

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka / Käynnissäpito

Tuomas Pekkola

KANNATTAVUUSVERTAILU MIKROKAASUTURBIINILAITOKSEN JA
HÖYRYKATTILAKYTKENNÄN VÄLILLÄ

Opinnäytetyö 2015

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin Kymenlaakson jäte Oy:n ja Kymenlaakson ammattikorkeakoulun toimeksiannosta. Haluan kiittää Kymenlaakson jäte Oy:n laatu- ja kehityspäällikkö Annika Aalto-Partasta, sekä Kymenlaakson ammattikorkeakoulun tutkimusinsinööri Tuomo Pimiää työn ohjauksesta.

Kiitokset kuuluvat myös Kymenlaakson jäte Oy:n käyttöpäällikkö Paavo Savolaiselle ja laitospäällikkö Aki Koivulalle.

Lisäksi haluan kiittää avopuolisoani ja perhettäni vankkumattomasta tuesta opintojeni aikana.

Lappeenrannassa 30.12.2014

Tuomas Pekkola

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka

PEKKOLA, TUOMAS

Kannattavuusvertailu mikroturbiinilaitoksen ja
höyrykattilakytkennän välillä

Opinnäytetyö

44 sivua + 3 liitesivua

Työn ohjaaja

Tutkimusinsinööri Tuomo Pimiä

Toimeksiantaja

Kymenlaakson Jäte Oy

Maaliskuu 2015

Avainsanat

Mikrokaasuturbiini, höyrykattila, hyötysuhde,
kannattavuus, mikroturbiinilaitos, kaatopaikkakaasu.

Opinnäytetyössä tarkastellaan teoreettisen höyrykattilalaitoksen kannattavuutta jo olemassa olevan mikrokaasuturbiinilaitoksen tilalla Kymenlaakson Jäte Oy:n Keltakankaan jätekeskuksessa. Tällä hetkellä pumpatusta kaasusta saadaan hyödynnettyä energiantuotantoon vain noin 55 prosenttia, ja tämä täytyy aktiivihiilisuodattaa, jotta se voidaan polttaa turbiinissa. Työssä pohditaan, olisiko kannattavaa polttaa kaatopaikkakaasu suodattamatta suoraan höyrykattilassa, ja täten välttää suodatuksesta aiheutuvat kustannukset.

Työssä tutkitaan erityyppisiä kattilaratkaisuja ja etsitään teoreettisesta näkökulmasta biokaasunpolton kannalta sopivinta höyrykattilakytkentää yhdistettyyn lämmön- ja höyryntuotantoon.

Tuloksista on pääteltävissä, että tässä noin 200 kWe:n kokoluokassa ei ole kannattavaa rakentaa höyryturbiinilaitosta, jonka polttoaineena käytetään kaatopaikkakaasua. Opinnäytetyön edetessä työhön lisättiin osuus, jossa tarkastellaan mikrokaasuturbiinilaitoksen tuottaman sähkön hyödyntämismahdollisuutta toimistorakennuksen lämmityksessä.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Technology

PEKKOLA, TUOMAS

steam

Bachelor's Thesis

Supervisor

Commissioned by

March 2015

Keywords

Viability Comparison Between Micro Gas Turbine and
Boiler Plant

44 pages + 3 pages of appendices

Tuomo Pimiä, Research Engineer

Kymenlaakson Jäte Oy

micro gas turbine, steam boiler, efficiency, profitability,
landfill gas.

In this bachelor's thesis, the theoretical profitability of a steam boiler plant compared to an existing micro gas turbine plant located in the Kymenlaakson Jäte Oy Keltakangas landfill is examined. At the present moment, only approximately 55 percent of the pumped biogas can be used for energy production, and a major portion of this gas must be active carbon filtered in order to combust the gas in the micro turbine.

In this thesis, it is examined if it would be profitable to combust the landfill gas directly in a steam boiler, thus preventing the annual costs of active carbon filtering. Different steam boiler solutions regarding the combustion of the landfill gas are examined for combined heat and power production.

The conclusion of this thesis is that it would not be financially viable to construct a small 200 kWe scale combined heat and power production steam boiler/turbine plant to utilize the landfill gas as a fuel as there are better options available. As the work on the thesis progressed, a section was added where the potential use and possibilities to heat an office building with the electricity produced with the micro gas turbine plant is also examined.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

| | | |
|---|-------------------------------------|----|
| 1 | JOHDANTO | 7 |
| 2 | YRITYSESITTELY | 7 |
| 3 | NYKYTILANNE | 8 |
| | 3.1 Kaatopaikkakaasu | 8 |
| | 3.2 Metaani | 9 |
| | 3.3 Kaasun kerääminen | 10 |
| | 3.4 Kaatopaikkakaasun käyttö | 10 |
| | 3.5 Mikroturbiinilaitos | 11 |
| 4 | KAASUTURBIINI | 13 |
| | 4.1 Kaasuturbiinin toimintaperiaate | 14 |
| | 4.2 Lämmön talteenotto | 15 |
| 5 | HÖYRYKATTILA | 18 |
| | 5.1 Höyrykattilan historiaa | 18 |
| | 5.2 Höyrykattilan toimintaperiaate | 19 |
| | 5.3 Eri voimalaitostyyppinä | 20 |
| | 5.4 Eri kattilatyyppejä | 21 |
| | 5.4.1 Luonnonkiertokattila | 22 |
| | 5.4.2 Pakkokiertokattila | 23 |
| | 5.4.3 Läpivirtauskattila | 24 |
| 6 | HÖYRYTURBIINI | 24 |
| | 6.1 Höyryturbiinin toiminta | 25 |

| | |
|---|----|
| 6.2 Höyryturbiinien jaottelu | 25 |
| Lauhdeturbiini | 26 |
| Vastapaineturbiini | 26 |
| 7 VERTAILUHÖYRYKATTILALAITOS | 26 |
| 7.1 Kattilan mitoitus | 27 |
| 7.2 Prosessi | 27 |
| 7.2.1 Kaatopaikkakaasun tiheys | 27 |
| 7.2.2 Kattilan hyötyteho | 29 |
| 7.2.3 Höyryn massavirta | 29 |
| 7.3 Teoreettinen hyötysuhde | 30 |
| 7.4 Kannattavuus | 31 |
| 7.5 Takaisinmaksuaika | 32 |
| 7.5.1 Mikroturbiinilaitoksen todellinen takaisinmaksuaika | 32 |
| 7.5.2 Teoreettinen takaisinmaksuaika | 33 |
| 8 POHDINTAA | 36 |
| 8.1 Jätelämpökattila ja ORC-prosessi | 37 |
| 8.2 Ylijäämäsähkön hyödyntäminen | 39 |
| 9 LÄHTEET | 43 |

LIITTEET

Liite 1. Mikrokaasuturbiinilaitoksen PI-kaavio.

Liite 2. Taulukko 1, eri pien-chp -laitosten kustannuksia.

Liite 3. Mittausraportti.

1 JOHDANTO

Kymenlaakson Jäte Oy:n Keltakankaan jätekeskuksessa hyödynnetään syntyvää kaatopaikkakaasua sähkön ja kaukolämmön tuotantoon. Kaatopaikkakaasu joudutaan kuitenkin aktiivihiilisuodattamaan ennen syöttöä mikroturbiineille, sillä kaasun vaihtelevasta laadusta ja mikroturbiinille liian korkeasta rikkidioksidipitoisuudesta johtuen osa kerätystä kaatopaikkakaasusta joudutaan polttamaan soihdussa. Kaatopaikkakaasun epäpuhtauksista johtuen arvioidusta syntyvästä kaasusta pystytään hyödyntämään vain noin kolmasosa, sillä kaasun vuotuiset suodatuskustannukset ovat noin 20 000 euroa.

Työssä tarkastellaan olisiko järkevää syöttää kaatopaikkakaasu puhdistamatta suoraan kaasupolttimella varustettuun höyrykattilaan, johon on kytketty kaukolämmön tuotantoon soveltuva vastapaineturbiini. Tarkastelussa vertaillaan nykyisen mikrokaasuturbiinilaitoksen tuottamaa energiaa mahdolliseen höyrykattilakytkentään eri käyttöasteilla. Työhön lisättiin myös mikroturbiinilaitoksella tuotetun ylijäämäsähkön hyödyntämismahdollisuuden tutkimista toimistorakennuksen lämmittämiseksi.

2 YRITYSESITTELY

Kymenlaakson jäte Oy on vuonna 1997 perustettu, kokonaan kuntien omistama voittoa tavoittelematon yhtiö. Yhtiön omistajina on yhdeksän kuntaa, joiden omistusosuus määräytyy kuntien asukaslukujen mukaan. Yhtiön toiminta-alueella asuu noin 191 000 asukasta. (Kymenlaakson Jäte Oy 2014.)

Kymenlaakson jäte Oy:n jätteenkäsittelykeskus ja toimisto sijaitsevat Kouvolan Keltakankaalla. Tämä vuonna 2001 valmistunut loppusijoitusalue on ollut vuodesta 2002 lähtien ainoa tavanomaisen jätteen loppusijoitusalue Kymenlaaksossa. Kymenlaakson jäte Oy:n ympäristöpäämääriin ja kehitystavoitteisiin kuuluu muun muassa kaatopaikkakaasun talteenoton nostaminen laskennallisesta maksimista 67 prosenttiin sekä hyötykäyttöön ohjattavan jätteen osuuden nostaminen 90 prosenttiin. (Kymenlaakson Jäte Oy 2014.)

Vuonna 2013 yhtiö vastaanotti 124 539 tonnia erilaisia jätteitä. Tästä määrästä 39,5 prosenttia sijoitettiin kaatopaikalle. Loppujätteen määrä oli 36 243 tonnia, josta ohjat-

tiin noin 92 prosenttia poltettavaksi Kotka Energia Oy:n hyötyvoimalaitokselle. Liikevaihto kasvoi vuodesta 2012 10,5 prosenttia, ja oli 13,29 miljoonaa euroa vuonna 2013. Liikevoitto oli 0,96 miljoonaa euroa eli 7,1 prosenttia liikevaihdosta. Tilikauden voitto oli 0,36 miljoonaa euroa. Liikevaihdon kasvu johtui asiakaskunnan laajentumisesta ja toiminnan määrän kasvusta. Vuoden 2013 lopussa yrityksen henkilöstömäärä oli 41. (Kymenlaakson Jäte Oy 2014.)

Kymenlaakson jäte Oy on saanut puolueettoman arvioijan, Bureau Veritaksen myöntämän laatusertifikaatin, joka on todistus siitä, että yhtiön toiminta noudattaa SFS-EN ISO 9001:2008 laatujärjestelmästandardia jäteneuvonnassa, jätteenkuljetusten hallinnoinnissa, jätteiden keräilyverkoston ylläpitämisessä ja jätteiden käsittelyssä sekä loppusijoituksessa. Kymenlaakson jäte Oy:llä on myös käytössään sertifioitu ympäristöjärjestelmä SFS EN ISO 14001. (Kymenlaakson Jäte Oy 2014.)

3 NYKYTILANNE

Kymenlaakson jäte Oy:n Keltakankaan kaatopaikalta pumpattiin vuoden 2013 aikana yhdestätoista kaivosta 1 068 433 m³ kaatopaikkakaasua. Tämä määrä on keskimäärin 60 prosenttia arvioidusta kaatopaikkakaasun kokonaistuotannosta. Pumpatusta kaatopaikkakaasusta pystyttiin käyttämään mikrokaasuturbiinilaitoksessa hyödyksi 672 073 m³ sähkön- ja lämmöntuotantoon. Loppuosa pumpatusta kaatopaikkakaasusta, 396 360 m³, poltettiin soihdussa. Mikroturbiinilaitoksen käyntiaste oli vuonna 2013 heikko ja kokonaiskäyttöaste 43 prosenttia. (Kymenlaakson Jäte Oy 2014.)

3.1 Kaatopaikkakaasu

Keltakankaalla syntyvän kaatopaikkakaasun pääkomponentit ovat metaani ja hiilidioksidi. Mittauspöytäkirjan mukaan kaasu sisältää noin 43 prosenttia metaania (CH₄), noin 34 prosenttia hiilidioksidia (CO₂) sekä pienen määrän (>5000ppm-51ppm) rikkivetyä (H₂S) ja noin yhden prosentin happea (O₂). (Kymenlaakson Jäte Oy 2014.) Rikkivety on haitallista mikrokaasuturbiinilaitokselle, ja tästä johtuen Keltakankaalla aktiivihiilisuodatetaan mikrokaasuturbiinille pumpattava kaasu. Loput 23 prosenttia on vesihöyryä. (Olli, Rinta-Kanto 2013, 5.) Kaatopaikkakaasussa esiintyy myös pieninä

pitoisuuksina useita fluori- ja kloorihiilivetyjä, sekä rikkiyhdisteitä. Rikkiyhdisteistä syntyy kaatopaikkakaasulle ominainen epämiellyttävä haju. Biokaasua syntyy kontrolloimattomasti kaatopaikoilla, tai sitä voidaan tuottaa kontrolloidusti biokaasureaktoreissa. Yksi keskikokoinen kaatopaikka tuottaa Suomessa kaatopaikkakaasua keskimäärin 200 – 400 m³/h ja tämän lisäksi jätevedenpuhdistamoissa, sekä teollisuuden mädättämöissä syntyy huomattavia määriä biokaasua. 1 kWh sähkön ja 1,23 kWh lämmön tuotantoon tarvitaan esimerkiksi noin 5 – 15 kg kotitalousjätettä, 5–7 kg biojätettä, 4 – 7 m³ jätevettä tai vaikkapa 8 – 12 kg orgaanista jätettä. 20 vuoden kuluessa tonni kotitalousjätettä tuottaa siis noin 150 – 200 kuutiometriä hyödyntämiskelpoista kaatopaikkakaasua. (Alakangas 2000, 145.)

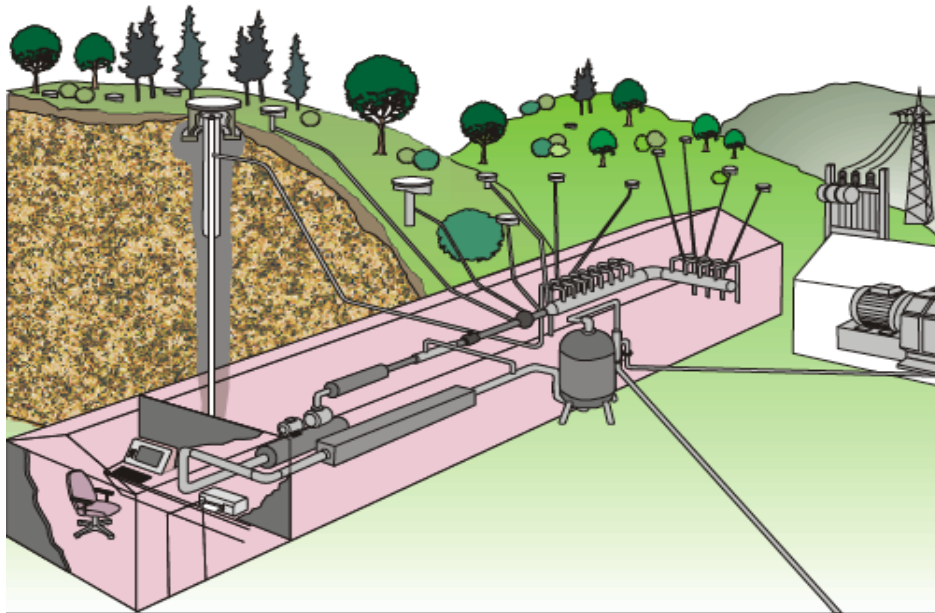
3.2 Metaani

Metaania syntyy, kun eloperäinen aine alkaa hajoamaan hapettomassa tilassa. Metaanin ilmastoa lämmittävä vaikutus on yli 21-kertainen verrattuna hiilidioksidiin, ja metaani onkin merkittävä kasvihuonekaasu. Kaatopaikoilta ilmaan vapautuva metaani vaurioittaa kasvillisuutta, sekä helposti syttyvänä kaasuna metaani voi aiheuttaa räjähdysvaaran. Metaani nopeuttaa myös kasvihuoneilmiötä ja tuhoaa otsonikerrosta monikerroin nopeammin kuin hiilidioksidi. Rikkiyhdisteet, jotka purkautuvat metaanin mukana, taas aiheuttavat ympäristöön epäviihtyvyyttä pahojen hajujen muodossa. Metaanin muodostumisnopeuteen vaikuttaa usea tekijä, kuten jätteen ikä, määrä, laatu sekä käsittelytapa. Lisäksi muodostumiseen vaikuttavat kosteus ja lämpötila jätetäytön sisällä. Metaanin palamisjätteenä syntyy vain hiilidioksidia ja vettä, ja metaani onkin poltettuna erinomainen energiakaasu. (Alakangas 2000, 145.)

Metaania pääsee purkautumaan ilmakehään kaasua johtavista peitekerroksista ja jätetäytön halkeamista. Peitekerrokseen purkautuva metaani saattaa levitä etäämmälle varsinaisesta vuotokohdasta, jolloin vuotokohdan havaitseminen on vaikeampaa. Myös kaatopaikalla tehtävät viimeistelytyöt raskailla koneilla voivat aiheuttaa repeämiä pintakerrokseen, ja täten metaanivuotoja ilmaan. (Olli, Rinta-Kanto 2013, 5.)

3.3 Kaasun kerääminen

Kaatopaikkakaasun kerääminen tapahtuu jätepenkereessä olevien siiviläputkien avulla. Putket voidaan asentaa joko pystyasentoon (kaivo), tai vaakatasoon (salaoja). (Alakangas 2000, 145.) (Kuva 1.) Keltakankaalla on kahdeksan pystykaivoa ja kolme vaakatasoon asennettua keräyslinjaa. Kaatopaikkakaasu siirretään keräyskaivoista kaasuinsiirtoputkistoa pitkin mikroturbiinilaitokselle, jossa kaatopaikkakaasu aktiivihiihliuodatetaan, ennen kuin kaasu poltetaan mikroturbiineissa. (Kymenlaakson Jäte Oy 2014.) Suomen olosuhteissa pystyasentoon asennetut kaivot on todettu tehokkaiksi korkeilla kaatopaikoilla, ja vastaavasti vaakatasoon asennetut salaojat ovat toimivimpia silloin, kun jätepenkerein syvyys on alle kuusi metriä. Molemmat keräystekniikat soveltuvat kaasun keräykseen myös toiminnassa oleville kaatopaikoille. (Alakangas 2000, 145.)



Kuva 1. Kaatopaikkakaasun keräys. (Alakangas 2000, 146.)

3.4 Kaatopaikkakaasun käyttö

Kaatopaikkakaasun keräys Keltakankaan kaatopaikalla on aloitettu syksyllä 2011. Pumppaamo kerää kaasua kaivoista ja mikroturbiinilaitos muuttaa osan kaasusta sähkö- ja lämpöenergiaksi, jota hyödynnetään jätekeskuksen omissa toiminnoissa. Loput

kerätystä kaatopaikkakaasusta poltetaan soihdussa. Kaasun polttaminen soihdussa vähentää kaatopaikan ilmastovaikutusta merkittävästi, kun haitallista metaania sisältävä kaasu palaa hiilidioksidiksi, sillä metaani on noin 20 kertaa hiilidioksidia haitallisempaa. Vuonna 2013 mikroturbiinilaitos tuotti puolet jätekeskuksen sähköntarpeesta, eli 0,7 GWh. Suurimmat energiankuluttajat olivat lajittelu- ja murskauslaitos, sekä jätevedenkäsittelyn ilmastimet. Toimistorakennuksen lämmittämiseen kului noin 18 708 litraa lämmitysöljyä. (Kymenlaakson Jäte Oy 2014.)



Kuva 2. Kaasunkeräysputkistoa mikroturbiinilaitoksella.

3.5 Mikroturbiinilaitos

Mikroturbiinilaitos koostuu pumppaamosta, aktiivihiilisuodattimista, kolmesta Capstone C65 -mikroturbiinista sekä kaukolämmönvaihtimesta. Kunkin mikroturbiinin nimellissähköteho on 65kW. (Liite 1.) Mikroturbiinin sähköntuotannon hyötysuhde on 29 prosenttia. (Capstone 2010.) Kaatopaikkakaasun paikoitellen (>5000 ppm) korke-

asta rikkivetypitoisuudesta johtuen kaasu pitää suodattaa aktiivihiilisuodattimilla mikroturbiinin vikaantumisen estämiseksi. Aktiivihiili on puhdasta erittäin huokoista hiiltä, jonka pinta-ala massayksikköä kohden on suuri. Yhdessä grammassa aktiivihiiltä on aktiivista pinta-alaa yli 1000 m². Aktiivihiiltä käytetään muun muassa veden ja kaasun suodattamiseen. (Bourke, Mazzoni 2014.) Aktiivihiilisuodattimesta huolimatta rikin yhdisteitä kulkeutuu mikroturbiineihin kaasun mukana. Nämä yhdisteet aiheuttavat edelleen korroosiota mikroturbiinien komponentteihin. Kaasun hyödyntämisestä tekee haastavaa myös se, että kaatopaikkakaasun laatu vaihtelee suuresti. Rikkivetypitoisuuden vaihtelu on kaivokohtaista, ja vaihteluväli on 51 ppm - >5000 ppm. Tämänhetkinen kaasumäärän aktiivihiilisuodatus maksaa noin 20 000 euroa vuodessa ja jos koko kaatopaikalla syntyvä kaasu suodatettaisiin, olisi hinta noin kolminkertainen. (Kymenlaakson Jäte 2014.)



Kuva 3. Mikrokaasuturbiinilaitos.

4 KAASUTURBIINI

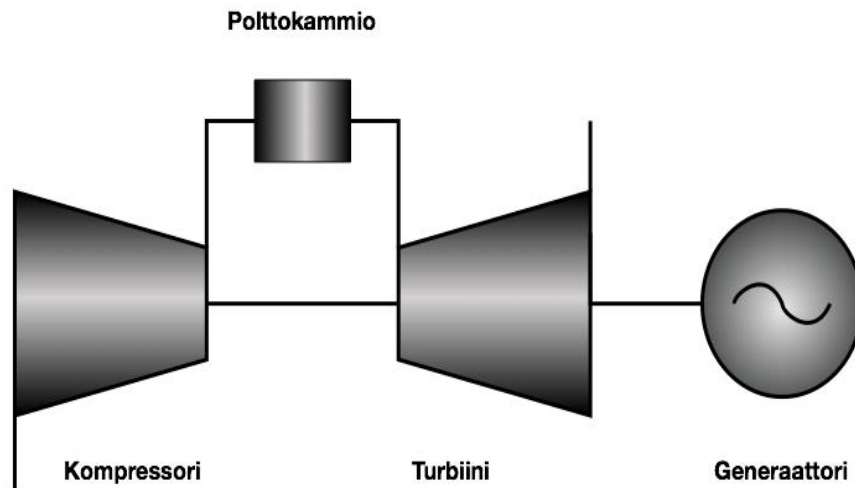
Kaasuturbiinien kehitys sai alkunsa Iso-Britanniassa jo niinkin aikaisin, kuin 1791, kun englantilainen John Barber patentoi ensimmäisen kaasuturbiinin. Kuitenkin vasta ensimmäinen nettotehoa luovuttanut kaasuturbiini rakennettiin Norjassa Aegidius Ellingin toimesta vuonna 1903. Ellingin kaasuturbiini antoi 8,2 kilowatin tehon. Toisen maailmansodan aikaan kaasuturbiinien käyttö yleistyi niin sota-alusten, kuin lentokoneidenkin voimanlähteenä. Sveitsiin rakennettiin vuonna 1939 maailman ensimmäisen kaasuturbiinikäyttöinen voimalaitos. (Huhtinen et al. 2013, 204.)



Kuva 4. Capstone C65 -mikrokaasuturbiini.

Kaasuturbiini on lämpövoimakone, jossa turbiinia pyöritetään kuumalla kaasulla. Kaasuturbiini muuntaa polttoaineen energiaa lämmöksi ja muodostunutta lämpöä mekaaniseksi liike-energiaksi. Muuta ulkoista lämmönlähdettä, kuten kattilaa, ei tarvita.

Kaasuturbiinin kolme tärkeintä osaa ovat kompressori, polttokammio ja turbiini. (Huhtinen et al. 2013, 204) (Kuva 5.)



Kuva 5. Kaasuturbiinin kaavio. (Huhtinen et al. 2013, 204. Muokattu)

4.1 Kaasuturbiinin toimintaperiaate

Kompressori tekee korkeapaineista ilmaa polttokammioon, jossa polttoaine poltetaan. Polttamisessa muodostuneet kuumat kaasut laajenevat turbiiniosassa kehittämällä kaasuturbiinin omakäyttöön vaadittavan tehon sekä hyötytehoa. Kaasuturbiinin kehittämästä tehosta vain noin kolmasosa saadaan hyötytehoa ulos. Esimerkiksi kompressori ja generaattori vaativat toimiakseen melkein yhtä suuren tehon. (Huhtinen et al. 2013, 204.)

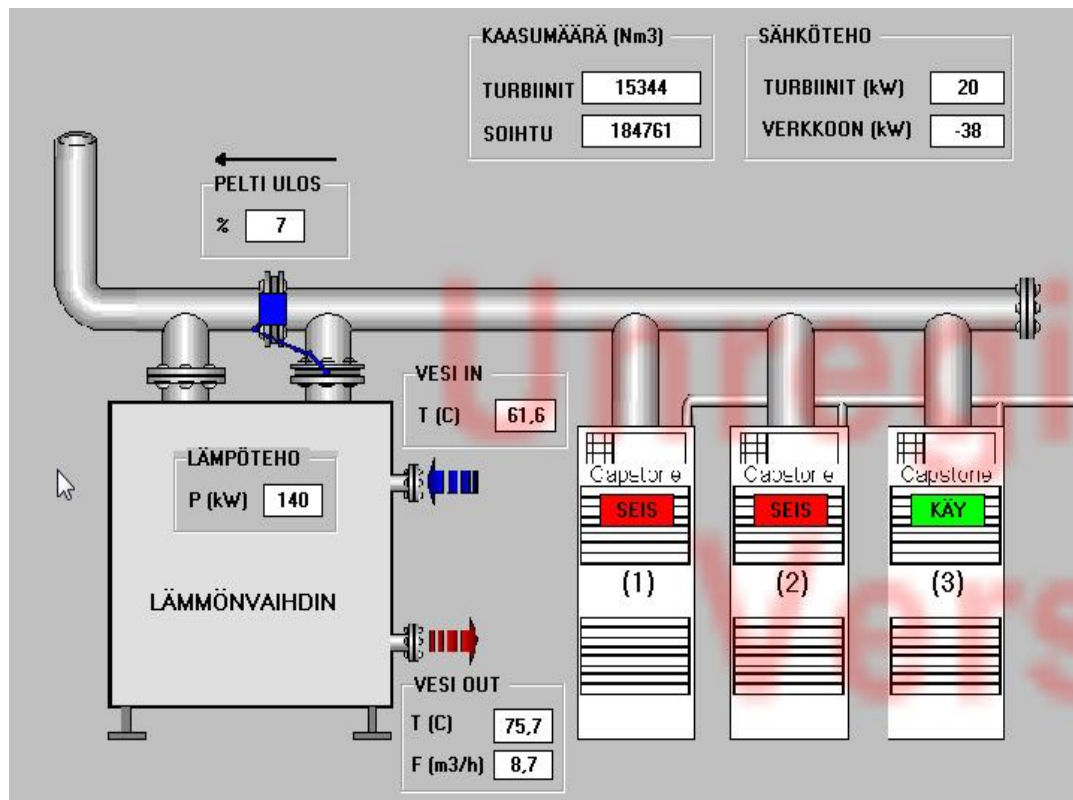
Teollisuuden kaasuturbiineissa käytetään yleensä aksiaalikompressoreita. Ilman virtausnopeutta nostetaan kompressorin juoksusiivissä, jolloin ilma lämpenee ja sen ominaistilavuus pienentyy. Johtosiivissä virtausnopeus ja ominaistilavuus pienenee, mutta lämpö ja paine nousevat. Juoksu- ja johtosiiviset muodostavat yhden jakson, mutta näitä tarvitaan useita, jotta aikaan saadaan riittävän korkea paine, sillä yhden

jakson painesuhde on vain noin 1,1 – 1,2. Polttoaine poltetaan polttokammiossa kompressorin tuottaman paineilman avulla. Polttokammiossa muodostuneet palamis- kaasut johdetaan turbiiniin. Turbiinin toiminta on päinvastainen verrattuna kompresso- riin. Kaasun virtausnopeus kasvatetaan johtosiivistössä ja kaasun entalpia muutetaan virtausnopeudeksi. Kaasun paine ja lämpötila laskevat juoksusiivistössä, ja virtausno- peus muuttuu kehävoimaksi, joka pyörittää turbiinin siivistöä. (Huhtinen et al. 2013, 205.)

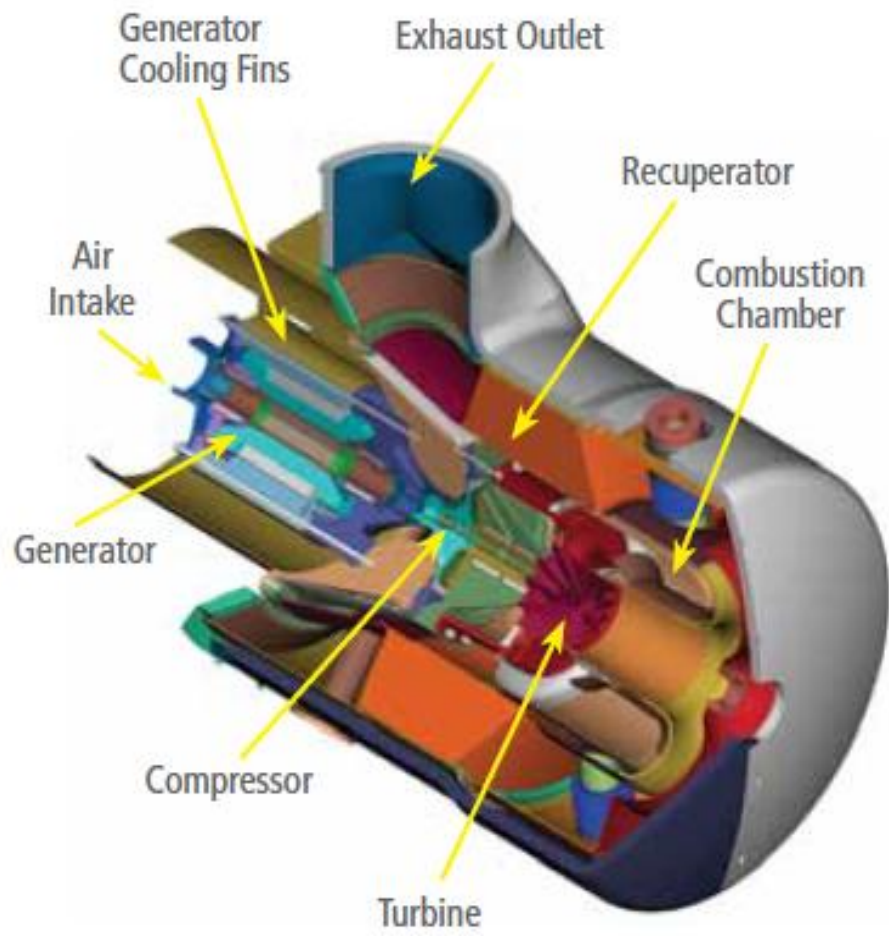
4.2 Lämmön talteenotto

Koska pakokaasuhäviöt ovat suuret pelkässä kaasuturbiiniprosessissa, voidaan kaasuturbiinin taloudellisuutta parantaa ottamalla pakokaasujen lämpöä talteen. Kaasuturbiinin pakokaasuista saatavaa lämpöä voidaan käyttää suoraan esimerkiksi jonkin tuotteen kuivatukseen, tai esimerkiksi kaukolämmöntuotantoon. Pakokaasujen lämpö otetaan talteen lämmöntalteenottokattilassa, jossa kehitetään höyryä tai kuumaa vettä. Lämmöntalteenottokattila kasvattaa kokonaishyötysuhteen noin 75 prosenttiin. Hyötysuhde on huomattavasti parempi kuin pelkän kaasuturbiiniprosessin hyötysuhde. Laitostyyppi sopii hyvin teollisuuslaitoksiin, joissa tarvitaan sähkön lisäksi kaukolämpöä, kuumaa vettä tai höyryä. (Huhtinen et al. 2013, 207 – 208.)

Keltakankaan mikrokaasuturbiinit syöttävät täydellä teholla ajettaessa 309 celsiusasteiset pakokaasut 450 kW kaukolämmönvaihtimeen, jossa pakokaasut jäähtyvät noin 125 celsiusasteeseen. Kuvassa 6 esitetystä ajotilanteesta, kun ajetaan vain yhdellä turbiinilla, on kaukolämpöteho 140 kW ja kaukolämpöverkkoon lähtevän veden lämpötila 75,7 celsiusastetta. Kaukolämpöä käytetään Keltakankaalla lämmittämään BEST-hallin lattiaa sekä lajittelulaitosta. (Kymenlaakson Jäte Oy 2014.)



Kuva 6. Ajotilanne yhdellä turbiinilla. (Kymenlaakson jäte Oy 2014.)



Kuva 7. Capstone-mikroturbiinin poikkileikkaus. (Capstone 2010.)

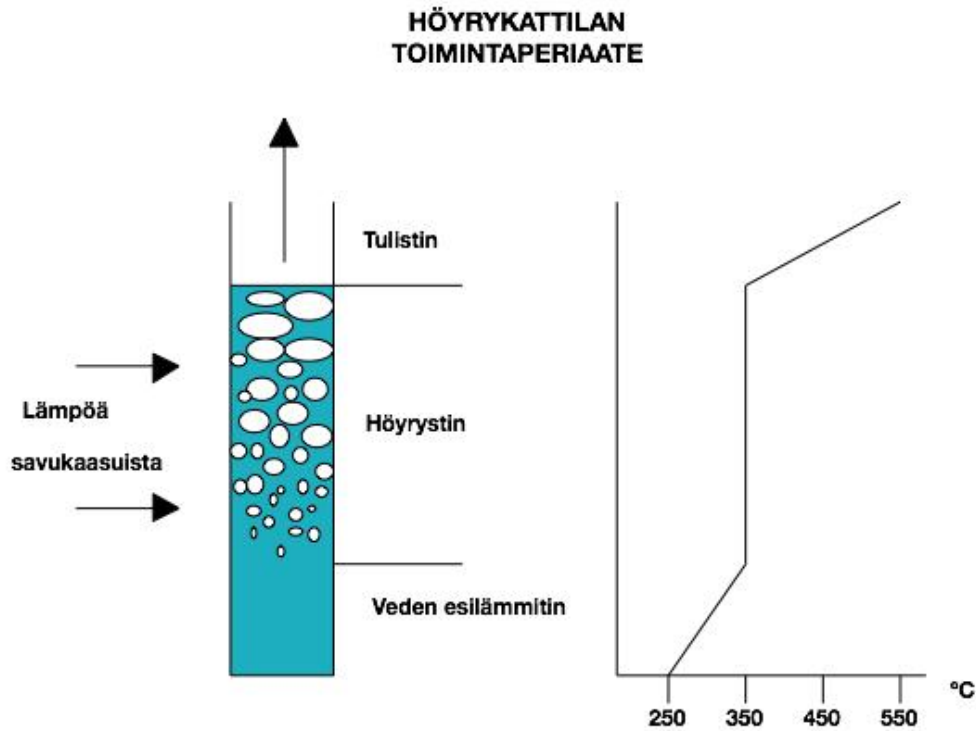
5 HÖYRYKATTILA

Vesihöyryn tuottamiseen teollisuuden prosessihöyryksi ja sähköntuotantoon käytetään höyrykattiloita. Tyypillisesti prosessihöyryn tuotantoon käytettävät höyrykattilat ovat tyypiltään joko vesiputki- tai tuliputkikattiloita. Vesiputkikattilassa vesi höyrystyy tulipesään sijoitetun höyrystinputkiston sisällä tai sen jälkeen sijoitetussa lämmönsiirto-osassa. Veden kierto tapahtuu joko pumpuilla toteutettuna pakkokiertona tai luonnonkiertoon perustuen. Tuliputkikattilassa höyrystettävä vesi on putkien ulkopuolella, kun taas savukaasut virtaavat putken sisällä. (Kara 1999, 209.) Vesiputkikattilalla päästään korkeisiin höyrynpaineisiin, joten kattilatyyppejä soveltuu hyvin sähkön- ja lämmöntuotantoon, kun taas tuliputkikattiloita käytetään pääsääntöisesti vain lämmöntuotantoon.

Yleisimmät polttomenetelmät kiinteillä polttoaineilla ovat arina-, leijukerros-, ja poltinkattilat. Kaasumaisille ja nestemäisille polttoaineille käytetään kattilan tulipesään sijoitettuja polttimia. Polttoaine ja palamisilma sekoitetaan polttimessa ja syötetään tulipesään. (Kara 1999, 209.)

5.1 Höyrykattilan historiaa

Höyryn käyttömahdollisuus mekaanisen liike-energian tuottamiseen on tunnettu jo useita satoja vuosia. Höyrytekniikan kehityksen ensiaskeleet otettiin 1700-luvun alussa, kun ensimmäiset höyrykoneet kehitettiin. Heikosta hyötysuhteestaan johtuen höyrykoneet on korvattu nykysovelluksissa paremman hyötysuhteen omaavilla laiteratkaisuilla. Sähköntuotannossa höyrykoneen korvaajaksi on otettu 1800-luvun lopulla keksitty höyryturbiini. Höyryturbiinit sopivat korkeampiin höyrynpaineisiin ja niissä höyry voi paisua lähes ympäristön lämpötilaa vastaavaan höyrynpaineeseen. Tällöin päästään yli 40 prosentin hyötysuhteeseen, kun se höyrykoneilla oli n. 15 – 20 prosenttia. Turbiinin kierrosnopeus on tavallisesti melko korkea (3000 r/min). (Huhtinen et al. 2000, 8.)



Kuva 8. Höyrykattilan toimintaperiaate. (Huhtinen et al. 2000, 7. Muokattu)

5.2 Höyrykattilan toimintaperiaate

Höyrykattilassa tuotetaan höyryä kattilaan syötetystä vedestä. Nykyaikaisessa höyrykattilassa vesi esilämmitetään lähelle höyrystymislämpötilaa ja syötetään höyrystinputkiston toisesta päästä nestemäisenä sisään. Putkistossa höyrystynyt vesi vielä lämmitetään tulistimessa höyrystymislämpötilaa korkeampaan lämpötilaan eli tulistetaan. (Kuva 8.) Höyrykattiloissa käytetyt höyrinpaineet ovat tyypillisesti luokkaa 150 – 220 bar ja lämpötilat vastaavasti 450 – 550 °C. Veden esilämmittäminen, höyrystäminen ja tulistus kuluttavat energiaa, ja tähän tarvittava energia tuotetaan höyrykattilassa polttamalla kiinteitä, nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita, kuten biomassaa, öljyä, ki-

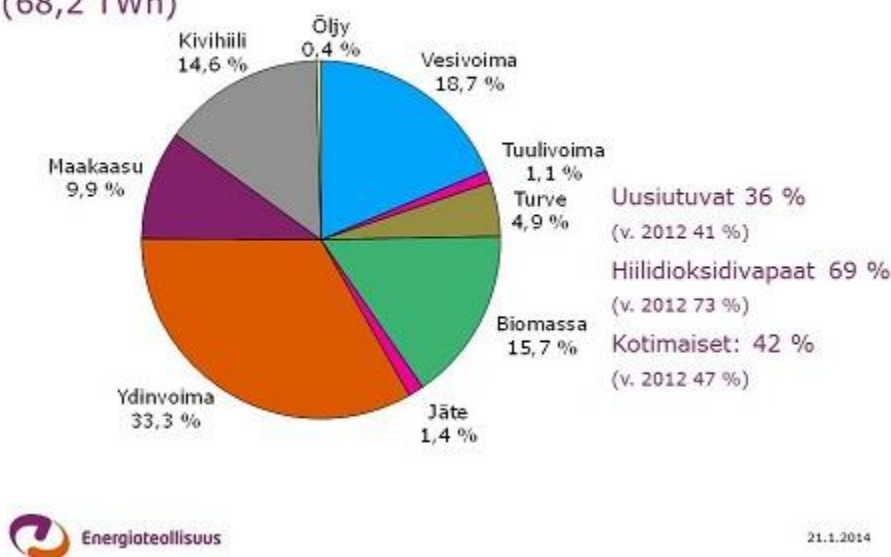
vihiltä tai vaikkapa maakaasua. Polttoaine syötetään palamisilman kanssa höyrykattilaan. Kattilassa polttoaine ja palamisilmassa oleva happi reagoivat keskenään, ja polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia saadaan muutetuksi savukaasuihin sitoutu-neeksi lämpöenergiaksi. Savukaasuihin sitoutunut lämpöenergia pyritään käyttämään tarkoin hyväksi jäähdyttämällä savukaasuja prosessin erilaisissa lämmönvaihtimissa, kuten esilämmittimessä, höyrystimessä ja tulistimessa. Tämän jälkeen jäähtyneet sa-vukaasut suodatetaan tarvittaessa ja johdetaan savupiipun kautta ympäristöön. (Huhti-nen et al. 2000, 7.)

5.3 Eri voimalaitostyyppjä

Sähköä tuottavat voimalaitokset voidaan jaotella eri tuotantotekniikoiden mukaan. Suomessa yleisiä voimalaitostyyppjä ovat lauhdutusvoimalaitokset, yhdistetyt sähkö- ja lämmöntuotannon voimalaitokset, kaasuturbiinivoimalat sekä vesivoimalat. (Energiateollisuus 2014.) Lämpövoimalaitos on laitos, joka tuottaa lämpöä ja muuttaa tämän edelleen sähköksi sähkögeneraattorissa. Yleisimmin polttoaineen energia vapautetaan polttamalla polttoaine kattilassa. Kattilassa tuotettu höyry johdetaan höyryturbiinille, joka puolestaan pyörittää generaattoria. Pelkästään sähköntuotantoon tarkoitettua voimalaitosta kutsutaan lauhdutusvoimalaitokseksi. Myös ydinvoimalaitokset ovat lauhdutusvoimalaitoksia. Näissä tavallisimmin päästään hyvään sähköntuotannon hyötysuhteeseen, mutta laitoksen kokonaishyötysuhde jää parhaimmillaankin vain 44 prosenttiin. Sähköä ja lämpöä samanaikaisesti tuottavaa voimalaitosta kutsutaan vastapainevoimalaitokseksi. Vaikkakin näissä sähköntuotannon hyötysuhde on vain n. 21 prosenttia, voidaan vastapainevoimalaitoksella päästä jopa 90 prosentin kokonaishyötysuhteeseen. (Huhtinen et al. 2000, 14.) Kaasuturbiinivoimala vastaa myös toimintaperiaatteeltaan lämpövoimalaitosta. Kaasuturbiinivoimala voi koostua joko pelkästään kaasuturbiinista tai tämän lisäksi lämmöntalteenottokattilasta. Näitä voimalaitoksia kutsutaan kombivoimalaitoksiksi. (Energiateollisuus 2014) (Huhtinen et al. 2000, 17 – 18.)

Vuonna 2013 Suomessa tuotetusta sähköstä 46,9 prosenttia tuotettiin lämpövoimalaitoksissa (pl. ydinvoima). (Energiateollisuus 2014.)

Sähkön tuotanto energialähteittäin 2013 (68,2 TWh)



Kuva 9. Sähkön tuotanto energialähteittäin. (Energiateollisuus 2014.)

5.4 Eri kattilatyyppejä

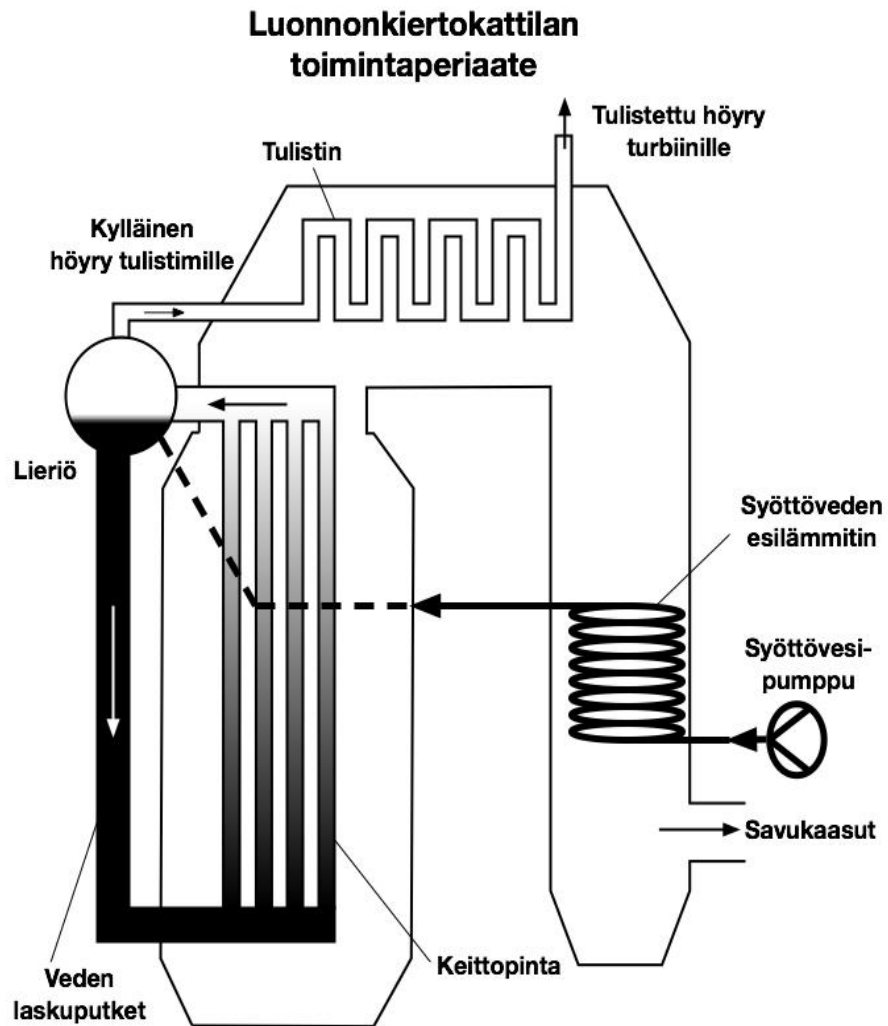
Kattilat voidaan jakaa vesihöyrypiirin rakenteen mukaan suurvesitilakattiloihin ja vesiputkikattiloihin. Suurvesitilakattilassa savukaasut kulkevat ensin tulitorvessa ja tulitorvea seuraavissa tuliputkissa höyrystäen putkien ulkopuolella olevan veden. Tyypillisiä suurvesitilakattiloiden käyttökohteita ovat teollisuuden matalapaineista prosessihöyryä vaativat kohteet, joissa höyryntarve on niin vähäistä, että sähköntuotanto ei ole kannattavaa. Vesiputkikattilat puolestaan soveltuvat huomattavasti paremmin korkeille höyrynpaineille ja tämän vuoksi vesiputkikattiloita käytetään voimalaitoksissa. Voimalaitoksissa käytettävät kattilat voidaan jakaa veden kierron mukaan luonnonkierto-, pakkokierto-, sekä läpivirtauskattiloihin. Luonnonkiertokattilan vesi/höyrykierto putkistossa perustuu veden ja höyryn väliseen paine-eroon, kun taas pakko- ja läpivirtauskattilassa kierto muodostetaan pumpun paineella. (Huhtinen et al. 2000, 111.)

5.4.1 Luonnonkiertokattila

Luonnonkiertokattila (kuva 10) on vesiputkikattila, jossa höyrystyvä vesi virtaa tulipesää ympäröivissä putkissa. Kattilan vesihöyrypiirin keskeisimmät osat ovat veden esilämmitin, lieriö, höyrystin ja tulistin. Syöttövesi tuodaan kattilaan syöttövesipumpulla syöttövesisäiliöstä. Vesi esilämmitetään syöttöveden esilämmittimessä eli ekonomaiserissa lähelle veden höyrystymislämpötilaa. Ekonomaiserilta vesi johdetaan lieriöön ja tämän jälkeen laskuputkia pitkin höyrystinputkiston alapäähän. Höyrystinputkistossa vain osa vedestä höyrystyy, ja tämä veden ja vesihöyryn seos johdetaan takaisin lieriöön. Lieriössä vesi ja höyrystimessä muodostunut erotetaan. Lieriön yläosasta höyry virtaa tulistimelle. (Huhtinen et al. 2000, 113.)

Vesihöyryn kierto lieriön ja höyrystimen välillä tapahtuu veden ja höyryn tiheuseroon perustuen. Höyrystinputkistossa osa vedestä höyrystyy tulipesässä syntyvän lämmön vaikutuksesta. Tällöin putkistossa muodostuvat veden ja vesihöyryn seoksen tiheys on pienempi kuin laskuputkessa olevan kylläisen. Tiheyseroihin perustuen höyrystinputkessa oleva veden ja vesihöyryn seos alkaa kevyempänä nousta ylöspäin ja virtaamaan takaisin lieriöön. Lieriöstä virtaa laskuputkia pitkin tilalle suuremman tiheyden omaavaa kylläistä syöttövettä. Koska luonnonkierrosta johtuen kierrätyspumppua ei tarvita, on luonnonkiertokattilan omakäyttötehon tarve pienempi kuin pakko-, tai läpivirtauskattiloilla. (Huhtinen et al. 2000, 113 – 114.)

Veden ja vesihöyryn tiheusero pienenee paineen kasvaessa. Kriittisessä paineessa ($p=221$ bar) veden ja höyryn tiheys on yhtä suuri. (321 kg/m^3) Tästä johtuen luonnonkiertokattiloilla ei voida käyttää kovin korkeita höyrynpaineita. Tulistimelta ulostulevan höyryn paine pitää olla käytännössä alle 170 bar, jotta luonnonkierto toimisi. (Huhtinen et al. 2000, 114.)



Kuva 10. Luonnonkiertokattila. (Huhtinen et al. 2000, 113. Muokattu.)

5.4.2 Pakkokiertokattila

Pakkokiertokattilassa veden kierto höyrystimessä toteutetaan pumpulla. Muilta osin pakkokiertokattilan vesihöyrypiirin on luonnonkiertokattilan kaltainen. Syöttövesipumppu pumppaa syöttöveden veden esilämmittimen kautta lieriöön samalla tavalla kuin luonnonkiertokattilassa. Vesi johdetaan lieriöstä pakkokiertopumppujen avulla kattilan tulipesän ympärillä sijaitsevaan höyrystimeen. Höyrystimestä höyrystyneen höyryn ja vesihöyryn seos virtaa pakkokieronpumpun aikaansaaman paineen avulla takaisin lieriöön. Lieriössä vedestä erotettu höyry johdetaan edelleen tulistimil-

le. Pakkokierto- ja pakkokierto-pumppu on sijoitettava useita metrejä lieriön alapuolelle, jotta lieriöstä tuleva kylläinen syöttövesi ei kavitoisi, eli höyrystyisi pumpussa. Pakkokierrosta johtuen kattila soveltuu hieman korkeammille höyrynpaineille kuin luonnonkiertokattila. Tästä huolimatta kun veden ja höyryn erotus tapahtuu lieriössä tiheyseroihin perustuen, ei pakkokierto-periaatteella toimivia kattiloita voida rakentaa ylikriittisille paineille. Tuorehöyryn paineen tulee käytännössä olla alle ylikriittisen paineen eli korkeimmillaan noin 190 bar. (Huhtinen et al. 2000, 118.)

5.4.3 Läpivirtauskattila

Läpivirtauskattiloita kutsutaan alkuperäisten kehittäjiensä mukaan Sulzer, Benson, tai Ramzin -kattiloiksi. Sulzerin kattilatehtailla Sveitsissä kehitettyä kattilatyyppeä kutsutaan Sulzer -kattilaksi, kun taas Benson -kattilan kehitti tsekkiläinen Mark Muller. Muller muutti ensimmäisen maailmansodan aikana Englantiin ottaen itselleen englantilaisen nimen Benson. Neuvostoliitossa kehitettiin professori Leonid Ramzinin (1887 – 1948) johdolla edellisistä kehittäjistä riippumattomasti läpivirtauskattilatyyppeä, jota kutsutaan Ramzin -kattilaksi. Läpivirtauskattila voidaan mieltää veden kierron kannalta ulkopuolelta lämmitetyksi pitkäksi putkeksi, jonka toisesta päästä syötetään vesi sisään ja toisesta päästä se tulee ulos tulistuneena höyrynä. Luonnonkierto- ja pakkokierto-kattiloista poiketen läpivirtauskattilassa ei ole ollenkaan lieriötä, jossa vesi ja vesihöyry erotettaisiin eikä tästä johtuen myöskään lieriön ja höyristimen välistä sisäistä kiertoa. Kiertoluku on läpivirtauskattiloissa yksi. Läpivirtauskattiloita käytetään suurissa voimalaitoksissa kattiloina, kun halutaan voimalaitosprosessi korkealle höyrynpaineelle sähköntuotannon hyötysuhteen parantamiseksi. (Huhtinen et al. 2000, 120.)

6 HÖYRYTURBIINI

Höyryturbiini muuttaa höyryn sisältämän lämpö- ja paine-energian pyöriväksi mekaaniseksi energiaksi. Ensin höyryn lämpöenergia muutetaan virtausenergiaksi, joka johdetaan turbiinin akselille roottoria pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi. Ensimmäinen höyryturbiini rakennettiin Ruotsissa Gustaf De Lavalin (1845 – 1913) toimesta vuonna 1883. De Lavalin kehittämä turbiini toimi aktioperiaatteella. Noin vuotta

myöhemmin englantilainen Charles A. Parson (1845 – 1931) kehitti De Lavalin keksinnöstä tietämättä ensimmäisen monijaksoisen höyryturbiinin. Höyryturbiinia käytetään pääsääntöisesti höyryvoimalaitoksissa ja ydinvoimalaitoksissa sähköntuotantoon, vastapaineturbiinina yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa, sekä keskipakopumppujen, puhaltimien ja laivojen voimankoneena. Höyryturbiineita saatava teho vaihtelee välillä 0,5 – 1 600 000 kW. (Huhtinen 2013, 109.)

6.1 Höyryturbiinin toiminta

Höyryturbiinin tarkoituksena on muuntaa höyryn sisältämä lämpöenergia eli entalpia mahdollisimman tarkoin mekaaniseksi energiaksi. Turbiinissa höyryn energia voidaan muuttaa virtausenergiaksi joko kiinteissä johtolaitteissa tai pyörivissä johtopyörän siivistöissä tai molemmissa. (Huhtinen et al. 2013, 109.) Turbiinin kaksi pääosaa ovat roottori ja staattori. Turbiinin runkoon kiinnitetyt johtosiivet muodostavat staattorin, ja roottori puolestaan koostuu akselista johon on kiinnitetty juoksusiivet. (Syri 2013.) Höyryn lämpötila ja -paine laskevat turbiinin johtosiivistössä. Paineen alenemisesta johtuen höyry pyrkii paisumaan turbiinissa, jolloin höyryn virtausnopeus kasvaa. Johtosiivet suuntaavat höyryvirtauksen juoksupyörään, joka kääntyy virtauksessa. Turbiinin akselilta saatava liike-energia muunnetaan generaattorissa sähköksi. Yksittäistä roottori-staattori -paria kutsutaan turbiinin jaksoksi eli vyöhykkeeksi. (Huhtinen 2013, 109.)

6.2 Höyryturbiinien jaottelu

Käytännössä turbiineissa on useita asteita peräkkäin. Höyryturbiinit jaetaan ylipaine- eli reaktioturbiineihin ja tasapaine- eli aktioturbiineihin toimintatapansa mukaan. Reaktioturbiinin juoksu- että johtopyörässä entalpiaputous muutetaan nopeusenergiaksi, jolloin höyrysuihkun nopeuden nousu aiheuttaa juoksupyörän kehävoiman reaktion perusteella. Juoksupyörän tuloreunalla vallitsee korkeampi paine kuin menoreunalla, mistä juontuu termi ylipaineturbiini. Tasapaineturbiinissa höyry virtaa vakiopaineella turbiinin läpi ja höyryn entalpiamuutos muutetaan kiinteissä johtolaitteissa nopeudeksi. (Huhtinen et al. 2013, 109.)

Höyryturbiinit voidaan jaotella myös höyryvirtauksen mukaan aksiaalis- ja radiaaliturbiniin. Höyryn virratessa turbiinin akselin suuntaisesti puhutaan aksiaalisturbiinista, kun taas höyryvirtauksen kohdistuessa kohtisuoraan akselia vastaan puhutaan säteis- eli radiaaliturbiniinista. Aksiaalisturbiinit voivat olla joko aktio- tai reaktioturbineita tai näiden kahden yhdistelmiä. Radiaaliturbiniit ovat aina pelkästään reaktioturbineita. (Huhtinen et al. 2013, 109.)

Lauhdeturbiini

Lauhdeturbiinit ovat tyypillisiä voimalaitosturbineita, joita käytetään kun lämmöntarvetta ei ole. Turbiinissa voi olla useita väliottoja esimerkiksi erilaisia esilämmityksiä tai laitoksen omakäyttöhöyryn hyödyntämistä varten. Lauhdeturbiinissa höyry paisuu lauhdutinpaineeseen, joka on yleisimmin 0,02 – 0,05 bar. Lauhduttimessa höyry lauhdetaan takaisin vedeksi eli lauhdeeksi joka johdetaan takaisin kattilaan. 60 prosenttia lauhdeturbiiniin johdetusta lämmöstä poistuu jäähdytysveden mukana. (Huhtinen et al. 2013, 109.)

Vastapaineturbiini

Vastapaineturbiineita käytetään silloin, kun samanaikainen lämmön- ja sähköntuotanto on tarpeen. Tyypillisiä vastapaineturbiiniin käyttökohteita ovat kaukolämpölaitokset sekä metsä- ja kemianteollisuus. Vastapaineturbiinista höyry poistuu ylipaineisena. Lämmön ja sähkön yhteistuotannolla saavutetaan hyvä kokonaishyötysuhde, joka on tyypillisesti n. 90 prosenttia. (Huhtinen et al. 2013, 109) (Huhtinen et al. 1994, 12.)

7 VERTAILUHÖYRYKATTILALAITOS

Vertailuhöyrykattilalaitos johon laskelmat perustuvat on tyypillinen tämän kokoluokan laitos. Kattilatyyppi on luonnonkiertoperiaatteeseen perustuva vesiputkikattila höyryn tulistuksella. Kattilan jälkeen on vastapaineturbiini, joka soveltuu yhdistettyyn sähkön- ja kaukolämmöntuotantoon. Kattilaan syötetään suodattamatonta kaatopaikkakaaasua, joka palaessaan höyrystää kattilan höyrystinputkistossa olevan veden. Aikaan saatu vesihöyry pyörittää höyryturbiinia, jolla tuotetaan sähköä. Höyryturbiinin jälkeen vesihöyry lämmittää kaukolämmönvaihtimessa kiertävän veden.

7.1 Kattilan mitoitus

Kattilan mitoituksessa käytetään Kymenlaakson jäte Oy:ltä saatuja kaatopaikkakaasun arvoja, joiden avulla määritetään kattilan arvioitu teoreettinen lämpöteho ja höyrykapasiteetti ja tästä eteenpäin teoreettinen sähkö- ja kaukolämpöteho. Tarkastelussa ei oteta huomioon putkistoista ynnä muista rakenteista ja laitteista aiheutuvia häviöitä. Rakennuskustannuksia ei myöskään huomioitu kannattavuuslaskelmissa. Käyttökustannukset arvioitiin samoiksi mikrokaasuturbiinilaitoksen kanssa eli n. 50 000 euroa vuodessa.

7.2 Prosessi

Luonnonkiertoperiaatteella toimivaan höyrykattilaan syötetään poltettavaksi kaatopaikkakaasua, jonka lämpötila on n. 10 celsiusastetta ja teoreettinen maksimivirtaus on noin 220 m³/h. Kaasun sisältämä energiavirta on n. 0,5 – 1 MW. (PI-kaavio). Biokaasun lämpöarvo on 4 – 6 kWh/m³_n (14,4 – 21,6 MJ/m³_n). (Alakangas 2000, 145.) Kattilassa poltettu kaatopaikkakaasu höyrystää veden höyrystinputkistossa, josta se johdetaan tulistimelle. Tulistettu höyry johdetaan vastapaineturbiinille ja tämän jälkeen vielä kaukolämmönvaihtimelle. Kattilan savukaasut johdetaan puhdistamatta savupiippuun. Kattilan savukaasujen lämmöllä esilämmitetään palamisilma ja syöttövesi. Tässä tapauksessa ei tiedetä kuin polttoaineen arvot, jolloin oletetaan biokaasukattilan hyötysuhteen olevan luokkaa samaa luokkaa, kuin maakaasukattilan eli n. 90 prosenttia (Huhtinen et al. 2000, 104), sillä biokaasu on teknisesti melko lähellä maakaasua (Alakangas 2000, 156). Keltakankaan biokaasun sisältämä energiavirta on keskimäärin 0,75 MW. Yleinen pienen höyryturbiinilla varustetun yhdistetyn lämmöntuotannon laitoksen rakennussuhde on 15/75 (Micare 2014.) (r = 0,2) eli 15 prosenttia sähkötehoa ja 75 prosenttia kaukolämpötehoa. Loput kymmenen prosenttia on häviöitä. Tästä saadaan koko prosessin teoreettiseksi hyötysuhteeksi 90 prosenttia.

7.2.1 Kaatopaikkakaasun tiheys

Kaatopaikkakaasun tiheys saadaan laskemalla yhteen kaasun pääkomponenttien tilavuusprosentit kerrottuna aina kyseisen komponentin tiheydellä. Hapen ja rikkivedyn

osuus kaasusta on niin pieni, että näiden komponenttien osuutta ei ole mielekästä ottaa tiheyslaskelmiin mukaan.

$$\rho_{PA} = m\%_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} + m\%_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + m\%_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \quad (1.)$$

| | | | |
|-------|-------------|----------------------------|----------------------|
| jossa | ρ_{PA} | Polttoaineen tiheys | [kg/m ³] |
| | $m\%$ | Kaasukomponentin pitoisuus | [%] |
| | ρ | Kaasukomponentin tiheys | [kg/m ³] |

CH₄ tiheys = 0,66 kg/m³

CO₂ tiheys = 1,98 kg/m³

Vesihöyryn tiheys = 0,0093 kg/m³

Kun tiedetään yllä olevien ainesosien tiheydet, saadaan laskettua kattilaan syötettävän polttoaineen tiheys.

$$\rho_{PA} = (0,43 \cdot 0,66) + (0,34 \cdot 1,98) + (0,23 \cdot 0,0093) = 0,959 \text{ kg/m}^3$$

Polttoaineen tiheydestä saadaan laskettua polttoaineen massavirta, kun tiedetään syötettävän kaasun määrä kuutioina tunnissa.

$$\dot{m}_{PA} = \dot{v}_k \cdot \rho_{PA} \quad (2.)$$

| | | | |
|-------|----------------|-------------------------|----------------------|
| jossa | \dot{m}_{PA} | Polttoaineen massavirta | [kg/s] |
| | \dot{v}_k | Kaasuvirta | [m ³ /h] |
| | ρ_{PA} | Polttoaineen tiheys | [kg/m ³] |

Polttoaineen massavirta kun kaatopaikkakaasun tiheys on 0,959 kg/m³

Kaasuvirta = 175 m³/h

$$\dot{m}_{PA} = 175 \text{ m}^3 / \text{h} \cdot 0,959 \text{ kg/m}^3 = 167,8 \text{ kg/h} = 0,0466 \text{ kg/s}$$

7.2.2 Kattilan hyötyteho

Polttoaineen massavirrasta saadaan laskettua kattilan hyötyteho kun polttoaineen lämpöarvon keskiarvo on 18 MJ/m^3 ja oletetaan että höyrykattilan hyötysuhde on 90 prosenttia.

$$\Phi_{HYÖTY} = (\bar{x}_H \cdot \eta_{Teoreettinen}) \cdot \dot{m}_{PA} \quad (3.)$$

| | | | |
|-------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------|
| jossa | $\Phi_{HYÖTY}$ | Kattilan hyötyteho | [kW] |
| | \bar{x}_H | Polttoaineen lämpöarvon keskiarvo | [MJ/m ³] |
| | $\eta_{Teoreettinen}$ | Teoreettinen hyötysuhde | |

$$\Phi_{HYÖTY} = (18 \text{ MJ/m}^3 \cdot 0,0466 \text{ kg/s}) = 0,755 \text{ MW} = 755 \text{ kW}$$

7.2.3 Höyryn massavirta

Kattilan hyötytehoa hyväksi käyttäen saadaan laskettua höyryn massavirta, kun höyrystymelle tulevan syöttöveden teoreettinen lämpötila on $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ja höyrystimestä lähtevän höyryn teoreettinen paine on 80 bar ja teoreettinen lämpötila $450 \text{ }^\circ\text{C}$. (Huhtinen 2000, 366.)

Höyryn massavirta

$$\dot{m}_{Höyry} = \frac{\Phi_{HYÖTY}}{(h_2 - h_1)} \quad (4.)$$

| | | | |
|-------|-------------------|--------------------|--------|
| jossa | $\dot{m}_{Höyry}$ | Höyryn massavirta | [kg/s] |
| | $\Phi_{HYÖTY}$ | Kattilan hyötyteho | [kW] |

$$h_2 = 3270 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Vesihöyryn h,s -diagrammista } p = 80 \text{ bar, } t = 450 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$h_1 = 850 \quad (\text{höyrytaulukko } t = 200)$$

$$\dot{m}_{Höyry} = \frac{755 \text{ kW}}{(3270 - 850)} = 0,31 \text{ kg/s}$$

7.3 Teoreettinen hyötysuhde

Teoreettiset sähkö- ja lämpötehot saadaan laskettua polttoaineen sisältämän tehon keskiarvolla:

$$P = \Phi_{HYÖTY} \cdot \eta \quad (5.)$$

| | | | |
|-------|----------------|---------------------------|------|
| jossa | P | Sähkö- tai kaukolämpöteho | [MW] |
| | $\Phi_{HYÖTY}$ | Kattilan hyötyteho | [MW] |
| | η | Hyötysuhde | [%] |

$$P_{Sähkö} = 0,755 \text{ MW} \cdot 0,15 = 0,11325 \text{ MW}$$

$$P_{Kaukolämpö} = 0,755 \text{ MW} \cdot 0,75 = 0,56625 \text{ MW}$$

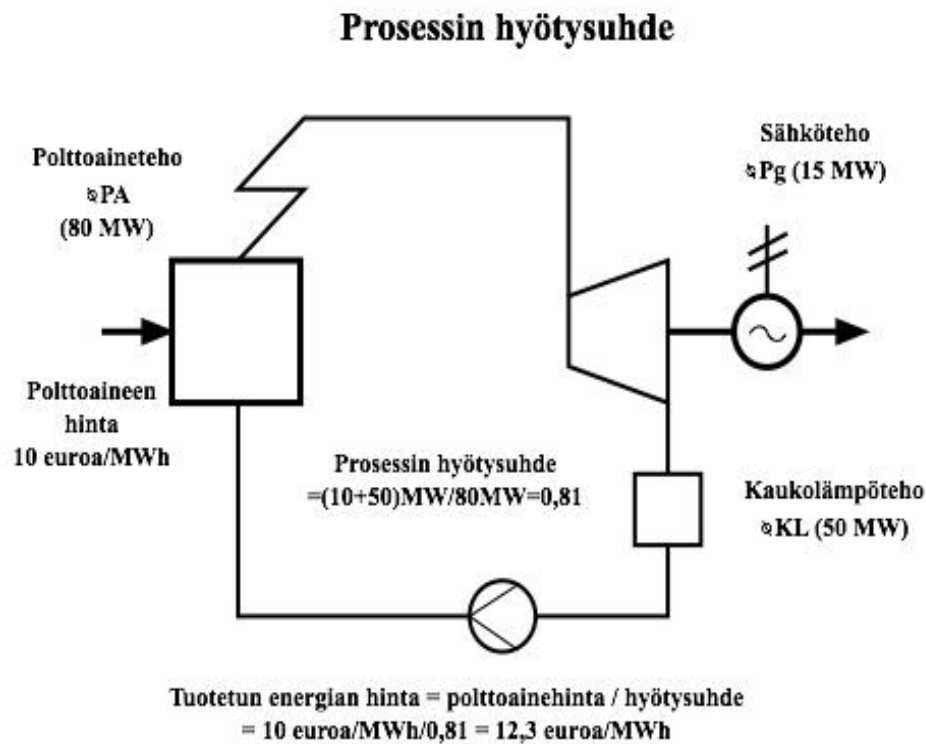
Näistä voidaan esittää että kattilalaitoksen teoreettinen hyötysuhde on:

$$\eta_{Teoreettinen} = \frac{(P_{Sähkö} + P_{Kaukolämpö})}{\Phi_{HYÖTY}} \quad (6.)$$

| | | | |
|-------|-----------------------|---------------------------|------|
| jossa | $\eta_{Teoreettinen}$ | Teoreettinen hyötysuhde | [%] |
| | P | Sähkö- tai kaukolämpöteho | [MW] |
| | $\Phi_{HYÖTY}$ | Kattilan hyötyteho | [MW] |

$$\eta_{Teoreettinen} = \frac{(0,11325 \text{ MW} + 0,6625 \text{ MW})}{0,755 \text{ MW}} = 0,9$$

Näin voidaan osoittaa että höyrykattilalaitoksesta vastapaineturbiinilla ja kaukolämmönvaihtimella saadaan teoriassa vain keskimäärin 113,25 kW sähkötehoa ja 566,25 kW kaukolämpötehoa ulos.



Kuva 11. Prosessin hyötysuhde, esimerkki. (Huhtinen et al. 2013, 323. Muokattu.)

7.4 Kannattavuus

Pienen höyryprosessin investoinnin hinta on arviolta 1300 – 3000 €/kW ja tuotantokustannukset noin 4 senttiä / kWh. Höyryprosessin käyttäminen voidaan mieltää kannattavaksi vasta sähköteholtaan yli 1000 kW tuotantolaitoksissa (Vartiainen et al. 2002, 24). Voidaan siis todeta, että nykytilanteessa ei olisi kannattavaa rakentaa perinteistä höyrykattilalaitosta kaatopaikkakaasun polttamiseen, sillä kyseessä olisi vähintäänkin noin 500 000 € investointi ja kuten edellä on päätelty, sähkötehoa saataisiin keskimäärin vain noin 115 kW ja lämpötehoa noin 570 kW ulos. Höyryturbiinien hyötysuhde pienessä kokoluokassa on melko huono. Esimerkiksi 30 kW kokoluokassa höyryturbiinin sähköntuotannon hyötysuhde voi olla vain luokkaa 6 – 8 prosenttia. Höyrykone onkin höyryturbiinia taloudellisempi vaihtoehto alle 1 MWe:n kokoluokassa. (Karjalainen 2012, 8-9.) Vaikka koko kaatopaikalla kerätyn kaasun suodattaisi,

kun suodatuskustannukset olisivat noin 60 000 € vuodessa, niin investointi tulisi edullisemmaksi vasta noin kymmenen vuoden kuluttua. Tällä ajanjaksolla tarkasteltaessa kaatopaikkakaasun syntyminen voi vähentyä merkittävästi, sillä nykyään yhä enemmän jätteitä kuljetetaan hyödynnettäväksi kaatopaikalle jätepenkereeseen ajamisen sijaan.

7.5 Takaisinmaksuaika

Seuraavassa vertaillaan kustannusten todellisia ja teoreettisia takaisinmaksuaikoja. Mikroturbiinilaitoksen todellinen takaisinmaksuaika pohjautuu Kymenlaakson Jäte Oy:n todellisiin kustannuksiin, kun taas teoreettiset takaisinmaksuajat sekä mikroturbiini-, että höyrykattilalaitokselle perustuvat taulukossa 2 esitettyihin rakennuskustannuksiin. Laskelmissa on käytetty takaisinmaksuajan kaavaa, jossa investoinnin kustannukset jaetaan vuotuisella tuotolla. Tuloksena saadaan takaisinmaksuaika vuosina. Menetelmässä ei oteta huomioon korkoja eikä arvon alenemista. Vuotuinen tuotto saadaan mikrokaasuturbiinilaitoksen tuottamasta sähköstä ja kaukolämmöstä. Mikrokaasuturbiinilaitoksella tuotettua energiaa on verrattu sähkön ja kaukolämmön hintoihin Suomessa vuosina 2012 – 2014.

7.5.1 Mikroturbiinilaitoksen todellinen takaisinmaksuaika

Todellinen mikroturbiinilaitoksen investoinnin takaisinmaksuaika perustuen Kymenlaakson Jäte Oy:ltä saatuihin tietoihin, kun mikroturbiinilaitoksen todellinen investointikustannus oli n. 830 000 euroa. Vuositasolla mikroturbiinilaitoksen käyttökuluihin on budjetoitu n. 50 000 euroa. Tämä summa sisältää aktiivihiilisuodatuksen kulut, noin 20 000 euroa, mikroturbiinilaitoksen kulut, noin 10 000 euroa, sekä 20 000 euroa palkkoihin ynnä muihin hallinnollisiin kuluihin. Laskelmissa on käytetty mikroturbiinilaitoksen tuotannolle 43 prosentin käyttöastetta.

Mikroturbiinilla tuotettu sähkö vuonna 2013 = 0,7 GWh = 700 000 kWh

Sähkön keskimääräinen hinta vuosina 2012 – 2013, alv 0 % = 44,4 €/MWh (energianet.fi)

Kaukolämmön keskimääräinen hinta vuonna 2012, alv 0 % = 50,8 €/MWh (Energiateollisuus 2014)

Sähkön ja kaukolämmön tuotto- ja ostohinnat saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$Tuotettu\ energia \cdot Energian\ hinta = Energian\ hinta\ vuodessa \quad (7.)$$

| | | | |
|-------|---------------------|------------------------|---------|
| jossa | $Tuotettu\ energia$ | Tuotettu energia | [MWh] |
| | $Energian\ hinta$ | Energian markkinahinta | [€/MWh] |

Mikroturbiinilla tuotetun nettosähkön ostohinta

$$700\ MWh \cdot 44,4\ \text{€} / MWh = 31080\ \text{€} / MWh$$

Mikroturbiinilla tuotettu kaukolämpö

$$Käyttötunnit \cdot \Phi_{KL} = Tuotettu\ energia \quad (8.)$$

| | | | |
|-------|----------------|--------------------------------------|------|
| jossa | $Käyttötunnit$ | Mikroturbiinin käyttötunnit vuodessa | [h] |
| | Φ_{KL} | Kaukolämpöteho | [kW] |

$$3590\ h \cdot 450\ kW = 1615,5\ MWh$$

Mikroturbiinilla tuotetun kaukolämmön nettohinta

$$1615,5\ MWh \cdot 50,8\ \text{€} / MWh = 82067,5\ \text{€} / a$$

Takaisinmaksuaika saadaan laskettua takaisinmaksuajan kaavalla:

$$Takaisinmaksuaika = \frac{Investoinnin\ hinta}{Vuotuinen\ nettotuotto} \quad (9.)$$

$$\frac{830000}{(31080 + 82067,5 - 50000)}\ \text{€} = 13,1\ vuotta$$

7.5.2 Teoreettinen takaisinmaksuaika

Teoreettiset takaisinmaksuajat mikroturbiinilaitokselle ja höyryturbiinilaitokselle perustuen taulukossa (liite 2) annettuihin tietoihin. Teoreettisiin laskelmiin on käytetty

sekä 43 prosentin että 90 prosentin käyttöasteita. Oletetaan että käyttökulut nousevat noin 10 000 euroa 90 prosentin käyttöasteella.

Mikroturbiinilaitoksen teoreettinen takaisinmaksuaika 43 prosentin käyttöasteella:

Investointikustannus noin 1000 €/kWh

Investoinnin kokonaiskustannus

$$195 \text{ kW} \cdot 1000 \text{ €/kWh} = 195000 \text{ €}$$

Takaisinmaksuaika

$$\frac{195000}{(31080 + 82067,5 - 50000)} \text{ €} = 3,1 \text{ vuotta}$$

Mikroturbiinilaitoksen teoreettinen takaisinmaksuaika 90 prosentin käyttöasteella:

Energian tuotanto halutulla käyttöasteella

$$\text{Kokonaissähköntuotanto} \cdot \text{Käyttöaste} = \text{Energian tuotanto} \quad (10.)$$

Sähkön tuotanto 90 prosentin käyttöasteella

$$\left(\frac{0,7 \text{ GWh}}{(0,43 \cdot 100)} \cdot 100 \right) \cdot 0,9 = 1,46 \text{ GWh}$$

Mikroturbiinilla tuotetun nettosähkön ostohinta (Kaava 7)

$$1465 \text{ MWh} \cdot 44,4 \text{ €/MWh} = 65046 \text{ €/a}$$

Kaukolämmöntuotanto

$$(8349 \text{ h} \cdot 450 \text{ kW}) \cdot 0,9 = 3,38 \text{ GWh}$$

Mikroturbiinilla tuotetun kaukolämmön nettohinta

$$3377 \text{ MWh} \cdot 50,8 \text{ €/MWh} = 171552 \text{ €/a}$$

Takaisinmaksuaika

$$\frac{195000}{(65046 + 171522 - 60000)} \text{ €} = 1,15 \text{ vuotta}$$

Höyryturbiinilaitoksen teoreettinen takaisinmaksuaika 43 prosentin käyttöasteella:

Investointikustannus noin 3000 €/kWh

Investoinnin kokonaiskustannus

$$113 \text{ kW} \cdot 3000 \text{ €} / \text{kWh} = 339000 \text{ €}$$

Sähköntuotanto

$$(113,25 \text{ kW} \cdot 8349 \text{ h}) \cdot 0,43 = 407 \text{ MWh}$$

Höyryturbiinilla tuotetun nettosähkön ostohinta

$$407 \text{ MWh} \cdot 44,4 \text{ €} / \text{MWh} = 18070 \text{ €} / a$$

Kaukolämmöntuotanto

$$(566,25 \text{ kW} \cdot 8349 \text{ h}) \cdot 0,43 = 2032 \text{ MWh}$$

Höyryturbiinilla tuotetun kaukolämmön nettohinta

$$2032 \text{ MWh} \cdot 50,8 \text{ €} / \text{MWh} = 103226 \text{ €} / a$$

Takaisinmaksuaika

$$\frac{339000}{(18070 + 103226 - 50000)} \text{ €} = 4,8 \text{ vuotta}$$

Höyryturbiinilaitoksen teoreettinen takaisinmaksuaika 90 prosentin käyttöasteella:

Sähköntuotanto

$$(113,25 \text{ kW} \cdot 8349 \text{ h}) \cdot 0,90 = 851 \text{ MWh}$$

Höyryturbiinilla tuotetun nettosähkön ostohinta

$$851 \text{ MWh} \cdot 44,4 \text{ €} / \text{MWh} = 37784 \text{ €} / a$$

Kaukolämmöntuotanto

$$(566,25 \text{ kW} \cdot 8349 \text{ h}) \cdot 0,90 = 3377 \text{ MWh}$$

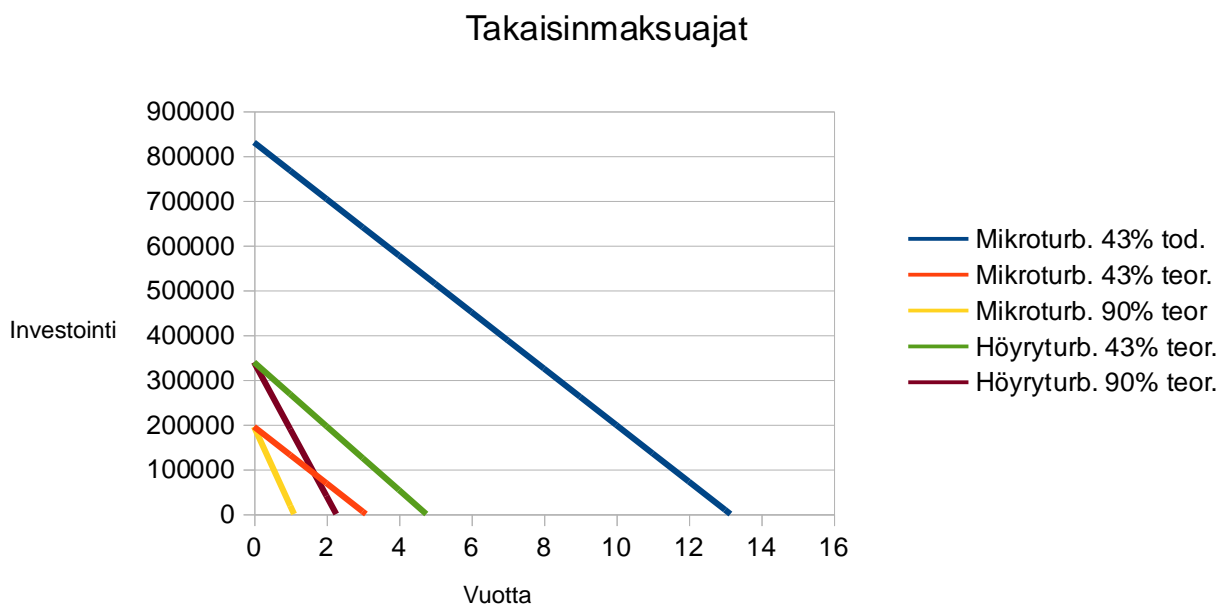
Höyryturbiinilla tuotetun kaukolämmön nettohinta

$$3377 \text{ MWh} \cdot 50,8 \text{ €/MWh} = 171552 \text{ €/a}$$

Takaisinmaksuaika

$$\frac{339000}{(37784 + 171552 - 60000)} \text{ €} = 2,3 \text{ vuotta}$$

Tästä voidaan päätellä että toteutuvat investoinnin kustannukset voivat olla jopa nelinkertaiset verrattuna teoreettisiin investointikustannuksiin. Kaaviossa 1 on esitetty takaisinmaksuaikoja eri käyttöasteilla sekä mikroturbiinilaitokselle että höyrykattilalaitokselle.



Kaavio 1. Takaisinmaksuaikoja eri käyttöasteilla.

8 POHDINTAA

Tässä luvussa pohditaan vaihtoehtoisia ratkaisuja höyrykattilalaitokselle, joka vaikuttaisi olevan kannattamaton. Mikroturbiiniin verrattuna höyrykattilalaitoksella saataisiin vain hieman enemmän tuotettua kaukolämpöä, mutta sähköntuotanto jäisi reilusti

vähäisemmäksi. Kattilalaitos vaatisi todennäköisesti suuremmat käyttökustannukset. Teoreettisia investointikustannuksia tarkastellessa höyrykattilaratkaisulla on noin kolmanneksen suuremmat kustannukset kuin mikrokaasuturbiinilaitoksella. Mikrokaasuturbiini vaikuttaisi olevan kannattavin vaihtoehto suodatuskustannuksista huolimatta käytettäväksi energiantuotantoon kaatopaikkaympäristössä. Mikäli suodatuskustannuksia saataisiin alennettua jollakin edullisemmalla menetelmällä, olisi mikrokaasuturbiini vieläkin kannattavampi ja toimivin ratkaisu edelleen. Muitakin energiantuotantoratkaisuja kaatopaikkakaasun hyödyntämiseen on olemassa, joista varteenotettavimmat ovat soihdun jätelämmön hyödyntäminen ja ORC-prosessi. Siltikään ORC-prosessi ei ole hyötysuhteeltaan hyvä verrattuna mikrokaasuturbiiniin, mutta kuitenkin parempi kuin höyryturbiinilla. ORC-prosessilla päästään noin 16 – 20 prosentin sähköntuotannon hyötysuhteeseen lämmöntuotannon ollessa 80 – 84 prosenttia. (Granö 2011.) Seuraavassa tarkastellaan hieman myös mikrokaasuturbiinilaitoksen tuottaman ylijäämäsähkön mahdollista hyödyntämistä toimistorakennuksen lämmityksessä.

8.1 Jätelämpökattila ja ORC-prosessi

Varteenotettavana ja todennäköisesti kannattavana kaatopaikkakaasun hyödyntämistekniikkana voitaisiin pitää soihdussa poltettavan kaasun pakokaasujen ohjaamista jätelämpökattilaan. Näin kaatopaikkakaasu saataisiin hyödynnettyä kaukolämmöntuotantoon sen sijaan että kaasu poltetaan vain pelkässä soihdussa. Sen sijaan, että soihdun pakokaasut ohjattaisiin jätelämpökattilaan, voitaisiin kaatopaikkakaasu polttaa suoraan lämmityskattilassa. Tästä hieman lisää edempänä.



Kuva 12. Biokaasusoihtu.

Toinen vaihtoehto olisi rakentaa ns. ORC-laitos. ORC tulee sanoista Organic Rankine Cycle. ORC-prosessi on samankaltainen höyryturbiiniprosessiin verrattuna, mutta vesihöyryn sijaan höyrystyvänä välittäjäaineena käytetään matalan höyrystymislämpötilan omaavaa orgaanista nestettä. Kiertoaineena voidaan esimerkiksi käyttää öljyä. Orgaanisen nesteen alhaisemmalla suhteellisella latenttilämmöllä on mahdollista saavuttaa vähintäänkin sama hyötysuhde yhden painetasen ORC-prosessissa kuin vesihöyryprosessissa. ORC-prosessissa saadaan orgaanisen lämmönsiirtoaineen teho ulos alhaisemmillä lämpötiloilla kuin vesihöyryprosessissa ja täten ORC-prosessi soveltuu paremmin käytettäväksi pienessä mittakaavassa. Lämmönvaihdin voidaan sijoittaa esimerkiksi kattilaan, tai savukaasukanavaan. ORC-prosessin tyypillinen sähköntuotannon hyötysuhde on noin 15 – 20 prosenttia ja lämmöntuotannon hyötysuhde noin 60 – 70 prosenttia. Hyötysuhteeltaan ORC-prosessi on vesihöyryprosessia parempi

pienessä mittakaavassa. Tämän menetelmän vahvuuksia ovat vähäinen ylläpidon tarve ja tekniikan yksinkertaisuus. ORC-tekniikkaa pidetään taloudellisesti melko lupaavana vaihtoehtona biomassaa hyödyntävään CHP-tuotantoon 200 – 1500 kWe:n kokoluokassa, mutta myös lämmöntalteenotto on nykypäivänä varteenotettava ORC-prosessin voimanlähde. (Karjalainen 2012, 2) (Turboden 2014). 30 kW:n sähkötehon omaavaan ORC-laitoksen investointikustannus on lähteestä riippuen 2765 – 6666 €/kWe. (Kymenlaakson Jäte 2014) (Konttinen 2012, 12).

8.2 Ylijäämäsähkön hyödyntäminen

Öljyä kuluu Keltakankaan jätekeskuksen toimistorakennuksen lämmittämiseen arviolta jopa noin 25 000 litraa vuodessa. (Savolainen 2014.) Kevyeen lämmitysöljyyn sitoutunut energia on 10 kWh/l, eli toimistorakennuksen lämmittämiseen ja käytetöveden lämmittämiseen kuluu vuodessa n. 250 000 kWh energiaa. Osa tästä voitaisiin korvata yöaikaan mikroturbiinilaitoksen tuottamalla sähköllä, kun jätekeskuksen muut toiminnot eivät tarvitse sähköä.

Kaikkea mikroturbiinilaitoksen tuottamaa potentiaalista sähköenergiaa ei pystytä käyttämään jätekeskuksen toiminnoissa, vaan yli tarpeen tuotettu sähkö joudutaan ohjaamaan sähköverkkoon. Tästä koituu lisäkustannuksia Kymenlaakson jäte Oy:lle sähköveron muodossa. Jätekeskuksen toimintojen ollessa käynnissä, kaikki mikroturbiinilaitoksen tuottama sähkö käytetään hyödyksi.

Kaatopaikkakaasun polttaminen lämmityskattilassa olisi kannattavaa, mikäli se ei sisältäisi niin paljon epäpuhtauksia. Kaasu pitäisi myös suodattaa, jos sitä haluttaisiin käyttää polttoaineena nykyisessä kattilassa öljyn sijaan, sillä se aiheuttaisi melko varmasti samantyyppisiä korroosiovaurioita kattilaan, kuin mikroturbiinilaitoksella. Toinen vaihtoehto olisi uusia poltin ja öljykattila. Lisäksi toimistorakennukselle pitäisi rakentaa kaasuputki noin sadan metrin päästä kulkevasta kaatopaikkakaasulinjasta.

Yksi potentiaalinen käyttökohde mikroturbiinilaitoksen tuottamalle sähkölle jätekeskuksen aukioloaikojen ulkopuolella olisi toimistorakennuksen lämmitysjärjestelmään öljylämmityskattilan rinnalle kytkettävä lämminvesivaraaja tai sähkökattila, jolla lämmitettäisiin lämmitysvesikierron vettä ilta- ja yöaikaan. Tällä tavalla saataisiin

korvattua öljykattilalla tuotettua lämpöä ja vähennettyä lämmitysöljyn kulutusta. Näistä sähkökattila vaikuttaisi olevan kannattavampi vaihtoehto. Yöaikaan toimistorakennuksen käyttöveden lämmitykselle ei ole tarvetta, joten sähkökattilan kuluttama energia kuluisi pääosin rakennuksen lämmittämiseen.

Sähkökattila voitaisiin kytkeä öljykattilan rinnalle toimistorakennuksen keskuslämmitysjärjestelmään. Kattiloille pitäisi suunnitella oma ohjausautomaatiikka, joka hoitaa kattiloiden kytkemisen öljykäytöltä sähkökäytölle ja päinvastoin. Automaatiikka hoitaisi myös öljykattilan takaisinkytkennän mahdollisten häiriötilanteiden varalta. Sähkökattila voisi vastata teholtaan jo olemassa olevan öljykattilan tehoa, jolloin saataisiin taattua yhtä suuri lämmitysteho riippumatta siitä, kumpi kattiloista on käytössä. Jäspi FIL kattila ei myöskään ole ulkomitoiltaan saman kokoluokan öljykattilaa suurempi, jolloin se olisi mahdollista sijoittaa nykyiseen lämmityskeskukseen. Toimistorakennuksen nykyisen öljylämmityskattilan teho on 145 kW.



Kuva 13. Toimistorakennuksen öljylämmityskattila.

Jäspi FIL -sähkökattilat soveltuvat sähkölämmityksessä kohteen mukaan esimerkiksi vuorottaiskäyttöön, täyssähkökäyttöön, kesäsähkökäyttöön, osa-aikakäyttöön, tai

vaikkapa teollisuuskäyttöön. FIL-sähkökattilat ovat varustettu älykkäällä ohjausautomaatiikalla, haponkestävillä laippavastuksilla, varolaitepääkytkimellä sekä hyvällä eristyksellä. Kattiloiden oma lämmönsäätöautomaatiikka säätelee kattilaan taloudellisesti alimman vaadittavan tehon siten, että kontaktorien kytkentätiheydet ja kytkentäkerrat pysyvät mahdollisimman vähäisinä. Jäspin FIL -sähkökattiloissa on varalämmitys-mahdollisuus, kaukokäyttövalmius, sekä tehoporrasrajoitus nimellistehosta. Sähkökat-tila on myös varustettu tehonvalvonta-automaatiikalla sekä sähkökatkon jälkeisellä vii-veautomaatiikalla. (Kaukora 2014.)



Kuva 14. Jäspi FIL -sähkökattiloita. (Kaukora 2014.)

Mikroturbiinilaitoksella tuotettiin sähköä vuonna 2013 noin 0,7 GWh joka vastaa noin 3580 käyttötuntia täydellä teholla. Tämä vastaa noin 9,8 päivittäistä käyttötuntia mikroturbiinilaitoksella. Todellisuudessa laitos on ollut käynnissä vain arkipäivisin jätekeskuksen työajan puitteissa, eikä ole käynyt maksimiteholla. Jos oletetaan, että sähköllä lämmitettäisiin vaikka puolet ajasta eli 12 tuntia vuorokaudessa, niin voidaan karkeasti arvioida, että lämmitysöljyn kulutus saataisiin puolitettua. Tällöin mikroturbiinilaitoksella tarvitsisi tuottaa 125 000 kWh sähköä vuositasolla sähkökattilan käyttöön. Tämä tarkoittaisi sitä, että mikroturbiinien kokonaiskäyttöaste pitäisi saada nostettua hieman yli viiteenkymmeneen prosenttiin.

$$\frac{E_{\text{Lisättävä}}}{E_{\text{Käyttöaste}}} \cdot 100 = \text{Käyttöaste en noston tarve} \quad (11.)$$

jossa $E_{\text{Lisättävä}}$ Lisättävä energiantuotanto [GWh]
 $E_{\text{Käyttöaste}}$ Mikroturbiinilaitoksen käyttöaste [GWh/a]

Mikroturbiinilaitoksen kokonaiskäyttöaste vuonna 2013: 43 %

Mikroturbiineilla tuotettu sähkö vuonna 2013: 0,7 GWh

Arvioitu kevytpolttoöljyn kulutus: 25 000 l = 250 000 kWh

Mikroturbiinilaitoksen arvioitu kokonaiskäyttöaste täydellä teholla

$$\frac{0,7 \text{ GWh}}{(0,43 \cdot 100)} \cdot 100 = 1,628 \text{ GWh}$$

Käyttöasteen korottaminen tarve

$$\frac{0,125 \text{ GWh}}{\left(\frac{0,7 \text{ GWh}}{0,43} \cdot 100\right)} = 7,69 \%$$

Sähkökattilat ovat tosin jonkin verran kalliimpia kuin perinteiset öljy- tai maakaasulämmityskattilat. Tämän kokoluokan kattiloiden hintatiedot ovat saatavilla vain tarjouspyynnöllä, mutta esimerkiksi kotitalouskäyttöön suunnitellut 13 – 21 kW kattiloiden hinnat liikkuvat 2600 – 4500 euron paikkeilla. (Kaukora 2014.) Sähkökattila on siis tässä kokoluokassa jonkin verran öljylämmityskattilaa kalliimpi hankintahinnaltaan. Erillisen kattiloiden ohjausautomaatiikan teettäminen tai hankinta lisää myös investointikustannuksia.

9 LÄHTEET

Alakangas E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT tiedotteita 2045. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Bourke A., Mazzoni M. TIGG 2014. Roles of granulated activated carbon in gas conditioning. [viitattu 23.11.2014]. Saatavissa <http://www.tigg.com/gas.conditioning.html>

Capstone 2010. Product catalog, esite. [viitattu 13.4.2014]. Saatavissa: <http://www.sarlin.com/fi/Energiatekniikka/Turbiinilaitokset>

Ekonergo Oy 2014. [viitattu 28.4.2014]. Sähkön hinta vuosina 2012-2013. Saatavissa: <http://www.energianet.fi>

Energiateollisuus Ry 2014. Sähköntuotanto, artikkeli. [viitattu 2.5.2014]. Saatavissa: <http://www.energia.fi/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto>

Energiateollisuus Ry 2014. Voimalaitostyyppit, artikkeli. [viitattu 2.5.2014]. Saatavissa: <http://www.energia.fi/energia-ja-ymp-rist/s-hk-ntuotanto/voimalaitostyyppit>

Granö, U-P. 2011. Pienempiä CHP -yksiköitä. Projekti-info 05. Highbio-interreg Pohjoinen 2008-2011.

Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P., Pakkanen H. 2000. Höyrykattilatekniikka viides uusittu painos, Helsinki: Edita.

Huhtinen M., Korhonen R., Pimiä T., Urpalainen S. 2013. Voimalaitostekniikka toinen tarkastettu painos, Helsinki: Opetushallitus.

Kara M. 1999. Energia Suomessa. Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. Helsinki: VTT energia – Edita

Karjalainen T. 2012. Pienmuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus – Laitteet ja niiden käyttöönotto. Oulu. [viitattu 20.5.2014]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/7436/Pienimuotoisen_lammon_ja_sahkon_yhteistuotannon_tilannekatsaus_laitteet_ja_niiden_kayttoonotto.pdf

Kaukora 2014. Jäspi FIL -sähkökattilat 31,5-1800kW -esite.

Koivula A., Laitospäällikkö, Kymenlaakson Jäte Oy. Haastattelu 22.5.2014

Konttinen J. 2012. Pien-CHP:n teknologiset ratkaisut. Jyväskylän yliopisto, kemian laitos. [viitattu 13.7.2014]. Saatavissa:

<http://www.forestenergy.org/openfile/378?PHPSESSID=007d1ce6028c9f7a94089e1581d3928d>

Kymenlaakson Jäte Oy 2014. Verkkosivut. [viitattu 4.4.2014]. Saatavissa:

<http://www.kymenlaaksonjate.fi>

Kymenlaakson Jäte Oy 2013. Vuosikertomus. [viitattu 4.4.2014]. Saatavissa:

<http://www.kymenlaaksonjate.fi/fi/Yhtiö/Vuosikertomukset/>

Micre 2013. CHP –teknologia, artikkeli. [viitattu 15.4.2014]. Saatavissa:

<http://www.micre.eu/fi/energiantuotanto/chp/>

Olli M., Rinta-Kanto S. 2013. Metaanimittaukset Ämmässuon vanhalla kaatopaikalla. [viitattu 28.4.2014]. Saatavissa:

http://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/jatehuolto/Documents/Metaanimittaukset_ammassuon_vanhalla_kaatopaikalla_2013.pdf

Savolainen P., Käyttöpäällikkö, Kymenlaakson Jäte Oy. Haastattelu 5.5.2014

Syri S. 2013. Aalto -yliopisto. Luentomateriaali. [viitattu 13.4.2014]. Saatavissa:

https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/ene-59.2101/luennot/Ene-59_2101_luento_2.pdf

Turboden 2014. Organic Rankine Cycle, artikkeli. [viitattu 13.12.2014]. Saatavissa:

<http://www.turboden.eu/en/rankine/rankine-history.php>

Vartiainen E., Luoma P., Hiltunen J., Vanhanen J. 2002. Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO₂ -päästöt, Helsinki: Gaia group

Taulukko 1, Eri pien-CHP -ratkaisujen kustannuksia (Micare 2013) Liite 2/3

| CHP- tekniikka | Pienin koko kW _e | Suurin koko kW _e | Pääomakustannukset €/kW _e | Sähköntuotannon hyötysuhde % | CHP-tuotannon kokonaishyötysuhde % | köntuotanto itannus tiä/kWh* |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------------|--|------------------------------------|
| Mikroturbiini | > 1 | < 1 000 | 500 - 800, lämmöntalteenotolla lisää 50 - 250 | n. 15 | 85 lämmöntalteenotolla | 18 |
| Poltto­moottori | 10 | 20 000 | 800 - 1 000, lämmöntalteenotolla lisää 50 - 150 | 25 - 40 | n. 80 | 23 |
| Stirling- moottori | 0,5 | < 75 | 1 400 - 3 000, sisältää lämmönvaihtimen | 15 - 35 | 75 - 90 | 13,5 |
| Höyryturbiini ja -kone | 100 | 500 000 | 1 300 - 3 000 | 15-35 (alle 3 MW _e) | 75-85 (alle 3 MW _e) | 12 |
| Poltto­kennot | 0,5 | 2 000 | 1 000 - 2 7000, sisältää lämmöntalteenoton | 30 - 50 | 75 - 95 | 24 |

SARLIN MITTAUSPÖYTÄKIRJA biokaasupumppaamo

| | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------|--------------------------------|-------|-------------------|
| Pumppaamo Kymenlaakson Jäte Oy | | | | | Pvm 30.8.13 | | Aika P. 20 | | |
| Energia | | | | | Hyöty 105 | | KWh/soihtu | | KWh |
| Kaasun määrä Hyöty 87724 / 22000 Nm ³ soihtu | | | | | Käyttötunnit | | | | |
| Ilmanpaine 1009 mba | | | | | Säätila - ulko muuttuva °C | | Lämpötila - ulko +15 °C | | |
| Linja | CH ₄ til. -% | CO ₂ til. -% | O ₂ til. -% | H ₂ S ppm. | Paine mbar | Lämpötila [C] | Virtaus m/s | Säätö | Virtaus uusi, m/s |
| 11/1. | 41,1 | 21,6 | 0,2 | 758 | -2,20 | 19,0 | 2,76 | 2- | |
| 6/2. | 42,6 | 25,1 | 0,2 | 547 | -1,27 | 19,2 | 1,46 | 2+ | |
| 7/3. | 48,8 | 25,2 | 2,8 | 3246 | -6,23 | 19,1 | 2,67 | 3- | |
| 10/4. | 32,8 | 27,2 | 4,5 | 141 | -0,62 | 20,1 | 1,28 | 2→1 | 0,89 |
| 2/5. | 39,1 | 25,2 | 1,2 | 878 | -4,93 | 19,9 | 4,49 | 3- | |
| * 3/6. | 56,0 | 28,1 | 0,5 | 1464 | -8,03 | 20,2 | 4,62 | 3→3+ | 6,19 |
| + 4/7. | 58,0 | 40,6 | 0,1 | 1758 | -11,59 | 19,2 | 0,75 | 4→4% | 1,10 |
| 8/8. | 32,1 | 23,2 | 1,2 | 51 | 0,53 | 19,1 | 0,05 | k Av | 10 |
| 1/9. | 44,2 | 24,8 | 1,1 | 982 | -16,92 | 19,0 | 0,47 | 2 | |
| 9/10. | 23,2 | 21,2 | 2,2 | 122 | 0,00 | 19,0 | 1,15 | 2→1+ | 0,81 |
| 5/11. | 42,2 | 27,2 | 1,1 | >5000 | -19,48 | 19,1 | 0,43 | 5 | |
| vara/12. | 42,2 | 26,1 | | | | | | | |
| vara/13. | 42,2 | 28,7 | | | | | | | |
| 14. | 42,2 | 25,5 | | | | | | | |
| GA 10. | 48,2 | 26,2 | 1,2 | >5000 | | | | | |
| Imu GA | 42,7 | 28,0 | 1,4 | 1061 | | | | | |
| Paine GA | 48,7 | | 2,2 | | | | | | |
| Näyttö | 44,6 | | 1,2 | | | | | | |
| Kaasun virtaus 87 Nm ³ /h | | | | | Kiertomantapuhallin | | A Hz | | |
| Ohjaus | | | | | % | | Auto Käsi | | |
| Paine P1 | | | | | -13 / -15 mbar | | Lämpötila T1 21,0 / 67,37 °C | | |
| Paine P2 | | | | | 56 28 / 25 mbar | | Lämpötila T2 59,5 / 28,5 °C | | |
| Paine P3 | | | | | mbar | | Lämpötila T3 9,1 °C | | |
| Paine P4 | | | | | 55 45 mbar | | Lämpötila T4 6,6 °C | | |

KWh_{uusi} = 657674
 KWh_{soihtu} = 25931
 KWh₊ = 1287955

KWh = 11432
 KWh = 9253
 KWh = 8285
 MWh = 624
 MWh = 6566
 MWh = 6270
 Soihtu = 5991
 -u- rpm = 1114