

Katja Tauriainen

**CHP - PUUKAASULAITOKSEN HYÖTYSUHTEEN JA HIILIKON-
VERSION MÄÄRITTÄMINEN**

Opinnäytetyö

CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Toukokuu 2019

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

| | | |
|---|------------------------------|---|
| Centria-ammattikorkeakoulu | Aika Toukokuu 2019 | Tekijä/tekijät Katja Tauriainen |
| Koulutusohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikka | | |
| Työn nimi CHP- PUUKAASULAITOKSEN HYÖTYSUHTEN JA HIILIKONVERSION MÄÄRITTÄMINEN | | |
| Työn ohjaaja Aki Suokko | Sivumäärä 36 + 7 | |
| Työelämäohjaaja Jani Kaaresto | | |
| <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli Volter 40 Indoor - puukaasutinlaitoksen hyötysuhteen ja hiilikonversion määrittäminen. Kaasutinlaitos on yhdistetty lämmön- ja sähköntuotantolaitos ja se käyttää polttoaineenaan puuhaketta. Volterin 40 Indoor- puukaasutinlaitoksen kaasutin on myötävirtatekniikkaan perustuva kiinteäpetikaasutin. Kaasutinlaitoksen nimellinen sähköteho on 40 kW ja nimellinen lämpöteho on 100 kW.</p> <p>Hyötysuhde määritettiin laskennallisesti suoralla menetelmällä polttoaineen tehollisen lämpöarvon sekä mitattujen sähkö- ja lämpötehojen avulla. Hiilikonversio määritettiin laskennallisesti polttoaineen ja kaasutuksesta jäljelle jääneen tuhkan hiilipitoisuuksien suhteesta. Epätäydellinen hiilikonversio vaikuttaa kaasuttimen hyötysuhteeseen ja sen vaikutus määriteltiin tuhkaan jäljelle jääneen hiilen sekä palamiseen tarvittavan hapen hiilidioksidin muodostuksen reaktioentalpian avulla.</p> <p>Työn edetessä tuli esiin ajatus laskea mahdollisen teholtaan suuremman lämmönvaihtimen vaikutus voimalaitoksen hyötysuhteeseen. Vaikutuksen laskemiseksi tuli määrittää stoikiometrisen palamisen savukaasujen muodostus ja palamisilmojen ilmakerroin. Ilmakertoimen avulla laskettiin todellisen palamisen pakokaasun hapen ja typen määrä. Pakokaasun koostumuksesta laskettiin lämpöteho lämpötilaeron ja kaasun massavirran avulla.</p> <p>Tuloksina esitetään kaasutinlaitoksen laskennallinen nykyinen hyötysuhde ja hiilikonversio sekä täydellisen hiilikonversion ja tehokkaamman lämmönvaihtimen laskennalliset vaikutukset hyötysuhteeseen.</p> | | |
| Asiasanat CHP, hiilikonversio, hyötysuhde, kaasutus, myötävirtakaasutin, puukaasutin | | |

ABSTRACT

| | | |
|---|-------------------------|-------------------------------------|
| Centria University of Applied Sciences | Date May 2019 | Author/s Katja Tauriainen |
| Degree programme Electric- and automation | | |
| Name of thesis THERMAL EFFICIENCY OF BIOGASS GASIFICATION BASED CHP PLANT | | |
| Instructor Aki Suokko | Pages 36 + 7 | |
| Supervisor Jani Kaaresto | | |
| <p>The aim of this thesis was to determine thermal and carbon conversion efficiency for Volter 40 Indoor wood gasifier. The gasifier engine- genset in question produces combined heat and power. The gasification process in Volter 40 Indoor is based on fixed bed downdraft gasification technology. The nominal output of Volter 40 Indoor is 40 kW electricity and 100 kW heat.</p> <p>The efficiency of the gasifier engine genset was determined as a ratio of measured output production and heat input. The only heat input, in practice, was combustion of fed fuel. Measurements of heat and electricity production were performed for one-hour period when the gasifier was operating at full power in steady- state conditions. Carbon conversion efficiency was determined indirectly by measurements of carbon content of consumed fuel and its ash. Imperfect gasification has negative effect on the thermal efficiency of the gasification process as part of the carbon in fuel gives no heat input at all. So, the difference between theoretical or ideal fuel carbon conversion and observed conversion was also determined.</p> <p>In this thesis, it was also studied that how much extra heat could be taken out of the flue gas by grater heat exchanger. Heat exchangers are generally optimized between two conflicting interests. The grater the heat surface is, more heat can be taken from the flue gas. But grater the heat surface is, the higher are capital costs. So, there is an optimum heat surface area by which heat is taken out of the fuel gas.</p> <p>The results calculated in this thesis, suggests that the heat exchanger of Volter 40 Indoor could be somewhat greater in size, but it depends on locally varying fuel prices and value of produced heat and capital expenses of greater heat exchanger. However, the results calculated in this thesis gives valuable information for Volter in their product optimization.</p> | | |

| |
|---|
| <p>Key words CHP, carbon conversion efficiency, fixed bed downdraft, wood gasification</p> |
|---|

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

| | |
|---------------------------|--|
| ad | Kuten on määritelty |
| °C | Celsiusaste |
| C | Hiili |
| | Polttoaineen kuiva- aineen hiilipitoisuus |
| c | aineen määrä liuoksessa (mg/l) |
| c₀ | aineen määrä liuoksessa ennen imeytymistä (mg/l) |
| C_c | Jäännöshiili, hiilikonversio |
| CH₄ | Metaani |
| CHP | Combined Heat and Power eli yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto |
| cm³ | Kuutiosenttimetri |
| CO | Hiilimonoksidi eli häkä |
| c_p | Ominaislämpökapasiteetti |
| d | Osuus kuiva- ainepitoisuudesta |
| eksoterminen | Lämpöä luovuttava (reaktio) |
| endoterminen | Lämpöä sitova (reaktio) |
| entalpian muutos | Reaktiolämpö |
| g | Gramma |
| h | Tunti |
| H | Vety |
| | Polttoaineen tehollinen lämpöarvo (LHV) |
| H₂O | Vesi |
| hapetus- pelkistys | Palamisen kaltainen kemiallinen reaktio |

| | |
|-----------------------|--|
| hiilikonversio | Polttoaineen hiilen palamisaste |
| Hz | Hertsi |
| kg | Kilogramma |
| kJ | Kilojoule |
| krakkautuminen | Hiilivetymolekyylien pilkkoutuminen |
| kW | Kilowatti |
| kWh | Kilowattitunti |
| L | Todellisen palamisen massavirta |
| l | Litra |
| L₀ | Stoikiometrisen palamisilman massavirta |
| LHV | Polttoaineen tehollinen eli alempi lämpöarvo (L ower H eat V alue) |
| M_{ad} | Näytteen kosteus analyysihetkellä |
| M_{ar} | Polttoaineen kosteus saapumistilassa (m-%) |
| M_i | Aineen i moolimassa |
| m_i | Kaasukomponentin i massaosuus |
| | Aineen i massa painoyksikössä |
| MJ | Megajoule |
| mm | Millimetri |
| mol | Mooli |
| MW | Megawatti |
| N | Typpi |
| n_i | Aineen i määrä mooleina |
| Nm³ | Normikuutiometri |

| | |
|-------------------------------|---|
| O₂ | Happi |
| pyrolyysi | Aineen kemiallinen hajoaminen kuumentamisen vaikutuksesta |
| Q_{saatu} | Palamisesta saatu lämpömäärä Jäähdyttämisestä saatu lämpömäärä |
| Q_{tuotu} | Polttoaineen tuotu lämpöteho |
| S | Rikki |
| SO₂ | Rikkidioksidi |
| V | tilavuus |
| VAC | Volttia vaihtojännitettä |
| V_d | Haihtuvien aineiden osuus massayksikössä |
| v_i | Pyrolysoituvan aineen i suhteellinen määrä polttoaineessa |
| v_{ko} | Viikko |
| w | Veden osuus polttoaineessa Aineen massaosuus kuiva- aineesta |
| q_{p, net, d} | Kuiva- aineen tehollinen lämpöarvo vakio paineessa (J/g tai MJ/kg) |
| q_{V, gr, d} | Kuiva- aineen kalorimetrinen lämpöarvo vakio tilavuudessa (J/g tai MJ/kg) |
| q_{p, net, ar} | Polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (J/g tai MJ/kg) |
| Δt | Lämpötilaero |
| η | Hyötysuhde |
| λ | Palamisen ilmakerroin |

ESIPUHE

Sain opinnäytetyöni aiheen joulukuussa 2018 opinnäytetyön ohjaajaltani ja siten mahdollisuuden päästä tutustumaan Volterin pienen mittakaavan CHP- puukaasutinlaitokseen. Mittaukset suoritettiin Volter Oy:n toimipaikassa Kempeleessä 10.12.2018. Valmis mittausasetelma helpotti mittauksia ja lisäksi minulla oli Centrian tutkimus- ja kehitysyksiköstä kokeneempi insinööri apuna koko mittauksen ajan.

Haluan kiittää Volter Oy:n Jani Kaarestoa, Iikka Korvaa ja Esa Terhoa mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö näin kiinnostavasta aiheesta sekä avusta mittauksien ja laskelmien aikana. Centria-ammattikorkeakoulusta haluan kiittää opinnäytetyön ohjaajaani Aki Suokkoa kärsivällisestä ja asiantuntevasta avusta koko prosessin aikana sekä Riku Nivaa avusta mittauksissa.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni tuesta ja erityisesti miestäni Juhaa kannustuksesta koko opiskeluni ajan.

Nivalassa 04.05.2019

Katja Tauriainen

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELYT
ESIPUHE

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| 1 JOHDANTO | 1 |
| 2 PUUN KAASUTUS | 2 |
| 2.1 Kaasutuksen historiaa..... | 2 |
| 2.2 Kaasutusprosessi | 3 |
| 3 PUUKAASUTINLAITOS | 6 |
| 3.1 Volter 40 Indoor - kaasutuslaitoksen tekniikka..... | 6 |
| 3.2 Myötävirtakaasuttimen toiminta..... | 8 |
| 4 PUU POLTTOAINEENA..... | 10 |
| 4.1 Puun analyysi | 10 |
| 4.4.1 Analyyseissa käytetyt standardit..... | 11 |
| 4.2 Puun lämpöarvo..... | 14 |
| 5 LASKUTOIMITUKSIEN TEORIAA | 17 |
| 5.1 Hyötysuhde..... | 17 |
| 5.2 Hiilikonversio..... | 18 |
| 5.3 Lämmönvaihtimen vaikutus hyötysuhteeseen..... | 19 |
| 5.3.1 Palamisen ilmakerroin | 19 |
| 5.3.2 Pakokaasun lämpöteho ja uusi hyötysuhde | 23 |
| 6 MITTAUSASETELMA..... | 25 |
| 7 TULOKSET | 28 |
| 7.1 Hyötysuhde..... | 28 |
| 7.2 Hiilikonversio ja sen vaikutus hyötysuhteeseen..... | 30 |
| 7.3 Lämmönvaihtimen vaikutus hyötysuhteeseen..... | 31 |
| 7.3.1 Ilmakerroin | 31 |
| 7.3.2 Pakokaasun lämpöteho ja sen vaikutus hyötysuhteeseen | 32 |
| 8 JOHTOPÄÄTÖKSET | 35 |

KUVIOT

| | |
|--|----|
| KUVIO 1. Mitattujen tehojen vaihtelu..... | 28 |
| KUVIO 2. Volter 40 Indoor hyötysuhteet..... | 29 |
| KUVIO 3. Hiilikonversion vaikutus hyötysuhteeseen..... | 30 |

| | |
|--|----|
| KUVIO 4. Lämmönvaihtimen vaikutus lämpötehoon..... | 32 |
| KUVIO 5. Lämmönvaihtimen vaikutus kokonaistehoon..... | 32 |
| KUVIO 6. Lämmönvaihtimen vaikutus lämpöhyötysuhteeseen..... | 33 |
| KUVIO 7. Lämmönvaihtimen vaikutus kokonaishyötysuhteeseen..... | 33 |

KUVAT

| | |
|--|----|
| KUVA 5. Polttoaineen määritysperusteet..... | 11 |
| KUVA 6. Sontex Supercall 531..... | 24 |
| KUVA 7. Flexin Fluxus F601..... | 25 |
| KUVA 8. Volter 40 Indoor kosketusnäyttö..... | 25 |

TAULUKOT

| | |
|---|----|
| TAULUKKO 1. Volter 40 Indoor tekniset tiedot..... | 7 |
| TAULUKKO 2. Savukaasun koostumuksen laskeminen..... | 19 |
| TAULUKKO 3. Savukaasun lämpötehon laskeminen..... | 22 |
| TAULUKKO 4. Pakokaasun lämpöteho..... | 31 |

1 JOHDANTO

Volter Oy antoi Centria- ammattikorkeakoululle toimeksiannon määrittää Volter 40 Indoor - puukaasutinlaitoksen hyötysuhde ja hiilikonversio. Voimala on yhdistetty sähkön- ja lämmöntuottolaitos, jonka sähköteho on 40kW ja lämpöteho 100kW täydellä teholla käytettäessä.

Volter Oy:n tarina alkaa vuodesta 1998, kun yrityksen perustaja Juha Sipilä alkoi selvittämään puukaasutuksen mahdollisuuksia energian tuotannossa. Volter Oy perustettiin vuonna 2008, ensimmäinen Volter CHP- kaasutinlaitos rakennettiin vuonna 2010 Kempeleen ekokylään ja ensimmäinen kaupallinen Volter CHP- kaasutinlaitos valmistettiin vuonna 2011. Volter työllistää nykyään 20 henkilöä ja laitoksia on myyty mm. Eurooppaan ja Japaniin. (Volter 2019.)

Kaasutinlaitoksella voidaan tuottaa tarpeeksi lämpöä ja sähköä yhden maatilan, asumisyhteisön tai pienen yrityksen tarpeisiin ja moduuleja voidaan lisäksi yhdistää suurempaa sähkön sekä lämmön tarvetta varten.

Puun kaasuttaminen korkeassa lämpötilassa ja vähähappisissa olosuhteissa on suoraan polttamiseen verrattuna tehokkaampi keino hyödyntää puuperäistä polttoainetta. Kaasutuksen tuottamista kaasuista tärkeimpiä ovat palavat kaasut, kuten hiilimonoksidi (CO) eli häkä ja vety (H_2). Volter 40 Indoor hyödyntää puukaasun kuusisylinterisessä moottorissa, joka pyörittää kolmivaihegeneraattoria. Lämpöteho saadaan puukaasun ja moottorin pakokaasun jäädytyksestä lämmönvaihtimen avulla.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli määrittää Volter 40 Indoor- puukaasutinlaitoksen suora hyötysuhde ja hiilikonversio. Lisäksi opinnäytetyön kulun aikana ilmeni tarve laskea myös tehokkaamman lämmönvaihtimen vaikutus nykyiseen hyötysuhteeseen.

Teoriaosuudessa käsitellään puun kaasutusta, polttoaineen analyysia ja hyötysuhteen laskennassa käytettäviä laskutoimituksia. Tuloksina esitetään kaasutinlaitokselle laskettu hyötysuhde mittaolosuhteissa, hiilikonversio sekä hiilen epätäydellisen palamisen ja tehokkaamman lämmönvaihtimen laskennalliset vaikutukset hyötysuhteeseen.

Hyötysuhde on laskettu suoralla menetelmällä, joka ottaa epäsuorasti huomioon kaasutinlaitoksen lämpöhäviöt, mutta ei erittele niitä.

2 PUUN KAASUTUS

Puun kaasutus on prosessi, jossa puusta saadaan kaasua polttamalla osa siitä korkeassa lämpötilassa vähähappisissa olosuhteissa. Osittaisesta poltosta vapautuvaa lämpöenergiaa käytetään puun kaasutukseen. Puukaasu voidaan hyödyntää suoraan lämmön ja sähkön tuotannossa tai se voidaan puhdistaa tuotekaasuksi sekä nestemäiseksi polttoaineeksi. Kaasuttamalla puuperäisestä polttoaineesta saadaan enemmän energiaa hyötykäyttöön massayksikköä kohden, samalla kun palamisen päästöt voivat pienentyä.

2.1 Kaasutuksen historiaa

Ihmiskunta on osannut hyödyntää puuta polttoaineena jo hyvin pitkään, mutta kaasutuksen historia alkaa kuitenkin vasta ensimmäisestä tunnetusta kokeesta vuodelta 1690, kun Thomas Shirley teki kokeita metaanin avulla. 1700-luvulla puukaasua saatiin puuhiilen valmistamisen yhteydessä, mutta sen hyödyntäminen oli kuitenkin vähäistä. (Basu 2010, 3-4.)

Ensimmäinen puukaasutin oli italialaisen Garuffan kehittämä kaasugeneraattori, joka käytti polttoaineena puuta. Ensimmäisen maailmansodan jälkeen puukaasutuksen tutkimukseen panostettiin voimakkaasti öljyn saatavuusongelmien pelossa. George Imbert kehitti 1920-luvulla puupilkkeellä toimivan kaasuttimen, joka on toiminut mallina nykyisin käytössä oleville puukaasuttimille. (Köhler 2007, 14-16.)

Toisen maailmansodan aikaan polttoainepula johti puukaasun laajamittaiseen käyttöön polttoaineen valmistuksessa Saksassa. Samaan aikaan muualla Euroopassa ajoneuvoihin asennettiin puukaasuttimia eli ns. ”häkäpöntöjä. Sodan loputtua polttoaineen saatavuus pikkuhiljaa normalisoitui ja puun kaasutus ajoneuvokäytössä jäi taka-alalle. (Basu, 2010, 3-4.)

Vuoden 1973 öljykriisi käänsi huomion vaihtoehtoisiin energianlähteisiin, mukaan lukien puukaasuttimien käyttöön. Ensimmäinen kaupallinen kaasutinlaitos tuli markkinoille Yhdysvalloissa vuonna 1997 ja puun kaasutuksella on uudelleen nähty mahdollisuuksia uusiutuvana energian tuottamismuotona. (Basu 2010, 3-4.)

Tällä hetkellä puun käytöstä käydään poliittista debattia ja puuperäisen energian hiilidioksidineutraalisuus on poliittisesti sovittu asia, joka voi muuttua. Metsäteollisuuden sivuvirrat ovat laajasti hyväksytyt raaka-aine energiantuotantoon varsinkin silloin, kun puusta valmistetaan pitkäikäisiä ja hiiltä pitkään sitovia tuotteita.

2.2 Kaasutusprosessi

Puun kaasutusprosessi eroaa suorasta polttamisesta ennen kaikkea siten, että kaasutuksessa palamiseen tarvittavan hapen määrä on noin 20- 30 % tavallisen palamisen määrästä. Hapen määrän rajoittaminen saa aikaan reaktioita, joista osa on eksotermisiä eli lämpöä luovuttavia ja osa on endotermisiä eli lämpöä sitovia. Lämpöä sitovissa reaktioissa muodostuu poltettavia yhdisteitä, joihin on sitoutunut lämpöenergiaa, toisin sanoen niillä on lämpöarvo. Suorassa palamisessa polttoaineen haihtuvien ainesosien muodostavalla savukaasulla ei ole lämpöarvoa. (Basu 2010, 1.)

Puu sisältää happea tyypillisesti noin 40 prosenttia ja kaasutuksessa tämä happi haihtuu polttoaineesta, vähentäen siten kaasutusprosessissa tarvittavan hapen määrää. Happi osallistuu kemiallisiin reaktioihin, joista tärkein on hiilimonoksidin muodostuminen polttoaineen hiilestä. Kaasutus myös parantaa polttoaineen hiili- vetysuhdetta (H/C) sitomalla vetyä kaasuun ja vapauttamalla hiiltä polttoaineesta. Edellä mainitut seikat kohottavat puukaasun lämpöarvoa. (Basu 2010, 14.)

Puukaasu on seos hiilimonoksidia (CO), vetyä (H₂), metaania (CH₄), typpeä (N₂), hiilidioksidia (CO₂) sekä pienempiä määriä muita hiilivetyjä ja orgaanisia epäpuhtauksia. Kaasuseoksen komponenteista polton kannalta tärkeimpiä ovat hiilimonoksidi, vety ja metaani.

Kaasutuksen vaiheet ovat kuivuminen, pyrolyysi ja jäännöshiilen palaminen tai kaasuuntuminen. Nämä prosessit voivat olla polttoaineen ominaisuuksista ja ennen kaikkea käytetystä tekniikasta riippuen myös osittain päällekkäisiä. (Husa ym. 1995, 139.)

Polttoaineen kuivuminen vaatii lämpöä. Kilogramma kosteutta vaatii haihtuakseen 2260kJ lämpöenergiaa. Jos polttoaine on liian kostea, kaasutusprosessi hidastuu ja siksi polttoaine on kuivattava ennen kaasutusta, sopiva kosteuspitoisuus on noin 20-30 %. (Basu 2010, 120.)

Kaasutusprosessin vaiheista tärkeimmät ovat:

Pyrolyysi

Reaktioyhtälön 1 mukainen pyrolyysi on ei vaadi ulkoista välittäjäainetta, kuten happea. Kaasutuksen pyrolyysissa monimutkaiset hiilivety-molekyylit hajoavat lyhyemmiksi hiilivetyketjuiksi, kuten metaaniksi. Reaktiot ovat nopeita ja vaativat korkean lämpötilan (550-850 °C). (Kouvo 2017, 13-15; Basu 2010, 120-123.)



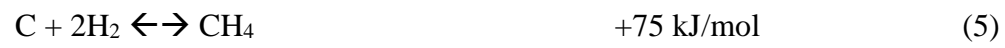
Jäännöshiilen kaasutus

Jäännöshiilen kaasutus on vaihe, jossa varsinaiset kaasutusreaktiot tapahtuvat. Reaktiot ovat pääosin endotermisiä. Lämpötilan on oltava korkea, jotta reaktiot tapahtuvat oikeaan suuntaan ja muodostuisi puukaasun pääkomponenttia eli hiilimonoksidia reaktioyhtälöiden 2 ja 3 mukaisesti. Reaktioyhtälö 4 on vesi-kaasureaktio eli niin sanottu shift-reaktio, jossa muodostuu hiilidioksidia ja vetyä. (Kouvo 2017, 13-15; Basu 2010, 120-123.)



Vetykaasutus

Vetykaasutus on eksoterminen reaktio, joka tuottaa osan jäännöshiilen reaktioiden tarvitsemasta lämmöstä yhdessä palamisreaktion kanssa reaktioyhtälöiden 5 ja 6 mukaisesti:



Palaminen



(Kouvo 2017, 13-15; Basu 2010, 120-123.)

3 PUUKAASUTINLAITOS

Puun kaasutukseen käytettävät tekniikat voidaan karkeasti jakaa kolmeen ryhmään: kiinteäkerros-, leijukerros- ja pölykaasutustekniikkaan. Kiinteäpetikaasuttimet voidaan jakaa myötä- ja vastavirtakaasuttimiin. Näitä käytetään yleensä pienen mittaluokan puukaasutuslaitoksissa, joiden nimellinen teho on 10 kW – 10 MW. (Basu 2010, 168-169.)

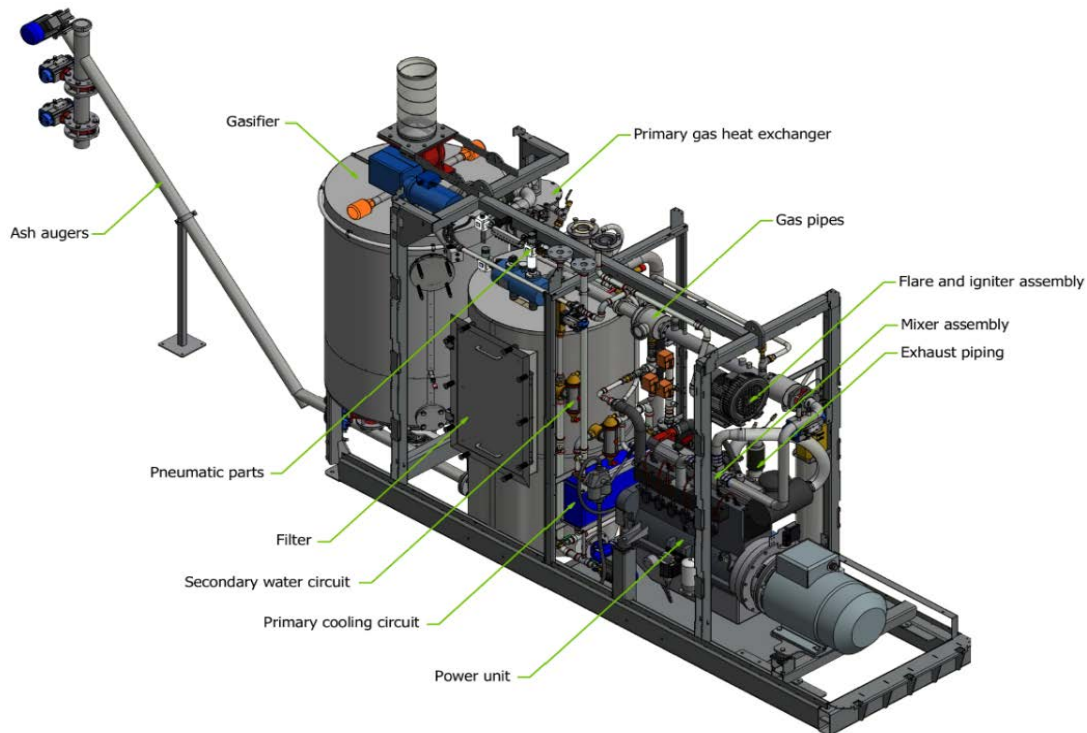
3.1 Volter 40 Indoor - kaasutuslaitoksen tekniikka

Volter 40 Indoor on yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotantolaitos, jonka nimellinen lämpöteho on 100 kW ja nimellinen sähköteho 40 kW. Lämmitysveden ulostulon virtaama on maksimissaan 1,4 l/s ja lämpötila on säädettävissä välille 60- 85 °C. Kaasutinlaitoksen myötävirtakaasutin tuottaa noin 450-550 °C kaasua 46 kg/h. Puukaasun tehollinen lämpöarvo on arviolta 5,75 MJ/Nm³ ja se koostuu pääasiassa hiilimonoksidista (CO), vedystä (H₂) ja typestä (N₂). Kaasuttimen polttoaineena käytetään palakooltaan noin 16- 30 mm metsähaketta, jonka kosteus on alle 18 %. Täydellä teholla kaasutinlaitos kuluttaa polttoainetta 37,5 kg tunnissa. (Volter 2017.)

Tuotekaasu ohjataan kaasuttimelta jäädytyksen ja puhdistuksen jälkeen kuusi sylinteriseen iskutilavuudeltaan 8400 cm³ kaasumoottoriin. Moottori pyörittää sähkögeneraattoria, joka tuottaa 400 VAC-jännitteen taajuudella 50 Hz. Lämpötehon tuotto perustuu lämmönvaihtimeen, jolla otetaan talteen lämpöä puu- ja pakokaasujen jäädytyksestä. (TAULUKKO 1.) (Volter 2017.)

TAULUKKO 1. Volter 40 Indoor tekniset tiedot (mukaiillen Volter 2017)

| Volter 40 Indoor | | | |
|-------------------------|---------|--------------------|------------------|
| Mitat | | | |
| Paino | 4500 | kg | |
| Pituus | 4820 | mm | |
| Korkeus | 2500 | mm | |
| Leveys | 1270 | mm | |
| Kaasutin | | | |
| Puukaasun lämpötila | 450-550 | °C | |
| Puukaasun tuotto | 46 | kg/h | |
| Kaasumoottori | | | |
| Iskutilavuus | 8400 | cm ³ | |
| Sylinterit | 6 | | |
| Generaattori | | | |
| Sähköteho | 40 | kW | ± 5% |
| Verkon syöttö | 400 | VAC | |
| Taajuus | 50 | Hz | |
| Lämmön tuotto | | | |
| Lämpöteho | 100 | kW | ± 10% |
| Lämmitysvesi | 70-80 | °C | Maksimi 85 °C |
| Virtaus | 1,4 | l/s | |
| Hakkeen kulutus | | | |
| Hakkeen kulutus | 37,5 | kg/h | täydellä teholla |
| Tuotekaasun LHV | 5,75 | MJ/Nm ³ | |
| Tuhkan muodostus | 500 | l/vko | täydellä teholla |

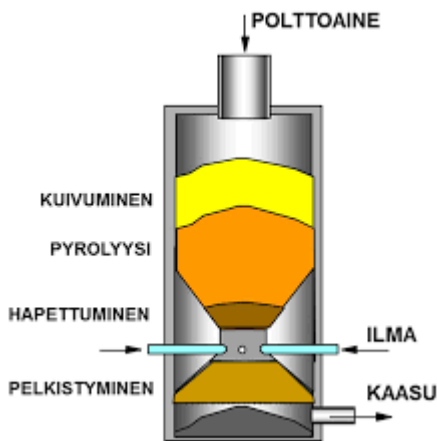


KUVA 1. Volter 40 Indoor rakenne (Volter Oy 2017)

Lämpötilaltaan 500-650 °C oleva puukaasu esijähdytetään, puhdistetaan ja jähdytetään vielä kerran ennen kuin se johdetaan moottorille. Moottori pyörittää sähkögeneraattoria, jonka tuottama sähkö on taajuudeltaan ja jännitteeltään yhteensopivaa verkkoon syötettäväksi. (KUVA 1) (Volter 2017.)

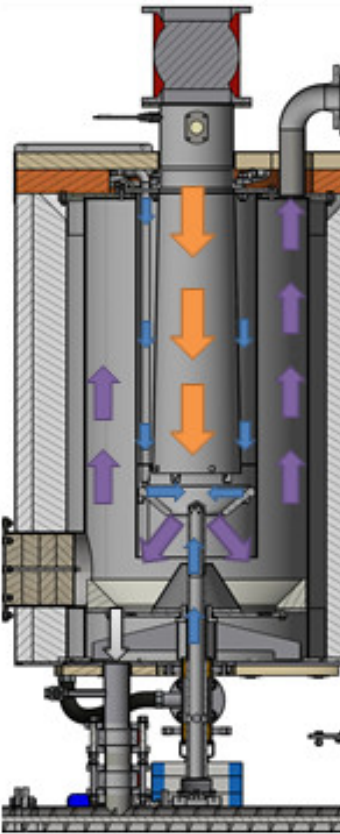
3.2 Myötävirtakaasuttimen toiminta

Myötävirtakaasutin on yleisin käytössä oleva kaasutintekniikka pienissä kaasutusvoimalaitoksissa. Sen toimintatapa muistuttaa Suomessakin ajoneuvoissa käytössä olleita ”häkäpönttöjä”. Myötävirtakaasuttimella toteutetun kaasutinlaitoksen teho rajautuu teknisen toteutuksen vuoksi alle 2 MW:iin ja polttoaineen kosteuden on oltava alle 25 %. Lisäksi polttoaineen on oltava palakooltaan pientä, jotta se valuisi reaktorissa alaspäin ongelmitta. (VTT 2013.)



Myötävirtakaasutuksessa polttoaine syötetään kaasuttimeen sen yläosasta, josta se valuu ensin kuivumisvyöhykkeeseen. Sen jälkeen tapahtuu pyrolyysi, palaminen ja kaasuuntuminen. Syntyvä tuotekaasu virtaa alas hapettumisvyöhykkeelle ja siitä pelkistymisvyöhykkeen kautta alaosan hiilipatjaan. Tästä juontuu nimitys myötävirtakaasutin. Palamisessa syntyvä lämpö johtuu kaasuttimen seiniä pitkin sen yläosaan ja kuivattaa polttoainetta. (VTT 2013.)

KUVA 2. Myötävirtakaasuttimen toiminta (VTT 2013)



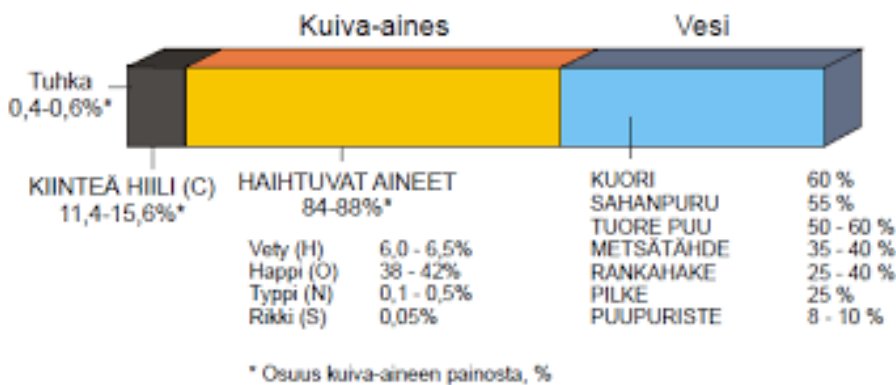
Hapettuminen ja kuumassa hiilipatjassa tapahtuva raskaiden hiiliyhdisteiden krakkautuminen vähentävät kaasutuskaasun tervoja eli raskaita hiiliyhdisteitä merkittävästi. Näin kaasu on puhtaampaa, eikä tervojen aiheuttamaa likaantumista tapahdu niin paljon, kuin muita tekniikoita käyttävissä kaasuttimissa. Pelkistyminen vähentää kaasutusprosessin hiilikonversiota ja pienentää näin kaasuttimen hyötysuhdetta (KUVA 2.). (VTT 2013.)

Volterin kaasuttimessa on Imbert-tyyppisen kaasuttimen mukainen rajoittava kurkku, joka pakottaa pyrolyysikaasun ja kuumaa hiiltä kulkemaan kapeammalla alueella. Tämä lisää tervojen krakkautumista eli hajoamista kevyemmiksi hiiliyhdisteiksi. (Basu 2010, 174-175.) Puukaasu ohjataan kaasuttimen yläosasta eteenpäin jäähdytystä ja suodattamista varten. Kaasun tuntuva lämpö osallistuu näin myös polttoaineen kuivattamiseen. Kaasutusjäännös eli tuhka laskeutuu kaasuttimen pohjalle, mistä se poistetaan (KUVA 3).

KUVA 3. Volterin myötävirtakaasutin (Volter Oy 2017)

4 PUU POLTTOAINEENA

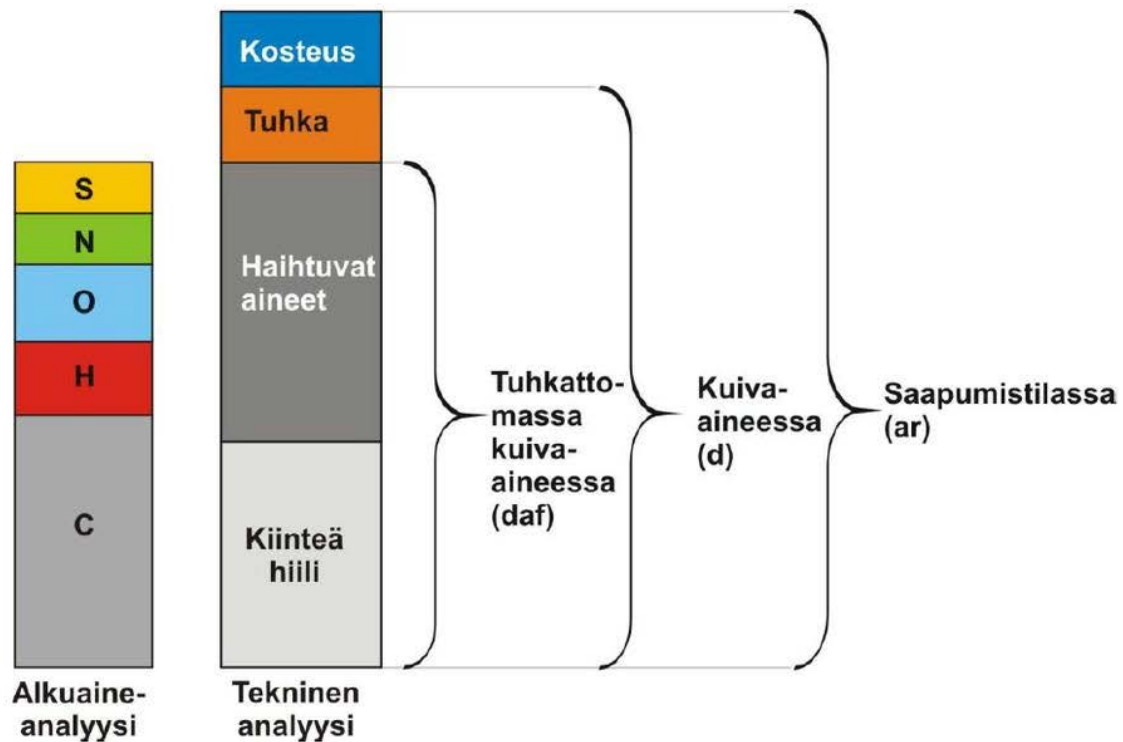
Puun kuiva-aineen koostumuksesta noin 99 % on hiiltä, vetyä ja happea ja se sisältää haihtuvia ainesosia noin 80-90 %. Puu sisältää vähän tuhkaa verrattuna muihin kiinteisiin polttoaineisiin, mikä helpottaa tuhkan käsittelyä ja vähentää näin kustannuksia (KUVA 6). (Airaksinen ym. 2001, 6.)



KUVA 4. Polttopuun koostumus (Airaksinen ym. 2000 6.)

4.1 Puun analyysi

Puun tekninen analyysi ja alkuainekoostumuksen sekä lämpöarvon määrittäminen voidaan suorittaa luotettavasti laboratorioissa tarkasti määriteltujen standardien mukaan. Tekninen analyysi pitää sisälleen puun kosteuden, kiinteän hiilen, haihtuvien aineiden ja tuhkan osuuden määrittelyt (KUVA 3.). (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen- Luntama & Korhonen 2016 23-24.)



KUVA 5. Polttoaineen määritysperusteet (VTT 2016)

4.4.1 Analyyseissa käytetyt standardit

SFS-EN ISO 18134-2:2017 Kiinteät polttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uunikuivausmenetelmä. Osa 2: Kokonaiskosteus. Yksinkertaistettu menetelmä.

Polttoaineen näyte kuivataan 105 °C uunissa, kunnes sen vakiomassa on saavutettu. Näyte punnitaan ennen ja jälkeen kuivauksen. Polttoaineen kosteus saapumistilassa lasketaan yhtälön 7 mukaisesti:

$$M_{ar} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100, \quad (7)$$

missä M_{ar} on polttoaineen kosteus saapumistilassa (m-%)

m_1 on astian massa

m_2 on astian ja näytteen massa ennen kuivausta

m_3 on astian ja näytteen massa kuivauksen jälkeen

(SFS-EN ISO 18134-2:2017.)

SFS-EN ISO 16948:2015 Solid biofuels. Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen.

Näytteen hiili-, vety-, ja typpipitoisuudet määritellään polttamalla näytettä hapen avulla, niin että muodostuu tuhkaa ja palamiskaasua. Kaasu koostuu hiilidioksidista, vesihöyrystä, tpeestä tai sen oksideista, rikin oksideista ja oksohapoista sekä vetyhalideista. Kaasuseoksesta poistetaan analyysia haittaavat epäpuhtaudet ja määritetään siitä hiilidioksidin, vesihöyryn ja typen määrä. Polttoaineen kosteus tulee olla määriteltynä toisesta saman materiaalin näytteestä standardilla ISO 18134-2.

Polttoaineen hiilen, vedyn ja typen pitoisuuden ilmoitetaan tuloksissa massaosuuksina (m-%) kuiva-aineesta ja ne määritellään yhtälöiden 8, 9 ja 10 mukaisesti:

$$\text{Hiilipitoisuus:} \quad C_c = C_{ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (8)$$

$$\text{Typpipitoisuus} \quad N_d = N_{ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (9)$$

$$\text{Vetypitoisuus} \quad H_{ad} = \left(H_{ad} - \frac{M_{ad}}{8,937} \right) \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (10)$$

missä d on kuiva- ainepitoisuudesta

ad on määritelty

M_{ad} on näytteen kosteus analyysihetkellä

Vedyn pitoisuus näytteen vesimäärästä saadaan käyttämällä kerrointa 8,937, joka määritetään veden kemiallisen kaavan H_2O ja vedyn sekä hapen moolimassojen avulla.(SFS-EN ISO 16948:2015.)

SFS-EN ISO 18123:2015 Kiinteät polttoaineet. Haihtuvien aineiden määrittäminen.

Haihtuvien aineiden osuus polttoaineesta määritetään menetetyin massan perusteella, kun näytettä kuumennetaan standardisoiduissa olosuhteissa. Kosteuden osuutta ei huomioida haihtuvissa aineissa.

Haihtuvien aineiden massaosuus kuiva- aineesta lasketaan yhtälön 11 mukaisesti:

$$V_d = \left[\frac{100 - (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] \times \frac{100}{100 - M_{ad}}, \quad (11)$$

missä V_d on haihtuvien aineiden massaosuus (m-%) kuiva- aineesta

m_1 on tyhjän astian ja kannen massa

m_2 on astian, kannen ja näytteen massa ennen kuumennusta

m_3 on astian, kannen ja näytteen massa kuumennuksen jälkeen

M_{ad} on näytteen määritelty kosteus (m-%)

(SFS-EN ISO 18123:2015.)

SFS- EN 15408:2011 Solid recovered fuels. Methods for determination of sulphur (S), chlorine (Cl), fluorine (F) and bromine (Br) content.

Standardi sisältää ohjeet polttoaineen rikki-, kloori-, fluori- ja bromipitoisuuksien määrittämiseen näytepalan avulla. Näytepala poltetaan hapen avulla alipaineistetussa kammiossa. Polton seurauksena näytteessä olevat halogeenit ja sulfaatit muuttuvat rikiksi, klooriksi, fluoriksi ja bromiksi ja ne imeytyvät testissä käytettävään liuokseen, esimerkiksi veteen (H₂O).

Fluorin, kloorin ja bromin massaosuus (m-%) polttoaineesta lasketaan yhtälön 12 mukaisesti:

$$w = \frac{(c - c_0) \times V}{m} \times 100, \quad (12)$$

missä w on fluorin, kloorin tai bromin massaosuus kuiva- aineesta (m-%)
 c on fluorin, kloorin tai bromin määrä liuoksessa (mg/l)
 c_0 on fluorin, kloorin tai bromin määrä liuoksessa ennen imeytymistä (mg/l)
 V on liuoksen tilavuus
 m on liuoksena käytetyn nesteen massa

Rikin massaosuus (m-%) polttoaineesta lasketaan yhtälön 13 mukaisesti:

$$w_s = \frac{(c-c_0) \times V}{m} \times 0.338 \times 100, \quad (13)$$

missä w_s on rikin massaosuus kuiva-aineesta (m-%)
 c on liuoksen rikkipitoisuus (mg/l)
 c_0 on liuoksen rikkipitoisuus ennen imeytymistä (mg/l)
 V on liuoksen tilavuus
 m on liuoksena käytetyn nesteen massa

0,338 on rikin ja sulfaattien suhteellisten massojen stoikiometrinen suhde. (SFS-EN 15408:2011.)

4.2 Puun lämpöarvo

Kalorimetrinen lämpöarvo tarkoittaa sitä lämpöenergian määrää, joka vapautuu, kun aine palaa täydellisesti ja syntyneet palamistuotteet jäähtyvät sen jälkeen +25 °C lämpötilaan. Kalorimetrissa lämpöarvoa määritettäessä sekä polttoaineen sisältämän vedyn palamistuotteena syntyvän veden, että

polttoaineesta haihtuneen kosteuden oletetaan jäähtymisen jälkeen olevan nestemäisessä muodossa. (Alakangas ym. 2016 28.)

Puun kalorimetrinen lämpöarvo määritetään standardin SFS-EN ISO18125:2017 ”Solid biofuels. Determination of calorific value” mukaisesti. Punnittua näytettä poltetaan korkeapaineistetussa hapessa kalorimetripommissa ennalta määritellyissä olosuhteissa. Näytteestä määritellään myös kosteus, jotta saataisiin laskettua absoluuttisesti kuivan polttoaineen lämpöarvo. (Alakangas ym. 2016 28; SFS- EN ISO 18125:2017.)

Suomessa käytetään hyötysuhdelaskelmissa pääsääntöisesti polttoaineen tehollista- eli alemmaa lämpöarvoa. Näin oletetaan, että savukaasuissa oleva vesi ei lauhdu takaisin nesteeksi, kuten asia useimmissa voimalaitoksissa onkin. Tehollinen lämpöarvo lasketaan kalorimetrisesta lämpöarvosta yhtälön 14 mukaisesti:

$$q_{p, \text{net}, d} = q_{v, \text{gr}, d} - 212,2 \times w(H)_d - 0,8 \times [w(O)_d + w(N)_d] \quad (14)$$

missä $q_{p, \text{net}, d}$ on kuiva- aineen tehollinen lämpöarvo vakioaineessa J/g

$q_{v, \text{gr}, d}$ on kuiva- aineen kalorimetrinen lämpöarvo vakiotilavuudessa J/g

$w(H)_d$ on kuivan polttoaineen vetypitoisuus (m- %)

$w(O)_d$ on kuivan polttoaineen happipitoisuus (m- %)

$w(N)_d$ on kuivan polttoaineen typpipitoisuus (m- %)

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

Lämpöarvoista alin on polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa. Se määritetään vähentämällä tehollisesta lämpöarvosta polttoaineen luontaisesti sisältämän ja palamisessa syntyvän veden haihduttamiseen tarvittava lämpöenergia. Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa lasketaan yhtälön 15 mukaisesti:

$$q_{p, \text{net}, ar} = q_{p, \text{net}, d} \times \left(\frac{100 - M_{ar}}{100} \right) - 0,02443 \times M_{ar} \quad (15)$$

missä $q_{p, \text{net}, ar}$ on polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg

$q_{p, \text{net}, d}$ on polttoaineen tehollinen lämpöarvo MJ/kg

M_{ar} on polttoaineen kosteus saapumistilassa (m- %)

0,02243 on veden höyrystymisen entalpian korjauskerroin 25 °C lämpötilassa

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

5 LASKUTOIMITUKSIEN TEORIAA

Hyötysuhde, hiilikonversio ja sen vaikutus hyötysuhteeseen sekä tehokkaamman lämmönvaihtimen vaikutus hyötysuhteeseen määritetään mittaus- ja analyysituloksien pohjalta tehtävillä laskutoimituksilla. Hyötysuhteen laskeminen suoralla menetelmällä on hyvin yksinkertaista, koska prosessin eri osien vaikutusta lämpöhäviöihin ei tarvitse ottaa huomioon. Hiilikonversio lasketaan polttoaineen ja kaasutuksesta jäljelle jääneen tuhkan avulla ja näin voidaan laskea teoreettisen, täydellisen hiilikonversion vaikutus kokonaishyötysuhteeseen. Tehokkaampi lämmönvaihdin alentaa pakokaasun lämpötilaa ja hyötysuhteen kasvu johtuu pakokaasun tuntevan lämmön vaikutuksesta kaasutinlaitoksen lämpötehoon.

5.1 Hyötysuhde

Kaasutinlaitoksen hyötysuhteen laskeminen suoralla menetelmällä tarkoittaa sitä, että lasketaan mittattujen tehojen keskiarvojen ja polttoainetehon suhde tietyllä aikavälillä. Laskelmissa määritetään erikseen sekä lämpö- että sähköhyötysuhteet ja kokonaishyötysuhde. Polttoaineteho saadaan lasketua, kun tiedetään polttoaineen alempi eli tehollinen lämpöarvo (LHV) toimituskosteudessa sekä massavirta yhtälön 16 mukaisesti: (Pietila 2005, 13-14.).

$$Q_{\text{tuotu}} = \dot{m}H \quad (16)$$

missä Q_{tuotu} on polttoaineen lämpöteho

\dot{m} on polttoaineen massavirta

H on polttoaineen lämpöarvo

Suora hyötysuhde lasketaan yhtälön 17 mukaisesti:

$$\eta = \frac{Q_{\text{saatu}}}{Q_{\text{tuotu}}} \quad (17)$$

missä η on hyötysuhde

Q_{saatu} on saatu lämpöteho

Q_{tuotu} on polttoaineen lämpöteho

Sähkön- ja lämmöntuoton hyötysuhteiden määrittämisen jälkeen voidaan laskea yhdistetty hyötysuhde, mikä lasketaan yhdistettyjen tehojen ja syötetyn polttoaineen lämpötehon suhteena.

5.2 Hiilikonversio

Kaasutuksessa pyritään mahdollisimman hyvään hiilikonversioon eli polttoaineen sisältämästä hiilestä pitäisi jäädä jäljelle mahdollisimman vähän. Kaasutuksessa kaikki polttoaineen sisältämä hiili ei poistu haihtuvien aineiden mukana vaan jää tuhkaan jäännösaineeksi. Polttoaineen haihtuvat aineet, kosteus ja tuhka suhteellisin osuuksina lasketaan yhteen ja vähennetään tämä määrä sadasta. Jäljelle jäänyt osuus on kiinteää hiiltä. (Airaksinen ym. 2001, 48.)

Tuhkan määrän ja sen hiilipitoisuuden ollessa selvillä voidaan laskea kaasuttimen hiilikonversio eli se, miten hyvin kaasutusprosessissa saadaan hyödynnettyä polttoaineen sisältämä hiili. Hiilikonversio ilmoitetaan jäljelle jääneen hiilen ja polttoaineen sisältämän kiinteän hiilen suhteena yhtälön 18 mukaisesti:

$$C_c = \frac{c_{pa} - c_{tuhka}}{c_{pa}} \times 100\%, \quad (18)$$

missä C_c on hiilikonversio

c_{pa} on polttoaineen kuiva- aineen hiilipitoisuus

C_{tuhka} on tuhkan hiilipitoisuus

Kun hiilikonversio tiedetään, voidaan laskea paljonko epätäydellinen hiilen palaminen vaikuttaa kaasuttimen hyötysuhteeseen. Kun hiili reagoi hapen kanssa hiilidioksidiksi eksotermisesti reaktioyhtälön 19 mukaisesti:



on vapautuva lämpöenergia eli reaktioentalpia 393,5 kJ/mol. Koska hiilen moolimassa on 12g/mol, on reaktion lämpöarvo (LHV) 32,8 MJ/kg. Hiilen osuuden, tuhkan kertymisajan sekä kokonaismäärän avulla lasketaan jäännöshiilen energia kilowatteina kilogrammaa kohti eli 9,2 kWh/kg.

Täydellisen hiilikonversion vaikutus kaasutinlaitoksen kokonaishyötysuhteeseen voidaan laskea yhtälön 20 mukaisesti:

$$\eta_{\text{uusi}} = [1 + (1 - C_c)] * \eta_{\text{nykyinen}} \quad (20)$$

5.3 Lämmönvaihtimen vaikutus hyötysuhteeseen

Tehokkaamman lämmönvaihtimen käyttöönotto tarkoittaa savukaasun lämpötilan laskemista nykyisestä 180 °C → 110 °C eli lämpötilaero Δt olisi 70 °C. Lämmön talteenoton vaikutus on arvioitava laskennallisesti, kun tiedetään polttoaineen koostumus ja palamisilman todellinen määrä syötetyn polttoaineen määrään nähden.

5.3.1 Palamisen ilmakerroin

Jotta päästäisiin käsiksi savukaasun energiataseeseen täytyy määrittää polttoaineen palamisen ilmakerroin. Ensin määritetään polttoaineen savukaasun koostumus ja palamisilman määrä stoikiometrisessä palamisessa eli kun kaikki polttoaine palaa ja happea ei jää yli. Polttoaineen ainesosien pitoisuuksien avulla voidaan laskea palamisessa syntyvät palokaasut. Inertit eli reagoimattomat aineet siirtyvät savukaasuun suoraan. (Hupa, Kurki- Suonio, Raiko & Saastamoinen 1995, 34-35.)

Savukaasun koostumus ja määrä on helpoin laskea muuttamalla polttoaineessa olevat ainesosuudet ensin mooliosuuksiksi. Osuuksien laskennassa tulee ottaa huomioon polttoaineen kosteus. Laskemisen helpottamiseksi apuna voi käyttää alla olevan mukaista taulukkoa, johon merkitään jokaisen reaktion lopputuote ja sen tarvitsema happimäärä (TAULUKKO 2). (Hupa, Kurki- Suonio, Raiko & Saastamoinen 1995, 34-35.)

TAULUKKO 2. Savukaasun koostumuksen laskeminen (mukaillen Hupa ym. 1995 34-35).

| Lähtöaineet | Mx(g) | mx(g) | nx(mol) | nO2(mol) | NCO2(mol) | nSO2(mol) | nN2(mol) | nH2O(mol) |
|-------------|----------|-------|---------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| C | 12,011 | | | | | | | |
| H2 | 2,016 | | | | | | | |
| S | 32,066 | | | | | | | |
| O2 | 31,999 | | | | | | | |
| N2 | 28,013 | | | | | | | |
| H2O | 18,015 | | | | | | | |
| tuhka | | | | | | | | |
| | Yht (g): | | | | | | | |

Kun tiedetään ainesosien prosentuaalinen osuus polttoaineessa, voidaan laskea aineen määrä grammoina yhdessä kilogrammassa polttoainetta. Laskuissa tulee ottaa huomioon polttoaineen kosteus. Aineen määrä voidaan laskea yhtälön 21 mukaisesti:

$$m_i = [w \times (v_i/100\%)] \times 1000g \quad (21)$$

missä m_i on kaasukomponentin i massaosuus

w on veden suhteellinen määrä polttoaineessa

v_i on pyrolysoituvan aineen i suhteellinen määrä polttoaineessa

Määrä jaetaan aineen moolimassalla ja saadaan näin kunkin aineen määrä mooleina yhtälön 22 mukaisesti:

$$n_i = m_i \times M_i \quad (22)$$

missä n_i on aineen i määrä moolina

m_i = on kaasukomponentin i massaosuus

M_i = on aineen i moolimassa

(Hupa ym. 1995, 33-35.)

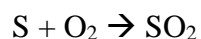
Reaktioyhtälöiden avulla saadaan selville, kuinka paljon reaktioon tarvitaan happea. Jotkut aineet, kuten typpi ja vesi siirtyvät suoraan palamiskaasuun eli ne ovat inerttejä aineita. Osa vedestä osa voi reagoida myöhemmin, varsinkin jos se pääsee kulkemaan kuumen vyöhykkeen läpi, kuten myötävirtatekniikassa. Polttoaineessa sitoutuneena oleva happi vähentää palamisessa tarvittavan hapen määrää. (Hupa ym. 1995, 34-35.)

Hiilen (C) ja happi (O₂) reagoivat hiilidioksidiksi reaktioyhtälön 23 mukaisesti:



eli yhtä hiilimoolia kohden tarvitaan yksi mooli happea.

Vettä ja rikkidioksidia syntyy reaktioyhtälöiden 24 ja 25 mukaisesti:



(Hupa ym. 1995, 32.)

Moolimassojen avulla lasketaan kuinka paljon yksi kilogramma polttoainetta tuottaa savukaasua grammoina yhtälön 21 mukaisesti:

$$m_i = n_i * M_i \quad (25)$$

missä m_i on kaasukomponentin i massaosuus

n_i on aineen i määrä mooleina

M_i on aineen i moolimassa

Palamisilman massavirta stoikiometrisessa palamisessa lasketaan yhtälön 26 mukaisesti:

$$L_0 = \dot{m}_{pa} * (m_{O_2} + m_{N_2}) \quad (26)$$

missä L_0 on stoikiometrisen palamisilman massavirta

m_{O_2} on hapen määrä, kun 1 kg polttoainetta palaa stoikiometrisesti

m_{N_2} on typen määrä, kun 1 kg polttoainetta palaa stoikiometrisesti

\dot{m}_{pa} on polttoaineen massavirta

Kun palamisilman määrä stoikiometrisessa palamisessa on määritelty ja tiedetään todellinen palamisilman määrä voidaan laskea ilmakerroin palamiselle yhtälön 27 mukaisesti:

$$\lambda = \frac{L}{L_0} \quad (27)$$

missä λ on ilmakerroin

L on todellisen palamisilman massavirta

L_0 on stoikiometrisen palamisilman massavirta

(Hupa ym. 1995, 34-35.)

5.3.2 Pakokaasun lämpöteho ja uusi hyötysuhde

Ilmakertoimen avulla voidaan laskea hapen ja typen osuus todellisessa palamistilanteessa yhtälön 28 mukaisesti:

$$n_i = \lambda * n_{ist} \quad (28)$$

missä n_i on todellisen palamisen hapen tai typen moolimäärä

λ on ilmakerroin

n_{ist} on stoikiometrisen palamisen hapen tai moolimäärä

TAULUKKO 3. Savukaasun lämpötehon laskeminen (Ominaislämpökapasiteetit on esitetty lämpötilassa 145 °C eli keskimääräisessä lämpötilassa kyseisellä lämpötilavälillä.)

| Kaasun lämpöarvot | | cp | | | |
|-------------------|---------|---------|-------|--------|--------------|
| Aine | mx kg/h | mx kg/s | kJ/kg | muutos | lämpöteho kW |
| CO2 | 64,09 | 0,02 | 0,83 | 70,00 | 1,03 |
| SO2 | 0,01 | 0,00 | 0,62 | 70,00 | 0,00007 |
| N2 | 211,71 | 0,06 | 1,04 | 70,00 | 4,29 |
| H2O | 6,01 | 0,00 | 2,00 | 70,00 | 0,23 |
| O2 | 66,62 | 0,02 | 0,91 | 70,00 | 1,18 |
| Yht. | 348,42 | 0,10 | 5,40 | | 6,74 |

Kaasun jäähtymisestä saatu lämpömäärä lasketaan kertomalla kaasuseoksen ominaislämpökapasiteetti lämpötilaerolla ja massavirralla yhtälön 29 mukaisesti: (Hupa ym. 1995, 52-53.)

$$Q_{saatu} = \dot{m}_i * c_p * \Delta t \quad (29)$$

missä Q_{saatu} on jäädytyksestä saatu lämpömäärä

\dot{m}_i on aineen i massavirta

c_p on aineen ominaislämpökapasiteetti

Δt on lämpötilaero

(Hupa ym. 1995, 48-53.)

Kun laskettu lämpöteho lisätään mitattuun lämpötehoon, saadaan uuden lämpötehon ja polttoainete-hon suhteesta laskennallinen arvo uudelle lämpöhyötysuhteelle yhtälön 30 mukaisesti. Oletuksena on, että kaasutuslaitoksen muut olosuhteet pysyvät samoina.

$$\eta_{\text{uusi}} = \frac{Q_{\text{saatu}}}{Q_{\text{tuotu}}} \times 100\% \quad (30)$$

missä η_{uusi} on uusi lämpöhyötysuhde

Q_{saatu} on jäädytyksestä saatu lämpömäärä

Q_{tuotu} on polttoaineteho

(Pietila 2005, 14.)

6 MITTAUSASETELMA

Mittaukset suoritettiin Volter Oy:n toimitiloissa Kempelessä joulukuussa 2018. Volter Oy oli järjestänyt valmiin mittausasetelman, missä Volter 40 Indoor - kaasutinlaitoksessa oli valmiina mittauksessa tarvittavat anturit ja mittalaitteet. Laitosta ajettiin niin pitkään, että se päätyi steady- state- tilaan eli kaikki lämpöhäviöt olivat ajasta riippumattomia ja kaasutusprosessi oli päätyneet ajasta riippumattomaan tilaan. Kaasutuksessa aina esiintyvät pienet vaihtelut, eivät vaikuta mittauksiloksiin merkittävästi ajasta riippumattomassa ajotilassa.

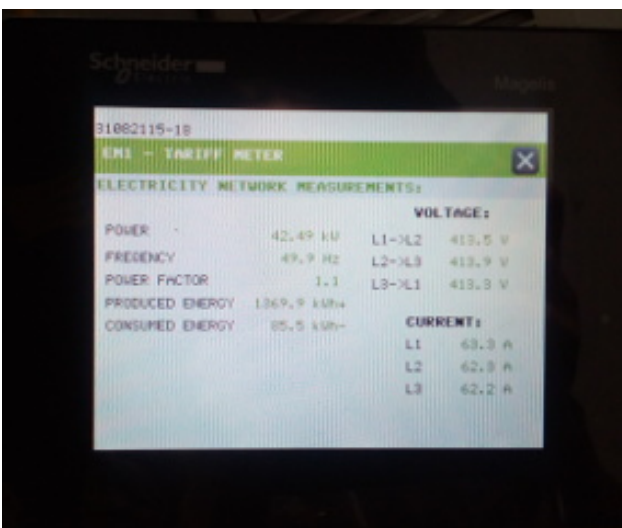
Hyötysuhteen määrittämiseen olennaiset mittaukset olivat kaasutinlaitoksen tuottamien sähkötehon ja lämpötehon mittaus. Lämpötehon mittaus suoritettiin Volterin Sontex Supercal 531 - mittarilla (KUVA 6) ja Centria- ammattikorkeakoulun Flexim Fluxus F601- mittarilla (KUVA 7). Sähköteho saatiin luettua kaasutinlaitoksen omasta, prosessien tarkkailemiseen ja hallintaan käytettävästä kosketusnäytöstä (KUVA 8).



KUVA 6. Sontex Supercal 531 (Volter Oy 2019)



KUVA 7. Flexim Fluxus F601



KUVA 8. Volter 40 Indoor kosketusnäyttö

Polttoaine punnittiin ja se syötettiin kaasutinyksikköön manuaalisesti tarpeen mukaan. Lisätyn polttoaineen määrät mitattiin ja lisäyksen ajankohdat merkittiin ylös. Mittaukset aloitettiin ajankohtana, jolloin prosessi oli kaasutinlaitoksen käynnistämisen jälkeen ollut tasainen jo pitkän aikaa. Tuhka-

astia tyhjennettiin tuhkan määrän seuraamista ja koeajankohtana syntyneen tuhkan analysoimista varten. Laskelmiin käytettiin mittaustuloksia tunnin ajalta ja aikaväliksi valittiin aika, jolloin kaasutin oli toimi täydellä teholla ja prosessi oli tasainen yhtäjaksoisesti. Sekä sähkö- että lämpöteho mitattiin kymmenen minuutin välein. Lämpöteho mitattiin molemmilla käytössä olevilla mittareilla.

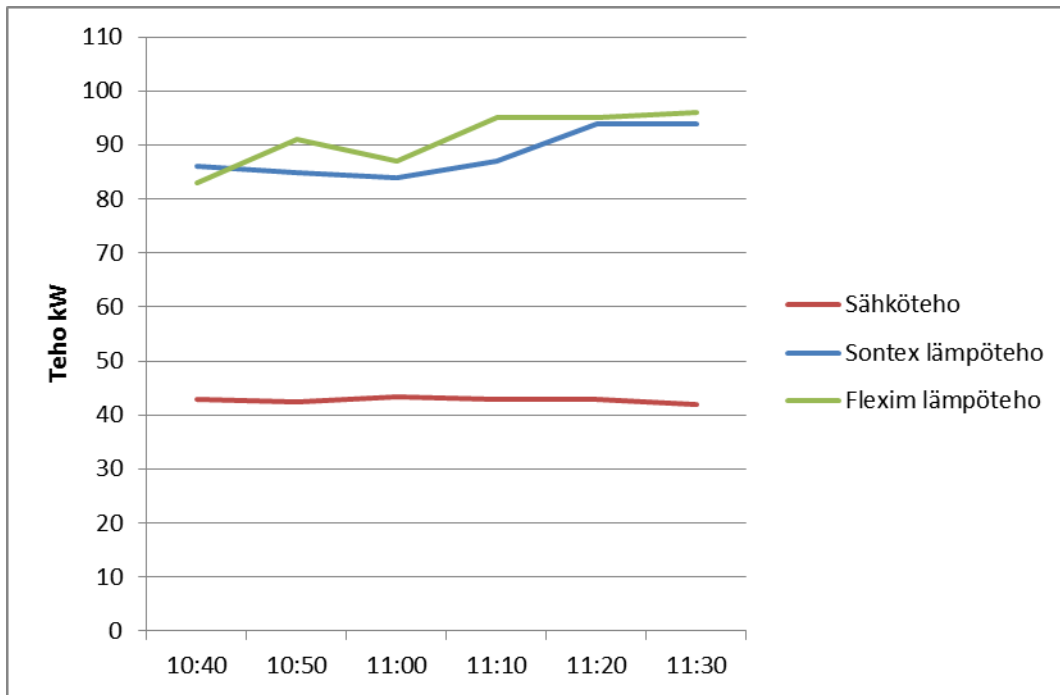
7 TULOKSET

Tuloksina esitetään mittauksien perusteella laskettu teoreettinen hyötysuhde ja hiilikonversio, sekä täydellisen hiilikonversion ja tehokkaamman lämmönvaihtimen teoreettinen laskennallinen vaikutus kaasutinlaitoksen hyötysuhteeseen.

7.1 Hyötysuhde

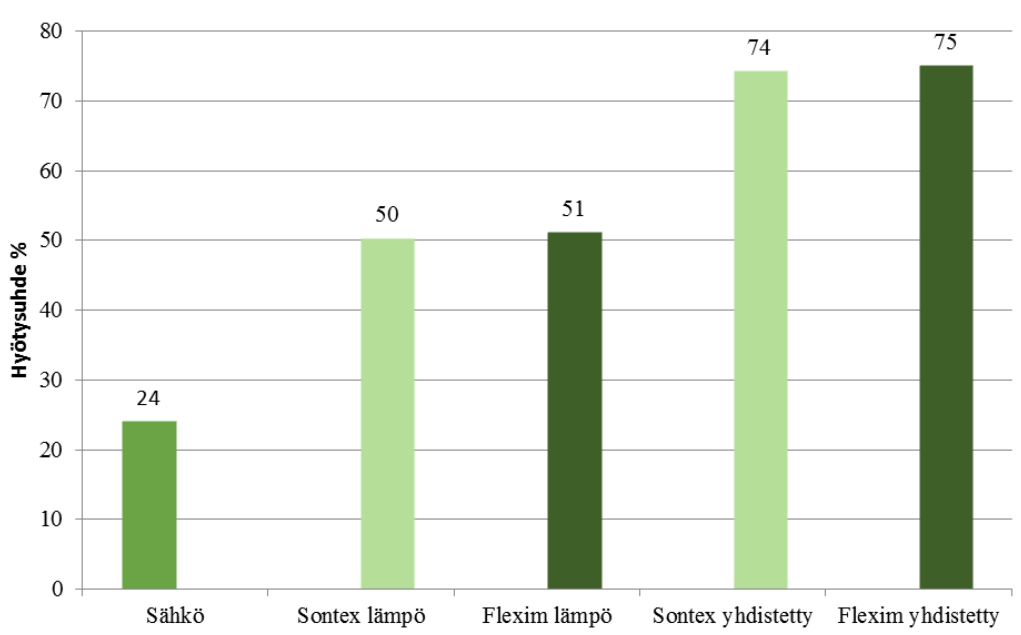
Hyötysuhteen laskemiseen suoralla menetelmällä tarvitaan mittaukset polttoaineen massavirrasta sekä kaasutinlaitoksesta ulos saatavista sähkö- ja lämpötehoista. Mittaukset suoritettiin tunnin ajalta ja kaasutin toimi mittauksen ajan tasaisesti täydellä teholla. Mittauksen aikana syötetty polttoaine punnittiin ja lisäyksien ajankohdat merkittiin ylös. Sähkö- ja lämpöteho mitattiin kymmenen minuutin välein. Laskelmissa käytettiin saatujen tehojen keskiarvoa mittauksen ajalta. Polttoaineen kulutettu kokonaismäärä laskettiin summaamalla polttoaineen lisätyt määrät samalta ajanjaksolta.

Polttoaine oli analysoitu ennen koetta riippumattomassa laboratoriossa lämpöarvon määrittämiseksi. Laskelmissa käytettiin tehollista lämpöarvoa saapumistilassa, koska ei voida olettaa, että polttoaineen sisältämä vesi lauhtuisi höyrystymisen jälkeen takaisin vedeksi. Polttoainetehoksi saatiin 180 kW. Sähkö- ja lämpötehot olivat mittauksen aikana hyvin tasaiset ja laskelmissa käytettiin tehojen keskiarvoja mittauksen ajalta (KUVIO 1).



KUVIO 1. Mitattujen tehojen vaihtelu

Sontexin mittarilla mitattujen lämpötehojen keskiarvoksi tuli 89 kW ja lämpöhyötysuhteeksi 50 %. Fleximin mittaustulokset olivat hieman suurempia ja lämpötehojen keskiarvo oli 92 kW, joten hyötysuhteeksi tuli näin 51 %. Mitattujen sähkötehojen keskiarvo oli 43 kW ja sähkön tuoton hyötysuhde 24 %. Summaamalla mitattujen tehojen keskiarvot ja jakamalla tulos polttoaineteholla saadaan yhdistetty hyötysuhde. Jälleen hyötysuhde erosi hieman riippuen siitä, kumpaa mittaria käytettiin. Volterin omalla mittarilla kokonaishyötysuhteeksi 74 % tuli ja Centrian mittarilla 75 % (KUVIO 2).

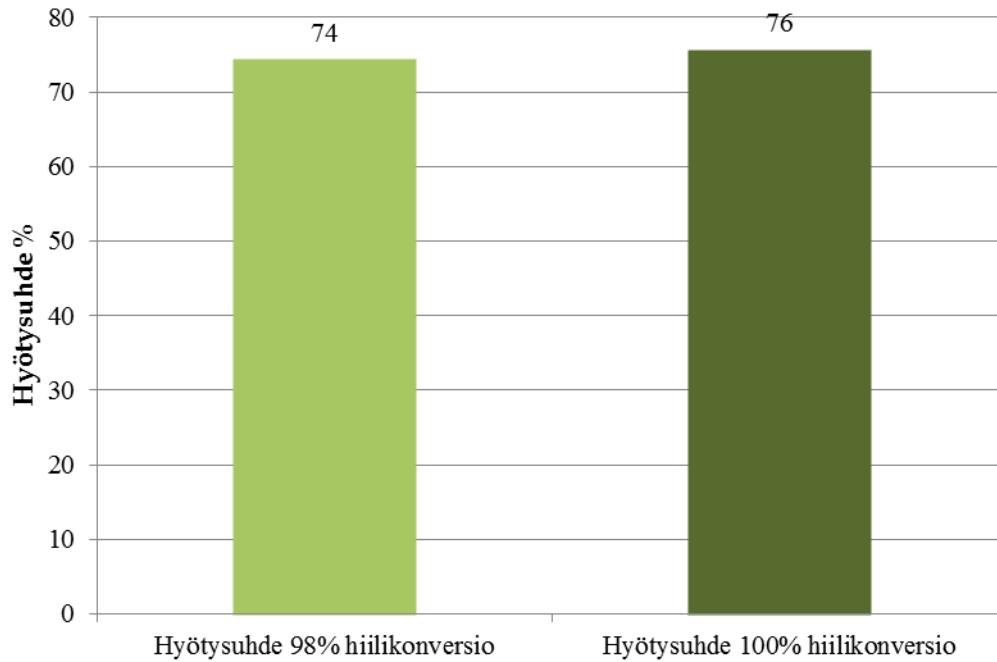


KUVIO 2. Volter 40 Indoor hyötysuhteet

7.2 Hiilikonversio ja sen vaikutus hyötysuhteeseen

Täydellinen eli 100 % hiilikonversio tarkoittaa sitä, että polttoaineen sisältämä hiili on reagoanut kaasutuksessa ja palanut moottorissa kokonaan ja siten tuhkassa ei ole hiiltä. Kaasutuksessa mittausajankohdan aikana muodostunut tuhka punnittiin ja sen koostumus analysoitiin riippumattomassa laboratoriossa. Volterin kaasuttimen hiilikonversio oli laskelmien perusteella 98 % .

Jos hiilikonversio olisi täydellistä, olisi puukaasuttimen yhdistetty tuotto 138 kW. Tämä laskennallinen arvo edellyttää, että mikään muu ei prosessissa muuttuisi. Oletus lienee perusteltu, sillä hiilikonversio oli muutenkin lähellä täydellistä. Se parantaisi kokonaishyötysuhdetta 74 % :sta 77 %:iin (KUVIO 3). Täydellinen hiilikonversio parantaisi kaasuttimen kokonaistehon hyötysuhdetta 3,2 % .



KUVIO 3. Hiilikonversion vaikutus hyötysuhteeseen

7.3 Lämmönvaihtimen vaikutus hyötysuhteeseen

Tehokkaampi lämmönvaihdin alentaisi kaasutinlaitoksen pakokaasun lämpötilaa 70 °C ja jäähdytyksestä saatava lämpöteho voidaan arvioida laskemalla pakokaasun lisäjäähdytyksen avulla saatavissa oleva lämpöteho. Lämpötehon määrittäminen tapahtuu laskemalla ensin stoikiometrisen eli täydellisen palamisen synnyttämän pakokaasun koostumus ja määrä. Pakokaasun todellinen koostumus voidaan määrittää, kun tiedetään polttoaineen alkuainekoostumus ja palamisen ilmakerroin.

7.3.1 Ilmakerroin

Polton ilmakerrointa laskettaessa täytyy ensin määrittää stoikiometrisen palamisen tarvitsema ilmamäärä. Volterin ilmoituksen mukaan todellinen palamisilman määrä täydellä teholla tuntia kohden on 277,5 kg. (Kaaresto 2019.) Todellisen palamisen ja stoikiometrisen palamisen ilmamäärien suhteesta saadaan ilmakertoimeksi 1,8. Ilmakertoimella kerrotaan stoikiometrisen palamisen mukaan

lasketut hapen ja typen arvot ja ne otetaan huomioon laskettaessa todellisessa palamisessa muodostuvan pakokaasun tuntuvaa lämpöä.

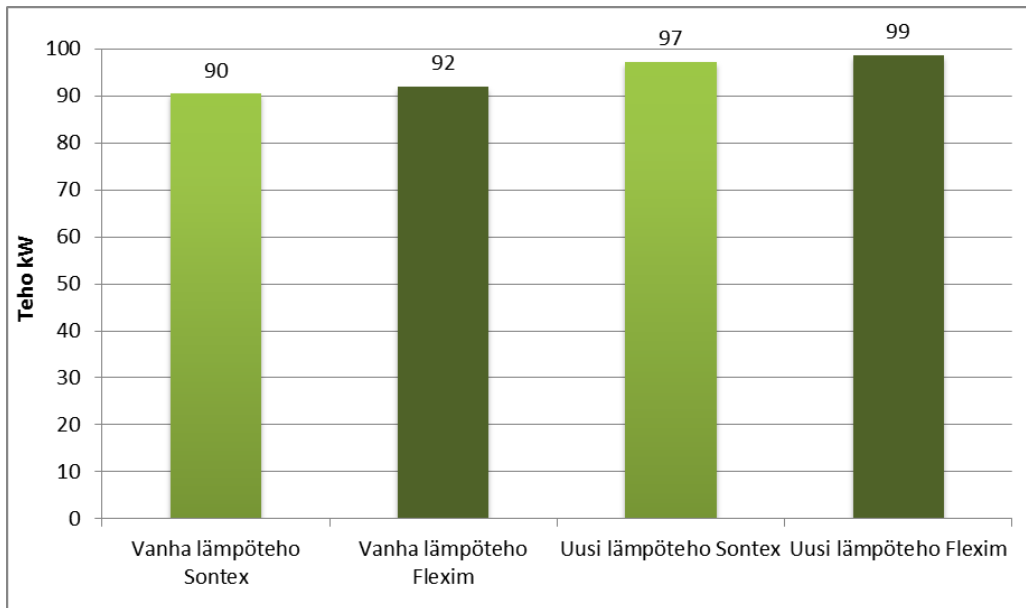
7.3.2 Pakokaasun lämpöteho ja sen vaikutus hyötysuhteeseen

Jos kaasuttimeen vaihdettaisiin tehokkaampi lämmönvaihdin, joka jäähdyttäisi pakokaasua 70 °C alhaisempaan lämpötilaan, paranisi kaasuttimen kokonaishyötysuhde pakokaasun kaasuyhdisteiden lämpökapasiteetin verran lämpötilaero huomioon ottaen (TAULUKKO 4). Samalla kokonaishyötysuhde nousisi. Pakokaasun laskennallinen, lisjäähdytyksen myötä saatavissa oleva lämpöteho on 6,7 kW ja tämä voidaan lisätä mitattuihin lämpötehoihin .

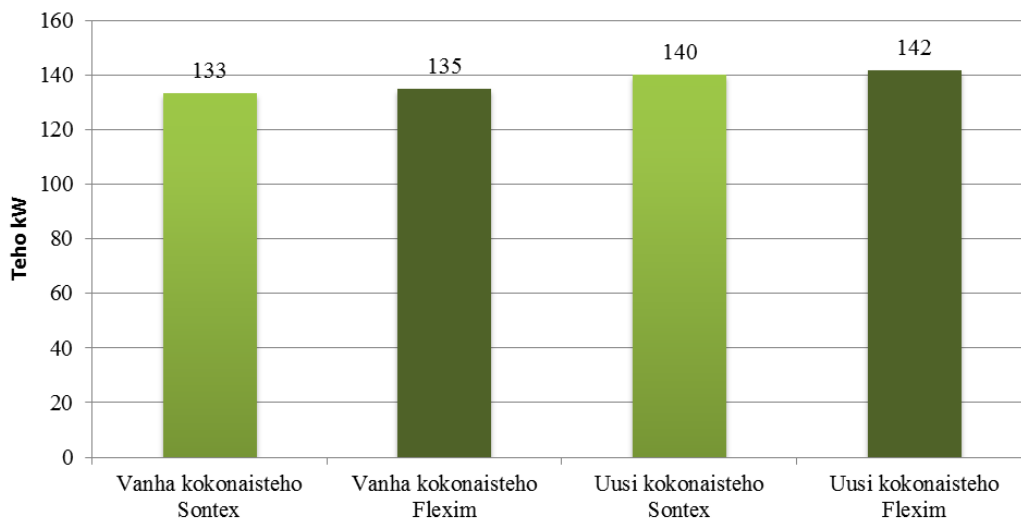
TAULUKKO 4. Pakokaasun lämpöteho.

| Kaasun lämpöarvot | | cp | | | |
|-------------------|---------|---------|-------|--------|--------------|
| Aine | mx kg/h | mx kg/s | kJ/kg | muutos | lämpöteho kW |
| CO2 | 64 | 0,02 | 0,83 | 70,00 | 1,03 |
| SO2 | 0 | 0,00 | 0,62 | 70,00 | 0,00007 |
| N2 | 212 | 0,06 | 1,04 | 70,00 | 4,29 |
| H2O | 6 | 0,00 | 2,00 | 70,00 | 0,23 |
| O2 | 67 | 0,02 | 0,91 | 70,00 | 1,18 |
| Yht. | 348 | 0,10 | 5,40 | | 6,74 |

Alkuperäinen lämpöteho oli Sontex- mittarilla mitattuna 90 kW ja Fleximilla mitattuna 92 kW. Kokonaisteho eli sähkö- ja lämpötehojen summa oli mittarista riippuen, joko 133 kW tai 135 kW. Suuremman lämmönvaihtimen vaikutuksesta lämpöteho olisi laskennallisesti 97 kW tai 99 kW (KUVIO 4) sekä kokonaisteho vastaavasti joko 140 kW tai 142 kW (KUVIO 5).

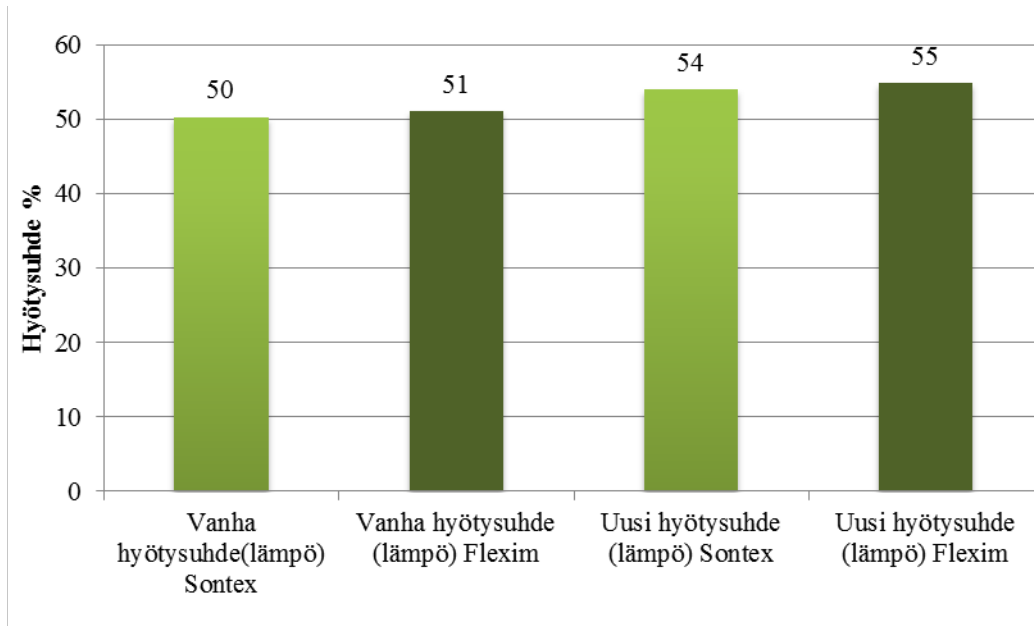


KUVIO 4. Lämmönvaihtimen vaikutus lämpötehoon

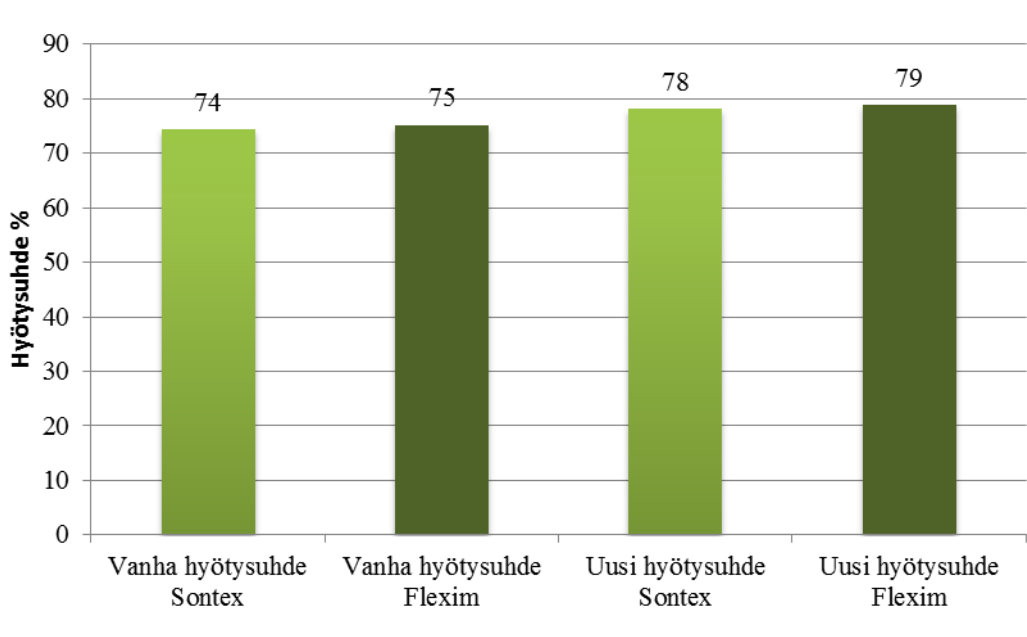


KUVIO 5. Lämmönvaihtimen vaikutus kokonaistehoon

Suuremman lämmönvaihtimen vaikutuksesta lämpöhyötysuhde olisi joko 54 tai 55 %, riippuen siitä kumman mittarin mittaustulosta sovellettaisiin ja (KUVIO 6) kokonaishyötysuhde olisi joko 78 tai 79 % (KUVIO 7). Silloin lämpöhyötysuhde paranisi 7 % ja kokonaishyötysuhde 5 %.



KUVIO 6. Lämmönvaihtimen vaikutus lämpöhyötysuhteeseen.



KUVIO 7. Lämmönvaihtimen vaikutus kokonaishyötysuhteeseen.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Hyötysuhteen määrittämisessä eri mittareilla mitatut lämpötehot poikkesivat hieman toisistaan ja näin laskutoimituksien lopputulos oli erilainen. Centrian Flexim mittarilla mitattu teho oli hieman suurempi, kuin Volterin omalla mittarilla mitattu. Joka tapauksessa ero oli hyvin pieni, koska eroa eri mittareiden mukaan lasketulla lämpöhyötysuhteella oli vain prosenttiyksikkö. Mittaustuloksiin saattoi vaikuttaa antureiden asennuspaikat ja Centrian mittalaitteen kalibrointi. Polttoaineen syötön mittauksien ja laskelmien mukaan puuhakkeen mittaajajankohdalla luovuttama polttoainetehto oli 180 kW. Volter 40 Indoor - puukaasutinlaitoksen lämpöteho oli 90 tai 92 kW, riippuen mittalaitteesta ja sähköteho oli 40 kW, jolloin kokonaistehoksi tuli 132 tai 134 kW. Lämpöhyötysuhde 52 % ja sähköhyötysuhde 24 % sekä kokonaishyötysuhde 72 % vastaavat hyvin saman mittaluokan myötävirta-kaasuttimien hyötysuhteita. (VTT 2013; Knoef 2012, 37.)

Volterin kaasuttimen hiilikonversio on erittäin hyvä. Hiilen täydellinen palaminen vaikuttaisi 3,4 % korotuksella hyötysuhteeseen. Käytännössä 100 % hiilikonversiota on erittäin hankala saavuttaa. Polttoaineen suurempi viipymäaika kaasuttimessa tai kaasun virtaaman pienentäminen voisivat parantaa hiilikonversiota, mutta silloin täytyisi laitekoko kasvaa ja tämä aiheuttaisi lisäkustannuksia ja on olemassa helpompiakin keinoja parantaa hyötysuhdetta, kuten nykyistä tehokkaamman lämmönvaihtimen asentaminen.

Lämmönvaihtimen vaikutus erityisesti lämpötehoon on merkittävä. Jos kaasuttimeen asennettaisiin tehokkaampi lämmönvaihdin, joka jäähdyttäisi pakokaasun nykyisestä 180 °C → 110 °C, kasvaisi lämpöteho 7 kW. Tämä suurentaisi lämpöhyötysuhdetta 7 % ja kokonaishyötysuhdetta 4 %. Laskelmien perusteella lämmönvaihtimen tehon suurentamista kannattaisi jo harkita, mikäli sen kustannukset olisivat kohtuulliset. Suurempi lämmönvaihdin todennäköisesti tekisi kaasutinlaitoksen fyysisestä koosta suuremman ja lämmönvaihtimen hankintakustannukset tekisivät siitä kalliimman.

LÄHTEET

Airaksinen, L., Alakangas, E., Alanen, V-M., Kainulainen, S., Puhakka, A., Siponen, T. & Soini, R. 2001 Hakelämmitysopas. Helsinki & Joensuu: Motiva.

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

<https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>

Viitattu 1.5.2019.

Basu, F. 2010 Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Elsevier Science & Technology.

Hupa, M., Kurki-Suonio, I., Raiko, R. & Saastamoinen, J. 1995 Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Teknillisten Tieteiden Akatemia(TTA), Gummerus.

Jarva, K. & Niskanen, M. 2011 Stirling- moottori puukaasukäytössä. Opinnäytetyö keskipohjanmaan ammattikorkeakoulu.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/33120/niskanen_mauri.pdf?

Viitattu 20.4.2019.

Juuso, Arto. 2017 Puukaasutuslaitteisto paikalliskäytössä. Opinnäytetyö Lapin ammattikorkeakoulu.

<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2017122022248>

Viitattu 20.4.2019.

Kouvo, L. 2017 Polttoaineen kosteuden vaikutus kaasutusprosessin toimintaan. Kandidaattityö Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

<http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/131014/Lauri%20Kouvo%20Kandi%20FINAL.pdf?sequence=2>

Viitattu 1.5.2019.

Köhler, S. 2007 Puukaasun aika. Helsinki: Alfamer.

Pietilä, K. 2005 Puun panospolton identifointi ja säätö tulisijassa. Diplomityö Oulun yliopisto.

http://www.student.oulu.fi/~mika/Diplomityx_Kai_Pietilx.pdf

Viitattu 1.5.2019.

Suokko, A. 2019 Kaasutusluento Centria- ammattikorkeakoulu Ylivieska

Volter. 2019 "Our Story" <https://www.volter.fi/our-story/> Viitattu 20.4.2019.

Volter Oy. 2017 Volter_40_Indoor_overview_10_2017.ppt.

Volter Oy. 2018 TECHSPEC_002338_Technical_Specification_and_Desing_Values_Volter_40_Indoor-1.7.pdf.

FTF Fuel Testing Finland Oy
Tutkimustodistus
 Projekti: 180427/1

Pvm: 28.12.2018
 1/2

Volter Oy

| | | | |
|--------------------|------------------|------------------------|------------|
| Tutkimuksen nimi: | Volter, puuhake | Näytteenottopvm: | |
| Näytteenottopiste: | Puuhake, Y182646 | Näyte saapui: | 17.12.2018 |
| | | Analysointi aloitettu: | 17.12.2018 |

Biopolttoaineet

| Määrittys | 18YB00908 | Yksikkö | Menetelmä | |
|--|-----------|---------|--|---|
| Kokonaiskosteus | 4,2 | m-% | SFS-EN ISO 18134-2 ¹ | V |
| Tuhka 550°C, vedetön | 0,62 | m-% | SFS-EN ISO 18122 ¹ | V |
| Haihtuvat aineet, vedetön | 84,5 | m-% | SFS-EN ISO 18123 ¹ | V |
| Hiili, C vedetön | 51,4 | m-% | SFS-EN ISO 16948 ¹ | V |
| Vety, H vedetön | 6,02 | m-% | SFS-EN ISO 16948 ¹ | V |
| Typpi, N vedetön | 0,24 | m-% | SFS-EN ISO 16948 ¹ | V |
| Fluoridi (F), vedetön | <0,005 | m-% | SFS-EN 15408 m, SFS-EN ISO 16994 m. | V |
| Kloori (Cl), vedetön | <0,005 | m-% | SFS-EN 15408 m., SFS-EN ISO 16994 m. ¹ | V |
| Rikki (S), vedetön | 0,0083 | m-% | ASTM D4239 m., SFS-EN 15408 m., SFS-EN ISO 16994 m. ¹ | V |
| Kalorimetrinen lämpöarvo, vedetön | 20,62 | MJ/kg | SFS-EN ISO 18125 ¹ | V |
| Kalorimetrinen lämpöarvo, saapumistila | 19,75 | MJ/kg | SFS-EN ISO 18125 ¹ | V |
| Tehollinen lämpöarvo, vedetön | 19,31 | MJ/kg | SFS-EN ISO 18125 ¹ | V |
| Tehollinen lämpöarvo, saapumistila | 18,39 | MJ/kg | SFS-EN ISO 18125 ¹ | V |
| Toimitettu energiamäärä (vedetön) | 5,36 | MWh/t | EF1001 | V |
| Toimitettu energiamäärä (saapumistila) | 5,11 | MWh/t | EF1001 | V |

Tutkimustodistuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain laboratorion kirjallisella luvalla. Testaustulokset koskevat vain tutkittua näytettä.

FTF Fuel Testing Finland Oy
Tutkimustodistus
Projekti: 180427/1

Pvm: 28.12.2018
2/2

¹ FINAS -akkreditoitu menetelmä. Mittausepävarmuus ilmoitetaan tarvittaessa. Akkreditointi ei koske lausuntoa.

FTF Fuel Testing Finland Oy



Eliisa Hatanpää
Tutkimuskemisti, FM, +358 40 075 9657

Tämä tutkimustodistus on allekirjoitettu sähköisesti ja varmennettu sertifikaatilla.

Laboratoriot V Analysoitu Vantaalla
Jakelu jani.kaaresto@volter.fi

Tutkimustodistuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain laboratorion kirjallisella luvalla. Testaustulokset koskevat vain tutkittua näytettä.



Testausseloste (LUONNOS)

1 (1)

19.12.2018

Eurofins Ahma Oy
Teollisuustie 6
96100 Rovaniemi

Saaja:

Volter Oy

Koivikkohaka 9
90450 Kempele

Tilauksen tiedot:

Asiakastunnus: 3604

Tilaustunnus: O-18-02655

Tilauksen kuvaus: Tuhkanäyte 1 kpl

| | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Näytetunnus: O-18-02655-001 | Kuvaus: Tuhkanäyte | | |
| Näyte otettu: | Vastaanotto: 12.12.2018 | | Tutkimus aloitettu: 14.12.2018 |
| Näytetyyppi: Tuhka | Näytteenottaja: | | |
| Analyysit | Yksikkö | Tulos | Menetelmä / Laboratorio |
| Hiihi (C) kuiva-aineessa | massa-% | 78,1 | SFS-EN ISO 16948:2015 / OUL |
| Vety (H) kuiva-aineessa | massa-% | <0,8 | SFS-EN ISO 16948:2015 / OUL |
| Typpi (N) kuiva-aineessa | massa-% | 0,69 | SFS-EN ISO 16948:2015 / OUL |

Mittausepävarmuudet ovat saatavissa laboratorionost.

Yhteyshenkilöt

Polttoaineanalytiikka: Ilkka Välimäki, 044 256 3322, IlkkaValimaki@eurofins.fi

Tulokset pätevät ainoastaan tässä selosteessa mainituille näytteille.
Tämän selosteen saa kopioida vain kokonaan. Muussa tapauksessa on
pyydyttävä lupa Eurofins Ahma Oy:ltä.

Menetelmäviittausten lopussa olevien laboratoriotunnusten selitteet:
OUL = Eurofins Ahma Oy, Sammonkatu 8, 90570 Oulu, p. 044 588 5260

POLTTOAINEEN LISÄYKSEN MÄÄRÄT JA AJANKOHDAT

LIITE 3.

LÄMPÖTEHON MITTAUSTULOKSET

LIITE 4.

| | LÄMPÖTEHOT | |
|-----------|------------------|------------------|
| | Sontex lämpöteho | Flexim lämpöteho |
| 10:40 | 86,19 | 83 |
| 10:50 | 84,8 | 91 |
| 11:00 | 84 | 87 |
| 11:10 | 87 | 95 |
| 11:20 | 94 | 95 |
| 11:30 | 94 | 96 |
| 10:40 | 94 | 96 |
| KA | 89 | 92 |

SÄHKÖTEHON MITTAUSTULOKSET

LIITE 5

| | Sähköteho | |
|-------|-----------|----|
| 10:40 | | 43 |
| 10:50 | | 42 |
| 11:00 | | 43 |
| 11:10 | | 43 |
| 11:20 | | 43 |
| 11:30 | | 42 |
| 10:40 | | 43 |
| | KA | 43 |

PAKOKAASUN KOOSTUMUS

LIITE 6

| Lähtöaineet | Mx(g) | %/100 | mx(g) | | nx(mol) | nO2(mol) | NCO2(mol) | nSO2(mol) | nN2(mol) | nH2O(mol) |
|-------------|-------------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|-----------|---------------------|----------|------------|
| C | 12,011 | 0,497552 | 497,552 | | 41,42469 | 41,42469 | 41,424694 | | | |
| H | 2,016 | 0,0576716 | 28,8358 | | 14,30347 | 3,575868 | | | | 7,15173611 |
| S | 32,066 | 0,000079514 | 0,079514 | | 0,00248 | 0,00248 | | 0,002479698 | | |
| O | 16 | 0,41803028 | 418,0303 | | 13,06345 | -13,0634 | | | | |
| N | 28,013 | 0,0024 | 2,4 | | 0,042837 | 0,042837 | | | 0,021419 | |
| H2O | 18,015 | 0,042 | 42 | | 2,331391 | | | | | 2,33139051 |
| tuhka | | 0,0059396 | 5,9396 | | | | | | | |
| | Yht (g): | 0,981672994 | 994,8372 | | O2 yht. | 31,98243 | | | H2O yht. | 9,48312662 |
| | Typpeä ilmasta | | | | | 117,2689 | | | | |
| | Palamisilmaa yht. | | O2 | N | | 149,2514 | | | | |
| | Palamisilmaa kilossa | | 1,023406 | 3,28353 | | | | Savukaasua yht mol. | 200,1831 | |
| | Palamisilmaa 35,152kg haketta | | 35,97476 | 115,4226 | 151,3974 | | | | | |

PAKOKAASUN LÄMPÖÄRVOT

LIITE 7

| Kaasun lämpöarvot | | cp | | | |
|-------------------|----------|----------|-------|--------|--------------|
| Aine | mx kg/h | mx kg/s | kJ/kg | muutos | lämpöteho kW |
| CO2 | 64,08564 | 0,017802 | 0,825 | 70 | 1,028040455 |
| SO2 | 0,005584 | 1,55E-06 | 0,623 | 70 | 6,76477E-05 |
| N2 | 211,7099 | 0,058808 | 1,043 | 70 | 4,293594503 |
| H2O | 6,005316 | 0,001668 | 2 | 70 | 0,233540062 |
| O2 | 66,61811 | 0,018505 | 0,913 | 70 | 1,182656513 |
| Yht. | 348,4246 | 0,096785 | 5,404 | | 6,737899181 |