

Joona Puikkonen

Savukaasujen lämmöntalteenoton
toimintaperiaate sekä kannattavuus
Kotileipomo Siiskosella

Opinnäytetyö
Talotekniikan koulutusohjelma

2020



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Joona Puikkonen	Insinööri (AMK)	Huhtikuu 2020
Opinnäytetyön nimi Savukaasujen lämmöntalteenoton toimintaperiaate sekä kannattavuus Kotileipomo Siiskosella		47 sivua 7 liitesivua
Toimeksiantaja STT Energia Mikkeli Oy		
Ohjaaja Jarkko Kolehmainen		
Tiivistelmä <p>Tämä opinnäytetyö keskittyi tutkimaan savukaasujen lämmöntalteenoton kannattavuutta asiakasyrityksessä, joka toteutettiin toimeksiantona STT Energia Mikkeli Oy:lle. Tutkimuksen tavoitteena oli luoda toimeksiantajalle selvitys savukaasujen lämmöntalteenoton vaikutuksista Kotileipomo Siiskosella. Tutkimuksessa käsiteltiin nestekaasun palamisprosessin vaiheita, kun leipäuunien savukaasuja lauhdutetaan alle kastepistelämpötilan. Opinnäytetyössä tuodaan esille savukaasujen lämmöntalteenottolaitteiston toimintaperiaatetta, kun hukkalämpöä kerätään talteen leipäuunien savukaasuista.</p> <p>Hukkaenergian hyödyntämisen kysyntä taloteknisillä laitteistoilla on lisääntynyt, sillä hyödyntämällä ”ilmaisenergiaa” voidaan saada aikaan merkittäviäkin säästöjä rakennusten ostoenergian käytössä. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon leipäuunien savukaasujen mukana kulkeutuu hukkaenergiaa ja minkä verran niistä saatiin hyödyksi savukaasujen lämmöntalteenottoilla Kotileipomo Siiskosella. Tutkimus suoritettiin hyödyntämällä kvantitatiivista tutkimusmenetelmää, jonka avulla saatiin laskettua savukaasujen lämmöntalteenoton kannattavuus. Tutkimuksessa ratkaistiin, kuinka suuri osuus hyödyksi saata- vasta hukkaenergiasta syntyi vesihöyryn kondensoitumisesta eli latentista lämpöenergiasta. Siinä selvitettiin myös savukaasujen lämmöntalteenoton lävitse virtaavan kiertoveden lämpötilan muutosta tunnin mittaisen käyntijakson aikana. Tämän avulla saatiin laskettua vuotuinen ostoenergian säästö Kotileipomo Siiskosella. Tutkimuksen laskelmia varten kohdeyrityksessä suoritettiin erilaisia savukaasu- ja vesivirtamittauksia, joiden perusteella saatiin laskettua savukaasujen lämmöntalteenoton kannattavuus. Tuloksista selviää myös savukaasujen lämmöntalteenoton hyötysuhde.</p> <p>Insinööriyön lopputuloksena syntyi kattava selvitys tutkimuskohteessa vuosittain saavutettavista hyödyistä savukaasujen lämmöntalteenotolla. Tutkimus osoitti, että savukaasujen lämmöntalteenotto on kannattavaa, koska sillä saavutetaan noin 10 000 euron säästöt vuosittain. Tämä on merkittävää, sillä hukkaenergiaa hyödyntämällä saavutetaan noin 125 MWh säästöt lämmitysenergian käytössä, jonka tuottamiseen kuluisi noin 11 000 kiloa nestekaasua. Tutkimustuloksia voidaan pitää luotettavina, sillä ne perustuvat todellisiin mit- taustuloksiin. Näin ollen tulokset ovat hyödynnettävissä vastaavanlaisissa taloteknisissä suunnittelu- ja toteutustehtävissä.</p>		
Asiasanat savukaasut, lämmöntalteenotto, nestekaasu, hukkalämpö		

Author (authors)	Degree	Time
Joona Puikkonen	Bachelor of Engineering	April 2020
Thesis title Heat recovery of flue gases and its viability in a Finnish bakery		47 pages 7 pages of appendices
Commissioned by STT Energia Mikkeli Oy		
Supervisor Jarkko Kolehmainen		
<p>Abstract</p> <p>This thesis focused on exploring the viability of heat recovery of flue gases in the target company. The demand of utilizing wasted energy with technical building equipment has increased, as utilizing "free energy" can generate significant savings in purchasing energy for buildings. The aim of the study was to find out how much wasted energy is discharged with the flue gases of bread ovens and how much was used for heat recovery.</p> <p>This research was carried out using a quantitative research method, which enabled calculating the profitability of heat recovery of flue gases. It also solved how much of the energy that was utilized came from condensation of water vapor or latent thermal energy. The research resolved the change in the temperature of the circulating water flowing through the heat recovery of the flue gas during a one - hour running period. This was used to calculate the annual savings in purchasing energy. For these calculations various flue gas and water flow measurements were carried out, which were used to calculate the profitability of heat recovery from the flue gases.</p> <p>This study revealed that heat recovery from flue gases is profitable as it achieves annual savings of around € 10,000. This is significant because wasted energy can save about 125 MWh in heating energy, which would require about 11,000 kilos of LPG. This research can be considered reliable as the results are based on actual measurement. Therefore, the results can be utilized in similar building engineering and implementation tasks.</p>		
<p>Keywords</p> <p>flue gases, heat recovery, liquefied petroleum gas (LPG), waste energy</p>		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	SAVUKAASUT JA PALAMINEN.....	7
2.1	Nestekaasun palaminen	7
2.2	Savukaasujen lämmöntalteenotto.....	10
2.3	Savukaasun lämmöntalteenoton toimintaperiaate	11
2.4	Lämpöenergiaa leipäuunin savukaasuista	13
2.5	Savukaasun ominaisuudet.....	14
2.6	Savukaasun lämmöntalteenotolla saatava hukkalämmön määrä.....	18
2.7	Vesihöyryjen kondensoitumisen energiasisältö.....	18
2.8	Savukaasun mukana kulkeutuva hukkalämmön määrä	20
3	TUTKIMUSKOHDDE	23
3.1	Savukaasun lämmöntalteenotto Kotileipomo Siiskosella	24
3.2	Leipäuunien lämmityksessä syntyvät savukaasut	24
3.3	Lämmönlähde.....	26
4	MITTAUKSET	27
4.1.1	Savukaasuanalysointilaitteisto.....	28
4.1.2	Vesivirtamittari	28
4.2	Mittaukset Kotileipomo Siiskosella.....	28
4.2.1	Ensimmäinen mittauskerta.....	29
4.2.2	Toinen mittauskerta	29
4.2.3	Kolmas mittauskerta	29
5	TULOKSET	30
5.1	Leipäuunien savukaasut	30
5.1.1	Savukaasussa oleva typen osuus.....	31
5.1.2	Savukaasussa oleva vesihöyryn osuus	31
5.1.3	Savukaasun tiheys	32
5.1.4	Savukaasun ominaislämpökapasiteetti	32

5.1.5	Savukaasun tilavuusvirta	34
5.1.6	Savukaasun massavirta.....	34
5.2	Savukaasun lämmöntalteenotolla hyödyksi saatu hukkaenergia	34
5.3	Vesihöyryn kondensoitumisen energiaosuus	35
5.4	Savukaasujen mukana kulkeutuva hukkalämmön määrä	36
5.5	Savukaasun lämmöntalteenoton hyötysuhde.....	36
5.6	Lämmöntalteenotolta kiertoveteen siirtyvä hukkalämpöenergia	37
6	HUKKAENERGIAN VAIKUTUS RAKENNUKSEN OSTOENERGIASSA.....	38
6.1	Vuosittainen energiasäästö	38
6.2	Vuosittainen polttoainesäästö	38
7	KANNATTAVUUS JA MARKKINOINTI.....	39
8	TULOSTEN YHTEENVETO	41
9	POHDINTA.....	43
	LÄHTEET	45

LIITTEET

Liite 1. Savukaasujen lämmöntalteenoton kytkentäkaavio

Liite 2. Mittauspöytäkirja ensimmäiseltä savukaasun lämmöntalteenotolta

Liite 3. Mittauspöytäkirja toiselta savukaasun lämmöntalteenotolta

Liite 4. Mittauspöytäkirja kolmannelta savukaasun lämmöntalteenotolta

Liite 5. Mittauspöytäkirja neljänneltä savukaasun lämmöntalteenotolta

Liite 6. Mittauspöytäkirja viidenneltä savukaasun lämmöntalteenotolta

Liite 7. Vuoden 2019 ilmaston keskilämpötila Kotileipomo Siiskosella

1 JOHDANTO

Lämmitysenergian säästämiseen liittyviä toimenpiteitä on ryhdytty hyödyntämään rakennuksen taloteknisissä järjestelmissä, kun ostoenergian hinta on ollut vuosittain nousujohteista. Hukkaenergiaa hyödyntämällä saavutettavat säästöt luovat suurta kiinnostusta monia kohderyhmiä kohtaan. Esimerkiksi investoimalla uusiin laitteisiin tai hyödyntämällä hukkalämpöä voidaan saada merkittäviäkin energia- ja kustannussäästöjä aikaan.

Opinnäytetyön tavoitteena on luoda toimeksiantajalle selvitys, josta ilmenee savukaasujen lämmöntalteenottolaitteiston kannattavuus Kotileipomo Siiskosella. Toimeksiantajana opinnäytetyössä toimii STT Energia Mikkeli Oy. Opinnäytetyön lopputuloksia voidaan jatkossa hyödyntää esimerkiksi suunniteltaessa tai toteutettaessa vastaavanlaista tekniikkaa. Opinnäytetyössä tutkitaan Kotileipomo Siiskosella käytössä olevilla savukaasujen lämmöntalteenotoilla saavutettavia hyötyjä ja rahallisia säästövaikutuksia. Savukaasujen lämmöntalteenottojen kannattavuutta tutkimuskohteessa selvitetään erilaisilla savukaasu- ja vesivirtamittauksilla. Savukaasujen lämmöntalteenotoilla leipäunien savukaasuista saatavaa hukkaenergiaa hyödynnetään rakennuksen ilmanvaihtokoneiden tuloilman ja lämpimän käyttöveden esilämmitykseen sekä rakennuksen ulkoalueiden sulanapitoon.

Opinnäytetyössä tuodaan esille savukaasujen lämmöntalteenoton toimintaperiaatetta, sitä, kuinka kyseinen lämmöntalteenotto prosessi etenee. Opinnäytetyössä selvitetään tutkimuskohteen leipäunien savukaasujen ominaisuuksia ja koostumusta sekä niiden vaikutusta hukkaenergian hyödyntämiseen savukaasujen lämmöntalteenotoilla. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, paljonko kyseisellä lämmöntalteenottojärjestelmällä saadaan kerättyä hukkaenergiaa savukaasuista. Tutkimuksessa ratkaistaan myös savukaasuja lauhduttaessa tapahtuvan latentin lämpöenergian osuus hyödyksi saatavasta hukkaenergiasta. Tutkimuksen tarkoitus on myös selvittää, kuinka paljon lämmöntalteenottojärjestelmä vaikuttaa ostoenergian säästöihin rakennuksen lämmityksessä. Lisäksi työssä pohditaan savukaasua hyödyntävän lämmöntalteenottojärjestelmän markkinoinnin kannattavuutta.

2 SAVUKAASUT JA PALAMINEN

Savukaasuja syntyy polttoaineiden palamisreaktioissa. Savukaasut sisältävät ilmassa olevan hapen mukana kulkeutuvaa typpeä ja vesihöyryä. Palamisreaktioilla tarkoitetaan poltettavan aineen kemiallista yhtymistä käytettävissä olevaan happeen, jolloin myös vapautuu lämpöenergiaa. Polttoaineiden reagoissa palavia aineita ovat hiili, vety, rikki sekä typpi. Savukaasuja syntyy, kun edellä mainitut aineet yhtyvät palamisilman happeen. (Huhtinen ym. 2000, 79.) Palamisessa käytettävä happi on peräisin ilmasta, joka koostuu pääosin typestä 79 % ja hapesta 21 % (Ilmatieteen laitos 2020a).

Palaminen tapahtuu täydellisesti silloin, kun palamisreaktioihin käytetään happea vain se määrä, mitä polttoaineen palamisreaktiot vaativat. Käytännössä ei kuitenkaan polttoaineen täydellistä palamista saavuteta teoreettisella hapen minimi-ilmamäärällä, vaan palamiseen käytetään normaalisti hieman enemmän happea eli yli-ilmamäärää. Palamisessa käytettävää ilmamäärää kuvataan ilmakertoimella (λ). Ilmakerroin kertoo, kuinka paljon palamisreaktioissa käytetään ilmassa olevaa happea suhteessa palamisreaktioiden tarpeeseen. Kun käytetään polttoaineena kaasua, käytetään normaalisti palamiseen happea vähintään 1,02–1,1 kertaa enemmän, kun mitä palamisreaktiot vaativat. (Huhtinen ym. 2000, 86.)

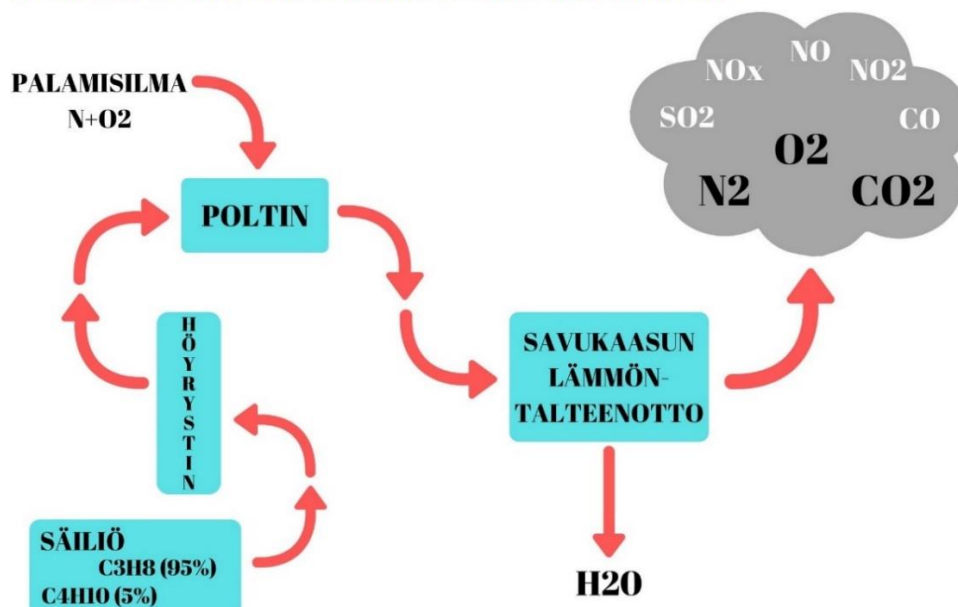
2.1 Nestekaasun palaminen

Nestekaasun palamisreaktiot ovat pääasiassa eksotermisiä eli niissä vapautuu jokaiselle reaktiolle ominainen energia lämpönä. Nestekaasun palamista kutsutaan homogeeniseksi silloin, kun polttoaine syötetään polttimelle kaasumaisessa muodossa. Palaminen on hyvin nopeaa ja tehokasta silloin, kun polttoaine on kaasumaisessa muodossa olevaa polttoaineen ja ilman seosta. (Huhtinen ym. 2000, 79–81.)

Nestekaasu koostuu pääosin propaanista (C_3H_8) sekä butaanista (C_4H_{10}). Nestekaasuja saadaan tuotettua öljynjalostuksen yhteydessä, ja niitä käytetään lämmityksen polttoaineena. (Harju 2010, 32.) Nestekaasussa propaanin pitoisuus on yleensä vähintään 95 % ja loppuosa koostuu butaanista. Propaani on toimintavarma polttoaine käytettäväksi ulkoilman olosuhteista riippu-

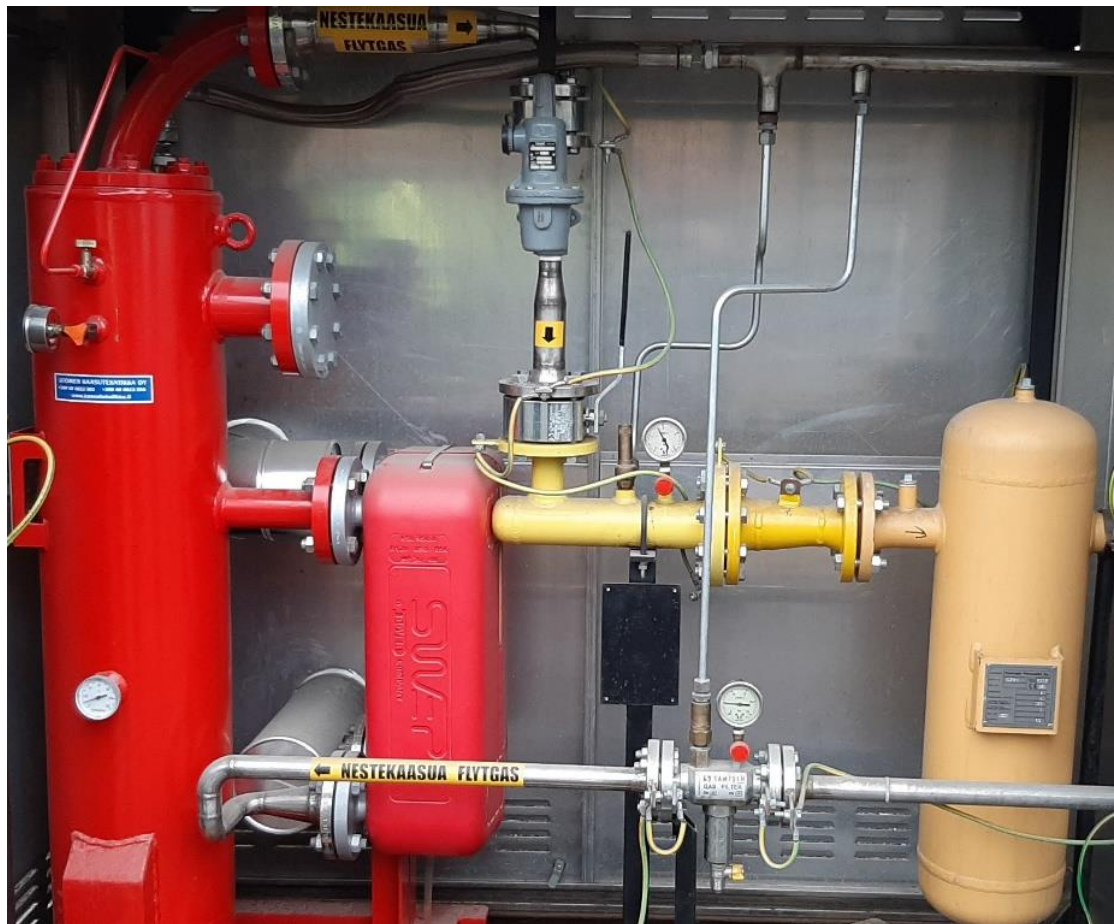
matta. Propanin sulamispiste on $-188\text{ }^{\circ}\text{C}$, sekä kiehumispiste $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nestekaasu sisältää kilogrammaa kohden vain $0,01\text{ g}$ rikkiä, eli palaminen on hyvin puhdasta. (Teboil 2020.) Propanin palamisyyhtälö on $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$ ja butaanin palamisyyhtälö on $\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5\text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$. Palamisprosessissa ainesosien yhtyessään happeen vedystä syntyy vettä, sekä hiilestä hiilidioksidia. (Suomen Kaasuyhdistys ry 2020, 14-15.) Nestekaasun palamisessa syntyvät savukaasut sisältävät siis aina hiilidioksidia ja vesihöyryä. Mikäli savukaasut sisältävät reagoimatonta happea, käyttää lämmönlähde palamiseen enemmän ilmaa, kun mitä palamisreaktiot tarvitsevat. Savukaasuissa oleva ylimääräinen jäännöshappi kuljettaa myös mukanaan ilmassa olevaa typpeä savukaasuihin. Nestekaasun palaessa syntyvässä savukaasussa oleva jäännöshappi muodostaa savukaasuihin pienen määrän muun muassa rikkidioksidia ja typen yhdisteitä, sekä hiilimonoksidia eli häkää. Nämä edellä mainitut haitalliset yhdisteet ilmaistaan yleensä miljoonaosan muodossa (ppm), eli parts per million. Nestekaasun palamisessa niiden alhaisilla massaosuuksilla ei ole laskennallista vaikutusta savukaasun energiasisältöön. (ACHR News 2020.) Nestekaasun palamisprosessi on esitetty alla olevassa kuvassa 1, jossa näkyy palamisen kulku pääpiirteittäin, kun syntyviä savukaasuja lauhdutetaan alle kastepistelämpötilan lämmöntalteenotolla. Vesihöyry tiivistyy vedeksi, kun savukaasut lauhtuvat alle kastepistelämpötilan.

NESTEKAASUN PALAMISPROSESSI & SAVUKAASUN LÄMMÖNTALTEENOTTO



Kuva 1. Kemiallisten aineiden kulkureitti nestekaasun palamisprosessissa savukaasujen lauhduttuessa alle kastepistelämpötilan (Puikkonen 2020a)

Nestekaasua varastoidaan nestemäisessä muodossa yleensä maan alla olevaan säiliöön, josta sitä käytetään rakennuksen lämmitystarpeisiin. Nestekaasu kulkeutuu säiliöltä höyrystimen kautta nestekaasupolttimelle, jolla lämpöenergia tuotetaan. Palamisprosessi etenee niin, että säiliöltä tuleva nestekaasu muuttuu höyrystimessä nestemäisestä kaasumaiseen muotoon, jonka jälkeen se kulkeutuu nestekaasupolttimelle. Esimerkki nestekaasun höyrystimestä on esitetty kuvassa 2. Kuvassa vasemmalla olevan höyrystimen jälkeen putkistoon on lisätty paineenalennusventtiili sekä painesäiliö, josta nestekaasu kulkeutuu nestekaasupolttimelle. Jos nestekaasun palaminen tapahtuisi hapen minimi-ilmamäärällä, kutsuttaisiin sitä stökiometriseksi palamiseksi. Stökiometrisessä palamisessa käytetään palamiseen happea ainoastaan se määrä, mitä palamisreaktioihin tarvitaan ja siinä palamisreaktiot tapahtuvat aina loppuun saakka. (Huhtinen ym. 1999, 32.)



Kuva 2. Nestekaasun höyrystin Kotileipomo Siiskosella (Puikkonen 2020b)

Savukaasun ilmakertoimella tarkoitetaan todellisen ja stökiometrisen ilmamäärän välistä suhdetta (Perttula 2000, 25). Savukaasun palaessa yli-ilmamäärällä on siinä ns. reagoimatonta happea. Käytettäessä kaasumaisia polttoaineita huomioidaan laskuissa polttoainekilolla tuotettava lämpöarvo, joka kertoo saatavan lämpömäärän yksikössä (kWh). Lämpöarvo kuvaa siis lämpöenergian määrää, joka vapautuu esimerkiksi kilon nestekaasua palaessa täydellisesti. (Wahlroos 1980, 28.) Nestekaasua poltettaessa on huomioitava palamisessa syntyvä kondensoituminen sekä hiilidioksidin syntyminen. Normaaliosuhteissa poltettaessa kilo nestekaasua syntyy 1,6 litraa vettä sekä 3 kiloa hiilidioksidia. Kilolla nestekaasua saadaan tuotettua 12,8 kWh lämpöenergiaa, mikä vastaa nestekaasun lämpöarvoa. Nestekaasukilon hankintahinnan ollessa 92,5 senttiä jää yhden kilowattitunnin lämpöenergian tuottamiseksi hintaa noin 7,23 senttiä, mikäli lämmönlähteen hyötysuhde olisi 100 %. (AGA 2020.)

2.2 Savukaasujen lämmöntalteenotto

Savukaasujen lämmöntalteenotolla tarkoitetaan, että savukaasuista kerätään hukkaenergiaa, jota hyödynnetään rakennuksen taloteknisiin lämmitystarpeisiin. Savukaasujen lämmöntalteenotolla saadaan parannettua rakennuksen energiatehokkuutta, sekä samalla vähennetään syntyviä paloturvallisuusriskejä ja ympäristöpäästöjä. Hyödyntämällä uusiokäytettävissä olevaa hukkalämpöä vähennetään hiilidioksidipäästöjä ilmastonmuutosta vastaan, sekä samalla edistetään teollisuuden kilpailukykyä. Hukkaenergiaa saadaan kannattavasti hyödyksi lämmöntalteenotolla matalistakin lämmöistä ja pienistä lämpötilaeroista, jotka sisältävät lämpöenergiaa. Nykypäivän taloteknisillä laitteistoilla voidaan lämmitysverkostoon ottaa lämpöä talteen jopa 130 °C asteeseen asti. (Hämäläinen 2019, 7–8.)

Leipomoteollisuudessa savukaasujen lämmöntalteenottoa kannattaa hyödyntää kaikissa prosesseissa, joissa lämpöenergiaa on saatavilla. Leipäuunien lämmityksen jälkeisten savukaasujen mukana kulkeutuu leipomoteollisuudessa normaalisti 10–15 % ylimääräistä lämpöenergiaa, mistä noin 80 % voidaan hyödyntää keräämällä savukaasuista hukkalämpöä. Kannattavuuteen vaikuttaa paljon savukaasujen lämpötila sekä se, kuinka paljon hukkalämmölle

on tarvetta. Järjestelmä on pitkäikäinen sekä edullinen huolto- ja kunnossapidon kustannuksia ajatellen. Savukaasujen lämmöntalteenotolla voidaan säästää 15 % säästöt lämmityskustannuksissa sekä 3–4 vuoden suora takaisinmaksuaika laitteistolle. (ARC Energy Reduction Solutions 2020.) Todelliseen takaisinmaksuaikaan vaikuttaa saavutettavien säästöjen lisäksi myös osatoenergian hinnan kehitys. Nestekaasun vuosittainen hintakehitys 20 vuoden aikana on ollut hyvin alhaista. Hinnan vuosittainen kehitys on ollut noin 2,15 %. (Energiavirasto 2020.)

2.3 Savukaasun lämmöntalteenoton toimintaperiaate

Savukaasujen lämmöntalteenottolaite näkyy pääpiirteittäin kuvassa 3. Lämmöntalteenottolaite on asennettu leipäuunilta savukaasuja ulos johdattavaan savupiippuun. Lämmöntalteenottolaite sijaitsee heti leipäuunin jälkeen, missä savukaasut ovat korkealämpöisiä ja sisältävät paljon lämpöenergiaa. Lämmöntalteenoton täytyy myös olla sisätiloissa Suomen olosuhteiden takia, koska ulkoilman lämpötila on suurimman osan vuodesta alle lämmöntalteenottojärjestelmän kiertoveden lämpötilan. Talvella pakkasen aikaan on mahdollisuus myös kiertoveden jäätymiseen, mikäli järjestelmä olisi kytketty rakennuksen ulkopuolelle tai kylmään tilaan.



Kuva 3. Savukaasujen lämmöntalteenottolaite leipäunin savupiipussa (Exodraft 2020)

Savukaasujen lämmöntalteenoton toiminta perustuu siihen, että nestekiertoisella lämmöntalteenotolla varataan kiertoveteen savukaasuissa olevaa hukkalämpöä. Kiertovettä kierrätetään puskurivaraajaan, josta sitä voidaan jatkossa hyödyntää ns. ”ilmaisena” energiana rakennuksen lämmitystarpeisiin. Savukaasujen lämmöntalteenottoa ohjataan automaation avulla, joka ohjaa myös lämmöntalteenoton ohituspellin ja sekoitusventtiilin toimintaa. Automaatio sulkee lämmöntalteenoton säätöpellin, kun kiertoveden lämpötila ylittää asetetun lämpötilan raja-arvon. Tämän jälkeen automaatio avaa ohituspellin, ja silloin leipäunin savukaasut johdetaan kokonaisuudessaan ulkoilmaan. Automaatio ohjaa myös sekoitusventtiiliä sähköisesti, minkä avulla saadaan säädettyä puskurivaraajalle palaavan veden lämpötilaa. (Exodraft 2020.)

Savukaasujen lämmöntalteenotossa tapahtuu jatkuvasti verkoston lämpötilanvaihteluita, minkä takia kiertopiiri täytyy varustaa paisunta-astialla, joka kompensoi veden lämpötilan muutokset. Paisuntajärjestelmässä on myös oltava aina varoventtiilit, painemittarit ja ilmanpoistajat. (Harju 2010, 94.)

2.4 Lämpöenergiaa leipäuunin savukaasuista

Palamisprosessin aikana on tärkeää, että savukaasujen lämpötila pysyy kastepistelämpötilan yläpuolella, mikäli vesihöyryn kondensoitumista ei voida ehkäistä. Savukaasujen kastepiste on lämpötila, jossa savukaasussa oleva vesihöyry alkaa tiivistymään vedeksi lämmöntalteenoton konvektio-osan tai savupiipun seinämille. Kastepistelämpötilan suuruuteen vaikuttaa polttoaineen kosteus, joka on peräisin palamisilmassa olevasta vesihöyrystä. Nestekaasun polttaminen on hyvin puhdasta ja rikkidioksidia ei palamisessa juurikaan synny, joten savupiipun syöpymiselle ei ole vaaraa. (Wahlroos 1980, 51–53.) Savukaasujen kastepistelämpötila on merkittävä tekijä poltettaessa kosteita ja raskaita polttoaineita. Kun savukaasuista otetaan hukkalämpöä talteen, saadaan ulos kulkeutuvien savukaasujen lämpötilaa jäähdytettyä. Hyödyntämällä savukaasujen mukana kulkeutuvaa hukkaenergiaa saadaan parannettua rakennuksen lämmönlähteen kokonaishyötysuhdetta. (Vuorelainen 1978, 136.)

Hyötysuhde saadaan selvitettyä, kun jaetaan savukaasujen lämmöntalteenotolla hyödyksi saatu energiamäärä sillä lämpöenergialla, joka virtaa savukaasuina leipäuunin lämmityksen jälkeen savupiipussa (Seppänen 2001, 317). Hyödyksi saatuun lämpöenergiaan on lisättävä latentti lämpöenergia, joka siirtyy myös kiertoveteen, kun savukaasun vesihöyryt lauhtuvat alle kastepistelämpötilan. Latentilla lämmöllä tarkoitetaan vesihöyryyn sitoutunutta lämpöenergiaa, joka vapautuu vesihöyryn tiivistyessä. Savukaasujen lämmöntalteenotolla voidaan saavuttaa 100 % hyötysuhde, jos savukaasujen lämpötilaa lämmöntalteenoton jälkeen verrataan polttimen käyttämän ilman alkulämpötilaan. Mikäli lämmöntalteenotolla saataisiin jäähdytettyä savukaasujen lämpötila alle palamisilman alkulämpötilan, voitaisiin saavuttaa yli 100 % hyötysuhde.

2.5 Savukaasun ominaisuudet

Savukaasun koostumusta voidaan mitata savukaasuanalyssaattorilla, jolla saadaan selville savukaasuissa oleva hapen ja hiilidioksidin pitoisuus, sekä savukaasun lämpötila. Savukaasuanalyssaattori laskee myös palamisen ilmakertoimen, kun sillä mitataan savukaasussa oleva hapen määrä. Palamiseen käytetty ilma koostuu pääosin tpeystä 79 % ja hapesta 21 % (ks. luku 2). Kun typen määrä (79 %) jaetaan hapen määrällä (21 %), saadaan kerroinluvuksi 3,76. Savukaasun sisältäessä reagoimatonta happea saadaan savukaasuissa olevan typen osuus laskettua kaavalla 1.

$$nN = nO_2 \cdot 3,76 \cdot \lambda \quad (1)$$

jossa	nN	savukaasussa oleva typen määrä	[%]
	nO ₂	savukaasussa oleva hapen määrä	[%]
	λ	palamisen ilmakerroin	[-]

Palamisessa muodostuu myös vesihöyryä, joka syntyy polttoaineessa olevan vedyn ja palamisilman hapen reagoidessa. Savukaasussa olevan vesihöyryn määrä saadaan laskettua kaavalla 2. Laskussa ei huomioida polttoaineen kosteutta, sillä suurin osa vesihöyryn kosteudesta syntyy nestekaasun palaessa.

$$nH_2O = 100 \% - (nN - nCO_2 - nO_2) \quad (2)$$

jossa	nH ₂ O	savukaasussa oleva vesihöyryn määrä	[%]
	nN	savukaasussa oleva typen määrä	[%]
	nCO ₂	savukaasussa oleva hiilidioksidin määrä	[%]
	nO ₂	savukaasussa oleva hapen määrä	[%]

Savukaasujen mukana kulkeutuvaa lämpöenergiaa varten täytyy tietää savukaasujen lämpötila. Savukaasuista on myös tiedettävä palamisilman alkuläm-

pötila ja lämmöntalteenoton jälkeinen lämpötila, kun selvitetään lämmöntalteenoton hyötysuhdetta. Laskiessa savukaasujen mukana kulkeutuvaa lämpöenergiaa on virtaavasta savukaasusta tiedettävä ominaislämpökapasiteetti ja massavirta. Massavirran selvittämiseksi on tiedettävä savukaasun tiheys ja tilavuusvirtaus.

Savukaasun tiheys saadaan selvitettyä savukaasuanalyysointorilla saatujen osakaasujen pitoisuuksien avulla. Savukaasujen eri osakaasujen tiheyksiä absoluuttisessa lämpötilassa 0 °C, sekä normaalissa ilmakehän paineessa 101,325 kPa on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Eri kaasujen tiheyksiä (Huhtinen ym. 2000, 99)

KAASUJEN TIHEYKSIÄ NORMAALITILASSA	
Ainesosa	Tiheys (kg/m ³)
Typpi	1,2505
Vesihöyry	0,802
Happi	1,429
Hiilidioksidi	1,977

Kun halutaan selvittää savukaasussa olevan osakaasun tiheys eri lämpötilassa, saadaan se laskettua halutussa lämpötilassa kaavalla 3.

$$f_{\text{KAASU}} = f_{\text{KAASU, ABS}} \cdot (T_{\text{ABS}} / T_{\text{SK}}) \quad (3)$$

jossa	f_{KAASU}	osakaasun tiheys tietyssä lämpötilassa [kg/m ³]	
	$f_{\text{KAASU, ABS}}$	kaasun tiheys absoluuttisessa lämpötilassa [kg/m ³]	
	T_{ABS}	absoluuttinen lämpötila	[273K]
	T_{SK}	savukaasun lämpötila	[K]

Kun halutaan selvittää esimerkiksi savukaasussa olevan typen tiheys sen pitoisuuden mukaan, saadaan se laskettua halutussa lämpötilassa kaavalla 4.

$$f_{\text{N}} = (n_{\text{N}} \cdot f_{\text{KAASU}}) / 100 \% \quad (4)$$

jossa	f_N	typen tiheys pitoisuuden mukaan	[kg/m ³]
	nN	savukaasussa oleva typen määrä [%]	
	f_{KAASU}	osakaasun tiheys tietyssä lämpötilassa	[kg/m ³]

Kaikkien savukaasuissa olevien osakaasujen yhteenlaskettu tiheys saadaan laskettua kaavalla 5.

$$f_{SK} = \sum (f_{KAASU}) \quad (5)$$

jossa	f_{SK}	savukaasun tiheys	[kg/m ³]
	f_{KAASU}	osakaasun tiheys tietyssä lämpötilassa	[kg/m ³]

Savukaasun ominaislämpökapasiteetti saadaan selvitettyä savukaasuanalysointorilla saatavilla osakaasujen pitoisuuksien avulla. Savukaasujen eri kaasuosien ominaislämpökapasiteettejä 300 °C lämpötilassa on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Eri kaasujen ominaislämpökapasiteettejä 300 °C:ssa (Huhtinen ym. 2000, 98)

KAASUJEN OMINAISLÄMPÖKAPASITEETTEJÄ 300 °C:ssa	
Ainesosa	Cp (kJ/kgK)
Typpi	1,051
Vesihöyry	1,909
Happi	0,95
Hiilidioksidi	0,959

Kun halutaan selvittää esimerkiksi savukaasuissa olevan typen massaosuus sen pitoisuuden mukaan, täytyy tietää savukaasun tiheys sekä typen pitoisuus savukaasussa. Kun tiedetään savukaasujen tiheys, tiedetään savukaasujen massa kuutiometrissä. Savukaasun massakerroin saadaan selvitettyä, kun jaetaan yhdestä kilosta savukaasun tiheys. Massakerroimen avulla saadaan laskettua esimerkiksi kaasukohtainen massaosuus kilogrammassa savukaasuja. Kun tiedetään savukaasujen massakerroin, saadaan laskettua esimerkiksi typen massaosuus kilogrammaa savukaasuja kohden kaavalla 6.

$$m_N = f_{N, SK} \cdot m_K \quad (6)$$

jossa	m_N	typen massaosuus	[kg/kg]
	$f_{N, SK}$	typen massaosuus kuutiossa savukaasuja	[kg]
	m_K	massakerroin	[kg]

Nestekaasun palamisessa syntyvien savukaasujen ominaislämpökapasiteetti saadaan laskettua kaavalla 7, kun lasketaan osakaasujen ominaislämpökapasiteetit yhteen.

$$C_{P, SK} = \sum (C_{PK}) \quad (7)$$

jossa	$C_{P, SK}$	savukaasun ominaislämpökapasiteetti	[kJ/(kg·K)]
	C_{PK}	osakaasun ominaislämpökapasiteetti	[kJ/(kg·K)]

Savukaasujen virtausnopeus (m/s), sekä piipun poikkipinta-ala on tiedettävä tilavuusvirran selvittämiseksi pyöreän muotoisessa savupiipussa. Pyöreän savupiipun sisähalkaisija saadaan laskettua, kun vähennetään piipun ulkohalkaisijasta seinämävahvuudet. Pyöreän savupiipun poikkipinta-ala saadaan laskettua kaavalla 8.

$$A = \pi \cdot ((d - (s \cdot 2)) / 2)^2 \quad (8)$$

jossa	A	pyöreän savupiipun poikkipinta-ala	[m ²]
	π	piin likiarvo	[3,14]
	d	pyöreän savupiipun ulkohalkaisija	[m]
	s	savupiipun seinämävahvuus	[m]

Savukaasun massavirran selvittämiseksi on tiedettävä savukaasujen tilavuusvirtaus sekä ilman tiheys. Savukaasun tilavuusvirtaus savupiipussa saadaan laskettua kaavalla 9.

$$Q_{V, SK} = v \cdot A \quad (9)$$

jossa	$Q_{V, SK}$	savukaasun tilavuusvirtaus	$[m^3/s]$
	v	savukaasun virtausnopeus	$[m/s]$
	A	pyöreän savupiipun poikkipinta-ala	$[m^2]$

Kun savukaasun tilavuusvirtaus kerrotaan savukaasun tiheydellä, saadaan selvitettyä savukaasun massavirta. Savukaasun massavirta saadaan lasket-
tua kaavalla 10.

$$Q_{M, SK} = Q_{V, SK} \cdot f_{SK} \quad (10)$$

jossa	$Q_{M, SK}$	savukaasun massavirta	$[kg/s]$
	$Q_{V, SK}$	savukaasun tilavuusvirtaus	$[m^3/s]$
	f_{SK}	savukaasun tiheys	$[kg/m^3]$

2.6 Savukaasun lämmöntalteenotolla saatava hukkalämmön määrä

Nestekaasun polton aikana savukaasujen lämmöntalteenotolla saatavan te-
hon määrä saadaan laskettua kaavalla 11. Laskussa käytetään savukaasun
lämpötilaa ennen lämmöntalteenottoa sekä lämmöntalteenoton jälkeen.

$$Q_{LTO} = (Q_{M, SK} \cdot C_{P, SK} \cdot \Delta T_{, LTO}) \quad (11)$$

jossa	Q_{LTO}	savukaasun lämmöntalteenotolla saatava tehon määrä $[kJ/s]$ tai $[kW]$	
	$Q_{M, SK}$	savukaasun massavirta	$[kg/s]$
	$C_{P, SK}$	savukaasun ominaislämpökapasiteetti $[kJ/(kg \cdot K)]$	
	$\Delta T_{, LTO}$	virtaavan savukaasun ja lämmöntalteen- oton jälkeinen lämpötilaero $[K]$	

2.7 Vesihöyryjen kondensoitumisen energiasisältö

Savukaasuja lauhduttaessa lämmöntalteenoton hyötysuhteeseen vaikuttaa
kerätyn hukkaenergian lisäksi myös savukaasuissa olevan vesihöyryn kon-

densoitumisen energiaosuus. Savukaasuissa olevat vesihöyryt kondensoituvat, kun ne lauhtuvat alle kastepistelämpötilan. Palamisprosessissa syntyvien savukaasujen kastepistelämpötila voidaan laskea, kun tiedetään savukaasussa oleva vesihöyryn osuus. Savukaasujen kastepistelämpötilalla tarkoitetaan siis savukaasujen lämpötilaa, jonka alittaessa savukaasuissa oleva vesihöyry kondensoituu vedeksi. Savukaasujen kastepistelämpötila saadaan laskettua kaavalla 12.

$$T_{SK,KP} = \frac{\ln\left(\frac{F_{H2O}}{610,78}\right) \cdot 234,175 \text{ °C}}{\ln\left(\frac{F_{H2O}}{610,78}\right) - 17,08085 \text{ °C}} \quad (12)$$

jossa $T_{SK, KP}$ savukaasun kastepistelämpötila [°C]
 F_{H2O} savukaasussa oleva vesihöyryn pitoisuus [%]

Palamisprosessissa savukaasuja lauhduttaessa voidaan vesihöyryn kondensoitumisen energiaosuus selvittää, kun tiedetään vesihöyryn tiheys kuutiometrissä savukaasuja. Savukaasujen kondensoitumisen energiaosuus saadaan laskettua kaavalla 13, kun savukaasuja kulkeutuu yhden kuutiometrin verran.

$$Q_{H2O, K} = R_{H2O} \cdot f_{H2O} \quad (13)$$

jossa $Q_{H2O, K}$ vesihöyryn kondensoitumisen energia kuutiometrissä savukaasuja [kJ/m³]
 R_{H2O} veden ominaishöyrystymislämpö [2260 kJ/kg]
 f_{H2O} vesihöyryn massa kuutiometrissä savukaasuja [kg/m³]

Savukaasujen tilavuusvirtaus tunnin mittaisen käyntijakson aikana voidaan selvittää, kun tiedetään savukaasujen tilavuusvirtaus (m³/s) ja nestekaasupolttimen käyntiaika tunnissa. Tunnin aikana virtaavien savukaasujen määrä saadaan laskettua kaavalla 14.

$$Q_{VT} = T_{POLTIN} \cdot Q_{V, SK} \quad (14)$$

jossa	Q_{VT}	savukaasujen tilavuusvirtaus tunnissa [m ³ /h]	
	T_{POLTIN}	nestekaasupolttimen käyntiaika tunnissa [s/h]	
	$Q_{V, SK}$	savukaasun tilavuusvirtaus	[m ³ /s]

Vesihöyryjen kondensoitumisesta kiertoveteen siirtyvä tehon määrä tunnin mittaisen käyntijakson aikana voidaan selvittää, kun tiedetään savukaasujen tilavuusvirtaus tunnin aikana, sekä kondensoitumisen energiaosuus kuutiometriä savukaasua kohti. Vesihöyryjen kondensoitumesta kiertoveteen siirtyvä tehon määrä saadaan laskettua kaavalla 15.

$$Q_{H2O, T} = (Q_{H2O, K} \cdot Q_{VT}) / 3600 \text{ s} \quad (15)$$

jossa	$Q_{H2O, T}$	vesihöyryyn kondensoitumisesta johtuva teho [kJ/s] tai [kW]	
	$Q_{H2O, K}$	vesihöyryyn kondensoitumisen energia kuutiometrissä savukaasuja [kJ/m ³]	
	Q_{VT}	savukaasujen tilavuusvirtaus tunnissa [m ³ /h]	

2.8 Savukaasun mukana kulkeutuva hukkalämmön määrä

Nestekaasun polton aikana savukaasujen mukana kulkeutuvan hukkalämpöenergian määrä saadaan laskettua kaavalla 16. Laskussa käytetään savukaasun lämpötilaa ennen lämmöntalteenottoa sekä palamisilman alkulämpötilaa. Palamisilman alkulämpötila vastaa vuoden keskilämpötilaa tutkimuskohteen alueella, jos palamiseen tarvittava happi otetaan ulkoilmasta. Laskussa kannattaa käyttää edellisen vuoden keskilämpötilaa, koska ilmaston lämpenemistä tapahtuu vuosittain. Ilmaston lämpenemisen myötä vuoden keskilämpötila kasvaa vuosittain, jolloin lämpötilan kehitystä ei kannata huomioida useammalta aikaisemmalta vuodelta.

$$Q_{SK} = (Q_{M, SK} \cdot C_{P, SK} \cdot \Delta T, SK) + Q_{H2O, T} \quad (16)$$

jossa	Q_{SK}	savukaasun mukana kulkeutuva tehon määrä [kJ/s] tai [kW]
	$Q_{M, SK}$	savukaasun massavirta [kg/s]
	$C_{P, SK}$	savukaasun ominaislämpökapasiteetti [kJ/(kg·K)]
	$\Delta T, SK$	virtaavan savukaasun ja palamisen alku- lämpötilan välinen lämpötilaero [K]
	$Q_{H_2O, T}$	vesihöyryn kondensoitumisesta johtuva teho [kJ/s] tai [kW]

Hyötysuhteella tarkoitetaan savukaasun lämmöntalteenotolla savukaasuista talteen ottamaa lämpöenergiaa verrattuna savukaasujen mukana kulkeutuvaan hukkaenergian määrään. Kun tiedetään savukaasun lämmöntalteenotolla hyödyksi saatu lämpöenergia sekä savukaasujen lauhtuessa vesihöyryn kondensoitumisen energiaosuus eli latentti lämpöenergia, saadaan savukaasun lämmöntalteenoton hyötysuhde laskettua kaavalla 17.

$$\eta = (Q_{LTO} + Q_{H_2O, T}) / Q_{SK} \quad (17)$$

jossa	η	savukaasun lämmöntalteenoton hyötysuhde [%]
	Q_{LTO}	savukaasun lämmöntalteenotolla saatava tehon määrä [kJ/s] tai [kW]
	$Q_{H_2O, T}$	vesihöyryn kondensoitumisesta johtuva teho [kJ/s] tai [kW]
	Q_{SK}	savukaasun mukana kulkeutuva tehon määrä [kJ/s] tai [kW]

Kun halutaan selvittää savukaasun lämmöntalteenotolla vuosittain saavutettavia ostoenergian säästöjä lämmityksessä, on tiedettävä kiertoveden lämpötilan muutos lämmöntalteenotossa. Lisäksi on tiedettävä veden massavirta ja ominaislämpökapasiteetti. Savukaasun lämmöntalteenottolaitteella kiertoveen siirtyvä lämpöenergian määrä saadaan laskettua kaavalla 18.

$$Q_{VESI} = Q_{M, VESI} \cdot C_{P, VESI} \cdot \Delta T, VESI \quad (18)$$

jossa	Q_{VESI}	lämmöntalteenotolta kiertoveteen siirtyvä teho [kJ/s] tai [kW]	
	$Q_{\text{M, VESI}}$	virtaavan veden massavirta	[kg/s]
	$C_{\text{P, VESI}}$	virtaavan veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/(kg·K)]	
	$\Delta T_{\text{, VESI}}$	virtaavan veden lämpötilan muutos	[K]

Kun halutaan tietää vuositasolla koko savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmällä tuotettua lämpöenergian määrää, on tiedettävä kaikkien leipäuunien yhteenlasketut käyttötunnit vuoden aikana. Leipäuuneilla vuosittain tuotettu lämpöenergian määrä kiertoveteen saadaan laskettua kaavalla 19.

$$Q_{\text{VUOSI}} = Q_{\text{VESI}} \cdot T_{\text{D}} \cdot T_{\text{A}} \cdot \phi_{\text{KPL}} \quad (19)$$

jossa	Q_{VUOSI}	lämmöntalteenotoilla tuotettava vuosittainen lämpöenergia [kWh/a]	
	Q_{VESI}	lämmöntalteenotolta kiertoveteen siirtyvä teho [kJ/s] tai [kW]	
	T_{D}	leipäuunin päivittäinen käyttöaika	[h]
	T_{A}	leipäuunin käyttöpäivät vuodessa	[a]
	ϕ_{KPL}	leipäuunien määrä	[-]

Rakennuksen lämmitysenergian vuosittaiset kustannukset koostuvat os-toenergian hinnasta. Vuosittain saavutettava nestekaasun käyttömäärän säästö saadaan laskettua kaavalla 20.

$$X_{\text{SÄÄSTÖ, NK}} = (Q_{\text{VUOSI}} / Q_{\text{NK}}) / \eta_{\text{KATTILA}} \quad (20)$$

jossa	$X_{\text{SÄÄSTÖ, NK}}$	lämmöntalteenotoilla saavutettava vuotuinen polttoainesäästö [kg/a]	
	Q_{VUOSI}	lämmöntalteenotoilla tuotettava vuosittainen lämpöenergia [kWh/a]	
	Q_{NK}	kilosta nestekaasua saatava lämpöenergia [kWh/kg]	
	η_{KATTILA}	kattilan hyötysuhde	[%]

Tutkittavan laitteiston kannattavuutta voidaan esittää vuotuisena säästönä polttoaineen kulutuksessa. Savukaasujen lämmöntalteenottojen vuotuinen rahallinen säästö saadaan laskettua kaavalla 21.

$$X_{\text{SÄÄSTÖ}} = X_{\text{SÄÄSTÖ, NK}} \cdot X_{\text{HINTA, NK}} \quad (21)$$

jossa	$X_{\text{SÄÄSTÖ}}$	lämmöntalteenotoilla saavutettava vuotuisen rahallinen säästö [e]
	$X_{\text{SÄÄSTÖ, NK}}$	lämmöntalteenotoilla saavutettava vuotuisen polttoainesäästö [kg]
	$X_{\text{HINTA, NK}}$	nestekaasun kilohinta [e/kg]

Kun tiedetään rakennuksen vuosittainen nestekaasun käyttömäärä, saadaan laskettua sen avulla rakennukseen ostoenergian määrä kaavalla 22.

$$Q_{\text{LÄMPÖ}} = (Q_{\text{NK}} \cdot M_{\text{NK}} \cdot \eta_{\text{KATTILA}}) / 1000W \quad (22)$$

jossa	$Q_{\text{LÄMPÖ}}$	rakennuksen vuosittainen ostoenergian määrä [MWh]
	Q_{NK}	kilosta nestekaasua saatava lämpöenergia [KWh/kg]
	M_{NK}	nestekaasun vuosittainen käyttömäärä [kg]
	η_{KATTILA}	kattilan hyötysuhde [%]

3 TUTKIMUSKOHDDE

Kotileipomo Siiskonen sijaitsee valtatie 5:n varrella, lähellä Mikkelin ja Juvan rajaa. Yritys on hyvin tunnettu herkullisista tuotteistaan läpi Savonmaan, jo vuodesta 1964. (Kotileipomo Siiskonen 2020.) Leipomo- ja kahvilarakennuksen kokonaislattiapinta-ala on noin 3005 m² sekä tilavuus noin 14 000 m³. Kotileipomo Siiskosella on käytössä 5 kappaletta Alfa Lavalin valmistamia neste-kiertoisia savukaasun lämmöntalteenottoja, yksi jokaisen käytettävissä olevan leipäuunin savupiipussa. Rakennuksen lämmitysenergia tuotetaan nestekaasupolttimella varustetulla vesikeskuslämmityksellä, josta lämmönjako tapahtuu

lämmitetyn tuloilman sekä patteriverkoston välityksellä. Leivän paistouunien lämmitysenergia tuotetaan uunikohtaisilla nestekaasupolttimoilla, joilla saadaan tuotettua jokaiseen leipäuuniin haluttu paistolämpötila. Rakennuksen vuosittainen nestekaasun käyttömäärä on noin 101 500 kg.

Savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmän tarkkaa ostohintaa ei ole tiedossa, koska se on aikanaan rakennusvaiheessa sisäistetty urakkaan. Jos savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmä asennetaan jälkikäteen, on koko investoinnin arvioitu ostohinta noin 45 000 euroa. Investointi pitää sisällään 5 kappaletta savukaasun lämmöntalteenottoja, Fidelix-rakennusautomaatiojärjestelmän, järjestelmän sähköistykset, puskurivaraajan, putkisto- ja asennustarvikkeet sekä asennustyöt.

3.1 Savukaasun lämmöntalteenotto Kotileipomo Siiskosella

Kotileipomo Siiskosella olevien Alfa Laval -lämmöntalteenottolaitteiden läpi johdetaan vettä, jota kierrätetään 6 m³ puskurivaraajassa. Liitteessä 1 on esitetty savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmän kytkentäkaavio. Jokainen leipäuuni on vuorokaudessa päällä klo 23.00–07.00, joten vuorokautista lämmöntalteenoton mahdollisuutta syntyy 8 tuntia jokaista leipäuunia kohden. Uuneja pidetään päällä kuutena päivänä viikossa, joten vuositasolla ajateltuna hukkalämpöä kerätään 313 päivänä. Lämmöntalteenottolaitteilla lämmitettyä vettä kierrätetään ilmanvaihtokoneiden vesikiertoisilla lämmityspattereilla, ulkoalueiden sulanapitojärjestelmässä, sekä sitä hyödynnetään myös lämpimän käyttöveden esilämmityksessä. Suljetussa lämmönkeruupiirissä käytetään Grundfos ALPHA2 25-60 180 -kiertovesipumppuja, joilla vesi johdetaan lämmöntalteenoton läpi. Sekoitusventtiileinä käytetään Belimon NRC24-SR-SI -venttiilimoottoreita, joilla pystytään ohjaamaan paluuv veden lämpötilaa puskurivaraajalle.

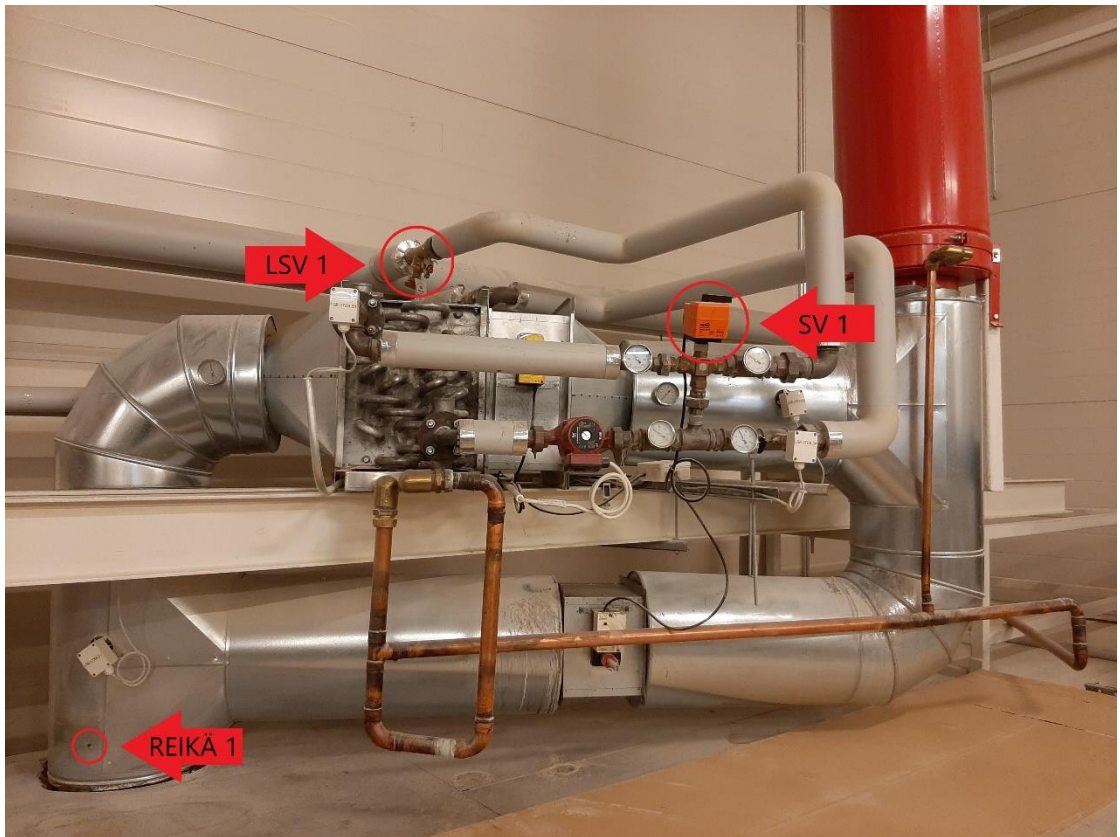
3.2 Leipäuunien lämmityksessä syntyvät savukaasut

Savukaasujen kulkureittiä ohjataan kahdella sulkupellillä automaation avulla. Automaatio ohjaa sulkupeltien avulla savukaasujen kulkureittiä lämmöntalteenotolle, sekä ohituspellin avulla suoraan ulkoilmaan. Savukaasuja ohjataan lämmöntalteenotolle niin pitkään, kunnes lämmöntalteenottopiirin kiertoveden lämpötila ylittää 70 °C. Lämmöntalteenoton ohituspelti on säädetty siten, että

kun kiertoveden lämpötila ylittää 70 °C, kytkee automaattikka ohituspellin käyttöön. Ohituspellin tarkoituksena on johdattaa savukaasut suoraan ulkoilmaan, niin etteivät ne kulkeudu savukaasun lämmöntalteenotolle. Tällöin kiertoveden lämpötila ei nouse 70 °C korkeammaksi, sillä käyttövesiverkoston tiivisteet eivät kestä 80 °C veden lämpötilaa. Ohituspellin käyttö on kesäaikoina tarpeellisempaa, jolloin rakennuksen lämpöhäviöt ovat alhaisempia, sekä lämpöenergiaa kuluu pääasiassa vain käyttöveden esilämmitykseen.

Jokaista leipäuunia palvelee oma Oilon GP-26.10 -nestekaasupoltin, jolla lämpöenergia saadaan tuotettua. Nestekaasupoltinta voidaan käyttää eri tehoalueilla 30 ja 270 kW välillä. Savukaasuja johdetaan savupiippua myöten ulkoilmaan. Savupiipun sisävaipan materiaalina on käytetty haponkestävää ja ruostumatonta HST-teräsputkea. Savupiipun sisävaippa on seinämävahvuudeltaan 1,25 mm paksuista, sekä sen ulkohalkaisija on 250 mm. Savupiipun ulko-vaipan materiaalina on käytetty sinkittyä peltipinnoitetta. Savupiipun ulko-vaippa on seinämävahvuudeltaan 0,75 mm paksuista, ja sen ulkohalkaisija on 420 mm. Savupiipun ulko- ja sisävaipan välinen tyhjä tila on eristetty palamattomalla villalla. Savupiipun tulee täyttää ympäristöministeriön asetuksen 745/2017 sekä standardin SFS 4395 asettamat määräykset.

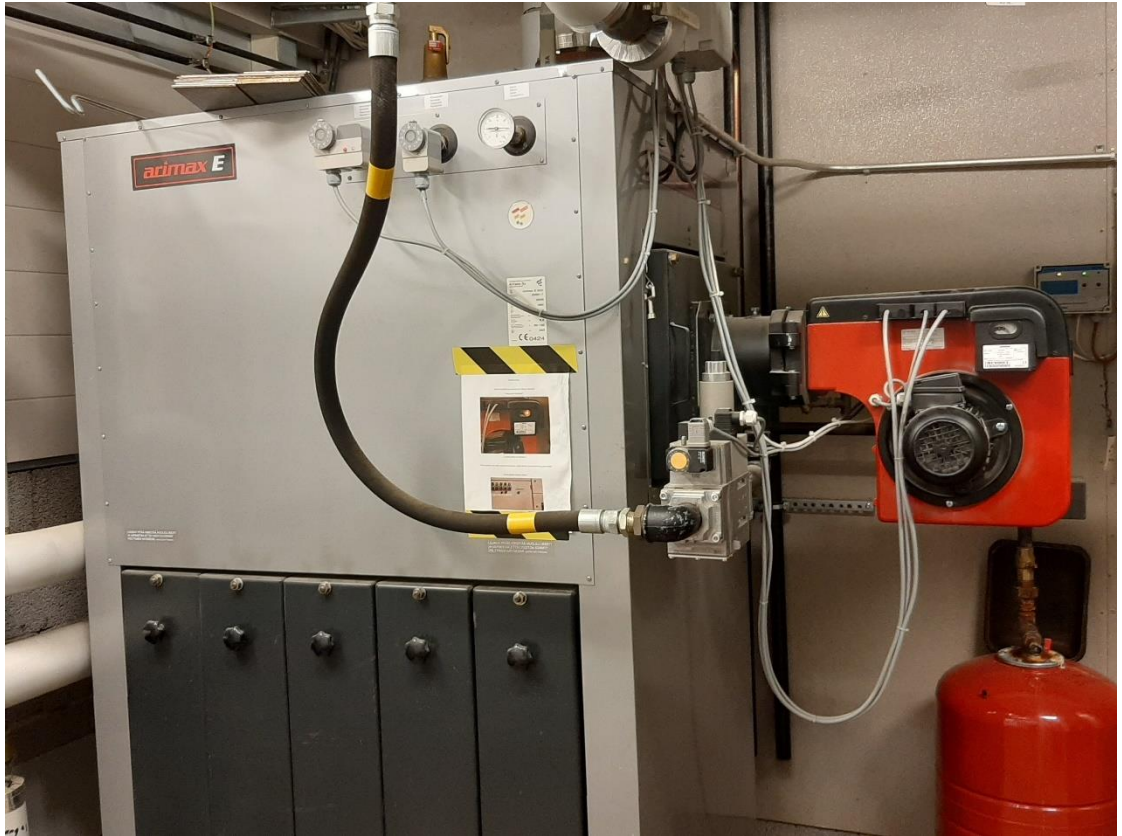
Normaaliolosuhteissa Kotileipomo Siiskosella leipäuunien savukaasut ovat noin 300 °C. Savukaasut poistuvat lämmöntalteenoton jälkeen ulkoilmaan noin 50 °C lämpöisenä. Näin ollen savukaasujen lauhtumisen osuus lämmöntalteenotossa on noin 250 °C. Savukaasuja lauhduttaessa vesihöyrystä kondensoitunutta vettä syntyy lämmöntalteenoton ulkopinnalle, joka kulkeutuu pois lämmöntalteenoton alapuolella olevalla pintavuotokaukalolla. Vettä syntyy lauhtumisen vuoksi myös savupiipussa, minkä takia savupiipun alaosaan poistetaan kondensoitunutta vettä. Alla olevassa kuvassa 4 on esitetty käytössä oleva savukaasujen lämmöntalteenottolaite kytkettynä.



Kuva 4. Savukaasujen lämmöntalteenottolaite Kotileipomo Siiskosella

3.3 Lämmönlähde

Lämmönlähteenä Kotileipomo Siiskosella toimii nestekaasupolttimella varustettu vesikeskuskattila, jonka lämmitysverkostoon on liitetty savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmä. Vesikeskuskattilana toimii Aritermin Arimax E 500 -vesikeskuskattila. Ariterm ilmoittaa kattilan hyötysuhteeksi noin 90 %. Aritermin vesikeskuskattilan lämmönvaihdin toimii vastavirtaperiaatteella, joka lisää taloudellisuutta ja tehokkuutta. (Ariterm 2020.) Alla olevassa kuvassa 5 on esitetty käytössä oleva vesikeskuskattila Kotileipomo Siiskosella.



Kuva 5. Vesikeskuskattila Kotileipomo Siiskosella

4 MITTAUKSET

Opinnäytetyöhön liittyvien mittausten avulla on tarkoitus saada selville, kuinka paljon savukaasujen lämmöntalteenottolaitteilla saadaan hukkaenergiaa talteen. Laitteiston kannattavuuden selvittämiseksi on tiedettävä jokaisessa lämmöntalteenotossa tapahtuva kiertoveden lämpötilanmuutos.

Savukaasujen lämmöntalteenottojen lävitse virtaavan kiertoveden tarkkoja lämpötilan muutoksia seurataan ilmanvaihtokonehuoneessa olevasta Fidelix-rakennusautomaatiojärjestelmästä. Jokaisen lämmöntalteenoton yhteyteen on kytketty langallisin anturein varustetut lämpötila-anturit kiertoveden meno- ja paluuputkeen. Langallisin anturein varustetut lämpötila-anturit mahdollistavat niiden mittatietojen etälukemisen. Fidelix-rakennusautomaatiojärjestelmästä voidaan lukea siis meno- ja paluueden lämpötilanmuutosta jokaisessa lämmöntalteenotossa. Kannattavuuden selvittämiseksi on kiertovedestä mitattava veden virtausnopeus, jotta saadaan selvitettyä lämmöntalteenoton lävitse virtaavan veden massavirta. Jotta voidaan selvittää savukaasujen lämmöntalteenoton hyötysuhde, on leipäuunien lämmityksen jälkeisistä savukaasuista

mitattava savukaasun lämpötila ja koostumus sekä virtausnopeus. Opinnäytetyön mittauksissa hyödynnetään XAMK:in talotekniikan laboratorion mittalaitteita.

4.1.1 Savukaasuanalysointilaitteisto

Savukaasujen mittauksessa käytetään Testo 340 -savukaasuanalysointilaitetta, joka soveltuu teollisuuden päästömittauksiin. Laitteesta saa valittua ennen mitausten aloittamista järjestelmässä käytössä olevan polttoaineen. Savukaasuanalysointilaitteen 8 mm paksu anturi kestää 1000 °C lämpötilaa. Savukaasuanalysointilaitteen avulla saadaan mitattua savukaasusta hiilidioksidin ja hapen pitoisuus. Mittarilla saadaan myös mitattua savukaasun virtausnopeus (m/s). Savukaasuanalysointilaitteisto laskee happipitoisuuden mukaan palamisen yli-ilma-kerroksen, joka perustuu siihen, kuinka paljon ylimääräistä reagoimatonta happea on palamisen jälkeen savupiipussa jäljellä. (Testo 2020, 27, 55–58.)

4.1.2 Vesivirtamittari

Kiertoveden vesivirran mittauksessa käytetään TA-Scope-1-vesivirtamittaria. Laite soveltuu lämmitys- ja jäähdytysverkostojen virtausten ja paine-erojen mittauksiin. Vesivirtamittari soveltuu mittaamaan virtaavaa nestettä, jonka lämpötila on välillä -20 °C - +120 °C. Laitteella voidaan mitata esimerkiksi linjasäätöventtiilistä nesteen virtaus ja paine-ero. Ennen mittauksen aloittamista TA-Scope-1-vesivirtamittariin asetetaan käytettävissä oleva linjasäätöventtiili ja siihen säädetty esisäätöarvo, sekä virtaava neste. TA-Scope-1-vesivirtamittarilla voidaan mitata nesteestä 500 kPa asti paine-eroa, jonka avulla laite laskee nesteen virtauksen. (IMI Hydronic 2020.)

4.2 Mittaukset Kotileipomo Siiskosella

Opinnäytetyöhön liittyvät mittaukset kohteessa suoritettiin tammikuun 2020 aikana. Mittaukset suoritettiin kolmena yönä. Mittaukset jouduttiin toteuttamaan öisin, sillä Kotileipomo Siiskosella leivän tuotantoprosessi on käynnissä vain klo 23.00-07.00 välisenä aikana. Mittaukset kohteessa suoritettiin siis silloin, kun leipäuunit olivat päällä ja savukaasujen lämmöntalteenotolla kerättiin hukkaenergiaa talteen leipäuunien lämmityksen jälkeisistä savukaasuista.

4.2.1 Ensimmäinen mittauskerta

Ensimmäinen mittauskerta Kotileipomo Siiskosella suoritettiin 17.1–18.1.2020 välisenä yönä. XAMK:in talotekniikan laboratoriolta otettiin lainaan Testo 340 -savukaasuanalysointilaite sekä TA-Scope-1-vesivirtauksen mittalaite. Lämmöntalteenoton läpi virtaavan veden virtaus saatiin selvitettyä kuvassa 4 merkitystä linjasäätöventtiilistä (LSV 1) vesivirtamittarilla. Linjasäätöventtiili oli malliltaan STAD DN32, johon oli asetettu esisäätöarvoksi 2,7. Mittauksen aikana tarkistettiin, että kuvassa 4 oleva sekoitusventtiili (SV 1) oli täysin auki, jolloin kiertoveden virtaus oli esteetöntä. Ongelmia syntyi savukaasun mittaus tulosten saamisessa, koska savukaasuanalysointilaite oli uusittava ennen tulosten saamista. Näin ollen savukaasumittauksia ei tällä kohdekäynnillä pystytty suorittamaan.

4.2.2 Toinen mittauskerta

Toinen mittauskerta suoritettiin Kotileipomo Siiskosella 24.1.–25.1.2020 välisenä yönä. Mittausdatan keräämistä varten laadittiin mittauspöytäkirjat, johon kerättiin savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmän vesivirtojen lämpötilanmuutosten tuloksia. Mittauspöytäkirjoihin kirjattiin tunnin mittaiselta jaksolta 5 minuutin välein jokaisen lämmöntalteenoton meno- ja paluueden lämpötiloja. Mittauspöytäkirjojen tarkat lämpötila-asteet on saatu ilmanvaihtokonehuoneessa sijaitsevasta Fidelix-rakennusautomaatiojärjestelmästä. Savukaasun lämmöntalteenoton tuottamat lämpötilaerot on laskettu vähentämällä paluueden lämpötilasta menoveden lämpötila. Mittauspöytäkirjojen tulokset ovat esitetty liitteissä 2–6.

4.2.3 Kolmas mittauskerta

Kolmas mittauskerta Kotileipomo Siiskosella suoritettiin 31.1.–1.2.2020 välisenä yönä. Mittaustuloksia kerättiin Testo 340 -savukaasuanalysointilaite yhdestä leipäuunin savupiipusta. Mittaustuloksia saatiin mitattua kuvassa 4 merkitystä reiästä 1, josta mahtui savukaasuanalysointilaite 8 mm paksu anturi savupiipun sisälle. Savukaasuanalysointilaite avulla kerättiin mittaustuloksia savukaasun lämpötilasta sekä savukaasun happi- ja hiilidioksidipitoisuudesta. Savukaasuanalysointilaite saatiin selville myös palamissa käytettävän hapen yli-ilmakerroin sekä savukaasun virtausnopeus savupiipusta.

5 TULOKSET

Opinnäytetyön tulosten tarkoituksena on selvittää savukaasujen lämmöntalteenoton kannattavuus. Kannattavuuteen vaikuttaa, kuinka paljon hukkaenergiaa saadaan hyödynnettyä leipäuunien lämmityksen jälkeisistä savukaasuista. Tulosten avulla lasketaan, kuinka paljon lämmöntalteenottojärjestelmä vaikuttaa rakennuksen lämmityksessä ostoenergia ja polttoaine säästöihin. Tulosten avulla saadaan myös ratkaistua savukaasun lämmöntalteenoton hyötysuhde sekä savukaasuja lauhduttaessa tapahtuvan latentin lämpöenergian vaikutus hyödyksi saatavaan hukkaenergiaan. Tutkimuksen tulosten avulla pohditaan laitteiston markkinoinnin kannattavuutta.

5.1 Leipäuunien savukaasut

Savukaasun koostumusta mitattiin Testo 340 -savukaasuanalysaattorilla. Mittaustulosten perusteella voidaan laskea leipäuunilta savukaasujen mukana ulos virtaava lämpöenergian määrä sekä savukaasun lämmöntalteenotolla hyödyksi saatavan lämpöenergian määrä. Mittauksen aikana savukaasujen lämpötilat olivat 300 °C ennen lämmöntalteenottoa ja 50 °C lämmöntalteenoton jälkeen. Savukaasujen lauhtumista tapahtui siis hukkalämpöä talteen ottaessa 250 °C. Nestekaasupoltin ottaa nestekaasun palamiseen tarvittavan hapen ulkoilmasta, joka vastaa palamisilman alkulämpötilaa. Savukaasuanalysaattorilla saatiin mitattua savukaasuista hapen ja hiilidioksidin pitoisuus. Savukaasuanalysaattorilla saadut tulokset on esitetty alla olevassa taulukossa 3. Laskuissa ei huomioida typpimonoksidia, -dioksidia, typen oksideja tai häkää, koska niiden pienellä massaosuudella ei ole laskennallista vaikutusta. Savukaasuanalysaattori ilmoitti jäännöshapen yli-ilmakertoimeksi arvon 1,61. Savukaasussa oleva typen osuus saadaan laskettua kaavalla 1.

Taulukko 3. Savukaasuanalysaattorilla saadut mittaustulokset

Kaasujen pitoisuudet	
Ainesosa	Pitoisuus (%)
Happi (reagoimaton)	8,5
Hiilidioksidi	8,2
Typpimonoksidi	57,5 ppm
Typpidioksidi	0,5 ppm
Typen oksidit	57 ppm
Häkä	40 ppm

5.1.1 Savukaasussa oleva typen osuus

Savukaasussa oleva typen osuus saadaan laskettua kaavalla 1, kun tiedetään palamisessa käytettävä hapen määrä sekä yli-ilmakerroin.

$$nN = 8,5 \% \cdot 3,76 \cdot 1,61 \quad (1)$$

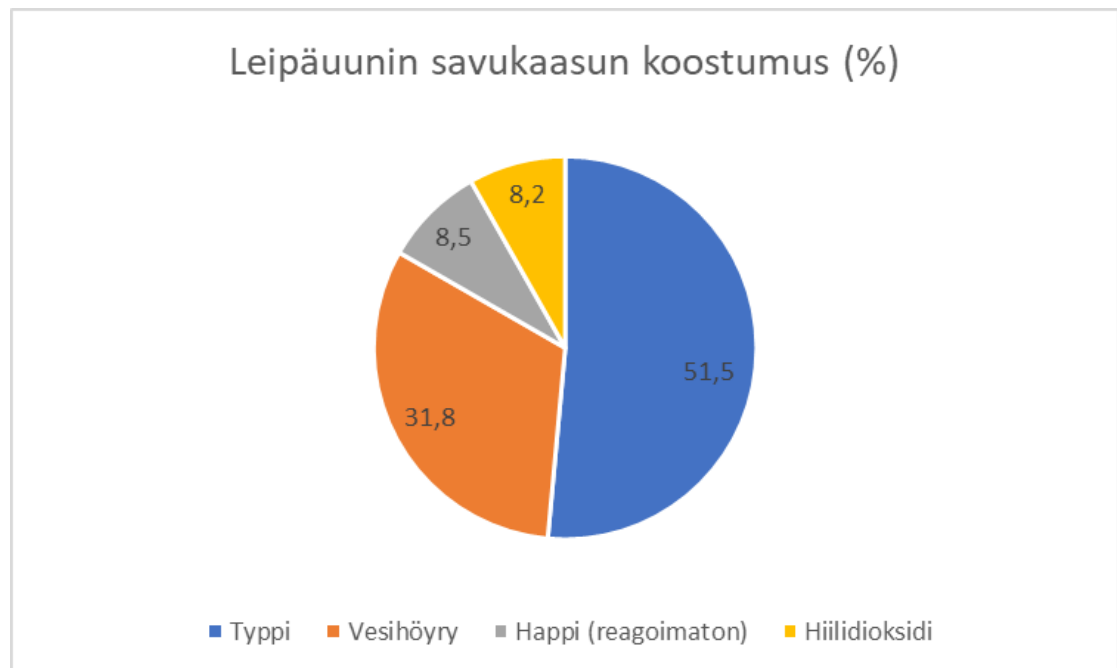
$$nN = 51,5 \%$$

5.1.2 Savukaasussa oleva vesihöyryn osuus

Kun tiedetään savukaasussa oleva typen osuus sekä savukaasuanalysointilla mitatut hapen ja hiilidioksidin pitoisuudet, voidaan laskea vesihöyryn pitoisuus savukaasussa. Leipäuunien lämmityksen jälkeisissä savukaasuissa olevan vesihöyryn pitoisuus saadaan laskettua kaavalla 2. Savukaasun osakaasujen koostumus on esitetty kuvassa 6.

$$nH_2O = 100 \% - (51,5 \% - 8,2 \% - 8,5 \%) \quad (2)$$

$$nH_2O = 31,8 \%$$



Kuva 6. Savukaasun osakaasujen koostumus

5.1.3 Savukaasun tiheys

Savukaasussa olevien osakaasujen tiheyksien tulokset on esitetty alla olevassa taulukossa 4. Tiheyksien tulokset 0 °C lämpötilassa on saatu taulukosta 1. Osakaasun tiheys savukaasussa on laskettu kertomalla sen pitoisuus kaasun tiheydellä 300 °C lämpötilassa.

Taulukko 4. Leipäuunien lämmitysten jälkeisten savukaasujen tiheydet

SAVUKAASUN TIHEYS				
Ainesosa	Pitoisuus (%)	Tiheys 0 °C (kg/m ³)	Tiheys 300 °C (kg/m ³)	Osakaasun tiheys (kg/m ³)
Typpi	51,5	1,2505	0,596	0,307
Vesihöyry	31,8	0,802	0,382	0,122
Happi (reagoimaton)	8,5	1,429	0,681	0,058
Hiilidioksidi	8,2	1,977	0,942	0,077
			Yhteensä	0,563

Esimerkiksi typen tiheys 300 °C lämpötilassa saadaan laskettua kaavalla 3.

$$f_{\text{KAASU}} = 1,2505 \text{ kg/m}^3 \cdot (273\text{K} / 573\text{K}) \quad (3)$$

$$f_{\text{KAASU}} = 0,596 \text{ kg/m}^3$$

Kotileipomo Siiskosella mitattujen savukaasujen pitoisuuksien avulla saadaan laskettua esimerkiksi typen tiheys kaavalla 4, kun savukaasujen lämpötila on 300 °C.

$$f_{\text{N}} = (51,5 \% \cdot 0,596 \text{ kg/m}^3) / 100 \% \quad (4)$$

$$f_{\text{N}} = 0,307 \text{ kg/m}^3$$

Savukaasujen kokonaistiheys saadaan laskettua kaavalla 5, kun lisätään kaikkien osakaasujen tiheyksien tulokset yhteen.

$$f_{\text{SK}} = (0,307 + 0,122 + 0,058 + 0,077) \text{ kg/m}^3 \quad (5)$$

$$f_{\text{SK}} = 0,563 \text{ kg/m}^3$$

5.1.4 Savukaasun ominaislämpökapasiteetti

Kun tiedetään, että kuutiometrissä on 0,563 kg savukaasuja saadaan laskettua massakerroin, jonka avulla saadaan laskettua jokaisen osakaasun massaosuus kilossa savukaasuja. Savukaasun massakerroin m_K tutkimuskohteessa

on siis $1 \text{ kg} / 0,563 \text{ kg} = 1,776 \text{ kg}$. Savukaasujen tiheyksien tulokset kuutiometriä kohden on esitetty taulukossa 5. Eri osakaasujen tiheydet $300 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa on saatu taulukosta 4, ja niiden avulla on laskettu kaasukohtaiset massaosuudet kertomalla ne massakertoimella.

Taulukko 5. Osakaasujen massaosuuksia

KAASUJEN MASSAOSUUKSIA		
Aineosa	Osakaasun tiheys (kg/m ³)	Massa (kg/kg)
Typpi	0,307	0,544
Vesihöyry	0,122	0,216
Happi (reagoimaton)	0,058	0,103
Hiilidioksidi	0,077	0,137
Yhteensä	0,563	1 kg

Esimerkiksi typen massaosuus kilossa savukaasuja saadaan laskettua kaavalla 6.

$$M_N = 0,307 \text{ kg} \cdot 1,776 \text{ kg} \quad (6)$$

$$M_N = 0,544 \text{ kg/kg}$$

Savukaasujen ollessa tasan $300 \text{ }^\circ\text{C}$ voidaan taulukon 2 tuloksia hyödyntää ilman, että niitä tarvitsee interpoloida. Kotileipomo Siiskosella mitattujen pitoisuuksien avulla on laskettu kaasukohtaiset ominaislämpökapasiteetit $300 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa kertomalla ne massaosuuksilla, jotka on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Leipäuninen savukaasujen ominaislämpökapasiteetti

SAVUKAASUN OMINAISLÄMPÖKAPASITEETTI				
Ainesosa	Pitoisuus (%)	Massaosuus (kg/kg)	Cp $300 \text{ }^\circ\text{C}$ (kJ/kgK)	Cp (kJ/kgK)
Typpi	51,5	0,544	1,051	0,572
Vesihöyry	31,8	0,216	1,909	0,413
Happi (reagoimaton)	8,5	0,103	0,95	0,098
Hiilidioksidi	8,2	0,137	0,959	0,132
			Yhteensä	1,214

Näin ollen kaikkien savukaasujen yhteenlaskettu ominaislämpökapasiteetti saadaan laskettua kaavalla 7, kun tiedetään kaasukohtaiset ominaislämpökapasiteetit.

$$C_{P, SK} = (0,572 + 0,413 + 0,098 + 0,132) \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \quad (7)$$

$$C_{P, SK} = 1,214 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

5.1.5 Savukaasun tilavuusvirta

Kotileipomo Siiskosella olevien leipäuunien savupiipun sisävaipassa käytetään ulkohalkaisijaltaan 250 mm HST -teräsputkea, jonka seinämävahvuus on 1,25 mm. Savupiipun poikkipinta-ala saadaan laskettua kaavalla 8.

$$A = \pi \cdot ((0,25 \text{ m} - (0,00125 \text{ m} \cdot 2)) / 2)^2 \quad (8)$$

$$A = 0,048 \text{ m}^2$$

Savukaasun virtausnopeus saatiin mitattua savukaasuanalysaattorilla ja tulokseksi saatiin 1,8 m/s. Tilavuusvirtaus savupiipussa saadaan laskettua savupiipun sisävaipan poikkipinta-alan avulla kaavalla 9.

$$Q_{V, SK} = 1,8 \text{ m/s} \cdot 0,048 \text{ m}^2 \quad (9)$$

$$Q_{V, SK} = 0,086 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.1.6 Savukaasun massavirta

Leipäuunin lämmityksen jälkeisten savukaasujen massavirta saadaan laskettua kaavalla 10.

$$Q_{M, SK} = 0,086 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 0,563 \text{ kg/m}^3 \quad (10)$$

$$Q_{M, SK} = 0,048 \text{ kg/s}$$

5.2 Savukaasun lämmöntalteenotolla hyödyksi saatu hukkaenergia

Nestekaasun polton aikana savukaasujen lämmöntalteenotolla hyödyksi saatava hukkalämpöenergian määrä saadaan laskettua kaavalla 11. Savukaasun lämpötilaksi mitattiin ennen lämmöntalteenottoa 300 °C ja lämmöntalteenoton jälkeen 50 °C.

$$Q_{LTO} = 0,048 \text{ kg/s} \cdot 1,214 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot (300-50) \text{ K} \quad (11)$$

$$Q_{LTO} = 14,6 \text{ kW}$$

5.3 Vesihöyryn kondensoitumisen energiaosuus

Savukaasujen vesihöyrypitoisuuden ollessa 31,8 % (ks. taulukko 4) saadaan leipäuunin lämmityksessä syntyvien savukaasujen kastepistelämpötila laskettua kaavalla 12.

$$T_{SK,KP} = \frac{\ln\left(\frac{31,8\%}{\frac{100\%}{610,78}}\right) \cdot 234,175 \text{ °C}}{\ln\left(\frac{31,8\%}{\frac{100\%}{610,78}}\right) - 17,08085 \text{ °C}} \quad (12)$$

$$T_{SK,KP} = 71,85 \text{ °C} \sim 72 \text{ °C}$$

Kun tiedetään, että savukaasut lauhtuvat lämmöntalteenoton jälkeen 50 °C lämpöiseksi, voidaan todeta, että savukaasuissa oleva vesihöyry tiivistyy vedeksi, kun savukaasujen lämpötila alittaa 72 °C lämpötilan. Savukaasujen lämpötilan ollessa 300 °C on savukaasuissa olevan vesihöyryn tiheys 0,122 kg/m³ (ks. taulukko 5). Vesihöyryn paino kuutiossa savukaasuja on siis 0,122 kg. Täten saadaan laskettua savukaasuissa olevan vesihöyryn kondensoitumisen energiaosuus eli latentti lämpöenergia kaavalla 13, kun savukaasuja kulkeutuu yhden kuutiometrin verran. Laskussa huomioidaan koko vesihöyryn osuus kondensoitumiseen.

$$Q_{H_2O, K} = 2260 \text{ kJ/kg} \cdot 0,122 \text{ kg/m}^3 \quad (13)$$

$$Q_{H_2O, K} = 275,7 \text{ kJ}$$

Jokaisen leipäuunin nestekaasupoltin käy keskimäärin tunnin aikana 2 kertaa 9 minuutin käyntijakson, joten nestekaasupoltin käy tunnissa noin 18 minuuttia, joka vastaa 1080 sekuntia. Kun tiedetään nestekaasupolttimen käyntiaika tunnin aikana, saadaan laskettua tunnin aikana virtaavien savukaasujen määrä kaavalla 14.

$$Q_{VT} = 1080 \text{ s/h} \cdot 0,086 \text{ m}^3/\text{s} \quad (14)$$

$$Q_{VT} = 92,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

Kun tiedetään tunnin aikana virtaavien savukaasujen määrä, saadaan laskettua vesihöyryn kondensoitumisesta syntyvä lämpöenergian määrä savukaasuja lauhduttaessa kaavalla 15.

$$Q_{H_2O, T} = (275,7 \text{ kJ/m}^3 \cdot 92,9 \text{ m}^3/\text{h}) / 3600 \text{ s} \quad (15)$$

$$Q_{H_2O, T} = 7,1 \text{ kJ/s} \sim 7,1 \text{ kW}$$

5.4 Savukaasujen mukana kulkeutuva hukkalämmön määrä

Nestekaasun polton aikana savukaasujen mukana kulkeutuva hukkalämpöenergian määrä saadaan laskettua kaavalla 16. Hyötysuhteen laskemista varten on lämpötilaero laskettu savukaasun alkulämpötilasta, joka vastaa vuositasolla ajateltuna keskimääräistä ulkolämpötilaa. Vuodenajan ilmaston keskilämpötila Kotileipomo Siiskosen alueella on 5 °C, jonka tulos on esitetty liitteessä 7 (Ilmatieteen laitos 2020b).

$$Q_{SK} = 0,048 \text{ kg/s} \cdot 1,214 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \cdot (300-5) \text{ K} + 7,1 \text{ kW} \quad (16)$$

$$Q_{SK} = 24,3 \text{ kW}$$

5.5 Savukaasun lämmöntalteenoton hyötysuhde

Savukaasun lämmöntalteenoton hyötysuhde verrattuna palamisilman alkulämpötilaan saadaan laskettua kaavalla 17. Hyötysuhde saadaan laskettua, kun tiedetään savukaasun lämmöntalteenotolla hyödyksi saatu lämpöenergia 14,6 kW (ks. luku 5.2), johon lisätään myös savukaasujen lauhtuessa syntyvä latentti lämpöenergia 7,1 kW (ks. luku 5.3). Näin ollen hukkalämpöenergiaa saadaan hyödyksi siis 21,7 kW. Savukaasujen mukana kulkeutuu hukkalämpöenergiaa 24,3 kW (ks. luku 5.4), johon savukaasun lämmöntalteenotoilla hyödyksi saamaa lämpöenergian määrää verrataan.

$$\eta = (7,1 + 14,6) \text{ kW} / 24,3 \text{ kW} \quad (17)$$

$$\eta = 89,3 \%$$

5.6 Lämmöntalteenotolta kiertoveteen siirtyvä hukkalämpöenergia

Kun lasketaan savukaasujen lämmöntalteenottolaitteiston kannattavuutta, on tiedettävä tunnin aikana kiertoveteen siirtyvän lämpöenergian määrä. Leipäuunin lämmityksen jälkeisten savukaasujen tuottama keskimääräinen lämpötilan muutos kiertoveteen on esitetty taulukossa 7. Liitteiden 2–6 mittauspöytäkirjojen tulosten avulla saadaan laskettua järjestelmässä tunnin aikana tapahtuvan meno- ja paluueden lämpötilaeron keskiarvoksi 4,5 °C. Veden virtausnopeudeksi mitattiin kuvassa 4 esitetystä (LSV 1) linjasäätöventtiilistä TA-Scope-1-vesivirtamittarilla 0,53 l/s. Jos oletetaan, että veden tiheys on 1 kg/l, kiertoveden massavirta on tällöin myös 0,53 kg/s.

Taulukko 7. Jokaisen savukaasun lämmöntalteenoton tuottama lämpötilanmuutos

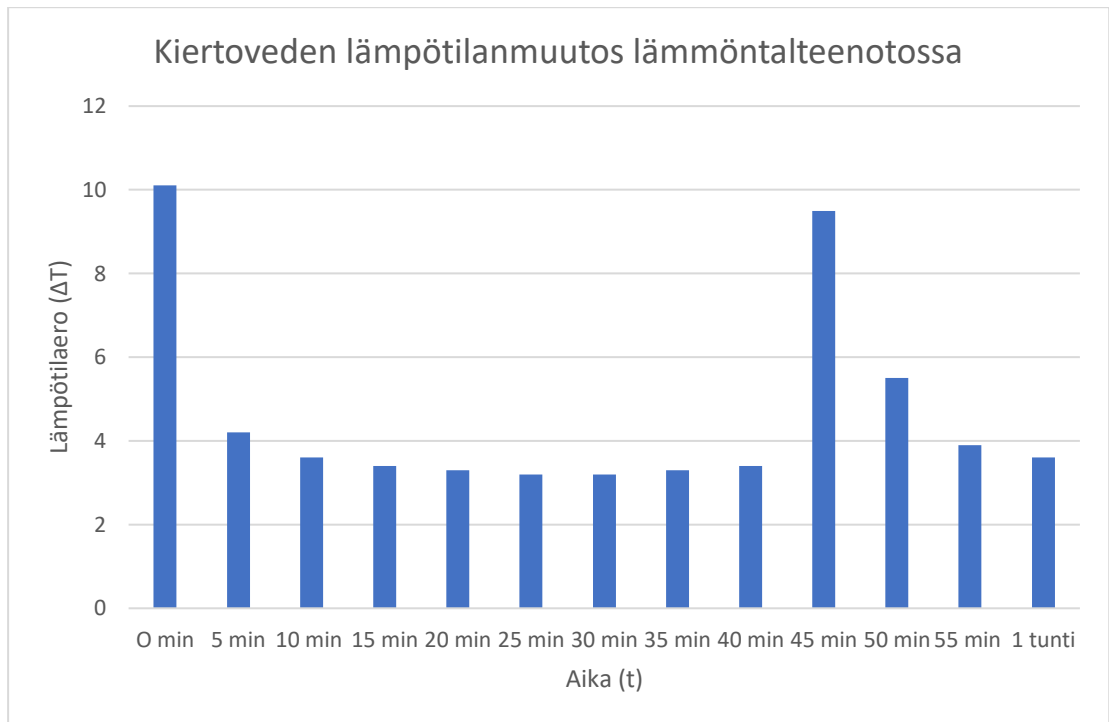
MITTAUSPÖYTÄKIRJA	
LTO	ΔT (°C)
Leipäuuni 1	4,5
Leipäuuni 2	4,6
Leipäuuni 3	4,9
Leipäuuni 4	4,3
Leipäuuni 5	4,2
Keskiarvo	4,5

Yhdellä Alfa Laval -lämmöntalteenottolaitteella kiertoveteen siirtyvän lämpöenergian määrä saadaan laskettua taulukon 7 tulosten keskiarvon mukaan kaavalla 18.

$$Q_{\text{VESI}} = 0,53 \text{ kg/s} \cdot 4,2 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)} \cdot 4,5 \text{ K} \quad (18)$$

$$Q_{\text{VESI}} = 10,02 \text{ kW} \sim 10 \text{ kW}$$

Liitteen 6 mittauspöytäkirjassa olevan savukaasun lämmöntalteenoton jälkeisen lämpötilan hetkittäiset muutokset johtuvat nestekaasupolttimen leipäuunille syöttämästä vaihtelevasta lämpötehosta. Nestekaasupoltin käy aina pienillä kierroksilla ja syöttää maksimilämpöä tarpeen mukaan pitääkseen leipäuunin paistolämpötilan tasaisena. Kuvasta 7 nähdään, että polttimen käytössä täysillä on meno- ja paluueden lämpötilaero savukaasun lämmöntalteenoton välillä noin 9,7 °C.



Kuva 7. Nestekaasupolttimen käyntitehon vaikutus meno- ja paluuveden lämpötileroon

6 HUKKAENERGIAN VAIKUTUS RAKENNUKSEN OSTOENERGIASSA

Tutkimuskohteen tuloksia tarkastellessa voidaan laskea savukaasun lämmöntalteenoton vaikutusta rakennuksen lämmityksen ostoenergia- ja polttoainesäästöissä.

6.1 Vuosittainen energiasäästö

Savukaasujen lämmöntalteenotoilla vuosittain hyödyksi saatava hukkalämpöenergian määrä saadaan laskettua kaavalla 19.

$$Q_{\text{VUOSI}} = 10 \text{ kW} \cdot 8 \text{ h} \cdot 313 \text{ a} \cdot 5 \quad (19)$$

$$Q_{\text{VUOSI}} = 125\,200 \text{ kWh/a} \sim 125 \text{ MWh/a}$$

6.2 Vuosittainen polttoainesäästö

Vuosittain saavutettava nestekaasun käyttömäärän säästö saadaan laskettua kaavalla 20. Kattilan hyötysuhteenä laskussa käytetään laitevalmistajan ilmoittamaa arvoa 90 %. (ks. luku 3.3)

$$X_{\text{SÄÄSTÖ, NK}} = (125\,200 \text{ kWh/a} / 12,8 \text{ kWh/kg}) / 0,9 \quad (20)$$

$$X_{\text{SÄÄSTÖ, NK}} = 10868 \text{ kg/a} \sim 10870 \text{ kg/a}$$

7 KANNATTAVUUS JA MARKKINOINTI

Savukaasujen lämmöntalteenotoilla saavutettava rahallinen säästö Kotileipomo Siiskosella saadaan laskettua kaavalla 21, kun nestekaasukilon hankintahinta on 0,925 euroa. (ks. luku 2.1)

$$X_{\text{SÄÄSTÖ}} = 10870 \text{ kg} \cdot 0,925 \text{ e/kg} \quad (21)$$

$$X_{\text{SÄÄSTÖ}} = 10\,054,75 \text{ e}$$

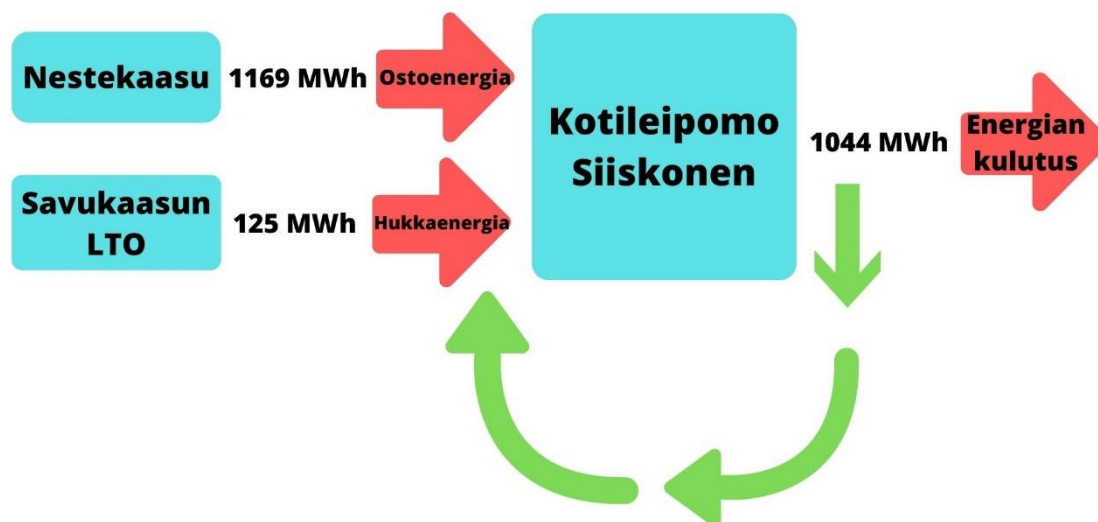
Rakennuksen vuosittaisen ostoenergian määrä saadaan laskettua kaavalla 22. Tutkimuskohteessa käytetään polttoaineena nestekaasua, jonka lämpöarvo on 12,8 kWh/kg (ks. luku 2.1) sekä vuosittainen käyttömäärä 101 500 kg (ks. luku 3).

$$Q_{\text{LÄMPÖ}} = (101\,500 \text{ kg} \cdot 12,8 \text{ kWh/kg} \cdot 0,9) / 1000 \text{ W} \quad (22)$$

$$Q_{\text{LÄMPÖ}} = 1169 \text{ MWh}$$

Laitteiston kannattavuutta on esitetty kuvan 8 vuokaaviossa, jossa näkyy rakennuksen vuosittainen lämmitysenergian käyttö. Kuvassa 8 näkyy savukaasujen lämmöntalteenotoilla hyödyksi saatava hukkaenergian määrä. Jos hukkaenergiaa ei hyödynnettäisi, olisi rakennuksen vuosittainen ostoenergia 125 MWh suurempi, mikä vastaa 11 % vuosittain käytetystä lämmityksen kokonaisenergiasta. Tämä lisäisi hieman yli 10 000 euroa rakennuksen lämmityksen vuosittaisia käyttökustannuksia.

VUOKAAVIO LÄMPÖENERGIAN VUOSITTAISESTA KÄYTÖSTÄ



Kuva 8. Vuosittainen lämpöenergian käyttö Kotileipomo Siiskosella

Savukaasujen lämmöntalteenottolaitteiston markkina-arvo määräytyy tuotteen ominaisuuksien, hinnan, kannattavuuden sekä saatavuuden mukaan, mitkä on esitetty kuvassa 9. Markkinoidessa tuotetta on sen vastattava asiakkaan tai kohderyhmän tarvetta. Kilpailukykyä tuotteen markkinoinnissa lisää sen myönteiset ominaisuudet sekä hinta-laatusuhde. Savukaasun lämmöntalteenottojärjestelmää myydessä voidaan eri asiakkaisiin vaikuttaa joko tuotteen laadun tai hinnan perusteella. Järjestelmän myyntihinnalla tuodaan esille tuotteen arvoja ja ominaisuuksia, jotka vaikuttavat myös ostajan näkemykseen. Järjestelmää markkinoidessa on hyvä esittää tuotteella saavutettavat hyödyt. Asiakkaan investoidessa kyseistä tuotetta vaikuttaa tuotteen kannattavuus sekä takaisinmaksuaika hankintaan. Laitteiston hankinnan kannalta merkittävä tekijä on myös järjestelmän saatavuus kohteeseen, mikä vaikuttaa ostajan valintaan. (Vcomply 2020.)



Kuva 9. Markkinointiin vaikuttavat tekijät (Vcomply 2020)

8 TULOSTEN YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tutkittua vastaavanlaista savukaasujen hukkaenergiaa hyödyntävää järjestelmää on tämän tutkimuksen tulosten perusteella kannattavaa markkinoida. Järjestelmällä saavutettavat noin 11 % vuotuiset ostoenergian säästöt (ks. luku 7) Kotileipomo Siiskosella lisäävät markkinoinnin kannattavuutta. Markkinoidessa vastaavanlaista tuotetta voidaan investoinnin hyötyjä tuoda esille tutkimuskohteesta saatujen rahallisesti kannattavien tulosten avulla.

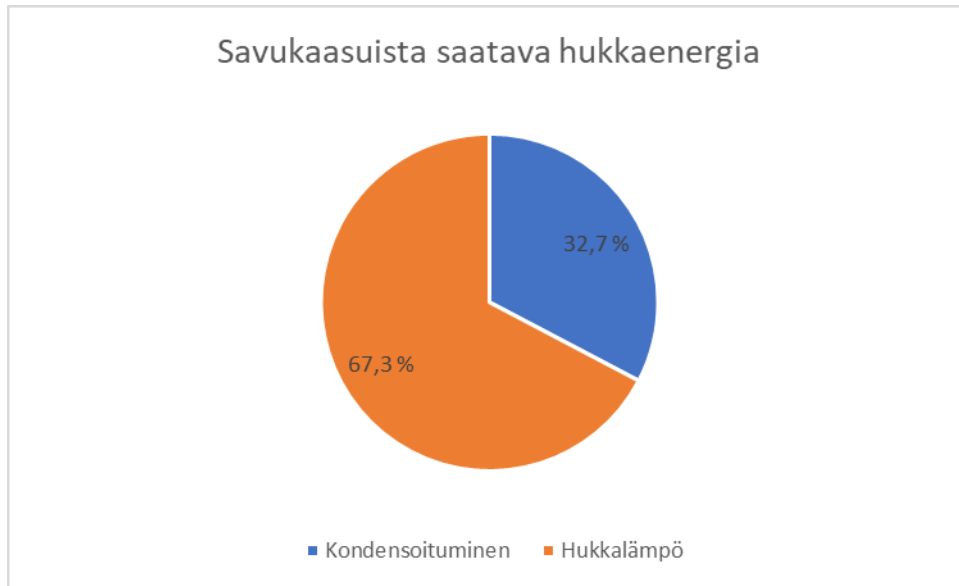
Savukaasujen lämmöntalteenoton takaisinmaksuaika on esitetty kuvassa 10. Investoinnin tuottoa laskiessa on huomioitu nestekaasun ostoenergian vuotuisen hintakehitys, joka on 2,15 % (ks. luku 2.2). Tutkimuskohteessa olevan savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmän 45 000 euron investoinnille (ks. luku 3) kertyy takaisinmaksuaikaa laskennallisesti hieman yli 4 vuotta.



Kuva 10. Tutkimuskohteen savukaasujen lämmöntalteenottoilaitteiston takaisinmaksuaika

Tuloksia tarkastellessa nähdään, että savukaasujen lämmöntalteenotoilla saadaan lämpöenergiaa hyödyksi 21,7 kW (ks. luku 5.5). Kuvan 7 meno- ja paluuvien lämpötilaeron ollessa 9,7 °C saadaan kaavalla 18 tulokseksi 21,6 kW. Mittaukset savukaasuanalysaattorilla tehtiin silloin, kun leipäuunin lämmityksen jälkeiset savukaasut olivat 300 °C, jolloin myös lämmöntalteenotossa tapahtui 9,7 °C lämpötilan muutos meno- ja paluuvien välillä. Näin ollen voidaan todeta, että laskelmissa päästiin erittäin lähelle todenmukaisia tuloksia.

Savukaasujen lämpötilan ollessa 300 °C saadaan lämmöntalteenotoilla hukkaenergiaa talteen siis 21,7 kW, josta vesihöyryn kondensoitumisen energiaosuus on 7,1 kW. Vesihöyryjen kondensoitumisen energiaosuus tutkimuskohteessa on siis merkittävä, sillä talteen otetusta hukkalämmöstä noin 33 % syntyy latentista lämpöenergiasta. Tämä johtuu siitä, että nestekaasun palamisessa syntyy paljon vettä. Vesihöyryn kondensoitumisen energiaosuuden merkitystä savukaasujen lämmöntalteenotossa on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Vesihöyryn kondensoitumisen energiaosuus savukaasujen lämmöntalteenotossa

9 POHDINTA

Tämän insinöörityön tavoitteena oli luoda selvitys toimeksiantajalle savukaasujen lämmöntalteenoton kannattavuudesta Kotileipomo Siiskosella. Mielestäni opinnäytetyön toteutuksessa onnistuttiin, sillä tutkimuksen tuloksista saatiin luotua selvitys toimeksiantajalle sekä tulokset osoittivat savukaasujen lämmöntalteenoton olevan kannattavaa. Mielestäni tutkimuskohteesta saatavat tulokset olivat merkittäviä rahallisesti energia- ja polttoainesäästöissä. Opinnäytetyössä käytetyt kvantitatiiviset eli laskennalliset tutkimusmenetelmät soveltuivat tähän tutkimukseen erittäin hyvin. Tutkimuksen suorituksen aikana käytettyjen lähteiden ja aineistojen avulla saatiin luotua kattava selvitys tutkitavan laitteiston kannattavuudesta ja hyödyistä. Opinnäytetyön tuloksia voidaan pitää luotettavana, sillä tutkimuksessa on käytetty tarkkoja mittaustuloksia tutkimuskohteesta. Opinnäytetyön tuloksien avulla voidaan jatkossa hyödyntää tätä tutkimusta esimerkiksi suunniteltaessa ja toteutettaessa vastaavanlaista järjestelmää.

Opinnäytetyön toteuttamisen aikana oma osaaminen sekä tietotaito kasvoivat paljon tutkitavan laitteiston teknistä tietämystä kohtaan. Mielestäni tutkimuksella on kiinnostavaa tarvetta nykyisin, sillä savukaasujen lämmöntalteenotto on hyvin uutta ja erittäin vähän käytettyä tekniikkaa sekä sillä luodaan tutkitusti merkittäviä rahallisia säästöjä. Jatkotutkimuksia ajatellen uskoisin, että

savukaasujen lämmöntalteenottoa voidaan kehittää kannattavammaksi Kotileipomo Siiskosella. Kehitysehdotuksena esimerkiksi kesäaikoina, kun lauhdelämpöä tarvitaan pääasiassa vain käyttöveden esilämmitykseen, voitaisiin hukkaenergiaa hyödyntää muihin lämpöenergiaa tarvitseviin toimenpiteisiin. Kannattavuutta voitaisiin lisätä esimerkiksi laajentamalla savukaasujen lämmöntalteenottolaitteistoa niin, että kesällä eli lämmityskauden ulkopuolella hyödyksi saatua lauhdelämpöä hyödynnettäisiin nestekaasun höyrystämässä.

LÄHTEET

ACHR News. 2020. Performing a combustion analysis. Yrityksen WWW-sivut. Saatavissa: <https://www.achrnews.com/articles/106070-performing-a-combustion-analysis> [viitattu 4.2.2020].

AGA. 2020. Rakennustyömaiden nestekaasulämmitys. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.aga.fi/fi/images/AGA%20Propane%20LPG%20Heating%20Brochure%20FI_tcm634-121304.pdf [viitattu 2.1.2020].

ARC Energy Reduction Solutions. 2020. Flue gas heat recovery. Yrityksen WWW-sivut. Saatavissa: <http://www.arc-ers.co.uk/boiler-equipment/flue-gas-heat-recovery/> [viitattu 12.1.2020].

Ariterm. 2020. Kiinteistökattilat. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ariterm.fi/wp-content/uploads/2013/11/Ariterm-E-sarja.pdf> [viitattu 28.1.2020].

Energiavirasto. 2020. Maakaasun hintatilastot. Excel-tiedosto. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/maakaasun-hintatilastot> [viitattu 2.1.2020].

Exodraft. 2020. Industrial bakeries. Yrityksen WWW-sivut. Saatavissa: <https://www.exodraft-heatrecovery.com/solutions/industrial-bakeries/> [viitattu 3.1.2020].

Harju, P. 2010. Lämmitystekniikan oppikirja. 4. painos. Anjalankoski: Solverpalvelut Oy.

Huhtinen, M., Jalonen, O., Rauhala, H. & Virta, K. 1999. Öljylämmitystekniikka. Helsinki: Suomen Lämmitystieto Oy.

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. painos. Helsinki: Oy Edita Ab

Hämäläinen, M. 2019. Hukkalämmöllä lämpiää iso tehdas. *Tekniikan Maailma* 21, 6-10.

Ilmatieteen laitos. 2020a. Ilmakehä-ABC. Yrityksen WWW-sivut. Saatavissa: https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?p_p_id=abc_WAR_fmiwwwportlets&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&abc_WAR_fmiwwwportlets_selectedInitial=I [viitattu 3.2.2020].

Ilmatieteen laitos. 2020b. Lämpötila- ja sadekarttoja vuodesta 1961. Yrityksen WWW-sivut. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/karttoja-vuodesta-1961> [viitattu 4.2.2020].

IMI Hydronic. 2020. TA-Scope. Yrityksen WWW-sivut. Saatavissa: <https://www2.imi-hydronic.com/fi/tuotteet-ja-ratkaisut/ta-balancing-and-control/mittausvalineet/mittalaitteet/> [viitattu 5.3.2020].

Kotileipomo Siiskonen. 2020. Yrityksen WWW-sivut. Saatavissa: <http://www.kauraleipa.fi/> [viitattu 8.1.2020].

Suomen Kaasuyhdistys ry. 2020. Maakaasu käsikirja. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/maakaasun-kasikirja/> [viitattu 6.1.2020].

Perttula, J. 2000. Energiatekniikka. 1. painos. Helsinki: WSOY.

Puikkonen, J. 2020a. Kuva. Nestekaasun palamisprosessi & savukaasun lämmöntalteenotto.

Puikkonen, J. 2020b. Kuva. Nestekaasun höyrystin.

Seppänen, O. 2001. Rakennuksen lämmitys. 2. päivitetty painos. Helsinki: Suomen LVI-liitto ry.

Teboil. 2020. Tietoa nestekaasusta. Yrityksen WWW-sivut. Saatavissa: <https://www.teboil.fi/tuotteet/nestekaasu/tietoa-nestekaasusta/> [viitattu 12.1.2020].

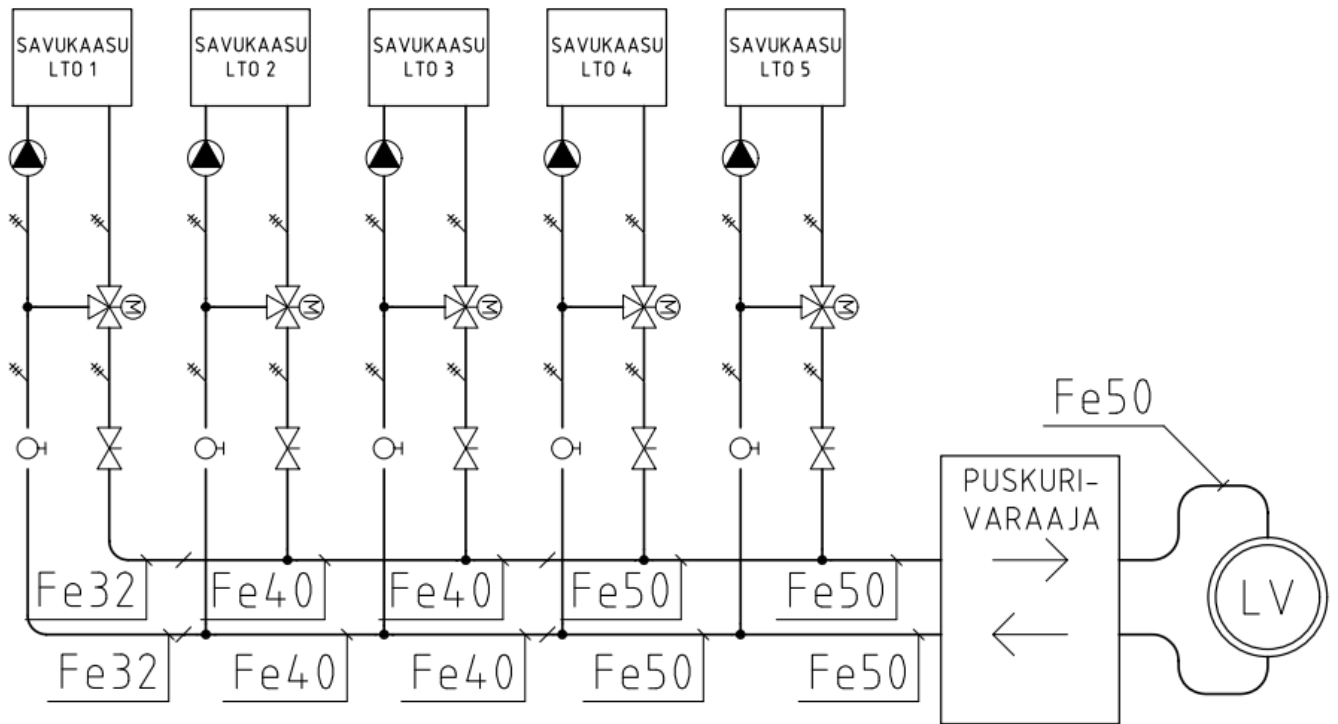
Testo. 2020. Instruction Manual. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://static-int.testo.com/media/17/0f/6aa36530c364/testo-340-Instruction-Manual.pdf> [viitattu 8.3.2020].

Vcomply. 2020. The 4 P's of marketing. Yrityksen WWW-sivut. Saatavissa: <https://blog.v-comply.com/4ps-mkting/> [viitattu 23.1.2020].

Vuorelainen, O. 1978. LVI-tekniikka: polttoaineet ja polttolaitteet. 2. painos. Espoo: Otakustantamo.

Wahlroos, L. 1980. Kotimaiset polttoaineet ja keskuslämmitys kattilat. 2. päivitetty painos. Pori: Energiakirjat Ky.

KAIKKI KYTKENTÄHAARAT DN-32 TERÄSPUTKELLA
SAVUKAASUJEN LÄMMÖNTALTEENOTOILLE



MITTAUSPÖYTÄKIRJA LTO1

Aika t	LTO:n veden lämpötila (celciusta)		Lämpötilaero ΔT
	ennen	jälkeen	
0 min	31	33,7	2,7
5 min	31,3	34,1	2,8
10 min	31,4	34,1	2,7
15 min	31,6	34,3	2,7
20 min	31,9	41,9	10
25 min	32,1	35,5	3,4
30 min	32,3	34,9	2,6
35 min	32,4	35,1	2,7
40 min	32,6	35,2	2,6
45 min	32,9	35,5	2,6
50 min	33,1	35,6	2,5
55 min	33,2	41,4	8,2
1 tunti	33,5	44,1	10,6
		Keskiarvo	4,5

MITTAUSPÖYTÄKIRJA LTO 2

Aika t	LTO:n veden lämpötila (celciusta)		Lämpötilaero ΔT
	ennen	jälkeen	
0 min	31,1	34,2	3,1
5 min	31,4	34,4	3
10 min	31,5	34,4	2,9
15 min	31,8	34,7	2,9
20 min	31,9	36	4,1
25 min	32,2	42,2	10
30 min	32,4	35,3	2,9
35 min	32,5	35,4	2,9
40 min	32,8	35,6	2,8
45 min	33	41,1	8,1
50 min	33,2	43,5	10,3
55 min	33,4	36,4	3
1 tunti	33,6	36,4	2,8
		Keskiarvo	4,6

MITTAUSPÖYTÄKIRJA LTO 3

Aika t	LTO:n veden lämpötila (celciusta)		Lämpötilaero ΔT
	ennen	jälkeen	
0 min	31,1	33,8	2,7
5 min	31,4	38,7	7,3
10 min	31,5	38,4	6,9
15 min	31,8	34,6	2,8
20 min	31,9	34,6	2,7
25 min	32,1	34,8	2,7
30 min	32,4	34,9	2,5
35 min	32,5	39,2	6,7
40 min	32,8	41,8	9
45 min	33	42,7	9,7
50 min	33,2	36,3	3,1
55 min	33,4	36	2,6
1 tunti	33,6	36,3	2,7
		Keskiarvo	4,9

MITTAUSPÖYTÄKIRJA LTO 4

Aika t	LTO:n veden lämpötila (celciusta)		Lämpötilaero ΔT
	ennen	jälkeen	
0 min	30,4	35,5	5,1
5 min	30,6	34,1	3,5
10 min	30,8	34,1	3,3
15 min	31	34,5	3,5
20 min	31,1	34,5	3,4
25 min	31,3	34,5	3,2
30 min	31,5	38	6,5
35 min	31,7	41,7	10
40 min	31,9	36	4,1
45 min	32,1	35,6	3,5
50 min	32,3	35,7	3,4
55 min	32,4	35,7	3,3
1 tunti	32,6	35,9	3,3
		Keskiarvo	4,3

MITTAUSPÖYTÄKIRJA LTO 5

Aika t	LTO:n veden lämpötila (celciusta)		Lämpötilaero ΔT
	ennen	jälkeen	
0 min	30,6	40,7	10,1
5 min	30,8	35	4,2
10 min	31	34,6	3,6
15 min	31,2	34,6	3,4
20 min	31,5	34,8	3,3
25 min	31,7	34,9	3,2
30 min	31,9	35,1	3,2
35 min	32,1	35,4	3,3
40 min	32,4	35,8	3,4
45 min	32,7	42,2	9,5
50 min	32,9	38,4	5,5
55 min	33	36,9	3,9
1 tunti	33,2	36,8	3,6
		Keskiarvo	4,2

Keskilämpötila

Vuosi 2019

