

AUTOMAATTISEN ALIPAINESÄÄDÖN VAIKUTUS BIOMASSAKATTILOIDEN  
HYÖTYSUHTEESEEN

Roni Viitala

Maisterintutkielma

Agroteknologia

Helsingin yliopisto

Maataloustieteiden osasto

Toukokuu 2025

# TIIVISTELMÄ

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty		Osasto — Sektion — Department	
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Maataloustieteiden osasto	
Tekijä — Författare — Author			
Roni Viitala			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Automaattisen alipainesäädön vaikutus biomassakattiloiden hyötysuhteeseen			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Agroteknologia			
Työn laji — Arbetets art — Level	Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages	
Maisterintutkielma	Toukokuu 2025	37	
Tiivistelmä – Referent - Abstract			
<p>Tutkimuksessa tarkasteltiin automaattisen alipainesäädön vaikutusta maatilakäyttöön tarkoitetun hakekattilan energiatehokkuuteen. Biomassaa, erityisesti puuhaketta, käytetään maataloudessa laajasti uusiutuvana lämmönlähteenä esimerkiksi rakennusten, käyttöveden ja viljankuivauksen yhteydessä. Energiatehokkuus on sekä taloudellisesti että ympäristöllisesti keskeinen tekijä, ja kattilajärjestelmien optimoinnilla voidaan vähentää polttoaineen kulutusta, pienentää päästöjä ja parantaa koko energiaketjun hallintaa. Erityisesti savukaasupuhaltimen toiminta vaikuttaa suoraan palamisen tasaisuuteen ja lämmön talteenoton tehokkuuteen.</p> <p>Työssä vertailtiin kahta erilaista savukaasuimurin säätötapaa: perinteistä vakionopeudella toimivaa puhallinta sekä automaattista alipainesäätöä, joka säätelee puhaltimen nopeutta kattilan sisäisen paineen mukaan. Kokeet suoritettiin maatilaympäristössä 240 kW:n tehoisella hakekattilalla. Mittauksissa tarkasteltiin hakkeen kulutusta ja savukaasun lämpötilaa kolmella eri tehoalueella (100 %, 50 %, 30 %) sekä alipainesäädön ollessa päällä ja pois käytöstä. Lämmityskokeet toteutettiin vakioituissa olosuhteissa, ja hakkeen kosteudeksi analysoitiin keskimäärin 27,1 % uunikuivausmenetelmällä tulosten luotettavuuden varmistamiseksi.</p> <p>Tulokset osoittivat, että automaattinen alipainesäätö toi merkittävää energiansäästöä erityisesti osateholla. 30 % teholla saavutettiin keskimäärin 20,8 % pienempi polttoaineenkulutus, ja 50 % teholla säästö oli noin 6 %. Täydellä teholla ero säätötapojen välillä oli vähäinen. Lisäksi alipainesäädöllä savukaasujen lämpötila pysyi tasaisempana ja alhaisempana, mikä tehosti lämmön talteenottoa ja vähensi häviöitä. Vakionopeudella toimiva puhallin ei kykene reagoimaan muuttuvaan polttoaineen laatuun tai sääolosuhteisiin yhtä herkästi, mikä johtaa epätasaiseen palamiseen ja suurempaan kulutukseen.</p> <p>Johtopäätöksenä voidaan todeta, että automaattinen alipainesäätö parantaa selkeästi hakekattilan hyötysuhdetta etenkin osakuormituksessa, joka on maatilojen yleisin käyttötilanne suurimman osan vuodesta. Säätö mahdollistaa polttoainetalouden optimoinnin ja alentaa energiakustannuksia sekä pienentää kattilan ympäristövaikutuksia. Näin ollen automaattinen alipainesäätö on suositeltava parannus nykyaikaisiin maatilojen lämmitysjärjestelmiin, etenkin niissä kohteissa, joissa kattilan käyttö vaihtelee kausittain ja kuormitustasot muuttuvat.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
hakekattila, alipainesäätö, savukaasuimuri, biomassan poltto, energiatehokkuus, maatalouslämmitys			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Maataloustieteiden osasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			
Tutkielman ohjaaja: apulaisprofessori Antti Lajunen			

# ABSTRACT

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty		Osasto — Sektion — Department	
Faculty of Agriculture and Forestry		Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author			
Roni Viitala			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
The Effect of Automatic Draft Control on the Efficiency of Biomass Boilers			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Agrotechnology			
Työn laji — Arbetets art — Level	Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages	
M.Sc. Thesis	May 2025	37	
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>This study investigated the effect of automatic draft control on the energy efficiency of a wood chip boiler intended for farm-scale use. Biomass, particularly wood chips, is widely used in agriculture as a renewable heat source for buildings, domestic water, and grain drying. Energy efficiency is a key factor both economically and environmentally, and optimizing boiler systems can reduce fuel consumption, lower emissions, and improve the overall control efficiency of the energy process. The operation of the flue gas fan has a direct impact on combustion stability and heat recovery efficiency.</p> <p>Two different control methods for the flue gas extractor fan were compared: traditional fixed-speed operation and automatic draft (negative pressure) control, which adjusts fan speed based on the internal boiler pressure. The experiments were carried out on a 240-kW wood chip boiler in a farm environment. Measurements focused on wood chip consumption and flue gas temperature at three power levels (100%, 50%, and 30%), with and without draft control enabled. All heating tests were conducted under standardized conditions, and chip moisture content was measured using oven-drying (average 27.1%) to ensure data reliability.</p> <p>The results showed that automatic draft control significantly improved energy efficiency, especially under partial load conditions. At 30% power, wood chip consumption decreased by an average of 20.8%, and at 50% power, the reduction was about 6%. At full power, the difference between control modes was minimal. Draft control also resulted in more stable and lower flue gas temperatures, indicating more effective heat transfer and reduced energy losses. In contrast, the fixed-speed fan was unable to respond adequately to changes in fuel quality or external conditions, leading to less consistent combustion and increased consumption.</p> <p>In conclusion, automatic draft control clearly enhances boiler efficiency under partial loads—typical of most farm operating conditions throughout the year. This type of control enables optimization of fuel use, reduction of energy costs, and minimization of environmental impact. Therefore, automatic draft regulation is a highly recommended upgrade for modern agricultural heating systems, especially in installations where seasonal or fluctuating demand affects boiler operation.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
wood chip boiler, draft control, flue gas fan, energy efficiency, biomass combustion, agricultural heating			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Department of Agricultural Sciences			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			
Supervisor: Associate Professor Antti Lajunen			

# Sisällys

1	Johdanto	5
2	Maatalouskokoluokan hakekattiloiden energiatehokkuuden optimointi	6
2.1	Hakekattilat maataloudessa	6
2.1.1	Käyttökohteet	6
2.1.2	Asennustavat	8
2.1.3	Investointi	10
2.2	Hakekattiloiden toiminta	10
2.2.1	Pääosat ja rakenne	10
2.2.2	Automaatiikka	12
2.2.3	Kuljettimet	15
2.3	Palaminen	15
2.4	Energiatehokkuuden optimointi	16
2.4.1	Hakkeen laatu	16
2.4.2	Jäännöshapen määrä	18
2.4.3	Savukaasupuhaltimen toiminta	19
3	Työn tavoitteet	20
4	Aineisto ja menetelmät	20
4.1	Laitteisto	20
4.2	Järjestelmä	22
4.3	Mittaukset	23
5	Tulokset	27
6	Tulosten tarkastelu	31
7	Johtopäätökset	33
8	Lähteet	34

## 1 Johdanto

Maatalouden energiasektorilla on ollut meneillään jo pitkään muutos pois fossiilisista energialähteistä ja tälle muutokselle ei näy loppua. Fossiilisten polttoaineiden käyttö maatalousrakennusten lämmityksessä on ollut taannoin hyvin yleistä. Öljypolttimet ovat vaihtuneet hiljalleen bio- ja lämpöpumppupohjaisiin lämmitysjärjestelmiin, jotka ovat jo ottaneet valtasijan lämmitysjärjestelmissä. Fossiilisten energialähteiden hinnannousu on johtanut uusiutuvien energialähteiden laajempaan käyttöön niiden hintojen ollessa hyvin kilpailukykyisiä. Uusiutuvien polttoaineiden käyttö maataloudessa on kustannustehokasta, mutta myös ilmaston kannalta parempi vaihtoehto. Uusiutuvan energian käytön osuus vuonna 2020 maataloudessa oli kohonnut jo 45 % tasolle (Luonnonvarakeskus 2020).

Suomen pohjoisissa oloissa maatalous tarvitsee lämmitystä. Tyypillisiä esimerkkejä ovat rakennusten ja käyttöveden lämmitys sekä viljankuivaus. Suurten rakennusten ja veden lämmitys sekä viljankuivaus kuluttaa paljon energiaa ja siksi myös sen kustannus on merkittävässä roolissa maatalouden kulurakenteessa. Viljankuivaus on Suomen oloissa käytännössä lähes aina pakollista. Viljan kuivauksessa käytetään edelleen paljon öljypolttimella varustettuja kuivureita niiden yksinkertaisen ja edullisen tekniikan takia. Uusista kuivureista vain noin kolmasosa myydään uusiutuvalla energialla toimivalla lämmönlähteellä (Antti-Teollisuus 2024). Uusiutuvan energian lämmönlähteillä varustettujen laitteiden hankintaa vauhdittaa öljyn ajoittainen korkea hinta (Neste 2025).

Joillakin maatalouden aloilla merkittävästä energian hinnannoususta saattaa aiheutua suurta haittaa liiketoiminnan kannattavuuteen ja siksi energiankulutus sekä energiajärjestelmät tulisivat olla hyvin optimoituja. Laitteistojen käytön optimoinnilla voidaan saada aikaan merkittävää hyötyä energiankulutuksessa. Maatalouskokoluokan hakekattiloita, joilla lämmitetään pääosin rakennuksia ja käyttövettä, saatetaan mitoittaa yläkanttiin mahdollisen kausittaisen viljan kuivaukseen tarvittavan lisälämmitysmahdollisuuden takia. Hakepohjaiset lämpölaitosprojektit ovat maataloudessa usein hyvin yksilöllisiä ja parametreja säädetään kussakin kohteessa erikseen. Tämän takia onkin paljon tilaa tutkimukselle siitä, kuinka kokonaisuuden energiankulutuksen optimointi suoritetaan. Tässä tutkielmassa tutkitaan maatalouskokoluokan hakelämmityskattilan automaattisen alipainesäädön vaikutusta kattilan hyötysuhteeseen.

## 2 Maatalouskokoluokan hakekattiloiden energiatehokkuuden optimointi

### 2.1 Hakekattilat maataloudessa

#### 2.1.1 Käyttökohteet

Puuhake on hyvin yleinen vaihtoehto maatalouden energialähteenä Suomessa. Hakkeen polttoon ja siitä saatavan energian talteenottoon käytetään lämmityskattilaa. Kattilat ovat pääosin vesikiertoisia eli lämpö siirretään haluttuun kohteeseen veden välityksellä lämpökanaalia pitkin (Piri 2016). Lämpö johdetaan yleensä maataloudessa rakennusten ja käyttöveden lämmitykseen tai viljan kuivaukseen (Lindroos 2007). Viljan kuivauksessa tehokkaampana vaihtoehtona käytetään suoraan viljan kuivaukseen tehtyjä kattiloita, jotka toimivat suoraan kuivurin menoilman lämmittiminä ilman vettä lämmönvälittimenä (Antti-Teollisuus 2024). Huonona puolena tällaisissa ratkaisuihin on kattilan yksipuolinen hyödyntäminen ja käyttöaikakin jää vähäiseksi, koska puintaika on tyypillisesti noin kahden kuukauden mittainen ajanjakso. Tällaisen kattilan hankinta tilalle kuitenkin voi olla perusteltua, koska sen etuna on parempi kuivauslämmityksen hyötysuhde sekä tehokkuus. Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuvilla energialähteillä kuivauksessa ei itsessään paranna energiatehokkuutta, vaan muuttaa ensisijaisesti käytetyn lämmönlähteen uusiutuvaksi. Energiatehokkuuden taso määräytyy prosessin kokonaishyötysuhteen ja lämmön hyödyntämisen tehokkuuden perusteella, riippumatta siitä, käytetäänkö fossiilisia vai uusiutuvia polttoaineita (Ahokas ja Jokiniemi 2021.). Kun viljan kosteus on 19 %, hakkeen kulutus kuivauksessa 3500 kg/ha satotasolla on noin 0,8 m<sup>3</sup>/ha Ahokkaan ja Jokiniemen (2021) mukaan.

Yleisemmin tiloilla käytössä olevat vesikiertoiset kattilat lämmittävät ainoastaan rakennuksia ja käyttövettä. Lämpö vapautetaan rakennuksien lämmitykseen vesi – ilma lämmönvaihtimien tai lattialämpöputkien kautta. Lämmönvaihtimet voivat olla puhaltimella varustettuja tai vaihtoehtoisesti niissä voi olla paljon pinta-alaa, jolloin puhaltimia ei tarvita. Lattialämpöputket pitää olla asennettuna lattiaan jo rakennuksen rakennusvaiheessa, mutta jälkiasennuksenakin se onnistuu (Rakentaja.fi 2023). Helpompi tapa on kuitenkin asentaa olemassa olevaan rakennukseen lämmönvaihdin, koska sen asennustyö on hyvin yksinkertainen verrattuna lattialämpöputkien jälkiasennukseen betonilattiaan. Jälkiasennettaviin vesikiertoisiin lämmitysratkaisuihin voidaan päätyä, jos tilalla ei ole ennestään ollut hakekattilalämmitystä. Vesikiertoista hakelämmityskattilaa voidaan käyttää myös kuivurin menoilman lämmitykseen vesi – ilma lämmönvaihtimen kautta (Kuva 1). Lämmitysteho ei välttämättä riitä tällaisissa ratkaisuihin nostamaan kuivauslämpötilaa tarpeeksi korkeaksi, jolloin

hakelämpö toimii vain esilämmityksenä kuivurin omalle öljylämmitykselle (Lindroos 2007). Tarpeeksi suurella kattilalla ja lämmönvaihtimella on kuitenkin mahdollista saada kuivauslämpö riittävän korkeaksi.



Kuva 1. Vesi-ilma lämmönvaihdin viljankuivurin tuloilma-aukon edessä. (Kuva: Roni Viitala)

Maatalousrakennuksista eniten lämmitysenergiaa vaativat siipikarjan pitopaikat sekä sikalat (Ahokas 2013). Nautakarjarakennukset eivät tarvitse erillistä sisäilman lämmitystä, koska isot eläimet tuottavat itsessään paljon lämpöenergiaa. Lypsykarjatililla merkittävä energiakulutus muodostuu kuitenkin lypsylaitteiston lämpimän pesuveden tarpeen kautta. Mahdolliset maatilojen eristetyt lämpimät varastot ovat yleensä pinta-alaltaan suhteellisen suuria ja kuluttavat talven aikana paljon

lämpöenergiaa. Tilojen kaikki lämpimät rakennukset, joissa on lämmitysvalmius, voidaan kytkeä hakelämmityspiiriin ja siksi lämmityskeskus kannattaakin sijoittaa hyvin keskeiselle paikalle tilan pihapiiriin, jotta lämpökanaaliyhteyksien pituudet pysyisivät kohtuullisina. Jokainen lisämetri lämpökanaalissa hukkaa lämpöä, joten sijoittelu on monelta kantilta ajateltuna tärkeässä roolissa (Ojanen 2014).

### 2.1.2 Asennustavat

Lämmityskattiloiden asennukset voivat erota toisistaan hyvinkin paljon. Asennuspaikat vaihtelevat osaksi kattilan koon mukaan. Pienemmät kattilat sijoitetaan useammin olemassa olevan tai uudisrakennuksen sisään omaan palo-osastoonsa. Yli 30 kW lämmityskattilat on osastoitava sijoitettaessa niitä olemassa oleviin rakennuksiin (Sten 2017). Suuremmat lämmityskattilat ovat yleensä sijoitettu sille tarkoitettuun omaan yksikköön. Lämmityskattilat soveltuvat asennettavaksi suhteellisen joustavasti eri paikkoihin, kunhan tila voidaan eristää paloturvallisuusmääräysten (Ympäristöministeriö 1997) vaatimalla tavalla muista lähellä olevista rakennuksista ja vähimmäisetäisyys 8 metriä täytyy muihin rakennuksiin (Sten 2017). Asennus vaatii myös tilan polttoainevarastolle tai säiliölle. Säiliö tai varasto tulee olla eristetty kattilahuoneesta, jotta paloturvallisuus pysyy hyvällä tasolla. Lämmitysjärjestelmiä on rakennettu kivijalkapohjaisesti, mutta suuressa suosiossa on myös lämpökontit, jotka sisältävät kattilahuoneen ja hakesäiliön samassa paketissa, joka on siirrettävä kokonainen moduuli (Kuva 2). Lämpökontti sisältää lähes kaiken valmiiksi käyttöä varten. Lämpökonttiin voidaan asentaa tehtaalla sarjatyönä ohjauskeskukset, sähkö ja oheislaitteet, mikä tekee käyttöönotosta paljon helpompaa, koska maatilalla tarvitsee karkeasti ajatellen vain kytkeä konttiin lämmityspotket, sähkö ja lisätä haketta (Ala-Talkkari 2014).



Kuva 2. Lämpökontti. (Kuva: Heatfactory Oy)

Lämpökontissa on monia etuja, mutta silti kiinteitä lämmityskeskusrakennuksia tehdään edelleen maataloille. Kiinteässä rakennuksessa kattila voidaan joustavammin vaihtaa uuteen käyttöiän tullessa päähän tai lämmitystehontarpeen kasvun myötä. Kiinteän rakennuksen etuja on myös mahdollisuus suurempaan tilaan kattilahuoneessa sekä polttoaineensyöttövaraston puolella. Suuremmat tilat mahdollistavat tulevaisuudessa tehdä helpommin muutoksia järjestelmään kuten varaajan lisääminen, suurentaminen tai suuremman kattilan asentamisen tarpeen tullessa. Kiinteään lämpökeskusrakennukseen pystyy rakentamaan myös suuremman varastotilan polttoaineelle. Suurempi varastotila hakkeelle vaikuttaa merkittävästi maatalan jokaviikkoisiin rutiinitöihin. Suuremmalla polttoainevarastolla voidaan esimerkiksi vähentää hakkeenlisäykset neljästä kertaan viikossa kertaan kahdessa viikossa. Riippuen rakennusmateriaaleista, työn hinnasta ja rakennuksen tyypistä, kiinteän rakennuksen hinta voi kohota reilusti yli lämpökontin kustannuksien. Lämpökontin kokoonpanossa pystytään saamaan tehdasmaisesta kokoonpanosta etuja, toisin kuin kiinteän asennuksen työt joudutaan tekemään yksilöllisesti joka kohteeseen erikseen.

### 2.1.3 Investointi

Maatalouden mittapuussa pienimuotoinen lämmityslaitos on suuruudeltaan merkittävän kokoinen investointi. Maatalouden energiainvestointeja tuetaan rahallisesti merkittävällä osuudella. Investoinnin kokonaiskustannuksista 40 % osuudelta saa täyden tuen valtion ja Euroopan unionin rahoittamana. Investointituen kriteereinä on se, että laitteiston tulee pohjautua uusiutuviin energialähteisiin (Ruokavirasto 2024). Hakekattiloissa pystytään polttamaan lähes mitä tahansa uusiutuvaa biomassaa. Biomassan maksimaalinen palakoko määräytyy käytössä olevan kattilan vaatimusten mukaisesti. Esimerkkejä polttoon soveltuvista uusiutuvista energianlähteistä ovat energiapuu, hakkuutähteet ja kasvijätteet. Suomessa on paljon metsää, joten saatavuus yleisimmälle energialähteelle eli hakkeelle on hyvä. Hakkeena käytetään tyypillisesti ensiharvennuksesta saatavaa pieniläpimittaista energiapuuta sekä hakkuutähteitä, kuten oksia ja latvuksia. Maatiloilla voidaan kuitenkin hyödyntää lämmityksessä myös mahdolliset sivuvirrat, kuten esimerkiksi viljan lajittelujätteet.

Kattilan hankintaa pohtiessa erilaisia valmistajia on paljon ympäri maailmaa mutta myös suomalaisia valmistajia on muutamia. Toimintaperiaate eri valmistajien kattilatyyppeiden ja oheislaitteiden osalta on hyvin samantyyppinen kaikilla valmistajilla, vaikka pieniä eroavaisuuksia ominaisuuksissa ja toiminnassa löytyykin. Hankintana lämmityskattila on pitkäaikainen ratkaisu. Kattiloiden käyttöikä ilman suurempia korjauksia on yleensä 20–30 vuoden välillä (Lamb 2017).

## 2.2 Hakekattiloiden toiminta

### 2.2.1 Pääosat ja rakenne

Lämmityskattilassa hakkeen palaminen tapahtuu palopään sisällä, jonne hake saapuu varastosta kuljettimen kautta. Palopäähän on myös liitetty useita muita toimilaitteita, kuten sytytys, ensiöpuhallin, toisiopuhallin ja liikkuva tai kiinteä arina. Näillä toimilaitteilla hake saadaan sytytettyä, poltettua ja tuhka siirrettyä eteenpäin. Tuhka siirtyy palopäästä eteenpäin liikkuvan arinan työntämänä, jos palopäässä on liikkuva arina kuten kuvassa 3. Pienemmän kokoluokan laitteissa tuhkan poistoon käytetään ritilätyyppistä painovoimaista tuhkanpoistoa, joka on rakenteeltaan yksinkertaisempi. Ensiöpuhaltimen tarkoituksena on syöttää ensimmäisen palamisvaiheen ilmaa suoraan polttoaineen sekaan palopään alaosaan. Sen päätehtävä on varmistaa, että polttoaine syttyy

kunnolla ja palaminen alkaa tehokkaasti. Toisiopuhaltimen tarkoituksena on syöttää lisäilmaa palotilaan ylempään osaan, jossa kaasut palavat loppuun (Buchmayr ym. 2015). Sen tarkoituksena on parantaa kaasumaisten palokaasujen (CO, hiilivedyt) palamista, mikä parantaa hyötysuhdetta ja vähentää päästöjä. Ensiö- ja toisiopuhaltimien säädöt ovat keskeisessä roolissa kattilan toiminnan kannalta (Buchmayr ym. 2015). Maatilakokoluokan palopäissä sytytykseen käytetään erityyppisiä sähkövastuksiin pohjautuvia sytytysjärjestelmiä. Palopään ja kattilan runko on valmistettu yleensä teräksestä, mutta palotilassa keskisuurissa ja suurissa kattiloissa käytetään paremmin suoraa liekkialtistusta ja korkeita lämpötiloja kestäväää materiaalia. Palotilan sisävuoraus on kattilan mukaan toteutettu teräksestä, tiilestä tai tulen kestävästä betonista (Antonovič ym. 2017).



Kuva 3. Liikkuva porrasarina 240 kW kattilan palopäissä. (Kuva: Heatfactory Oy)

Lämmön talteenotto tapahtuu lämmityskattilassa, missä palokaasuista ja säteilylämmön kautta tuleva lämpö yritetään saada mahdollisimman hyvin siirrettyä veteen lämmönvaihdinpintojen kautta. Kattilan mitoituksessa suurempi lämmönvaihtopinta-ala parantaa hyötysuhdetta, mutta kaasujen virtausnopeus ei saa silti laskea liikaa lämmönvaihtokanavissa, jotta vältetään liialta savukaasun

jäähtymiseltä, mikä aiheuttaa kondenssiveden tiivistymistä kanaviin (Retschitzegger ym. 2015). Veden tiivistyminen kattilan sisäpinnoille aiheuttaa korroosiota, joka lyhentää kattilan käyttöikää merkittävästi, jos ongelma jatkuu pitkään. Kattilan lämmön talteenottopintojen tulisi pysyä mahdollisimman puhtaana, jotta hyötysuhde pysyisi mahdollisimman hyvänä (Macek ym. 2017). Pintoja täytyy ajoittain puhdistaa noesta ja tuhkaista. Edistyneissä kattiloissa on automaattinen nuohous, joka toimii paineilmalla tai mekaanisesti. Tällä tavalla pystytään pitämään lämmönvaihtopinnat puhtaana jatkuvasti, koska nuohousta voidaan tehdä päivittäin. Lämmityskattilan sisällä on merkittävä määrä lämpöä varaavaa vettä. Vesitilavuus vaihtelee kattiloiden mallien välillä mutta yleensä vesimäärä on 2–5 litraa per kW.

Savukaasut voidaan ohjata kattilasta ulos luonnollisen hormivedon kautta tai savukaasupuhaltimen avulla (Djurović ym. 2015). Luonnollista hormivetoa käytetään kuitenkin vain pienemmissä kattiloissa, koska tehokkaammissa kattiloissa voimakkaampi palamisprosessi vaatii paremman savukaasujen poiston. Koneellinen savukaasujen poisto varmistaa aina sen, että veto on aina oikeaan suuntaan. Ulkoiset tekijät kuten tuuli ja ilman kosteus vaikuttavat luonnollisen vedon toimivuuteen, joka tekee erilaisissa olosuhteissa kattilan palamistapahtumasta vaihtelevaa. Vaihteleva palamistapahtuma aiheuttaa kattilassa epätäydellistä palamista, mikä heikentää hyötysuhdetta. Savukaasupuhaltimen toimiessa oikein palaminen on hyvänlaatuista, mutta vikatilanteissa sen sammuminen kesken palamisen voi aiheuttaa esimerkiksi räjähdyksen, jos palamattomia kaasuja kertyy kattilan palotilaan (Di Sarli ym. 2014).

Puun palamisen yhteydessä syntyy aina tuhkaa. Kattiloissa automaattinen tuhkanpoisto on järjestelmä, joka löytyy jokaisesta keskisuuresta ja suuresta lämmityskattilasta. Tuhka siirtyy yleensä palopesän jälkeen kattilan pohja osaan, mistä ruuvikuljetin siirtää sen lopulliseen tuhka astiaan.

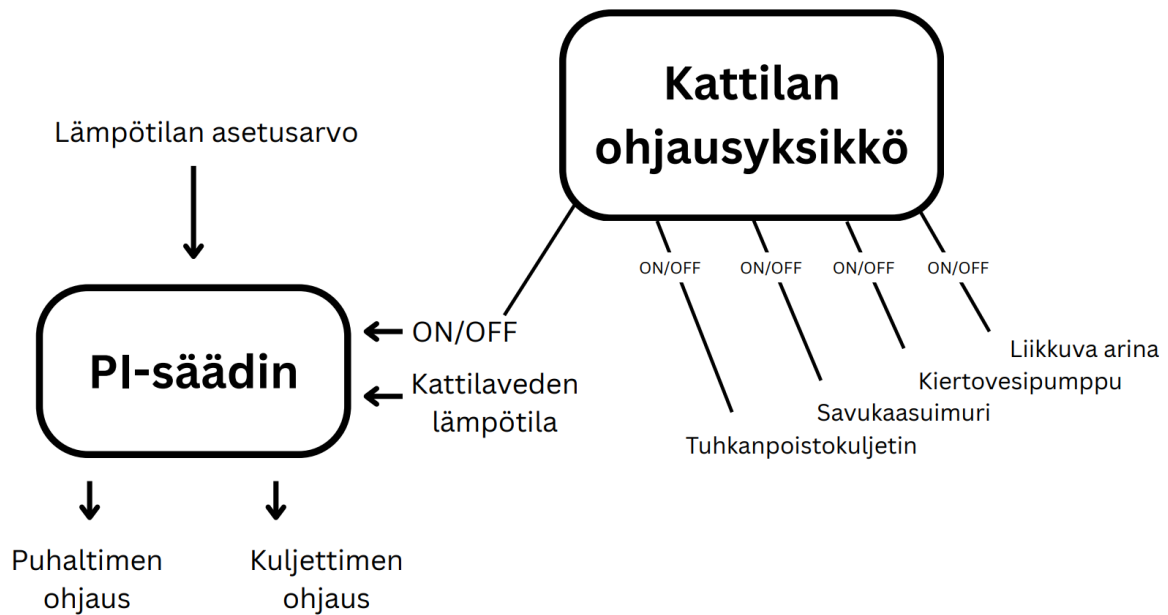
### 2.2.2 Automaatiikka

Uusiutuvan energian eli polttopuiden poltto on pohjautunut aiemminkin samantyyppisiin lämmityskattiloihin kuin nykyaikaiset hakekattilat. Hakekattilassa suurimpana erona manuaalisiin polttopuukattiloihin onkin polttoaineen automaattinen syöttö sekä palamisen hallinta. Hakekattilan automatiikan päätehtävät ovat hakkeen syöttö, lämmitystehon säätäminen, veden lämpötilan

mittaaminen ja tuhkan poisto (Kuva 4). Näillä automaattisilla toimilla kattilasta saadaan täysin itsestään toimiva laite, joka lämmittää piirissä kulkevaa vettä.

Hakkeen syöttömäärä määritetään automatiikassa kattilaveden lämpötilan mukaan PI-säätimen avulla. Lämpötila mitataan kattilan yläosasta eli lähtöyhteen läheisyydestä. PID-säätimen D eli derivoiva osa reagoi veden lämpötilan muutosnopeuteen, joka ei ole kattilaohjauksessa välttämätöntä, koska kattilan ja lämmönsiirtopintojen lämpötila muuttuu hitaasti, vaikka puuaines sytytetään tai sammutetaan (Gilman, 2010). Tällöin muutosnopeudet ovat alhaisia ja yliampuminen (*engl. overshoot*) ei ole ongelma. Veden kiehuminen kattilassa on tilanne, jota tulee välttää, koska se luo ylimääräistä painetta järjestelmään, joka voi rikkoa järjestelmän. Normaalisti automatiikka pystyy estämään tällaisten tilanteiden syntymisen, kun energian kulutus ei lopu yhtäkkiä.

Automatiikkaan kytketään yleensä useita erilaisia antureita, joiden avulla saadaan ohjausjärjestelmään paljon lisätietoa kattilan toiminnasta. Kattilan automatiikkaan tuodaan yleisimmin mittatietoa, kuten veden lähtö- ja tulolämpötila, jäännöshappiarvo, savukaasun lämpötila, ulkolämpötila ja syöttimen lämpötila (Biofire.fi 2025). Maatilakokoluokan kattiloissa useamman kuin yhden lämpötilamittausanturin käyttö mahdollistaa lämmöntalteenoton optimoinnin. Tämä saavutetaan hallitsemalla lämpötilaeroa meno- ja paluuv veden välillä pumpun kierrosnopeutta säätämällä. Kun lämpötilaero on optimaalinen, järjestelmä hyödyntää energiaa tehokkaammin ja vähentää energiankulutusta (Grassl 2017). Jäännöshappiarvon avulla automatiikkaan pystytään luomaan ohjaus, joka säätelee paloilmapuhaltimien nopeutta eli ilmamäärää, jota syötetään polttoon (Plaček ym. 2012). Tämä ohjaus ei ole kattilan toiminnan kannalta pakollinen mutta tuo lisää energiatehokkuutta toimintaan. Jäännöshappiarvon eli lambda-arvon mittaaminen vaatii yhden anturin savukaasukanavaan. Savukaasun lämpötila-anturin avulla voidaan arvioida lämmöntalteenoton tehokkuutta. Liian suuri savukaasun lämpötila kertoo suuresta energiahävikistä, joka poistuu savukaasun mukana ja liian pieni lämpötila kertoo siitä, että kosteus alkaa tiivistymään kattilan sisäpinnoille lämmönvaihdon loppupäässä aiheuttaen korroosiota pintamateriaaleille (Kovacs ym. 2018).



Kuva 4. Automatiikan toimintaperiaate.

Ulkolämpötilanmittauksen avulla kattilan ohjaus voi ennakoida lämmitettävien rakennusten lämmitystarvetta ja säätää polttoa tai tavoitelämpötilaa kattilassa. Tällaiset säädöt voivat lisätä energiatehokkuutta ja auttaa säästämään energiaa. Turvallisuuden lisäämiseksi kattilajärjestelmissä voi olla hakkeen syöttimessä lämpötila-anturi mahdollisen takapalon havaitsemiseksi (Pietikäinen ja Ruuskanen 2008). Takapalo tarkoittaa palopäästä väärään suuntaan etenevää paloa. Takapalo voi edetä todella vaaralliseen tilanteeseen, kuten koko hakemäärän syttymiseen, mitä on hakevarastossa. Tällaisten tilanteiden varalta anturin kuuluminen järjestelmään on hyvin perusteltua kaikkien kokoluokkien kattiloissa. Anturin turvarajan ylittyessä ohjaus pyrkii tyhjentämään viimeisen syöttimen palopesään, jotta polttoainetta palon etenemiseen ei olisi. Kattilan automaattisiin turvajärjestelmiin kuuluu myös viimeiseen syöttimeen kohdistettu vesilinja, joka aukeaa lämpötilan kohotessa tarpeeksi ylös, mutta vesilinjan laukaisu on toteutettu mekaanisesti varmuuden lisäämiseksi mahdollisten sähkökatkojen varalta (Pietikäinen ja Ruuskanen 2008).

Nykypäivän automatiikkaan kuuluu myös etäohjaus ja seuranta. Etäkäytön avulla kattilan parametreja pystytään muuttamaan netin välityksellä sovelluksen tai nettisivun kautta (Biofire.fi

2025). Tämä ominaisuus vähentää fyysisten käyntien määrää kattilahuoneella, mikä tekee kattilan käyttömukavuuteen paljon. Mahdolliset virheilmoitukset puhelimen kautta ovat heti nähtävillä ja tällöin käyttökatkoksia voidaan vähentää tai estää jopa kokonaan, koska tieto saadaan ajoissa.

### 2.2.3 Kuljettimet

Kuljettimien tarkoitus on siirtää haketta varastosta polttoon kattilan palopäähän. Yleisin kuljetintyyppi maatalouskokoluokan järjestelmissä on ruuvikuljetin (Pietikäinen ja Ruuskanen 2008). Hakkeen siirto toteutetaan kattilalle kahden eri ruuvin avulla. Toinen ruuveista on lyhyempi, joka tekee viimeisen hakkeen siirron palopäähän. Kahden ruuvin välissä on yleensä palokatko eli hake tippuu alas viimeisen ruuvin päähän. Tällä pystytään parantamaan laitteiston paloturvallisuutta, koska suora palamisyhteys katkaistaan. Tämän palokatkon välissä on usein vielä lisäksi lokerosyötin, joka tiputuksen lisäksi katkaisee fyysisesti ilmatilan kahdeksi eri tilaksi (Pietikäinen ja Ruuskanen 2008). Ruuvikuljettimien lisäksi on olemassa muitakin kuljetintyyppisiä, joita käytetään maatilakokoluokan hakekattiloiden syötinjärjestelmissä, mutta ne ovat Suomessa harvinaisia.

## 2.3 Palaminen

Hakekattilan toiminta perustuu puulastuiksi silputun puun polttamiseen. Puun palaminen on kemiallinen reaktio, jossa puu hapettuu palaessaan ja vapauttaa energiaa lämpönä. Lämpöä vapauttavaa reaktiota kutsutaan eksotermiseksi reaktioksi. Puun palamisen vaiheet alkavat sen lämpenemisestä, jolloin se alkaa kuivamaan ja haihduttamaan vettä vesihöyryinä. Pyrolyysi tapahtuu kuivamisen jälkeen riittävän korkeassa lämpötilassa, kun alkaa syntyä kaasumaisia yhdisteitä kuten hiilimonoksidia, metaania ja vetyä (Emmons ja Atreya 1982). Nämä yhdisteet reagoivat hapen kanssa ja muodostavat hiilidioksidia ja vettä, jolloin lämpöä vapautuu ja liekit alkavat fyysisesti näkyä. Hiiltynyt puu palaa ilman näkyvää liekkiä hehkumalla ja keskimäärin hieman kuumempina kuin puu ennen hiiltymistä (bioenergianeuvoja.fi 2025b). Kun hiili on palanut loppuun, jäljelle jää vain tuhkaa, joka sisältää mineraaleja, kuten kalsiumia, kaliumia ja magnesiumia.

Puun syttymislämpötila on noin 300 °C, jotta palaminen voi alkaa (Nussbaumer 1993). Puun palamislämpötila vaihtelee olosuhteista ja materiaaleista riippuen 250–1000 °C välillä. Palaminen etenee ketjureaktiona, jolloin palopesään syötettävä uusi palamaton puuainekesä syttyy olemassa olevan

tulen lämpövaikutuksen takia. Tässä kohtaa kosteampi puuainees vaatii enemmän energiaa kuivuakseen siihen pisteeseen, että syttyminen on mahdollista.

## 2.4 Energiatehokkuuden optimointi

### 2.4.1 Hakkeen laatu

Puuhakkeen laadulla on suuri merkitys kattilan maksimitiehen sekä energiategokkuuteen (Karppinen 2022). Hakkeen kosteus vaikuttaa erittäin merkittävästi saapumistilan energia-arvoon (bioenergianeuvoja.fi 2025b). Hake voidaan määritellä hyvälaatuiseksi, kun sen kosteus on alle 30 %. Tällöin hake ei enää pääse homehtumaan varastossa ja polton ominaisuudet ovat paremmat. Normaalisssa lämmityskattilassa ei kannata polttaa 55 % tai kosteampaa puuta, koska sen energiasisältö on ainoastaan alle 3 kWh/kg (Karppinen 2022). Märän hakkeen kuivatus kuluttaa suuren osan puun energiasisällöstä, jolloin itse päätarkoitukseen jää vain pieni osa kokonaisenergisällöstä. Polttokokeissa on todettu tuorehakkeen polton olevan noin 30 % tehokkaampaa kuin tienvarressa kuivatetun energiapuun (Lahti ym. 2018). Tuorehakkeen poltto kuitenkin vaatii erityisesti sitä varten suunnitellun kattilajärjestelmän. Tuorehakeominaisuudet ei vielä nykyisissä maatilakokoluokan kattiloissa ole saatavilla yleisesti (Lahti ym. 2018).

Haketettava energiapuu varastoidaan pinoissa, jotka sijaitsevat joko hakkuupaikan lähistöllä tai siirrettyinä lähemmäs hakkeen varastointipaikkaa. Energiapuu voi olla karsittua rankapuuta tai kokopuuta (Alakangas 2000). Kokopuu sisältää nimensä mukaisesti koko puun eli oksineen kokonainen puu juuresta katkaistuna. Rankapuun etuina on kuljetuksen helppous, koska kuormissa saadaan vietyä merkittävästi enemmän kiintokuutioita. Kokopuussa oksat tekevät kuormista todella ilmavia, mikä lisää kuljetuskustannuksia. Kokopuun suurimpana etuna on suuri kuutiokertymä metsähehtaaria kohti, koska puusta otetaan kaikki hyödyksi paitsi kanto.

Hakkeen kosteuteen voidaan vaikuttaa puun varastointitavan kautta. Puupinon tulee kuivaa noin vuoden verran, jolloin puu ei vielä ehdi lahoamaan. Pinon sijoittelu tulisi tehdä kuivaan paikkaan, jossa tuuli pääsisi kuivattamaan sekä aurinko paistamaan. Puupino tulisi peittää paperilla kuivatusvaikutuksen maksimoimiseksi. Oikeaoppinen peittäminen tuottaa 5–10 % kuivemman loppukosteuden puulle (Erkkilä ym. 2011). Peittäminen tehdään sateen ja lumen aiheuttaman

kosteuden välttämiseksi, mutta sivut jätetään auki auringon ja tuulen tuoman kuivatusvaikutuksen vuoksi. Korkeampi pino on parempi kuivatuksen kannalta, koska tällöin kastuvaa pinta-alaa on tällöin mahdollisimman vähän.

Kuivan hakkeen hyöty on niin suuri, että sitä kannattaa jopa kuivata erikseen, jos siihen on mahdollisuus (Rahikainen 2005). Hakkeen kuivaus toteutetaan ilmalla puhaltaen kasan läpi. Maataloudessa hakkeen kuivaus tapahtuu erilaisten ritiläpohjien tai ilmanavien avulla. Kuivatettava hake siirretään ritiläpohjan tai ilmanavien päälle, jonka läpi ilma puhalletaan. Kuivatuksen täytyy olla energiatehokasta, jotta kulut eivät kasva suuremmiksi kuin hyödyt. Ilmavirtauspinta-alan täytyy olla riittävän suuri, jotta hake kuivaisi tasaisesti. Kuivaus on paljon nopeampaa, jos ilmaa pystyy lämmittämään, mutta lämmitys on haastava toteuttaa kustannustehokkaasti maatilakokoluokan kuivausjärjestelmissä. Aurinkoenergia on hyvä vaihtoehto hakkeen kuivauksen energialähteenä, koska energiaa saattaa varsinkin kesällä jäädä merkittävästi yli kulutuksen.

Puun laadulla hakkeessa on vaikutus palamisessa. Haketettavan puun tiheys on suoraan yhteydessä energiatiheyteen. Kuusihaketta täytyy syöttää hieman enemmän tilavuus yksikössä kuin esimerkiksi mäntyhaketta saadakseen saman lämpöenergian poltossa (bioenergianeuvoja.fi 2025a). Suomen puulajeissa painavimman eli koivun painoa verratessa esimerkiksi kuusen tilavuuspainoon, eroa voi olla jopa yli 40 % (Taulukko 1). Lämpöarvossa ei juuri ole eroa vertaillessa yhtä kiloa puuta, vaikka tilavuusyksiköissä mitattuna ero on merkittävä puulajikkeiden välillä. Suomen puulajikkeista puhtaimmin palaa koivu, eli se nokeaa vähiten savukanavia (Pelka ym. 2021). Kuusen ja männyn palaminen tuottaa koivua enemmän nokea, ellei palamislämpötila ole korkea eli yli 850 °C.

Taulukko 1. Yleisimpien maataloudessa käytettyjen biolämmityspolttoaineiden pääominaisuuksien vertailu (Alakangas 2000).

<b>Polttoaine</b>	<b>Lämpöarvo kuiva-aineessa (MJ/kg)</b>	<b>Suosittelun enimmäiskosteus (%)</b>	<b>Tilavuuspaino (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Huomioitavaa</b>
<b>Kokopuuhake</b>		35	230–300	Oksat tekevät hakkeesta ilmavaa, lisää tilantarvetta ja nokeavuutta
<b>Rankahake</b>		35	300–400	Tiiviimpi rakenne, parempi energiatiheys tilavuusyksikössä
<b>Kasvijätteet</b>		20	100–500	Vaihtelevan laatuista, voi tuottaa paljon tuhkaa ja epätäydellistä palamista
<b>Yleisimmät poltettavat puulajit</b>				
<b>Koivu</b>	19–19,5		570–650	Tiheä puu, hyvä lämpöarvo ja puhdas palaminen, vähän tuhkaa
<b>Mänty</b>	19–19,5		500–550	Sisältää pihkaa, voi aiheuttaa enemmän karstaa
<b>Kuusi</b>	19–19,5		400–450	Kevyempi kuin mänty, palaa helposti mutta voi pikeentyä enemmän

#### 2.4.2 Jäännöshapen määrä

Puuhakkeen poltossa jäännöshapen määrä ja sen optimointi on tärkeässä roolissa tehokkaan ja puhtaan palamisen kannalta (Pedruzi ym. 2020). Jäännöshappi tarkoittaa sitä happipitoisuutta, mikä jää savukaasuun jäljelle palopesään syötetystä ilmasta. Palotilaan syötettävän ilman happipitoisuus on noin 21 %, mitä voidaan kutsua lähtötilanteeksi ennen palamista. Jäännöshapen säätämällä pyritään saamaan hyvä hyötysuhde palamisesta saatavan lämmön talteenottoon sekä pienentämään päästöjä (Zaporozhets 2019).

Moderneissa puuhakekattiloissa optimaalinen jäännöshapen taso on noin 2-5 %, jolloin palaminen on hyvää (Mižáková ym. 2021). Tätä suuremmilla tasoilla lämpöenergiaa virtaa ulos liian paljon savukaasujen mukana. Kattilavalmistajilla voi olla myös laitekohtaisia ohjeistuksia jäännöshapen säätöön. Korkea jäännöshapen määrä myös voi edistää typen oksidipäästöjen muodostumista. Liian pieni jäännöshapen määrä tekee palamisesta osaksi epätäydellistä (Kömi 2015). Epätäydellisen palamisen ongelmia on nokeamisen lisääntyminen, joka aiheutuu liian matalasta palamislämpötilasta. Myös hiilimonoksidi- ja hiilivetyypäästöjen määrä kasvaa merkittävästi epätäydellisen palamisen yhteydessä.

Jäännöshapen määrää pystytään säätämään lambda-anturin avulla, joka ohjaa paloilmapuhaltimien nopeutta (Kang ym. 2013). Haettaessa optimaalista palamista lambda-anturi on pakollinen, koska hakkeen laatu voi vaihdella, mikä vaikuttaa merkittävästi palotapahtumaan ja ilman tarpeeseen. Pienemmän kokoluokan lämmityskattiloihin ei vakiovarusteena aina kuulu jäännöshapen automaattinen säätö. Ilman automaattista säädintä puhaltimien nopeus tulisi säätää aistinvaraisesti (bioenergianeuvoja.fi 2025b). Säätämisessä tulisi tarkkailla nokeamisen määrää, tuhkan laatua ja savun väriä. Hyvässä palamisessa tuhka on hienoa vaaleaa tai harmaata väriltään. Savukaasun väri ei saisi olla täysin kirkasta, vaan sen pitäisi olla hieman harmahtavaa. Täysin kirkas savukaasu kertoo liiallisen hapen määrästä.

#### 2.4.3 Savukaasupuhaltimen toiminta

Savukaasupuhaltimen tarkoituksena on varmistaa savukaasujen virtaus oikeaan suuntaan ja riittävän nopeasti (Kömi 2015). Sen toiminta voidaan säätää joko vakionopeudelle, alipaineanturin avulla pitämään kattilan sekä palopään sisällä koko ajan vakioalipaineen (Kömi 2015) tai säätymään eri nopeuksille eri tehoalueiden mukaisesti. Vakionopeus pitää savukaasuvirtauksen samana kattilan polttilanteesta riippumatta. Alipainesäätö savukaasupuhaltimelle tarkoittaa, että palopään polttopuhaltimille on erillinen ohjaus hakekattilan ohjauksesta. Alipainesäätö savukaasupuhaltimelle voidaan toteuttaa esimerkiksi taajuusmuuttajan sisäisen PID-säätimen kautta ilman ulkopuolista ohjausta (vfds.org 2025). Kolmas vaihtoehto ohjaukseen on toteuttaa säätö kattilaohjauksen kautta, joka voi perustua eri tehoalueisiin, lambda-anturiin tai savukaasun lämpötilaan. Alipainesäädin pitää vedon koko ajan vakaana riippumatta polttoaineen laadusta tai sääolosuhteista (Kömi 2015). Lambda

pohjainen säätö ei yksinään pysty reagoimaan muutoksiin niin nopeasti kuin alipainesäädin tai lambda-alipainesäädin yhdistelmä. Ainoana säätönä kattilan tehoalueiden perusteella toimiva savukaasupuhallin ei pysty reagoimaan ollenkaan palotapahtumien muutoksiin, jolloin siitä voi seurata epätäydellistä palamista tai energiahäviöitä.

### **3 Työn tavoitteet**

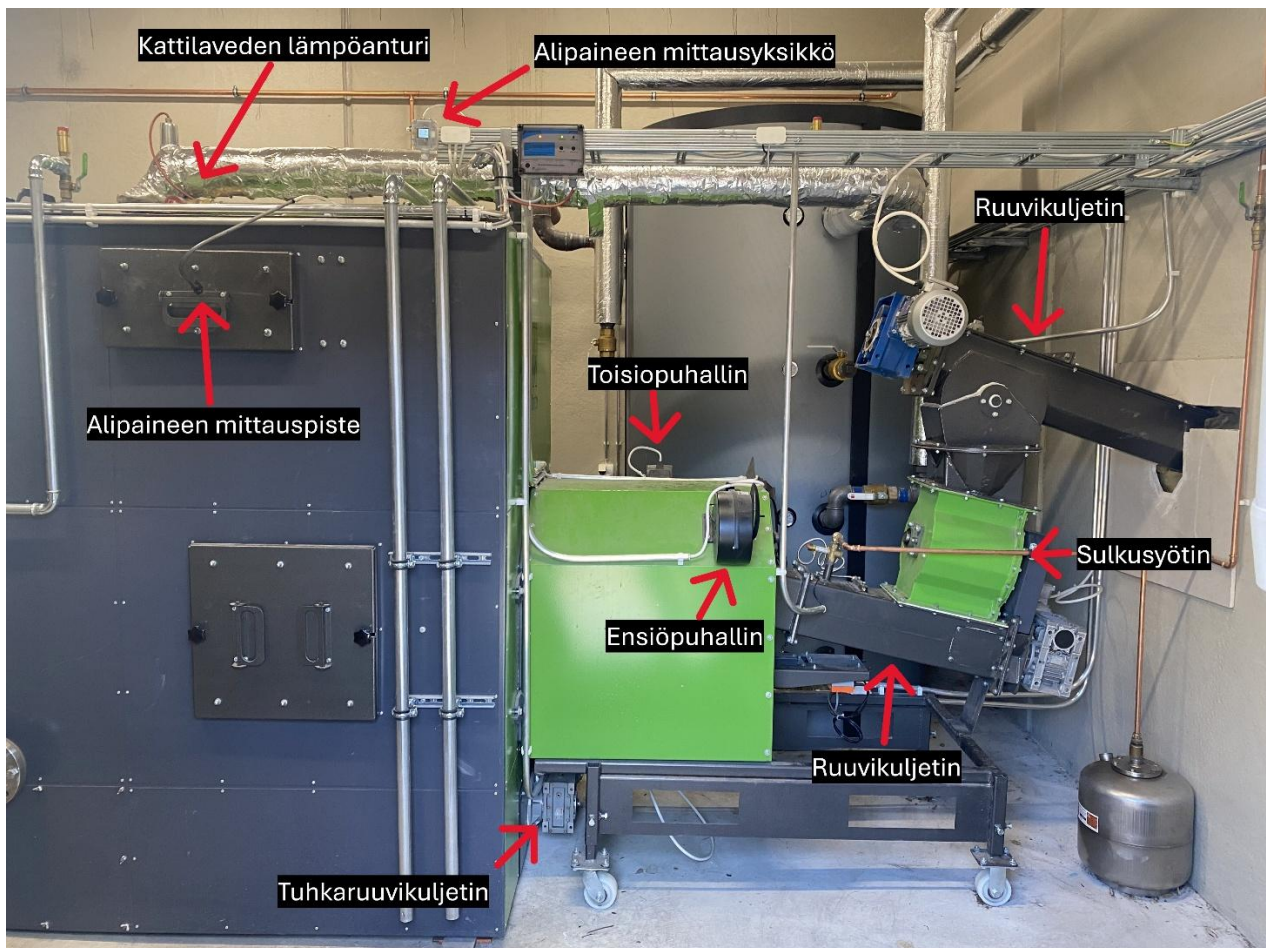
Tämän työn tavoitteena on tutkia maatalouskokoluokan hakekattiloiden energiatehokkuuden optimointia erityisesti savukaasuimurin säätämisen avulla. Energian hinnan nousu ja uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntyminen ovat tehneet hakelämmityksestä entistä tärkeämmän vaihtoehdon maataloille, mutta sen tehokas hyödyntäminen vaatii tarkempaa optimointia. Tutkimuksessa keskitytään erityisesti, miten alipainesäädetty savukaasuimuri vaikuttaa kattilan palamistapahtumaan ja energiankulutukseen verrattuna vakionopeuteen. Kokeessa testataan eri säätöasetuksia ja analysoidaan mittaustulokset, jotta voidaan löytää optimaalinen tapa parantaa hakekattilan energiatehokkuutta maatilaympäristössä. Tämän työn tulokset tarjoavat käytännön tietoa maataloille ja kattilavalmistajille siitä, miten hakekattiloiden käyttöä voidaan tehostaa ja energiankulutusta pienentää ilman, että palamisen laatu kärsii.

## **4 Aineisto ja menetelmät**

### **4.1 Laitteisto**

Kokeen aikana käytössä oli maatilakohteessa sijaitseva hakekattila, joka on asennettu kiinteään rakennukseen. Kattilan maksimitehoksi on ilmoitettu valmistajan puolesta 240 kW. Hakkeen purku varastosta tapahtuu jousipurkaimen avulla ensimmäisen syöttöruuvin päälle. Ensimmäinen pidempi syöttöruuvi kuljettaa hakkeen sulkusyöttimelle (Kuva 5). Sulkusyötin syöttää hakkeen toiselle ruuville, joka kuljettaa hakkeen polttoon palopäähän asti. Palopäässä on liikkuva porrasarina, jonka avulla tuhka kulkeutuu eteenpäin. Tuhkanpoisto tapahtuu kattilan pohjassa sijaitsevan ruuvin kautta tuhka-astiaan. Kattilan päälämmönvaihto tapahtuu putken muotoisten kanavien kautta. Kattilan oma vesitilavuus on noin 900 litraa, mutta tämän lisäksi käytössä on 3000 litran kuumavesivaraaja. Varaaja sijaitsee kahden metrin päässä kattilasta ja kiertovesipumppu kierrättää vettä näiden välillä. Kiertovesipumppu pumppaa täydellä teholla aina, kun tarvitaan suurta lämmitystehoa.

Kattilan savukaasu poistetaan koneellisesti savukaasuumurilla (Kuva 6), jonka ohjaustapaa tutkitaan tässä työssä. Savukaasun poistopuhallin on toiminut tilan kattilassa aiemmin vakionopeudella, mutta siihen asennettiin automaattinen säätö tässä työssä esiteltävää koetta varten. Säätö ohjaa puhaltimen nopeutta kattilan sisällä vallitsevan alipaineen mukaan ja pyrkii pitämään sen vakiona. Alipaineen säätö on toteutettu taajuusmuuttajan sisäistä PID-säädintä hyödyntäen. Alipaineanturi tuottaa 0–10 V analogisen jännitesignaalin, joka välitetään ohjausjärjestelmän analogiseen tuloon, jonka perusteella taajuusmuuttajan kautta pystytään hallitsemaan savukaasuumurin moottorin nopeutta. Alipaineanturin putki on kytketty kattilan yläosaan.



Kuva 5. Lämmityskattilan pääosat edessä. (Kuva: Roni Viitala)

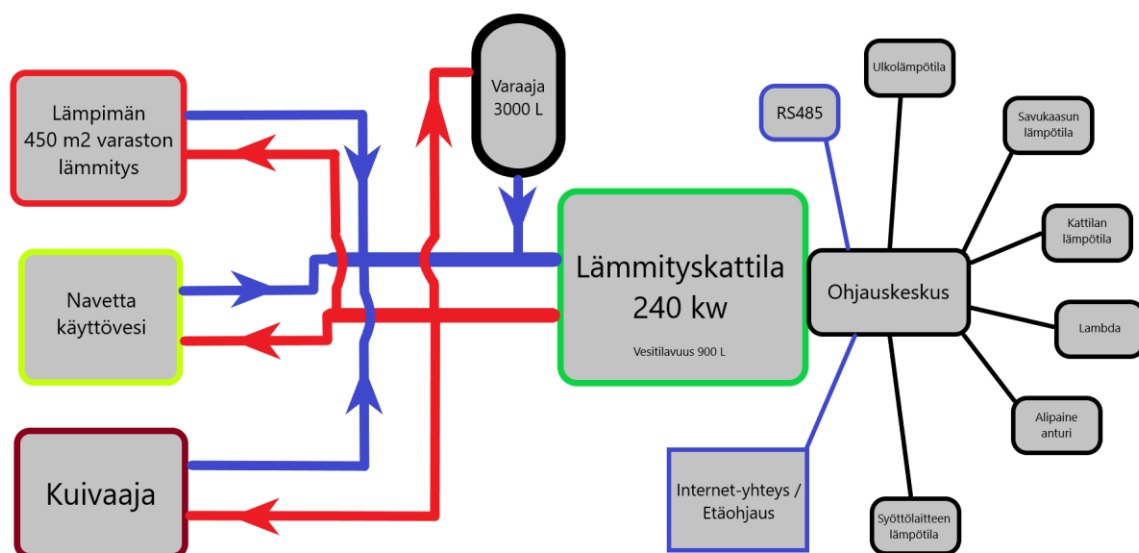


Kuva 6. Lämmityskattilan pääosat takana. (Kuva: Roni Viitala)

## 4.2 Järjestelmä

Lämmitysjärjestelmään on kytketty kuvan 7 mukaisesti kuivaajan imuilman, navetan käyttöveden ja varaston lämmitys. Kiertovesipumput kierrättävät vettä piirikaavion nuolten osoittamalla tavalla järjestelmässä. Kuivaajan ilman lämmitys on viljankuivauksen kausiluontoisuuden takia vain noin kuukauden per vuosi käytössä. Pääosin vuodesta täyttä tehoa kattilasta ei tarvita. Kattilaa käytetään tässä tapauksessa varaajan lämmitykseen kymmenen asteen hystereesillä. Liekki sammuu tulipesässä, kun tavoitelämpötila on saavutettu ja automaattinen sytytys sytyttää liekin kattilalämpötilan laskettua hystereesin ala-arvoa vastaavaan arvoon. Tällä tavalla käyntiaikoina pystytään käyttämään enemmän kattilan korkeampaa tehoaluetta. Käytännössä on todettu, että kuivaajan lämmönvaihdin pystyy siirtämään lämpöä kuivausilmaan niin paljon kuin kyseinen kattila pystyy tuottamaan. Talven pakkasten vuoksi kuivausilman lämmönvaihtimessa on vesi-etyleeniglykoliseos jäätyneen

estämiseksi. Tämän takia kuivauspiirissä täytyy olla yksi ylimääräinen lämmönvaihdin veden ja vesietyleeniglykoliseoksen välillä.



Kuva 7. Piirikaavio lämmitysjärjestelmästä. Punainen väri tarkoittaa menolinjaa ja sininen paluulinjaa.

### 4.3 Mittaukset

Mittaukset toteutettiin kokeessa nostamalla varaajan ja kattilan veden lämpötilaa 20 °C kattilan eri asetuksia käyttäen. Tämä toteutettiin jäähdyttämällä vesi alle 60 °C ja sitten ajamalla erilaisilla tehoasetuksilla lämpötila 80 °C. Kaikki ulkopuoliset lämmitettävät kohteet suljettiin pois piiristä, jotta mittausolosuhteet saatiin riittävän vakaisiksi. Toistot tehtiin kaikilla tehoalueilla yhtä monta kertaa, savukaasuumurin pyöriessä vakionopeudella ja sen automaattisella säädöllä, jolloin alipaine pysyi vakiona.

Kokeen aikana käytössä oli kokopuuhake, joka oli silmämääräisesti arvioituna tasalaatuista. Käytössä olleesta hakkeesta mitattiin kosteus uunissa kuumentamalla 16 tunnin ajan noin 105 °C lämpötilassa. Hake punnittiin ennen ja jälkeen lämmitysjakson. Kosteuspunnitustuloksien mukaan hakkeen veden osuus kuiva-aineesta oli 27,09 %. Kosteusmittauksia varten kerättiin eri puolilta hakevarastoa

näytteitä, jotka sekoitettiin ämpärissä laadunvaihtelujen tasaamiseksi (Kuva 8). 16 tunnin uunijakson jälkeen varmuuden vuoksi kokeiltiin lämmittää ylimääräiset kuusi tuntia haketta kosteuden poistumisen varmistamiseksi, mutta voitiin todeta 16 tunnin olleen riittävä täydelliseen kosteuden poistoon.



Kuva 8. Kokeessa käytetty hake. (Kuva: Roni Viitala)

Päämittaus tehtiin punnitsemalla kulutetun hakkeen määrä jokaiselta toistolta erikseen. Koetta varten syöttöruuvien päälle asennettiin hakkeen syöttölaatikko (Kuva 9). Syöttölaatikon avulla hakkeen kulutus pystytään selvittämään, kun syöttölaatikko pidetään täytenä kokeen alku- ja loppuvaiheissa. Haketta siirrettiin ensin suursäkkiin hakevarastosta ja sitten suursäkin alkupaino punnittiin (Kuva 10). Säkin loppupaino punnittiin, kun kokeen aikana kulunut hake oli täytetty säkistä syöttölaatikkoon.

Suursäkin loppupainon ja alkupainon erotuksella voitiin todeta kunkin toiston hakkeen kulutus kiloina. Punnituksessa oli käytössä 1000 kg kapasiteetin riippuvaaka.



Kuva 9. Vanerilaatikko asennettuna syöttöruuvien päälle koetta varten. (Kuva: Roni Viitala)

Lämmityskokeissa käytettiin erilaisia kattilan tehoalueita. Hypoteesina tutkielmassa oli, että automaattisella alipainesäädöllä olisi positiivinen vaikutus energiatehokkuuteen osatehoalueilla (30 % – 50 %). Tehoaluetta rajoitettiin kattilan ohjauksen asetuksista, jotta päästäisiin haluttuihin maksimitehoalueisiin jokaisen toiston kohdalla. Kokeessa käytettiin kolmea eri maksimitehoaluetta 30 %, 50 % ja 100 %. Prosentit kertovat hakkeen syötön määrästä ja paloilmavahallimien nopeudesta.

Esimerkiksi 100 % tehoalueella haketta syötetään ruuvikuljettimella 11,8 sekuntia 30 sekunnin välein, jolloin paloilmapuhallin pyörii täydellä teholla.



Kuva 10. Hakesäkin punnitseminen riippuvaa'alla. (Kuva: Roni Viitala)

Kokeessa tutkittiin savukaasuimurin ohjauksen vaikutusta energiatehokkuuteen vakioalipainesäädön ja vakiopyörimisnopeuden välillä. Mittaukset suoritettiin kahdessa eri asetuksessa: vakionopeudella toimivalla savukaasuimurilla (OFF) ja alipainesäädöllä (ON). Kussakin asetuksessa testattiin kolme eri tehotasoa: 100 %, 50 % ja 30 %. Toistoja tehtiin jokaisella asetuksella kolme kappaletta. Yhteensä

mittaustuloksia tuli 18 kappaletta. Lämmityskattilan ohjauksen mittausdata tallennettiin jokaisen toiston jälkeen, joka tallentaa kaikkien antureiden tiedot jokaisen mittauksen ajalta.

Kulutus kiloina haketta tarkoittaa, kuinka paljon haketta piti polttaa lämmittääkseen 3900 litraa vettä 20 celsiusasteen verran. Tarvittava energiamäärä veden lämmittämiseen saadaan kaavalla:

$$Q = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T,$$

missä

$$Q = \text{lämpöenergia (kWh)}$$

$$\rho = \text{veden tiheys } 25 \text{ }^\circ\text{C (997 kg/m}^3\text{)}$$

$$V = \text{veden tilavuus (3,9 m}^3\text{)}$$

$$c = \text{veden ominaislämpökapasiteetti (4,18 kJ/kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$$

$$\Delta T = \text{lämpötilan muutos (20 }^\circ\text{C)}$$

$$Q = 997 \text{ kg/m}^3 \cdot 3,9 \text{ m}^3 \cdot 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C} \cdot 20 \text{ }^\circ\text{C} \approx 324\,636 \text{ kJ}$$

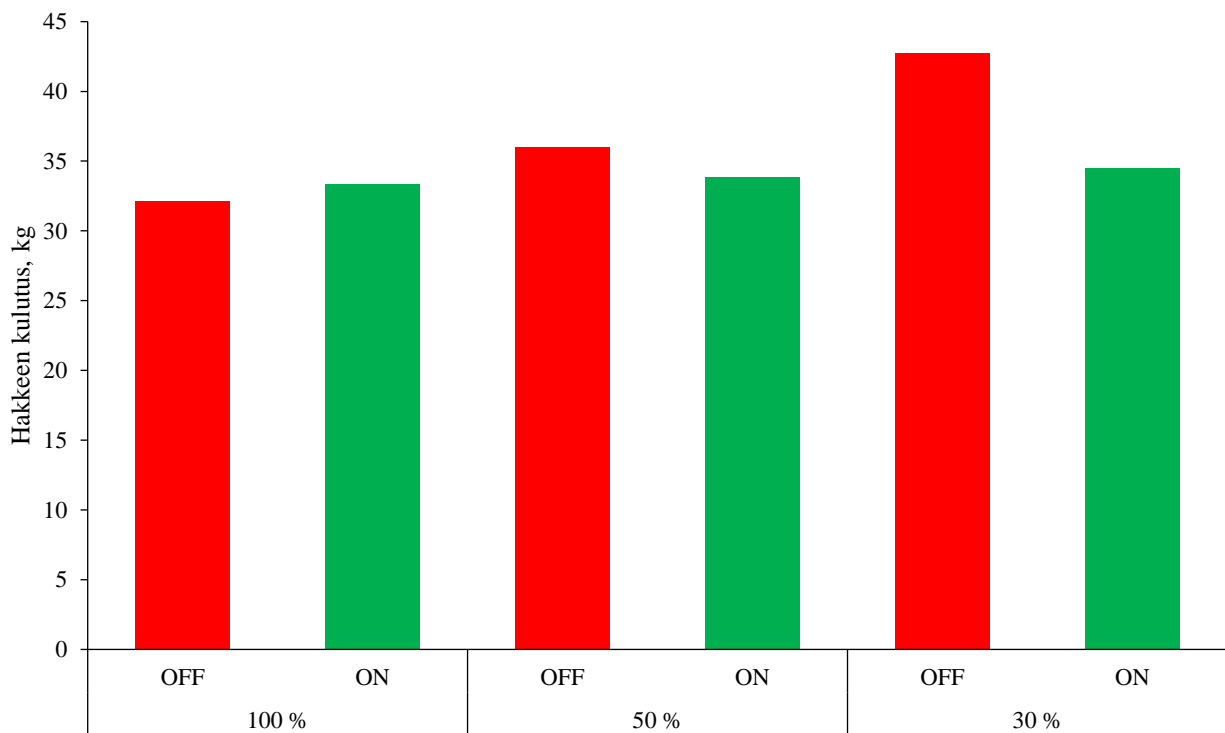
$$Q = 324\,636 \text{ kJ} / 3600 \approx 90,2 \text{ kWh}$$

## 5 Tulokset

Hakkeen kulutuksen tulokset on esitetty taulukossa 2 ja kuvassa 11. Taulukosta 2 voidaan huomata eroja kulutuksessa etenkin pienemmillä tehoalueilla alipainesäätimen ollessa ON tai OFF tilassa. Hakkeen kulutuksen suurimmat arvot saatiin alipainesäätimen ollessa pois päältä (Kuva 11). Kulutuksen suurimman ja pienimmän arvon välillä eroa oli 15 kg, joka on merkittävä määrä keskikulutuksen ollessa noin 35,4 kg. Ulkolämpötiloissa toistojen välillä oli merkittäviä eroja (Taulukko 2), joilla voi olla vaikutusta tuloksiin.

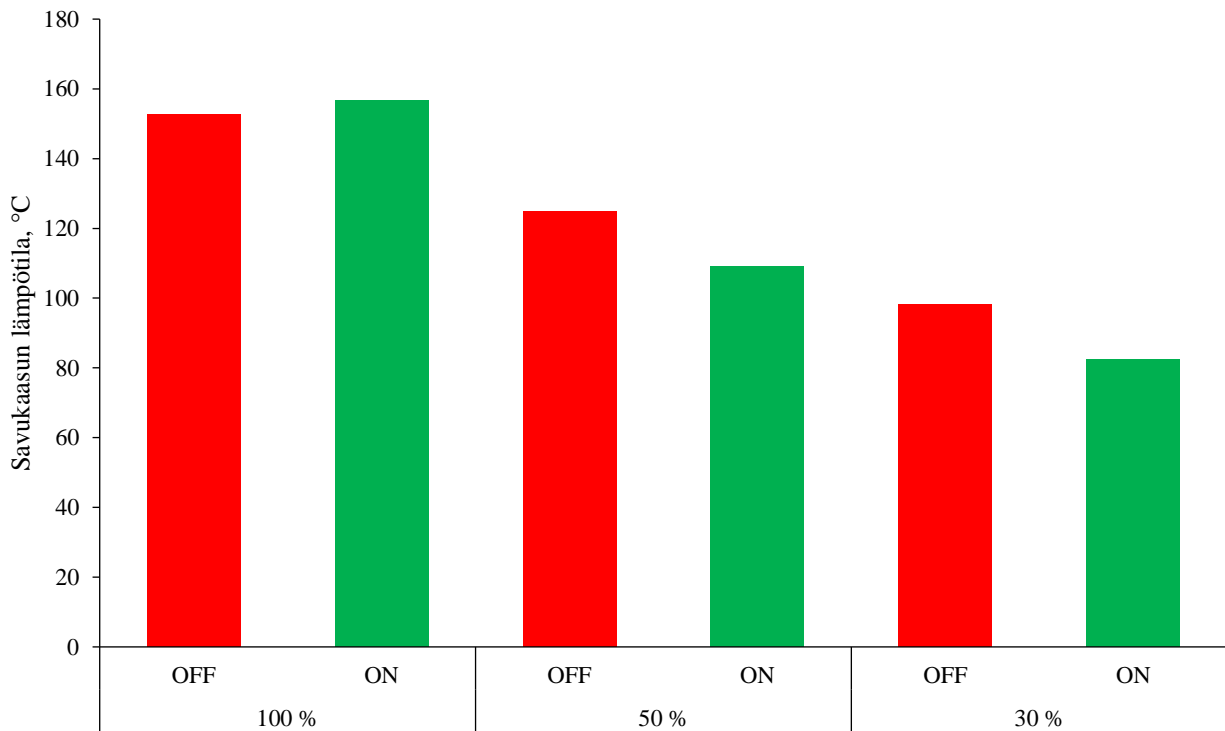
Taulukko 2. Hakkeen kulutuksen tulokset. Ulkolämpötila mitattuna kattilahuoneen ulkopuolelta kokeen aikana. Punnitussäkin lähtöpaino ennen polttokoetta ja loppupaino punnituskokeen jälkeen.

Toisto nro	Alipainesäädin	Teho maks. %	60°C → 80 °C			Ulkolämpötila
			Lähtöpaino, kg	Loppupaino, kg	Kulutus, kg	
1	OFF	100	196,5	165,5	31	-0,9
2	OFF	100	165,5	133,5	32	0,5
14	OFF	100	123,5	90	33,5	6,0
3	OFF	50	133,5	98,5	35	-2,0
4	OFF	50	98,5	62,5	36	-4,0
15	OFF	50	90	53	37	17,2
5	OFF	30	62,5	23	39,5	-1,1
6	OFF	30	139,5	93,5	46	-4,0
17	OFF	30	69	25	44	7,0
7	ON	100	93,5	57	36,5	-10,1
8	ON	100	173	139	34	-10,1
13	ON	100	153	123,5	29,5	6,2
9	ON	50	139	105	34	1,1
10	ON	50	105	69,5	35,5	3,1
16	ON	50	137,5	105,5	32	11,7
11	ON	30	163	128	35	2,6
12	ON	30	128	94	34	-2,2
18	ON	30	105,5	72	33,5	8,3



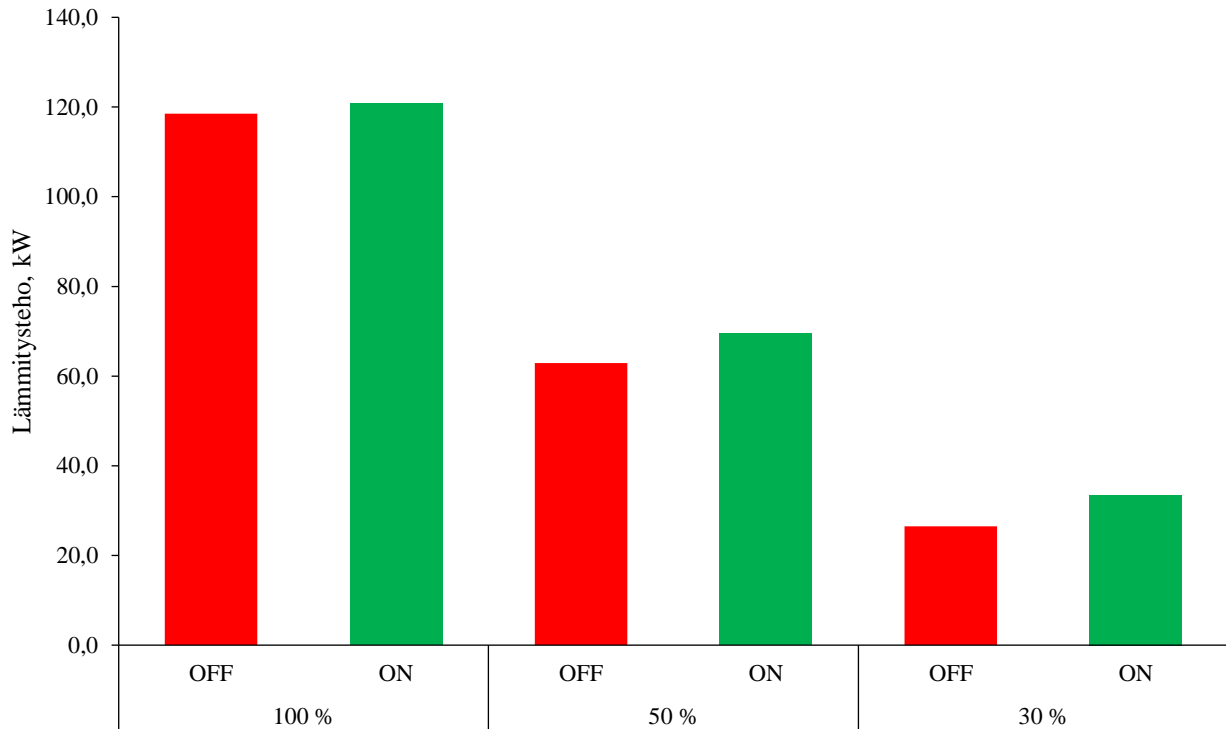
Kuva 11. Hakkeen kulutus keskimäärin 20 asteen lämpötilan nostoon erilaisilla koeasetelmilla.

Keskimääräinen savukaasun lämpötila on esitetty kuvassa 12. Savukaasujen lämpötilat olivat alhaisemmat alipainesäädön ollessa päällä osatehoalueilla. ON-tilassa täydellä teholla savukaasujen lämpötila oli poikkeuksellisesti korkeampi ja samalla myös kokeen suurin. Tuloksissa nähdään 50 % ja 30 % osatehoilla lähes yhtä suuri ero savukaasun lämpötilojen välillä.



Kuva 12. Keskimääräinen savukaasun lämpötila.

Lämmitystehon laskentaan oli käytössä ainoastaan viiden minuutin tarkkuudella tallennettu data kattilaohjauksen mittauslokista. Tämä tarkoittaa, että lämmitykseen kulunut aika ei ole tarkkaan kelloitettu, mikä vaikuttaa tehotuloksien tarkkuuteen. Tehon laskennassa käytettiin varattavan veden lämpöenergiämäärää (90,2 kWh) ja lämmittämiseen kulunutta aikaa. Jokaisella tehoalueella hakkeen syöttöaika ja syöttöväli ovat olleet vakioita. Lämmitysteho eri koeasetelmilla on esitetty kuvassa 13. Kaikilla tehoalueilla saatiin suurin lämmitysteho, kun alipainesäädin oli päällä.



Kuva 13. Lämmitysteheho eri koasetelmilla.

Hakkeen noin 27 prosentin kosteuspitoisuus tarkoittaa keskimääräisellä kulutuksella sen sisältävän 8,9 kg pelkkää vettä per yhden toiston hakemäärä. Kokeessa noin 10 °C kovemmassa pakkasessa kaikki hakkeen sisältämä vesi pitää myös lämmittää ennen höyrystymistä, joka vaatii ylimääräistä lämpöenergiaa. Kaavaa hyödyntämällä voimme laskea 10 °C lämpötilaeron vaikutuksen hakkeen sisältämän veden lämmityksen tarpeeseen:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

missä,

$$Q = \text{lämpöenergia (kJ)}$$

$$m = \text{veden massa} = 8,9 \text{ kg}$$

$$c = \text{veden ominaislämpökapasiteetti} = 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = \text{lämpötilan muutos} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q = 8,9 \text{ kg} \cdot 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot 10 \text{ }^\circ\text{C} = 372,02 \text{ kJ}$$

*Muunnetaan kilowattitunneiksi:*

$$372,02 \text{ kJ} / 3600 \approx 0,103 \text{ kWh}$$

*Hakkeen keskimääräinen kulutus per kWh*

$$= \text{Hakkeen kokonaiskulutus (kg)} / \text{Tuotettu energia (kWh)}$$

$$35,4 \text{ kg} / 90,2 \text{ kWh} \approx 0,39 \text{ kg/kWh}$$

Laskelman perusteella voidaan todeta, että vaikka hake olisi 10 °C kylmempää saapumistilassa, sen lämmittämisellä ei pitäisi olla yksinään merkittävää vaikutusta kokeen kokonaisenergiankulutukseen. 10 °C lämmittäminen 8,9 kg vesimassassa tarkoittaa ainoastaan 0,103 kWh, joka vastaa 40 grammaa haketta. 40 grammaa haketta on keskimääräisestä hakkeen kulutuksesta ainoastaan 0,11 prosentin osuus.

## **6 Tulosten tarkastelu**

Mittauksissa havaittiin hypoteesin suuntaisia tuloksia. Eroja alettiin näkemään kattilan osatehoalueilla 50 % ja 30 %. Täydellä teholla kulutuksen taso voidaan todeta olevan lähes samanlainen alipainesäädöllä ja vakionopeudella. Ulkolämpötila ei pysynyt kokeen aikana täysin vakiona, mikä aiheuttaa epävakautta tuloksiin, koska korvausilma ja hake saapumistilassa on kylmempää. Tuloksissa voidaan huomata suurempaa hakkeen kulutusta ulkolämpötilan ollessa matalimmillaan. Ulkolämpötilaa voidaan pitää yhtenä mahdollisena tekijänä hakkeen suurempaan kulutukseen kovimpien pakkasten aikaan.

Tuloksia tarkastellessa voidaan todeta energiansäästön olevan sitä suurempi automaattisella alipainesäädöllä, mitä pienemmällä teholla kattilaa käytetään. Keskimäärin 50 % tehoalueella saatiin energiansäästöä ainoastaan 6 %. Tämä voi koostua käytössä olleiden mittausmenetelmien satunnaisvaihtelusta, toistomäärän ollessa vähäinen. 30 % tehoalueella keskimääräinen energiansäästö oli 20,8 %. Pienimmällä osatehoalueella hakkeen kulutus suurenee merkittävästi

ilman automaattista alipaineohjausta. Vakioalipaineasetuksella saatiin kokonaisuudessaan vakaa hakkeen kulutus kWh yksikköä kohti eri tehoalueista riippumatta.

Kokeissa pyrittiin vakioimaan kaikki mahdolliset olosuhteet, jotka voisivat vaikuttaa tuloksiin. Silti epävarmuutta voi syntyä esimerkiksi hakkeen laatuvaihtelujen, antureiden ja luonnonolosuhteiden vuoksi. Silmämääräisesti hakkeen laatu hakevarastossa on hyvin tasainen ja tarkemmin sen laatuvaihtelua suuressa mittakaavassa on hankala arvioida. Kokopuuhake pyrittiin täyttämään täyttösäkkiin useilla satunnaisotoksilla varastosta, jolloin täytön ei olisi pitänyt kohdistua yhden tietynlaatuisen hakekärryllisen kohtaan. Punnitsemisessa käytetty vaaka oli nimellistarkkuudeltaan  $\pm 0,5$  kg ja mittausskaalaltaan 0–1000 kg. Vaa'an antamien arvojen paikkansapitävyyttä ei tarkistettu, mutta kaikki mittaukset tehtiin samoissa olosuhteissa. Vaaka otettiin aina juuri ennen mittaamista kattilahuoneen lämpimistä olosuhteista. Laskennallisesti vaaka tuo epävarmuutta noin 1,4 % verrattuna hakkeen kulutuksen keskiarvoon. 1,4 % virhemarginaali vaa'an toiminnassa ei ole suurin ongelma, verrattuna sitä kulutuksen heittelyyn samanlaisten toistojen välillä.

Lämpötilan mittauksessa käytössä olleista NTC (Negative Temperature Coefficient) -antureista ei ollut saatavilla datalehteä, mistä olisi selvinnyt tarkkuus. Keskimääräisesti NTC-anturit ovat tarkkuudeltaan  $\pm 0,5$  °C. Tämä virhe voisi vaikuttaa suoraan hakkeen kulutustulokseen kokeessa, koska ylimääräistä haketta saatettaisiin vielä lisätä täyttölaatikkoon, jos anturin antama lukema on 0,5 °C alempi absoluuttisen arvon ollessa tasan 80 °C. Todennäköisesti kokeessa nähtävä kokonaisvirhemarginaali syntyy monen pienen asian summasta. Kokonaisuudessaan virhemarginaali ei ole liian suuri, sillä selviä eroja eri asetusten välillä pystytään näkemään virheestä huolimatta.

Savukaasun lämpötila on selvästi alhaisin pienimmillä osatehoalueilla (Taulukko 2). Mittaustuloksista nähdään, että kaikki alipainesäädin ON-tilan lämpötilat lukuun ottamatta 100 % tehoa ovat matalampia kuin OFF-tilan lämpötilat. ON-tilan täyden tehon mittausta kulutti eniten haketta ja siinä oli samaan aikaan myös suurin savukaasun lämpötila. 50 % ja 30 % tehoilla savukaasun lämpötilojen ero alipainesäätimen käyttötilojen välillä pysyi lähes samalla tasolla. Jokin ulkoinen tekijä on kokeessa vaikuttanut hakkeen polttoprosessiin merkittävästi, koska toistot 7 ja 8 ovat monella tapaa poikkeavia. Alipainesäätimen ollessa päällä osatehoalueiden savukaasulämpötilat laskevat liiankin alhaiseksi.

Tuloksiin on vaikea löytää vertailukohdetta, koska vastaavanlaisia kokeita on haastava löytää. Tulokset kokonaisuudessaan kertovat paljon uutta tarkempaa mittauksiin perustuvaa lisätietoa liittyen alipaineanturiperusteisen savukaasumurin toimintaan. Mittaustuloksia etenkin maatilakokoluokan laitteista on muidenkin aiheiden tiimoilta hyvin vähän saatavilla.

Tuloksista käy ilmi, että automaattinen alipainesäätö parantaa selkeästi energiatehokkuutta erityisesti osakuormituksilla. Jotta kattilan hyötysuhdetta ja järjestelmän kokonaistoimivuutta voitaisiin tulevaisuudessa arvioida vielä tarkemmin, olisi suositeltavaa kehittää mittausmenetelmiä sekä tehokkuuden että ohjauksen dynamiikan osalta. Erityisesti tehonlaskennan tarkkuutta voitaisiin parantaa mittaamalla lämmitysjärjestelmän meno- ja paluuputken lämpötilaero sekä kiertävän veden virtausnopeus. Tämä mahdollistaisi jatkuvan ja reaaliaikaisen tehon määrittämisen, eikä laskenta perustuisi enää pelkästään lämmityksen keston arviointiin. Menetelmä parantaisi tehon määrittämisen luotettavuutta, erityisesti tilanteissa, joissa lämmitys on jaksottaista tai kuormitus muuttuu nopeasti.

Myös savukaasun lämpötilan ja jäännöshappiarvon jatkuva seuranta voisi tuottaa tarkempaa tietoa palotapahtuman laadusta ja palamisen dynamiikasta eri säätötilanteissa. Lisäksi hakkeen kosteuden ja puulajin vaikutusta kattilan hyötysuhteeseen olisi mahdollista arvioida tarkemmin, jos näitä parametreja seurattaisiin erillisillä sensoreilla. Tulevaisuuden kehityssuuntana voisi olla älykkään säätöjärjestelmän toteuttaminen, jossa automatiikka mukautuu polttoaineen laatuun ja käyttöolosuhteisiin. Tällaiset järjestelmät voisivat parantaa polton laatua ja energiatehokkuutta erityisesti maatilaympäristöissä, joissa käyttökuormitus vaihtelee vuodenaikojen mukaan.

## **7 Johtopäätökset**

Tämän tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että vakaa alipaine lämmityskattilassa parantaa energiatehokkuutta erityisesti pienemmillä osatehoalueilla. Suurin ero hakkeen kulutuksessa havaittiin 30 % tehoalueella, jossa alipainesäädin pienensi kulutusta keskimäärin 20,8 %. Keskimääräinen kulutus kaikilla tehoaluilla alipainesäätimen ollessa käytössä oli 0,37 kg / kWh, kun taas savukaasumurin vakionopeusasetuksella kulutus oli 0,41 kg / kWh.

Täydellä teholla ero säätötapojen välillä oli vähäinen, mikä viittaa siihen, että alipainesäätimen vaikutus korostuu erityisesti osateholla, jolloin palamiskaasut virtaavat liian kuumana ulos palotapahtumaan nähden. Tämä tukee hypoteesia, jonka mukaan savukaasuimurin automaattinen säätö vakauttaa palamista ja pienentää lämpöhäviötä savukaasujen mukana. Savukaasujen keskilämpötilat olivat kauttaaltaan alhaisempia alipainesäädön ollessa päällä, lukuun ottamatta täyden tehon mittauksia. Poikkeavat tulokset täydellä teholla nostivat merkittävästi kulutuksen, sekä savukaasun lämpötilan keskiarvoa. Tällainen yksittäinen tulos saattaa liittyä hakkeen poikkeavaan laatuun tai ulkoiseen häiriötekijään.

Vaikka ulkoiset olosuhteet, kuten ulkolämpötila, eivät pysyneet täysin vakiona kokeiden aikana, niiden vaikutus energiankulutukseen arvioitiin pieneksi laskennallisten tarkastelujen perusteella. Epävarmuutta tuloksiin tuo erityisesti vaa'an tarkkuus ja mahdollinen hakkeen laatu vaihtelu, mutta mittausten sisäinen johdonmukaisuus ja selvästi havaittavat erot eri säätötapojen välillä tukevat johtopäätösten luotettavuutta. Koetulosten perusteella automaattinen alipainesäätö osoittautui hyödylliseksi maatilakokoluokan hakekattiloissa, erityisesti silloin kun kattilaa käytetään usein myös osateholla. Tällöin saavutetaan merkittävää polttoaineensäästöä ilman, että palamisen laatu heikkenee.

## 8 Lähteet

- Ahokas, J. 2013. Maatilojen energiankäyttö Enpos-hankkeen tulokset. Department of Agricultural Sciences - Publications.
- Ahokas, J. & Jokiniemi, T. 2021. Viljankuivaus. Energia-akatemia.
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Energia.
- Ala-Talkkari. 2014. Veto Cont-lämpökeskukset 60-2000 kW.
- Antonovič, V., Szczerba, J., Keriene, J., Stonys, R. & Boris, R. 2017. Refractory Materials for Biofuel Boilers. Teoksessa E. Jacob-Lopes & L. Q. Zepka (Toim.) *Frontiers in Bioenergy and Biofuels*. InTech. <https://doi.org/10.5772/65550>
- Antti-Teollisuus. 2024. Antin etumatka on kuiva fakta: Viljaesite 2024. bioenergianeuvoja.fi. 2025a. Lämmitysteho—Bioenergianeuvoja. <https://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/polttopuu/lampoarvo/>. Viitattu 20.2.2025.

- bioenergianeuvoja.fi. 2025b. Täydellinen palaminen—Bioenergianeuvoja. <https://www.bioenergianeuvoja.fi/faktaa/taydellinen-palaminen/>. Viitattu 20.2.2025.
- Biofire.fi. 2025. Ohjausjärjestelmä—Biofire Oy. <https://www.biofire.fi/ohjausjarjestelma/>. Viitattu 4.2.2025.
- Buchmayr, M., Gruber, J., Hargassner, M. & Hochenauer, C. 2015. Experimental investigation of the primary combustion zone during staged combustion of wood-chips in a commercial small-scale boiler. *Biomass and Bioenergy* 81:356–363. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.016>
- Di Sarli, V., Cammarota, F. & Salzano, E. 2014. Explosion parameters of wood chip-derived syngas in air. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 32:399–403. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.10.016>
- Djurović, D., Nemoda, S., Repić, B., Dakić, D. & Adzić, M. 2015. Influence of biomass furnace volume change on flue gases burn out process. *Renewable Energy* 76:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.007>
- Emmons, H. W. & Atreya, A. 1982. The science of wood combustion. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences Section C: Engineering Sciences* 5:259. <https://doi.org/10.1007/BF02904581>
- Erkkilä, A., Hillebrand, K., Raitila, J., Virkkunen, M., Heikkinen, A., Tiihonen, I. & Kaipainen, H. 2011. Kokopuun ja mäntykantojen korjuuketjujen sekä varastoinnin kehittäminen. VTT.
- Gilman, G. F. 2010. Boiler control systems engineering. 2 painos. Internat. Soc. of Automation. 198 s.
- Grassl, D. 2017. Total system efficiency: condensing boiler system myth busting. Cleaver-Brooks Inc.
- Kang, S. B., Kim, J. J., Choi, K. S., Sim, B. S. & Oh, H. Y. 2013. Development of an air fuel control system for a domestic wood pellet boiler. *Journal of Mechanical Science and Technology* 27:1701–1706. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0419-x>
- Karppinen, S. 2022. Hakkeen laatuun kannattaa panostaa. Metsälehti. <https://www.metsalehti.fi/artikkelit/hakkeen-laatuun-kannattaa-panostaa/>
- Kovacs, H., Dobo, Z., Koos, T., Gyimesi, A. & Nagy, G. 2018. Influence of the Flue Gas Temperature on the Behavior of Metals during Biomass Combustion. *Energy & Fuels* 32:7851–7856. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b00796>
- Kömi, T. 2015. Polttoainekattilan palamisilman mittaus. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

- Lahti, J., Lauhanen, R., Timonen, R., Laasasenaho, J. & Kitinoja, A. 2018. Onko tuoreen puun poltosta hyötyä maatilametsänomistajalle? Tuoreen energiarangan hankintalogistiikan ja polton kehittäminen. Suomen maataloustieteellisen seuran tiedote nro 35.
- Lamb, A. 2017. Understanding why biomass boilers fail. CIBSE Journal. <http://cibsejournal.com/test/technical/2017-11-bio/>
- Lindroos, A.-P. 2007. Hakelämmitys viljan kuivauksessa. Satakunnan ammattikorkeakoulu.
- Luonnonvarakeskus. 2020. Maatalouden energiankulutus ja uusiutuvan energian osuus. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/indikaattorit/agrikaattori-maaseutuohjelman-indikaattorit-20142020/maatalouden-energiankulutus-ja-uusiutuvan-energian-osuus>. Viitattu 12.3.2025
- Macek, K., Endel, P., Cauchi, N. & Abate, A. 2017. Long-term predictive maintenance: A study of optimal cleaning of biomass boilers. *Energy and Buildings* 150:111–117. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.055>
- Mižáková, J., Pitel, J., Hošovský, A., Pavlenko, I., Ochowiak, M. & Khovanskyi, S. 2021. Biomass Combustion Control in Small and Medium-Scale Boilers Based on Low Cost Sensing the Trend of Carbon Monoxide Emissions. *Processes* 9:2030. <https://doi.org/10.3390/pr9112030>
- Neste. 2025. Öljytuotteet. Bensiinin ja dieselin marginaalit. <https://www.neste.com/fi-fi/sijoittajille/markkinatietoa/oljytuotteet>. Viitattu 12.3.2025.
- Nussbaumer, T. 1993. Wood Combustion. Teoksessa A. V. Bridgwater (Toim.), *Advances in Thermochemical Biomass Conversion*. s. 575–589. Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-1336-6\\_44](https://doi.org/10.1007/978-94-011-1336-6_44)
- Ojanen, T. 2014. Lämpöhäviöiden määrittelyminen kaukolämpöverkostossa. Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu.
- Pedruzi, G. O. L., Rodrigues Santos, R., De Oliveira Resende, M., Arêdes Martins, M. & Meira Santana, M. 2020. Control system for complete burning in furnace using lambda probe. *Revista engenharia na agricultura - reveng* 28:69–77. <https://doi.org/10.13083/reveng.v28i.903>
- Pelka, G., Wygoda, M., Luboń, W., Pachytel, P., Jachimowski, A., Paprocki, M., Wyczesany, P. & Kotyza, J. 2021. Analysis of the Efficiency of a Batch Boiler and Emissions of Harmful Substances during Combustion of Various Types of Wood. *Energies* 14:6783. <https://doi.org/10.3390/en14206783>
- Pietikäinen, J. & Ruuskanen, T. 2008. Hakelämmitysjärjestelmä Alakosken tilalle. Opinnäytetyö. Savonia ammattikorkeakoulu.
- Piri, I. 2016. Pienen kokoluokan biomassakattilat. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Plaček, V., Oswald, C. & Hrdlička, J. 2012. Optimal Combustion Conditions for a Small-scale Biomass Boiler. *Acta Polytechnica* 52. <https://doi.org/10.14311/1564>

- Rahikainen, O. 2005. Hakkeen kuivaus bioenergiakeskuksen monikäyttökuivurissa auringon energiaa lisälämmönlähteenä hyödyntäen. Bioenergiakeskuksen julkaisusarja nro 17.
- Rakentaja.fi. 2023. Näin onnistut vesikiertoisen lattialämmityksen asennuksessa. <https://rakentaja.fi/artikkelit/vesikiertoisen-lattial%C3%A4mmityksen-asennus/>. Viitattu 15.3.2025.
- Retschitzegger, S., Brunner, T. & Obernberger, I. 2015. Low-Temperature Corrosion in Biomass Boilers Fired with Chemically Untreated Wood Chips and Bark. *Energy & Fuels* 29:3913–3921. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00365>
- Ruokavirasto. 2024. Maatalouden investointituet. <https://www.ruokavirasto.fi/tuet/maatalous/investoinnit/maatalouden-investointituet/>. Viitattu 29.2.2025.
- Sten, E. 2017. Kiinteän polttoaineen lämpökeskuksen paloturvallisuus. Finanssiala turvallisuusohje. [vfds.org. 2025. VFD PID Control. http://www.vfds.org/vfd-pid-control-997149.html](http://www.vfds.org/vfd-pid-control-997149.html). Viitattu 30.3.2025.
- Ympäristöministeriö. 1997. Kattilahuoneiden ja polttoainevarastojen paloturvallisuus. Suomen rakennusmääräyskokoelma E9.
- Zaporozhets, A. 2019. Analysis of Control System of Fuel Combustion in Boilers with Oxygen Sensor. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 63:241–248. <https://doi.org/10.3311/PPme.12572>