

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Energia- ja polttomoottoritekniikka

2019

Santtu Naukkarinen

# KIINTEÄN POLTTOAINEEN SAVUKAASULASKURI

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

2019 | 38 sivua

Santtu Naukkarinen

## KIINTEÄN POLTTOAINEEN SAVUKAASULASKURI

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda laskuri, jonka avulla saataisiin laskettua syntyvän savukaasun määrä syötetyn polttoaineen mukaan. Työn idea sai alkunsa siitä, kun Suomessa on paljon 0,5-4 MW kattilalaitoksia, joissa syntyvän savukaasun määrä ei ole tiedossa. Savukaasun määrittämiseksi opinnäytetyössä käydään läpi palamisprosessin ja polttoaineiden teoriaa, jonka pohjalta savukaasulaskuri luominen aloitettiin. Työn tilaajana toimi South-West Supply Oy Ltd.

Kattilalaitoksissa voidaan käyttää useita eri polttoaineita lämmön tai sähkön tuottamiseen. Koska polttoaineita on useita, päätettiin tässä työssä keskittyä pelkästään puu-, turve- ja kuoripolttoaineisiin sekä niiden polttoaineseoksiin. Polttoaineseos koostuu pääasiassa puupolttoaineesta ja turpeesta, sillä näiden seoskäyttö on yleisin.

Opinnäytetyö perustuu palamisprosessin, polttoaineiden koostumusten ja kemiallisten reaktioiden teorian soveltamiseen. Tiedot haettiin eri verkko- ja kirjallaisista lähteistä. Työn tuloksena kehitetty laskuri luotiin teoriasta löydettyjä kaavoja ja taulukoita apuna käyttäen. Laskuri päätettiin luoda Excel-tilukkolaskentaohjelmalla, koska sen käytöstä tekijällä oli eniten kokemusta.

ASIASANAT:

Biomassa, bioenergia, rikkihappo, kemialliset reaktiot, palaminen

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and Production Engineering

2019 | 38 pages

Santtu Naukkarinen

## FLUE GAS COUNTER FOR SOLID FUEL

The aim of this thesis was to create a counter that could easily calculate the amount of flue gas produced based on the fuel supplied. The idea for the project came from the fact that Finland has a large number of 0,5-4 MW boiler plants, where the amount of flue gas produced is unknown. In order to determine the flue gas, the thesis presents the combustion process and the fuel theory, from which the creation of the counter was started. The work was commissioned by South-West Supply Oy Ltd.

Boiler plants can use many different fuels to produce heat or electricity. Because of this, it was decided to focus solely on wood, peat and bark fuels as well as their fuel blends. The fuel mixture consists mainly of wood and peat fuels, since they are the most commonly used.

The thesis is based on studying the theory of combustion, fuel compositions and chemical reactions. The information was retrieved from various online and book sources. The resulting counter was created using formulas and tables found in the theory. It was decided that the counter would be created with an excel spreadsheet program because the author had most experience in using it.

### KEYWORDS:

Biomass, bioenergy, sulphuric acid, chemical reactions, combustion

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 PALAMISEN TEORIAA</b>	<b>9</b>
2.1 Palaminen	9
2.2 Lämpöarvo	11
2.3 Polttoaineen koostumus	12
2.4 Kosteus	13
2.5 Palamisilmantarve	14
<b>3 POLTTOAINEET</b>	<b>16</b>
3.1 Uusiutuvan energian käyttö Suomessa	16
3.2 Puu ja puuhake	17
3.3 Kuori	19
3.4 Turve	19
3.5 Seospolttoaine	20
<b>4 SAVUKAASUN LASKENTA</b>	<b>22</b>
4.1 Palamiseen tarvittavat ainemäärät	22
4.1 Lämpöarvo	25
4.2 Todellinen ilmanmäärä	25
4.3 Savukaasun massa- ja tilavuusvirta	26
4.4 Savukaasun lämpötila	27
4.5 Vesikastepiste	28
4.6 Happokastepiste	29
<b>5 LASKURIN LUOMINEN</b>	<b>32</b>
<b>6 YHTEENVETO</b>	<b>37</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>38</b>

## KAAVAT

Kaava 1. $n_x = m_x / M_x$ .	22
Kaava 2. $n_{O_2(\text{teor})} = n_{xO_2} + n_{xO_2} + \dots$	22
Kaava 3. $n_{\text{ilma}(\text{ylim.})} = n_{O_2(\text{teor})} * \lambda$ .	23
Kaava 4. $y_{H_2O} = RH * p'_h / p_{\text{tot}}$ .	23
Kaava 5. $y_{H_2O} / 1 - y_{H_2O}$ .	24
Kaava 6. $n_{\text{typpi}} = 3,77 * n_{\text{happi}}$ .	24
Kaava 7. $n_{H_2O} = (y_{H_2O} / 1 - y_{H_2O}) * (n_{\text{typpi}} + n_{\text{yli-ilma}})$ .	24
Kaava 8. $n_{i(\text{kostea})} = n_{\text{typpi}} + n_{H_2O} + n_{\text{yli-ilma}}$ .	24
Kaava 9. $H_u = 34,8 * m_C + 93,8 * m_{H_2} + 10,5 * m_S + 6,3 * m_{N_2} - 10,8 * m_{O_2} - I_{25} * m_{H_2O}$ .	25
Kaava 10. $n_{i(\text{teor.})} = (3,78 N_2 + 1 O_2) * (w_C / M_C * 1 * w_{H_2} / 2 * M_{H_2} - w_{O_2} / M_{O_2} + w_S / M_S)$ .	25
Kaava 11. $m_{i(\text{teor})} = n_{i(\text{teor})} * M_i$ .	26
Kaava 12. $m_{i(\text{tod.})} = \lambda * m_{i(\text{teor})}$ .	26
Kaava 13. $\dot{m}_{pa} = P / H_u$ .	26
Kaava 14. $\dot{m}_i = \dot{m}_{itod} * m_{pa}$ .	26
Kaava 15. $\dot{m}_{sk} = \dot{m}_i + \dot{m}_{pa}$ .	27
Kaava 16. $V_{sk} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{SO_2}$ .	27
Kaava 17. $Q_{sk} = \dot{m}_{sk} / \rho_{sk}$ .	27
Kaava 18. $c_{psk} = \sum m_n * c_{pn}$ .	27
Kaava 19. $t_{sk} = (H_u + \dot{m}_{i(\text{tod})} * t_i * c_{pi}) / (\dot{m}_{sk(\text{tod})} * c_{psk(\text{tod})})$ .	28
Kaava 20. $p_{vh} = y_{H_2O} * p_{\text{kok}}$ .	28
Kaava 21. $1000 / T_{HKP,K} = 3,9526 - 0,1863 * \ln(p_{H_2O}) - 0,000867 * \ln(p_{SO_2}) + 0,000913 * \ln(p_{H_2O}) * \ln(p_{SO_2})$	30

## KUVAT

Kuva 1. Puun palaminen ja lämmönkehitys (Alakangas 2008, 42).	10
Kuva 2. Eri polttoaineiden likimääräisiä tehollisia lämpöarvoja (Hänninen 2018, 249).	11
Kuva 3. Fossiilisen polttoaineen koostumus (Huhtinen 1997, 32).	12
Kuva 4. Polttoaineiden kuiva-ainekoostumus (%) sekä tyypillinen kosteus (Huhtinen 1997, 32).	13
Kuva 5. Eri polttoaineiden tyypillisiä ilmakertoimia (Huhtinen 1997, 77).	15
Kuva 6. Suomen uusiutuvan energian osuus kokonaisenergiasta vuonna 2018 (Motiva 2019).	16
Kuva 7. Yleisimpiä polttoaineita (Optima)	17
Kuva 8. Puun kuiva-ainekoostumus (Alakangas 2000, 35-36).	18
Kuva 9. Kuoren kuiva-ainekoostumus (Alakangas 2000, 67).	19
Kuva 10. Turpeen kuiva-ainekoostumus (Alakangas 2000, 88).	20

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda pienille ja keskikokoisille, biokattilalaitoksille soveltuva savukaasulaskuri. Työssä haluttiin pystyä määrittämään kattilasta syntyvän savukaasun määrä, vesi- ja happokastepiste. Aihe on tärkeä koska, savukaasun määrän selvittäminen auttaa lämmönvaihtimen mitoittamisessa oikean kokoiseksi, ja koska yleensä 0,5-4 MW kattilalaitoksissa ei tiedetä syntyvän savukaasun määrää. Savukaasun vesi- ja happokastepisteen määrittäminen kertoo, paljonko savukaasusta, voidaan ottaa lämpöä hyötykäyttöön, ennen kuin vesi tai rikkihappo alkaa tiivistymään lämpöpinnoille ja alkaa aiheuttamaan korroosiota.

Kiinteitä polttoaineita on useita. Niitä polttamalla voidaan tuottaa lämpöä tai sähköä. Sen takia tässä työssä päätettiin rajata käytetyt polttoaineet puu-, kuori- ja turvepolttoaineisiin. Näiden kolmen polttoaineen lisäksi haluttiin selvittää, mitä laskuri antaisi jos kahta näistä polttoaineista poltettaisiin seoksena.

Työssä käsitellään teoriaa palamisprosessista, kiinteistä polttoaineista, niiden ominaisuuksista ja vaikutuksista itse palamisprosessiin sekä kaavoja ja taulukoita, joiden avulla savukaasulaskuri pystyttiin luomaan. Työn loppuksi käydään läpi laskurin luomista ja sen verifiointi kirjallaisista löydetyistä savukaasulaskun avulla.

Laskuri tehtiin Excel-tilukkolaskentaohjelmalla. Kirja- ja verkkolähteistä haettuja kaavoja ja taulukoita hyödynnettiin laskurin luomisessa. Excel-ohjelman omia funktioita käytettiin apuna, jotta laskentaa saatiin helpoitettua ja laskennan virhettä minimoitua.

## 1.2 Toimeksiantajan esittely

Opinnäytetyön tilaajana toimi Varsinais-Suomalainen yritys, South-West Supply Oy Ltd. South-West Supply on Turussa toimiva pieni yritys, joka on erikoistunut lämmönsiirtimiin, painelaitteisiin ja teräsrakenteisiin. Yrityksen nimi ”South-West” viittaa sen maantieteelliseen sijaintiin, joka on Lounais-Suomessa. Yritys ei ole kauhean vanha, sillä se on perustettu vuonna 2015 syksyllä. Tällä hetkellä yrityksessä työskentelee kolme henkilöä.

South-West Supply tarjoaa innovatiivisen tavan saada energiaa hyötykäyttöön. Sen strategia on olla avaimet käteen-toimittaja. Yrityksen joustava toimintamalli ja laaja valmistajaverkosto tarjoavat rajattoman valmistuskapasiteetin maailmanlaajuisiin asennuksiin.

## 2 PALAMISEN TEORIAA

### 2.1 Palaminen

Palamisessa aine yhtyy kemiallisesti hapen kanssa. Samalla kemialliselle reaktiolle ominainen energia vapautuu lämpönä ympäröivään ilmaan. Palamisprosessissa käytettyjen polttoaineiden yleisimpiä aineita ovat hiili (C), vety (H), rikki (S) ja typpi (N), jotka reagoivat hapen kanssa. Palamisessa tapahtuvat reaktiot ovat pääsääntöisesti eksotermisiä tai endotermisiä. Eksotermisessä reaktiossa lämpö vapautuu ympäröivään tilaan mutta endotermisessä reaktiossa lämpöä kuluu. Palamisessa yleisesti hapen ja typen reaktiot ovat endotermisiä. Palamisprosessissa tarvitaan aina jotakin polttoainetta, joka voidaan sytyttää. Polttoaineen syttymisellä tarkoitetaan hapen ja polttoaineen välisen reaktion kiihtymistä, jonka seurauksena se pystyy pitämään itse itseään yllä. Kun palamisen lämpötila kasvaa, alkaa sen komponenttien reaktionopeus myös kiihtymään. (Huhtinen 1997, s.70.)

Kiinteiden polttoaineiden palaminen voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin:

- alkulämpeneminen, missä polttoaine lämmitetään n. 100 celsiusasteeseen
- polttoaineen kosteuden haihtumiseen
- polttoaineen haihtuvien aineiden pyrolysoituminen n. 100-200 celsiusasteessa
- kiinteän polttoaineen syttyminen n. 180-225 celsiusasteessa
- jäljelle jääneen hiilen kaasuuntuminen ja palaminen (Metsäalan ammattilehti 2010.)

Palamisprosessissa lämmönsiirto, aineensiirto ja kemiallinen reaktionopeus vaikuttavat palamisnopeuteen. Aineensiirrolla tarkoitetaan muun muassa kosteuden siirtymistä polttoaineen sisällä. Muuttamalla polttoaineen rakennetta tai tekemällä kahdesta eri kiinteästä polttoaineesta seospolttoainetta pyritään vaikuttamaan palamisnopeutta rajoittaviin tekijöihin. (Metsäalan ammattilehti 2010.)

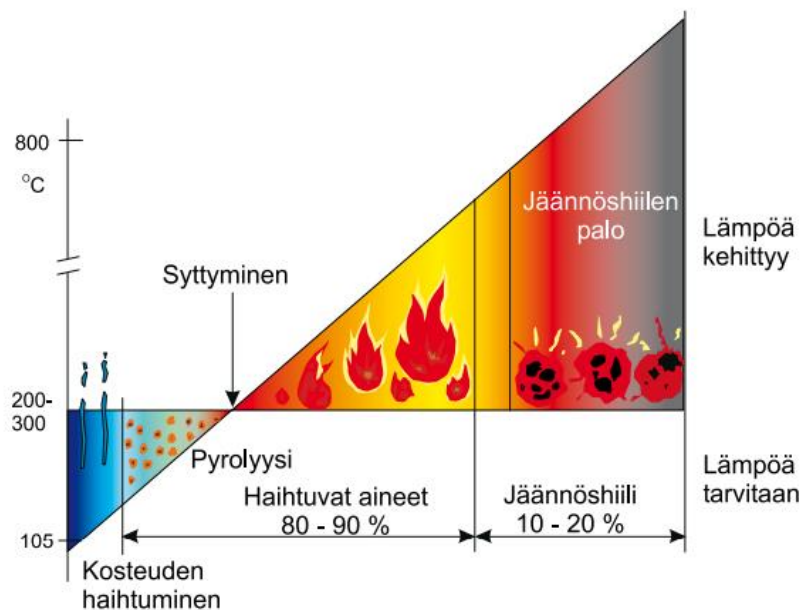
Kiinteän polttoaineen palamisprosessiin voidaan vaikuttaa käsittelemällä sen ominaisuuksia. Palamisprosessiin vaikuttavat polttoaineen kemialliset, rakenteelliset ja fysikaaliset ominaisuudet. Reaktiivisuus, pyrolysoitumislämpö ja lämpöarvo ovat kemiallisia ominaisuuksia. Palakoko, tiheys ja huokoisuus ovat rakenteellisia ominaisuuksia.



Lämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus ovat fysikaalisia ominaisuuksia. (Alakangas 2008, 41.)

Puun syttymisen hetkellä siitä vapautuu vesihöyryä, haihtuvia hiilivetyjä ja pyrolyysikaasuja jotka syntyvät alhaisessa lämpötilassa. Pyrolyysikaasut syttyvät palamaan, kun ne kuumenevat tarpeeksi sekä, kun niiden pitoisuus kasvaa riittävän suureksi. Polttoaineen suuret molekyylit hajoavat pyrolyysissä ja niistä syntyy palavia kaasuja, nestemäisiä tervoja ja palamattomia kaasuja. (Alakangas 2008, 42.)

Palamisvaiheeseen kuuluu polttoaineen lämpeneminen, voimakkaan palamisen vaihe ja hiipuminen. Palamisenvaiheessa pyrolyysi on nopeinta ja hitainta kun palamisvaihe hiipuu. Pyrolyysikaasuja ei synny kun kiinteä hiili palaa eikä siinä ole silloin liekkiä. Jäännöshiilen ja kaasujen palaessa syntyy lämpöä, mutta ulkopuolista lämpöä tarvitaan niiden kuivumiseen, syttymiseen ja pyrolyysiin. (Alakangas 2008, 42.)



Kuva 1. Puun palaminen ja lämmönkehitys (Alakangas 2008, 42).

Jäännöshiili syntyy palamisen edetessä kun hiilen määrä kasvaa suhteessa vetyyn. Tässä vaiheessa syntyy vähän kaasuja ja palaminen tapahtuu vain hiilen pinnassa ilman liekkiä. Jäännöshiilen lämpöarvo on huomattavan suuri n. 25-50 %, kun sen osuus kuiva-aineesta on vain 10-30 %. (Kömi 2015, 7.)

## 2.2 Lämpöarvo

Lämpöarvo on polttoaineen tärkein ominaisuus. Lämpöarvo kuvaa vapautuvan lämpöenergian määrää, joka syntyy kun kiinteä palaa täydellisesti. Lämpöarvo ilmoitetaan energiana massayksikköä kohti eli MJ/kg. (Raiko 2002, 123.)

Kiinteiden polttoaineiden lämpöarvo ilmoitetaan joko kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona, tehollisena lämpöarvona saapumistilassa tai kalorimetrinen lämpöarvo. Tavallisesti Suomessa polttoaineen lämpöarvo ilmoitetaan kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona. (Motiva 2016.)

Ylempi lämpöarvo eli ns. kalorimetrinen lämpöarvo tarkoittaa sitä, että polttoaineen sisältämän kosteuden höyrystymiseen vaadittava energia otetaan huomioon palamisessa (Alakangas 2000, 27-28). Lämpöarvo kuitenkin yleensä ilmoitetaan alempana lämpöarvona eli tehollisena lämpöarvona, koska se sopii paremmin käytännön olosuhteisiin (Raiko 2002, 123). Tehollisessa lämpöarvossa otetaan huomioon polttoaineen sisältämästä vedystä syntyvän vesihöyryn ja savukaasujen mukana poistuvan vesihöyryn haihduttamiseen kuluva lämpömäärä (Alakangas 2000, 27-28).

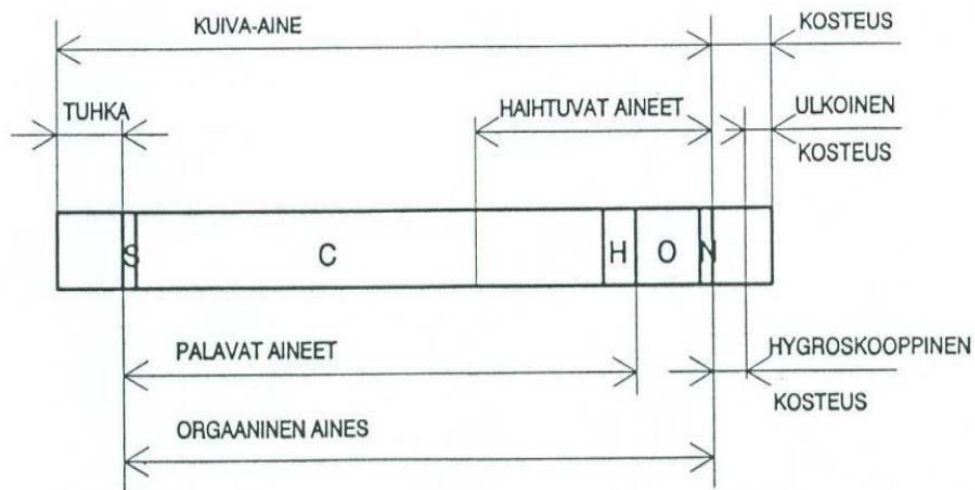
Kuvassa 2 on esitettyä tavallisimpien polttoaineiden tehollisia lämpöarvoja.

Polttoaine	Tehollinen lämpöarvo
Kivihiili	27 MJ/kg
Kevyt polttoöljy	43 MJ/kg
Raska polttoöljy	41 MJ/kg
Kuiva puu	15 MJ/kg
Turve	10 MJ/kg
Maakaasu	40 MJ/kg

Kuva 2. Eri polttoaineiden likimääräisiä tehollisia lämpöarvoja (Hänninen 2018, 249).

### 2.3 Polttoaineen koostumus

Polttoaineen koostumus vaikuttaa siitä syntyvän savukaasun koostumukseen. Polttoaineet koostuvat tuhkasta, kuiva-aineista, haihtuvista aineista ja vedestä. Varsinaiset palavat komponentit ovat hiili, vety ja rikki. Lisäksi polttoaineissa on typpeä, joka yhdessä rikin kanssa on ei-toivottu. Rikin ja typen reagoiessa hapen kanssa syntyy rikkidioksidia ja typen oksideja, jotka ovat molemmat ympäristölle haitallisia. Polttoaineessa oleva vesi taas vaatii suuren määrän energiaa, jotta se höyrystyy kattilassa eikä sitä yleensä saada talteen. Kaikkien polttoaineiden koostumukset vaikuttavat niiden käsittelyyn, polttoon ja savukaasujen käsittelyyn. Polttoaineen koostumuksen tärkeimmät tekijät ovat niiden kosteuspitoisuus, tuhkapitoisuus, rikkipitoisuus ja haihtuvien aineiden määrä. Kuvassa 3 on esitetty fossiilisen polttoaineen koostumus ja kuvassa 4 eri polttoaineiden kuiva-ainekoostumusten %-osuudet polttoaineissa. (Huhtinen 1997, 32.)



Kuva 3. Fossiilisen polttoaineen koostumus (Huhtinen 1997, 32).

Polttoaine	C	H <sub>2</sub>	S	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Tuhka	Kosteus
Kivihilli (puol.) (engl.)	73,2	4,7	1,0	9,1	1,0	11,0	9
	75,7	4,7	1,0	6,0	1,6	11,0	12
Raskas polttoöljy Kevyt polttoöljy	87,8	10,4	0,9	0,5	0,4	0,04	0,3
	86,2	13,7	0,1	-	0,02	0,01	0,01
Puu	50,4	6,2	-	42,5	0,5	0,4	55
Kuori (mänty) (kuusi) (koivu)	54,5	5,9	-	37,7	0,3	1,7	60
	50,6	5,9	-	40,2	0,5	2,8	60
	56,6	6,8	-	34,2	0,8	1,6	55
Mustalipeä (mänty) (koivu)	39,0	4,0	4,5	33,4	0,1	19	40
	37,0	4,0	4,0	33,9	0,1	21*	40
Jyrsinturve	55,0	5,5	0,2	32,6	1,7	5,0	50
Maakaasu	CH <sub>4</sub> 98,92	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 0,11	O <sub>2</sub> 0,05	CO <sub>2</sub> 0,02	N <sub>2</sub> 0,9		

Kuva 4. Polttoaineiden kuiva-ainekoostumus (%) sekä tyypillinen kosteus (Huhtinen 1997, 32).

## 2.4 Kosteus

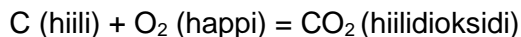
Vettä löytyy lähes jokaisesta polttoaineesta. Suurimmat vesipitoisuudet löytyvät puu-, kuori- ja turvepolttoaineilla. Kosteus on sitoutunut polttoaineisiin sekä ulkoisesti että sisäisesti. Sisäisesti sitoutunutta kosteutta kutsutaan hydroskooppiseksi kosteudeksi, joka on sitoutunut polttoaineiden huokosiin. Kun polttoaineen antaa olla tarpeeksi kauan ilman kanssa tekemisessä, asettuu sen kosteus tiettyyn tasapainoarvoon. Tähän vaikuttavia tekijöitä ovat käytettävä polttoaine, ilman kosteus ja ilman lämpötila. Biopolttoaineissa, puussa, ja kuoressa, on vettä n. 55-60 %. Fossiilisten polttoaineiden vesipitoisuus pienenee geologisen iän kasvaessa. (Huhtinen, 1997, 32-33.)

Vesipitoisuus pienentää polttoaineen lämpöarvoa. Mitä enemmän vettä on, sitä enemmän palamisesta vapautuvasta energiasta tulee käytettyä veden höyrystymiseen. Sen lisäksi että vesi alentaa polttoaineen lämpöarvoa, se suurentaa samalla polttoaineen kulutusta, lisää muodostuvia savukaasuvirtoja ja lisää puhallintehon tarvetta. Kun polttoaine on mahdollisimman kuivaa, se nostaa tulipesän lämpötilaa ja siten voidaan kattilan kokoa pienentää alhaisempien savukaasuvirtojen takia. (Huhtinen, 1997, 32-33.)

## 2.5 Palamisilmantarve

Palamiseen tarvittava happi saadaan yleensä ilmasta. Ilma sisältää n. 21 tilavuusprosenttia happea (O<sub>2</sub>) ja n. 78 tilavuusprosenttia typpeä (N<sub>2</sub>). Ilman loppuosa koostuu argonista, hiilidioksidista, neonista, heliumista ja kryptonista. Jos palamisen ympäristössä tapahtuu happipitoisuuden aleneminen, niin palamisnopeus pienenee huomattavasti. Jos ympäristön happipitoisuus laskee alle 15 tilavuusprosentin, palamista ei enää tapahdu. (Hänninen 2018, 248.)

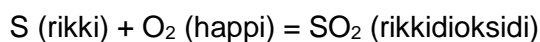
Palamisilmantarve määräytyy yleensä hiilen, vedyn ja rikin palamisreaktioihin tarvittavan happitarpeen mukaan. Palamisilmantarpeeseen ja savukaasujen laskentaa varten tarvittavat tiedot saadaan nettoreaktiokaavoista. Nettoreaktiokaavoista nähdään esimerkiksi, paljonko happea tarvitaan reagoimaan hiilen kanssa, jotta lopputuotteeksi saadaan hiilidioksidia:



Yhtälöstä huomataan, että yksi mooli hiiltä tarvitsee yhden moolin happea täydelliseen palamiseen, josta saadaan yksi mooli hiilidioksidia. Jos hiili ei palaisi täydellisesti, syntyi siitä CO:ta eli hiilimonoksidia. Vedyn palamisen nettoreaktiokaava on:



Reaktioyhtälön mukaan tarvitaan kaksi moolia vetyä ja yksi mooli happea, jotta saadaan kaksi moolia vettä. Vedyn palaessa saadaan tuloksena puhdasta vesihöyryä. Rikin palamisen nettoreaktiokaava on:



Yhtälö näyttää, että yksi mooli rikkiä tarvitsee yhden moolin happea, jotta siitä syntyy yksi mooli rikkidioksidia. Yleensä palamisessa pieni osa rikkidioksidista hapettuu rikkiatrioksidiksi. Polttoaineessa oleva rikki on haitallinen ympäristölle sekä kattilalle, mutta samalla energiaa luovuttava komponentti palamisessa. (Huhtinen 1997, 74-77.)

Palamisilmantarpeen määrittäminen alkaa polttoaineen koostumuksesta ja sen komponenttien ja hapen reaktioyhtälöistä. Reaktioyhtälöiden avulla saadaan selville, paljonko

happea tarvitaan täydelliseen palamiseen. Laskemalla eri komponenttien tarvitsema hapen määrä ja vähentämällä siitä polttoaineessa oleva happi saadaan selvitettyä koko polttoaineen palamiseen tarvittava happimäärä teoreettisesti. Tällaista tilannetta kutsutaan stökiometriseksi palamiseksi, jossa ilmakerroin on 1. Palamisprosessiin tarvittava happi saadaan ilmasta. Todellinen ilma on aina kosteaa, eli se on kuivan ilman ja vesihöyryn muodostama seos. Yleensä palamisilman suhteellinen kosteus on n. 40-60 %. Palamisilmassa oleva kosteus lisää itse palamisilman määrää n. 1 %. (Huhtinen 1997, 74-77.)

Käytännössä polttoaineen täydellistä palamista ei saavuteta stökiometrisellä ilmamäärällä. Vaan palamisprosessiin on aina syötettävä enemmän ilmaa. Tällaista kutsutaan todelliseksi ilmamääräksi. Todellisen ilmamäärän ja teoreettisen ilmamäärän suhdetta sanotaan ilmakertoimeksi ( $\lambda$ ). Vaikeammin poltettavat polttoaineet, kuten kiinteät polttoaineet, vaativat suuremman ilmaylimäärän kuin nestemäiset tai kaasumaiset polttoaineet. Kuvassa 5 on esitettyä polttoaineiden tyypillisiä ilmakertoimia. (Huhtinen 1997, 74-77.)

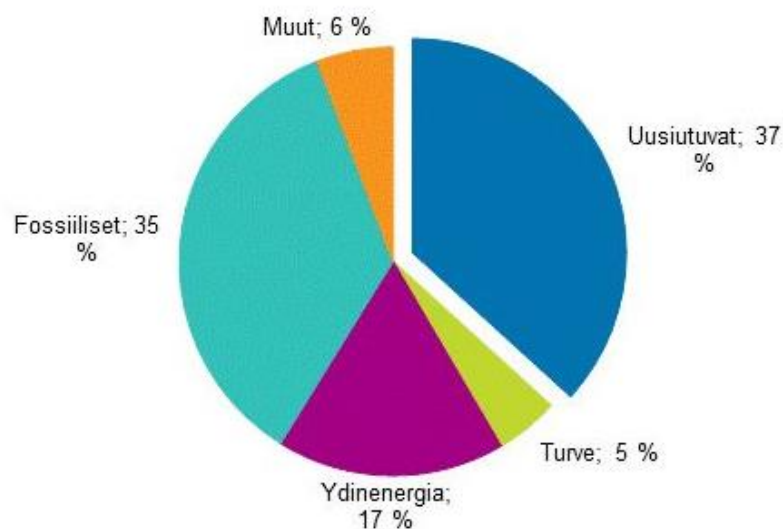
Kattilan polttoaine	Polton ilmakerroin ( $\lambda$ )
Hiili	1,15 - 1,35
Kaasu	1,02 - 1,1,0
Raskasöljy	1,03 - 1,10
Turve (kosteus 50%)	1,15 - 1,35
Puujäte (kosteus 60%)	1,15 - 1,50
Jätelipeä	1,10 - 1,25

Kuva 5. Eri polttoaineiden tyypillisiä ilmakertoimia (Huhtinen 1997, 77).

## 3 POLTTOAINEET

### 3.1 Uusiutuvan energian käyttö Suomessa

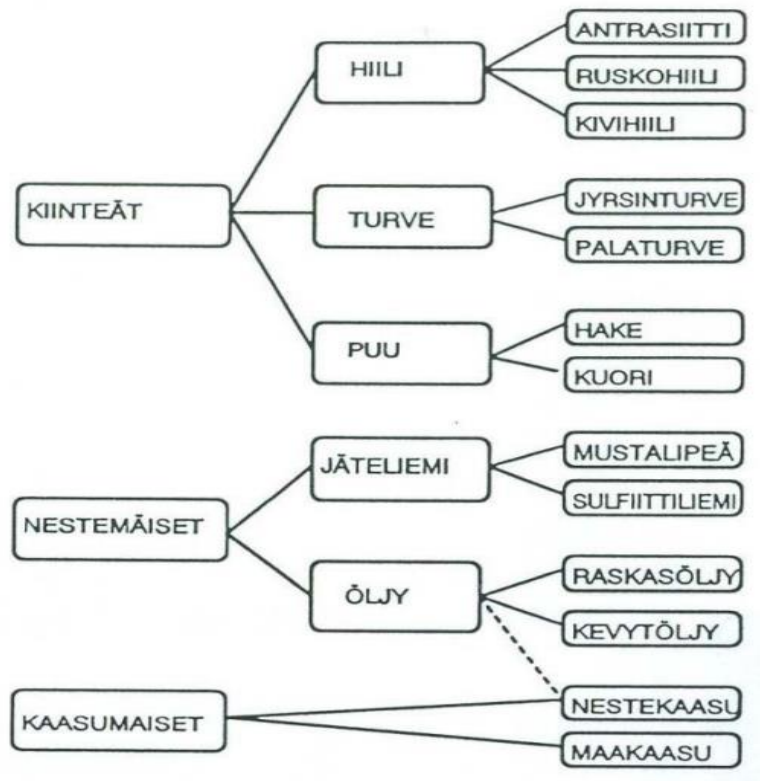
Suomi kuuluu EU-maiden kärkijoukkoon uusiutuvan energian käytössä. Uusiutuvista energioista yleisimmät, ovat puu ja bioperäiset kierrätyspolttoaineet. Vuonna 2018 uusiutuvien energialähteiden käyttö lisääntyi 3 prosenttia Suomessa, samalla niiden osuus energian kokonaiskulutuksessa kasvoi 37 prosenttiin. Tulevaisuudessa uusiutuvan energian käyttöä pyritään energia- ja ilmastostrategian tavoitteiden mukaisesti lisäämään. Uusiutuvan energian osuus loppukulutuksesta pyritään saamaan yli 50 prosenttiin vuonna 2020. Kuva 6 havainnollistaa eri energialähteiden osuudet Suomen kokonaisenergiasta. (Motiva 2019.)



Kuva 6. Suomen uusiutuvan energian osuus kokonaisenergiasta vuonna 2018 (Motiva 2019).

Polttoaineen tärkein tarkoitus palamisprosessissa on tuottaa energiaa ja vapauttaa lämpöä, kun se reagoi hapen kanssa. Yleisimmin käytetyt polttoaineet ovat orgaanisia. Orgaaniset polttoaineet voidaan jakaa fossiilisiin polttoaineisiin kuten hiili, öljy, turve, maakaasu tai sitten elollisesta luonnosta saataviin biopolttoaineisiin kuten puu ja kuori.

(Huhtinen 1997, 23.) Kuvassa 7 on havainnollistettuna miten polttoaineet jakautuvat kiinteisiin, nestemäisiin ja kaasumaisiin polttoaineisiin.



Kuva 7. Yleisimpiä polttoaineita (Optima)

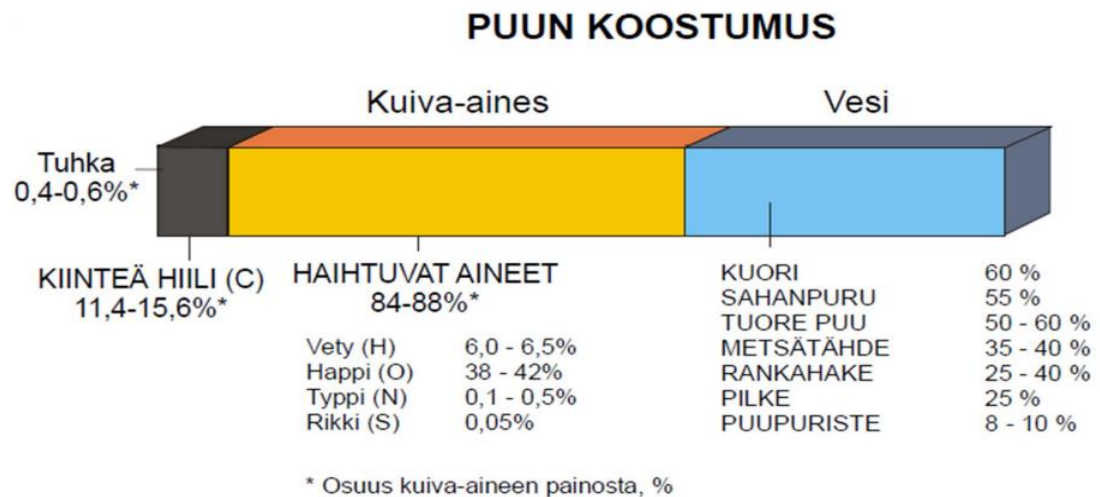
### 3.2 Puu ja puuhake

Suomen puuvarat ovat suuria ja kehittyneen korjuutekniikan avulla puun käyttäminen polttoaineena on kannattavaa. Näiden tekijöiden takia puuta on alettu käyttää pienissä kaukolämpökattiloissa. Näin myös voidaan vähentää huomattavasti hiilidioksidipäästöjä. Puupolttoaineena voidaan käyttää hukkarunkopuuta, oksia, juuria ja harvennuspuustoa, kunhan ne vain ensin haketetaan. Näitä tuotteita jää aina luontoon, kun metsää kaadetaan. (Huhtinen 1997, 24.)

Puussa haihtuvia aineita on n. 80-90 % mikä tekee siitä pitkäliekkisen polttoaineen ja siten vaatii suuren palotilan. Puun alkuainekoostumus muodostuu pääasiassa hiilestä,



vedystä ja hapestä. Puun kuiva-ainemassasta näiden osuus on n. 99 %. Puu sisältää myös muita alkuaineita kuten typpeä, jonka osuus on yleensä n. 0,2 % ja rikkiä, jota on yleensä alle 0,05 %. Kuvassa 8 on esitettyä puun kuiva-ainekoostumus. (Alakangas 2000, 35-36.)



Kuva 8. Puun kuiva-ainekoostumus (Alakangas 2000, 35-36).

Puussa on yleensä kosteutta n. 40-60 %. Puun kosteuteen vaikuttavaa moni asia kuten kasvupaikka, puulaji ja sen ikä. Puun käyttötapa määrää kuinka kosteaa se voi olla. Suurissa laitoksissa voidaan käyttää kosteaa puuta, mutta pienissä laitoksissa tai kotitalouksissa puun tulee olla kuivaa. Jos puupolttoainetta käytetään alle 1 MW tehoisessa laitoksessa, sen kosteuden tulisi ole alle 40 %. (Alakangas 2000, 39-40.)

Kiinteistä polttoaineista pienin lämpöarvo löytyy puulta. Tämä asettaa tiettyjä vaatimuksia sen käsittely- ja polttolaitteille. Kiinteistä polttoaineista puu tarvitsee myös suurimmat varastointitilat. (Alakangas 2000, 42.)

### 3.3 Kuori

Puun kuori koostuu kahdesta osasta, ulkokuoresta ja sisäkuoresta. Puun kuoressa on suuria määriä ligniiniä. Ligniini on puun rakenneaine, joka sitoo kuituja toisiinsa ja samalla antaa puulle sen mekaanisen lujuuden. Ligniinissä on huomattavia määriä hiiltä ja vetyä, jotka tuottavat lämpöä. Tästä johtuen kuoren lämpöarvo on korkea ja se on lähes sama rungon eri korkeuksilla. Kuorella on korkea kosteus- ja tuhkapitoisuus, jotka heikentävät sen polttoaineominaisuuksia ja siksi kuorta yleensä poltetaan jätteen hävittämiseksi kuin energian tuottamiseksi. Kuoren polttoaineominaisuuksia pystytään parantamaan sekoittamalla, kuivaamalla tai puristamalla. Kuvassa 9. on esitettyä kuorien kuiva-ainekoostumuksia. (Alakangas 2000, 67.)

Kuori	Hiili C,%	Vety H,%	Rikki S,%	Happi O + Typpi, N%	Tuhkapitoisuus, %
Mänty	54,4	5,9	-	38,0	1,7
Kuusi	50,6	5,9	-	40,7	2,8
Koivu	56,6	5,9	-	35,0	1,6

Kuva 9. Kuoren kuiva-ainekoostumus (Alakangas 2000, 67).

### 3.4 Turve

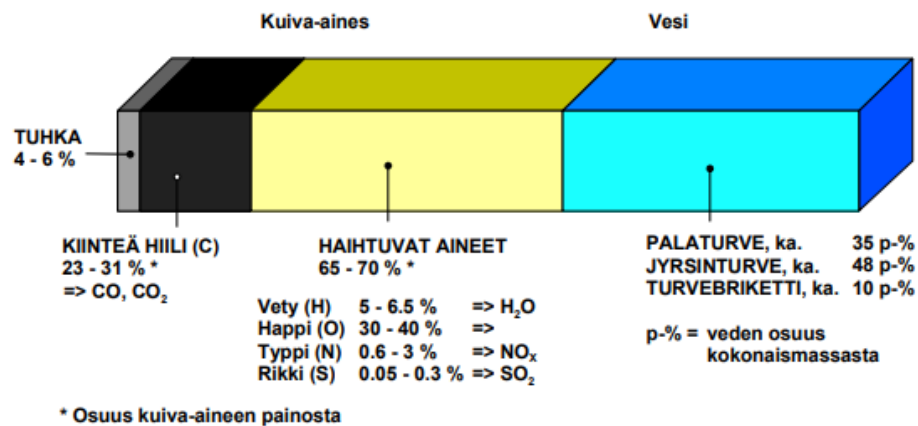
Turve on eloperäistä maa-ainesta, jota syntyy suokasvien jäännöksistä epätäydellisen hajoamisen tuloksena. Turvekerrostuma kasvaa jatkuvasti johtuen juuri kasvien epätäydellisestä hajoamisesta. Soiden hapen puute ja runsas veden määrä aiheuttaa kasvien huonon hajoamisen. (Alakangas 2000, 87.)

Turvetta kehittyä kosteilla suoalueilla. Turve on hyvin hitaasti uusiutuva polttoaine, sillä se kasvaa vuodessa vain 1 mm verran suon pintakerroksessa samaan aikaan sen alemmien kerrosten maatuessa. Paksuimmat suot ovat 7-8 m syviä. (Huhtinen 1997, 25.)

Turpeen kosteuspuiteisuus on huomattavan suuri, sillä soissa on vettä yleensä yli 90 %. Turpeen kosteuspuiteisuus saadaan kuitenkin laskemaan n. 50 %:iin kuivaamalla sitä

ulkoilmassa. Kuten aikaisemmin todettiin polttoaineen kosteus pudottaa sen lämpöarvoa ja siksi turvetta kuivataan ennen kuin sitä käytetään polttoaineena. (Huhtinen 1997, 33.)

Suurin osa turpeesta on hiiltä n. 53-56 %. Sen pitoisuus vaihtelee turpeen maatumisas-teen mukaan. Mitä enemmän turve maatuu, sitä suuremmaksi sen hiilipitoisuus kasvaa. Turpeen suuren hiilipitoisuuden takia se palaa hitaammin kuin puu. Muita aineita, joita turpeesta löytyy, ovat vety, happi, rikki ja typpi. Rikkiä turpeesta löytyy yleensä alle 0,3 % mutta tämäkin voi vaihdella riippuen siitä mistä turvetta on hankittu. Kuvassa 10. on vielä esitettyä turpeen kuiva-ainekoostumus. (Alakangas 2000, 88.)



Kuva 10. Turpeen kuiva-ainekoostumus (Alakangas 2000, 88).

### 3.5 Seospolttoaine

Puun ja turpeen seoskäyttö on kannattavaa, koska sillä on suotuisia polttoteknisiä vaikutuksia. Puun ja turpeen seospolttoainetta käytetään yleisimmin voima- ja lämpölaitoksilla. Polttoaineiden seoskäyttö mahdollistaa metsähakkeen käytön lisäämistä. Puupolttoaineessa piilee ongelma koska sen saatavuudessa ja laadussa on suurta vaihtelua. Turvetta on hyvä lisätä puupolttoaineen rinnalle sillä se parantaa palamisprosessin energiatehoa. (Turveinfo.)

Polttoteknisten vaikutusten takia puupolttoainetta ja turvetta käytetään seoksena. Polttoaineiden yhteiskäytöllä saavutetaan useita hyötyjä ja ne palavat puhtaammin yhdessä.

Puupolttoaine sitoo turpeen rikkiä ja vastineeksi turve estää puun syövyttäviä vaikutuksia kattilassa. Lisäksi turve sitoo puupolttoaineessa olevaa klooria. Näin saadaan säästettyä kattilaa ja ehkäistyä korroosion muodostumista lämmönsiirtopinnoille. (Turveinfo.)

## 4 SAVUKAASUN LASKENTA

### 4.1 Palamiseen tarvittavat ainemäärät

Savukaasu on eri kaasujen kaasuseos, jota syntyy palamisprosessin tuotoksena. Laskut, joissa selvitetään palamisen tarvitsemia ainemääriä ja siitä syntyviä ainemääriä sanotaan savukaasulaskuiksi. (Hänninen 2018, 252.)

Ainemäärät ja aineiden massat saadaan laskettua kaavalla:

$$\text{Kaava 1. } n_x = m_x / M_x.$$

$n_x$  = ainemäärä

$m_x$  = massa

$M_x$  = moolimassa

Tavallisimmat polttoaineet, hiiltä lukuun ottamatta ovat kemiallisia yhdisteitä, niiden palamistuotteet määräytyvät polttoaineen alkuainekoostumuksen mukaan. Polttoaineen jokaiselle palavalle alkuaineelle voidaan kirjoittaa palamisreaktio. (Hänninen 2018, 253.)

$C + O_2 = CO_2$ , reaktioyhtälössä hiili (C) reagoi hapen ( $O_2$ ) kanssa muodostaen hiilidioksidia ( $CO_2$ )

$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$ , reaktioyhtälössä vety ( $H_2$ ) reagoi happiatomin (O) kanssa muodostaen vettä ( $H_2O$ )

$S + O_2 = SO_2$ , reaktioyhtälössä rikki (S) reagoi hapen ( $O_2$ ) kanssa muodostaen rikkidioksidia ( $SO_2$ )

Näiden palamisreaktioiden mukaan, saadaan selvitettyä paljonko alkuaine tarvitsee ilmaa, jotta reaktio toteutuisi.

Eri aineiden reaktioihin tarvittava teoreettinen ilmamäärä saadaan kaavalla:

$$\text{Kaava 2. } n_{O_2(\text{teor})} = n_{xO_2} + n_{xO_2} + \dots$$

$n_{O_2(\text{teor})}$  = teoreettinen ilmanmäärä

$n_{\text{O}_2}$  = alkuaineen reaktioon tarvittava teoreettinen ilmanmäärä

Palaminen tarvitsee aina vähän enemmän ilmaa kuin mitä teoreettisesti tarvitaan. Kiinteät polttoaineet tarvitsevat enemmän ilmaylimäärää kuin muut polttoaineet.

Ilmaylimäärä saadaan lasketuksi seuraavalla kaavalla.

$$\text{Kaava 3. } n_{\text{ilma}(\text{ylim.})} = n_{\text{O}_2(\text{teor.})} * \lambda.$$

$n_{\text{ilma}(\text{ylim.})}$  = ilmaylimäärä

$n_{\text{O}_2(\text{teor.})}$  = hapen ainemäärä

$\lambda$  = lambda

Palamisilman mukana kulkeutuu vesihöyryä palamisprosessiin. Ilman vaihteleva vesihöyrypitoisuus riippuu ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Ilman sisältämä veden mooliosuus saadaan selvitettyä kostean ilman paineen ja seoksessa olevan veden osapaineen avulla seuraavasti. (Raiko 2002, 35.)

$$\text{Kaava 4. } y_{\text{H}_2\text{O}} = \text{RH} * p'_h / p_{\text{tot.}}$$

$y_{\text{H}_2\text{O}}$  = ilman sisältämä vesihöyry

RH = ilman suhteellinen kosteus

$p'_h$  = kylläisen veden höyrynpaine

$p_{\text{tot}}$  = kostean ilman paine

Palamisessa tarvittava ilmantarve lasketaan yleensä ensin kuivana ilmaa. Todellisen kostean ilmantarpeen laskemiseksi tarvitaan kostean ilman mukana tulevan kosteuden ja kuivan ilman suhde. (Raiko 2002, 36.) Kosteuden ja kuivan ilman suhde saadaan kaavalla:

Kaava 5.  $y_{H_2O} / 1 - y_{H_2O}$ .

$y_{H_2O}$  = ilman sisältämä vesihöyry

Kuiva ilma sisältää 20,948 vol-% happea, 78,084 vol-% typpeä, 0,93 vol-% argonia, 0,03 vol-% hiilidioksidia sekä vähäisiä määriä muita kaasuja. Palamistarkastelussa saadaan hapen ja "raakatyphen" moolisuhteeksi 3,7737. (Raiko 2002, 35.) Palamisilman mukana tulevan typen määrä saadaan siten kaavasta:

Kaava 6.  $n_{\text{typpi}} = 3,77 * n_{\text{happi}}$ .

$n_{\text{typpi}}$  = typen ainemäärä

$n_{\text{happi}}$  = hapen ainemäärä

Ilman kosteuden mukana tuleva vesimäärä saadaan kaavasta:

Kaava 7.  $n_{H_2O} = (y_{H_2O} / 1 - y_{H_2O}) * (n_{\text{typpi}} + n_{\text{yli-ilma}})$ .

$n_{H_2O}$  = veden ainemäärä

$n_{\text{yli-ilma}}$  = yli-ilman ainemäärä

$n_{\text{typpi}}$  = typen ainemäärä

Polttoaineen palamiseen tarvittavaa ilmanmäärää kutsutaan kosteaksi polttoilmaksi, koska siinä on otettu huomioon ilman mukana tuleva vesipitoisuus. Kostean polttoilman määrä saadaan kaavalla:

Kaava 8.  $n_{i(\text{kostea})} = n_{\text{typpi}} + n_{H_2O} + n_{\text{yli-ilma}}$ .

$n_{i(\text{kostea})}$  = kostean polttoilman ainemäärä

#### 4.1 Lämpöarvo

Polttoaineen tärkein ominaisuus on sen lämpöarvo. Kiinteiden polttoaineiden lämpöarvot pystytään selvittämään tarkasti seuraavan kaavan avulla:

$$\text{Kaava 9. } H_u = 34,8 * m_C + 93,8 * m_{H_2} + 10,5 * m_S + 6,3 * m_{N_2} - 10,8 * m_{O_2} - l_{25} * m_{H_2O}.$$

$H_u$  = tehollinen lämpöarvo

$m_C$  = hiilen paino-osuus polttoaineessa

$m_{H_2}$  = vedyn paino-osuus polttoaineessa

$m_S$  = rikin paino-osuus polttoaineessa

$m_{N_2}$  = typen paino-osuus polttoaineessa

$m_{O_2}$  = hapen paino-osuus polttoaineessa

$l_{25}$  = veden höyrystymislämpö (2443 kJ/kg kun  $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$m_{H_2O}$  = veden paino-osuus polttoaineessa

#### 4.2 Todellinen ilmanmäärä

Polttoaineen palamisilmantarve lasketaan lähes aina yhtä polttoainekiloa kohti eli kg ilmaa / kg polttoainetta ( $\text{kg}_i/\text{kg}_{pa}$ ). Polttoainetta kohti tarvittava ilman ainemäärä saadaan seuraavalla kaavalla:

$$\text{Kaava 10. } n_{i(\text{teor.})} = (3,78n_{N_2} + 1_{O_2}) * (w_C / M_C * 1 * w_{H_2} / 2 * M_{H_2} - w_{O_2} / M_{O_2} + w_S / M_S).$$

$n_{i(\text{teor.})}$  = teoreettinen ilman ainemäärä

$w_x$  = alkuaineen massaosuus

$M_x$  = alkuaineen moolimassa

Teoreettinen ilmantarve saadaan selvitettyksi kaavalla:



$$\text{Kaava 11. } m_{i(\text{teor})} = n_{i(\text{teor})} * M_i.$$

$m_{i(\text{teor})}$  = teoreettinen ilmantarve

Teoreettisen ilmantarpeen kautta päästään käsiksi todelliseen ilmantarpeeseen. Se saadaan kaavalla:

$$\text{Kaava 12. } m_{i(\text{tod.})} = \lambda * m_{i(\text{teor})}.$$

$m_{i(\text{tod.})}$  = todellinen ilmantarve

### 4.3 Savukaasun massa- ja tilavuusvirta

Savukaasun massavirta on ilmoitettu yksikössä  $\text{kg}_{\text{sk}}/\text{s}$ . Tähän päästään käsiksi selvittämällä polttoaineen massavirta kaavalla:

$$\text{Kaava 13. } \dot{m}_{\text{pa}} = P / H_u.$$

$\dot{m}_{\text{pa}}$  = polttoaineen massavirta

P = teho

$H_u$  = lämpöarvo

Seuraavaksi määritetään ilman massavirta, se saadaan kaavalla:

$$\text{Kaava 14. } \dot{m}_i = m_{i(\text{tod.})} * m_{\text{pa.}}$$

$\dot{m}_i$  = ilman massavirta

$m_{\text{pa.}}$  = polttoaineen massa

Savukaasun massavirta saadaan kaavalla:

$$\text{Kaava 15. } \dot{m}_{sk} = m_i + m_{pa}.$$

$\dot{m}_{sk}$  = savukaasun massavirta

$m_i$  = ilman massa

Jos halutaan selvittää savukaasun tilavuusvirta, tulee ensin selvittää savukaasun tilavuus (Kärenlampi 2017, 22). Siihen päästään käsiksi savukaasun komponenttien tilavuuksien kautta seuraavalla kaavalla:

$$\text{Kaava 16. } V_{sk} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{SO_2}.$$

$V_{sk}$  = savukaasun tilavuus

$V_x$  = savukaasun komponenttien tilavuus

Kun savukaasun tilavuus on selvillä, saadaan tilavuusvirta selville kaavalla:

$$\text{Kaava 17. } Q_{sk} = \dot{m}_{sk} / \rho_{sk}.$$

$Q_{sk}$  = savukaasun tilavuusvirta

$\rho_{sk}$  = savukaasun tiheys

#### 4.4 Savukaasun lämpötila

Adiabaattisella palamislämpötilalla tarkoitetaan korkeinta lämpötilaa, joka on teoriassa saavutettavissa polttoaineen palaessa. Palamislämpötilan laskeminen vaatii savukaasujen ominaislämmön tuntemista. Adiabaattinen palamislämpötila riippuu ilmakertoimesta ja polttoaineen lämpöarvosta. Adiabaattiset palamislämpötilat ovat yleensä 1500-2000 °C alueella mutta sekin riippuu vahvasti polttoaineesta, ilmakertoimesta ja palamisilman lämpötilasta. (Huhtinen 1997, 87.) Ominaislämpö savukaasulle saadaan kaavalla:

$$\text{Kaava 18. } c_{psk} = \sum m_n * c_{pn}.$$

$c_{psk}$  = savukaasun ominaislämpö

$\Sigma m_n$  = tietyn kaasukomponentin massaosuus

$cp_n$  = tietyn kaasukomponentin ominaislämpö

Adiabaattinen palamislämpötila saadaan lasketuksi kaavalla:

$$\text{Kaava 19. } t_{sk} = (Hu + m_{i(tod)} * t_i * cp_i) / (m_{sk(tod)} * cp_{sk(tod)}).$$

$t_{sk}$  = savukaasun adiabaattinen palamislämpötila

$Hu$  = polttoaineen tehollinen lämpöarvo

$m_{i(tod)}$  = todellinen ilmavirta polttoainekiloa kohti

$t_i$  = ilman sisäänmenolämpötila

$cp_i$  = ilman keksimääräinen ominaislämpö

$m_{sk(tod)}$  = todellinen savukaasuvirta polttoainekiloa kohti

$cp_{sk(tod)}$  = savukaasun keskimääräinen ominaislämpö

#### 4.5 Vesikastepiste

Palamiskaasut sisältävät vesihöyryä. Jos savukaasussa olevan vesihöyryn osapaine on suurempi kuin kylmän veden höyrynpaine kyseisessä lämpötilassa, pyrkii savukaasuissa oleva vesihöyry tiivistymään. Vesihöyryn tiivistyminen savukaasukanavissa ei ole toivottua koska se aiheuttaa korroosiota. Ilmaylimäärän avulla saadaan laskettua vesikastepistettä koska, se vähentää vesihöyryn osapainetta savukaasuissa. Vesikastepisteet ovat yleensä 40-60 °C:n kohdalla. Jotta vesikastepiste voidaan selvittää, täytyy tietää savukaasussa olevan veden osapaine. Se voidaan selvittää savukaasukanavassa vallitseman kokonaispaineen avulla, joka yleensä on n. 1 bar. (Huhtinen 1997, 90.) Savukaasun vesihöyryn osapaine saadaan selvitettyä kaavalla:

$$\text{Kaava 20. } p_{vh} = y_{H_2O} * p_{kok}.$$

$p_{vh}$  = vesihöyryn osapaine

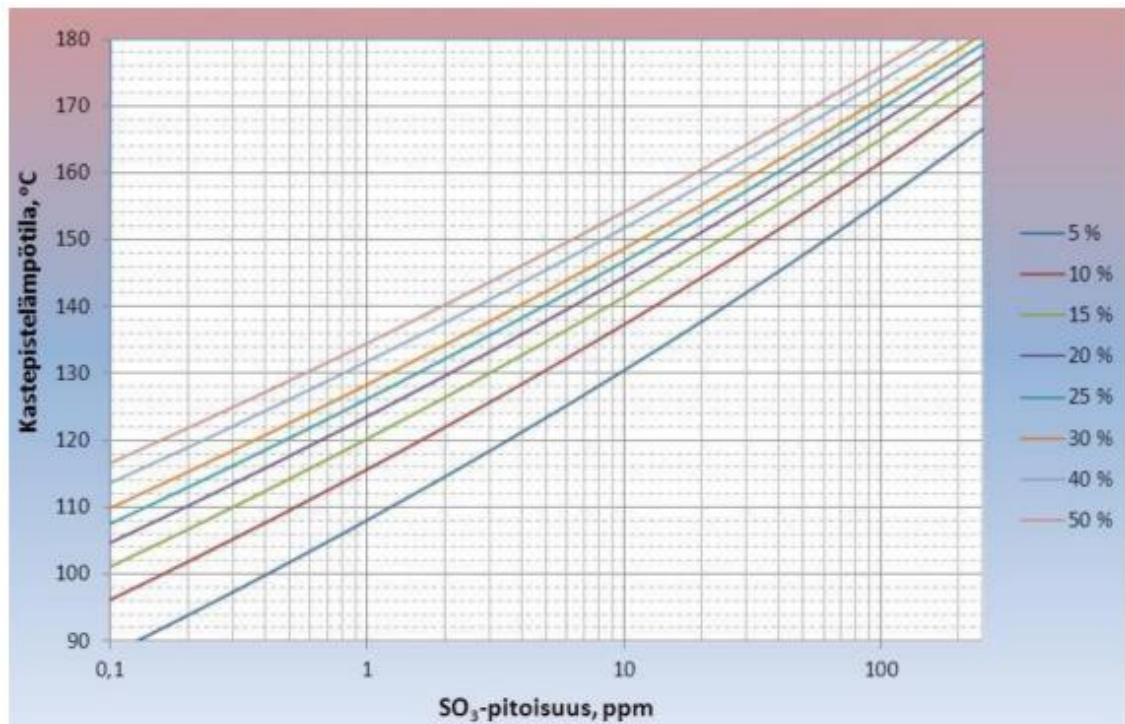
$p_{\text{kok.}}$  = kokonaispaine

Kun vesihöyryn osapaine tiedetään, niin höyrytaulukon avulla saadaan selvitettyä savukaasun vesikastepiste (Huhtinen 1997, 90).

#### 4.6 Happokastepiste

Joissakin polttoaineissa on joukossa rikkiä kuten turpeessa ja polttoöljyssä. Runsaammin rikkiä sisältävät kivihiili ja raskaat polttoöljyt. Maakaasussa ja puupolttoaineessa ei rikkiä ole lähes lainkaan. Kun poltetaan polttoainetta, joka sisältää rikkiä, alkaa rikki reagoimaan hapen kanssa ja näin muodostuu rikinoksideja  $\text{SO}_2$ :a ja  $\text{SO}_3$ :a. (Huhtinen 1997, 40.) Polttoaineen sisältämästä rikistä n. 95-99 % hapettuu rikkidioksidiksi. Jäljelle jäävä 1-5 % hapettuu rikkiatrioksidiksi. Rikkiatrioksidi ei enää reagoi rikkihapoksi vaan se poistuu ilmaan savupiipun kautta. N. 400 °C lämpötilassa rikkiatrioksidi alkaa muodostamaan kaasumaista rikkihappoa. Kaasumaisesta rikkihaposta ei ole haittaa lämmönsiirtopinnoille, vaan se poistuu savukaasujen mukana pois ulkoilmaan. Mutta jos savukaasu saavuttaa happokastepisteen pintojen korroosiota alkaa tapahtua. Happokastepisteessä kaasumainen rikkihappo alkaa tiivistymään sen nestemäiseen olomuotoon. Happokastepiste pystytään määrittämään, kun tiedetään savukaasun rikkidioksiidin ja kosteuden pitoisuudet. Apuna voidaan käyttää esimerkiksi taulukkoa 1. (Alakangas 2000, 33.)

Taulukko 1. Happokastepistelämpötila kosteuden ja rikkiatriksidipitoisuuden mukaan (Alakangas 2000, 33).



Jos rikkihappoa alkaa tiivistymään pakokanavien pinnoille, alkaa nihin syntymään korroosiota. Korroosiota on tavallisimmin havaittavissa siellä missä savukaasun lämpötila on alhaisimmillaan. Korroosiota voi tapahtua myös, jos savukaasu on kosketuksissa huomattavasti kylmemmän pinnan kanssa, eikä sen lämpötila ole lähellä kastepistettä. (Alakangas 2000, 33.)

Taulukko 1:n avulla voidaan saada arvio happokastepisteestä. Happokastepisteen tarkkaan määrittämiseen tarvitaan paljon monimutkaisempaa laskentaa. Mutta sen määrittämiseen on myös yksinkertaisempiakin korrelaatioita, joissa tarvitsee tietää savukaasun koostumus kosteuden ja rikkiatriksidipitoisuuden mukaan. (Alakangas 2000, 33.)

Happokastepiste voidaan myös selvittää savukaasun rikkidioksiidipitoisuuden ja kosteuden mukaan seuraavalla kaavalla:

$$\text{Kaava 21. } 1000 / T_{\text{HKP,K}} = 3,9526 - 0,1863 \times \ln(p_{\text{H}_2\text{O}}) - 0,000867 \times \ln(p_{\text{SO}_2}) + 0,000913 \times \ln(p_{\text{H}_2\text{O}}) \times \ln(p_{\text{SO}_2})$$

$T_{\text{HKP,K}}$  = happokastepiste Kiangin korrelaatiolla

$P_{\text{H}_2\text{O}}$  = vesihöyryn osapaine

$P_{\text{SO}_2}$  = rikkidioksidin osapaine

## 5 LASKURIN LUOMINEN

### 5.1 Laskurin luominen

Savukaasulaskuri luotiin Excel-taulukkolaskenta ohjelmalla, koska sen käytöstä oli teki- jällä eniten kokemusta. Lisäksi Excelin avulla on helppo paikantaa laskennassa tapah- tunut virhe. Laskurin tekemisen alkuvaiheessa tiedossa oli ainoastaan kattilan teho. Muut lähtöarvot kuten polttoaineiden koostumukset etsittiin kirja- ja verkkolähteistä. Läh- töarvojen puuttuminen teki laskurin luomisesta aluksi vaikeaa, koska ei ollut tiedossa mitä kaikkia arvoja tulisi tietää, jotta laskut saataisiin suoritetuksi. Tästä johtuen opinnäy- tetyön alkuvaiheessa perehdyttiin useisiin kirja- ja verkkolähteisiin ja saatiin valmiiksi hahmotettua minkälainen laskurista pitäisi tulla.

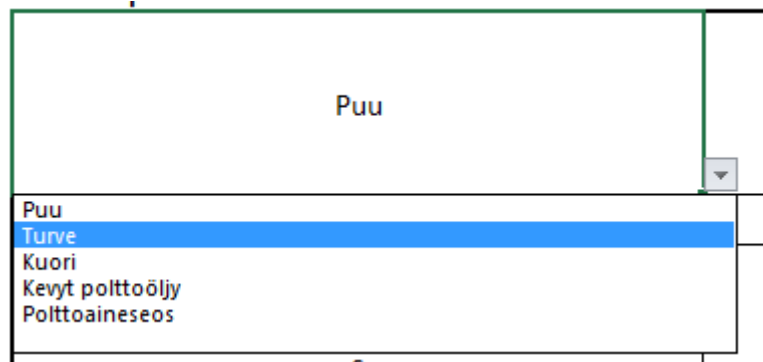
Mitä pidemmälle laskurissa päästiin, huomattiin että laskuri tarvitsee kirjallisuudesta saa- tuja taulukkoarvoja joidenkin tulosten selvittämistä varten. Taulukkoarvojen etsimisen helpottamiseksi päätettiin ne luoda suoraan Exceliin, jossa arvot saataisiin haettua no- peasti käyttäen apuna HAKU-funktiota. Taulukossa 2 on esitettyä yksi Exceliin lisätty taulukko joka, helpottaa polttoaineenkuiva-ainekoostumuksen hakemisen laskentaan.

Taulukko 2. Polttoaineiden kuiva-ainekoostumukset.

Polttoaine / koostumus	Seos	Osuudet (%)	C (%)	H <sub>2</sub> (%)	S (%)	O <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> O (%)	Tuhka (%)
Puu			50,40	6,20	0,00	42,50	0,50	20,00	0,40
Turve			55,00	5,50	0,20	32,60	1,70	50,00	5,00
Kuori			53,90	6,20	0,00	37,36	0,53	58,30	2,03
Kevyt polttoöljy			85,80	13,20	0,50	0,30	0,20	0,05	0,01
Polttoaineseos	Puu	50	52,70	5,85	0,10	37,55	1,10	35,00	2,70
	Turve	50							

Kun kuiva-ainekoostumukset oli saatu selville, päästiin laskemaan syntyvien komponent- tien määriä savukaasussa käyttäen apuna polttoaineen sisältämiä ainemääriä. Ainemää- rien laskuvaiheeseen luotiin taulukko, jossa saatiin eriteltyä polttoaineen lähtöaineiden määrät ja savukaasun ainemäärät.

Laskurin käyttöä haluttiin yksinkertaistaa sen verran, että polttoaineen ainemääriä ei erikseen tarvitse sijoittaa eri soluihin, vaan polttoainesoluun pystyy valitsemaan haluttu polttoaine valmiiksi tehdyn valikon kautta. Sen mukaan laskuri hakisi automaattisesti oikeat lähtöarvot taulukosta 2. Tämän toiminnon avulla säästettäisiin aikaa ja saataisiin vähennettyä virheen mahdollisuutta. Kuvassa 11 on esitettyä polttoainevalikko.



Kuva 11. Polttoaineluettelo.

Kun haluttu polttoaine on valittuna, laskuri hakee taulukosta 2 oikeat arvot ja sijoittaa ne taulukko 3:een josta saadaan selville polttoaineen, palamiseen kuluvan hapen ja savukaasujen ainemäärät selvitettyä. Taulukon 3 antamien arvojen yksikkö on kmol/kg.



Taulukko 3. Esimerkki savukaasulaskusta, jossa poltetaan 1 kg puuta.

Puu	Lähtöaineet				Savukaasu					
	Aineet:	$M_x$	$m_x$	$n_x$	$n_{O_2}$	$n_{CO_2}$	$n_{SO_2}$	$n_{N_2}$	$n_{H_2O}$	$n_{O_2}$
C	12,01	0,403	0,034	0,034	0,034					
H <sub>2</sub>	2,02	0,050	0,025	0,012					0,025	
S	32,07	0,000	0,000000	0,000000		0,000000				
O <sub>2</sub>	32	0,340	0,0106	-0,0106						
N <sub>2</sub>	28,02	0,004	0,00014	-			0,00014			
H <sub>2</sub> O	18,02	0,20	0,011	-					0,011	
Tuhka		0,003								
Yhteensä		<b>1,0</b>		0,035						
Happimäärä				0,046						0,0106
Typeä ilmasta				0,173			0,17			
Kosteutta ilmasta				0,0050					0,0050	
Kosteaa polttoilmaa				<b>0,224</b>						
Savukaasun komponentteja					0,034	0,000000	0,17290	0,04066		0,01057
Savukaasuja yhteensä (kosteaa savukaasua)										<b>0,258</b>
Kuivaa savukaasua										<b>0,217</b>

Kun savukaasun ainemäärät saatiin selville taulukko 3:n avulla, voitiin selvittää kostean savukaasun sisältämien osakaasujen osuudet. Taulukossa 4 on esitettyä puusta syntyvien osakaasujen prosenttiosuudet savukaasussa.

Taulukko 4. Esimerkki savukaasun komponenttien mooliosuuksista.

Kostean savukaasun mooliosuus (vol-%):		
$y_{CO_2}$	0,130	kmol
$y_{SO_2}$	0,000000	ppm
$y_{N_2}$	0,671	kmol
$y_{H_2O}$	0,158	kmol
$y_{O_2}$	0,041	kmol

Kuten jo aikaisemmin kerrottiin niin joidenkin laskujen ratkaisemiseksi tuli käyttää lähteistä löydettyjen taulukoiden arvoja. Taulukoiden etsimiseen käytetty aika haluttiin minimoida ja siksi taulukot luotiin laskuriin toiselle välilehdelle, jotta laskuria pystyisi operoimaan pelkästään yhdellä välilehdellä taulukoiden ollessa piilossa. Laskurissa taulukoiden arvot saataisiin haettua yksinkertaisesti käyttäen apuna Excelin HAKU-funktiota. Tämä teki laskurista huomattavasti selkeämmän kun ei tarvitse selata useita taulukoita

läpi. Samalla saatiin varmistettua ettei laskurin käyttäjä vahingossa syötä väärää taulukkoarvoa väärään soluun.

Savukaasun vesikastepiste saatiin selvitettyä käyttäen kaavaa 20. Laskun jälkeen höyrytaulukkoa apuna käyttäen saatiin selvitettyksi vesikastepisteen lämpötila. Höyrytaulukko syötettiin kirjalähteestä laskurin toiselle välilehdelle, ja tässäkin tilanteessa käyttäen HAKU-funktiota voitiin helpottaa lämpötilan selvittämistä.

Happokastepisteen selvittämiseksi lisättiin laskuriin happokastepistetaulukko. Taulukon avulla pystyy selvittämään rikkiatrioksiidin ja savukaasussa olevan vesihöyryn osapaineen avulla sen happokastepistelämpötilan. Mutta kirja- ja verkkolähteistä löydetyn kaavan 21 avulla onnistuttiin laskemaan likimääräinen happokastepistelämpötila. Kaavan avulla ei tarvitse tietää rikkiatrioksiidin määrää, vaan siinä riittää kun tietää savukaasussa olevan rikkidioksiidin määrän. Kaavan avulla onnistuttiin helpottamaan lämpötilan selvittämistä sillä kaavassa voidaan käyttää suoraan kostean savukaasun sisältämää rikkidioksiidin mooliosuutta.

## 5.2 Laskurin verifiointi

Seuraavaksi käydään läpi laskurin verifiointi käyttäen apuna kirjalähteestä löydettyä esimerkkilaskua, jossa poltetaan 1 kg turvetta. Turpeen kuiva-ainekoostumus on seuraava: 55 p-% hiiltä, 5,5 p-% vetyä, 0,2 p-% rikkiä, 32,6 p-% happea 1,7 p-% typpeä ja loput tuhkaa. Laskussa turve palaa täydellisesti, joten lambda on tässä tapauksessa 1. Vesipitoisuus oli ilmoitettu turpeella olevan 45 p-%. Ja ilman suhteellinen kosteus on 70 %.

Polttoaineen kuiva-ainekoostumuksesta syntyneiden komponenttien osakaasuja verrattiin kirjalähteestä löydettyihin tuloksiin. Taulukossa 5 on esitettyinä kirjalähteessä ilmoitetut osakaasujen prosenttiosuudet ja laskurin antamat osakaasujen prosenttiosuudet savukaasussa.

Taulukko 5. Kostean savukaasun komponenttien vertailu.

Kostean savukaasun komponentit	Kirjalähteen savukaasun mooliosuudet (vol-%)	Laskurin antamat savukaasun mooliosuudet (vol-%)
Hiilidioksidi CO <sub>2</sub>	0,149	0,148
Rikkidioksidi SO <sub>2</sub>	0,0002	0,000268
Vesi H <sub>2</sub> O	0,244	0,251
Typpi N <sub>2</sub>	0,607	0,601
Ilma O <sub>2</sub>	0	0

Seuraavaksi selvitettiin savukaasun vesikastepiste käyttäen apuna laskuriin syötettyä höyrytaulukkoa. Molempien savukaasujen vesihöyryn osapaineen ja kattilan jälkeisen savukaasukanavan kokonaispaineen avulla, saadaan höyrytaulukosta katsottua savukaasujen vesikastepisteeksi n. 60-65 °C. Ja kuten aikaisemmin todettiin, savukaasujen vesikastepisteet ovat yleensä n. 40-60 °C tuntumassa. Joten voidaan todeta että laskettu vesikastepiste on oikeaa suuruusluokkaa.

Lopuksi kun sijoitetaan savukaasussa olevan rikkidioksidin ja vesihöyryn osapaineet aikaisemmin esitettyyn kaavaan, päästään käsiksi savukaasun happokastepisteeseen. Käyttämällä apuna kaavaa 21 saadaan savukaasun happokastepisteeksi n. 155 °C. Ja jos tulosta verrataan aikaisemmin ilmoitettuun arvoon jonka yläpuolella savukaasujen lämpötila tulisi pitää, jotta lämpöpinnat eivät alkaisi syöpymään, voidaan todeta että happokastepiste on oikealla alueella. Normaalisti rikkiä sisältävien polttoaineiden savukaasut pyritään pitämään n. 140-150 °C yläpuolella, jotta lämpöpinnat eivät alkaisi syöpymään.

## 6 YHTEENVETO

Tämä opinnäytetyö tehtiin toimeksiantona South-West Supply Oy Ltd:lle. Opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda laskuri, joka pystyisi määrittämään syntyvän savukaasun määrän kun poltettaisiin puuta, kuorta, turvetta tai joidenkin kahden edellämainitun polttoaineen seosta. Savukaasun lisäksi haluttiin saada selville syntyvän savukaasun vesi- ja happokastepiste. Savukaasun määrä on tärkeä tietää kun halutaan mitoittaa lämmönvaihinta. Vesi- ja happokastepiste kertoo paljonko savukaasuista voidaan ottaa lämpöä hyötykäyttöön ennen kuin haitallista rikkihappoa tai vettä alkaa syntyymään lämpöpinnoille ja aiheuttaa korroosiota. Laskurin toimeksianto syntyi, kun n. 0,5-4 MW kattilalaitoksissa ei aina tiedetä niistä syntyvän savukaasun määrää.

Opinnäytetyön suorittamista varten tuli perehtyä useisiin kirja- ja verkkolähteisiin. Lähteiden pohjalta kerättiin laskuria varten lähtöarvoja, teoriaa ja taulukoita, jotka auttoivat savukaasun määrän, vesi- ja happokastepisteen määrittämisessä. Lähtöarvojen lisäksi lähteistä haettiin eri taulukoita, joiden avulla saatiin kehitettyä laskuria laskemaan arvot automaattisesti.

Laskuri luotiin Excel-taulukkolaskenta ohjelmalla, koska sen käytöstä oli eniten kokemusta. Ohjelmalla pystyy myös paikantamaan helposti ja nopeasti laskennassa tapahtuvat virheet. Laskurin avulla saatiin lopulta selvitettyä syntyvien savukaasujen määrä, sekä siinä olevien komponenttien osapaineiden määrät syötetyn polttoaineen mukaan. Osakaasujen kautta päästiin selvittämään vesi- ja happokastepiste. Lopuksi suoritettiin laskurin verifiointi ja kirjalähteiden perusteella voidaan todeta, että laskuri onnistui laskemaan halutut tiedot.

Opinnäytetyö tuntui aluksi haastavalta, mutta kun itse palamisprosessiin alkoi perehtyä niin selvisi että se on aika suoraviivainen prosessi, jossa pystytään selvittämään savukaasun osapaineiden avulla lähes kaikki tarvittava. Laskurin kehittämistä ajatellen sen voisi jatkossa saada määrittämään syntyvän savukaasun määrän myös muille polttoaineille kuin pelkästään puulle, kuorelle ja turpeelle.

## LÄHTEET

- Alakangas, E. 2000. Otamedia Oy, Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tiedotteita 2045. Viitattu 22.10.2019. [Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. \(pdf\) \(2.9 MB\)](#)
- Alakangas, E.; Erkkilä, A. & Oravainen, H. 2008. Tehokas ja ympäristöä säästävä tulisijalämmitys, Polttopuun tuotanto ja käyttö. Jyväskylä: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT. Viitattu 12.11.2019. <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/VTT-R-10553-08.pdf>
- Hautala, M.; Peltonen, H. 2014. Insinöörin fysiikka. 11. painos. Saarijärvi: Lahden Teho-Opetus Oy
- Huhtinen, M.; Kettunen, A.; Nurminen, P.; Pakkanen, H. 1997. Höyrykattilatekniikka. 2., tarkistettu painos. Helsinki: Oy Edita Ab
- Hänninen, H.; Karppinen, M.; Leskelä, M. & Pohjakallio, M. 2018. Tekniikan kemia. 14., uudistettu painos, Keuruu: Edita Publishing Oy
- Kärenlampi, K. 2017. Höyrykattiloiden lämpötekniinen suunnittelu. Opinnäytetyö. Energiatekniikan koulutusohjelma. Oulun ammattikorkeakoulu. Viitattu 28.4.2019
- Kömi, T. 2015. Biopolttoainekattilan palamisilman mittaus. Opinnäytetyö. Energiatekniikan koulutusohjelma. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu 12.11.2019.
- Metsäalan ammattilehti. 2010. Kiinteän biopolttoaineen palaminen. Viitattu. 22.10.2019. <https://www.ammattilehti.fi/uutiset.html?a15700=1959>
- Motiva 2016, Biopolttoaineiden lämpöarvoja, Viitattu. 22.10.2019. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden\\_lampoarvoja](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden_lampoarvoja)
- Motiva 2019, Uusiutuva energia Suomessa, Viitattu 22.10.2019. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/uusiutuva\\_energia\\_suomessa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa)
- Paso, T. 2014. Savukaasujen puhdistus kotimaisenpolttoaineen kattilalaitoksessa. Talotekniikan koulutusohjelma. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Viitattu 28.4.2019
- Raiko, R.; Saastamoinen, J.; Hupa, M.; Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2., painos. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemioiden – De tekniskvetenskapliga akademierna r.y
- Seppänen, R.; Mannila, L.; Kervinen, M.; Parkkila, I.; Konttinen, P.; Karkela, L.; Yli-Kokko, T. 2012. MAOL taulukot. 1.-5. painos. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy
- Tornberg, A. 19.5.2015. Leijukattilan savukaasujen loppulämpötilan hallinta. Viitattu 31.10.2019 [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/104733/Diplomity%C3%B6\\_Tornberg\\_muutokset%20tehty.pdf?sequence=2](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/104733/Diplomity%C3%B6_Tornberg_muutokset%20tehty.pdf?sequence=2)
- Turveinfo. Turve ja puu tukevat toisiaan energiakäytössä. Viitattu 22.10.2019 <http://turveinfo.fi/kayttotavat/energiakaytto/turve-ja-puu-tukevat-toisiaan-energiakaytossa/>
- Tölli, M. 2015. Alapalokamiinan lämpötekniinen laskenta. Opinnäytetyö. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Oulun ammattikorkeakoulu. Viitattu 28.4.2019
- Valtunen, E. 2013. Tekniikan taulukkokirja. 20. painos. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy