



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

SAVUKAASUPESURIN KANNAT- TAVUUDEN TARKASTELU TOIVA- LAN BIOLÄMPÖKESKUKSELLA

TEKIJÄ: Valtteri Partanen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Valtteri Partanen	
Työn nimi Savukaasupesurin kannattavuuden tarkastelu Toivalan biolämpökeskuksella	
Päiväys	31.3.2018
Sivumäärä/Liitteet	44 + 3
Ohjaaja(t) Markku Huhtinen, Kari Anttonen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savon Voima Oyj	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää kuinka kannattavaa olisi rakentaa savukaasupesuri Toivalan Biolämpökeskukselle. Lisäksi selvitetään lämpöpumpulla varustetun savukaasupesurin kannattavuus normaaliin savukaasupesuriin verrattuna.</p> <p>Tässä työssä esitellään Savon Voima Oyj:tä yrityksenä sekä kerrotaan tarkemmin Toivalan biolämpölaitoksella käytettävistä biopolttoaineista. Näiden polttoaineiden vaikutusta savukaasuihin tutkitaan myös. Esittelen myös referenssilaitoksen, jolle kannattavuuden tarkastelu sijoittuu.</p> <p>Tämän kirjallisen esityksen lisäksi tehtiin Excel-taulukko Savon Voima Oyj:lle, jossa on laskettu savukaasupesurin teho ilman lämpöpumppua ja lämpöpumpun kanssa. Lisäksi Excelissä on laskettu pesurista saatavat polttoainesaastöt (KPA ja öljy) sekä pesurin kannattavuuslaskenta.</p> <p>Vuoden 2017 tiedoilla saatiin Excelin avulla savukaasupesurilla saatavaksi kiinteän polttoaineiden säästöksi noin 5000 MWh/vuosi ja öljyn säästöksi noin 150 MWh/vuosi. Savukaasupesurilla + lämpöpumpulla saadaan kiinteitä polttoaineita säästettyä noin 7000 MWh/vuosi ja öljyä noin 230 MWh/vuosi. Savukaasupesurilla rahallista säästöä saadaan kiinteälle polttoaineelle hieman yli 92000€/vuosi ja öljylle hieman yli 10000 €/vuosi, eli yhteensä noin 103000 €/vuosi. Vastaavasti savukaasupesurilla + lämpöpumpulla saatavat kiinteän polttoaineen säästöt ovat noin 125000 €/vuosi ja öljylle noin 16000 €/vuosi, eli yhteensä noin 141000 €/vuosi. Säästölaskelmasta voidaan huomata, että savukaasupesuri + lämpöpumppu yhdistelmällä saadaan säästettyä enemmän polttoaineita kuin tavallisella savukaasupesurilla. Säästöä saadaan lämpöpumpulla noin 38000 €/vuosi enemmän kuin tavallisella pesurilla.</p> <p>Laskennat eivät ole tarkkoja vaan suuntaa antavia, joista voi päätellä pesurin kannattavuuden. Tällä hetkellä savukaasupesurin hankkiminen ei ole kannattavaa, koska polttoaineista saatavat säästöt ovat liian alhaiset sekä lämmöntuotanto on liian vähäistä tarvittavaan investoinnin suuruuteen nähden. Työssä on lisäksi tarkasteltu savukaasupesurin kannattavuutta skenaariolla, jossa verkon myynti kasvaisi 33 %.</p>	
Avainsanat Savukaasupesuri, lämpöpumppu, polttoaine säästöt, kannattavuus, lämmöntalteenottoteho	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering			
Author(s) Valtteri Partanen			
Title of Thesis Profitability Review for a Flue Gas Scrubber at Toivala Biopower Plant			
Date	31.3.2018	Pages/Appendices	44 + 3
Supervisor(s) Markku Huhtinen, Kari Anttonen			
Client Organisation /Partners Savon Voima Group			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to find out how profitable it would be to build a flue gas scrubber to Toivala Bio-heating plant. In addition, the profitability of a flue gas scrubber with heat pump compared with the normal flue gas scrubber was investigated.</p> <p>In this thesis Savon Voima Group as a company and details of the biofuels used at the bio heating plant in Toivala are presented. The effect of these fuels on flue gases was also investigated. Also, the reference plant where the profitability was reviewed is introduced.</p> <p>In addition to this written presentation, an Excel table was made for Savon Voima Group, In Excel the efficiency of the flue gas scrubber without and with a heat pump was calculated. In addition, the fuel savings (Solid fuels and oil) from the scrubber and the profitability calculation are contained in Excel.</p> <p>With data from 2017, flue gas scrubber saves solid fuels approximately 5000 MWh/year and oil about 150 MWh/year. With a flue gas scrubber with heat pump, solid fuels savings are about 7000 MWh/year and those of oil about 230 MWh/year. With flue gas scrubber the money savings on solid fuels are just over 92000 € / year and for oil just over 10000 € / year, a total of about 103000 €/per year. Similarly, with the flue gas scrubber with heat pump, solid fuel savings are about 125,000 € / year and oil savings are about 16,000 € / year, a total of about 141,000 € / year. From the fuel savings calculation it can be noticed that the flue gas scrubber with heat pump can save more fuel a standard flue gas scrubber. The saving with the heat pump is about 38,000 € / year more than with standard flue gas scrubber.</p> <p>The calculations are not accurate, but indicative, which can prove the profitability of the scrubber. At present, obtaining the flue gas scrubber is not profitable, because fuel savings and heat production are too low for a huge investment. In this study also, the profitability of a flue gas scrubber with a scenario where sales would increase by 33% was studied.</p>			
<p>Keywords</p> <p>Flue gas scrubber, heat pump, fuel savings, profitability, power of heat recovery</p>			

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö tehtiin keväällä 2018 Savon Voima Oyj:lle yhteistyössä Caligo Industria Oy:n kanssa. Työn tarkoituksena oli selvittää, millä reunaehdoilla Toivalan biolämpökeskukselle olisi potentiaalia rakentaa savukaasupesuri, jossa hyödynnetään lämpöpumppu tekniikkaa. Työni ohjaajina toimivat Savonia-ammattikorkeakoulun puolelta Markku Huhtinen sekä Savon Voima Oyj:n Turvallisuus- ja Kehityspäällikkö Kari Anttonen.

Haluan kiittää Savon Voima Oyj:tä opinnäytetyön mahdollistamisesta ja kaikesta tuesta, jota teiltä sain opinnäytetyön aikana. Iso kiitos myös ohjaajalleni Markku Huhtiselle asiantuntevista neuvoista ja tuesta. Lisäksi haluan kiittää Caligo Industria Oy:n Teknologiapäällikköä Mika Nummilaa yhteistyöstä ja avunannoista opinnäytetyötäni kohtaan.

Kuopiossa 31.3.2018

Valtteri Partanen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
1.1	Palamisen teoriaa ja palamisprosessi biolämpölaitoksella	7
1.2	Polttoaineet ja niiden ominaisuudet	9
1.2.1	Puupolttoaine, hake ja puru	10
1.2.2	Turve polttoaineena	11
1.3	Savukaasut ja niiden puhdistus	12
1.4	Savukaasupesuri	13
1.5	Lämpöpumppu kytkettynä savukaasupesuriin	15
2	SAVON VOIMA OYJ	17
3	TOIVALAN BIOLÄMPÖKESKUS	21
3.1	Polttoainejärjestelmä	21
3.2	Poltto- ja tuhkalaitteisto	22
3.3	Palamisilma- ja savukaasujärjestelmä	23
3.4	Lämmöntuotanto- ja vesijärjestelmät	25
3.5	Tehon säätö kattilassa	25
3.6	Tehon jakautuminen Toivalassa	26
3.7	Kaukolämpöverkosto	26
4	CALIGO INDUSTRIA OY	28
5	LASKENNAT	29
5.1	Savukaasu laskennat	29
5.2	Säästö ja investointi laskennat	38
5.2.1	Lisämyynnin mahdollisuus	40
5.2.2	Lämpöpumpun käytön rajoitus	42
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	43
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	44

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehtiin keväällä 2018 Savon Voima Oyj:lle yhteistyössä Caligo Industria Oy:n kanssa. Työn tarkoituksena oli selvittää, millä reunaehdoilla Toivalan biolämpökeskukselle olisi potentiaalia rakentaa savukaasupesuri, jossa mahdollisesti hyödynnetään savukaasupesurin lämpöpumppu tekniikkaa.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan Toivalan biolämpökeskuksen energiantuotantoa sekä sen energiatehokkuuden parantamista. Savukaasuista syntyvää hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää osana kaukolämmöntuotantoa.

Savukaasupesurin lämmöntalteenoton tehokkuus perustuu siihen, että savukaasuista lauhdutetaan sen sisältämää vesihöyryä ja tässä vapautuvaa lämpöä siirretään kaukolämpöverkkoon. Työssä selvitettiin, onko savukaasupesurin hankkiminen lämmön talteenottolaitteistolla taloudellisesti kannattavaa Toivalan biolämpökeskukselle. Savukaasupesurin tehtävänä ei olisi pelkästään savukaasujen puhdistus vaan siitä olisi tarkoitusta saada hukkalämpöä hyödynnettyä osana kaukolämmön tuotantoa. Savukaasujen puhdistus taas referenssilaitoksella toimii sähkösuodattimen avulla. Kun hukkalämpöä saadaan hyödynnettyä, lämpölaitoksen kokonaishyötysuhdetta saadaan parannettua ja tämä tarkoittaa myös sitä, että polttoainetta ei tarvitse polttaa niin paljon ja laitoksen päästöt vähenevät samalla.

Työssä käsitellään tarkemmin referenssilaitosta, joka sijaitsee Siilinjärven Toivalassa. Kerron myös lyhyesti referenssikohteessa poltettavia polttoaineita sekä yleisesti niiden ominaisuuksia. Tutkimuskohteena oli Toivalan Biolämpökeskus, joka on teholtaan 8 MW:n luokkaa. Kattila käyttää polttoaineena purukuoriseosta, puuhaketta sekä turvetta. Laitoksesta ja sen järjestelmistä kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.

1.1 Palamisen teoriaa ja palamisprosessi biolämpölaitoksella

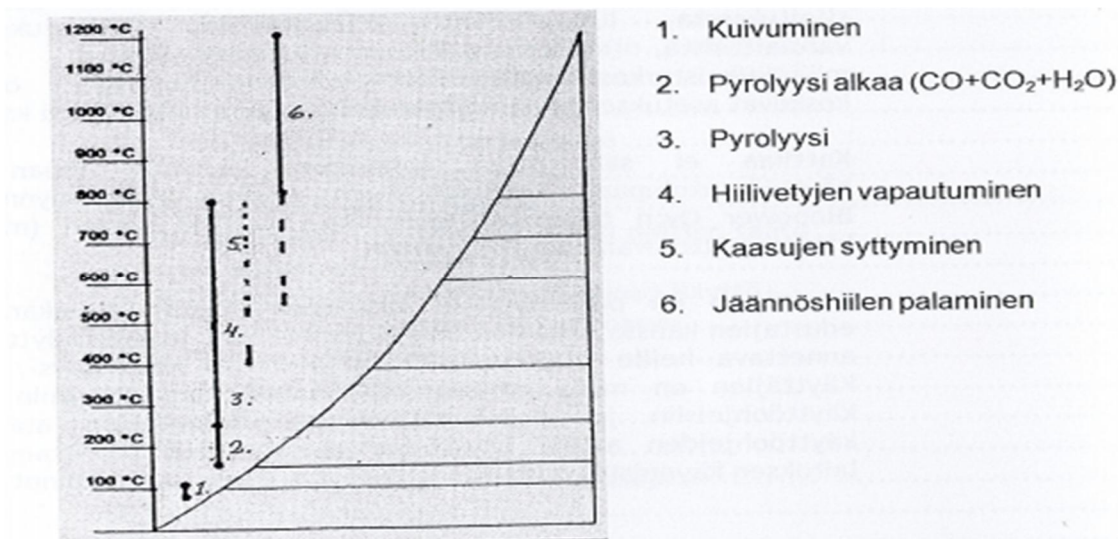
Tässä kappaleessa kerrotaan palamisen teoriaa ja kiinteiden polttoaineiden palamisesta. Keskityn kertomaan kiinteistä polttoaineista, koska Toivalan biolämpökeskuksella käytettävät polttoaineet ovat kiinteässä olomuodossa.

Aineiden kemiallinen yhdistyminen hapen kanssa tarkoittaa palamista. Seuraavat aineet reagoivat hapen kanssa; hiili, vety, rikki ja typpi. Palamisprosessi on pääosin eksotermisen reaktio, eli se luovuttaa ympärillensä lämpöenergiaa. Tästä poiketen hiilen ja typen yhteisreaktio on kuitenkin endotermisen, eli se on lämpöä kuluttava reaktio ja se sitoo lämpöä ympäristöstä. (Antila & Karppinen & Leskelä & Mölsä & Pohjakallio, 2008, s. 112), (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen, 2000, s.79)

Toivalan biolämpökeskuksella polttoaineen palamisprosessi voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen. Kuivumiseen, haihtuvien aineiden pyrolyysiin, eli kuivatislaukseen, ja palamiseen sekä jäännöshiilen palamiseen. Polttoaineessa oleva kosteus haihtuu +100 Celsius asteen lämpötilassa. Mitä hienojakoisempaa polttoaine on toimitettaessa, sitä nopeammin kosteus haihtuu polttoaineesta. Polttoaineen kuivuminen tapahtuu liekistä tulevan säteilyn, primääri-ilman, sekä tulipesämuurauksista johtuvan lämmön avulla. Haihtuvat aineet vapautuvat polttoaineesta +150-200 Celsius asteen välillä. Pyrolyysivaiheessa vapautuu hiilimonoksidia, vetyä sekä erilaisia hiilivetyjä. Tervaa ja erilaisia kaasuuntumisesta muodostuvia yhdisteitä muodostuu +250-500 celsius asteen välillä. Lämpötilan ollessa alle +350 celsius astetta, haihtuvien aineiden vapautuminen vaatii energiaa. Pyrolyysi tuottaa energiaa korkeammassa lämpötilassa. Haihtuvia aineita on puupolttoaineissa keskimäärin noin 70-75%. (Wärtsilä BioEnergy 8 MW, Kattilalaitoksen käyttöohje s. 4)

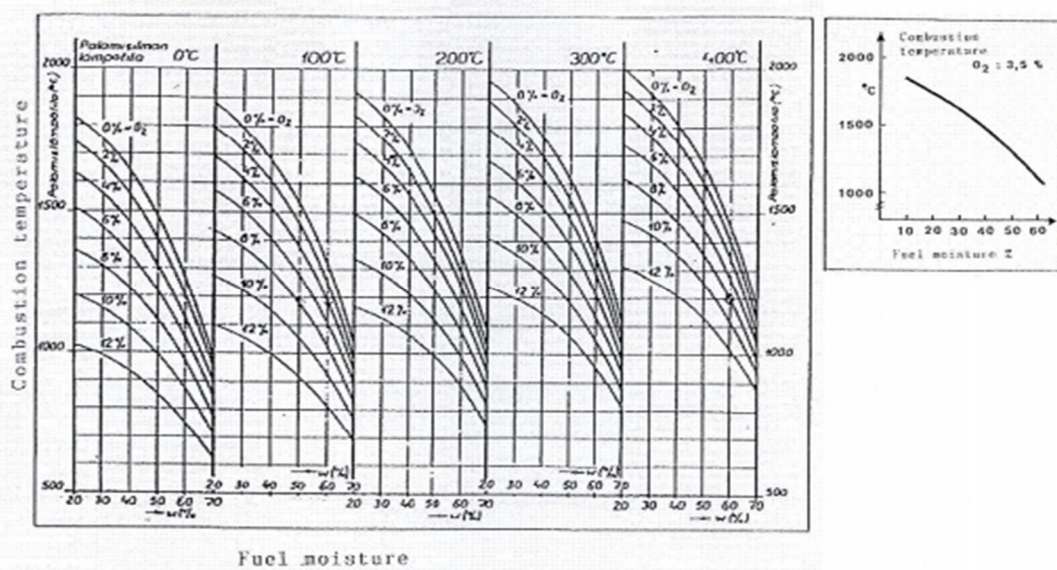
Kun tulipesän lämpötila saavuttaa syttymislämpötilansa, sitä voidaan tämän jälkeen käyttää turvallisesti. Täysin kuivan hakkeen syttymislämpötila on noin +200 celsius astetta, mutta normaalisti hakkeen syttymislämpötila on likimain + 500 Celsius asteen luokkaa. Mikäli polttoaine on erittäin kosteaa, sen syttymislämpötila saattaa olla jopa + 800 celsius astetta. Polttoaineesta haihtuvat aineet palavat kirkkaalla liekillä, sillä kirkkaan liekin väri kertoo hiilivetyjen palamisessa syntyvistä nokihiukkasista. Palamisprosessin viimeisessä vaiheessa jäljelle jäänyt hiili palaa. Tämä jäännöshiili palaa + 500-750 celsius asteen välillä. (Wärtsilä BioEnergy 8 MW, Kattilalaitoksen käyttöohje s. 5)

Palamisprosessin aikana muodostuu savukaasuja. Savukaasut sisältävät vettä ja hiilidioksidia. Palamisessa syntyy myös jonkin verran typen oksideja. Kun polttoaine ja palamisilma sekoittuvat epätäydellisesti, savukaasuissa on hiilimonoksidia 30-100 ppm. Jos polttoaine sisältää rikkiä, palamisen aikana syntyy rikin oksideja. (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen, 2000, s.91-92)



Kuva 1. Palamisen eri vaiheet (Wärtsilä BioEnergy 8 MW, Kattilalaitoksen käyttöohje s. 4)

Jotta palamisprosessi on mahdollisimman hyvä, on palamislämpötilan oltava riittävän korkea, +800-1000 celsius asteen välillä. Mikäli palamislämpötila nousee liian korkealle, se voi vaurioittaa kattilan sisäpuolella olevia muurauksia tai vesijäähdytteisiä laitteita. Palamislämpötilaan vaikuttaa olennaisesti poltettavan polttoaineen laatu-tekijät. Polttoaineen lopulliseen palamislämpötilaan vaikuttaa polttoaineen kosteus, palamisilman lämpötila, ilmaylimäärä sekä tulipesän rakenne ja jäähdytys. Tulipesän lämpötilaan voidaan vaikuttaa muurauksilla sekä esilämmittämällä palamisilmaa. Mikäli polttoaine on hyvin kosteaa, suuri ilmaylimäärä sekä arinan ja tulipesän jäähdytys laskevat olennaisesti palamislämpötilaa. Alla olevassa kuvassa näytetään teoreettinen ja samalla adiabaattisen palamislämpötilan riippuvuus polttoaineen kosteudesta, savukaasun happipitoisuudesta sekä palamisilman lämpötilasta. Todellisuudessa palamislämpötila on muutama sata Celsius astetta alempana, mitä alla oleva kuva kertoo. Käytännössä palamisilman todellinen suuruus muuttuu adiabaattisen palamislämpötilan mukaisesti. (Wärtsilä Bioenergy 8 MW, kattilalaitoksen käyttöohje, s. 5)



Kuva 2. Teoreettinen palamislämpötila kun polttoaineen kosteus, savukaasun happipitoisuus sekä palamisilman lämpötila on tiedossa (Wärtsilä Bioenergy 8 MW, kattilalaitoksen käyttöohje, s. 5)

1.2 Polttoaineet ja niiden ominaisuudet

Tässä kappaleessa kerrotaan lyhyesti kaukolämmöntuotannossa käytettävissä olevista polttoaineista, niiden koostumuksesta sekä käsitellään yleisesti kolmea eri polttoainetta, joita referenssilaitoksella käytetään, purukuori seosta, puuhaketta ja turvetta. Polttoaineen merkitys kaukolämmöntuotantolaitoksilla on yksi tärkeimmistä tekijöistä.

Polttoaineen koostumus vaikuttaa oleellisesti sen käsittelyyn, palamiseen ja palamisesta syntyviin savukaasuihin. Polttoaineen koostumusta tarkastellessa, tulee pohtia lähemmin polttoaineen omaa kosteutta, tuhkan ominaisuuksia ja sen pitoisuuksia, rikkipitoisuutta sekä lämpöarvoa. (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen, 2000, s.37–43)

Polttoaineen kosteus ja polttoaineen polttotapa vaikuttavat paljon palamisilman tarpeeseen sekä savukaasun määrään. Palamisilman tarve kasvaa, mitä kosteampaa polttoaine on. Mitä kuumempaa savukaasun loppulämpötila lämmön talteenoton jälkeen, sitä huonompi on myös kattilan hyötysuhde. Esimerkiksi jos polttoaineen kosteus kasvaa 40 %:sta 60 %:iin, savukaasujen määrä kasvaa 25 % ja savukaasupuhaltimen tehontarve kasvaa myös 95 %. Jotta saataisiin mahdollisimman hyvä polttoaineen palaminen aikaiseksi, olisi yli-ilmamäärän oltava pientä. Palamiseen sopiva yli-ilmamäärä voidaan tarkastaa savukaasujen happi- ja hiilimonoksidipitoisuuksien avulla. Yleensä savukaasujen happipitoisuus on 2-4 %. Tavallisesti savukaasujen alhainen happipitoisuus merkitsee korkeampaa hyötysuhdetta ja taas mitä enemmän savukaasuissa on happea, se merkitsee alemmää hyötysuhdetta. Mikäli savukaasujen happipitoisuus on korkea, puhaltimien tehontarve kasvaa ja samalla suurenee omakäyttötehon tarve. (Wärtsilä BioEnergy 8 MW, Kattilalaitoksen käyttöohje s. 6)

Lähtökohtaisesti puu- ja turvepolttoaineilla on suhteellisen korkea kosteuspitoisuus. Puupolttoaineissa kosteus vaihtelee 50–60 %:n välillä, riippuen puunlajista. Turpeella kosteus vaihtelee 30-50 %:n välillä.

Kun polttoaine on poltettu loppuun, siitä jäljelle jäävä osa on tuhkaa. Polttoaineen tuhkasta on otettava huomioon sen mahdolliset haitat. Tuhkan tiedetään heikentävän polttoaineen lämpöarvoa, tuhka likaa kattilan sisäpintoja ja voi aiheuttaa myös kattilan sisäpintojen vaurioitumisen tuhkan syövyttävien vaikutusten takia. Tuhka myös kuluttaa polttoaineen käsittelylaitteita, kuten arinaa. (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen, 2000, s.41)

Rikkipitoisuus vaihtelee eri polttoaineiden välillä. Yleensä polttoaineissa on noin 0-3 % rikkiä. Puupolttoaineissa ei ole juuri ollenkaan rikkiä, mutta turpeessa rikkiä on pieni määrä, noin 0,2 %. Rikkiä tavataan enemmän poltettaessa raskasta polttoöljyä tai hiiltä, mutta referenssilaitoksella ei polteta kumpaakaan näistä. Vaikkakin lähinnä turpeen rikkipitoisuus onkin pienehkö, sen rikkipitoisuus on otettava huomioon, sillä jos savukaasujen seassa oleva rikkihappohöyry tiivistyy kattilan sisäpinoille, voi siitä seurata hyvinkin nopea sisäpintojen syöpyminen ja edelleen kattilan pahempi vaurioituminen. Rikki on myös ympäristölle haitallinen. Ilmakehään päästyään rikkioksidit hapettuvat ja

muuttuvat rikkiatrioksidiksi. Kun rikkiatrioksidi reagoi veden kanssa se muodostaa rikkihappoa. (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen, 2000, s.45)

Lämpöarvo ilmaisee, kuinka paljon lämpöenergiaa on saatavilla polttoainemäärää kohti, kun sitä poltetaan. Lämpöarvoa ilmaistessa käytetään yksikköä MJ/kg. Polttoainetta poltettaessa, lämpöarvo voidaan ilmaista kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa on kalorimetrinen lämpöarvo, eli ylempi lämpöarvo. Kalorimetrinen lämpöarvo on arvo, joka on saatu polttamalla pienimäärä polttoainetta kalorimetrin sisällä ja sen jälkeen on mitattu kalorimetrin lämpötilan muutos. Kun polttoainetta poltetaan kalorimetrissä, savukaasujen vesihöyryä alkaa tiivistymään, koska kalorimetrin oma lämpötila on huoneilman kaltainen. Tämän seurauksena kalorimetrillä lämpöarvolla saadaan polttoaineelle parempi lämpöarvo, vaikka todellisuudessa kattilan sisällä syntynyt höyry kulkeutuu savukaasujen mukana pois ulkoilmaan. Toinen tapa ilmaista lämpöarvo, on alempi lämpöarvo, eli tehollinen lämpöarvo, joka on lähempänä realistisia käyttöolosuhteita. Kun vähennetään ylemmästä lämpöarvosta kalorimetrissä tiivistyneen veden lauhtumislämpö, saadaan alempi lämpöarvo. Alla olevassa taulukossa on vertailtu puun, jyrshinturpeen ja kevyt polttoöljyn lämpöarvoja keskenään. (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen, 2000, s.43–45)

Polttoaine	Kalorimetrinen lämpöarvo	Tehollinen lämpöarvo (Kuiva)	Tehollinen lämpöarvo (Kosteaa)
Puu	20,5 MJ/kg	19,1 MJ/kg	7,25 MJ/kg
Jyrshinturpe	22,0 MJ/kg	20,8 MJ/kg	9,2 MJ/kg
Kevyt polttoöljy	45,6 MJ/kg	42,7 MJ/kg	42,7 MJ/kg

Taulukko 1. Polttoaineiden lämpöarvojen vertailu (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen, 2000, s.45)

1.2.1 Puupolttoaine, hake ja puru

Puu polttoaineena on ympäristöystävällinen, CO₂-neutraalia ja lähes rikitöntä. Kaiken tämän lisäksi sitä on paljon saatavilla. Poltto-/kattilateknikka määrittää kuinka kosteaa polttoainetta voidaan käyttää. Suurimmilla voimalaitoksilla voidaan käyttää hyvinkin kosteaa polttoainetta lähes ongelmitta, mutta puu palaa sitä paremmin, mitä kuivempi se on. Kuivan puuaineksen tehollinen lämpöarvo on 18,3–20,0 MJ/kg:n välissä. (VTT – Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia)

Polttoaineena käytettävää haketta tehdään yleensä suoraan metsästä hakattavasta puusta ja sahoilta tulee sahan sivutuotteita, esim. purua ja kuorta. Haketta voidaan käyttää polttoaineena rakennusten lämmityskattiloissa, voimalaitoksilla sekä kaukolämpölaitoksilla. Mursketta käytetään yleensä kaukolämpölaitoksilla ja voimalaitoksilla. Hakkeen tärkein laatuominaisuus on sen kosteus. Hakkeen keskimääräinen palakoko on 30–40mm. Polttoaineena käytettävä puru syntyy yleensä sahoilta sivutuotteena. Sen kosteus voi vaihdella paljon, täysin kuivasta 70 %:iin. Purun koko on yleensä melko pientä, 1–5 mm luokkaa. Puru on melko märkää ja ilmavaa polttoainetta. (VTT – Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia)



Kuva 3. Purukuori seos -polttoainetta Toivalassa.

1.2.2 Turve polttoaineena

1970-luvulta lähtien turve on ollut erittäin merkittävä polttoaine lämpö- ja voimalaitoksille ja sen käyttö jatkuu yhä. Turpeen käyttö on vaihdellut 2010-luvulla 14,4–26,3 TWh välillä per vuosi. Turvetta syntyy kosteilla soilla biomassasta. Suomessa suot ovat syntyneet noin 10000 vuotta sitten jääkauden jälkeen. Paksuimmillaan suot voivat olla jopa 7-8 metriä syviä, mutta keskimäärin turvesuot ovat 1,4 metriä syviä. Turvekerros kasvaa hitaasti ja on erittäin hitaasti uusiutuva energianlähde. Turve kasvaa vain noin 1 mm vuodessa ja samaan aikaan alemmat kerrokset lahoavat. Suomessa arviolta 32 % maapinta-alasta ovat soiden peittämiä ja tästä osuudesta on noin 1 miljoonaa hehtaaria soita, jotka sopivat hyvin turpeen tuotantoon. Turpeentuotantoon ovat sopivia suot, jotka ovat noin 50 hehtaaria kokoisia ja kahden metrin syvyisiä. Näin ollen Suomen polttoaineeksi käytettävät turvevarat ovat noin 5500 miljoonaa kuutiometriä. Jos vuositasolla käytetään 18 miljoonaa kuutiometriä vuodessa, turvevarannot riittävät vuosikymmeniksi. (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen, 2000, s. 31–32), (VTT – Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia)

Jyrsinturpeen käytön osuus energiaturpeesta on yli 90 %. Kun jyrsitään turvetta, maasta irrotetaan ohut kerros, joka sitten kuivataan auringon energian avulla. Kuivumisen jälkeen turve kootaan mekaanisesti traktorien avulla tai pneumaattisesti imuvaunujen avulla aumoihin suon reunalla. Jyrsinturvetta käytetään paljon kaukolämpölaitoksilla sekä voimalaitoksilla. Viime vuosien aikana turvetta on alettu käyttämään seospolttoaineena puupolttoaineen tai muiden kierrätyspolttoaineen kanssa. (VTT – Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia)

Toinen voimalaitoksissa tai kaukolämpölaitoksilla käytettävä turvepolttoaine on palaturve. Palaturvetta tuotetaan tekemällä turvekenttään ura, josta irrotettu turvemassa puristetaan suulakkeen läpi, jolloin se saa sylinterimäisen muotonsa. Saatuaan muotonsa, turvepalat jätetään suon päälle kuivumaan noin kahdeksi viikoksi säästä riippuen. Näin saadaan palaturpeelle tavoitekosteus, joka on noin 35 %, ennen kuin se lähetetään poltettavaksi voimalaitokselle tai kaukolämpölaitokselle. Jotkut käyttäjät voivat kuitenkin vaatia kuivempaa palaturvetta. Yleisimmät palamuodot ovat juuri lieriöpala ja lainepala. Jyrsintä voidaan tehdä joko nostoruuvilla tai nostokiekolla. (VTT – Suomessa käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksia), (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen, 2000, s.31–32)



Kuva 4. Palaturvetta Toivalassa.

1.3 Savukaasut ja niiden puhdistus

Tässä kappaleessa kerron lyhyesti savukaasujen syntymisestä ja niiden puhdistusmenetelmistä. Kerron tarkemmin sähkösuodattimesta, koska se on tällä hetkellä ainut savukaasujen puhdistustapa Toivalan biolämpölaitoksella.

Poltettaessa eri polttoaineita kattilassa, syntyy kuumia savukaasuja. Savukaasut koostuvat pääasiassa hiilidioksidista ja vesihöyrystä. Typen ja hapen lisäksi, savukaasuissa on pienissä määrin myös typen- ja rikinoksiedeita, häkää ja pienhiukkasia. Palamisen aikana vapautuva lämpöä siirtyy savukaasuihin jonka jälkeen savukaasut kulkeutuvat lämmönsiirtimien avulla kattilalaitoksen vesihöyry- tai vesipiiriin. Savukaasuista johtuviin päästöihin vaikuttavat ensisijaisesti poltettava polttoaine ja myös sen polttotapa. (Savukaasu, Wikipedia, 2017)

Savukaasuja voidaan puhdistaa useammalla eri menetelmällä. Savukaasujen pölynerotusmenetelmiä ovat esimerkiksi, syklonit, sähkösuodattimet, letkusuodattimet ja savukaasupesurit, joilla saadaan myös hyödynnettyä savukaasuista hukkalämpöä osana lämmöntuotantoa. Savukaasupesureista kerrotaan tarkemmin kappaleessa 1.4.

Sähkösuodatin on yksi yleisimpiä savukaasujen puhdistusmenetelmiä energiantuotantolaitoksilla. Sähkösuodattimen toiminta perustuu siihen, että savukaasut johdetaan sähkösuodattimeen, jossa savukaasuissa olevat pienhiukkaset varataan negatiivisesti, jonka jälkeen hiukkaset tarttuvat sähkösuodattimen sisäpuolella olevien positiivisesti varattuihin elektrodilevyihin. Tämän jälkeen positiivisesti varattuja levyjä ravistetaan levyravistimilla tai lankaravistimilla, jolloin hiukkaset putoavat lentotuhkakonttiin. Sähkösuodattimen käyttö on varsin kannattavaa, sillä niiden käyttöikä on varsin pitkä ja tehonkulutukseltaan se on varsin pieni. Sähkösuodatin pystyy käsittelemään suuria määriä kaasuja sekä se kestää kovia lämpötiloja (420 Celsius asteeseen saakka). Hiukkaskoon ollessa yli 0,5 µm, sähkösuodattimen erotusaste on 97–100 %. Tästä pienemmät hiukkaset läpäisevät sähkösuodattimen helpommin, jolloin erotusaste on 70 %. (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen, 2000, s.250–256)



Kuva 5. Kuva sähkösuodattimesta ja Toivalan lämpölaitoksesta.

1.4 Savukaasupesuri

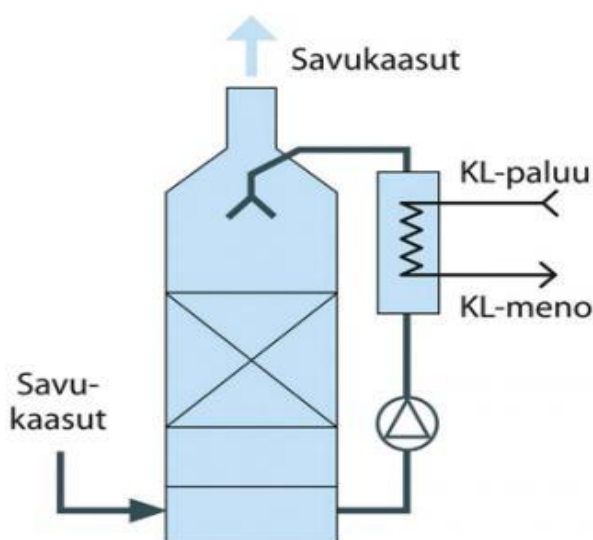
Savukaasupesurin alkuperäisenä tarkoituksena oli vähentää hiukkaspäästöjen määrää mutta nykyään savukaasupesureiden avulla voidaan hyödyntää savukaasujen sisältämää hukkalämpöä. Savukaasupesurilla ja sähkösuodattimella on lähes sama erotuskyky, mutta savukaasupesurilla on silti mahdollista päästä sähkösuodatinta parempaan erotuslukuun. Hiukkasten ollessa pienempiä kuin 0,5 µm, erotusaste on jo 90 %. Vastaavasti jos hiukkasten koko on yli 0,5 µm, erotusasteen arvo on jo 98–100 %. (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen, 2000, s.256) (Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta, 2014, Juha Järvenreuna)

Tavanomaisen pesurin toiminta perustuu kahteen prosessivaiheeseen. Ensimmäinen vaihe on pesuvaihe ja toinen lämmöntalteenottovaihe. Käytännössä savukaasupesuri on tornimainen elementti, jossa on tätekappaleita. Nämä tätekappaleet lisäävät pesurin lämmönsiirtopinta-alaa. Tätekappaleet voidaan valmistaa esimerkiksi keraamisesta aineesta, muovista tai metallista. (Grönmark, Caligo savukaasupesuri pdf)

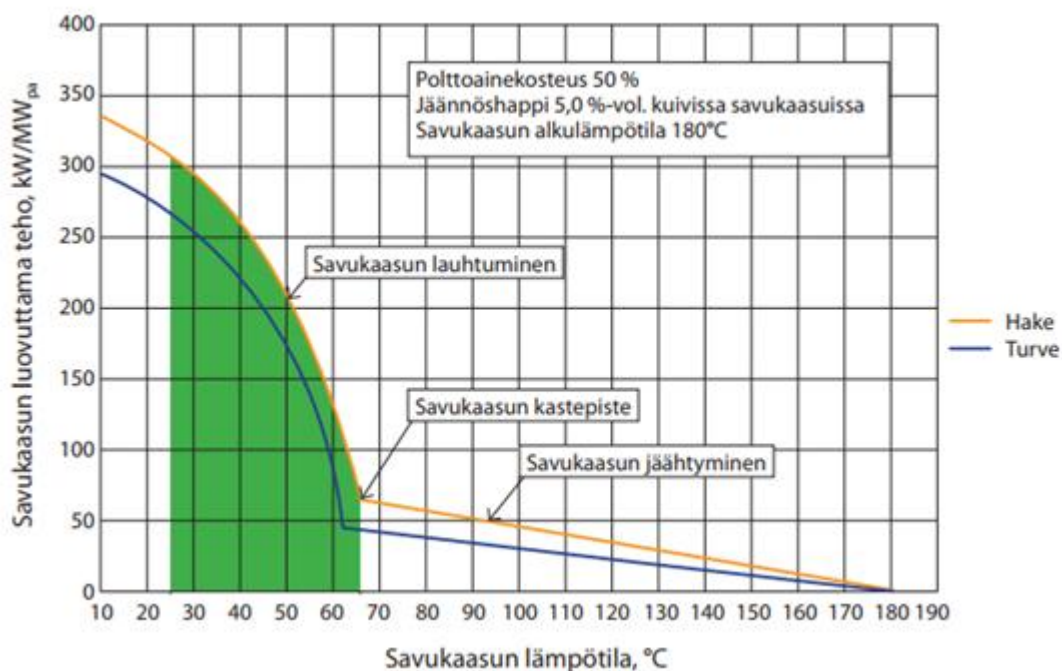


Kuva 6. Tätekappaleita (Grönmark)

Savukaasupesurin toiminta perustuu kahteen prosessivaiheeseen, pesuvaiheeseen ja lämmöntalteenottovaiheeseen. Pesuvaiheessa noin 150 Celsius asteiset savukaasut syötetään savukaasupesurin alaosaan kautta pesurin sisään ja samanaikaisesti yläpuolelta ruiskutetaan pesurin kiertovettä lämmöntalteenottoon soveltuvien tätekappaleiden läpi suoraan savukaasujen päälle. Pesuvaiheessa savukaasut saadaan puhdistettua ja samalla savukaasut jäähtyvät ja saavuttavat märkälämpötilansa, joka on noin 60–70 Celsius astetta. Savukaasujen saavutettua märkälämpötilansa ne tiivistyvät nesteeksi ja tämä neste siirtyy pesurissa kiertävään kiertoveteen. Tämä kieroveteen siirtynyt lämpöenergia otetaan talteen ja se pumpataan pesurin lämmönsiirtimelle. Lämmönsiirtimellä, kiertoveteen talteen saatu lämpöenergia luovutetaan kaukolämmön paluulinjan veteen ja samalla kiertovesi jäähtyy ja palaa takaisin pesuriin uuteen kiertoon. Tätä vaihetta kutsutaan lämmöntalteenottovaiheeksi. (Caligo savukaasupesuri pdf)



Kuva 7. Savukaasupesurin toimintaperiaate. (Caligo Industria Oy)

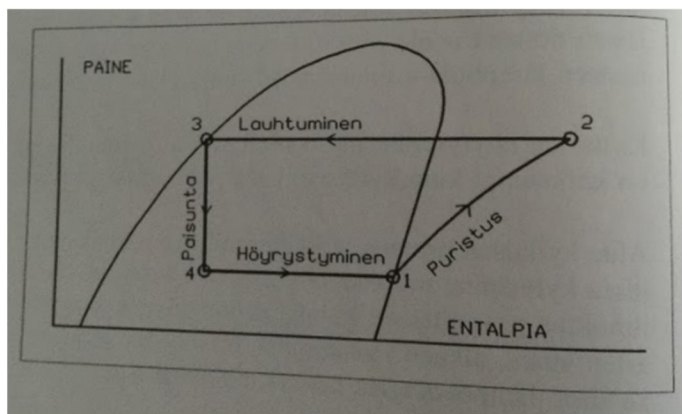


Taulukko 2. Savukaasun luovuttama energian määrä (Caligo Industria Oy)

Lämmöntalteenotto vaiheessa on tärkeää saavuttaa kastepistelämpötilä. Kaukolämpöverkon paluuvien lämpötila on oltava savukaasujen kastepistelämpötilan alapuolella. Mikäli kaukolämpöveden paluuvien lämpötila on liian korkea, ei haluttua savukaasun kastepistelämpötilaa saavuteta ja pesurin lämmöntalteenottoteho romahtaa. Talvisin kovien pakkasien aikaan, lämpölaitokset yleensä käyttävät kuivempia polttoaineita toiminta varmuuden säilyttämiseksi. Tämä tarkoittaa sitä, että savukaasujen kastepistelämpötila on hyvinkin matala, koska kuivia polttoaineita poltettaessa syntyy kuivia savukaasuja. Paluuvien korkealämpötila voi johtua asiakkaan kaukolämpölaitteista. (Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta, 2014, Juha Järvenreuna)

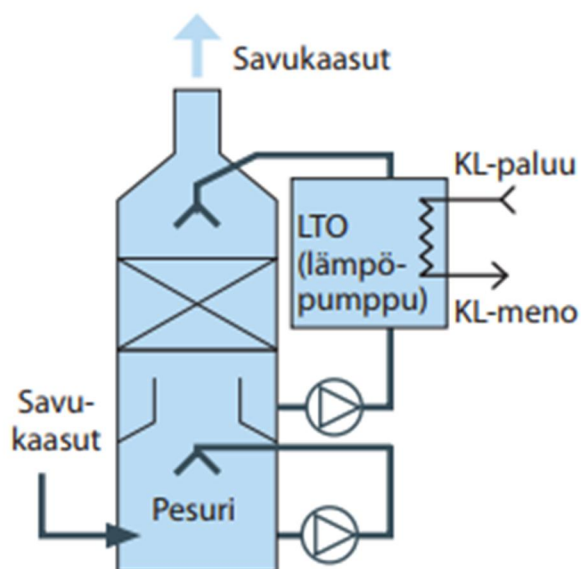
1.5 Lämpöpumppu kytkettynä savukaasupesuriin

Lämpöpumpun yleisenä tehtävänä on lämpöenergian siirtäminen kylmemmästä lämpimämpään tilaan. Lämpöpumpun toiminta perustuu pumpun sisällä kiertävään kylmäaineen kiertoon ja sen faasimuutoksiin. Lämpöpumpussa on neljä tärkeää osaa, jotka ovat kompressori, lauhdutin, paisuntaventtiili ja höyrystin. Lämpöpumpun sisällä kiertävä kylmäaine höyrystyy nimensä mukaisesti höyrystimessä korkeampaan paineeseen. Kompressorissa puristetaan kylmäainetta, jolloin sen lämpötila lähtee myös nousemaan. Tämän jälkeen tulistettu kylmäaine menee lauhduttimeen, jolloin se muuttuu olomuotonsa nesteeksi. Nestemäinen kylmäaine palaa paisuntaventtiilikautta höyrystimelle, jossa on matalampi paine ja kierto alkaa taas alusta. (Nydal Roald, 2002, Käytännön kylmäteknikka s.59-62)



Kuva 8. Lämpöpumpun toiminta. (Nydal Roald, 2002, Käytännön kylmäteknikka s. 64)

Lämpöpumpputekniikkaa on hyödynnetty teollisuudessa hukkalämmön talteenotossa jo kauan. Tavanomaiseen savukaasupesuriin verrattuna, voidaan lämmöntalteenottoa saada paremmaksi, jos käytetään oikeaa lämpöpumppukytkentätapaa. Lämpöpumpun etuna on myös se, että savukaasu saavuttaa kastepistelämpötilan riippumatta kaukolämpöveden paluulämpötilasta. Tavanomaisissa pesureissa taas kaukolämmön paluuv veden lämpötila määrää savukaasujen loppulämpötilan. Lämpöpumpulla voidaan taas alentaa kaukolämpöverkon paluulinjan veden lämpötilaa jopa 20 celsius astetta sen virratessa pesurille. Paluuv edessä oleva lämpöenergia ei katoa mihinkään vaikka paluuvettä jäähdytetään, ja se siirtyy takaisin kaukolämpöverkoston lämpöpumpun termoaineen välityksellä ja lauhtuttimen kautta. Kun paluuvettä johdetaan jäähdytykseen, pesuri ottaa vain tarvitsemansa määrän vettä eli lämpöpumpulla siirretty vesi vain ohittaa pesurikytkennän. (Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta, 2014)



Kuva 9. Savukaasupesuri lämpöpumppukytkennällä. (Caligo Industria)

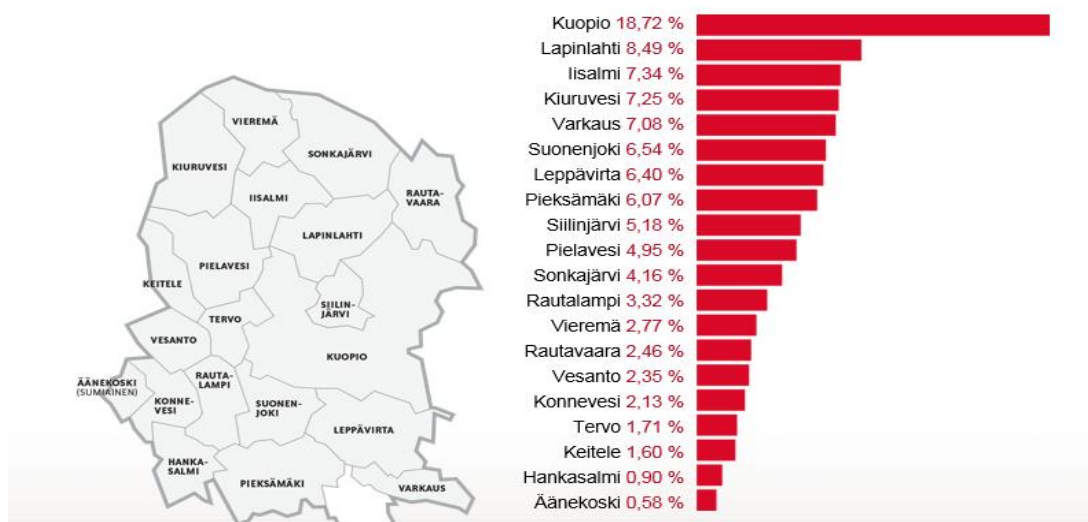
2 SAVON VOIMA OYJ

Savon Voima aloitti toimintansa ystävänpäivänä 14.2.1947 Pohjois-Savon Voima Oy nimellä. Ensimmäiset vuosikymmenet sotien jälkeen olivat kiireistä aikaa maakunnan sähköistämisen ja jälleenrakentamisen vuoksi. Yrityksiä ja kotitalouksia autettiin hankkimalla heille sähkölaitteita, jotka helpottivat tavallista arkea. Tämän lisäksi Savon Voima tarjosi opastusta niiden käyttöön. Sähkön kysynnän kasvaessa, tuli tarve rakentaa omia voimalaitoksia sekä hyödyntää maakuntien vesivoimaa. Savon Voima tuottaa tänäkin päivänä sähköä vesivoiman avulla 11 vesivoimalaitoksessa. Kaukolämpöliiketoiminta alkoi vuonna 1975. (Savon Voima, 2018)

Savon Voima -konsernin kuuluvat Savon Voima Oyj -emoyhtiön myös Savon Voima Verkko Oy ja Savon Voima Salkunhallinta Oy. Savon Voima Oyj:n omistaa Savon Energiaholding Oy, jonka omistajat ovat 20 kuntaa, jotka sijaitsevat Savon Voima Verkon jakeluverkon alueella. Neljä suurinta omistajaa ovat Kuopio, Lapinlahti, Iisalmi ja Varkaus. (Savon Voima, 2018)

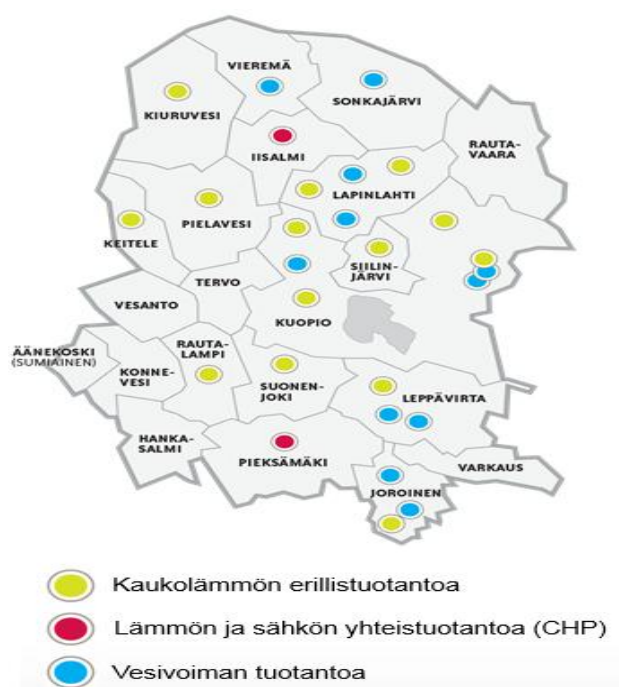


Kuva 10. Savon Voima Oyj:n konsernirakenne (SV esittelykalvot 2017)



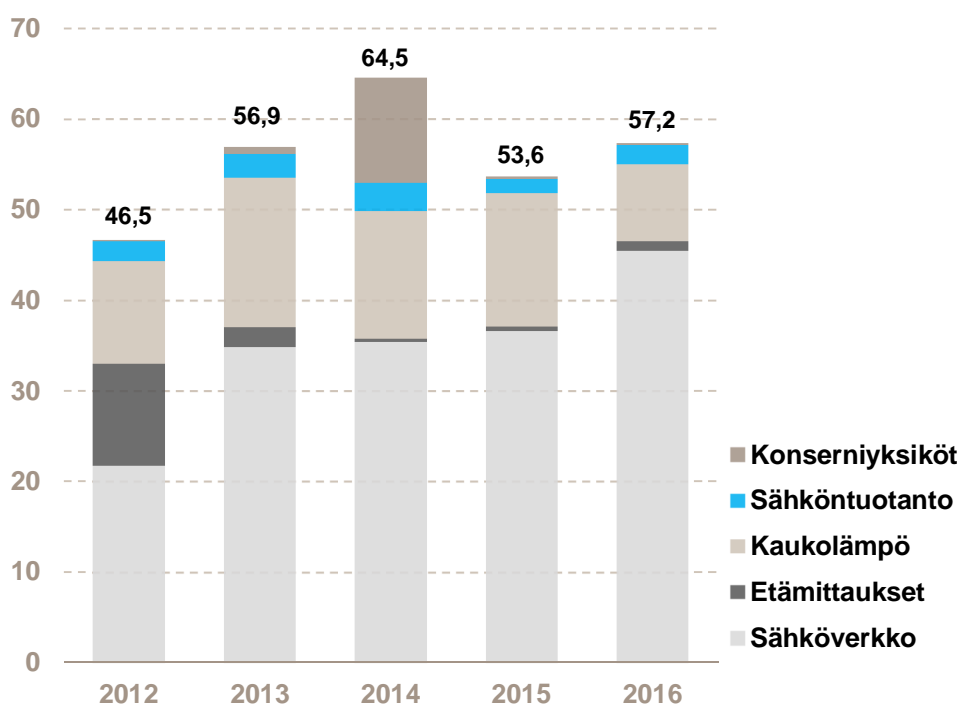
Kuva 11. Savon Voima Oyj:n omistajaosuudet (SV esittelykalvot 2017)

Savon Voima Oyj on yksi Suomen suurimmista energiayhtiöistä. Yhtiön palveluksessa työskentelee noin 180 alan ammattilaista, joista suurin osa työskentelee pääsääntöisesti yrityksen pääkonttorilla Siilinjärven Toivalassa. Muut työskentelevät yhtiön eri paikkakunnilla erilaisissa tehtävissä kaukolämmön ja sähköntuotannon käytön ja kunnossapidon tehtävissä. Yhtiön liiketoimintaan kuuluvat sähkön ja lämmön tuotanto, myynti ja jakelu sekä niiden lisäksi energia-alan asiantuntijapalvelut. Savon Voima Oyj tuottaa ja myy kaukolämpöä 20 kaukolämpöverkon alueella. Kahdella paikkakunnalla (Iisalmi ja Pieksämäki) tuotetaan sähköä CHP-laitoksella. Savon Voima Verkolla on sähköverkkoa Etelä- ja Pohjois-Savon alueen lisäksi myös Keski-Suomen alueilla yhteensä noin 27 000 kilometriä, pääosin harvakseltaan asutulla alueella. Kaukolämpöverkkoa Savon Voimalla on noin 365 kilometriä. (Savon Voima)



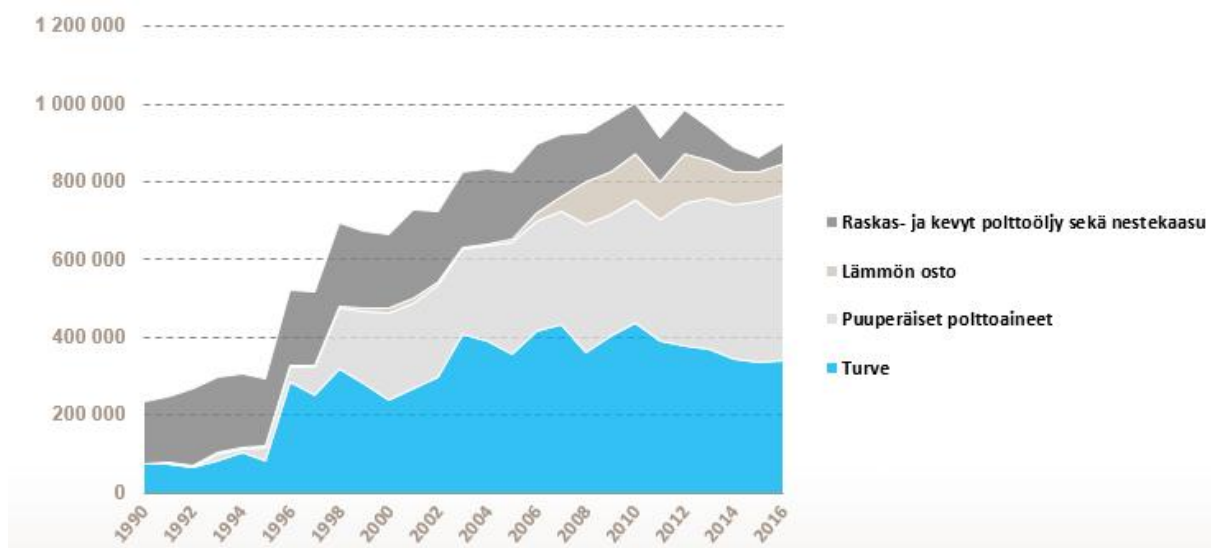
Kuva 12. Kaukolämmön, lämmön ja sähkön yhteistuotannon ja vesivoiman jakautuminen (SV esittelykalvot 2017)

Vuonna 2016 yhtiön liikevaihto oli noin 185 miljoonaa euroa, josta liikevoiton osuus oli 30,8 miljoonaa euroa. Savon Voima investoi vuosittain kymmenillä miljoonilla euroilla kaukolämpö -ja sähköverkon toimintavarmuuteen. Jotta viime vuosien myrskyjen kaltaiset häiriöt asiakkaille voitaisiin minimoida, Savon Voima on alkanut rakentaa säävarmaa verkkoa ja samalla investoimaan voimakkaasti sen omaan sähköverkkoon. Vuonna 2016 sähköverkon rakennus-, ylläpito- ja kehitysinvestoinnit olivat mittavat, yhteensä noin 46,5 miljoonaa euroa. Investoinnit vuonna 2016 olivat yli 57 miljoonaa euroa, eli suurin osa investoinneista käytettiin juuri sähköverkon investointeihin. Kaukolämpöverkoston ja lämmöntuotannon investoinnit olivat 8,5 miljoonan euron luokkaa. (Savon Voima, SV esittelykalvot 2017)



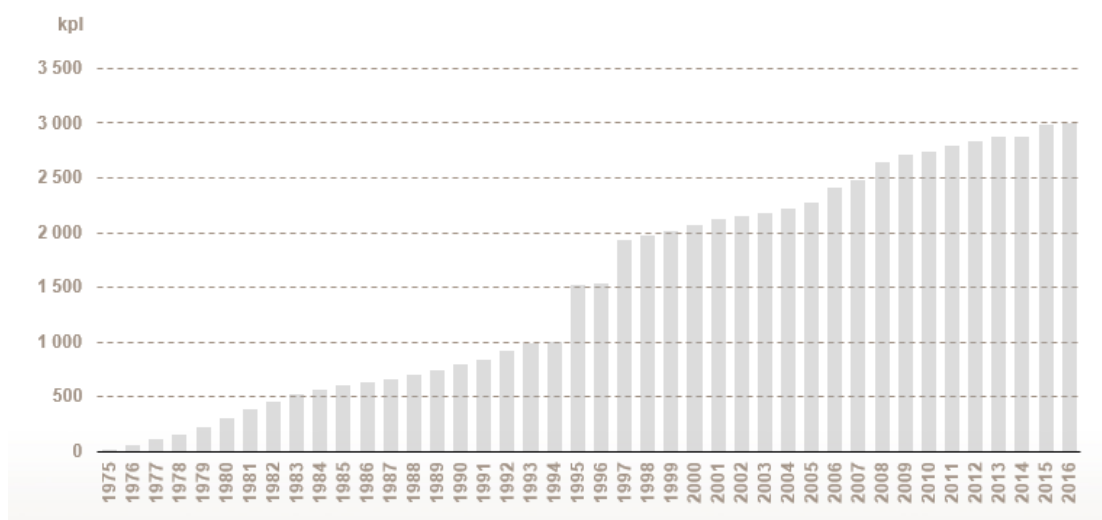
Taulukko 3. Investointien jakauma (SV esittelykalvot 2017)

Savon Voima Oyj:n kaukolämmöntuotannossa yli 95 % energianlähteistä ovat kotimaisia ja lähellä tuotettuja. Vuonna 2016 lämpöenergiaa myytiin yhteensä 636 GWh. Viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana puun osuus polttoaineena on noussut merkittävimiksi ja polttoöljyn käyttö kaukolämmön tuotannossa on merkittävästi vähentynyt. Vuonna 2016 Savon Voiman lämmön- ja yhdistetyn sähköntuotannossa käytetyistä polttoaineista 47 % olivat puuperäisiä polttoaineita, 38 % turvetta, 6 % raskasta ja kevyttä polttoöljyä sekä kaasua ja loput 9 % on ostettua lämpöä. (SV esittelykalvot, 2017)



Taulukko 4. Polttoaineiden käyttöosuudet MWh (SV esittelykalvot 2017)

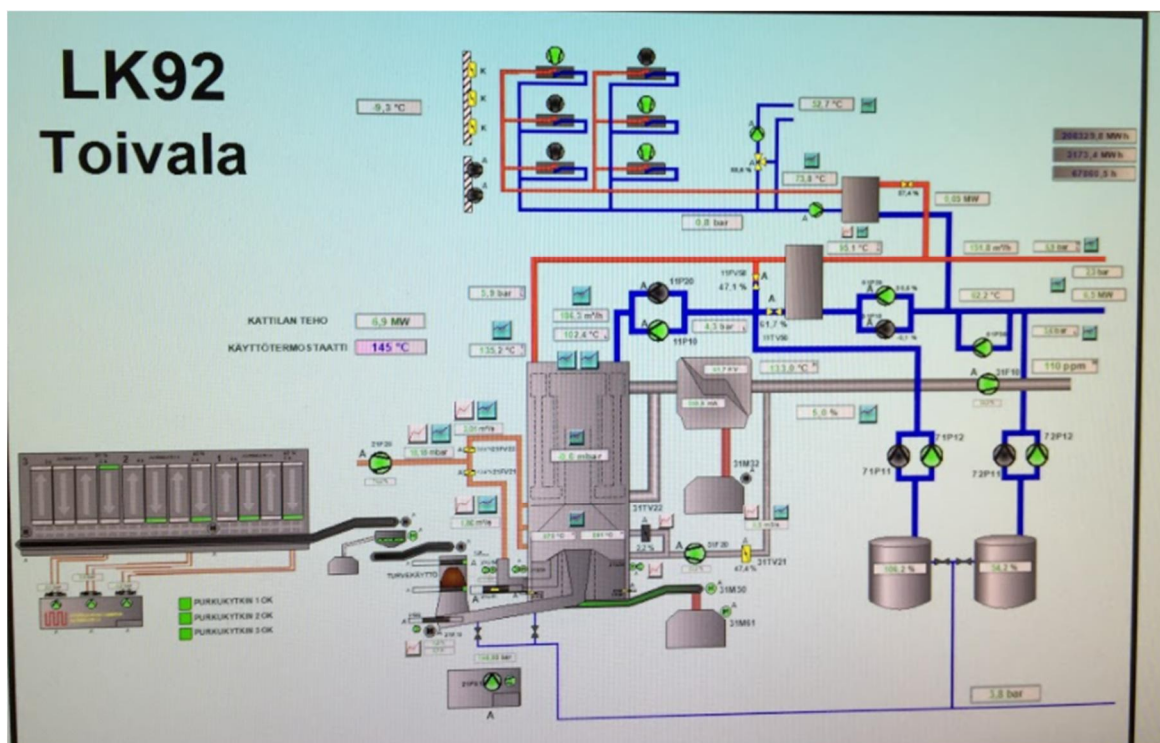
Vuonna 2016 kaukolämpöasiakkaita oli yhteensä 3003 kappaletta. Alla olevasta diagrammista voidaan huomata, kuinka asiakasmäärä on kehittynyt vuodesta 1975 aina tähän päivään asti. Suurin osa asiakkaista ovat pääosin kerrostalo tai rivitaloyhtiöitä, mutta myös muita merkittäviä asiakkaita ovat esimerkiksi teollisuusrakennukset. (Savon Voiman sisäiset tiedostot, 2018)



Taulukko 5. Kaukolämmön asiakasmäärän kehittyminen vuosilla 1975–2016 (SV esittelykalvot 2017)

3 TOIVALAN BIOLÄMPÖKESKUS

Tässä opinnäytetyön kappaleessa 3, keskitytään kertomaan tarkempia tietoja Toivalan biolämpökeskuksesta sekä lyhyesti tontilla sijaitsevista kahdesta varalla olevasta öljykattilasta. Biolämpökeskus on teholtaan 8 MW ja se on Wärtsilä Biopowerin toimittama. Öljykattiloiden tehot ovat 2x4 eli yhteensä 8 MW. Biolämpökeskuksen valmistusvuosi on 2009. Alla olevassa kuvassa on kuva valvomon koneen näytöstä, jossa näkyy biolämpölaitoksen kaikki PI-kaaviossakin olevat toimilaitteet ja prosessit.



Kuva 13. Toivalan biolämpölaitoksen ajokaavio.

3.1 Polttoainejärjestelmä

Polttoainejärjestelmän päälaitteet ovat; tankopurkaimet, tasaajatela, hydraulikkakoneikko, 2kpl pakuljettimet, kiekko-seula, syöttösuppilo, sulkupellit, syötin ja pintakytkimet. Polttoainevaraston pohjalla on tankopurkaimet. Tankopurkainten tehtävänä on kuljettaa polttoaine polttoainevarastosta polttoainekuljettimelle. Toivalan biolämpölaitoksella polttoainevarasto on jaettu kolmeen yhtä suureen lohkokon. Tankopurkaimet käyttävät toimiakseen hydraulikkakoneistoa. Jokaista tankopurkainta kohden on kaksi hydraulikkasyylinteriä. Tankopurkaimet on jaettu kolmeen ryhmään, yksi kullekin lohkolle, jotka toimivat normaalisti automaattilla yhtä aikaa, mutta tarvittaessa tankopurkaimia voidaan myös ajaa manuaalisesti käsiajolla. Hydraulikkakoneikossa on kolme pumppua, jotka kukin käyttää omaa ryhmäänsä. Tankopurkainten toimintaa tarkkaillaan rajakytkimien avulla. (Wärtsilä Bioenergy 8 MW, kattilalaitoksen käyttöohje, s. 7)

Polttoainevaraston ja polttoainekuljettimen välillä on tasaajatela, joka laittaa polttoainetta tasaisesti kuljettimelle. Polttoainekuljettimia Toivalan biolämpölaitoksella on kaksi kappaletta. Polttoainekuljetin 1 kuljettaa polttoainetta seuralle asti ja seuralta eteenpäin polttoainekuljetin 2 hoitaa polttoaineen kuljettamisen syöttösuppiloon, jonka pohjalta syöttöruuvi syöttää polttoainetta kattilan arinalle. Polttoon kelpaamaton puu aines erotellaan seuralalla ja ne ohjataan ylitelavalle. Syöttösuppilossa on kaksi polttoainepeltiä, jotka annostelevat polttoainetta sopivan määrän syöttöruuville.

(Wärtsilä Bioenergy 8 MW, kattilalaitoksen käyttöohje, s. 7)



Kuva 14. Polttoaineen vastaanottoasema Toivalassa.

3.2 Poltto- ja tuhkalaitteisto

Polttolaitteistossa olennaiset elementit ovat syöttöruuvi eli stoker-ruuvi, arina sekä tulipesä. Stoker-ruuvin tehtävänä on siirtää polttoainetta arinoiden alapuolelta arinan pesän keskelle. Syöttöruuvien käyttöä säädellään laitoksen tehon ja polttoaineen tarpeen mukaisesti. Järjestelmä huolehtii itse polttoainesuppilon täytöstä. (Wärtsilä Bioenergy 8 MW, kattilalaitoksen käyttöohje, s. 8-12)

Arinan pinta on pyöreä ja kartiomaisesti laskeva. Joka toinen arinakehä on kiinteä ja joka toinen epätasaisesti pyörivä. Ensimmäinen ja viimeinen pyörivä arinakehä pyörivät taas tasaisesti. Joka toinen pyörivä arinakehä pyörii myötäpäivään ja joka toinen taas vastapäivään. Kiinteiden arinakehien alapuolella on primääri-ilmapanta, jonka virtauksia voidaan käsikäyttöisesti säätää ohjauspeltien avulla. Liikkuville arinakehille on omat säädettävät ohjauspellit. Kuten aiemmin kerrottiin, palamisen ensimmäinen vaihe on kuivuminen. Polttoaineen kosteus haihtuu kuivumisen aikana. Pyörivät arinakehät levittävät tasaisesti polttoaineen ympäri arinaa, jolloin kosteimmatkin polttoaineet kuivuvat hyvin. Toisessa vaiheessa polttoaine palaa ja lopulta jää jäljelle jäännöshiili, jonka palaminen vie kauan aikaa. Arinoiden ulkokehällä on tuhka-arinat, joiden päällä pyörivät tuhkaneräjähtäjät, jotka edelleen pudottavat tuhkan arinoiden alapuolella olevaan vesitilaan ja edelleen siellä olevalle tuhka-kuljettimelle. Veden tarkoitus on sammuttaa arinalla ollut tuhka sekä erottaa eri primääri-ilma-vyöhykkeet toisistaan. Tulipesän pohjalla sijaitseva tuhka-kuljetin kuljettaa tulipesästä pudonneen tuhkan märkä-tuhkakonttiin. (Wärtsilä Bioenergy 8 MW, kattilalaitoksen käyttöohje, s. 8-12)

Tulipesän vesijäähdytetty etupalotila on rakenteellisesti kestävä rakenne ja polttoteknisesti tehokas, koska se on pyöreän muotoinen. Pyöreän muotonsa ansiosta tulipesässä ei ole lainkaan kylmiä nurkkia. Etupalotila on arinoiden yläpuolella, jonka katto on kartiomainen holvi. Tämä heijastaa hyvin lämpöenergiaa. Tulipesään johdetaan palamisenprosessin eteenpäin viemiseksi sekundääri- ja tertiääri-ilmaa ilmakehien kautta. Itse palamisprosessia säädetään tarvittavan tehon mukaan. Tehon tarve antaa käskyn primääri-ilmavirralle, joka taas säättää polttoainesyöttöä sopivaksi. Polttoaineen ja ilman suhde pidetään vakiona savukaasuista tulevan jäännöshappimittausten avulla. Tulipesään tarvittava alipaine saadaan savukaasupuhaltimen avulla ja tulipesän lämpötilaa saadaan säädettyä kiertokaasupuhaltimella. (Wärtsilä Bioenergy 8 MW, kattilalaitoksen käyttöohje, s. 8-12)

3.3 Palamisilma- ja savukaasujärjestelmä

Palamisilmajärjestelmässä pääelementit ovat; palamisilmapuhallin, säätöpellit ja ilmakehät. Toivalan biolämpökeskuksessa on yksi palamisilmapuhallin. Säätöpeltien ja kanavien avulla ohjataan ja säädetään tarvittaville tasoille, kuten primääri-, sekundääri- ja tertiääri-ilmavyöhykkeille. Primääri-ilmaa jaetaan tasaisesti arinalle erillisiä ilmakehien pitkin. Primääri-ilma myös jäähdyttää arinaa ja sen liikutuslaitteistoja. Palamisilma otetaan mahdollisimman korkealta kattilahuoneesta, jolloin kattilasta johtuvat lämpösäteilyhäviöt saadaan hyödynnettyä. Primääri-ilman tehtävä on myös säätää polttoainetehoa. (Wärtsilä Bioenergy 8 MW, kattilalaitoksen käyttöohje, s. 13-16)

Savukaasujärjestelmässä tärkeät laitteet ovat savukaasupuhallin, savukaasukanavat, savukaasusuodatin eli sähkösuodatin, kiertokaasupuhallin, savukaasupellit ja savupiippu. Savukaasut johdetaan savukaasusuodattimen läpi, jonka erotusaste on melkein 99 %. Tästä savukaasut johdetaan savupiippuun. Savukaasupuhaltimella on tarkoitus myös säätää tulipesässä olevaa alipainetta. Tulipesän lämpötilaa säädettyä käytetään kiertokaasupuhallinta. Kiertokaasu johdetaan kanavaa pitkin arinan alle, jossa kiertokaasu ja primääri-ilma sekoittuvat. Kiertokaasu jäähdyttää savukaasuja etupesässä ja hidastaa palamista. (Wärtsilä Bioenergy 8 MW, kattilalaitoksen käyttöohje, s. 13-16)



Kuva 16. Savukaasupuhallin Toivalassa.



Kuva 17. Kiertokaasu- ja palamisilmapuhaltimet.

3.4 Lämmöntuotanto- ja vesijärjestelmät

Toivalan biokattila on kytketty lämmönsiirtimellä kaukolämpöverkoston ja se tuottaa kuumaa menovettä kaukolämpöverkoston. Kaukolämpöverkoston menoveden lämpötilaa voidaan säätää erillisen parametrin mukaan, kuten ulkolämpötilan mukaan tai vaihtoehtoisesti menoveden lämpötilaa voidaan pitää vakiona koko ajan. Laitoksella olevat paineenpitojärjestelmät huolehtivat kaukolämpöverkoston ja kattilapiirin paineenpidosta. Lisävesisäiliö on kaukolämpöverkoston puskurivarasto ja yksi osa paisuntajärjestelmää. Paisuntasäiliöön laitetaan happea poistavaa sekä pH:ta säätävää kemikaalia. Kaukolämpöverkoston paluuputken painetta seurataan painekeytkimen avulla. Jos paluuputken paine laskee liian alhaiseksi, paineenpitopumppu pumppaa paluuputkeen lisää vettä, jotta paine saadaan takaisin asetettuun painearvoon. Mikäli paineenpitopumppu vikaantuu, varalla oleva toinen paineenpitopumppu lähtee pumppaamaan. Jos kaukolämpöverkoston veden lämpötila nousee tai paine kasvaa liian suureksi, ylimääräinen vesi palaa takaisin paisuntasäiliöön suodatinten, ylivirtausventtiilien ja sulkuventtiilin lävitse. Kaukolämpöverkosto voidaan myös hätä täyttää manuaalisesti, mikäli verkoston paine laskee voimakkaasti. (Wärtsilä Bioenergy 8 MW, kattilalaitoksen käyttöohje, s. 17-20)

3.5 Tehon säätö kattilassa

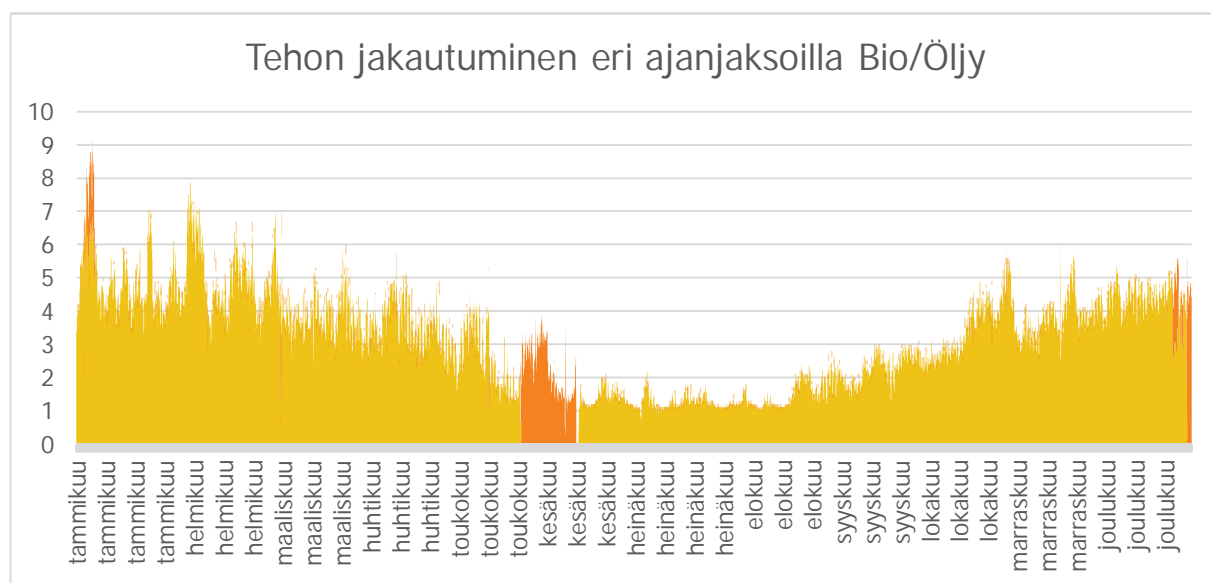
Tulipesän tehoa säädetään kattilan vesitason perusteella eli lämpömäärän virtauksen avulla. Mitä suurempi lämmön tarve on, sitä suuremmaksi käy primääri-ilman virtauksen suuruus. Primääri-ilman virtauksen perusteella taas säädetään sekundääri-ilman virtausta sekä stoker-ruuvin kierrosnopeutta ja edelleen tulipesän tehoa. Alla olevassa taulukossa kerrotaan, kuinka primääri-ilman määrä vaikuttaa lämpömäärään. (Wärtsilä Bioenergy 8 MW, kattilalaitoksen käyttöohje, s.19)

Lämpömäärä [MW]	Primääri-ilman virtaus [m ³ /s]
1,6	1
3,5	1,2
6,2	2
8	2,4

Taulukko 10. Tehotaulukko. (Wärtsilä Bioenergy 8 MW, kattilalaitoksen käyttöohje, s.19)

3.6 Tehon jakautuminen Toivalassa

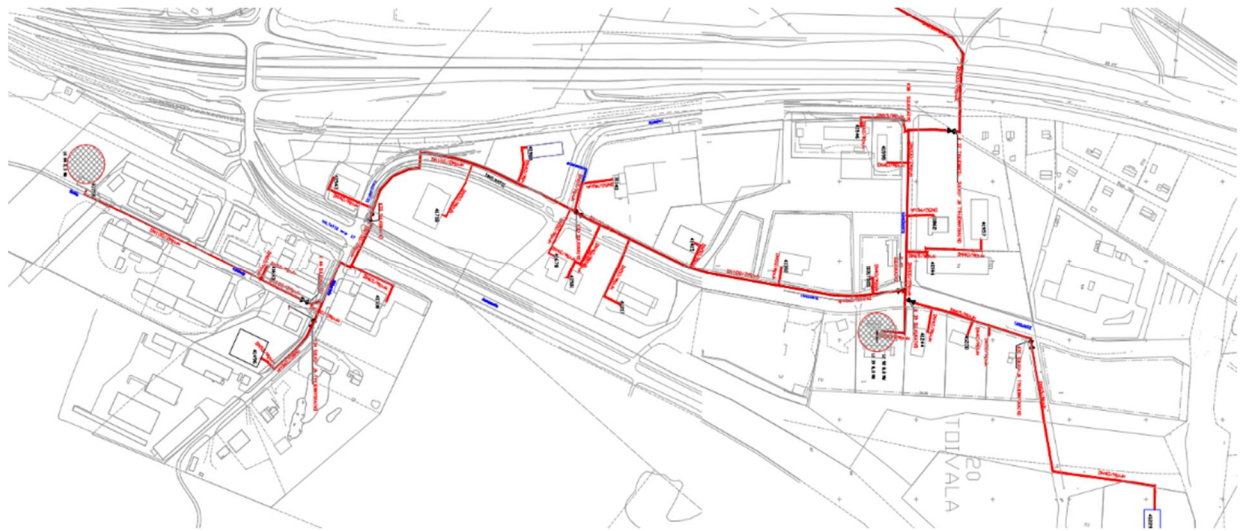
Alla olevassa taulukossa nähdään tehon jakautuminen Toivalan kaukolämpöverkostossa vuonna 2017. Taulukkoa tehdessä on käytetty Generis-järjestelmästä saatuja arvoja. Taulukossa voidaan nähdä biolämpölaitoksen teho (keltainen) ja tontilla sijaitsevan öljylämpölaitoksen (oranssi) teho. Kesäseisokin ajankohdan näkee myös selkeästi, jolloin biolämpölaitos on huollossa. Kesähuolto biolämpökeskuksella tehtiin toukokuun lopun ja kesäkuun lopun välisen aikana. Yleensä huolto kestää 2-3 viikkoa. Tällöin öljylämpölaitos on vain toiminnassa.



Taulukko 2. Kaukolämmön tehonjakautuminen vuoden 2017 aikana. (Savon Voiman sisäisestä tiedostoista)

3.7 Kaukolämpöverkosto

Asiakkaita Toivala-Vuorela alueen verkossa on yhteensä 109 kappaletta. Toivalan kaukolämpöverkoston alueeseen kuuluu myös siis Vuorelan alue. Tämän alueen yhteispituus oli siis 12,8 km. Vuorelan alueella on myös kaksi öljylämmityskeskusta, Simpantiellä 4 MW:n sekä Takojantiellä 2,3 MW. Nämä edellä mainitut öljylaitokset toimivat varalämpökeskuksina, jos Toivalan biolämpökeskuksen tontilla tehdään esimerkiksi kesähuoltoa biolämpölaitokselle tai tontilla olevaan öljylämpökattiloille. Alla olevissa kuvassa on Toivalan kaukolämpöverkoston osuus ja toisessa kuvassa on Vuorelan puolen kaukolämpöverkosto ja niiden kaukolämpölaitokset. (Savon Voiman sisäisestä tiedostoista)



Kuva 18. Toivalan kaukolämpöverkosto. (Savon Voiman sisäiset tiedostot, 2018)



Kuva 19. Vuorelan kaukolämpöverkosto. (Savon Voiman sisäiset tiedostot, 2018)

4 CALIGO INDUSTRIA OY

Caligo Industria Oy on Elomatic Oy:n tytäryhtiö (Elomatic 51 % toimiva johto 49 %). Henkilöstöä Caligo Industria Oy:llä on 5 henkilö sekä yksi DI työntekijä. Ulkomailla heillä työskentelee myyntiagentteja. Caligo Industria Oy on perustettu elokuussa 2013. Se kehittää, markkinoi ja myy savukaasun puhdistukseen ja prosessin hukkalämmön hyödyntämiseen erilaisia järjestelmäratkaisuja. Periaatteena heillä on käyttövalmiit ns. "avaimet käteen" kokonaisuudet. Valmistus ja kokoonpano työt ovat ulkoistettu. Vuonna 2017 liikevaihto oli noin 4 miljoonaa euroa. Osaamisalueina erityisesti heillä on savukaasupesurit, jotka on varustettu omalla lämpöpumppupatentilla. Referenssejä on lukuisia, noin 15 kappaletta toimitettuja yksiköitä 3-25 MW:n voima- ja lämpölaitoksiin. Pääasiassa savukaasupesuri- ja lämpöpumpputoimituksia, mutta myös lauhteenkäsittely -erillisyyksiköiden toimituksia. Tällä hetkellä heillä on toimituksessa 4 yksikköä. Caligo Industria Oy hakee aktiivisesti kasvua etenkin viennin avulla. Heidän ensimmäinen vientikauppa sijoittui Ranskaan maailman suurimmalle lämpölaitosoperaattorille, Dalkialle. Alla muutamia saman kokoluokan referenssejä, kuin Toivalan 8 MW:n biolämpölaitos. (Kommila, Mika 2018-2-9. Caligo Indutria Oy [sähköpostiviesti].)

Elenia Lämpö Oy, Toijala, 2014

- 6 MW:n hakelämpölaitos
- Caligo-pesuri ja lämpöpumppu CSXPHPXWT
- Lämmön talteenotto: 28 % (ka.)

Adven Oy, Nummela, 2014

- 8 MW:n hakelämpölaitos
- Caligo-pesuri ja lämpöpumppu CSXPHPXWT
- Lämmön talteenotto: 32 % (ka.)

Kauhavan Kaukolämpö Oy, Kauhava, 2015

- 10 MW:n hakelämpölaitos
- Caligo-pesuri ja lämpöpumppu CSXPHPXWT

VAPO Oy, Vilppula, Pellettitehdas 2015

- Caligo lauhteenkäsittely-yksikkö kahdella tornilla (CSWTX-TWIN)

VAPO Oy, Sotkamo, 2015

- 15 MW:n hake- ja turvelämpölaitos
- Caligo-pesuri ja lämpöpumppu CSXPHPXWT
- Lämmön talteenotto: 25 % (ka.)

Alajärven Lämpö Oy, Alajärvi, 2016

- 8 MW:n lämpölaitos (turve, hake, kuori)
- Caligo-pesuri ja lämpöpumppu
- Lämmön talteenotto: >35 % (ka.)

Kuva 20. Muutamia Caligo Industria Oy:n referenssejä. (Caligo CSX HP -savukaasupesurijärjestelmä -esite)

5 LASKENNAT

Laskentoja varten luotiin Excel taulukko, jolla kaikki tarvittavat laskennat suoritettiin. Jotta saataisiin laskettua savukaasupesurin teho, on ensin selvitettävä polttoaineen kuiva-aineen koostumukset. Laskennoissa käytetään puun ja turpeen kuiva-aineen koostumuksia, mutta laskenta vaiheessa näytetään vain puun tiedoilla tehdyt laskelmat, koska samaa laskentaa käytetään myös turpeelle sekä kuivemmalle puulle (40 % kosteus). Tehon laskennoissa on hyödynnetty Savon Voimalta saatuja vuoden 2017 dataa. Toivalassa turpeen kosteus on noin 33% ja puun kosteus on 55%.

5.1 Savukaasu laskennat

Turve	osuus painoprosentteina
C	55,00 %
H2	5,50 %
S	0,20 %
O2	32,60 %
N2	1,70 %
TUHKA	5,00 %

Taulukko 3. Turpeen kuiva-ainekoostumus

Puu	osuus painoprosentteina
C	50,4 %
H2	5,9 %
S	- %
O2	42,5 %
N2	0,5 %
TUHKA	0,4 %

Taulukko 4. Puun kuiva-ainekoostumus

Seuraavaksi lasketaan kunkin komponentin paino kilogrammoina kosteassa polttoaineessa ($\text{kg}/\text{kg}_{\text{pa}}$).

$$\text{Kosteus -\%} * \text{kuiva-aine määrä} = \text{komponentin määrä polttoaineessa} \quad (\text{Kaava 1})$$

Missä,
 Kosteus-% = polttoaineen kosteus prosentti (%)
 Kuiva-ainemäärä = polttoaineen komponentin kuiva-aine osuus prosentteina (%)
 komponentin määrä= komponentin määrä kosteassa polttoaineessa ($\text{kg}/\text{kg}_{\text{pa}}$)

Kun komponenttien määrät kosteassa polttoaineessa ovat selvillä, muutetaan kilogrammat mooleiksi polttoainekilossa jakamalla kunkin komponentin määrä komponentin molekyylimassalla

Komponentin määrä kosteassa polttoaineessa / M

(Kaava 2)

Missä, Komponentin määrä kosteassa polttoaineessa = kg/kg_{pa}

M= moolimassa (kg/kmol)

Kun moolit on saatu ratkaistua, voidaan laskea palamiseen kuluva hapen tarve palamisreaktioyhtälöiden avulla.

Hiilen palaessa $C + O_2 \rightarrow CO_2$

Rikin palaessa $S + O_2 \rightarrow SO_2$

Vedyn palaessa $H + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$

Palamiseen kuluva hapen tarve lasketaan seuraavasti;

$$N_{O_2 (TEOR)} / m_{pa} = n_C + 0,5 * n_{H_2} + n_{S_2} - n_{O_2}$$

(Kaava 3)

Missä, n_C = hiilen määrä kosteassa polttoaineessa (kmol/kg_{pa})

n_{H_2} = vedyn määrä kosteassa polttoaineessa (kmol/kg_{pa})

n_{S_2} = rikin määrä kosteassa polttoaineessa (kmol/kg_{pa})

n_{O_2} = hapen määrä kosteassa polttoaineessa (kmol/kg_{pa}).

Alla olevassa taulukossa on laskettuna edellä tehdyt laskennat.

Yhdiste	Määrä (kuiva polttoaine)%	Määrä (kosteaa polttoainetta) kg/Kg _{pa}	Molekyylipaino (kosteaa polttoainetta) kg/kmol	Määrä (kosteaa polttoainetta) kmol/kg _{pa}	Hapen tarve (O ₂)
C	50,40 %	0,2268	12,01	0,0189	0,0229
H ₂	6,20 %	0,0279	2,016	0,0138	0,0068
S	0,00 %	0	32,06	0,00000	0,00003
O ₂	42,50 %	0,19125	32	0,0060	-0,0051
N ₂	0,50 %	0,00225	28,02	0,0001	0,00000
tuhka	0,40 %				
H ₂ O	100,00 %	55,00 %	18,016	0,0305	

Taulukko 5. Puulle tehdyt laskennat puun kosteuden ollessa 55 %

Ilmassa on 21 % happea ja 79 % typpeä, joten ilman tarve on,

$$N_i (TEOR) / m_{pa} = (N_{O_2 (TEOR)} / m_{pa}) * (1/0,21)$$

(Kaava 4)

Missä, $N_i (TEOR) / m_{pa}$ = Ilman tarve (kmol/kg_{pa})

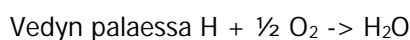
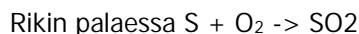
$N_{O_2 (TEOR)} / m_{pa}$ = edellä laskettu palamiseen kuluva hapen tarve (kmol/kg_{pa})

0,21 = hapen määrä ilmassa

Tästä saatu tulos vähennetään kokonais- O₂ tarpeesta, jolloin saadaan typen tarve.

$$(N_{O_2 (TEOR)} / m_{pa}) * (1/0,21) - (N_{O_2 (TEOR)} / m_{pa}) = \text{typen tarve (kmol/kg}_{pa}) \quad (\text{Kaava 5})$$

Savukaasujen määrä ja koostumus lasketaan palamisreaktioiden avulla. Näiden avulla nähdään mitä reaktiotuotteita palamisessa syntyy ja kuinka paljon.



Näin ollen kussakin palamisreaktiossa syntyneitä reaktiotuotteita syntyy yhtä paljon moleina kuin polttoaineessa on sitä synnyttävää palavaa komponenttia. Savukaasuihin siirtyy myös typpeä sekä muut polttoaineen palamattomat komponentit. (Huhtinen & Kettunen & Nurminen & Pakkanen, 2000, s.346)

$$N_{sk (TEOR)} / m_{pa} = n_c + n_{h_2} + n_s + 3,76 * N_{O_2 (TEOR)} / m_{pa} + n_n + n_{h_{20}} \quad (\text{Kaava 6})$$

Missä, $N_{sk (TEOR)} / m_{pa}$ = savukaasujen määrä polttoainekiloa kohti (kmol/kg_{pa})

n_c = hiilen määrä kosteassa polttoaineessa (kmol/kg_{pa})

n_{h_2} = vedyn määrä kosteassa polttoaineessa (kmol/kg_{pa})

n_s = rikin määrä kosteassa polttoaineessa (kmol/kg_{pa})

$N_{O_2 (TEOR)} / m_{pa}$ = edellä laskettu ilman tarve (kmol/kg_{pa})

n_n = typen määrä kosteassa polttoaineessa (kmol/kg_{pa})

$n_{h_{20}}$ = veden määrä kosteassa polttoaineessa (kmol/kg_{pa})

Alla olevassa taulukossa on sama asia esitetty taulukkomuodossa.

Yhdiste	yhdisteen määrä		savukaasumäärä (kmol/kg pa)	osuus savukaasuissa (%) kuiva	osuus savukaasuissa (%) kostea
	polttoaineessa (kmol/kg pa)	reaktiotuote			
C	0,0189	CO ₂	0,0189	20,19 %	13,70 %
H ₂	0,0138	H ₂ O	0,0444		32,18 %
H ₂ O	0,0305	H ₂ O			
S	0,00000	SO ₂	0,00000	0,00 %	0,00 %
O ₂	0,0060				
N ₂	0,0001	N ₂	0,0746	79,81 %	54,13 %

YHT. KOSTEAT

SK

0,138 kmol/kg pa

YHT. KUIVAT

SK

0,138-0,044=0,094 kmol/kg pa

Taulukko 7. Savukaasumäärät

Edellä lasketut savukaasumäärät saadaan muutettua kiloiksi kertomalla moolimäärät molekyylipainoilla. Samalla tavalla savukaasumäärät saadaan kuutioiksi kertomalla moolimäärät komponenttien mooliilavuuksilla. Alla olevassa taulukossa on tehty muunnokset.

Yhdiste	Määrä savu-		Määrä savukaa-	Mooliilavuus	Määrä savukaa-
	kaasuissa	molekyylipaino			
	(kmol/kg pa)	(kg/kmol)		(m ³ /kmol)	
CO ₂	0,0189	44,01	0,831	22,26	0,420
H ₂ O	0,0444	18,016	0,799	22,4	0,994
SO ₂	0,00000	64,06	0,000	21,98	0,000
N ₂	0,0746	28,02	2,091	22,4	1,672
YHT.	0,13788		3,751		3,086

Taulukko 8. Savukaasumäärät eri tavoin ilmaistuna.

Toivalan biolämpölaitoksella savukaasun happipitoisuus on noin 5 %. Tällöin ilmakerroin saadaan ratkaistua seuraavasti;

$$\text{Ilmakerroin } \lambda = 21 / (21 - \text{savukaasun happipitoisuus}) = \lambda \quad (\text{Kaava 8})$$

Missä, Ilmakerroin = ilmaylimäärän kerroin
Savukaasun happipitoisuus = savukaasun happipitoisuus (%)

Laskennallisesti ilmaylimäärä siirtyy savukaasuun suoraan ja todelliset savukaasut ovat ilmakertomella 1 laskettujen teoreettisten savukaasun ja ilmaylimäärän summa. Kun tiedetään ilmakerroin, voidaan laskea ilmaylimäärä ja sen hapen ja typen osuudet.

$$\text{Ilmaylimäärä} = \text{Ilmakerroin} * (N_{O_2 (TEOR)} / m_{pa}) * (1/0,21) \quad (\text{Kaava 9})$$

$$\text{Josta hapen osuus} = 0,21 * \text{Ilmakerroin} * (N_{O_2 (TEOR)} / m_{pa}) * (1/0,21)$$

$$\text{Typen osuus} = 0,79 * \text{Ilmakerroin} * (N_{O_2 (TEOR)} / m_{pa}) * (1/0,21)$$

Missä, Ilmakerroin = ilmaylimäärän kerroin
($N_{O_2 (TEOR)} / m_{pa}$) * (1/0,21) = palamiseen kuluvan hapen tarve (kmol/kg_{pa})

ILMAKERROIN 1+	0,31
ILMAYLIMÄÄRÄ	0,029269 kmol/kg pa
josta happea 21%	0,0061 kmol/kg pa
ja typpeä 79%	0,0231 kmol/kg pa

Taulukko 9. Savukaasun laskettu ilmaylimäärä Toivalassa.

Yhdiste	Määrä savu- kaasuissa (λ=1) (kmol/kg pa)	ilmayli- määrä (kmol/ kg pa)	yht. (kmol/kg pa)	osuus savu- kaasuissa (%) kuiva	osuus savu- kaasuissa (%) kosteaa
CO2	0,0189		0,0189	15,38 %	11,30 %
H2O	0,0444		0,0444		26,54 %
SO2	0,00000		0,00000		
N2	0,0746	0,0231	0,0978	79,61 %	58,48 %
O2		0,0061	0,0061	5,01 %	3,68 %

YHT.	YHT. KOS- TEAT SK	0,16715	kmol/kg pa
	YHT. KUIVAT SK	0,16715- 0,0444=0,12278	kmol/kg pa

Taulukko 10. Savukaasun ilmamäärät

Reaktiotuotteen määrä savukaasuissa saadaan kertomalla ilmaylimäärä reaktiotuotteen molekyylipainolla. Jotta päästään laskemaan savukaasupesurin tehoa, on ensin laskettava veden osuus kuivissa savukaasuissa.

$$\text{Määrä savukaasuissa kiloina} = \text{ilmaylimäärä} * M \quad (\text{Kaava 11})$$

Missä, Määrä savukaasuissa kiloina = reaktiotuotteen määrä savukaasuissa (kg/kg_{pa})
 Ilmaylimäärä = edellä lasketut reaktiotuotteen ilmaylimäärät (kmol/kg_{pa})
 M = Reaktiotuotteen molekyylipaino (kg/kmol)

Todellinen veden osuus savukaasuissa lasketaan seuraavasti;

$$\text{Veden osuus savukaasuissa } \Delta X = \text{H2O määrä} / \text{kuivat savukaasut} \quad (\text{Kaava 12})$$

Missä, H2O määrä = veden osuus savukaasuissa (kg/kg_{pa})
 Kuivat savukaasut = Kuivien savukaasujen osuus kokonais- savukaasuista (savukaasut yhteensä – veden osuus savukaasuista)

Yhdiste	Määrä savu- kaasuissa (kmol/kg pa)	Molekyylipaino (kg/kmol)	Määrä savukaa- suissa (kg/kg pa)	Osuus savukaa- suissa (%)
CO2	0,0189	44,01	0,831	18,2 %
H2O	0,0444	18,016	0,799	17,5 %
SO2	0,00000	64,06	0,000	0,0 %
N2	0,0978	28,02	2,739	60,0 %
O2	0,0061	32	0,197	4,3 %

YHT.	4,566	100,0 %
kuivat savukaasut	3,767	
TODELLINEN VE- DEN OSUUS SAVU- KAASUISSA	0,21	kg/kg _{pa} = ΔX

Taulukko 11. Reaktiotuotteiden osuus savukaasuissa ja ΔX.

Laskentaa varten luotiin vielä tehopistetaulukko, jossa on laskettu kullekin tehopisteelle oma savukaasu lämmöntalteenottoteho ilman lämpöpumppua ja lämpöpumpun kanssa. Laskuissa on huomioitu kaukolämpöverkon paluuveden lämpötila, polttoaineen kosteus, savukaasun happipitoisuus, kattilan hyötysuhde, polttoaineen tehollinen lämpöarvo sekä savukaasun lämpötila ennen pesuria. Taulukossa on laadittu 8 MW:lle, 6 MW:lle, 4 MW:lle ja 2 MW:lle kaukolämpöveden paluulämpötilat ja niiden entalpiat. Taulukkoon on laadittu myös polttoainesekoitukset 8 MW:n ja 6MW:n kohdissa, koska niissä tehopisteissä poltetaan saman verran puuta ja turvetta. Laskennassa otetaan myös tehopisteissä 6 ja 7 huomioon, jos kattila käyttäisikin pelkästään puuta polttoaineena. Tässä tapauksessa polttoaineen laatu olisi parempaa, eli sen kosteus olisi noin 40 %, 55 %:n sijaan. Entalpia muutosten ja savukaasumassavirran avulla saadaan laskettua savukaasun teho. Taulukossa entalpia ero Δh entalpia, saadaan kun vähennetään savukaasun lämpötilan entalpiasta savukaasun loppulämpötilan entalpia. Koska kullekin tehopisteelle määrättiin tietty paluuveden lämpötila, savukaasun loppulämpötila peruspesurissa on noin 4 korkeampi kuin paluuveden lämpötila. Lämpöpumppua käytettäessä on käytetty 10 C astetta alemmaa lämpötilaa, kuin paluuvesi.

Savukaasun lämpötilalle entalpian määrittäminen tapahtuu seuraavasti;

$$h_{\text{savukaasu}} = c_{p, \text{ksk}} * T + \Delta x * (c_{p, \text{H}_2\text{O}} * T + L) \quad (\text{Kaava 12})$$

Missä, $c_{p, \text{ksk}}$ = kuivan savukaasun ominaislämpö (kJ/kg \cdot C)
 T = savukaasun lämpötila ennen pesuria (C)
 Δx = kg vettä / kg savukaasuja (kgvettä/kg ksk)
 $c_{p, \text{H}_2\text{O}}$ = veden ominaislämpö (kJ/kg \cdot C)
 L = veden höyrystymislämpö (kJ/kg \cdot C)

Savukaasun loppulämpötilalle entalpiaa määritettäessä, katsotaan ensin Mollier diagrammista savukaasun loppulämpötilaa vastaavan X:n arvo. Entalpia lasketaan samalla tavalla kuin savukaasun lämpötilalle ennen pesuria seuraavasti;

$$h_{\text{skloppu}} = c_{p, \text{ksk}} * T + x * (c_{p, \text{H}_2\text{O}} * T + L) \quad (\text{Kaava 13})$$

Missä, $c_{p, \text{ksk}}$ = kuivan savukaasun ominaislämpö (kJ/kg \cdot C)
 T = savukaasun loppulämpötila (C)
 x = kg vettä / kg savukaasuja (kgvettä/kg ksk)
 $c_{p, \text{H}_2\text{O}}$ = veden ominaislämpö (kJ/kg \cdot C)
 L = veden höyrystymislämpö (kJ/kg \cdot C)

Näistä saadaan laskettua entalpiaero savukaasun lämpötilan ja savukaasun loppulämpötilan välille seuraavasti;

$$\Delta h = h_{\text{savukaasu}} - h_{\text{skloppu}} \quad (\text{Kaava 14})$$

Missä, $h_{\text{savukaasu}}$ = savukaasun lämpötilan entalpia ennen pesuria (kJ/kg)

$h_{skloppu} = \text{savukaasun loppulämpötilan entalpia (kJ/kg)}$

Teho [MWh]	KL-paluu lämpötila [C]	Savukaasun loppulämpötila [C]	Entalpia [kJ/kg]	Δ Entalpia ero [kJ/kg]	Polttoaine	Kosteus [%]
8,00	51	55	354,3	211,3	Puu/turve 50/50 %	puu 55% ja turve 33%
6,00	50	54	340,1	225,6	Puu/turve 50/50 %	puu 55% ja turve 33%
6,00	50	54	340,1	372,0	Puu 100%	puu 55%
4,00	50	54	340,1	372,0	Puu 100%	puu 55%
2,00	49	53	320,7	391,4	Puu 100%	puu 55%
8,00	51	55	354,3	176,2	Puu 100%	puu 40%
6,00	50	54	340,1	190,4	Puu 100%	puu 40%

Taulukko 13. Savukaasun loppulämpötilan entalpia ja polttoaine osuudet.

Jotta saadaan laskettua jokaiselle tehopisteelle pesurin LTO-teho, on laskettava ensin kullekin pisteelle polttoaineteho. Kahdessa ensimmäisessä tehopisteessä, 8MW ja 6MW lasketaan yhteistalteenotto teho, koska näissä kahdessa pisteessä poltetaan turvetta ja puuta samaan aikaan. Esimerkiksi pisteessä 1 teho on 8MW, josta 4MW tuotetaan puulla ja toiset 4MW tuotetaan turpeella. Näin ollen lasketaan kummankin polttoaineen tuottama LTO-teho ja ne lasketaan yhteen. Muissa pisteissä lasketaan vain puun tuottamalla arvoilla. Polttoaineteho lasketaan seuraavalla tavalla;

$$\text{Teho} * 3600 = \text{Polttoaineteho (MJ)} \quad (\text{Kaava 14})$$

Missä, Teho=kattilan teho (MW)

Tämän jälkeen lasketaan polttoaineenmassavirta;

$$\text{Polttoaineteho}/(\text{Hu} * \eta) / 3600 = qv_{pa} \quad (\text{Kaava 15})$$

Missä, Hu= Polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)

η = kattilan hyötysuhde (%)

qv_{pa} = polttoaineen massavirta (kg/s)

Polttoaineen massavirran ja kuivien savukaasujen avulla saadaan ratkaistua savukaasun massavirta seuraavasti;

$$qv_{pa} * \text{kuivat savukaasut} = qv_{sk} \quad (\text{Kaava 16})$$

Missä, qv_{pa} = polttoaineen massavirta (kg/s)

kuivat savukaasut = kuivien savukaasujen osuus kaikista savukaasuista (kg/kgpa)

qv_{sk} = savukaasun massavirta (kg/s)

Kun savukaasun massavirta on ratkaistu, saadaan laskettua savukaasupesurin teho kullekin tehopisteelle entalpia eron ja savukaasun massavirran avulla seuraavasti;

$$q_v \cdot \Delta h = \text{Savukaasupesurin LTO teho (kW)} \quad (\text{Kaava 17})$$

Missä, q_v sk = savukaasun massavirta (kg/s)

$$\Delta h = h_{\text{savukaasu}} - h_{\text{skloppu}} \text{ (kJ/kg)}$$

Alla olevassa taulukossa on edellä lasketut laskut taulukko muodossa;

Teho	Teho [MJ]	Polttoaine-teho [MJ]	Polttoaine massavirta [kg/h]	Polttoaine massavirta [kg/s]	Savukaasun massavirta [kg/s]	Pesurin LTO teho [MW]
8	28800	33103,45	3798,26	1,06	5,20	1,10
6	21600	24827,59	2848,69	0,79	3,90	0,88
6	21600	24827,59	3027,75	0,84	3,17	1,18
4	14400	16551,72	2018,50	0,56	2,11	0,79
2	7200	8275,86	1009,25	0,28	1,06	0,41
8	28800	33103,45	4037,01	1,12	5,63	0,99
6	21600	24827,59	3027,75	0,84	4,22	0,80

Taulukko 8. Pesurin teho eri tehopisteissä.

Lämpöpumpulla voidaan savukaasujen loppulämpötilaa pudottaa yli 10 celsius astetta. Lämpöpumpulla saatava lisäteho lasketaan samalla tavalla kuin yllä laskettu pesurin LTO-teho. Esimerkiksi, jos pesurissa savukaasun loppulämpö tila oli tehopisteessä 1, 54 Celsius astetta, tällöin lämpöpumpulla voidaan saada savukaasun loppulämpötilaksi 44 Celsius astetta. Mollier diagrammista katsotaan savukaasun loppulämpötilalle, 44 Celsius asteelle vastaava X:n arvo, aivan kuten aikaisemmassa vaiheessa katsottiin. Uudelle savukaasu loppulämpötilalle saadaan entalpia laskettua seuraavalla tavalla;

$$h_{\text{skloppu pumppu}} = c_{pksk} \cdot T + x \cdot (c_{pH2O} \cdot T + L)$$

Missä, c_{pksk} = kuivan savukaasun ominaislämpö (kJ/kg_{sk} C)

T = savukaasun loppulämpötila (C)

x = kg vettä / kg savukaasuja (kgvettä/kg_{sk})

c_{pH2O} = veden ominaislämpö (kJ/kgH₂O C)

L = veden höyrystymislämpö (kJ/kgH₂O)

Lämpöpumpulla saatava lisäteho lasketaan savukaasun massavirran ja entalpia muutoksen avulla. Aiemmin laskettiin savukaasun entalpia pesurille. Tästä entalpiasta vähennetään uusi savukaasun loppulämpötilan entalpia seuraavalla tavalla;

$$h_{skloppu} - h_{skloppu\ pumppu} = \Delta h_2$$

(Kaava 14)

Missä, Δh_2 = lämpöpumpulla saatava entalpia muutos (kJ/kg)

$h_{skloppu}$ = savukaasun loppulämpötila pesurilla

$h_{skloppu\ pumppu}$ = savukaasun loppulämpötilan entalpia lämpöpumpulla (kJ/kg)

Ja edelleen lisäteho saadaan seuraavasti;

$$q_{v\ sk} * \Delta h_2 = \text{lämpöpumpun lisäteho (kW)}$$

(Kaava 17)

Alla olevassa taulukossa on laskettu edellä lasketut laskut.

Savukaasun loppulämpötila-pumpun kanssa => -10C		entalpia kJ/kg	Δ Entalpia ero kJ/kg	Pumpulla saatava LTO teho [kW]	Pumpulla saatava LTO lisäteho [MW]
45	213,0	141,4	735,5	0,74	
44	198,9	141,2	550,9	0,55	
44	198,9	141,2	447,2	0,45	
44	198,9	141,2	298,2	0,30	
43	190,1	130,6	137,9	0,14	
45	213,0	141,4	796,2	0,80	
44	198,9	141,2	596,4	0,60	

Taulukko 9. Lämpöpumpulla saatava lisäteho.

Savukaasupesurin teho ja lämpöpumpusta saatavat tehot on laskettu yhteen alla olevassa taulukossa.

Pesuri+pumppu yhteisteho [MW]	tehon ollessa
1,84	8MW
1,43	6MW
1,93	6MW
1,08	4MW
0,55	2MW
1,79	8 MW
1,40	6 MW

Taulukko 10. Savukaasupesurin ja lämpöpumpun yhteisteho eri tehopisteillä.

Liitteessä kaksi on esitetty kuvaaja muodossa vuoden 2017 tuotantotiedoilla bion teho, savukaasupesurin teho, lämpöpumpun tuoma lisäteho sekä öljyn tehot.

5.2 Säästö ja investointi laskennat

Edellä olevia laskentoja käytettiin hyväksi toisessa Excel ohjelmassa, jossa oli vuoden 2017 Toivalan biolämpökeskuksen ja öljylämmityskeskuksen tuotantotiedot tunti tunnilta. Vuonna 2017 biokattila tuotanto oli noin 30000 MWh ja öljyn noin 1400 MWh. Vertailun vuoksi laskennassa tehtiin myös samat laskelmat vuoden 2012 tiedoilla, koska vuonna 2017 tuotanto oli normaalia lämpimämpi. Nii- den tietojen avulla saatiin laskettua edellä lasketut savukaasupesurin tehot tietyssä tehopisteessä ja sen avulla saadaan laskettua kiinteän polttoaineen säästöt ja öljyn säästöt.

Vuoden 2017 tiedoilla saatiin Excelin avulla savukaasupesurilla saatavaksi kiinteän polttoaineiden säästökseksi 5123 MWh ja öljyn säästökseksi noin 155 MWh. Savukaasupesurilla + lämpöpumpulla saa- daan kiinteitä polttoaineita säästettyä noin 7000 MWh ja öljyä noin 230 MWh. Polttoaineilta saatava rahallinen säästö saadaan kertomalla polttoaineen hinta ja säästetty energiamäärä keskenään seu- raavasti;

$$\text{Säästö} = \text{säästetty energia} * \text{pa hinta} \quad (\text{Kaava 20})$$

Missä, $\text{Säästö} = \text{säästetystä energiasta saatava rahallinen säästö [€]}$
 $\text{säästetty energia} = \text{polttoaineen säästö [MWh]}$
 $\text{pa hinta} = \text{polttoaineen hinta [€/MWh]}$

Vuoden 2017 tuotantotiedoilla savukaasuista saatavat polttoaine säästöt on laskettu alla olevassa taulukossa;

Savukaasupesuri	
KPA säästöt [MWh/vuosi]	Öljyn säästöt [MWh/vuosi]
5123	155
KPA hinta [€/MWh]	Öljyn hinta [€/MWh]
18	70
KPA säästöt [€/vuosi]	Öljyn säästöt [€/vuosi]
92214	10850
Yhteensä [€/vuosi]	103064
Savukaasupesuri + lämpöpumppu	
KPA säästöt [MWh/vuosi]	Öljyn säästöt [MWh/vuosi]
7000	230
KPA hinta [€/MWh]	Öljyn hinta [€/MWh]
18	70
KPA säästöt [€/vuosi]	Öljyn säästöt [€/vuosi]
126000	16100
Yhteensä [€/vuosi]	142100

Taulukko 11. Polttoainesäästöt

Savukaasupesurilla rahallista säästöä saadaan kiinteälle polttoaineelle hieman yli 92000€/vuosi ja öljylle hieman yli 10000 €/vuosi, eli yhteensä noin 100000 €/vuosi. Vastaavasti savukaasupesurilla + lämpöpumpulla saatavat kiinteän polttoaineen säästöt ovat noin 126000 €/vuosi ja öljylle noin 16000 €/vuosi, eli yhteensä noin 140000 €/vuosi. Säästölaskelmasta voidaan huomata, että savukaasupesuri + lämpöpumppu yhdistelmällä saadaan säästettyä enemmän polttoaineita kuin tavallisella savukaasupesurilla. Säästöä saadaan lämpöpumpulla noin 38000 €/vuosi enemmän kuin tavallisella pesurilla.

Kun tarkastellaan kannattavuutta savukaasupesurille ilman lämpöpumppua ja lämpöpumpun kanssa, täytyy laskennoissa ottaa huomioon investoinnin suuruus, polttoaineista saatavat säästöt sekä käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Alla olevassa taulukossa on lähtötiedot laskennalle.

Koroton takaisinmaksuaika saadaan investointi jakamalla kiinteän polttoaineen ja öljyn säästöjen summalla ja vähentämällä se käyttö- ja kunnossapitokustannuksilla.

$$KTMA = \text{Investointi} / (\text{KPA S} + \text{öljy S}) - \text{K\&K} \quad (\text{Kaava 21})$$

Missä, KTMA = koroton takaisinmaksuaika [vuosia]
 Investointi = investoinnin suuruus [€]
 KPA S = Kiinteän polttoaineen säästöt [€]
 Öljy S = Öljyn säästöt [€]
 K&K = Käyttö- ja kunnossapito kustannukset [€]

Savukaasupesuri

Investointi	██████████	€
Käyttö- ja kunnossapitokustannukset	██████████	€
Koroton takaisinmaksuaika	██████	a
Sisäinen korkokanta	██████	%

Savukaasupesuri + lämpöpumppu

Investointi	██████████	€
Käyttö- ja kunnossapitokustannukset + huolto	██████████	€
Omakäyttösähkö	██████	MWh/MWh
Omakäyttösähkö	██████	€
Koroton takaisinmaksuaika	██████	a
Sisäinen korkokanta	██████	%

Taulukko 12. Investoinnit ja kustannukset

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

5.2.1 Lisämyynnin mahdollisuus

[REDACTED]

Savukaasupesuri

KPA säästöt [MWh/vuosi]

Öljyn säästöt [MWh/vuosi]

KPA hinta [€/MWh]

Öljyn hinta [€/MWh]

KPA säästöt [€/vuosi]

Öljyn säästöt [€/vuosi]

Yhteensä [€/vuosi]

Savukaasupesuri + lämpöpumppu

KPA säästöt [MWh/vuosi]

Öljyn säästöt [MWh/vuosi]

KPA hinta [€/MWh]

Öljyn hinta [€/MWh]

KPA säästöt [€/vuosi]

Öljyn säästöt [€/vuosi]

Yhteensä [€/vuosi]

Taulukko 13. Lisämyynti säästöt

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

Savukaasupesuri

Investointi

€

Käyttö- ja kunnossapitokustannukset

€

Koroton takaisinmaksuaika

a

Sisäinen korkokanta

%

Savukaasupesuri + lämpöpumppu

Investointi

€

Käyttö- ja kunnossapitokustannukset +
huolto

€

Omakäytösähkö

MWh/MWh

Omakäytösähkö

€

Koroton takaisinmaksuaika

a

Sisäinen korkokanta

%

Taulukko 14. Lisämyynnin kautta saatava kannattavuus

[REDACTED]

[REDACTED]

5.2.2 Lämpöpumpun käytön rajoitus

[REDACTED]

[REDACTED]

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vuoden 2017 tiedoilla saatiin Excelin avulla savukaasupesurilla saatavaksi kiinteän polttoaineiden säästökseksi noin 5000 MWh/vuosi ja öljyn säästökseksi noin 150 MWh/vuosi. Savukaasupesurilla + lämpöpumpulla saadaan kiinteitä polttoaineita säästettyä noin 7000 MWh/vuosi ja öljyä noin 230 MWh/vuosi. Savukaasupesurilla rahallista säästöä saadaan kiinteälle polttoaineelle hieman yli 92000€/vuosi ja öljylle hieman yli 10000 €/vuosi, eli yhteensä noin 103000 €/vuosi. Vastaavasti savukaasupesurilla + lämpöpumpulla saatavat kiinteän polttoaineen säästöt ovat noin 125000 €/vuosi ja öljylle noin 16000 €/vuosi, eli yhteensä noin 141000 €/vuosi. Säästölaskelmasta voidaan huomata, että savukaasupesuri + lämpöpumppu yhdistelmällä saadaan säästettyä enemmän polttoaineita kuin tavallisella savukaasupesurilla. Säästöä saadaan lämpöpumpulla noin 38000 €/vuosi enemmän kuin tavallisella pesurilla.

Tällä hetkellä savukaasupesurin hankkiminen ei ole kannattavaa, koska polttoaineista saatavat säästöt ovat liian alhaiset sekä lämmöntuotanto on liian vähäistä tarvittavaan investoinnin suuruuteen nähden.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

Antila Anna-Maija, Karppinen Maarit, Leskelä Markku, Mölsä Heini, Pohjakallio Maija. 2008. Tekniikan kemia, Edita.

Caligo CSX HP -savukaasupesurijärjestelmä -esite (pdf). 2017. Caligo Industria Oy. [Viitattu: 2018-03-01] Saatavissa: http://www.caligoindustria.com/files/Caligo_CSX_Brochure_FIN_2017.pdf

Caligo savukaasupesuri pdf. [Viitattu: 2018-02-28] Saatavissa: http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf

Huhtinen Markku, Kettunen Arto, Nurminen Pasi, Pakkanen Heli. 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki. Edita, Opetushallitus

Kommila, Mika, 2018-02-09. Caligo Industria Oy [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Valteri Partanen

Nydal Roald, 2002, Käytännön kylmätekniikka. Helsinki. Suomen kylmäyhdistys ry

Savon Voiman sisäiset tiedostot, 2018, ei julkisessa tiedossa

Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. 2014. Promaint. [Viitattu: 2018-02-18] Saatavissa: <http://www.promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuriparantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>

Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Eija Alakangas, Markus Hurskainen, Jaana Laatikainen-Luntama, Jaana Korhonen. VTT. [Viitattu: 2018-02-11] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>

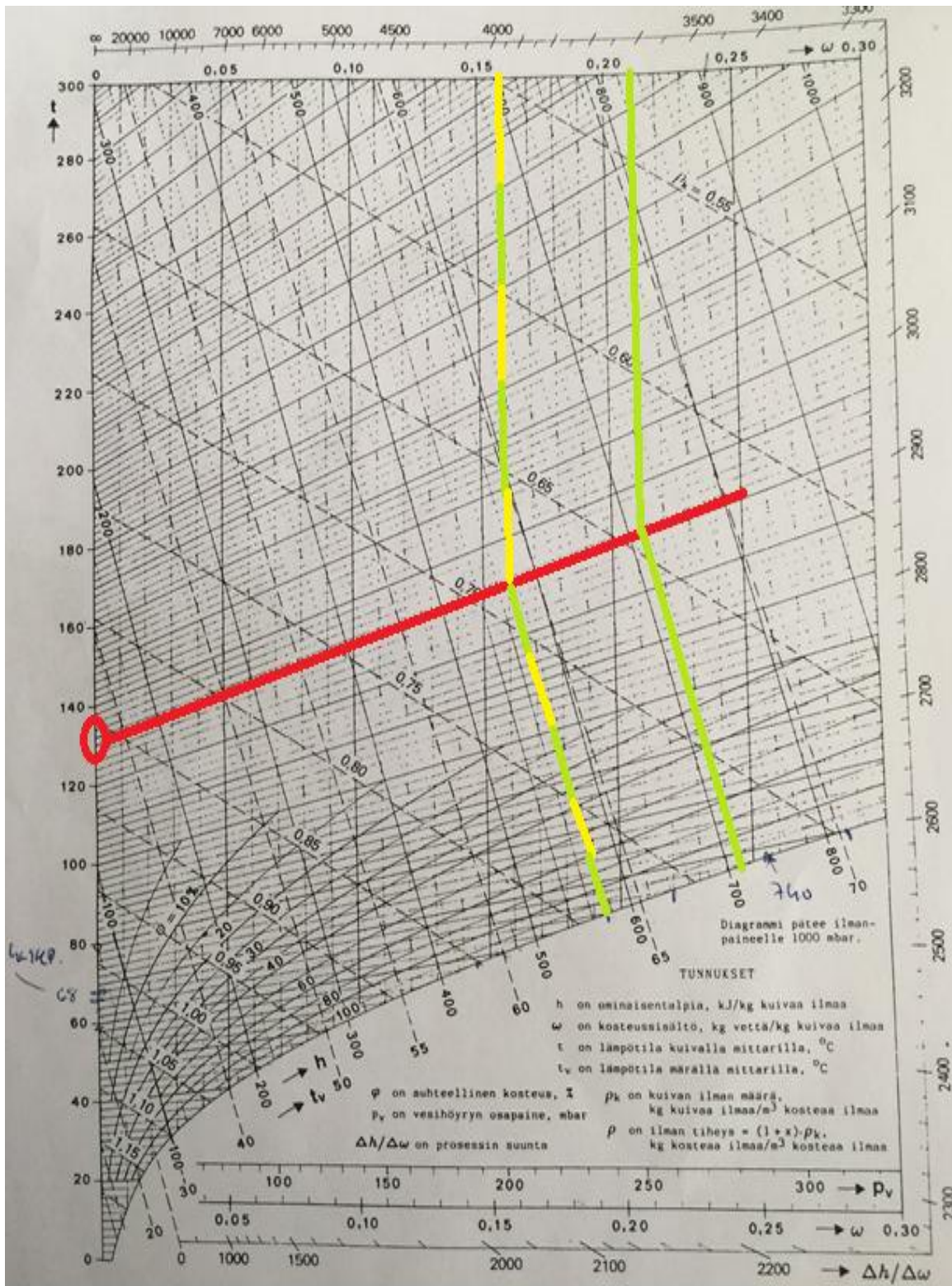
SV esittelykalvot. 2017

Tietoa meistä. Savon Voima Oyj. [Viitattu: 2018-2-12] Saatavissa: <https://www.savonvoima.fi/konserni/tietoa-meista/>

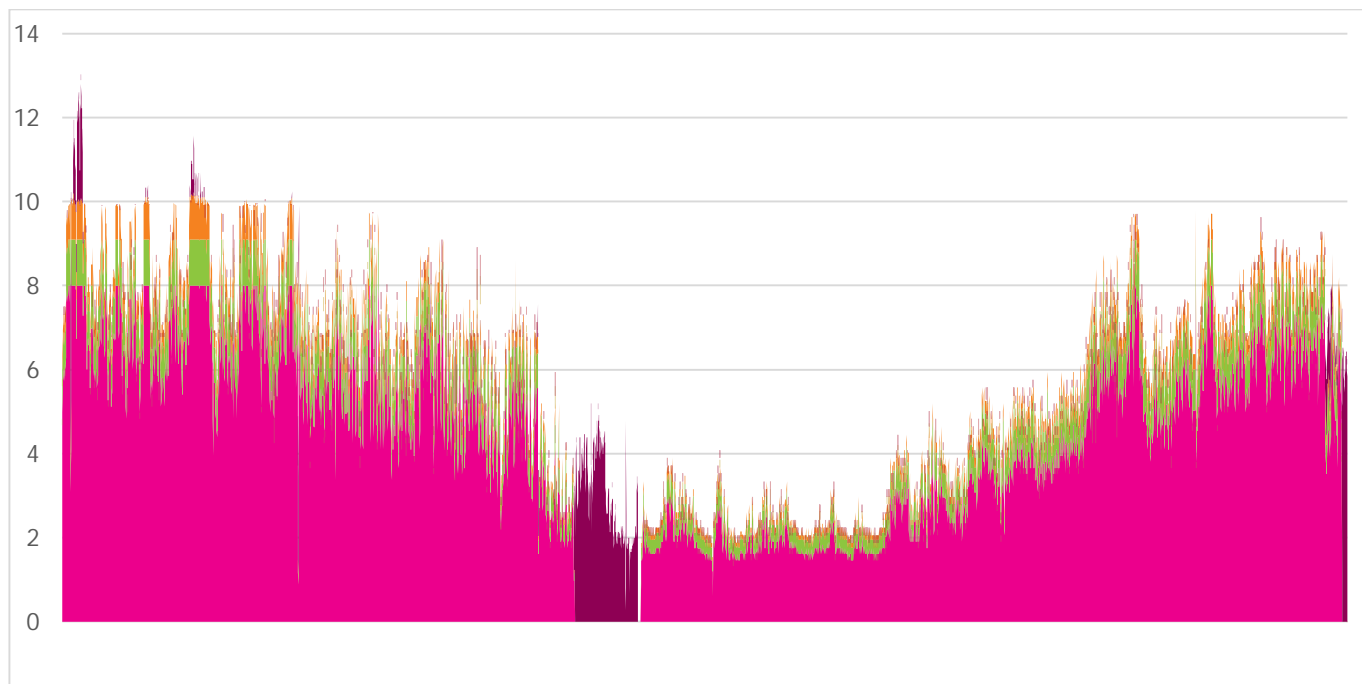
Täytekappaleet. Grönmark. [Viitattu: 2018-02-13] Saatavissa: <https://www.gronmark.fi/tuote/taytekappaleet/>

Wärtsilä BioPower Oy. 2009. Kattilalaitoksen käyttöohje

LIITE 1: MOLLIER DIAGRAMMI



LIITE 2: TEHOJEN JAKAUTUMINEN LISÄMYYNILLÄ (BIO, SAVUKAASUPESURI, LÄMPÖPUMPUN LISÄTEHO, ÖLJY)



Missä, Bio = pinkki
Savukaasupesuri = vihreä
Lämpöpumpun lisäteho = oranssi
Öljy = lila

LIITE 3: CALIGO INDUTRIAN LASKENNAT EXCEL (EI JULKINEN)