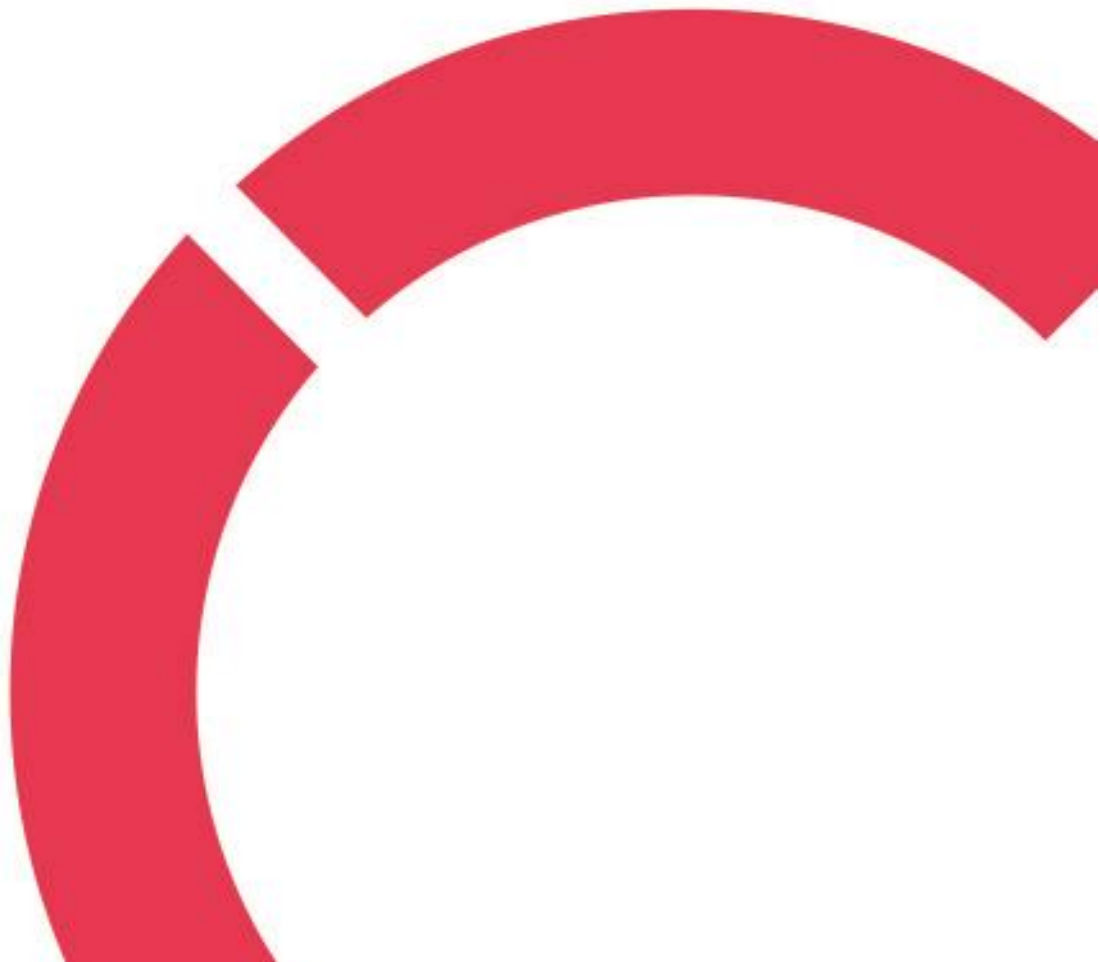


Sanna Pakanen

CHP-PUUKAASUTINLAITOKSEN HYÖTYSUHTEEN MÄÄRITTÄMINEN

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Marraskuu 2023**



Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Marraskuu 2023	Tekijä/tekijät Sanna Pakanen
Koulutus Sähkö- ja automaatiotekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi CHP-PUUKAASUTINLAITOKSEN HYÖTYSUHTEEN MÄÄRITTÄMINEN		
Työn ohjaaja Aki Suokko		Sivumäärä 34 + 5
Työelämäohjaaja Juhani Haapalahti		
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli määrittää uudistetulle CHP-voimalaitokselle hyötysuhteet. Volter Oy:n Walter-voimalaitos on myötävirtakaasuttimeen perustuva, ja se käyttää polttoaineena metsähaketta. Voimalaitoksen nimellinen sähköteho on 50 kW ja lämpöteho 130 kW.</p> <p>Työ toteutettiin suorittamalla Walter-voimalaitokselle hyötysuhde- ja päästömittaukset. Tulosten pohjalta päästiin määrittämään lämmön ja sähkön tuoton hyötysuhteet sekä yhdistetty hyötysuhde. Savukaasumittauksilla päästiin mittaamaan laitoksen ympäristökuormaa ja optimoimaan palamisprosessin kulkua.</p> <p>Kirjallisessa osiossa perehdytään Volter Oy:n historiaan, Walter-voimalaitoksen tekniikkaan ja myötävirtakaasuttimen toimintaan. Lisäksi käsitellään puukaasutuksen historiaa ja prosessia sekä puupolttoaineen ominaisuuksia. Laskennan teoriaosuudessa käsitellään laskukaavoja, joita tarvittiin hyötysuhteiden sekä savukaasun koostumuksen ja määrän määrittämisessä. Hyötysuhteet määritettiin suoralla menetelmällä.</p> <p>Mittaus ja tulokset osioissa esitettiin tammikuussa suoritetun mittauksien asetelmat ja mittauksissa saadut arvot. Tuloksena esitettiin voimalaitoksen laskennalliset hyötysuhteet ja päästömittauksien arvot.</p>		
Asiasanat CHP, hyötysuhde, puukaasutus, puupolttoaine, päästöt		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date November 2023	Author Sanna Pakanen
Degree programme Electrical and Automation		
Name of thesis THERMAL EFFICIENCY OF A BIOGASS GASIFICATION BASED CHP PLANT		
Centria supervisor Aki Suokko	Pages 34 + 5	
Instructor representing commissioning institution or company Juhani Haapalahti		
<p>This thesis aimed to determine the efficiency ratios for Volter Oy's renewed CHP power plant, the Walter power plant, which utilizes a co-flow gasifier with wood chips as fuel. The nominal output of the power plant is 50 kW (electricity) and 130 kW (thermal power).</p> <p>The study involved conducting efficiency and emission measurements for the Walter power plant, enabling the determination of heat production and electricity production efficiency ratios, as well as the combined efficiency ratio. Flue gas measurements were used to assess the plant's environmental impact and optimize the combustion process.</p> <p>The written report covers Volter Oy's history, the technology of the Walter power plant, and the functioning of the downstream gasifier. Additionally, it discusses the history and process of wood gasification, along with the properties of wood fuel. The theoretical part provides the formulas needed to calculate the efficiency ratios and the composition and amount of flue gas, while profit ratios were determined using the direct method.</p> <p>The measurement and results sections presented the layout and values obtained in the measurements conducted in January. The results are presented as the calculated efficiencies and emission measurement values for the power plant.</p>		
Key words Biomass, CHP, efficiency, wood gasification		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

C	Hiili
C_xH_x	Hiilivedyt
C₂H₆	Etaani
C₃H₈	Propaani
CH₄	Metaani
CHP	Combined Heat and Power, yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto
CO	Hiilimonoksidi ts. häkä
CO₂	Hiilidioksidi
Eksoterminen	Lämpöä luovuttava
Endoterminen	Lämpöä sitova
H	Vety
H₂O	Vesi
Hiilikonversio	Hiilen palamisaste
Krakkautuminen	Hiilivetymolekyylien pilkkoutuminen
kW	Kilowatti
LHV	Polttoaineen tehollinen eli alempi lämpöarvo
N₂	Typpikaasu
N₂O	Typpioksiduuli ts. ilokaasu
NO	Typpimonoksidi
NO₂	Typpidioksidi
NO_x as NO₂	Typhen oksidit, monoksidien ja dioksidien välille ei tehdä eroa typpipäästöjä mitattaessa

Nm³	Normikuutio
O₂	Happi
Pyrolyysi	Kemiallinen hajoaminen kuumentamisen vaikutuksesta
Redusointi	Muunnetaan arvo vertailukelpoiseen olosuhteeseen
S	Rikki
SO₂	Rikkidioksidi

ESIPUHE

Kiitokset Volter Oy:lle mielenkiintoisen aiheen antamisesta ja mahdollisuudesta toteuttaa työelämälähtöinen opinnäytetyö. Lisäksi haluan kiittää Centria ammattikorkeakoulun yliopettajaa Aki Suokkoa opinnäytetyön asiantuntevasta ja kannustavasta ohjaamisesta sekä Centrian tutkimus- ja kehitysyksikön asiantuntijaa Riku Nivaa, jonka avustajana sain toimia hyötysuhdemittauksissa.

Haluan kiittää myös puolisoani Jania tuesta ja kannustuksesta koko opintojeni ajan.

Nivalassa 5.11.2023

Sanna Pakanen

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 VOLTER OY	2
2.1 Walter-voimalaitos	2
2.2 Myötävirtakaasutin	4
3 PUUKAASUN TUOTTO	6
3.1 Historia	6
3.2 Prosessi.....	7
3.2.1 Kuivuminen.....	7
3.2.2 Pyrolyysi.....	8
3.2.3 Kaasuuntuminen.....	9
4 PUUPOLTTOAINEEN OMINAISUUDET	11
4.1 Lämpöarvo.....	11
4.2 Palamisreaktiot.....	13
4.3 Savukaasut.....	14
4.4 Päästöt.....	14
5 LASKENNAN TEORIA	16
5.1 Hyötysuhde	16
5.2 Palamisilma ja ilmakerroin.....	17
5.3 Savukaasujen koostumus ja määrä	19
5.4 Päästömittauksen kaavat ja laskenta.....	20
6 MITTAUKSET	22
7 TULOKSET	26
7.1 Hyötysuhde	26
7.2 Ilmakerroin.....	28
7.3 Savukaasujen määrä ja koostumus	28
7.4 Savukaasujen päästöt	30
8 YHTEENVETO	32
LÄHTEET	34
LIITTEET	
KUVIOT	
KUVIO 1. Kaasutusprosessin vaiheet.....	7
KUVIO 2. Polttopuun koostumus.....	11
KUVIO 3. Invertterin vaikutus sähkötehon keskiarvoon	27
KUVIO 4. Invertterin vaikutus yhdistettyyn hyötysuhteeseen.....	28

KUVAT

KUVA 1. Walter-voimalaitoksen rakenne	3
KUVA 2. Myötävirtakaasuttimen toiminta	4
KUVA 3. Walter-voimalaitoksen kosketusnäytöllinen ohjauspaneeli	22
KUVA 4. Flexim Fluxus F601 -mittari ja lämpötilamittari mittausasetelmassa	23
KUVA 5. Walter-voimalaitoksen polttoaine	24
KUVA 6. Gasmets DX4000 FTIR	25
KUVA 7. Näytteenottosondi	25

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Savukaasun koostumus ja määrä	19
TAULUKKO 2. Savukaasun koostumus ja määrä polttoaineanalyysin pohjalta	29
TAULUKKO 3. Walter-voimalaitoksen päästöt tasaisen ajon aikana	30
TAULUKKO 4. Kuivan kaasun keskiarvo	31
TAULUKKO 5. Päästöt redusoitu 6 til.-% happipitoisuuteen ja virherajoihin	31

1 JOHDANTO

Toimeksiannon opinnäytetyölle antoi puukaasutusteknologian alan yritys, liminkalainen Volter Oy. Opinnäytetyön tavoitteena oli laskea uudistetulle CHP-voimalaitokselle hyötysuhteet. Lyhenne CHP (combined heat and power) tarkoittaa sähkön ja lämmön yhteistuotantoa. Lisäksi tiukentuvien päästörajoitusten johdosta suoritettiin päästömittaukset kannettavalla FTIR-kaasuanalysaattorilla. Hyötysuhde- ja päästömittaukset suoritettiin Volter Oy:n toimipisteellä tammikuussa 2023 ja teoriaosuus kirjoitettiin kesän ja syksyn aikana. Mittauksista vastasi Centrian tutkimus- ja kehitysyksikön asiantuntija Riku Niva ja laskelmista vastasi opinnäytetyön tekijä Pakanen.

Hyötysuhde määriteltiin CHP-voimalaitokselle suoralla menetelmällä, eli laskettiin tietyllä aikavälillä mitattujen tehojen keskiarvojen ja polttoainetehon suhteella. Laskennassa määriteltiin erikseen sähkö- ja lämpöhyötysuhteet sekä kokonaishyötysuhde. Polttoaineen koostumus määriteltiin laboratoriossa tehdyn polttoaineanalyysin perusteella.

Walter-voimalaitos on yhdistetty sähkön- ja lämmöntuottolaitos, jonka sähköteho on 50 kW ja lämpöteho 130 kW täydellä teholla käytettäessä. Voimalaitoksella voidaan tuottaa energiaa esimerkiksi maatalan, taloyhtiön tai pienyrityksen energiatarpeisiin ympäri vuoden. Voimalaitoksia voidaan myös yhdistää useamman laitoksen kokonaisuudeksi, jolloin esimerkiksi kymmenen Walter-voimalaa tuottaa täydellä teholla käytettäessä 500 kW sähkötehoa ja 1,3 MW lämpötehoa.

Työn lähdemateriaalina on käytetty kirjallisuusmateriaalia niin suomen - kuin englanninkielisenä sekä yritysten kotisivuja. Lisäksi teoriaosuudessa on hyödynnetty Centriassa pidetyn Kaasutalous ja kaasujen energiakäyttö -luennon materiaaleja. Opinnäytetyössä käsitellään ensin yrityksen historiaa ja CHP-voimalaitoksen rakennetta sekä sen toimintaa. Teoriaosuudessa käsitellään puun kaasutuksen historiaa ja prosessia, puupolttoaineen ominaisuuksia, palamisprosessia ja päästöjä sekä hyötysuhteen ja savukaasukoostumuksen laskennassa käytettäviä yhtälöitä. Työn lopussa esitetään CHP-voimalaitokselle määritetyt hyötysuhteet, savukaasun analyysi sekä päästöt.

Opinnäytetyön kulun aikana kävi ilmi tammikuussa tehdyn mittauksen aikainen polttoaineen epätarkka punnitus, joten uudelleen mittaus suoritettiin helmikuussa Volter Oy:n toimesta. Näistä mittauksista laskettiin uudet hyötysuhteet. Päästömittauksia ei tuolloin suoritettu, joten niitä ei uudessa laskennassa otettu huomioon.

2 VOLTER OY

Volter Oy:n tarina sai alkunsa, kun yrityksen perustaja Juha Sipilä sai idean mökistä, jossa sähkö tuotettaisiin omavaraisesti. Mökille rakentui vuonna 1998 oma saarekeverkko akustoineen, tuulivoimala ja dieselaggregaatti, joka myöhemmin korvattaisiin puukaasuttimella. Vuonna 2006 tuotekehityksen pohjalta syntyi puukaasuauto ”El Kamina” todistamaan konseptin toimivuutta. Bensiinin sijaan auto kävi puusta tuotetulla puukaasulla. (Volter 2023.)

Vuonna 2010 otettiin käyttöön ensimmäinen prototyyppi Volterin puuhakevoimalasta Kempeleen ekokylässä, joka oli Suomen ensimmäinen täysin energiaomavarainen asuinalue. Hanke oli ainutlaatuinen, sillä alue oli täysin uusiutuvaan energiaan perustuva. Hankkeen tavoitteena oli energiaomavaraisuus, yhteisöllisyys ja energian säästö. Vuotta myöhemmin ensimmäinen kaupallinen Volter-puuhakevoimala valmistui. (Volter 2023.)

Ensimmäinen konttimallinen Volter 40 CHP -voimalaitos valmistui 2012 ja kaksi vuotta myöhemmin Volter 40 Indoor -malli julkaistiin. Vuosien uurastus alkoi näkyä, ja Volter sai kansainvälistä huomiota omavaraisten energiatuottajien keskuudessa. Vuonna 2017 Volterin voimalaitokset tuottivat sähköä ja lämpöä pohjoismaiden ja Euroopan lisäksi Kanadassa ja Japanissa. Vuonna 2023 valmistui uusi puuhakevoimala Walter, joka on paranneltu versio edellisestä CHP-voimalaitoksesta. (Volter 2023.)

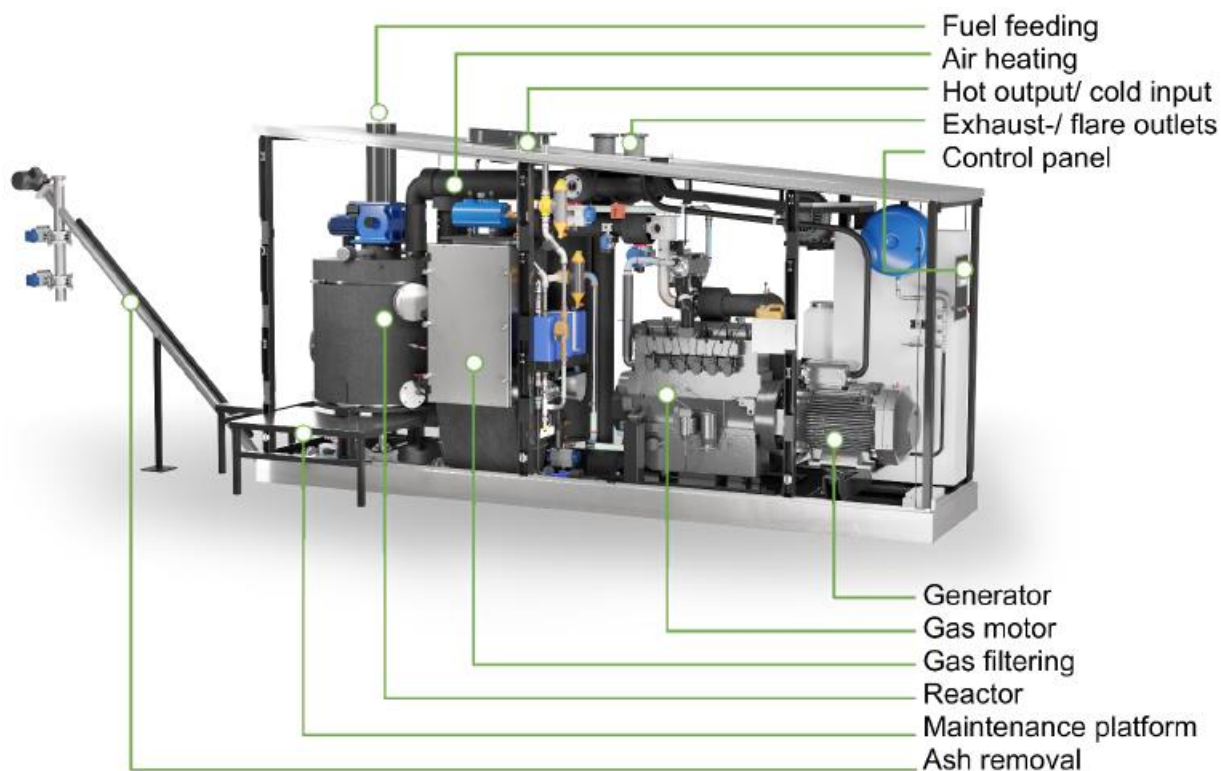
2.1 Walter-voimalaitos

Walter on yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotantolaitos, joka on noin 2 miljoonan käyttötunnin perusteella paranneltu versio Volter 40 Indoor:sta. Sen nimellinen sähköteho on 50 kilowattia ja nimellinen lämpöteho puolestaan 130 kilowattia. Kaasuttimen polttoaineena käytetään puuhaketta, jonka kosteus on alle 18 % ja vuorokausikulutus on noin 5,6 kuutiometriä palakoosta riippuen. Lämmitysveden lämpötila on säädettävissä välillä 65–85 °C, ja veden ulostulon virtaama on maksimissaan 1,4 litraa sekunnissa. (Volter 2023.)

Voimalaitos koostuu hakkeen syöttölaitteesta, myötävirtakaasuttimesta, jäädyttimestä ja puhdistuslaitteistosta sekä moottorista, generaattorista ja verkon syöttöyksiköstä. Laitteisto rakennetaan konttiin, joka

on mahdollista asentaa sisä- ja ulkokäyttöön. CHP-voimalaitos on ulkomitoiltaan 2,5 metriä korkea ja 1,2 metriä leveä ja 4,8 metriä pitkä. Painoa voimalaitoksella on 4500 kg. (Volter 2023.)

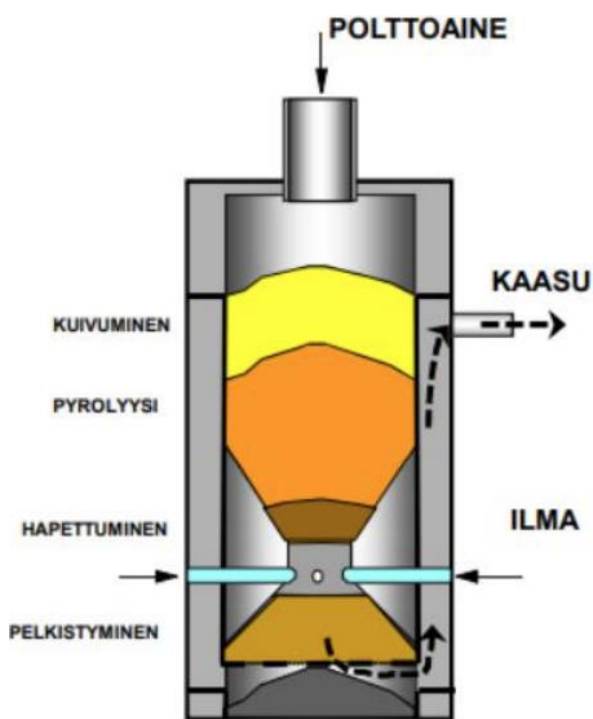
Kuvassa 1 on havainnollistettu Walter-voimalaitoksen rakenne. Polttoaineena käytettävä puuhake syötetään reaktoriin, jossa saadaan suhteellisen puhdasta puukaasua tuotettua korkeassa lämpötilassa ja alhaisessa happipitoisuudessa. Seuraavaksi kaasu jäädytetään lämmönvaihtimen avulla 200 asteen lämpötilaan ja kaasusta suodatetaan kaikki kiinteät partikkelit pois. Kaasuun sekoitetaan paloilmaa ja valmis kaasu-ilmaseos syötetään 6 sylinteriseen ja iskutilavuudeltaan 8,4 litraa olevaan AGCO Sisu Power -kaasumoottoriin. Sähkögeneraattori tuottaa energiaa moottorin tuottamasta liike-energiasta. Generaattori tuottaa 400 VAC-jännitteen 50 hertsin taajuudella. Voimalaitoksen tuottama sähkö siirretään verkkoon verkon syöttöyksikön avulla. (Volter 2023.)



KUVA 1. Walter-voimalaitoksen rakenne (Volter 2023.)

2.2 Myötävirtakaasutin

Pienissä CHP-voimalaitoksissa käytetään pääsääntöisesti myötävirtakaasuttimia. Polttoainetta syötetään kaasutusreaktorin yläosasta ja ilma tuodaan keskivaiheelta pyrolyysivaiheen jälkeen, jolloin palamisvaihe ja kaasuuntuminen alkaa. Reaktorissa syntyvä tuotekaasu ohjataan polttoaineen virtaussuunnan mukaisesti kuuman tuhkerakroksen läpi reaktorin alaosaan. Myötävirtakaasuttimesta ulostulevan kaasun tervapitoisuus on alhainen, koska terva krakkautuu. Tervojen ”krakkautumisella” tarkoitetaan niiden hajoamista korkeassa lämpötilassa kevyemmiksi kaasuiksi kuten hiilidioksidiksi, hiilimonoksidiksi, vedyksi ja metaaniksi. Myötävirtakaasuttimessa syntyvän tuotekaasun tervapitoisuus on 0,015–3 g/Nm³. (Basu 2010, 172–174.) Kuvassa 2 on esitetty myötävirtakaasuttimen toiminta.



KUVA 2. Myötävirtakaasuttimen toiminta (Hiltunen 2013.)

Myötävirtakaasuttimessa käytettävän polttoaineen tulee olla kuivaa ja polttoaineen palakoon tulee olla tasaista. Alhaisen tervapitoisuuden vuoksi myötävirtakaasuttimet soveltuvat sähkön- ja lämmöntuotantoon ja ne toimivat hyvin myös polttomoottoreiden kanssa. Erillisistä laitteistoa tuotekaasun talteenottoon ei tarvitse, sillä polttomoottorin imu puolen alipaine imee ilman ja tuotekaasun polttoainekerroksen läpi. (Basu 2010, 172–173.)

Walter-voimalaitoksessa on käytetty Imbert-tyyppistä kaasutinta rajoittavalla kurkulla. Kurkun avulla saadaan pyrolyysikaasu ja kuuma hiili kulkeutumaan kapeammalla alueella lisäten tervojen krakkautumista. Kaasu ohjataan reaktorin yläosasta jäähdytykseen sekä suodatukseen. Joihinkin myötävirtakaasutinkonsepteihin verrattuna Volterin käyttämässä kaasutintyyppissä syntyvä tuotekaasu osallistuu lämpöä johtamalla polttoaineen kuivattamiseen reaktorissa. (Volter 2023.)

3 PUUKAASUN TUOTTO

Puuperäisestä polttoaineesta saadaan lämpöarvoa sisältävää, polttoprosesseissa hyödynnettävää kaasua ”polttamalla” puuta korkeassa lämpötilassa vähähappisissa olosuhteissa. Tätä kutsutaan kaasutukseksi. Puukaasutus on lämpökäsittelyprosessi, joka perustuu kuivaukseen, pyrolyysiin, hapetukseen ja kaasutukseen. ”Kaasutuksella” viitataan sekä näihin kaikkiin neljään vaihetta sisältävään prosessiin että kaasutusvaiheeseen itse kaasutusprosessissa. Tuotekaasun lisäksi puuhakkeesta muodostuu kaasutuksen aikana hiiltä, tuhkaa ja pieniä määriä orgaanisia epäpuhtauksia. Puukaasun käyttöalueita ovat muun muassa suorapoltto joko lämmöntuotantona lämmityskattilassa tai sähkön- ja lämmöntuotantona CHP-yksikössä. Tuotekaasua voidaan puhdistuksen jälkeen jatkojalostaa ajoneuvopolttoaineiksi tai kemiallisiksi raaka-aineiksi. (Basu 2010, 119–120.)

3.1 Historia

Puuta on hyödynnetty hyödyntämisen määritelmästä riippuen tuhansia vuosia polttoaineena, mutta kaasutuksen historia alkaa vuodelta 1659, kun Thomas Shirley suoritti kaasutuskokeiluita metaanilla. Puukaasuttimen historia alkaa kuitenkin vasta 1900-luvun alusta, kun italialainen insinööri Egidio Garuffa suunnitteli edistyneen kaasugeneraattorin, joka käytti polttoaineena puuta. (Basu 2010, 2–3.)

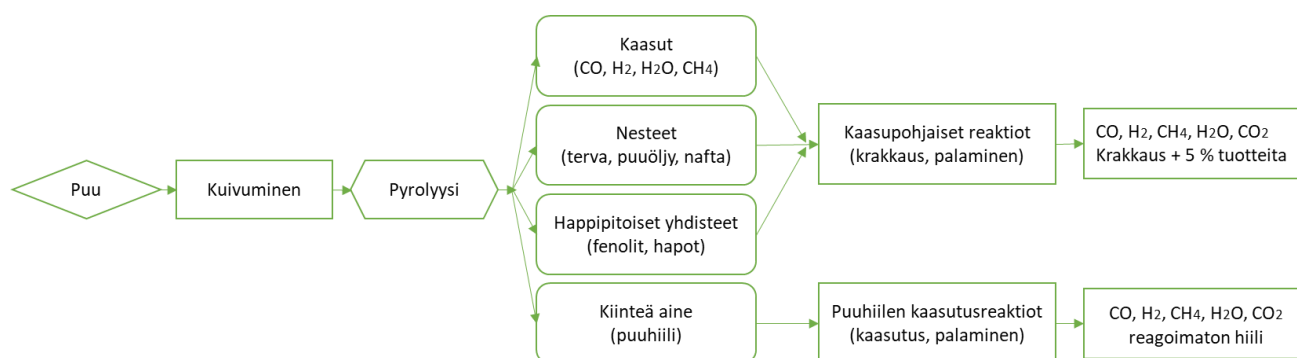
Ensimmäisen maailmansodan jälkeen puukaasugeneraattoreiden kehitykseen alettiin panostamaan öljyn saatavuusongelmien pelossa. Merkittävin puukaasuttimien kehittäjä oli saksalais-ranskalainen kemisti-insinööri George Imbert, jonka suunnittelemaa pilkekaasutinta pidetään nykyisten puukaasuttimien esinä. (Köhler 2007, 16.)

Toisen maailman sodan aikana ajoneuvoissa käytetty bensiini pääosin ohjattiin sotatantoreelle, joten puukaasuttimet otettiin laajempaan käyttöön kansalaisten autoissa. Kansanomaisesti paremmin tunnetun ”häkäpöntön” aikakausi oli ajallisesti lyhyt, kun sodan jälkeen polttoaineen saatavuus parani ja palattiin takaisin nestemäiseen polttoaineeseen. (Basu 2010, 3.)

Puukaasutin oli ehtinyt toisen maailman sodan jälkeen olla pitkälti unohduksissa lähes 30 vuotta, kunnes 1970-luvun alkupuolella maailmaa koetteli jälleen öljykriisi. Öljykriisin ja kohonneiden polttoainehintojen myötä alettiin pohtimaan vaihtoehtoisia energialähteitä ja puukaasuttimen käyttö nousi jälleen esille. Vuonna 1997 tuli Yhdysvaltojen markkinoille ensimmäinen kaupallinen kaasutinlaitos. Nykypäivänä puukaasutin nähdään uusiutuvan energian lisäämisen mahdollistavana ja energiaomavaraisuutta kohottavana mahdollisuutena, joskin raaka-ainetta voi olla rajallisesti saatavilla ja sille voi olla kilpailevaa käyttöä. (Basu 2010, 3–4.)

3.2 Prosessi

Tyypillisesti puun kaasutusprosessi etenee neljässä vaiheessa, jotka ovat kuivuminen, pyrolyysi ja hiileen kaasuuntuminen ja palaminen. Yleensä nämä vaiheet mallinnetaan sarjassa, mutta todellisuudessa niiden välillä ei ole selkeää rajaa. Kaasuttimessa tapahtuu osittaisia eksotermisiä palamisreaktioita, joista lämpöä sitovat eli endotermiset vaiheet saavat energiansa. Kuviossa 1 on havainnollistettu kaasutusprosessin vaiheet sekä syntyvät väli- ja lopputuotteet. (Basu 2010, 120.)



KUVIO 1. Kaasutusprosessin vaiheet (Basu 2010, 119.)

3.2.1 Kuivuminen

Kuivumisvaiheen tarkoitus on pienentää polttoaineen kosteuspitoisuutta. Puuhakkeen tyypillinen kosteusprosentti saapumistilassa on 30–60 %. Jokainen kilogramma vettä puuhakkeessa vähentää tuotettua

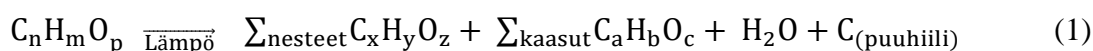
energiaa karkeasti 2260 kilojoulella. On siis tärkeää syöttää kaasuttimeen puuhaketta, josta on esikuivattu suurin osa kosteudesta pois. Syötetyn puuhakkeen kosteuden tulisi useissa tapauksissa olla noin 10–20 %, jotta kaasutin tuottaisi lämpöarvoltaan taloudellisesti kannattavaa kaasua. (Basu 2010, 120.) Toisaalta savukaasupesurilla ja mahdollisesti lämpöpumpulla varustetussa CHP-laitoksessa polttoaineen kosteus ei ole niin suuri taloudellinen kysymys, koska polttoaineen sisältämästä vedestä suurin osa saadaan lauhtumaan takaisin nestemäiseen muotoon. Toki on olemassa polttoaineesta riippuva kosteusraja, jonka ylittyessä palamisprosessi muuttuu epävakaaksi. (Suokko 2023.)

Palamisvaiheessa syntyvän lämpöenergian avulla puuhakkeen kosteus höyrystetään kaasuttimessa. Nestemäinen vesi muuttuu vesihöyryksi, kun puuhakkeen lämpötila kohoaa yli 100 asteeseen. Lämpötilan noustessa kevyet molekyyliainekset alkavat haihtua ja kuivuminen jatkuu aina 200 asteeseen. (Basu 2010, 120.)

3.2.2 Pyrolyysi

Pyrolyysi eli kuivatus on olennainen vaihe kaasuttimessa. Se on lämpökemiallinen prosessi, jossa pyrolysoitavaa materiaalia lämmitetään hapettomassa olosuhteissa tai rajallisessa hapen määrässä. Pyrolyysiprosessit voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan, nopeaan ja hitaaseen pyrolyysiin. Nopea pyrolyysi tapahtuu korkeassa lämpötilassa ja hidas pyrolyysi alhaisessa lämpötilassa. Kaasua saadaan muodostumaan mahdollisimman paljon, kun pyrolyysi tapahtuu hitaasti korkeassa lämpötilassa. (Basu 2010, 65.)

Pyrolyysireaktiossa puuhakkeen sisältämät isot monimutkaiset hiilivetymolekyylit hajoavat pienimmiksi ja yksinkertaisimmiksi kaasuihin ja nestemolekyyleiksi sekä kiinteäksi hiileksi. Toimintalämpötilaväli pyrolyysissa on 300–600 °C. Pyrolyysiprosessi voidaan esittää yhtälön 1 mukaisesti:



Kuten yhtälöstä yksi on havaittavissa, pyrolyysireaktion päätuotteita ovat kiinteät tuotteet, nesteet ja kaasut. Kiinteitä tuotteita ovat puuhiili ja puhdas hiili, nesteitä ovat raskaammat hiilivedyt ja vesi ja kaasuja ovat hiilimonoksidi, hiilidioksidi ja useat eri hiilivedyt. Tuotteiden keskinäiset suhteet riippuvat polttoaineen lisäksi partikkelikoosta, lämmitysnopeudesta ja lopullisesta pyrolyysilämpötilasta. Terva

on pyrolyysin aikana syntyvä haittatuote, koska osa muodostuneista kaasuista tiivistyy nesteeksi. (Basu 2010, 68.)

3.2.3 Kaasuuntuminen

Pyrolyysin jälkeen seuraava vaihe on kaasuttaminen, missä kaasuttava aine voi olla ilmaa, vesihöyryä, happea, hiilidioksidia tai näiden seosta. Kaasuttava aine saa aikaiseksi kemiallisten sidosten uudelleenjärjestäytymisen, jolloin kiinteästä hiilestä ja hiilivedyistä muodostuu pienimolekyylisiä kaasuja, kuten hiilimonoksidia ja vetyä. Toimintalämpötilaväli kaasutuksessa on tyypillisesti 800–1000 astetta. (Basu 2010, 65, 118–120.)

Tärkeimmät kaasutusvaiheessa tapahtuvat reaktiot ovat puuhiilen reaktiot. Ne ovat pääosin endotermisiä eli lämpöä sitovia reaktioita kaasuttavan aineen ja puuhiilen välillä. Puuhiili reagoi herkemmin kuin muut vastaavat polttoaineet, koska se on erittäin huokoista ainetta. Puuhaketta kaasutettaessa tulee lämpötilan olla korkea, jotta reaktiot tapahtuvat oikeaan suuntaan muodostaen hiilimonoksidia yhtälöiden 2 ja 3 mukaisesti. Shift-reaktiossa eli vesi-kaasureaktiossa syntyy hiilidioksidia ja vetyä yhtälön 4 mukaisesti. Metaania syntyy yhtälön 5 mukaisesti, kun kaksi vetymolekyyliä yhdistyy hiilen kanssa. Negatiivinen vapauttaa energiaa ja positiivinen sitoo energiaa.

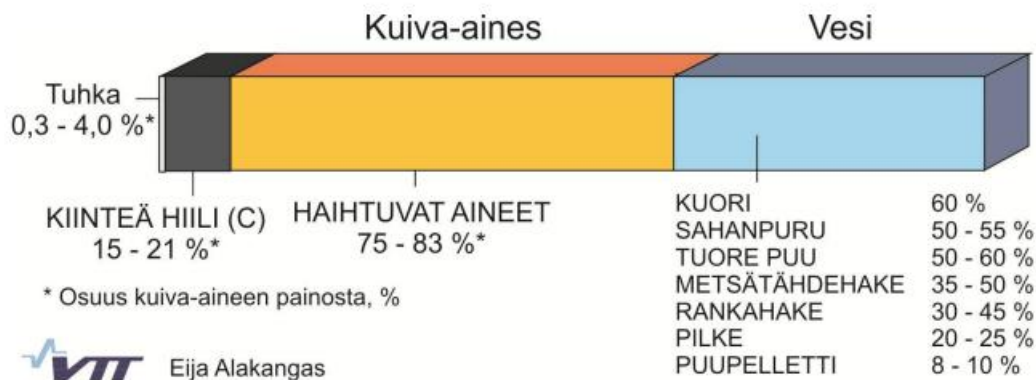


Endotermisiä reaktioita suosimalla saadaan kaasutuksesta mahdollisimman suuri energiasisältö käyttövalmiiseen kaasuun. Eksotermisiä eli lämpöä luovuttavia reaktioita tulee tapahtua, jotta energiaa saadaan kuivumiseen, pyrolyysiin ja kaasuuntumiseen, ellei kaasutukseen tuoda energiaa ulkoa. (Basu 2010, 121–123.)

Kaasutus ja palaminen ovat molemmat termokemiallisia prosesseja, mutta ne eivät tarkoita samaa asiaa. Kaasutus sitoo energiaa ja vedyn määrä lisääntyy, kun puolestaan palaminen rikkoo sidokset vapauttaen energiaa ja vety yhtyy happeen muodostaen vesihöyryä. Palamisreaktiot tapahtuvat vähintään yhtä kertaluokkaa nopeammin kuin kaasutusreaktiot. (Basu 2010, 126.)

4 PUUPOLTTOAINEEN OMINAISUUDET

Puun kuiva-aines koostuu hiilestä (C), hapestasta (O) ja vedystä (H) sekä lisäksi pienistä määristä typpeä (N), rikkiä (S) ja tuhkaa. Puun kuiva-aineessa on paljon haihtuvia ainesosia, joten polttoprosessi tapahtuu pitkällä liekillä ja vaatii suuren palotilan. Kuviossa 2 on havainnollistettu puun koostumus. (Alakangas, Hurskainen, Korhonen & Laatikainen-Luntama 2016, 54.)



KUVIO 2. Polttopuun koostumus (Alakangas ym. 2016, 55.)

4.1 Lämpöarvo

Lämpöarvo on energiantuotannon kannalta tärkein polttoaineen ominaisuus, joka ilmentää polttoainemäärää kohti polttoaineesta poltettaessa saatavan energian. Kalorimetrisellä eli ns. ylemmällä lämpöarvolla tarkoitetaan lämpöenergian määrää, joka vapautuu aineen palaessa täydellisesti ja palamistuotteet jäähtyvät +25 asteen lämpötilaan. Kalorimetristä lämpöarvoa määriteltäessä polttoaineen sisältämän vedyn palamistuotteena syntyvän veden ja polttoaineen sisältämän kosteuden oletetaan olevan nestemäisessä muodossa. (Alakangas ym. 2016, 28.)

Standardin SFS-EN ISO 18125:2017 ”Solid biofuels. Determination of calorific value” mukaan määritellään puun kalorimetrinen lämpöarvo. Ilmakuivattu näyte punnitaan ja poltetaan korkeapaineistetussa hapessa kalorimetripommissa standardin mukaisissa olosuhteissa. Samasta analyysinäytteestä määritetään kosteus, jonka avulla lämpöarvo muutetaan vastaamaan absoluuttisen kuivan näytteen arvoa. (Alakangas ym. 2016, 28; SFS-EN ISO 18125:2017.)

Hyötysuhdelaskemissa käytetään pääsääntöisesti polttoaineen tehollista- eli alempaa lämpöarvoa, joka vastaa paremmin todellisia käyttöoloja. Tehollista lämpöarvoa määriteltäessä vähennetään ylemmästä lämpöarvosta energiamäärä, joka käytetään polttoaineen palamisesta syntyvän veden haihduttamiseen. Yhtälön 6 mukaisesti lasketaan kalorimetrisestä lämpöarvosta polttoaineen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo:

$$q_{p,net,d} = q_{v,gr,d} - 212,2 * w(H)_d - 0,8 * [w(O)_d + w(N)_d] \quad (6)$$

missä $q_{p,net,d}$ on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo vakiopaineessa, J/g,
 $q_{v,gr,d}$ on kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo vakiotilavuudessa, J/g,
 $w(H)_d$ on kuivan polttoaineen vetypitoisuus, m-%,
 $w(O)_d$ on kuivan polttoaineen happipitoisuus, m-% ja
 $w(N)_d$ on kuivan polttoaineen typpipitoisuus, m-%.

(Alakangas ym. 2016 28; SFS-EN ISO 18125:2017.)

Alin ilmoitettava lämpöarvo on tehollinen lämpöarvo saapumistilassa. Se määritellään vähentämällä tehollisesta lämpöarvosta energiamäärä, joka käytetään polttoaineen luontaisesti sisältämän ja palamisessa syntyvän veden haihduttamiseen. Yhtälön 7 mukaisesti lasketaan tehollinen lämpöarvo saapumistilassa:

$$q_{p,net,ar} = q_{p,net,d} * \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0,02443 * M_{ar} \quad (7)$$

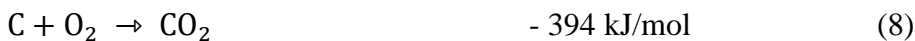
missä $q_{p,net,ar}$ on polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg,
 $q_{p,net,d}$ on polttoaineen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg,
 M_{ar} on polttoaineen kosteus saapumistilassa, m-% ja
0,02243 on höyrystymisentalpian korjauskerroin vedelle 25 asteen lämpötilassa.

(Alakangas ym. 2016, 29; SFS-EN ISO 18125:2017.)

4.2 Palamisreaktiot

Reaktioyhtälöiden avulla saadaan selville palamisessa tarvittava stoikiometrinen happi- ja ilmamäärä sekä teoriassa syntyvä savukaasun määrä. Palamisilman tarve ja savukaasulaskujen kannalta on tunnettava puupolttoaineen palavien alkuainekomponenttien eli hiilen, vedyn ja rikin reaktiot hapen kanssa. On tunnettava myös polttoaineen sisältämän hapen, hiilen, vedyn ja tuhkan osuudet. Polttoaineen sisältämä happi vähentää osaltaan palamisreaktiossa tarvittavaa happimäärää. Polttoaineessa mahdollisesti olevat inerttikaasut eli hiilidioksidi, typpi ja vesihöyry eivät reagoi hapen kanssa vaan siirtyvät sellaisinaan savukaasuihin. (Hupa, Kurki-Suonio, Raiko & Saastamoinen 2002, 37.)

Todellisuudessa puun palaminen on kemiallisesti erittäin monimutkainen tapahtumaketju. Nettoreaktiot eli yhtälöistä selviävät lähtöaineet ja lopputuotteet riittävät teoreettisen palamisilmantarpeen määrittämiseen ja teoriassa muodostuvien savukaasujen laskentaan. Puupolttoaineen tärkein palava komponentti on hiili, joka reagoi happiylijäämästä hapen kanssa hiilidioksidiksi reaktioyhtälön 8 mukaisesti:



Hiili reagoi hapen kanssa, jolloin syntyy hiilidioksidia ja lämpöä vapautuu 394 kilojoulea moolia kohti. Yhtälöstä nähdään myös, että yksi mooli hiiltä vaatii täydellisesti palaakseen yhden moolin kaksiatomista happea. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 83–84.)

Vedyn ja hapen reagoidessa keskenään syntyy vettä yhtälön 9 mukaisesti:



Kuten yhtälöstä 9 nähdään, kaksi moolia vetyä tarvitsee palaakseen yhden moolin kaksiatomista happea, jolloin tuloksena on kaksi moolia vettä. Lämpöä vapautuu reaktiossa 242 kilojoulea moolia kohti. Vedyn palaessa syntyy puhdasta vesihöyryä, minkä vuoksi paljon vetyä sisältäviä polttoaineita pidetään ympäristön kannalta hyvinä polttoaineina. (Huhtinen ym. 2000, 84.)

Rikin reagoidessa hapen kanssa syntyy rikkidioksidia yhtälön 10 mukaisesti:



Reaktioyhtälön mukaan yksi mooli rikkiä vaatii täydellisesti palakseen yhden moolin kaksiatomista happea. Reaktion aikana vapautuu lämpöä 9,2 kilojoulea moolia kohti. Polttoaineessa oleva rikki on palaessaan energiaa vapauttava komponentti, mutta haitallinen tulipesälle ja ympäristölle. (Huhtinen ym. 2000, 84.)

4.3 Savukaasut

Savukaasut ovat palamisessa poistuvia kaasuja, joiden koostumukseen vaikuttaa polttoaineen koostumus ja palamisilman määrä polttoainetta kohti. Stoikiometrisissa eli teoreettisissa olosuhteissa jokaisen palavan komponentin palaessa syntyy palamistuotetta yhtä monta moolia kuin polttoaineessa on palavaa komponenttia. Palamistuotteiden lisäksi savukaasuissa on ilman mukana tullutta typpeä, jota on 3,77-kertainen määrä palamisessa tarvittavaan happeen verrattuna. (Huhtinen ym. 2000, 86–87.)

Polttoprosessi tulee säätää siten, että savukaasuissa esiintyy ainoastaan vähäisiä määriä palaamattomia aineita. Tämä edellyttää poltettavan polttoaineen riittävän pitkää viipymäaika korkeassa lämpötilassa sekä siitä, että palamisilmaa on ylimäärin polttoaineen stoikiometriseen palamiseen nähden. Viipymäaika lasketaan voimalaitoksen mitoituksen ja ominaisuuksien sekä poltettavan aineen palamisominaisuuksien perusteella. Savukaasuanalyseja tehdään, jotta palaminen saadaan säädettyä optimiksi ja näin saadaan samalla vähennettyä palamisessa muodostuvia haitallisia päästöjä. Savukaasupäästöt aiheuttavat ympäristölle ja ihmisille haittavaikutuksia kuten hengitysoireita, happamia sateita ja ilmaston lämpenemistä. (Mäki & Posio 2004, 2.)

4.4 Päästöt

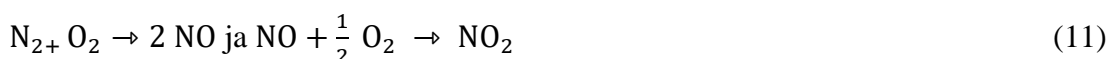
Polttoaineen laatu vaikuttaa olennaisesti päästöihin ja hyötysuhteeseen etenkin pienemmissä teholuokissa. Polton hallintaa ja haitallisten päästöjen määrää vähennetään kosteudeltaan ja palakooltaan tasaisella polttoaineella. Palamisreaktion seurauksena savukaasut sisältävät palamistuotteina muodostunutta hiilidioksidia, vettä ja rikkidioksidia. Näiden lisäksi savukaasuissa on polttoaineesta ja palamisilmasta tulleita komponentteja. Savukaasuihin päätyneiden ilmasta peräisin olevat kaasut kuten kaksiatominen typpi, happi ja argon eivät ole haitallisia ympäristölle. Hiilidioksidi, rikkidioksidi ja lentotuhka sekä hiilimonoksidi eli häkä, hiilivedyt ja typen oksidit ovat ympäristölle haitallisia kaasuja. Vesi on palamistuotteista ainoa, jota ei pidetä ympäristölle vahingollisena. (Huhtinen ym. 2000, 91.)

Palamisilman alhaisuus aiheuttaa epätäydellisen palamisen, ja tämän seurauksena osa polttoaineen hiilestä reagoi hapen kanssa vain hiilimonoksidiksi asti. Reaktiossa syntyy hiilimonoksidia ja lämpöä vapautuu 111 kilojoulea moolia kohti. Hiilidioksidin verrattuna lämpöä vapautuu vain neljännes reaktioyhtälön aikana. Häkäpitoisuus kuvastaa palamisen puhtautta ja on suhteessa muiden päästöjen määrään. Häkäpitoisuuden kasvaessa lisääntyvät typpioksiduulin eli ilokaasun ja hiilivetyjen päästöt jyrkästi. Typpioksiduuli on merkittävä kasvihuonekaasu. (Huhtinen ym. 2000, 91; Flyktman, Impola & Linna 2012, 5.)

Hiilivedyt ovat savukaasuissa palamatta jäänyttä polttoainetta, minkä vuoksi niitä esiintyy yleensä häkä- ja palamattomien päästöjen yhteydessä. Hiilivetyjä ovat muun muassa metaani, etaani ja propaani. Hiilivetypäästöjen syynä on häkäpäästöjen tapaan polttoaineen ja palamisilman huono sekoittuminen tai liian epäoptimaalinen polttoaineen ja palamisilman sekoitussuhde. Lisäksi alhainen lämpötila tulipesässä aiheuttaa hiilivetypäästöjen syntymistä. (Huhtinen ym. 2000, 92.)

Polttoaineen rikkipitoisuus vaikuttaa rikkidioksidipäästöihin. Puupolttoaineen rikkipitoisuus on niin alhainen, että sen SO₂ -päästöjä ei ole tarpeen tarkastella lähemmin päästömittauksessa. Rikkidioksidipäästöt ovat myös ympäristölle haitallisia. (Huhtinen ym. 2000, 92.)

Polttoaineen typpipitoisuus ja polttoaineen kosteus sekä palamiskaasujen lämpötilan ja happipitoisuuden jakautuminen vaikuttavat typen oksidien päästöihin. Typpimonoksidia ja typpidioksidia syntyy, kun typpi ja happi reagoivat keskenään yhtälön 11 mukaisesti:



Typpioksidipäästöjä mitattaessa monoksidien ja dioksidien välille ei tehdä eroa, vaan nimitetään niiden yhteenlasketuista päästöistä nimitystä NO_x. Typpioksidipäästöjä pyritään rajoittamaan, sillä ne happeamittavat ympäristöä. Typpipäästöjen lähteenä voi olla polttoaineen tai palamisilman mukana tullut typpi. (Huhtinen ym. 2000, 92–93.)

5 LASKENNAN TEORIA

Mittaus- ja analyysitulosten pohjalta määritetään hyötysuhteet, ilmakerroin ja savukaasujen koostumus. Hyötysuhteiden laskennassa sovelletaan DIN 1942 standardia. Hyötysuhdemäärityksissä on käytössä kaksi menetelmää: suora ja epäsuora. Suorassa menetelmässä voimalaitoksesta saatavaa tehoa verrataan sisään tuotuun energiaan. Epäsuorassa menetelmässä voimalaitoksen hyötysuhde lasketaan häviöiden kautta. Häviöt koostuvat polttoprosessissa palamattoman polttoaineen häviöistä, savukaasun termisistä häviöistä, tuhkan termisistä häviöistä sekä säteily- ja johtumishäviöistä. (Huhtinen ym. 2000, 101.) Tässä työssä hyötysuhteet lasketaan suoralla menetelmällä.

Polttoaineen koostumus, tiheys ja kosteus voivat vaihdella paljon, jolloin ilmakerroin voidaan laskea savukaasuista mitatun happipitoisuuden tai hiilidioksidipitoisuuden mukaan. Polttoaineanalyysin pohjalta määritetään savukaasujen koostumus sekä stoikiometrisen palamisen ilmamäärä. (Hupa, ym. 2002, 37.)

Savukaasulaskuilla pyritään selvittämään hapen tarve tietyn polttoainemäärän palaessa täydellisesti. Hapen tarpeen perusteella saadaan määriteltyä ilman tarve täydelliseen palamiseen. Savukaasulaskuilla pyritään myös selvittämään savukaasujen määrä ja savukaasuihin päätyvien komponenttien kuten CO_2 , SO_2 , N_2 ja H_2O pitoisuudet ja kokonaismäärä. Pitoisuudet redusoidaan eli muunnetaan yleensä vaadittuun savukaasun jäännöshappipitoisuuteen, joka vaihtelee laitoksen ja maan mukaan. Suomessa kiinteillä polttoaineilla se on 6 til.-%. Savukaasuja laskemalla saadaan täydellisen palamisen aiheuttamat teoreettiset päästöt, ja mittaamalla savukaasuja saadaan määritettyä todelliset palamisen aikana syntyvät päästöt. (Huhtinen ym. 2000, 85.)

5.1 Hyötysuhde

CHP-voimalaitoksen hyötysuhteiden laskenta suoralla menetelmällä tarkoittaa, että mitattujen tehojen keskiarvo ja polttoainetehon suhde lasketaan tietyltä aikaväliltä. Voimalaitokseen syötettävä polttoaineteho on riippuvainen polttoaineen alemmasta eli tehollisesta lämpöarvosta (LHV) toimituskosteudessa ja polttoaineen massavirrasta. Polttoaineen alempi lämpöarvo saapumistilassa on määritetty polttoaineanalyysissä. Polttoaineteho saadaan laskemalla yhtälön 12 mukaisesti:

$$\dot{Q}_{\text{tuotu}} = \dot{m}H \quad (12)$$

missä \dot{Q}_{tuotu} on polttoaineen teho, kW,
 \dot{m} on polttoaineen massavirta, kg/s ja
 H on polttoaineen lämpöarvo, kW.

(Pietilä 2005, 13–14.)

Laskennassa määritetään voimalaitoksen sähkö- ja lämpöhyötysuhteet. Suora hyötysuhde lasketaan yhtälön 13 mukaisesti:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{hyöty}}}{\dot{Q}_{\text{tuotu}}} \quad (13)$$

missä η on hyötysuhde, %,
 $\dot{Q}_{\text{hyöty}}$ on tehon keskiarvo ja
 \dot{Q}_{tuotu} on polttoaineen teho, kW.

(Huhtinen ym. 2000, 101.)

Yhdistetty hyötysuhde voidaan laskea sähkön- ja lämmöntuoton hyötysuhteiden määrittämisen jälkeen. Hyötysuhde lasketaan suoralla menetelmällä laskettujen tehojen keskiarvojen sekä syötetyn polttoaineen tehon suhteena.

5.2 Palamisilma ja ilmakerroin

Puun polttamiseen tarvittava happi saadaan kuivasta ilmasta, jossa sitä on likimain 21 tilavuusprosenttia. Hapen lisäksi ilmassa on typpeä 79 tilavuusprosenttia. Palamiseen tarvittava ilmamäärä saadaan lasketuksi kertomalla palamisreaktioissa tarvittava hapen määrä luvulla 4,76 yhtälön 14 mukaisesti:

$$V_{\text{ilma}} = 4,76 * V_{\text{O}_2} \quad (14)$$

missä V_{ilma} on tarvittava ilmamäärä,
 4,76 on ilman tarve laskettuun hapen tarpeeseen nähden ja

V_{O_2} on tarvittava hapen määrä.

(Pietilä 2005, 9.)

Hapen ja palavien alkuaineiden täydellisellä sekoittumisella palamiseen riittää teoreettinen eli stoikiometrinen ilmamäärä. Todellisuudessa täydellisestä sekoittumisesta ei ole, vaan täydellisen palamisen saavuttamiseksi on käytettävä teoreettisesti suurempaa ilmamäärää. Palamisilman määrän määritettyä stoikiometrisessa palamisessa ja todellisen palamisilman määrän ollessa tiedossa voidaan laskea ilmakerroin yhtälön 15 mukaisesti:

$$\lambda = \frac{L}{L_0} \quad (15)$$

missä λ on ilmakerroin,
 L on todellisen palamisilman massavirta ja
 L_0 stoikiometrisen palamisilman massavirta.

(Pietilä 2005, 9.)

Ilmakerroin voidaan myös laskea savukaasuista mitatun happipitoisuuden mukaan. Tämä perustuu siihen, että teoreettisessa poltossa ilmakertoimen ollessa yksi on savukaasujen happipitoisuus nolla. Palamisilmaa lisättäessä alkaa savukaasujen happipitoisuus kasvaa. Polttoaineen teoreettisen kuivan savukaasuvirran ja ilmavirran suhde on hyvin lähellä yhtä. Polttoaineen massavirta on pieni palamisilman massavirtaan nähden, jolloin ilmakerroin voidaan määrittellä yhtälön 16 mukaisesti:

$$\lambda = \frac{21}{21 - X_{O_2, \text{mitattu}}} \quad (16)$$

missä λ on ilmakerroin,
 21 on kuivan ilman pitoisuus, til.-% ja
 $X_{O_2, \text{mitattu}}$ on mitattu happipitoisuus savukaasussa, til.-%.

(Huhtinen ym. 2000, 87.)

5.3 Savukaasujen koostumus ja määrä

Polttoaineen koostumuksen ja palamisreaktioiden avulla saadaan määritettyä savukaasun koostumus ja määrä. Savukaasulaskun lähtötiedoiksi tarvitaan polttoaineen kuiva-ainekoostumus, kosteusprosentti ja poltossa käytettävä ilmakerroin. Alkuainekoostumus ja kosteusprosentti saadaan määritettyä laboratoriossa tehdystä polttoaineanalyysistä. (Hupa ym. 2002, 37.)

Kirjallisuudesta voidaan käyttää laskemisen apuna taulukon 1 mukaista taulukkoa. Taulukkoon merkitään polttoaineen koostumus sekä prosentteina että grammoina kilogrammassa, komponenttien moolimassa ja tarvittava hapen määrä, joka määräytyy palamisen reaktioyhtälöiden perusteella. (Hupa ym. 2000, 38.)

TAULUKKO 1. Savukaasujen koostumus ja määrä (Hupa ym. 2002, 38.)

Aine	Lähtöaineet						Savukaasut			
	M_x (g/mol)	m_x (% dry)	m_x (% wet)	m_x (g/kg pa.)	n_x (mol/kg pa.)	n_{O_2} (mol/kg pa.)	n_{CO_2} (mol)	n_{SO_2} (mol)	n_{N_2} (mol)	n_{H_2O} (mol)
C	12,011									
H ₂	2,016									
S	32,066									
O ₂	31,999									
N ₂	28,013									
H ₂ O	18,015									
Tuhka										
Yhteensä		100	100	1000						
Typeä palamisilmasta [mol]										
Palamisilmaa yhteensä [mol]										
Palamisilma 1,0 kg haketta										
O ₂										
N ₂										
Palamisilmaa yhteensä [kg]										
Savukaasu komponentit [mol]										
Savukaasuja yhteensä [mol]										

Laboratoriossa tehdystä alkuainemäärityksestä saadaan selville niin kuivan kuin kostean kaasun prosentuaalinen massaosuus polttoaineessa. Kostean kaasun prosenttiosuudella voidaan laskea aineen määrä grammoina yhdessä kilogrammassa kosteaa polttoainetta. Aineen määrä voidaan laskea yhtälön 17 mukaisesti:

$$n_x = \frac{m_x}{M_x} \quad (17)$$

missä n_x on ainemäärä mooleina,
 m_x on aineen massaosuus ja
 M_x on aineen moolimassa.

(Hänninen, Karppinen, Leskelä, Pohjakallio 2018, 252.)

Kuten luvussa 4.2 Palamisreaktiot mainitaan, jokaiselle palavalle alkuaineelle voidaan kirjoittaa palamisreaktiot, joiden mukaan saadaan selvitettyä stoikiometrinen happimäärä. Hiilen, vedyn ja rikin lisäksi palamisen aikana syntyy inerttikaasuja, jotka eivät reagoi kemiallisesti vaan siirtyvät sellaisinaan suoraan palamiskaasuun. Inerttikaasuja ovat hiilidioksidi, typpi ja vesi. Palamisen aikana syntyvä tuhka ei siirry laisinkaan savukaasuihin. Savukaasun määrä mooleina saadaan summaamalla kaikki ainemäärät yhteen. (Hupa ym. 2002, 37.)

5.4 Päästömittauksen kaavat ja laskenta

Voimalaitoksen päästöt voidaan selvittää savukaasuista savukaasumittauksen avulla. Savukaasumittaukset suoritetaan Fourier-muunnosta hyödyntävällä infrapunaspektroskopiolla. FTIR-päästömittauslaitteisto mittaa päästöt kosteasta savukaasusta ja ilmoittaa tulokset ppm-muodossa. Ppm (particles per million) tarkoittaa yhtä miljoonasosaa. Jotta tulos saadaan kuivan savukaasun muotoon, tulee kostean savukaasun ppm-arvo muuttaa kuivan savukaasun muotoon mg/Nm^3 . Muutos tehdään yhtälön 18 mukaisesti:

$$c_{\text{mg}/\text{Nm}^3} = c_{\text{ppm}} * \frac{M}{22,4} \quad (18)$$

missä $c_{\text{mg}/\text{Nm}^3}$ on komponentin kuivapitoisuus yksikössä, mg/Nm^3 ,
 c_{ppm} on komponentin kosteuspitoisuus yksikössä, ppm,
 M on komponentin moolimassa, g/mol ja
 22,4 on ideaalikaasun moolitilavuus normaalitilassa, l/mol.

(VTT 2007, 52.)

Yhtälön 19 mukaisesti lasketaan komponentin kuivapitoisuus kosteuspitoisuuden ja veden määrän avulla:

$$C_{\text{kuiva}} = C_{\text{kosteaa}} * \frac{1}{1 - \frac{c_{\text{H}_2\text{O}}}{100}} \quad (19)$$

missä C_{kuiva} on komponentin kuivapitoisuus, mg/Nm³,
 C_{kosteaa} on komponentin kosteuspitoisuus, ppm ja
 $c_{\text{H}_2\text{O}}$ on vesihöyryn osuus, til.-%.

(VTT 2007, 52.)

Yhtälössä 20 yhdenmukaistetaan pitoisuudet vastaamaan tiettyä jäännöshappipitoisuutta:

$$C_{\text{O}_2\text{-muunnettu}} = C_{\text{kuiva}} * \frac{21 - O_{2,\text{vertailu}}}{21 - O_{2,\text{mitattu}}} \quad (20)$$

missä $C_{\text{O}_2\text{-muunnettu}}$ on redusoitu arvo,
 21 on kuivan ilman määrä, til.-%,
 C_{kuiva} on komponentin kuivapitoisuus, mg/Nm³,
 $O_{2,\text{vertailu}}$ on vertailu happipitoisuus, til.-% ja
 $O_{2,\text{mitattu}}$ on mitattu happipitoisuus, til.-%.

(VTT 2007, 52.)

6 MITTAUKSET

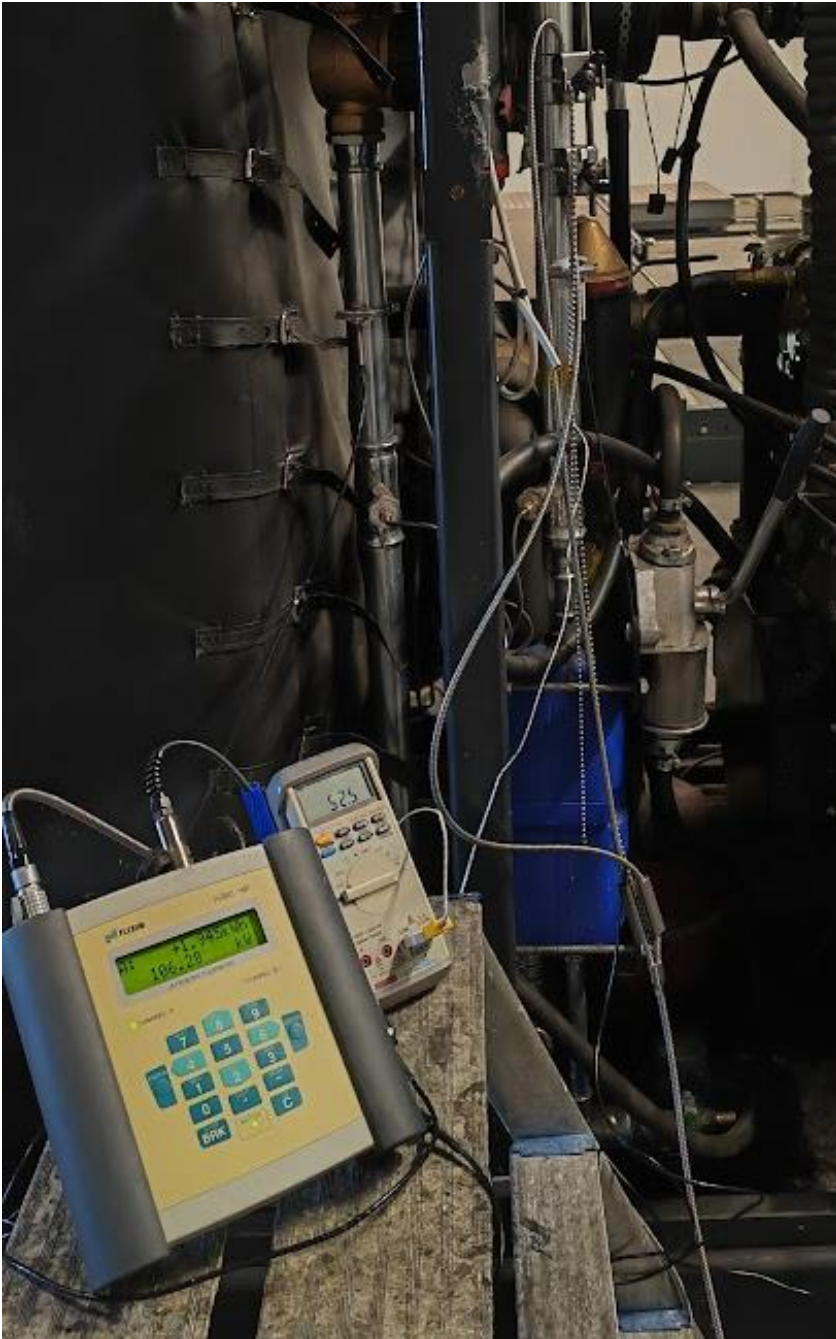
Tammikuussa 2023 suoritettiin mittaukset Volter Oy:n toimitiloissa Limingassa. Mittauksien tarkoituksena oli tuottaa dataa, jonka avulla sai laskettua Walter-voimalaitokselle hyötysuhde ja määriteltyä päästöarvot. Mittaukset suoritettiin 1 tunnin ajalta voimalaitoksen käydessä täydellä teholla niin, että prosessi oli suhteellisen tasainen. Mittausasetelmista vastasi Centrian tutkimus- ja kehitysyksikön asiantuntijan Riku Niva ja avustajana toimi opinnäytetyön tekijä Pakanen.

CHP-voimalaitoksen hyötysuhteen määrittämiseen olennaiset mittaukset suoritettiin Centria-ammattikorkeakoulun Flexim Fluxus F601 -mittarilla sekä Volterin Sontex Supercal 531- ja Schneider Electric iEM3255 -mittareilla. Centrian mittarilla pystyttiin määrittelemään voimalaitoksen lämpöteho ja Volterin mittareilla laitoksen lämpö- ja sähköteho. Kuvassa 3 on voimalaitoksen Schneider Electricin Magelis-ohjauspaneeli.



KUVA 3. Walter-voimalaitoksen kosketusnäyttölinen ohjauspaneeli

Flexim Fluxus F601 -mittarin virtausanturit asetettiin mittaamaan veden virtaamaa menoputken ulko-kuorelle. Ennen mittauksen aloittamista mittariin syötettiin lähtötietoina vesiputken materiaali, halkaisija ja paksuus. Lämpötilamittarin avulla mitattiin menoveden lämpötilaa. Voimalaitoksen lämpötehon mitaus Centrian mittarilla on esitetty kuvassa 4.



KUVA 4. Flexim Fluxus F601 -mittari ja lämpötilamittari mittausasetelmassa

Voimalaitoksen polttoaineena käytettiin metsäpuuhaketta, joka syötettiin punnituksen jälkeen manuaalisesti reaktoriin. Lisätyn polttoaineen määrät ja lisäsjankohdat kirjattiin ylös myöhempää tarkastelua varten. Kuvassa 5 on kuvattu polttoaineena käytettyä puuhaketta. Polttoaineen laatu pysyi silmämääräisesti tasalaatuisena koko mittauksen ajan.



KUVA 5. Walter-voimalaitoksen polttoaineena käytetty puuhake

Savukaasumittaukset suoritettiin Gasmets DX4000 FTIR-savukaasuanalysaattorilla, joka on Fourier-muunnosinfrapunatekniikkaan perustuva päästömittausjärjestelmä. Tekniikkaa käytetään kohteissa, jotka vaativat useiden parametrien jatkuvaa mittaamista samanaikaisesti. Useimmat kaasut absorboivat eli imevät infrapunavaloa infrapunaspektrin aallonpituuksilla. Kaasujen molekyyli rakenne määrittelee absorptioiden sijainnin ja voimakkuuden. Jokaisella kaasulla on yksilöllinen absorptiospektri, jota voidaan sormenjäljen tapaan käyttää näytteen kaasujen tunnistamiseen ja mittamiseen. FTIR on tehokas kaasunmittausteknologia, jonka avulla pystytään mittaamaan jopa 50 eri kaasua yhtä aikaa. Gasmets-analysaattorilla voidaan analysoida tuloksia kosteista kaasuista. (Gasmets 2023.)

Kuvissa 6 ja 7 on kuvattu Gasmets-mittauslaitteisto. Kuvassa 6 keskellä on näytteenottojärjestelmä ja tietokoneen alla on FTIR-analysaattori. Analysaattori on kytketty tietokoneeseen, joka kerää mittaus-

arvoja minuutin välein koko mittauksen ajan. Kuvassa 7 Gaset-järjestelmään kuuluva näytteenottosondi on asennettu paikoilleen mittaamaan savukaasun koostumusta. Näytteenottosondiin on integroitu ZrO_2 -happianturi.



KUVA 6. Gaset DX4000 FTIR



KUVA 7. Näytteenottosondi

7 TULOKSET

Mittaustulosten pohjalta laskettiin Walter-voimalaitokselle teoreettiset hyötysuhteet sekä määritettiin savukaasun määrä ja koostumus. Opinnäytetyön kulun aikana kävi ilmi, että tammikuussa tehdyssä mittauksessa oli polttoaineen kulutus oletettua suurempi. Tämän vuoksi Volter Oy suoritti helmikuussa uuden mittauksen, jonka tulosten pohjalta laskettiin hyötysuhteet uudelleen. Toisella mittauksella polttoaineanalyysia ja savukaasumittauksia ei tehty, joten hyötysuhdetta uudelleen määrittäessä käytettiin oletuksena ensimmäisen mittauksen polttoaineen lämpöarvoa. On siis syytä suhtautua hyötysuhdelaskelmaan hienoisella varauksella.

Walter-voimalaitoksessa on käytetty invertteri-teknologiaa sähköä siirtämiseksi generaattorilta sähköverkkoon. Kuvioissa 3 ja 4 on vertailtu invertterin vaikutusta sähköä tuoton keskiarvoon ja yhdistettyihin hyötysuhteisiin.

7.1 Hyötysuhde

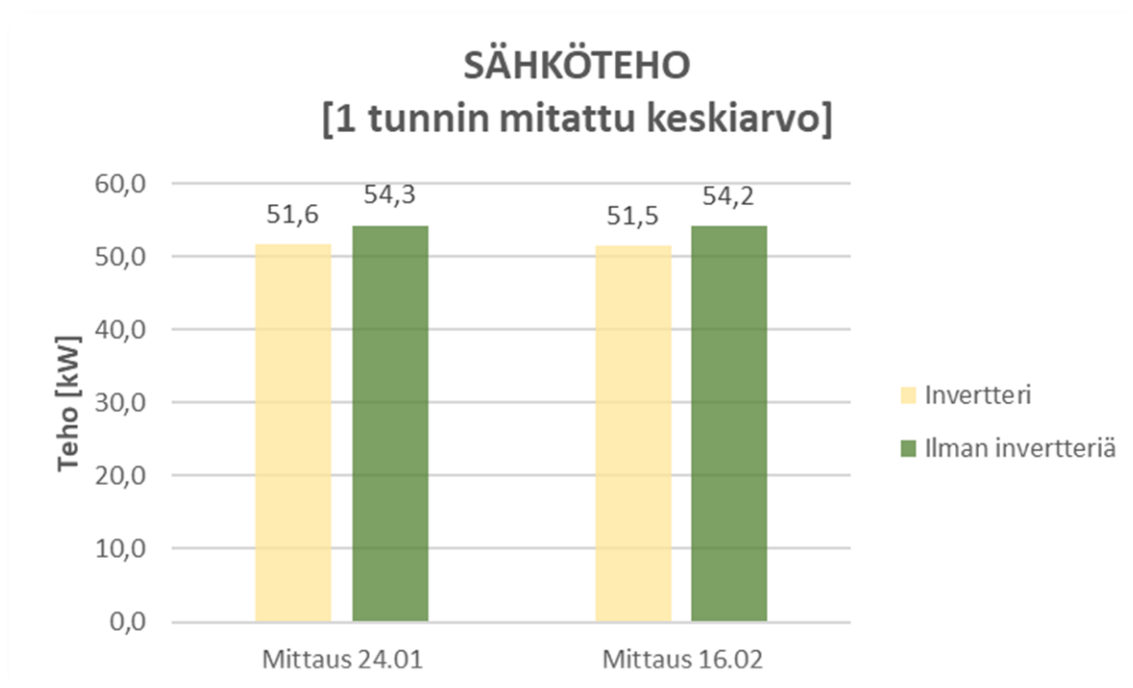
Hyötysuhdetta määrittäessä suoralla menetelmällä tulee ottaa seuraavat asiat huomioon: polttoaineen massavirta ja lämpöarvo sekä voimalaitoksesta ulos saatavat sähkö- ja lämpötehot. Liitteissä 1 ja 2 on esitetty sähkö- ja lämpötehon mittausdata, joka kerättiin tunnin ajalta, jolloin voimalaitos toimi tasaisesti täydellä teholla. Mittauksen aikana syötetty polttoainemäärä punnittiin ja kirjattiin ylös. Molempien mittauksien polttoaineen kulutus on esitetty liitteessä 3. Polttoaineen kokonaismäärä summattiin, ja tällä tiedolla pystyttiin määrittämään polttoaineen massavirta. Ensimmäisessä mittauksessa polttoaineen massavirta oli 51,0 kg/h eli 0,014 kg/s ja toisessa mittauksessa 46,6 kg/h eli 0,013 kg/s.

Polttoaine analysointiin laboratoriossa lämpöarvon määrittämiseksi. Laboratorioraportti on esitetty liitteessä 4. Laskelmissa käytettiin tehollista lämpöarvoa saapumistilassa, joka oli 17,3 MJ/kg. Polttoainetehto saatiin kertomalla polttoaineen saapumistilan lämpöarvo massavirralla. Ensimmäisen mittauksen polttoainetehto oli 244 kW ja toisen mittauksen 223 kW.

Sähkö- ja lämpöteho mitattiin minuutin välein ja laskelmissa käytettiin saatujen tehojen keskiarvoa mittausjakson (1 tunti) ajalta. Sähköä tuoton hyötysuhde määritettiin jakamalla polttoainetehto mitatun sähkötehon keskiarvolla. Ensimmäisessä mittauksessa sähkötehon keskiarvo mittausajanjaksolta oli 51,6

kW, jolloin sähkön tuoton hyötysuhde oli 21 %. Toisen mittauksen sähkötehon keskiarvo oli 51,5 kW, jolloin sähkön tuoton hyötysuhde oli 23 %.

Invertterin vaikutus sähkötehon keskiarvoon on esitetty kuviossa 3. Ilman invertteriä sähkötehon keskiarvo olisi hieman reilu 54 kW. Kuviosta voidaan päätellä, että invertteri heikentää noin yhden prosenttiyksikön verran sähkön tuoton hyötysuhdetta.

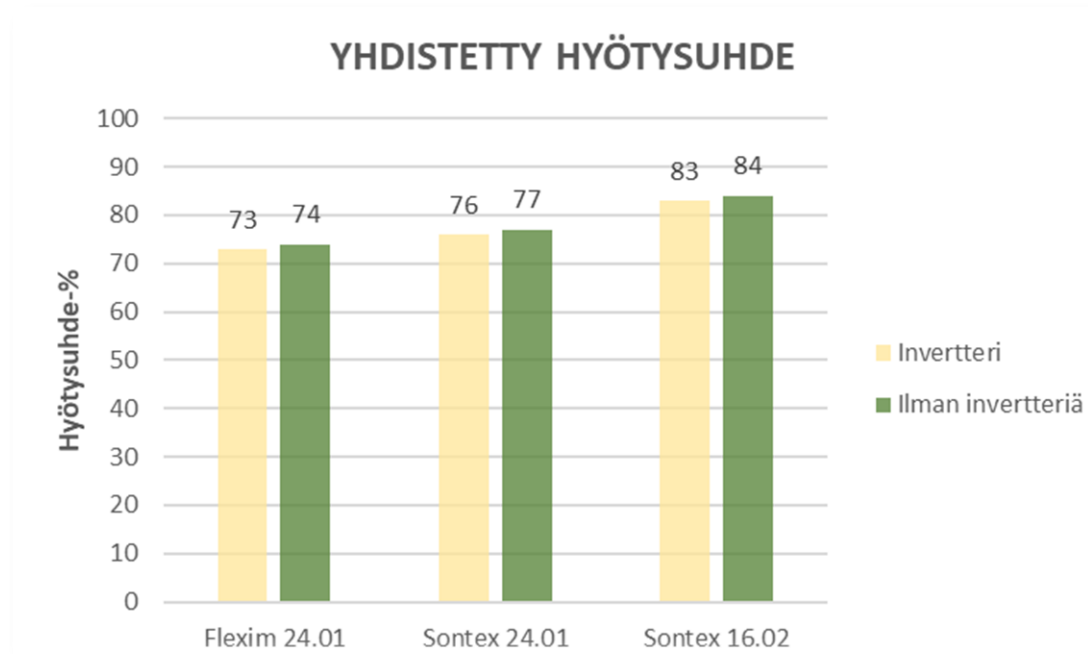


KUVIO 3. Invertterin vaikutus sähkötehon keskiarvoon

Lämpötehon keskiarvo mitattiin sekä Centrian mittauslaitteistolla että Volter Oy:n omalla mittarilla. Centrian Flexim-mittarilla mitattujen lämpötehojen keskiarvo oli 128 kW, jolloin hyötysuhde oli 52 %. Volterin Sontex-mittarilla mitattiin hieman suurempia tuloksia. Ensimmäisessä mittauksessa lämpötehon keskiarvo oli 133 kW, jolloin laskettu hyötysuhde oli 54,5 % ja toisella mittauksella 134 kW, joten hyötysuhteeksi saatiin 60 %.

Yhdistetty hyötysuhde saatiin summaamalla mitattujen tehojen keskiarvot ja jakamalla tulos polttoaineteolla. Flexim-mittarilla yhdistetty hyötysuhde oli 73 % ja Sontex-mittarilla ensimmäisessä mittauksessa 76 % ja toisessa mittauksessa 83 %. Hyötysuhteiden määrittämiseen käytettiin Excel-taulukkoa, joka on esitetty liitteessä 5.

Kuviossa 4 on esitetty invertterin vaikutus yhdistettyyn hyötysuhteeseen. Kuviosta voidaan päätellä, että invertterin käyttö sähkön siirtämiseksi generaattorilta sähköverkkoon ei juurikaan heikennä yhdistettyä hyötysuhdetta.



KUVIO 4. Invertterin vaikutus yhdistettyyn hyötysuhteeseen

7.2 Ilmakerroin

Polton ilmakerroin määritettiin savukaasuista mitatun jäännöshappipitoisuuden mukaan. Savukaasumittauksella mitattiin savukaasun sisältävän jäännöshapetta 0,1 til.-%. Ilmakerroin laskettiin vähentämällä ensin savukaasuista mitattu jäännöshapen määrä kuivan ilman määrästä, minkä jälkeen niiden tulos jaettiin vielä uudelleen kuivan ilman määrästä. Ilmakertoimeksi saatiin 1,005.

7.3 Savukaasujen määrä ja koostumus

Savukaasujen teoreettinen koostumus ja määrä selvitettiin tarkastelemalla 1000 g kostea puuhaketta. Taulukkoa 2 apuna käyttäen pystyttiin laskemaan komponenttien mooliosuudet, kunkin komponentin hapen tarve, poltossa tarvittava ilman määrä ja syntyvän savukaasun määrä. Polttoaineen typpi ja vesihöyryksi höyrystyvä kosteus oletettiin siirtyvän sellaisinaan savukaasuihin. Tuhkaa ei siirtynyt savukaa-

suihin. Taulukkoon 2 kirjattiin polttoaineen kuiva-ainekoostumus polttoaineanalyysin pohjalta seuraavasti: hiiltä 51,1 %, vetyä 6,1 %, rikkiä 0,006 %, happea 42,2 %, typpeä 0,2 % ja tuhkaa 0,4 %. Polttoaineen kosteusprosentti tuli ottaa huomioon, jolloin hakkeen koostumus muuttui seuraavanlaiseksi: vettä 8,6 %, hiiltä 46,7 %, vetyä 5,6 %, rikkiä 0,01 %, happea 38,6 % sekä typpeä 0,2 % ja tuhkaa 0,37 %.

TAULUKKO 2. Savukaasun koostumus ja määrä polttoaineanalyysin pohjalta

Aine	Lähtöaineet						Savukaasut			
	M _x (g/mol)	m _x (% dry)	m _x (% wet)	m _x (g/kg pa.)	n _x (mol/kg pa.)	nO ₂ (mol/kg pa.)	nCO ₂ (mol)	nSO ₂ (mol)	nN ₂ (mol)	nH ₂ O (mol)
C	12,011	51,1	46,71	467,1	38,886	38,886	38,886			
H ₂	2,016	6,1	5,58	55,8	27,656	13,828				27,656
S	32,066	0,006	0,01	0,1	0,002	0,002		0,002		
O ₂	31,999	42,19	38,57	385,7	12,052	-12,052				
N ₂	28,013	0,2	0,18	1,8	0,065	-			0,065	
H ₂ O	18,015	-	8,6	86,0	4,774	-				4,774
Tuhka	-	0,4	0,37	3,7	-	-				
Yhteensä		100	100	1000	83,434	40,663				
Typeä palamisilmasta [mol]						153,300			153,300	
Palamisilmaa yhteensä [mol]						193,963				
Palamisilma 1,0 kg haketta:										
O ₂						1,301				
N ₂						4,294				
Palamisilmaa yhteensä [kg]						5,596				
Savukaasu komponentit [mol]							38,886	0,002	153,365	32,430
Savukaasuja yhteensä [mol]										224,682

Taulukosta 2 käy ilmi, että 1000 g kosteaa puuhaketta sisälsi 467,1 g hiiltä, 55,8 g vetyä, 0,1 g rikkiä, 385,7 g happea, 1,8 g typpeä sekä 86,0 g vettä ja 3,7 g tuhkaa. Polttoaineen hiili tarvitsi täydellisesti palaakseen 38,9 mol eli 1244 g happea. Hiilen ja hapen reagoiessa syntyi hiilidioksidia 1711 g. Puuhakkeessa oli vetyä 56 g, joka tarvitsi palaakseen 13,8 mol eli 442 g happea. Vedyn reagoiessa hapen kanssa syntyi vesihöyryä 27,7 mol eli 498 g.

Rikkiä hakkeessa oli hyvin vähäinen määrä: 0,1 g. Rikki tarvitsi täydellisesti palaakseen 0,002 mol eli 0,064 g happea. Rikin ja hapen reagoiessa keskenään syntyi rikkidioksidia 0,128 g. Polttoaineen sisältämä happi, jota oli 12,052 mol eli 386 g, käytettiin palamiseen. Puuhakkeessa oleva kosteus ja typpi, siirrettiin laskennassa sellaisinaan suoraan savukaasuihin.

Palamisilmassa oli happea 40,6 mol. Typen moolimäärä palamisilmassa saatiin selville kertomalla palamisilmassa olevan hapen moolimäärä 3,77-kertoimella. Typpeä palamisilmassa oli siten laskennallisesti 153 mol. Teoreettinen palamisilman kokonaismäärä 194 mol saatiin summaamalla palamisilmassa olevien hapen ja typen moolimäärät. Palamistuotteet ja niiden moolimäärät summaamalla saatiin laskettua syntyvien savukaasujen määrä. Lisäksi lukuun summattiin polttoaineen kosteuden kautta syntynyt vesihöyry ja palamisilman typpi, jolloin savukaasujen kokonaismääräksi saatiin 225 mol.

7.4 Savukaasujen päästöt

Päästömittaukset voimalaitokselle tehtiin samaan aikaan hyötysuhdemittausten kanssa. Mittaus väli-
neenä käytettiin Gasmeter DX4000 -kaasuanalysointilaitetta, joka suoritti tunnin kestoisen jatkuvan savukaasu-
mittauksen. Savukaasun näytteenotto väliksi oli määritetty 1 minuutti. Kostean savukaasun lämpötila
ja absoluuttinen paine mittaussondissa olivat vakaat mittaussjakson aikana. Lämpötila oli 180 °C (453 K)
ja paine 1021 mbar. Mittaustulokset esitetään taulukossa 3 tilavuuspitoisuutena mittaolosuhteissa. Sa-
vukaasujen vesihöyry-, hiilidioksidi- ja jäännöshappipitoisuudet pysyivät lähes tasaisena koko mittauk-
sen ajan. Happipitoisuutta mittaamalla saatiin palamisprosessin päästömäärän lisäksi seurattua kaasus-
tusprosessin kulkua.

TAULUKKO 3. Walter-voimalaitoksen päästöt tasaisen ajon aikana

	Vesihöyry	Hiilidioksidi	Hiilimonoksidi	Rikkidioksidi	Metaani	Typen oksidit	Happi
	H ₂ O	CO ₂	CO	SO ₂	CH ₄	NO _x as NO ₂	O ₂
	til.-%	til.-%	ppm	ppm	ppm	ppm	til.-%
Keskiarvo	12,9	18,3	381,8	0,2	32,3	119,3	0,1
Pienin arvo	11,03	17,86	4,61	0	3,12	10,72	0
Suurin arvo	14,93	18,81	4518,11	12,76	155,14	468,43	0,39
Keskihajonta	0,9	0,2	577,4	1,6	30,3	121,5	0,1

Päästöpitoisuuksia päästiin seuraamaan mittauslaitteella syttymishetkestä alkaen. Kosteiden savukaasu-
jen hiilimonoksidipitoisuus vaihteli 4–4518 ppm välillä. Suurimmat hiilimonoksidin pitoisuusvaihtelut
mitattiin heti syttymisen jälkeen. Rikkidioksidia ei savukaasuissa juuri ollut, koska polttoaineena käytet-
ty hakkeen rikkipitoisuus oli alhainen. Muista palavista kaasuista metaanipitoisuus oli 3–155 ppm vä-
lillä. Typen oksidien pitoisuudet vaihtelivat palamisen aikana 10–468 ppm välillä.

Kuivan savukaasun pitoisuudet saatiin muuttamalla yhtälöiden 18 ja 19 mukaisesti kostean savukaasun ppm-arvo muotoon mg/Nm^3 . Mitattu ppm-arvo kerrottiin kertoimella, joka saatiin jakamalla mitatun päästön moolimassa ideaalikaasun moolitilavuudella, minkä jälkeen tuloksesta vähennettiin veden osuus pois. Hiilimonoksidin keskiarvo kuivassa kaasussa oli $548,4 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. Rikkidioksidin keskiarvo oli $0,7 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ja metaanin $26,4 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. Typen oksidien keskiarvo kuivassa savukaasussa oli $281,4 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. Tulokset on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Kuivan kaasun keskiarvo

	Hiilimonoksidi	Rikkidioksidi	Metaani	Typen oksidit
	CO	SO ₂	CH ₄	NO _x as NO ₂
	mg/Nm^3	mg/Nm^3	mg/Nm^3	mg/Nm^3
Keskiarvo	548,3	0,7	26,4	281,4
Keskihajonta	728,6	4,7	21,9	251,9

Jotta taulukon 4 tulokset olisivat vertailukelpoisia, redusoitiin taulukon 4 tulokset 6 til-% jäännöshappipitoisuuteen yhtälön 20 mukaisesti. Keskimäärin pitoisuudet olivat mittausjakson aikana hiilimonoksidilla $393,0 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, rikkidioksidilla $0,5 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, metaanilla $19,0 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ja typen oksideilla $201,7 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. Tulokset on esitetty taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Päästöt redusoitu 6 tilavuusprosentin happipitoisuuteen ja virherajoineen

	Hiilimonoksidi	Rikkidioksidi	Metaani	Typen oksidit
	CO	SO ₂	CH ₄	NO _x as NO ₂
	mg/Nm^3	mg/Nm^3	mg/Nm^3	mg/Nm^3
Keskiarvo	393	0,5	19	201,7
Virheraja	± 1040	$\pm 3,4$	± 31	± 361

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli määrittää Volter Oy:n uudistetulle CHP-voimalaitokselle hyötysuhteet. Opinnäytetyön tekijän henkilökohtaisen mielenkiinnon vuoksi tässä opinnäytetyössä hyötysuhteen määrittämisen lisäksi sivuttiin kaasutuksen aikana syntyviä päästöjä. Työ aloitettiin suorittamalla mittauksia Volterin toimipisteellä Limingassa tammikuussa 2023. Mittaukset suoritettiin yhden tunnin aikana voimalaitoksen käydessä täydellä teholla. Hyötysuhteiden määrittämistä varten käytössä olivat Centrian Flexim Fluxus -mittari sekä Volterin Sontex-mittari. Lisäksi savukaasun päästöarvoja mitattiin Centrian Gasmet FTIR DX4000 -kaasuanalysaattorilla.

Polttoainetehon avulla saatiin määritettyä lämmön- ja sähkön tuoton hyötysuhteet sekä yhdistetyt hyötysuhteet. Polttoaineteho määritettiin kertomalla keskenään polttoaineen saapumistilan lämpöarvo, joka oli määritetty laboratoriossa ja mittauksen aikana syötetty hakkeen määrä. Tammikuussa suoritettujen mittauksien aikainen polttoaineteho oli 244 kW. Lämpötehot vaihtelivat mittareiden välillä. Sontex-mittarilla mitattu lämpöteho oli 133 kW ja Flexim-mittarilla 127,5 kW. Riippuen mittalaitteesta lämmön tuoton hyötysuhteeksi saatiin 55% tai 52 %. Sähköntuoton hyötysuhteeksi saatiin 21 % mitatun sähkötehon ollessa 51,6 kW. Yhdistetyksi hyötysuhteeksi Sontex-mittarin tulosten pohjalta saatiin 76 % ja Flexim-mittarilla 73 %. Lisäksi työssä selvitettiin invertterin vaikutusta lämmön tuoton ja yhdistettyihin hyötysuhteisiin. Laskelmissa huomattiin, että invertteri vie sähkötehoa noin 3 kW, jolloin se heikensi hyötysuhteita noin yhden prosenttiyksikön verran.

Helmikuussa 2023 Volter Oy suoritti uusintamittaukset, sillä tammikuussa tehdyn mittauksen aikainen polttoaineen punnitus oli ollut epätarkka. Puuhaketta oli kulunut oletettua enemmän. Volter Oy:n mittareilla mitattujen tulosten perusteella laskettiin uudet hyötysuhteet. Oletuksena käytettiin ensimmäisten mittausten polttoaineen lämpöarvoa, jolloin uudeksi polttoainetehoksi määritettiin 223 kW.

Lämmön tuoton hyötysuhde oli 60 %, joka oli noin 6–8 prosenttiyksikköä parempi edellisiin mittauksiin verrattuna. Sähkön tuoton hyötysuhde oli 23 %, eli hyötysuhde parani kaksi prosenttiyksikköä. Uusintamittauksen vaikutti erityisesti yhdistettyyn hyötysuhteeseen, joka oli 83 %. Pienemällä polttoainemäärällä yhdistetty hyötysuhde kasvoi noin 7–10 prosenttiyksikköä edellisiin hyötysuhteisiin verrattuna.

Molempien mittauksien lämpö- ja sähköhyötysuhteet sekä yhdistetyt hyötysuhteet vastasivat saman mittaluokan myötävirtakaasuttimien hyötysuhteita. Pienimuotoisten CHP-voimalaitosten, jotka käyttävät puupohjaisia polttoaineita kaasutuksessa, sähkön tuoton hyötysuhde on tyypillisesti 20–30 % ja yhdistetty sähkön ja lämmön hyötysuhde on noin 80 %. (Hiltunen 2013.)

Puun kaasutuksessa syntyy sivutuotteena tuhkaa, mutta tässä työssä hiilikonversion määrittäminen rajattiin ulkopuolelle. Kiinteillä polttoaineilla on mahdotonta saavuttaa 100 %:n hiilikonversiota, sillä osa hiilestä jää palaamatta jäännöshiileksi.

Savukaasumittauksella voitiin määritellä puun kaasutuksen aiheuttamaa ympäristökuormaa sekä mittauksen perusteella pystyttiin säätämään kaasuttimen palamisprosessia ja parantamaan hyötysuhdetta. Savukaasumittauksen tulokset esitettiin keskiarvopitoisuuksina kuiviin savukaasuihin ja haluttuun happipitoisuuteen redusoituna pitoisuuksina.

Lähes kaikki päästöt päätyvät savukaasun mukana voimalaitoksen ulkopuolelle. Hiilidioksidia muodostuu aina hiilen ja hiilivetyjen palaessa. Hiilidioksidipäästöjä ei kuitenkaan huomioida puuta kaasutettaessa, sillä biopolttoaineiden päästöt lasketaan maankäyttösektorille, jolloin niitä pidetään hiilineutraaleina energiakäytössä. Mitatuissa savukaasuissa havaittiin hiilidioksidin lisäksi vesihöyryä, happea, hiilimonoksidia, typen oksideja ja rikkidioksidia. Kaasutuksen yhteydessä syntyvien päästöjen pitoisuudet riippuvat useasta tekijästä, kuten käytettävän polttoaineen ominaisuuksista, polttomenetelmästä ja puhdistusmenetelmästä. Esimerkiksi puukaasu palaa erittäin puhtaasti ja päästöt ovat alhaiset, kun käytetään riittävän kuivaa puuhaketta ja palamisilma on riittävä.

LÄHTEET

- Alakangas, E., Hurskainen, M., Korhonen, J. & Laatikainen-Luntama, J. 2016. *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>. Viitattu 2.6.2023.
- Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Burlington: Academic Press.
- Gasmet. *FTIR*. Saatavissa: <https://www.gasmet.com/fi/tuotteet/teknologia/ftir/>. Viitattu 4.7.2023.
- Flyktman, M., Impola, R. & Linna V. 2012. *Kotimaista polttoaineita käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitoksen tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta*. Saatavissa: https://energia.fi/files/393/Pienen_polttolaitosten_palamisen_hallinta_loppuraportti.pdf. Viitattu 2.6.2023.
- Hiltunen, I. 2013. *Pienen kokoluokan kaasutustekniikan kehityspolku*. VTT seminaarimateriaali. Saatavissa: http://www.vtt.fi/Documents/01_Pienen_kokoluokan_kasutustekniika.pdf. Viitattu 2.6.2023.
- Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. *Höyrykattilatekniikka. 5., uudistettu painos*. Helsinki: Oy Edita Ab.
- Hupa, M., Kurki-Suonio, I., Raiko, R. & Saastamoinen, J. 2002. *Poltto ja palaminen. 2., täydennetty painos*. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemit.
- Hänninen, H., Karppinen, M., Leskelä, M. & Pohjakallio, M. 2018. *Tekniikan kemia. 14., uudistettu painos*. Keuruu: Edita Publishing Oy.
- Motiva. 2023. *Energian kokonaiskulutus*. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian-kaytto-suomessa/energian_kokonaiskulutus. Viitattu 2.6.2023.
- Mäki T. & Posio J. 2004. *Savukaasumittaukset*. Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514275551.pdf>. Viitattu 2.6.2023.
- Pietilä, K. 2005. *Puun panospolton identifiointi ja säätö tulisijassa*. Oulu: Oulun yliopisto, Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto. Diplomityö.
- SFS-EN ISO 18125:2017. *Solid biofuels. Determination of calorific value*. 2017. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
- Suokko, A. 2023. *Emission measurements, Volter Oy*. Raportti 1/2023.
- Suokko, A. 2023. Kaasutusluento Centria-ammattikorkeakoulu Ylivieska.
- Volter Oy. 2022. *About us*. Saatavissa: <https://volter.fi/about-us/>. Viitattu 3.6.2023.
- VTT. 2007. *Päästömittausten käsikirja osa 1. Päästömittaustekniikan perusteet*. Saatavissa: <https://il-mansuojeluyhdistys.files.wordpress.com/2015/05/osa1.pdf>. Viitattu 25.7.2023.

24.01.2023 SÄHKÖ- JA LÄMPÖTEHON MITTAUSTULOKSET

LIITE 1

Arvot tunnin mittausajalta [1 min välein]				
AIKA	LÄMPÖTEHO [kW]		SÄHKÖTEHO [kW]	SÄHKÖTEHO [kW]
	Flexim	Sontex		ilman invertterin vaikutusta
10:47:00	131,23	140	51,7	54,4
10:48:00	115,77	114	51,6	54,2
10:49:00	102,76	108	51,7	54,3
10:50:00	131,34	139	51,6	54,3
10:51:00	134,68	135	51,8	54,2
10:52:00	117,25	123	51,6	54,2
10:53:00	116,86	124	51,7	54,3
10:54:00	130,35	132	51,5	54,3
10:55:00	130,03	135	51,9	54,3
10:56:00	126,89	131	51,7	54,1
10:57:00	125,61	132	51,7	54,4
10:58:00	122,97	128	51,8	54,3
10:59:00	124,99	127	51,6	54,2
11:00:00	126,91	131	51,6	54,2
11:01:00	126,20	131	51,7	54,4
11:02:00	126,51	131	51,8	54,2
11:03:00	128,27	130	51,7	54,3
11:04:00	129,84	135	51,8	54,3
11:05:00	131,20	135	51,8	54,2
11:06:00	128,27	134	51,7	54,4
11:07:00	127,82	133	51,6	54,1
11:08:00	126,21	130	51,6	54,3
11:09:00	127,60	134	51,6	54,2
11:10:00	128,46	134	51,8	54,2
11:11:00	127,91	134	51,6	54,5
11:12:00	127,90	133	51,5	54,2
11:13:00	127,19	134	51,7	54,2
11:14:00	127,18	134	51,4	54,2
11:15:00	128,12	135	51,3	54,2
11:16:00	127,15	134	51,3	54,1
11:17:00	127,74	134	51,4	54,2
11:18:00	128,74	136	51,5	54,3
11:19:00	131,00	138	51,6	54,4
11:20:00	130,04	137	51,5	54,5
11:21:00	129,80	136	51,6	54,3
11:22:00	129,13	136	51,6	54,2
11:23:00	129,86	136	51,6	54,2
11:24:00	128,73	136	51,5	54,2
11:25:00	130,97	136	51,6	54,3
11:26:00	130,25	136	51,6	54,3
11:27:00	130,28	134	51,6	54,3
11:28:00	128,76	135	51,5	54,4
11:29:00	128,39	134	51,7	54,3
11:30:00	128,66	136	51,6	54,2
11:31:00	128,84	136	51,9	54,2
11:32:00	129,13	132	51,8	54,4
11:33:00	128,16	133	51,7	54,4
11:34:00	128,34	136	51,6	54,3
11:35:00	129,63	136	51,5	54,2
11:36:00	128,41	136	51,4	54,2
11:37:00	129,23	136	51,2	54,1
11:38:00	129,31	133	51,5	54,4
11:39:00	129,30	135	51,4	54,5
11:40:00	128,99	134	51,4	54,3
11:41:00	128,79	134	51,6	54,2
11:42:00	127,38	134	51,7	54,2
11:43:00	127,23	133	51,3	54,2
11:44:00	125,89	134	51,5	54,3
11:45:00	128,93	137	51,3	54,2
11:46:00	130,05	136	51,6	54,2
11:47:00	127,31	134	51,2	54,3

AIKA	Arvot tunnin mittausajalta [1 min välein]		
	LÄMPÖTEHO [kW]	SÄHKÖTEHO [kW]	
	Sontex	Sontex	ilman invertterin vaikutusta
12:40:00	138	51,3	54,1
12:41:00	139	52,0	54,5
12:42:00	138	51,4	54,4
12:43:00	138	51,5	54,2
12:44:00	138	51,6	54,2
12:45:00	137	51,4	54,1
12:46:00	137	51,5	54,2
12:47:00	136	51,7	54,2
12:48:00	135	51,6	54,4
12:49:00	133	51,6	54,3
12:50:00	132	51,4	54,2
12:51:00	129	51,4	54,3
12:52:00	131	51,5	54,2
12:53:00	132	51,6	54,2
12:54:00	132	51,5	54,2
12:55:00	132	51,6	54,3
12:56:00	132	51,4	54,2
12:57:00	134	51,4	54,3
12:58:00	135	51,4	54,2
12:59:00	134	51,5	54,2
13:00:00	134	51,6	54,3
13:01:00	135	51,4	54,1
13:02:00	135	51,5	54,2
13:03:00	135	51,6	54,5
13:04:00	134	51,4	54,1
13:05:00	133	51,5	54,2
13:06:00	131	51,5	54,3
13:07:00	132	51,4	54,5
13:08:00	133	51,2	54,1
13:09:00	133	51,6	54,3
13:10:00	133	51,2	54,3
13:11:00	134	51,6	54,3
13:12:00	135	51,4	54,2
13:13:00	135	51,4	54,4
13:14:00	133	51,7	54,2
13:15:00	134	51,3	54,2
13:16:00	134	51,5	54,2
13:17:00	133	51,5	54,3
13:18:00	134	51,4	54,1
13:19:00	134	51,7	54,2
13:20:00	133	51,4	54,2
13:21:00	135	51,4	54,2
13:22:00	132	51,5	54,0
13:23:00	133	51,4	54,2
13:24:00	132	51,5	54,2
13:25:00	132	51,4	54,2
13:26:00	133	51,5	54,0
13:27:00	132	51,5	53,9
13:28:00	135	52,0	54,3
13:29:00	134	51,5	54,2
13:30:00	133	51,4	54,1
13:31:00	134	51,6	54,2
13:32:00	136	51,5	54,1
13:33:00	138	51,5	54,1
13:34:00	136	51,5	54,3
13:35:00	134	52,0	54,1
13:36:00	135	51,4	54,1
13:37:00	133	51,4	54,1
13:38:00	133	51,7	54,1
13:39:00	133	51,4	54,2
13:40:00	132	50,7	54,6

MITTAUS
24.01.2023

Ajankohta	Määrä	Lisätiedot
10:48		Mittaukset aloitetaan.
11:13	20,4 kg	25 min aikana lisätty määrä.
11:35	19,4 kg	22 min aikana lisätty määrä.
11:48	11,1 kg	13 min aikana lisätty määrä. Mittaukset lopetetaan.
Yhteensä:	50,9 kg	

Huom! Tyhjän astian paino 4,8 kg > astian paino on vähennetty.

MITTAUS
16.02.2023

Ajankohta	Määrä	Lisätiedot
12:40		Mittaukset aloitetaan.
12:46	5,096 kg	6 min aikana lisätty määrä.
12:57	7,792 kg	11 min aikana lisätty määrä.
13:05	6,635 kg	8 min aikana lisätty määrä.
13:20	11,499 kg	15 min aikana lisätty määrä.
13:27	5,065 kg	7 min aikana lisätty määrä.
13:36	7,601 kg	9 min aikana lisätty määrä.
13:40	2,882 kg	4 min aikana lisätty määrä. Mittaukset lopetetaan.
Yhteensä:	46,57 kg	

Huom! Tyhjän astian paino 0,211 kg > astian paino on vähennetty.



Tutkimustodistus	AR-23-GQ-000898-01	Päivämäärä	09/02/2023	Sivu	1/1
------------------	--------------------	------------	------------	------	-----

s-posti Jarno.Haapakoski@volter.fi

Volter Oy

Jarno Haapakoski

Koivikkohaka 9

90450 KEMPELE

FINLAND

Näyte-erä

EUAB30-00025425

Asiakkaan tilausnumero

Näyttenumero	748-2023-0000972	Näytteen nimi	Hakenäyte
Näytteen kuvaus	Kiinteä biopolttoaine	Asiakkaan näytetunniste	
Näytteenoton aloitus (polttoaine)	24.1.2023	Näytteenottopiste	

Analyyssi	Menetelmä	Yksikkö	Tulos	(MU)	Raja-arvo
-----------	-----------	---------	-------	------	-----------

Alkuperäisestä näytteestä

Kokonaiskosteus	GQ (a)	SFS-EN ISO 18134-2	%	8,6	0,7
-----------------	--------	--------------------	---	-----	-----

Gravimetriset

Tuhka (550°C), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 18122	%	0,4	0,2
Haihtuvat aineet, kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 18123	%	85,6	2,6

Lämpöarvomääritys

Kalorimetrinen lämpöarvo (qV) kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 18125	MJ/kg	20,43	0,20
Tehollinen lämpöarvo (qp), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 18125	MJ/kg	19,10	0,19
Tehollinen lämpöarvo (qp), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 18125	MWh/tonni	5,306	0,053
Tehollinen lämpöarvo (qp), saapumistila	GQ (a)	SFS-EN ISO 18125	MJ/kg	17,25	0,17
Tehollinen lämpöarvo (qp), saapumistila	GQ (a)	SFS-EN ISO 18125	MWh/tonni	4,791	0,048

Alkuainemääritykset

Hilli (C), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 16948	%	51,1	1,0
Vety (H), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 16948	%	6,1	0,3
Typpi (N), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 16948	%	<0,2	
Happipommihajotus	GQ (a)	SFS-EN ISO 16994 mod.		Tehty	
Kloori (Cl), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 16994 mod.	%	0,002	0,001
Fluori (F), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 16994 mod.	%	<0,001	
Rikki (S), kuiva näyte	GQ (a)	SFS-EN ISO 16994	%	0,006	0,002

Huomautukset

Tutkimustodistuksen osittainen kopioiminen on sallittu vain laboratorion kirjallisella luvalla. Testaustulokset koskevat vain vastaanotettua ja tutkittua näytettä.

GQ = Analysoiva laboratorio on Eurofins Environment Testing Finland (Jyväskylä).

(a) = Analyysit on tehty akkreditoidulla menetelmällä (SFS-EN ISO/IEC 17025:2017 FINAS T039).

ALLEKIRJOITUS

Anne-Riikka Rautio

Tuotantoyksikön päällikkö

Tutkimustodistus on sähköisesti hyväksytty.

Eurofins Environment Testing Finland Oy
Heinämäentie 2

VAT no: FI27522925

40250 Jyväskylä
FINLAND

www.eurofins.fi



MITTAUS 24.01.2023			MITTAUS 16.02.2023	
POLTTOAINEEN LÄMPÖARVO	17250 J/kg		Oletuksena käytetään 24.01. polttoaineen lämpöarvoa	
POLTTOAINEEN MASSAVIRTA	51,0 kg/h		46,57 kg/h	
	0,01417 kg/s		0,012936 kg/s	
POLTTOAINETEHO	244,38 kW		223,15 kW	
SÄHKÖTEHO [KA]	51,59 kW		51,49 kW	
SÄHKÖN TUOTON HYÖTYSUHDE	21 %		23,07 %	
	FLEXIM	SONTEX		
LÄMPÖTEHO [KA]	127,55 kW	133,10 kW	134,00 kW	
LÄMMÖN TUOTON HYÖTYSUHDE	52,20 %	54,46 %	60,05 %	
	FLEXIM	SONTEX		
YHDISTETTY HYÖTYSUHDE	73,31 %	75,58 %	83,12 %	
Hyötysuhteet ilman invertterin vaikutusta:				
SÄHKÖTEHO [KA]	54,27 kW		54,22 kW	
SÄHKÖN TUOTON HYÖTYSUHDE	22,21 %		24 %	
	FLEXIM	SONTEX		
YHDISTETTY HYÖTYSUHDE	74,40 %	76,67 %	84,35 %	