.
- Ready Solutions, 2024. Mitä on aikasarja-analyysi ja ennustaminen?. [Online]  
Available at: <https://readysolutions.fi/mita-on-aikasarja-analyysi-ennustaminen/>  
[Haettu 7 huhtikuu 2025].
- Sansaniwal, S., Pal, K., Rosen, M. & Tyagi, S., 2017. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. Renewable & sustainable energy reviews , Issue vol.72, pp. 363-384.
- SFS 18134-2, 2024. Solid biofuels. Determination of moisture content. Part 2: Simplified method. Helsinki: SFS Suomen Standardit ry.
- SFS 18135, 2017. Kiinteät biopolttoaineet. Näytteenotto. Helsinki: SFS Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Tilastokeskus, 2024. Polttoaineluokitus. [Online]  
Available at: [https://stat.fi/media/uploads/tup/khkinv/polttoaineluokitus\\_2024\\_maaritelmat.pdf](https://stat.fi/media/uploads/tup/khkinv/polttoaineluokitus_2024_maaritelmat.pdf)  
[Haettu 14 tammikuu 2025].
- Vakkilainen, E. K., 2017. Steam generation from biomass : Konstruktion and desing of large boilers. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.
- Vesanto, P., 2006. Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä. [Online]  
Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/14927315.pdf>  
[Haettu 13 maaliskuu 2025].
- Virtaharju, E., 2025. Kosteusnäytteisiin liittyvät kuvat 17.3.2025. [Kuvat].
- Wihlborg, A., 2021. Energinyheter. [Online]  
Available at: <https://www.energinyheter.se/20211015/25026/sammanslagning-av-adven-och-varmevarden-ska-starka-bolagets-position-inom-fjarrvarme>  
[Haettu 3 helmikuu 2025].

## LIITE 1: PUDOTUSTORVIEN VERTAILU

LUOTTAMUKSELLINEN

## LIITE 2: HAKKEEN KOSTEUDEN MÄÄRITTÄMINEN

Hakkeen kosteus määritettiin käyttämällä (SFS 18134-2, 2024, p. 7) yksinkertaistettua uunikuivausmenetelmää ja näytteidenotto nojasi näytteenottostandardin (SFS 18135, 2017).

Kosteus ( $M_{ar}$ ) lasketaan märkäpainosta kaavalla

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100, \text{ missä} \quad (1)$$

- $M_{ar}$  on kosteus saapumistilassa, p-%
- $m_1$  on tyhjän kuivausastian paino, g
- $m_2$  on kuivausastian ja näytteen yhteispaino ennen kuivausta, g
- $m_3$  on kuivausastian ja näytteen yhteispaino kuivauksen jälkeen, g

Näytteen pienentäminen tehdään näytteenkäsittelystandardin mukaan. Ensin näyte pienennetään ja periaatteena siinä on, näytteen on säilytettävä alkuperäinen koostumuksensa ilman muutoksia. Punnitseminen aloitetaan punnitsemalla ensin tyhjä kuivausastia ( $m_1$ ). Sen jälkeen näyte sekoitetaan ja punnitaan samassa astiassa vaa'alla, jonka tarkkuus on 0,1 g, toimitaan ripeästi, jotta kuivumista ei pääse tässä vaiheessa tapahtumaan. (Alakangas, et al., 2016, p. 24–25.)

Kosteusmääritys standardin mukaan kosteusnäytteen koko on oltava 300 g, sahanpurulle riittää 200 g näytettä. On huomioitava, että näytettä on ohut kerros ja palakoko on maksimissaan 31,5 mm. Jos kosteutta on tiivistynyt näytepussin seinämiin, se hierotaan takaisin näytteeseen (Alakangas, et al., 2016, p. 25.)

Näytteen kuivaamiseen käytetään lämpökaappia. Lämpökaapin lämpötila on  $(105 \pm 2)$  °C ja on varmistettava, että kosteus pääsee poistumaan kaapista eikä siellä ole samaan aikaan eri aikaan kuivumaan laitettuja näytteitä. Näyte siirretään lämpökaappiin välittömästi ( $m_2$ ) punnituksen jälkeen huolellisesti, jotta näytettä ei tipu pois astiasta. Näyteastiat eivät saa koskea toisiinsa tai esimerkiksi kaapin seiniin tai pohjaan. Näytettä kuivataan yleensä noin 16 tuntia, kunnes sen paino vakiintuu eikä enää muutu, mutta maksimikuivausaika on 24 tuntia. (Alakangas, et al., 2016, p. 26.)

Näyte punnitaan heti, kun se on otettu lämpökaapista ( $m_3$ ). Punnitus tulee suorittaa nopeasti (10–15 s), jotta huoneilman kosteus ei ehdi imeytyä näytteeseen. Tämän jälkeen kosteus lasketaan kaavalla (1). (Alakangas, et al., 2016, p. 26.) Alla kuvat lämpökaapista, näytteestä sekä ajokokeiden aikaisesta näytteenotto paikasta.



Kuva 1. Lämpökaappi (Virtaharju, 2025)



Kuva 2. Kolmannen ajokokeen yksi näyte (Virtaharju, 2025)



Kuva 3. Ajokokeiden näytteenottoaika (Virtaharju, 2025)

## LIITE 3: OTE OHJEESTA POLTTOAINEEN KULJETTAJALLE

## Näytteenotto

Näytteenotto biopolttoaineesta perustuu puupolttoaineen laatuohjeeseen 2013 (päivitetty 2020) (VTT-M-07608-13). Sekä standardiin (SFS-EN ISO 18135 :2017).

Polttoainenäytteet otetaan jatkuvasta polttoainevirrasta kuorman purun yhteydessä purkutapahtumaan soveltuvalla näytteenottokauhalla. Yksittäisiä näytteitä tulee ottaa siten, että kukin näyte edustaa 20-25 m<sup>3</sup> hakemäärää.

Yksittäisiä näytteitä otetaan:

- alle 50 m<sup>3</sup> kuormista 2 kpl,
- 50 - 120 m<sup>3</sup> kuormista 4 kpl (2kpl vetoauto, 2 kpl perävaunu)
- yli 120 m<sup>3</sup> kuormista 6 kpl (2kpl vetoauto, 4 kpl perävaunu).

Yksittäisen **näytteen tilavuus** on oltava **vähintään 1 litra, mikäli:**

- Biopolttoaineen partikkelikoko on alle 60 mm.

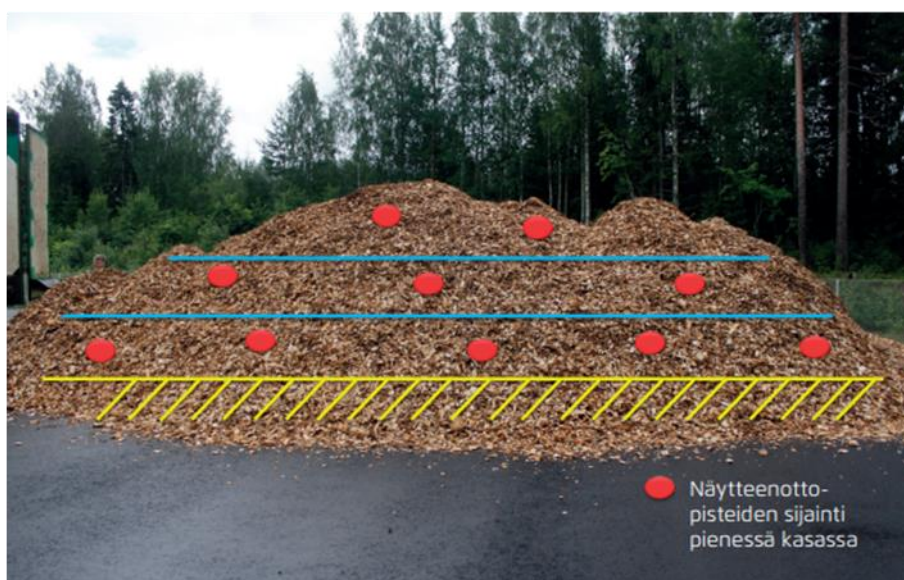
Yksittäisen **näytteen tilavuus** on oltava **vähintään 5 litraa, mikäli:**

- Biopolttoaineen palakoko on vähintään 60 mm.

Näytteet tulee ottaa tasaisesti koko polttoainevirran matkalta siten, että ne kuvaavat mahdollisimman tarkasti toimitetun polttoaine-erän laadun keskiarvoa.

Tai

Kasasta yksittäisnäytteet otetaan tasaisesti useasta kohdasta 20 cm pinnan alta. Huom! Mahdollisimman edustavan näytteen saamiseksi on ehdottoman tärkeää, että näyte otetaan useammasta eri kohdasta. Näytteiden ottoa on vältettävä myös aivan kasan pohja- ja reunaosista.



Kuva 1 Näytteenottopisteiden sijainti pienessä polttoainekasassa. Kuva Haklog Ky

## LIITE 4: AJOKOKEIDEN KOSTEUSNÄYTTEET JA MITTAUSTULOKSET

19.2.2025 Aika	Astian tyhjäpaino (g)	Paino ennen kuivausta (g)	Paino kuivauksen jälkeen (g)	Kosteus %
8:30	9,33	320,53	161,32	51,2
9:30	9,34	357,74	191,40	47,7
10:30	9,99	335,00	178,01	48,3
			Keskiarvo	49,1

20.2.2025 Aika	Astian tyhjäpaino (g)	Paino ennen kuivausta (g)	Paino kuivauksen jälkeen (g)	Kosteus %
8:00	9,37	366,76	192,03	48,9

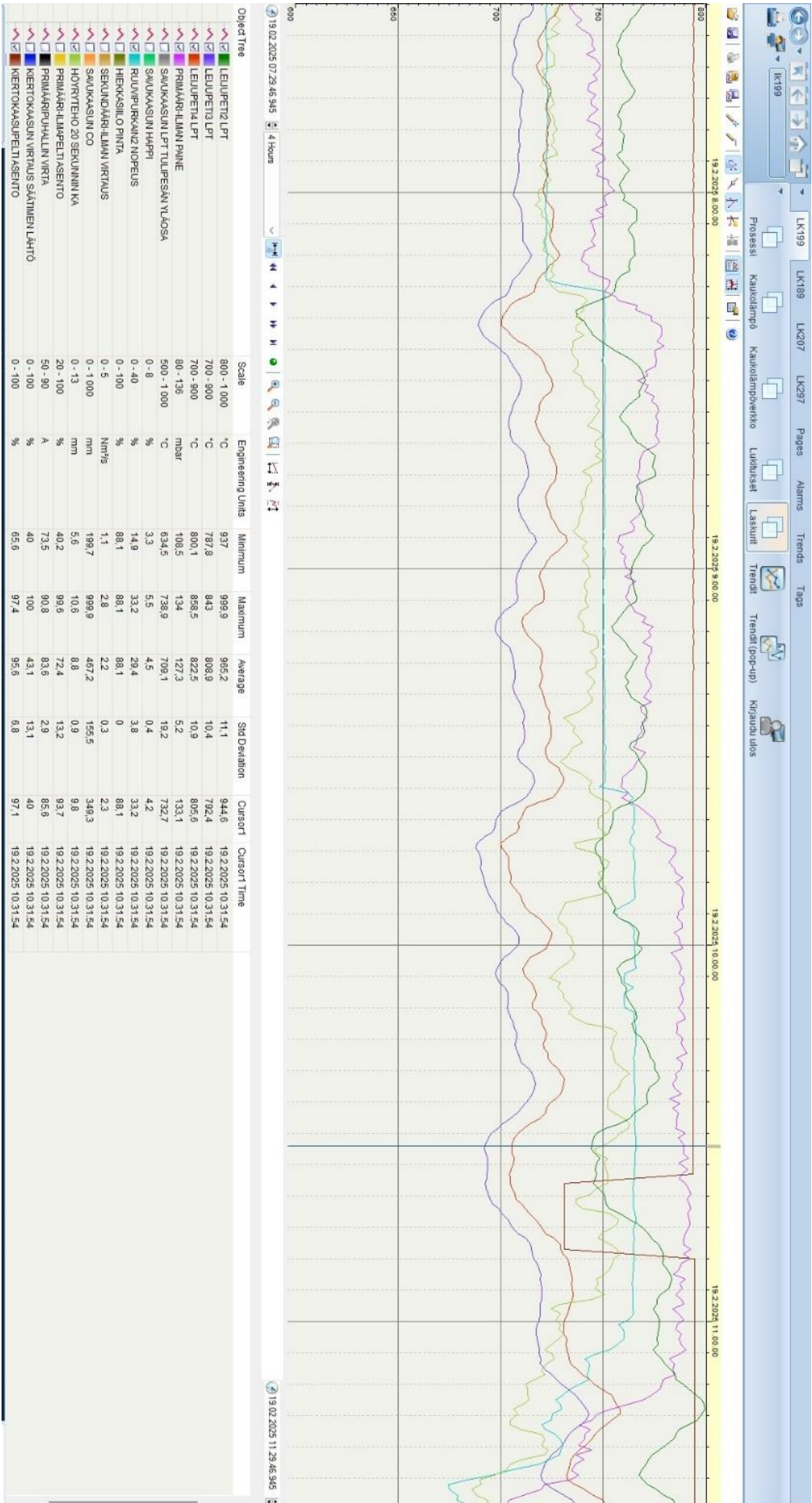
17.3.2025 Aika	Astian tyhjäpaino (g)	Paino ennen kuivausta (g)	Paino kuivauksen jälkeen (g)	Kosteus %
7:15	9,32	342,34	178,13	49,3
	9,36	331,65	170,23	50,1
8:15	9,44	333,22	167,88	51,1
	9,42	327,16	162,85	51,7
9:15	9,34	336,16	163,10	53,0
	9,29	331,94	156,84	54,3
			Keskiarvo	51,6

17.3.2025 Kokooma- näyte	Astian tyhjäpaino (g)	Paino ennen kuivausta (g)	Paino kuivauksen jälkeen (g)	Kosteus %
1	9,30	373,21	187,44	51,0
2	9,30	340,38	176,25	49,6
			Keskiarvo	50,3

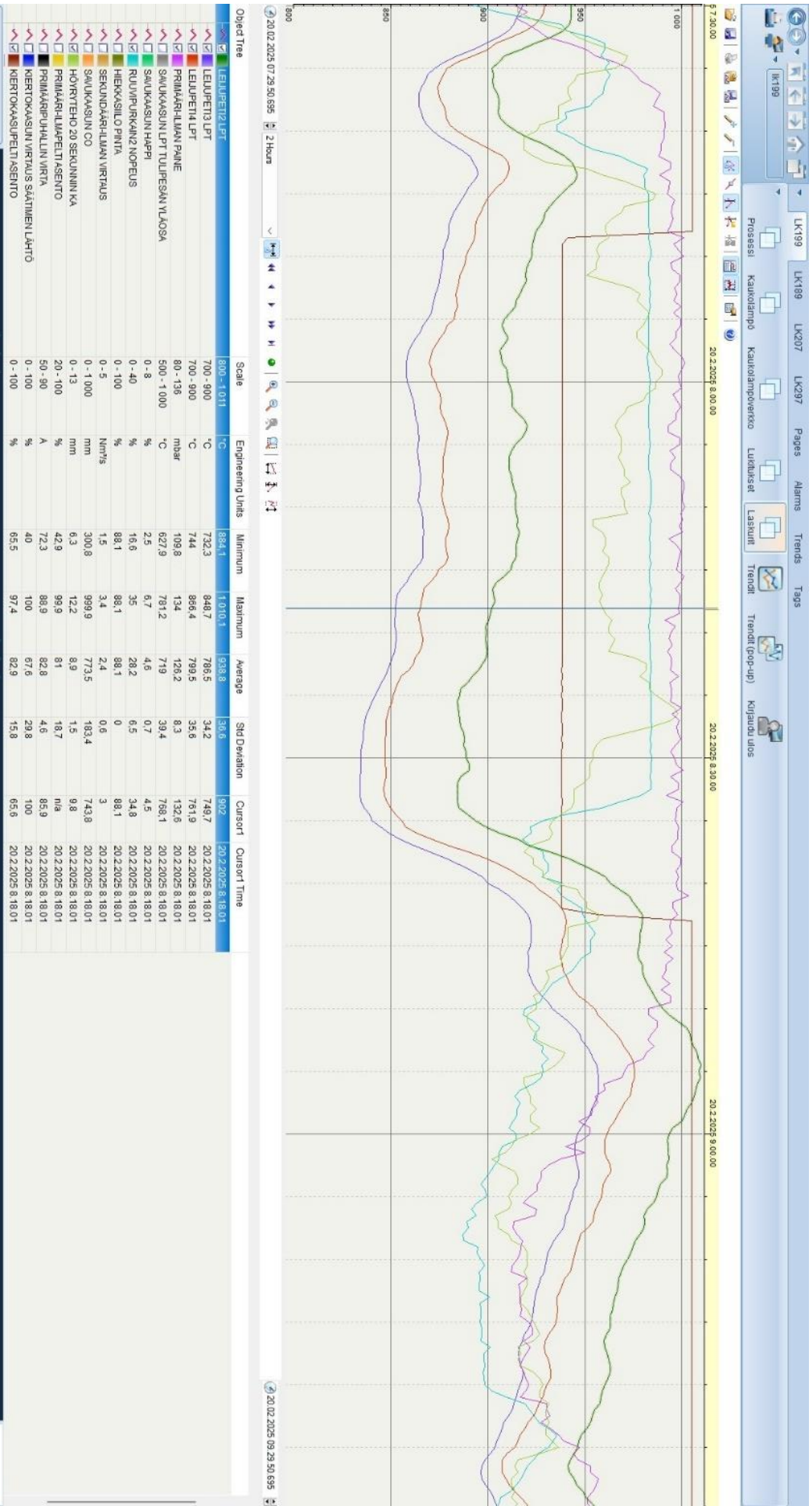
LIITE 5: 17.3.2025 AJOKOKEEN KULKU

LUOTTAMUKSELLINEN

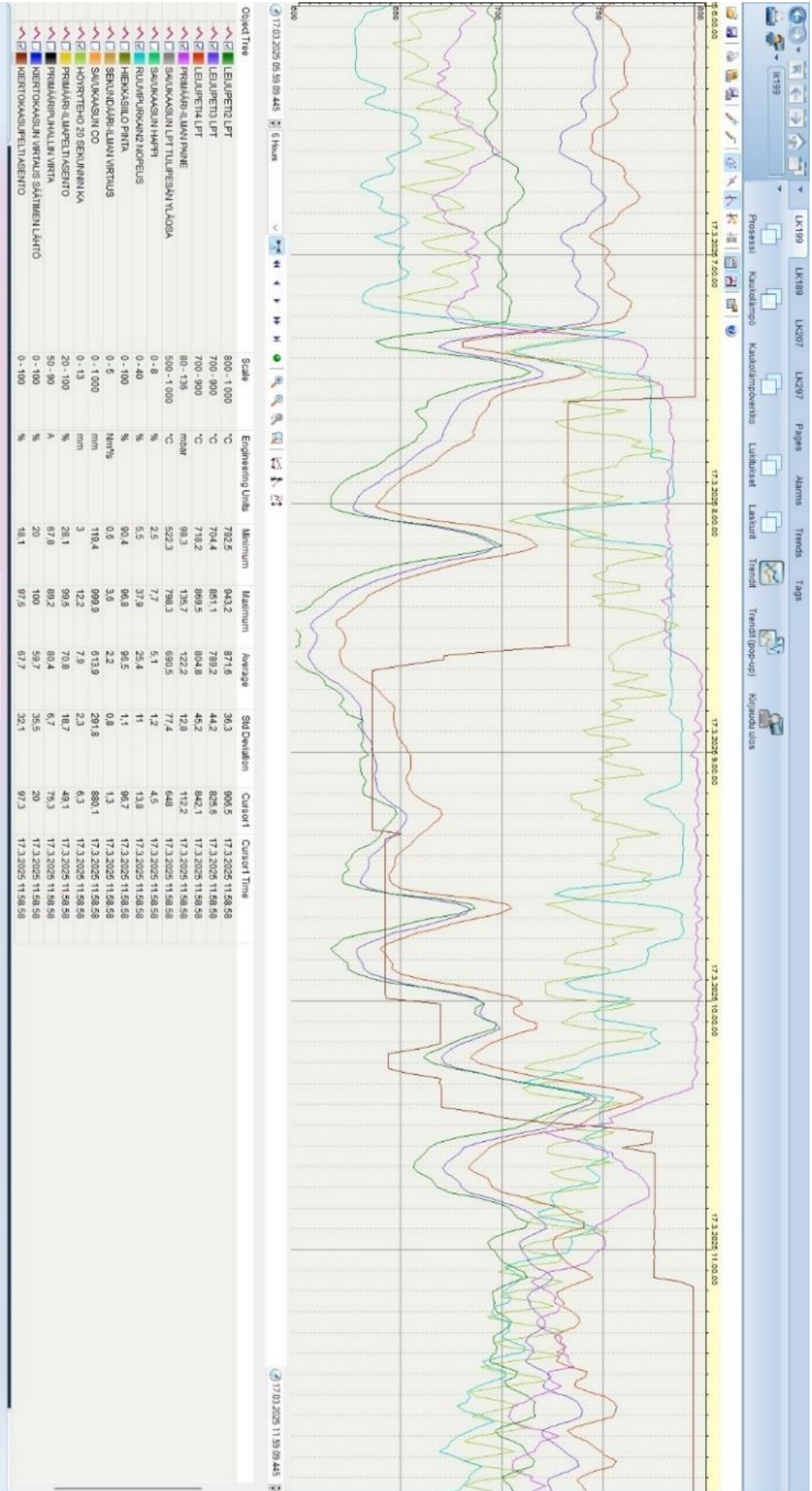
LIITE 6: AJOKOE TRENDIT



Kuva 1. Trendi ajokokeesta 19.2.2025



Kuva 2. Trendi ajokokeesta 20.2.2025



Kuva 3. Trendi ajokokeesta 17.3.2025

LIITE 7: ÖLJYNKULUTUS

LUOTTAMUKSELLINEN

## LIITE 8: PRIMÄÄRIPUHALTIMEN TIEDOT

Taulukko 1. Primääripuhaltimen tiedot (GFE-Energy, 2013)

FE 1001 N primääri-ilmapuhallin				
Kapasiteetti	2,29 Nm <sup>3</sup> /s	(DIN -0°C) (98 %)	Nopeus	50,87 m/s
Staattinen paine	14465 Pa	0,996 kg/m <sup>3</sup>	Pyörimisnopeus	2960 rpm
Dynaaminen paine	1312 Pa	0,996 kg/m <sup>3</sup>	Kokonaishyötysuhde	81 %
Kokonais paine	15778 Pa	0,996 kg/m <sup>3</sup>	Staattinen hyötysuhde	74 %
Kokonais paine	19007 Pa	1,2 kg/m <sup>3</sup>	Asennustapa	4
Absorboitunut teho	54 kW	1,2 kg/m <sup>3</sup>	Hitausmomentti (PD2)	8,5 (J) kgm <sup>2</sup>
Asennettu teho	45 kW	(D225M 2 pole)	Aksiaalivoima	912 N
Absorboitunut teho	44,8 kW	0,996 kg/m <sup>3</sup>	Poistotyöntövoima	767 N

Taulukko 2. Primääripuhaltimen mitoituspisteet (GFE-Energy, 2013)

Mitoituspisteet	
Lämpötila	80 °C
Korkeus	0 m
Tiheys	0,996 kg/m <sup>3</sup>
Kapasiteetti	1,80 Nm <sup>3</sup> /s (DIN - 0°C)
Paine	15000 Pa Staattinen poistopaine



LIITE 9: SAVUKAASULASKENTA

LUOTTAMUKSELLINEN

LIITE 10: AJOKOKEIDEN TULOKSET

LUOTTAMUKSELLINEN

LIITE 11: HIEKANKULUTUS

LUOTTAMUKSELLINEN