



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

BIOKAASUN HYÖDYNTÄMINEN ENERGIA- OMAVARAISUUDEN PARANTAMISEKSI

Forssan jätevedenpuhdistamo

Joonas Anttila

Opinnäytetyö
Toukokuu 2017
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Sähkövoimatekniikka

ANTTILA, JOONAS:

Biokaasun hyödyntäminen energiaomavaraisuuden parantamiseksi
Forssan jätevedenpuhdistamo

Opinnäytetyö 42 sivua
Toukokuu 2017

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja oli Forssan vesihuoltoliikelaitos, ja työ kirjoitettiin Forssan jätevedenpuhdistamolle. Opinnäytetyön tarkoitus oli luoda julkaisu, jota voidaan käyttää oppaana Forssan jätevedenpuhdistamon energiaomavaraisuuden parantamisessa biokaasua hyödyntäen. Työssä esiteltiin nykyajan yleisimmät biokaasun hyödyntämistekniikat, jotka soveltuvat parhaiten jätevedenpuhdistamoille. Työssä tutkittiin biokaasun hyödyntämisen nykytilaa Forssan puhdistamolla, minkä jälkeen ehdotettiin kehittämistoimenpiteitä kokonaisvaltaisemman hyödyntämisen saavuttamiseksi. Opinnäytetyön tavoitteena oli osoittaa kirjallisuuden ja laskelmien avulla muutoksen tarve puhdistamon biokaasun hyödyntämisessä.

Forssan jätevedenpuhdistamon kaasumoottorin epävakaa toiminta aiheuttaa energian hukkaamista, sillä biokaasua joudutaan hyödyntämisen sijasta polttamaan vararatkaisuna soihdussa. Kaasumoottorin käyttökatoilla on iso vaikutus puhdistamon sähköntuotantoon, jolloin myös puhdistamon sähköntuotannon omavaraisuusprosentti pysyy vaatimattomana. Lisäksi kaasumoottorin tuottamaa lämpöä ei hyödynnetä millään tapaa, mistä johtuen energiaa hukataan entisestään. Lämpöä tuotetaan biokaasun avulla ainoastaan höyrykehittimellä, joka parhaimmassa tapauksessa voidaan jättää prosessissa vararatkaisuksi, mikäli kaasumoottorin tuottama lämpö hyödynnetään. Lämmöntuotanto voidaan jatkossa hajauttaa, minkä ansiosta lämpöä saadaan tuotettua biokaasun avulla kahdessa eri puhdistamon rakennuksessa.

Opinnäytetyössä ehdotettiin teknisen käyttöikänsä lopussa olevan kaasumoottorin korvaamista uudenaikaisella kaasumoottorilla sekä siirtymistä sähkön- ja lämmön yhteistuotantoon eli CHP-tuotantoon. Parhaimmaksi vaihtoehdoksi kaasumoottorin tuottaman lämmön hyödyntämiseksi todettiin moottorin pakokaasujen sisältämän lämmön hyödyntäminen yksinkertaisella pakokaasukattilalla. Lisäksi työssä otettiin kantaa jo suunnitella olevaan lämmöntuotannon hajauttamiseen uuden kaasulinjan avulla. Lämmöntuotannon hajauttamista perusteltiin mahdollisuudella hyödyntää vanhaa lämpökattilaa vaihtamalla siihen kaasulle sopiva poltin ja sekä kaukolämmön että öljylämmityksen tarpeen vähenemisellä. Jatkotutkimusaiheeksi ehdotettiin selvitystä biokaasun puhdistamisen tarpeesta ennen sen hyötykäyttöä kaasumoottorilla.

Asiasanat: biokaasu, jätevedenpuhdistamo, kaasumoottori, CHP-tuotanto

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

ANTTILA, JOONAS:

Use of Biogas to Improve Energy Self-sufficiency
Forssa's wastewater treatment plant

Bachelor's thesis 42 pages
May 2017

This Thesis was written for Forssa's wastewater treatment plant. The purpose of this thesis was to produce a document that can be used as a guide to improving energy self-sufficiency by utilizing biogas in Forssa's wastewater treatment plant. The Thesis discusses the most common biogas utilization techniques that are most suitable for wastewater treatment plants. It also researched the current state of utilization of biogas at Forssa's wastewater treatment plant, after which was proposed development measures. The goal was to show the need to change in the utilization of biogas with based on existing and calculations.

The practical part of the research was done by examining the biogas production and the gas motor. This was carried out by researching the production statistics for 2011–2015. The gas motor was examined by calculating the degree of energy self-sufficiency in electricity production and efficiency of the gas motor. The heat production of the wastewater treatment plant was summarized by examining the district heating bills for 2011–2015 and calculating the proportion of heat generated by the steam generator.

As result of the investigation, the old gas motor need replacement and transition to CHP production. A simple exhaust gas boiler was recommended to utilize the heat produced by the gas motor. The result also supported the already planned heat decentralization with a new gas line. The decentralization of heat production was justified by the possibility of utilizing the old boiler by replacing the burner suitable for the gas and by reducing the need for both district heating and oil heating. For future research topic, could be the cleaning of the biogas before utilizing it with gas motor.

Key words: biogas, wastewater treatment plant, gas motor, CHP production

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	TEORIA	8
2.1	Biokaasu.....	8
2.1.1	Biokaasun hyödyt.....	8
2.2	Biokaasun muodostuminen jätevedenpuhdistusprosessissa	9
2.3	Biokaasun hyödyntämistavat	9
2.3.1	Lämmön tuotanto kaasukattilalla	10
2.3.2	Lämmöntuotanto höyrykehittimellä.....	11
2.3.3	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (CHP).....	12
2.3.4	Biokaasun soihtupoltto.....	13
2.4	Kaasumootorit.....	13
2.4.1	Ottokaasumoottori.....	14
2.4.2	Dieselkaasumoottori.....	16
2.4.3	Kaksoispolttoainemoottori	16
2.5	ORC	17
2.6	Mikroturbiinit.....	19
2.7	Biokaasun puhdistus	21
3	BIOKAASUN HYÖDYNTÄMINEN FORSSAN JÄTEVEDENPUDISTAMOLLA	23
3.1	Biokaasun hyödyntämislaitteisto	23
3.1.1	Kaasumoottori ja generaattori	23
3.1.2	Höyrykehitin	25
3.2	Biokaasun tuotanto	26
3.3	Sähköntuotanto	27
3.3.1	Omavaraisuus	28
3.3.2	Sähköntuotantoon hyödynnetty biokaasu	29
3.3.3	Kaasumoottorin hyötysuhteet.....	31
3.4	Lämmöntuotanto	31
3.4.1	Höyrykehittimellä tuotettu energia	32
3.4.2	Kaukolämpö	32
4	TOIMENPITEET ENERGIAOMAVARAISUUDEN PARANTAMISEKSI	33
4.1	CHP-tuotantoon siirtyminen	33
4.1.1	Uusi kaasumoottori	33
4.1.2	Kaasuanalyysi	35
4.2	Lämmöntuotannon hajauttaminen	35
5	POHDINTA.....	37

5.1 Yhteenveto	37
5.2 Luotettavuus ja eettisyys	38
5.3 Jatkotutkimusaiheet	38
LÄHTEET	40

ERITYISSANASTO

CH ₄	metaani
CHP	combined heat and power generation (= sähkön ja lämmön yhteistuotanto)
CO ₂	hiilidioksidi
kWh/a	vuoden kokonaissähkönkulutus
kWh _{tuotettu}	tuotettu sähköenergia
mg/Nm ³	milligrammaa kuutiota kohti normaaliolosuhteissa
η	hyötysuhde
ORC	Organic Rankine Cycle
P _{gen}	generaattorin pätöteho
Q	lämpöarvo
q _v	biokaasun virtauksen mitoitusarvo
SiO ₂	piioksidi
t	aika
V	tilavuus
W ₁	koneen ottama energia
W ₂	koneesta hyödyksi saatu energia

1 JOHDANTO

Biokaasu on uusiutuva energianlähde ja biopolttoaine, jota syntyy jätevedenpuhdistamoiden puhdistusprosessin sivutuotteena. Biokaasu on palava kaasuseos, joten se voidaan hyödyntää sellaisenaan puhdistamon sähkön- ja lämmöntuotannossa. Tätä vihreää energiaa tulisi arvostaa yhä enemmän ja pyrkiä hyödyntämään sitä mahdollisimman kokonaisvaltaisesti. Biokaasun talteenotolla ja hyötykäytöllä on suuri vaikutus kasvihuonepäästöjen vähentämiseen. Lisäksi näin toimimalla jätevedenpuhdistamolla saavutetaan merkittäviä taloudellisia säästöjä.

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on Forssan vesihuoltoliikelaitos ja työ kirjoitetaan Forssan jätevedenpuhdistamolle. Forssan puhdistamolla on ollut ongelmia biokaasun hyödyntämisessä etenkin kaasumoottorikäytössä, mikä on johtanut energian hukkaamiseen. Lisäksi kaikkia lämmöntuotannon mahdollisuuksia ei ole otettu hyötykäyttöön, mikä on lisännyt hukatun energian määrää. Puhdistamon energiaomavaraisuus on ollut laskussa, vaikka suunnan pitäisi olla koko ajan kehittyvän tekniikan ansiosta päinvastainen.

Biokaasun hyödyntämistavat ja hyödyntämiseen käytettävät laitteistot kokevat isoja muutoksia tulevaisuudessa. Tulevaisuuden yleinen hyödyntämistapa voi olla esimerkiksi biokaasun jalostaminen liikennepolttoaineeksi. Myös sähkön- ja lämmöntuotannosta tulee tehokkaampaa kehitteillä olevien hyötysuhteiltaan parempien tuotantotekniikoiden ansiosta. Vaikka yleisesti biokaasun hyödyntämiseen on nykyaikana käytössä useita eri teknisiä ratkaisuja, on jätevedenpuhdistamoympäristöön soveltuvia vaihtoehtoja varsin vähän.

Tässä opinnäytetyössä esitellään tämän hetken yleisimmät tekniikat biokaasun hyödyntämiseen, jotka soveltuvat parhaiten jätevedenpuhdistamoille. Lisäksi selvitetään biokaasun hyödyntämisen nykytilanne Forssan jätevedenpuhdistamolla sekä ehdotetaan korjauksia toimenpiteitä puhdistamon energiaomavaraisuuden parantamiseksi. Tavoitteena on luoda julkaisu, joka toimii oppaana matkalla kohti energiaomavaraista jätevesien puhdistusta Forssassa.

2 TEORIA

2.1 Biokaasu

Biokaasua muodostuu, kun mikrobit hajottavat orgaanista ainetta hapettomassa olosuhteissa. Mikrobin hajottaessa orgaanista ainetta, syntyy biokaasua sekä lannoitekäyttöön hyvin soveltuvaa orgaanista mädätysjäännöstä. Biokaasun muodostumisprosessia voidaan kutsua myös anaerobiseksi käsittelyksi, biokaasutukseksi tai mädätykseksi. [24.]

Biokaasu on kaasuseos, joka sisältää runsaasti metaania (CH_4). Juuri metaani on biokaasun olennaisin aine energiankäytön kannalta. Kaasun koostumus on riippuvainen mädätysprosessin laadusta ja mädätettävästä biomassasta. Metaanin osuus kaasuseoksesta on tavallisesti 50–70 % ja hiilidioksidin (CO_2) 30–50 %. Biokaasussa on myös hyvin pieninä pitoisuuksina mm. vettä, happea, typpeä, vetyä, ammoniakkia ja rikkiyhdisteitä. [17.]

Biokaasu on lämpöarvoltaan hyvä kaasuseos. Sen lämpöarvo on normaalissa ilmanpaineessa 4,4–7,4 kWh/m³ metaanipitoisuudesta riippuen. [19.] Kun kyseessä on kaasu, lämpöarvo ilmaisee aineen täydellisessä palamisessa kehittyvän lämpöenergiämäärän aineen tilavuusyksikköä kohti [25]. Lämpöarvo ilmoitetaan kilowattitunteina kuutiota kohti (kWh/m³). Lämpöarvoltaan yksi kuutio puhdasta metaania vastaa noin yhtä litraa polttoöljyä [3].

2.1.1 Biokaasun hyödyt

Biokaasu on uusiutuva energianlähde ja biopolttoaine, jota arvostetaan yhä enemmän. Metaani vapaasti ilmakehään päästessään on 20–70 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi. Mikäli muodostunut biokaasu otettaisiin talteen ja hyötykäytettäisiin, voitaisiin kasvihuonekaasujen päästöjä vähentää merkittävästi. [24.]

Biokaasu on palava kaasu, joten sitä voidaan hyödyntää sellaisenaan lämmön- ja sähkön tuotannossa. Biokaasua voidaan myös jalostaa liikennepolttoaineeksi nostamalla sen metaanipitoisuutta yli 95 %:iin poistamalla kaasusta hiilidioksidia. Liikennebiokaasusta tu-

lee lisäksi poistaa korroosiota aiheuttavaa rikkivetyä, vettä ja piiyhdisteitä. [2.] Puhdistettua biokaasua voidaan liikennekäytön lisäksi hyödyntää syöttämällä sitä maakaasuverkkoon [17].

2.2 Biokaasun muodostuminen jätevedenpuhdistusprosessissa

Jätevedenpuhdistuksessa biokaasun muodostumisprosessia kutsutaan mädätykseksi. Puhdistamolietettä mädätetään suljetussa reaktorissa, hapettomassa tilassa. Reaktorin lämpötila on riippuvainen valitusta mädätysprosessista. Mesofiilisessa prosessissa lämpötila on 35–37 °C ja termofiilisessa prosessissa 50–55 °C. Erona näissä prosesseissa on lähinnä juuri lämpötila, joka termofiilisessa prosessissa on 13–20 °C korkeampi. [23.] Yhden liete-erän käsittelyaika on yleensä noin 14–27 vuorokautta. Käsittelyaikaan ja lopputuotteen laatuun voidaan vaikuttaa mädätysprosessin valinnalla. Termofiilisessa prosessissa käsittelyaika on vain noin 14 vuorokautta, kun taas mesofiilisessa prosessissa lietteen käsittelyyn kuluu noin 21 vuorokautta. Lietteen sisältämät taudinaiheuttajat tuhoutuvat tehokkaammin termofiilisessa prosessissa korkeasta lämpötilasta johtuen, minkä takia lopputuotteen hygieeninen laatu on parempi kuin mesofiilisella käsittelyllä. [14.] Lisäksi termofiilisessa prosessissa biokaasua syntyy enemmän kuin mesofiilisessa prosessissa [6]. Toisaalta termofiilinen prosessi vaatii huomattavasti enemmän energiaa reaktorin lämmitykseen, mikä tekee siitä kalliimman vaihtoehdon. [14.] Suomessa suurin osa mädätysprosesseista on mesofiilisiä [23].

Lietettä lämmitetään tapauskohtaisesti joko lämmönvaihtimilla tai höyryä hyödyntäen [23]. Lämpö auttaa ylläpitämään mikrobikantoja, jotka käyttävät ravinnokseen lietteen orgaanista ainetta. Käsittelyn tuloksena osa orgaanisesta aineesta muuttuu biokaasuksi. Koko mädätysprosessi tuottaa jätevedenpuhdistamolle helposti kuivattavaa lietettä, joka siirtyy kuivausprosessiin. Mädätyksessä sivutuotteena syntyvä biokaasu johdetaan kaasuprosessiin, jossa sitä voidaan käyttää laitoksen sähkön- ja lämmöntuotantoon. [14.]

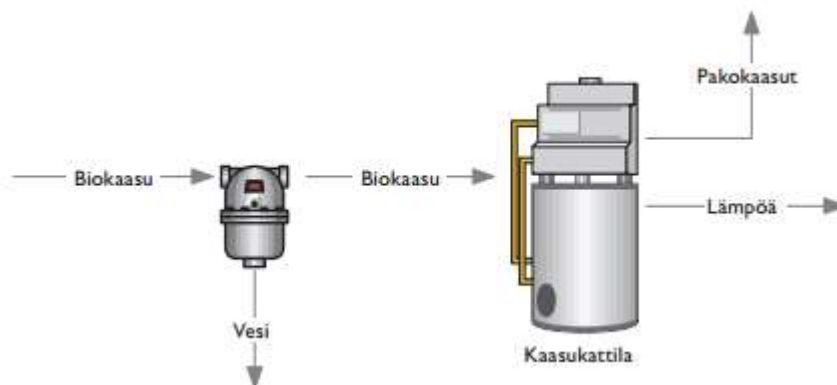
2.3 Biokaasun hyödyntämistavat

Biokaasun hyödyntämistapaa valitessa on arvioitava tuotettavan biokaasun määrä ja paras käyttökohde. Hyödyntämistapa on riippuvainen laitoksen sijainnista ja kannattavimmista

hyödyntämistavoista paikallisesti. Käytännössä jätevedenpuhdistamoilla vaihtoehtoja ovat lämmöntuotanto, yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto sekä mekaaninen energia. Pelkkää lämpöä voidaan tuottaa kaasukattiloilla tai höyrykehittimillä, kun taas yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon voidaan käyttää kaasumoottoreita tai mikroturbiineja. Mekaanisen energian tuotanto on vaihtoehto lähinnä silloin, kun puhdistamo tarvitsee sitä ilmastukseen jäteveden käsittelyprosessissa. Tällöin kaasumoottorin tai mikroturbiinin energia ohjataan jäteveden ilmastuskompressorille. [15.]

2.3.1 Lämmön tuotanto kaasukattilalla

Yksinkertainen ja yleinen ratkaisu on hyödyntää biokaasua lämmitykseen kaasukattilan avulla (kuva 1). Biokaasusta erotetaan vesi, minkä jälkeen se ohjataan kaasupolttimelle matalassa paineessa. Kaasupoltin lämmittää vettä laitoksen kiertovesijärjestelmään. [15.]



KUVA 1. Lämmöntuotanto biokaasusta [15]

Lämmöntuotanto kattilalla on investoinneiltaan pieni ja vaatii vähän huoltoa ja valvontaa. Vanhoja lämpökattiloita voidaan hyödyntää lämmöntuotannossa vaihtamalla niihin kaasulle sopiva poltin. Kaasupolttimia on laaja valikoima eri kokoluokille. Lämmöntuotannon hyötysuhteeksi kattiloiden avulla voidaan saada jopa yli 90 %. [14.] Toisaalta, vaikka energiahyötysuhde on korkea, biokaasun potentiaali työn tekoon menetetään. Tästä syystä lämmöntuotannon exergiahyötysuhde on nolla. Toisin sanoen mahdollisuus mekaanisen energian tuottamiseen menetetään. [13.]

Mikäli jätevedenpuhdistamo on liitetty kaukolämpöverkkoon, voidaan lämpöä myös syöttää kaukolämpöverkkoon. Näin tehdään esimerkiksi Lahden ja Hämeenlinnan jätevedenpuhdistamoilla. Lämmöntuotannon merkittävä ongelma kuitenkin on, että kesäisin lämmölle ei välttämättä ole paljoakaan tarvetta. [27.]

2.3.2 Lämmöntuotanto höyrykehittimellä

Biokaasu voidaan hyödyntää myös höyrykehittimellä ja käyttää tuotettua höyryä esimerkiksi lietteen lämmittämiseen [23]. Höyrykehittimen pääosia ovat poltin, palotila, kierukka, vedenerotin ja vesipumppu [9]. Esimerkki höyrykehittimen rakenteesta on esitetty kuvassa (2).



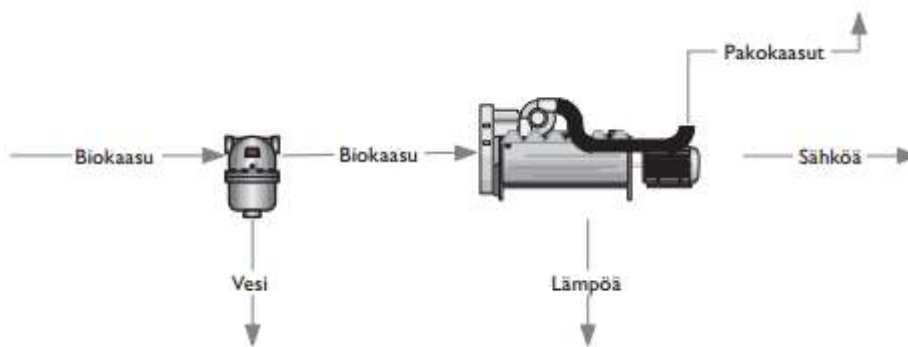
KUVA 2. Höyrykehittimen rakenne [9]

Biokaasu johdetaan höyrykehittimen polttimelle. Palokaasut lämmittävät palotilaan kierrettyä höyrykierukkaa, jolloin sinne pumpattu vesi kuumenee ja muuttuu höyryksi. Ennen syntyneen höyryn hyötykäyttöä, voidaan siitä erottaa vettä kuivemman höyryn saamiseksi. Erotettu vesi palautetaan takaisin seuraavaan kiertoon. [9.]

Höyrykehittämiä on saatavilla laajasti 5–100 barin painealueelle. Höyryntuotanto sijoituu välille 150–40 000 kg/h painealueesta riippuen. Höyrykehittimien hyötysuhteet ovat lähes aina 88–97 % kuormasta riippumatta. [9.]

2.3.3 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (CHP)

Yleisin Suomen jätevedenpuhdistamoilla käytössä oleva biokaasun hyödyntämistapa on sähkön ja lämmön yhteistuotanto (CHP, Combined Heat & Power). Vedenerotuksen jälkeen biokaasu ohjataan kaasumootorille, joka pyörittää sähkögeneraattoria (kuva 3). [15.]



KUVA 3. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto biokaasusta [15]

CHP-käytössä voidaan kaasumootorin jäähdytysjärjestelmästä ja pakokaasuista ottaa talteen lämpöä ORC-tekniikkaa (Organic Rankine Cycle) hyödyntävällä laitteistolla tai yksinkertaisemmin pelkkää pakokaasukattilaa hyödyntäen. Hyödyntämällä myös pakokaasujen sisältämä energia, päästään CHP-käytössä korkeisiin hyötysuhteisiin. [15.] ORC-tekniikkaa käsitellään tarkemmin luvussa 2.5.

Sähkön ja lämmön yhteistuotannon hyötysuhde nykytekniikalla on jopa 70–90 % riippuen kokoluokasta [14]. Kokoluokan kasvaessa myös kokonaishyötysuhde kasvaa [4]. Pelkän sähköntuotannon hyötysuhde jää noin 25–30 %:iin, joten se ei ole kannattavaa [14].

Yleisimmin biokaasulla toimivissa lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksissa käytetään ottomootoritekniikka hyödyntävää kaasumootoria ja dieselmootorin tekniikkaa hyödyntävää kaksoispolttoainemootoria. Myös mikroturbiinit ovat alkaneet yleistyä. [4.]

2.3.4 Biokaasun soih tupoltt o

Kun biokaasun hyödyntäminen ei ole mahdollista, joudutaan se polttamaan soih tupoltt ossa. Biokaasun soih tupoltt aminen toimii vararatkaisuna hyödyntämislaitteiston ollessa rikkoutunut tai huollossa, eikä laitoksella ole syntyvälle biokaasulle riittävästi varastokapasiteettia. Biokaasu poltetaan soihdussa, jotta sen sisältämän metaanin kasvihuonevaihutusta pystytään vähentämään. Poltettaessa biokaasua soihdussa, energiaa menee hukkaan, joten soih tupoltt on määrä pyritään pitämään minimissä. Lähes jokaisella suomalaisella jätevedenpuhdistamolla on soih tu vararatkaisuna. Vararatkaisuna voi toimia myös yksinkertainen lämpökattila. [15.]

2.4 Kaasumoottorit

Kaasumoottori on polttomoottori, jossa käytetty polttoaine on kaasumaista [18]. Jätevedenpuhdistamoilla biokaasua hyödyntävä kaasumoottori on tyypillisesti kokonaisteholtaan noin 100 kW – 2 MW [14]. Kaasumoottorit jaetaan tyypillisesti otto- ja dieselmoottoreihin [18]. Vuonna 2008 arviolta noin puolet kaikista Euroopan CHP-laitoksista käyttivät nelitahtisia ottomoottoreita ja puolet dieselmoottoreita [4].

Sähköntuotannon hyötysuhde kaasumoottoreissa on tyypillisesti 30–40 % ja lämmöntuotannon hyötysuhde 45–50 % kokoluokasta riippuen [20]. CHP-tuotantoon suunnitellut kaasumoottorit ovat yleisesti vakiokierrosluvulla käyviä, joten sähköntuotannon hyötysuhde laskee kuorman pienentyessä [1]. Taulukossa (1) on esitetty kahdelle eri kokoluokalle kaasumoottorin hyötysuhteet, kierrosnopeudet sekä huolto- ja korjausvälit.

TAULUKKO 1. Kaasumoottorin tekniset ominaisuudet [20]

	KAASUMOOTTORI < 200 kW	200 – 2000 kW
Sähköhyötysuhde	30 – 38 %	35 – 40 %
Lämpöhyötysuhde	45 – 50 %	45 – 50 %
Kokonaishyötysuhde	75 – 90 %	80 – 90 %
Perushuoltoväli	2000 – 5000 h	2000 – 5000 h
Peruskorjausväli	15 000 – 20 000 h	20 000 – 30 000 h
Kierrosnopeus	1000 – 3000 rpm	1000 – 1800 rpm

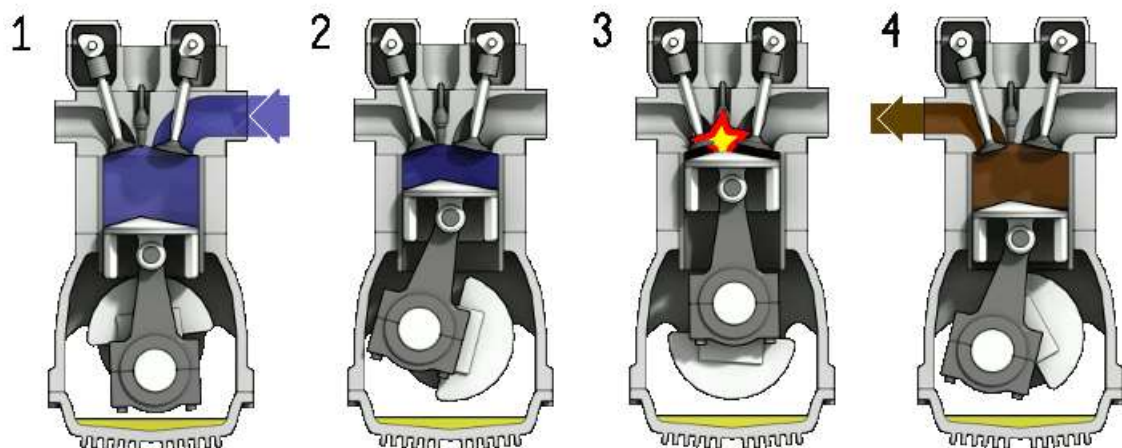
Parhaiten kaasumootorit soveltuvat kohteisiin, joissa vaaditaan hyvää sähköntuotannon hyötysuhdetta, ja lämmön ja sähkön tarve on melko tasainen [10]. Kaasumootoreita on käytössä useilla Suomen jätevedenpuhdistamoilla ja niiden käytöstä on pitkä kokemus [27]. Kaasumootorin investointikustannukset ovat mikroturbiiniin verrattuna edullisemmat, mutta sen käyttö- ja huoltokulut korkeammat [15]. Kaasumootorin huonona puolena huoltokustannuksien lisäksi voidaan pitää sen korkeaa melutasoa.

2.4.1 Ottokaasumoottori

Ottomootorin toimintaperiaate voidaan ymmärtää paremmin tutkimalla sen kiertoprosessin eri vaiheita. Kiertoprosessit ovat tyypillisesti kaksi- tai nelitahtisia. Yksi kierto käsittää neljä vaihetta:

1. Aineen imu sylinteriin,
2. puristus (syttyminen),
3. paisunta ja
4. palokaasujen poisto.

Jos nämä vaiheet tapahtuvat moottorissa yhden kierroksen aikana, on kyseessä kaksitahtinen moottori. Mikäli vaiheet tapahtuvat kahden kierroksen aikana, moottori on nelitahtinen. [18.] Kuvassa (4) on esitetty kiertoprosessin kaikki vaiheet. Mikäli CHP-laitoksessa käytetään ottomoottoritekniikkaa hyödyntävää kaasumootoria, on se kiertoproseltaan nelitahtinen [4].



KUVA 4. Ottomootorin kiertoprosessi [30]

Ottomoottorissa polttoilma ja kaasu sekoitetaan, minkä jälkeen seos syötetään sylinteriin [18]. Koska kaasu sekoitetaan polttoilman kanssa, kaasun painetta ei moottorissa tarvitse nostaa kovin korkeaksi. Pienimmillään jopa 0,1 barin paine voi riittää. Paineen suuruus on kuitenkin riippuvainen aina moottorin koosta ja tyypistä. [8.] Sylinterissä mäntä puristaa seosta, minkä jälkeen se sytytetään sähkökipinällä juuri ennen kuin mäntä on liikeratansa ylimmässä kohdassa eli yläkuolokohdassa. Palo on räjähdysmäistä, minkä seurauksena paine työntää männän takaisin ala-asentoon. [18.] Palokaasujen poistuminen tapahtuu pakoventtiilin kautta, kun mäntä työntää palokaasut ulos sylinteristä [8]. Mitä enemmän polttoilman ja kaasun seosta pystytään puristamaan, sitä enemmän saadaan työtä, jolloin myös hyötysuhde on parempi [18].

Puristusta rajoittaa kuitenkin seoksen lämpeneminen puristuksessa. Lämpö saattaa nousta niin korkeaksi, että se sytyttää polttoaineen. Tätä ilmiötä kutsutaan nakutukseksi. Nakutusilmiö on moottorille vaarallinen suurien lämpö- ja painerasitusten vuoksi. Nakutusilmiötä voidaan ehkäistä esimerkiksi nakutusanturilla, joka tunnistaa moottorille haitallisen nakutuksen ja lähettää tiedon ohjainyksikölle. [18.]

Kun polttoaineena käytetään biokaasua, puristussuhde moottorissa voi olla 11–12,5. Koska jätevedenpuhdistamoilla biokaasu tuotetaan reaktorissa, saattaa se aiheuttaa pientä vaihtelua biokaasun metaanipitoisuudessa. Tämän takia biokaasua käyttävät ottokaasumoottorit ovat yleensä varustettu automaattisella sytytyksen säädöllä, jonka avulla saadaan säädettyä sytytyksen ajoitus biokaasun koostumukselle sopivaksi metaanipitoisuusmittauksen ja nakutusanturin perusteella. [4.]

Nelitahtista ottokaasumoottoria käytettäessä on suositeltavaa ahtaa biokaasun ja polttoilman seos turboahtimen avulla. Lisäksi ahdettu ilma on hyvä jäähdyttää välijäähdyttimen avulla. Turboahtimen ja välijäähdyttimen avulla moottorin suorituskyky voidaan nostaa jopa 1,5-kertaiseksi. [4.]

2.4.2 Dieselkaasumoottori

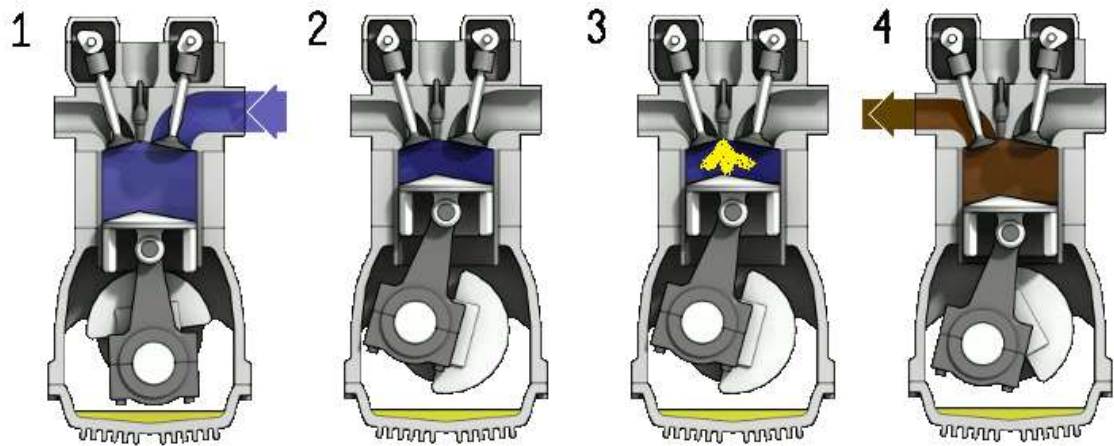
Toisin kuin kipinäsytytyksellä toimivat ottomoottorit, dieselmoottorin sytytys tapahtuu puristamalla. Näitä puristussytytyksellä toimivia kaasumoottoreita kutsutaan dieselkaasumoottoreiksi. Samoin kuin ottomoottorissa, dieselmoottorin kiertoprosessissa on neljä vaihetta. Myös dieselmoottorit ovat kaksi- tai nelitahtisia. [18.]

Dieselmoottorin toiminnallinen ero ottomoottoriin on se, että moottorin sylinteriin syötetään ensin polttoilma ja vasta puristuksen lopussa kaasu. Mäntä puristaa siis vain ilmaa. Kaasu syttyy sylinterissä itsestään ilman korkeasta lämpötilasta ja paineesta johtuen. Kaasu syötetään sylinteriin korkeassa kaasupaineessa (250–450 bar), mikä tekee laitoksesta teknisesti kalliin. [18.]

Dieselkaasumoottorin polttoaineena voidaan käyttää myös biokaasua. Metaanilla on kuitenkin korkea syttymislämpötila, minkä takia dieselmoottorilla ei voida saavuttaa tarpeeksi suurta puristussuhdetta biokaasun sytyttämiseksi. Tästä johtuen moottorin sylinteriin ruiskutetaan sytytyshetkellä dieselöljyä, jotta puristussytytys saadaan mahdolliseksi. Tätä tekniikkaa hyödyntävää dieselmoottoria kutsutaan kaksoispolttoainemoottoriksi. [4.]

2.4.3 Kaksoispolttoainemoottori

Kaksoispolttoainemoottori toimii dieselperiaatteella, mutta eroaa kaasudieselmoottorista kaasunsyötön osalta. Kaksoispolttoainemoottorilla sylinteriin syötetään ottokaasumoottorin tapaan polttoilman ja kaasun seos, jota mäntä puristaa. Sytytyspolttoaineena käytetään pientä määrää kevyttä polttoöljyä kuten dieselöljyä. [18.] Dieselöljyn osuus polttoaineesta on noin 10 % riippuen biokaasun metaanipitoisuudesta [4]. Sytytyspolttoaine syötetään suurella paineella sylinteriin juuri ennen yläkuolokohtaa, jossa se syttyy puristuksen aiheuttaman korkean lämpötilan johdosta. Tämän jälkeen pakoventtiili avautuu ja palokaasut poistuvat sen kautta. [18.] Nämä kaksoispolttoainemoottorin kiertoprosessin kaikki neljä vaihetta on esitetty kuvassa (5).



KUVA 5. Kaksoispolttoainemoottorin kiertoprosessi [30]

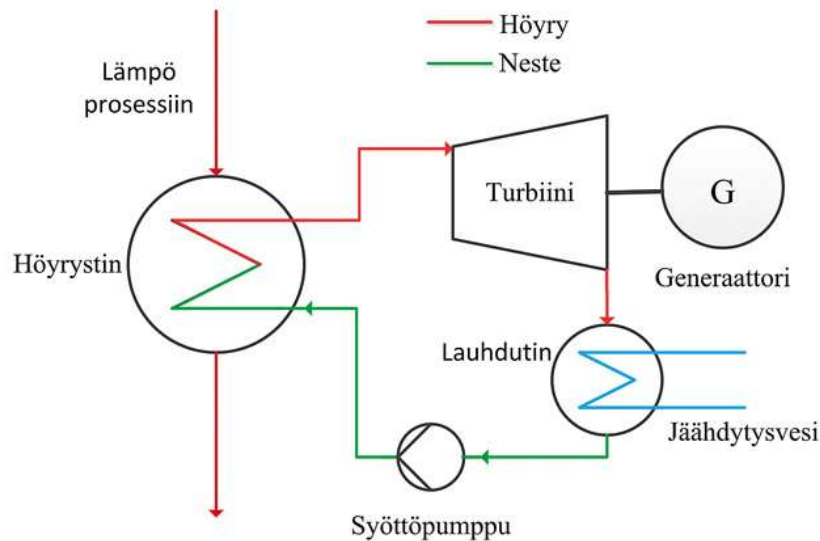
Dieselmootorissa nakutusvaara ei ole kovin suuri, sillä mäntä puristaa vain ilmaa. Kaksoispolttoainemoottorissa nakutusilmiön vaara kasvaa männän puristaessa sekä kaasua että ilmaa. [18.]

Pienen kokoluokan kaasumootoreissa kaksoispolttoainemoottori on ottomoottoria taloudellisempi vaihtoehto. Lisäksi sillä saavutetaan pienessä kokoluokassa parempi hyötysuhde. Tästä johtuen kaksoispolttoainemoottori on yleisin ratkaisu käytettäessä kaasumootoria pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. [4.] Pieneksi kokoluokaksi CHP-tuotannossa luetaan yleensä sähköntuotantoteholtaan 1–2 MW ja lämpötehoaan 3–5 MW oleva voimala [10].

2.5 ORC

ORC-laitteisto (Organic Rankine Cycle) on höyryturbiiniin perustuva voimakone, jonka avulla hukkalämpövirroista voidaan tuottaa sähköä. ORC-laitteiston lämmönlähteen lämpötila tulisi mielellään olla yli 100 °C. [16]. Jätevedenpuhdistamolla ORC-laitteistoa voidaan hyödyntää tuottamalla sähköä kaasumootorin tai mikroturbiinin pakokaasuista. Pakokaasukanavaan kytkettyä pakokaasukattilaa voidaan käyttää ORC-prosessin lämmönlähteenä eikä lisäpolttoaineita tarvita. Kaasumootoreista on tällä tapaa mahdollista saada lisäsähkötehoa 10 % moottorin sähkötehosta. Mikroturbiinien pakokaasuista voidaan saada jopa 25–35 % lisäsähkötehoa. [22].

ORC-prosessissa kuumen kaasun sisältämä lämpöenergia muutetaan höyryturbiinin avulla mekaaniseksi energiaksi. Höyryturbiini pyörittää generaattoria, joka tuottaa sähköä. ORC-prosessissa kiertoaineena käytetään veden sijaan kohteeseen ominaisuuksiltaan sopivaa orgaanista ainetta. [10]. Käytetty orgaaninen aine höyrystyy ja lauhtuu prosessin eri vaiheissa normaalin vesikierron tapaan. Orgaanisia kiertoaaineita voivat olla esimerkiksi pentaani, tolueni ja silikoniöljyt. [16]. Yksinkertaistetun ORC-prosessin kaavio on esitetty kuvassa (6).



KUVA 6. Yksinkertaistettu ORC-prosessin kaavio [28]

Periaatteeltaan ORC-prosessi on hyvin yksinkertainen. Kiertoaine saatetaan syöttöpumpulla prosessin vaatimaan paineeseen. Kiertoaine höyrystetään kattilassa, josta se johdetaan höyryturbiinille. Turbiinissa höyry paisuu pienempään paineeseen, jolloin paineenalaisesta höyrystä saadaan mekaanista työtä. Turbiinin läpi kulkenut matalapaineinen höyry johdetaan lauhduttimen läpi, jolloin se palautuu nesteeksi prosessikiertoon. [16].

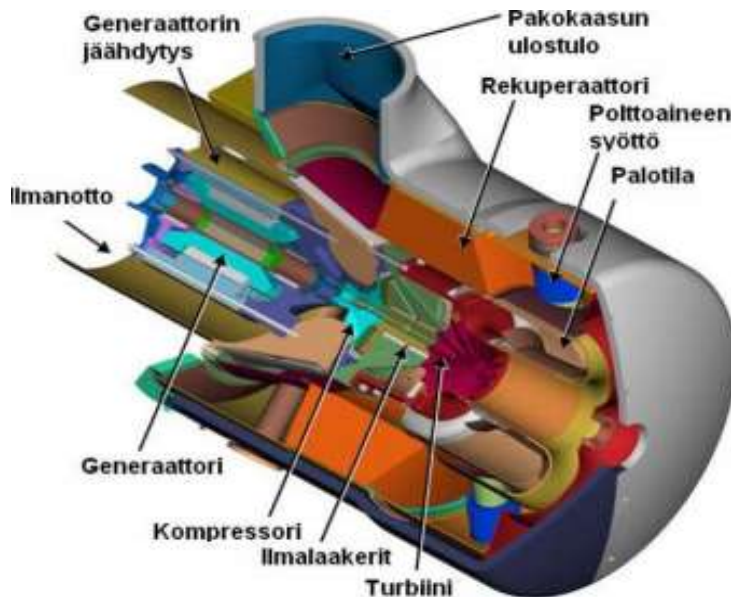
ORC-laitteiston sähköntuotannon hyötysuhde on tyypillisesti 15–20 % [10]. Kaasumootorin ja ORC-laitteiston yhdistelmällä suurimmilla laitoksilla päästään 70–90 % kokonaisyötysuhteeseen. Ajettaessa laitteistoa osakuormalla, pystyy se silti pitämään hyötysuhteensa korkeana. Prosessin hyötysuhdetta voidaan parantaa rekuperaattorilla. Tällöin sijoitetaan lämmönsiirrin paisuneen höyryn ja syöttöpumpun jälkeisen syöttönesteen välille. Lämmönsiirtimellä höyryn energia voidaan siirtää kattilaan, jossa sillä voidaan esilämmittää kiertonestettä ennen höyrystämistä. [16].

ORC-prosessin etuja ovat mm. laitteiston yksinkertainen tekniikka, nopea ja laaja säädettävyys, hiljainen käynti, pienet käyttökulut sekä pitkä käyttöikä. Lisäksi laitteisto on mahdollista automatisoida kattavasti, jolloin ylläpidon tarve vähenee. [16]. ORC-laitteisto on kuitenkin kallis ratkaisu, minkä takia sen hankkiminen on lähinnä vaihtoehto vain isoille laitoksille. Pienillä laitoksilla lämmön talteenottoa ei ole yleensä kannattavaa toteuttaa ORC-laitteistolla, sillä se nostaa investointeja merkittävästi. [15].

Helsingin Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla otettiin käyttöön ORC-laitteisto vuonna 2014 tavoitteena parantaa puhdistamon energiatehokkuutta. Hankkeelle saatiin Työ- ja elinkeinoministeriön energiatukea, sillä se sisälsi uutta teknologiaa, jolla tavoiteltiin uusiutuvan energian käytön lisäämistä. ORC-laitteistolla hyödynnetään kaasumoottorin pakokaasulämpöä ja kiertoaaineena käytetään tolueenia. Uusi teknologia toi haasteita ensimmäisessä käyttöönotossa, eikä tuotantotavoitteisiin päästy. Korjaustöiden jälkeen ORC-laitteisto on toiminut hyvin, ja sen sähköntuotannon hyötysuhteeksi on saatu 15,7 %. [12].

2.6 Mikroturbiinit

Mikroturbiinit ovat pienitehoisia (alle 1 MW) kaasuturbiineja, joilla voidaan tuottaa sähköä ja lämpöä [11]. Kaasuturbiinit ovat rakenteeltaan ja toiminnaltaan hyvin yksinkertaisia, minkä takia niitä pidetään hyvänä vaihtoehtona suhteellisen monimutkaisille kaasumoottoreille. Yhden mikroturbiiniyksikön koko on yleensä 25–250 kW. Mikroturbiinin yleisin polttoaine on tällä hetkellä maakaasu, mutta myös biokaasun käyttö on yleistymässä [10]. Mikäli polttoaineena käytetään biokaasua, pitää siitä poistaa kosteus ja kaasun tulee olla paineistettua [21]. Mikroturbiinin rakenne on esitetty kuvassa (7). Mikroturbiiniyksikön pääosia ovat akselille ilmalaakeroidut turbiini ja kompressori sekä palotila [11].



KUVA 7. Mikroturbiinin rakenne [10]

Mikroturbiinissa kiertoaineena on ilma. Turbiini pyörittää kompressoria, jossa ilma puristetaan korkeaan paineeseen. Polttoaine syötetään palotilaan, jossa se palaa kompressorin tuottaman ilman kanssa. Näin syntynyt korkeapaineinen ja kuuma savukaasu virtaa turbiiniin. Savukaasun lämpöenergia muuttuu virtausenergiaksi ja lopulta turbiinin siipien kautta mekaaniseksi energiaksi. Tällä mekaanisella energialla pyöritetään generaattoria ja kompressoria. Tyypillisesti noin 70 % tehosta kuluu kompressorin pyörittämiseen, jolloin vain noin 30 %:lla tehosta voidaan tuottaa sähköä. Mikroturbiinijärjestelmällä voidaan tuottaa pelkästään sähköä, jolloin kyseessä on avoin kaasuturbiiniprosessi. Pakokaasuissa oleva lämpö voidaan kuitenkin ottaa talteen hyötykäyttöä varten, jolloin kyseessä on CHP-prosessi. [11.] Pakokaasujen lämpötila on tyypillisesti 450–600 °C, joten hyötykäyttökohteena voi olla esimerkiksi höyryn tuottaminen [10].

Mikroturbiinien sähköhyötysuhde on voimakkaasti riippuvainen turbiinin kuormituksesta ja tehosta. Tyypillisesti mikroturbiinin sähköhyötysuhde on 15–35 % ja lämpöhyötysuhde 50–60 %. CHP-prosessissa mikroturbiinin kokonaishyötysuhde on 75–85 %. Sähkön tuotannon hyötysuhdetta voidaan parantaa rekuperaattorin eli esilämmittimen avulla. Rekuperaattoriin varastoidaan osa poistuvan pakokaasun lämpöenergiasta. Varastoitu energia vapautuu seuraavassa kierrossa sisään tulevan kaasun esilämmittämiseen. [10.] Taulukossa (2) on esitetty yhden mikroturbiinisyksikön hyötysuhteet, kierrosnopeus sekä huolto- ja korjausvälit.

TAULUKKO 2. Mikroturbiinin tekniset ominaisuudet [10, 21]

MIKROTURBIINI 25 – 250 kW	
Sähköhyötysuhde	15 – 35 %
Lämpöhyötysuhde	50 – 60 %
Kokonaishyötysuhde	75 – 85 %
Perushuoltoväli	8000 h
Peruskorjausväli	40 000 h
Kierrosnopeus	90 000 – 120 000 rpm

Koska mikroturbiinin pyörimisnopeus on suuri, generaattorin tuottama sähkö on hyvin korkeataajuisia. Tuotettu sähkö muunnetaan käyttöön sopivaksi taajuusmuuttajalla. [21.] Huolto- ja korjausvälit mikroturbiineissa ovat lähes puolet pidempiä kaasumoottoreihin verrattuna.

Mikroturbiinien merkittävä etu on niiden sopeutuvuus erilaisiin kuormitustilanteisiin ja kaasun määrän muutoksiin. Mikäli mikroturbiiniyksikköjä on useita, voidaan yksittäisiä yksiköitä käynnistämällä ja sammuttamalla sopeutua verkon kuormaan. Mikroturbiineilla myös saarekekäyttö on mahdollista. [7.] Muina etuina voidaan pitää tasaista tuotantoa, pieniä päästöjä ja vähäistä melua [21]. Vähäinen huollontarve pitää käyttökustannukset pieninä, mutta hankintahinnaltaan mikroturbiini on kuitenkin kaasumoottoriin verrattuna kallis ratkaisu, minkä vuoksi se ei sovellu pienimpiin laitoksiin [15].

Parhaiten mikroturbiinit soveltuvat kohteisiin, joissa tarvitaan korkeaa lämpötilaa tai höyryä. Myös kaukolämpöverkkoon liitetyt kohteet ovat hyvin soveltuvia, sillä ylijäämä- lämpö voidaan syöttää kaukolämpöverkkoon. [10.] Tyypillisesti mikroturbiineja käytetään kaatopaikka-pumppaamoilla, mutta niiden sopeutuvuudesta myös jätevedenpuhdistamolle on saatu hyviä tuloksia. Esimerkiksi Tampereella Raholan jätevedenpuhdistamolla kaasumoottori korvattiin mikroturbiineilla vuonna 2010. Mikroturbiinit ovat toimineet hyvin ja vuonna 2013 biokaasun hyötykäyttöaste oli peräti 96,4 %. [26.]

2.7 Biokaasun puhdistus

Ennen hyötykäyttöä biokaasusta voidaan poistaa toimintaa ja kunnossapitoa haittaavaa kosteutta vedenerottimilla. Kosteuden lisäksi haitaksi voivat olla rikkivety ja siloksaanit.

Suuret määrät rikkivetyä voivat aiheuttaa ongelmia lämmöntuotannossa sekä CHP-tuotannossa. Pesuaineista, kosmetiikasta sekä lääke- että muun teollisuuden tuotteista peräisin olevat siloksaanit ovat usein ongelma CHP-tuotannossa. Biokaasussa pieninä pitoisuuksina olevat fluori, ammoniakki ja öljy eivät aiheuta haittaa biokaasun hyödyntämiselle. [15.]

Rikkivedyn vähentämiseksi prosessiin voidaan lisätä rautaa. Jätevedenpuhdistamoilla jäteveden käsittelyssä käytetään rautasulfaattia fosforin poistamiseen, joka ehkäisee myös rikkivedyn muodostumisen biokaasuun. Näin ollen rikkivedyn erillistä puhdistusta jätevedenpuhdistamoiden yhteydessä olevilla biokaasulaitoksilla ei tarvita. [15.]

Siloksaanit aiheuttavat ongelmia etenkin biokaasun moottorikäytössä. Metyylisiloksaanit hapettuvat piioksidiksi (SiO_2) palamistapahtuman yhteydessä. Piioksidia kerääntyy kaasumoottoreiden mänttiin, sylinterirenkaisiin, sytytystulppiin sekä öljyyn, mikä johtaa moottorin käyntiongelmiin. Syntynyt piioksidi voi aiheuttaa moottorissa nakutusilmiön siten, että se alkaa hehkua ja sytyttää biokaasun liian aikaisin. Nakutus voidaan saada minimiin konetta säätämällä, mutta tällöin teho laskee huomattavasti. Jo noin 15 mg/Nm^3 siloksaaneja aiheuttaa muutoksia kaasumoottorin käynnissä. Tällä on myös vaikutus moottorin huolto- ja öljynvaihtoväleihin. Siloksaanien vaikutukset voivat vaurioittaa myös mikroturbiineja. [15.]

Siloksaanien poistoon biokaasusta voidaan hyödyntää absorptiota eli imeytymistä. Siloksaanit voidaan absorpoida aktivoituun alumiinioksidiin tai aktiivihiileen. Yksinkertaisimmillaan siloksaanit voidaan poistaa jäähdyttämällä. Jäähdytys ei kuitenkaan ole yhtä tehokas menetelmä kuin absorptio. Siloksaanien poisto kannattaa tehdä viimeisenä muiden puhdistuksien jälkeen. [4.]

3 BIOKAASUN HYÖDYNTÄMINEN FORSSAN JÄTEVEDENPUDISTAMOLLA

3.1 Biokaasun hyödyntämislaitteisto

Forssan jätevedenpuhdistamolla on toiminnassa vuonna 2000 rakennettu mädättämö, jossa puhdistamolla muodostuva puhdistamoliete mädätetään. Mädätysprosessi on mesofiilinen. Mädätyksessä syntyvä biokaasu johdetaan vedenerotuksen jälkeen kaasumoottorille ja höyrykehittimelle. Kaasumoottorilla tuotetaan pelkästään sähköä ja höyrykehittimellä lämpöä puhdistamon omaan käyttöön. On arvioitu, että kolmasosa puhdistamon kokonaissähkönkulutuksesta pystyttäisiin tuottamaan itse. [29.] Biokaasun puhdistusta ei Forssan jätevedenpuhdistamolla ole käytössä.

3.1.1 Kaasumoottori ja generaattori

Forssan jätevedenpuhdistamolla on toiminnassa vuonna 2000 hankittu biokaasutoiminen kaasumoottori ja generaattori (kuva 8). Moottorin valmistaja on Jenbacher, ja sen malli on J 208 GS-C21. Toiminnaltaan kaasumoottori on nelitahtinen ottomoottori. Kaasumoottorin tekniset tiedot ovat lueteltuina taulukossa (3).



KUVA 8. Kaasumoottori ja generaattori

TAULUKKO 3. Kaasumoottorin tekniset tiedot

JENBACHER J 208 GS – C21	
Polttoainetehto	804 kW
Akseliteho	291 kW
Lämpöteho	210 kW
Kierrosnopeus	1500 rpm
Kaasumäärän mitoitusarvo	126 m ³ n/h
Lämpöarvo	23 MJ/m ³
	6,4 kWh/m ³

Kaasumoottori pyörittää generaattoria, jolla tuotetaan sähköä. Generaattorina toimii Stamford-generaattori, joka on malliltaan HCI 534 D2. Generaattorin tekniset tiedot ovat lueteltuina taulukossa (4).

TAULUKKO 4. Generaattorin tekniset tiedot

STAMFORD HCI 534 D2	
Pätöteho	277 kW
Näennäisteho	347 kVA
Tehokerroin	0,8
Virta	500 A
Jännite	400 V
Taajuus	50 Hz
Pyörimisnopeus	1500 rpm
Suojausluokka	IP23
Eristysluokka	H

Kaasumoottorin toiminnassa on ollut käyttöönotosta asti ongelmia. Moottori on aiheuttanut käyttökatkoillaan merkittävästi lisätöitä, ja sen huollon tarve on ollut suuri. Vuonna 2000 hankittu moottori alkaa olla teknisen ikänsä lopussa, mikä on lisännyt toiminnan epävakautta entisestään. Käyttökatkot ovat aiheuttaneet sähköntuotantoon isoa vaihtelua niin kuukausi- kuin vuositasollakin. Käyttökatkojen aikana biokaasua ollaan jouduttu polttamaan soihdussa sen hyödyntämisen sijaan. Lisäksi energiaa on hukattu merkittävästi tuotettaessa kaasumoottorilla pelkästään sähköä. Kaasumoottorin tuottamaa lämpöä ei olla siis hyödynnetty millään tapaa.

3.1.2 Höyrykehitin

Puhdistamolla on toiminnassa LOOS/DAMPFFIX-höyrykehitin malliltaan DFL 750, jonka polttoaineena voidaan käyttää biokaasua tai kevytöljyä (kuva 9). Höyrykehittimellä tuotettua höyryä käytetään suurimmalta osin lietsyötteiden esilämmitykseen. Ylijäävää höyryä käytetään mädättämön tilojen lämmittämiseen. Höyrykehittimen tekniset tiedot ovat lueteltuina taulukossa (5).



KUVA 9. Höyrykehitin

TAULUKKO 5. Höyrykehittimen tekniset tiedot

LOOS/DAMPFFIX DFL 750	
Lämpöteho	500 kW
Käyttöpainealue	4 ... 8 bar
Rakennepaine	13 bar
Suunnittelupaine	16,9 bar
Käyttölämpötila	195 °C
Höyryntuotto	750 kg/h
Tehonsäätö	0 – 50 – 100 %

3.2 Biokaasun tuotanto

Selvitys biokaasun hyödyntämisestä Forssan jätevedenpuhdistamolla aloitettiin tarkastelemalla biokaasun vuosikohtaisia tuotantoja vuosivälillä 2011–2015. Aiempien vuosien tuotantotietoja ei ollut saatavissa ja vuosi 2016 jätettiin tarkastelun ulkopuolelle puhdistamon saneeraus- ja laajennustöiden vuoksi. Taulukkoon (6) kirjattiin tuotetun biokaasun tilavuudet tarkasteltavina vuosina. Taulukkoon kirjattiin myös hyödynnetyn ja soihtupoltetun biokaasun tilavuudet sekä keskiarvo kunkin vuoden metaanipitoisuudesta.

TAULUKKO 6. Biokaasun tuotanto ja hyödyntäminen

Vuosi	2011	2012	2013	2014	2015
Tuotettu biokaasu (m ³)	537000	524145	568671	684464	680834
Metaanipitoisuus (%)	70	68	68	68	68
Hyödynnetty biokaasu (m ³)	400000	454145	538671	584464	590834
Soihtupoltettu biokaasu (m ³)	137000	70000	30000	100000	90000

Edellisen taulukon (6) biokaasutilavuuksille laskettiin niitä vastaavat energiasisällöt kaavalla (1), jotta vertailu eri energiamäärien välillä olisi helpompaa. Laskuissa käytettiin biokaasun lämpöarvona taulukossa (3) ilmoitettua 6,4 kWh/m³. Biokaasun metaanipitoisuuden vaihtelua ei otettu laskuissa huomioon vaihtelun vähäisyyden vuoksi.

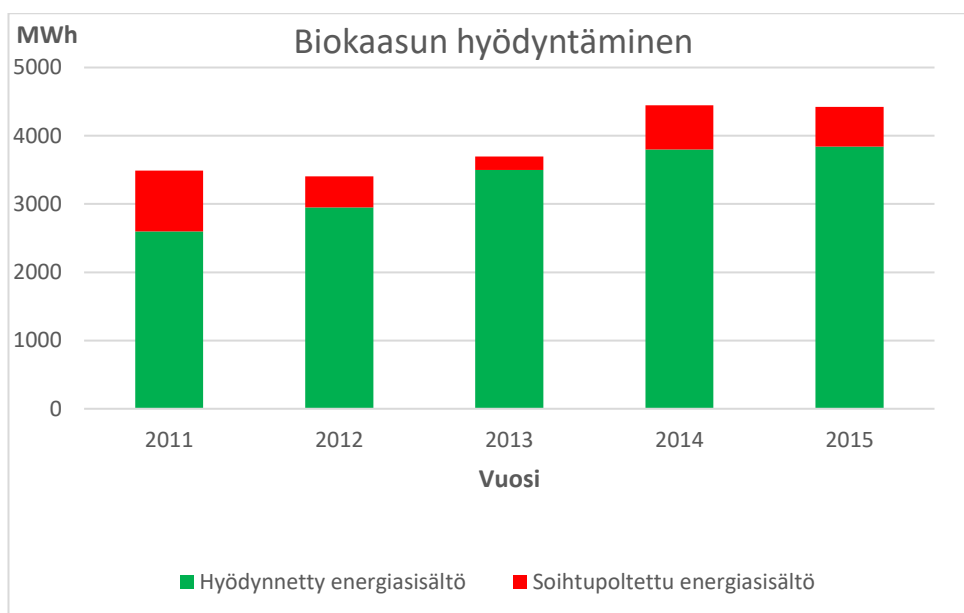
$$Q \cdot V, \quad (1)$$

jossa Q on biokaasun lämpöarvo ja V on biokaasun tilavuus.

Lasketut energiasisällöt kirjattiin taulukkoon 7, ja niiden pohjalta luotiin pylväskuvaaja (kuva 10), jossa näkyvät hyödynnetyn ja soihtupoltetun biokaasun osuus kokonaan hyödynnettävissä olevasta biokaasun tilavuudesta.

TAULUKKO 7. Biokaasun tilavuuksia vastaavat energiasisällöt

Vuosi	2011	2012	2013	2014	2015
Tuotettu biokaasu (MWh)	3490,5	3406,9	3696,4	4449,0	4425,4
Hyödynnetty biokaasu (MWh)	2600,0	2951,9	3501,4	3799,0	3840,4
Soihtupoltettu biokaasu (MWh)	890,5	455	195	650	585



KUVA 10. Biokaasun hyödyntäminen

Biokaasun tuotanto on vuosina 2011–2013 ollut melko tasaista, jonka jälkeen tuotanto on noussut noin 1000 MWh:n verran vuosille 2014–2015. Biokaasua ollaan hyödynnetty vuosi vuodelta enemmän, mutta samalla soih tupoltetun biokaasun osuus on ollut hyvin vaihtelevaa. Vuonna 2011 biokaasua jouduttiin polttamaan soihdussa jopa neljännes tuotetusta tilavuudesta, kun taas vuonna 2013 soih tupolton osuus laski noin 5 % suuruiseksi. Kaasumoottorin epävakaata toimintaa on kuitenkin kasvattanut soih tupoltetun energian määrää vuoden 2013 jälkeen, jolloin soih tupolton osuus on lähes kolminkertaistunut.

3.3 Sähköntuotanto

Seuraavaksi tarkasteluun otettiin puhdistamon sähköntuotanto. Jokaiselle tarkasteltavalle vuodelle laskettiin sähköntuotannon omavaraisuusprosentti, joka kertoo, kuinka suuri prosentuaalinen sähköenergian osuus ollaan puhdistamon kokonaissähkökulutuksesta pystytty tuottamaan itse. Tämän lisäksi laskettiin vuosikohtainen sähköntuotantoon ohjattu biokaasun tilavuus, minkä jälkeen myös kaasumoottorin vuosikohtaiset sähköntuotannon hyötysuhteet olivat mahdollista laskea.

3.3.1 Omavaraisuus

Sähköntuotannon omavaraisuuden selvittäminen aloitettiin kirjaamalla taulukkoon (8) ostetun sähköenergian tarve, tuotetun sähköenergian määrä sekä puhdistamon kokonaissähkönkulutus. Samaan taulukkoon laskettiin sähköntuotannon omavaraisuusprosentti kullekin vuodelle kaavalla (2).

$$\frac{kWh_{tuotettu}}{kWh/a} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

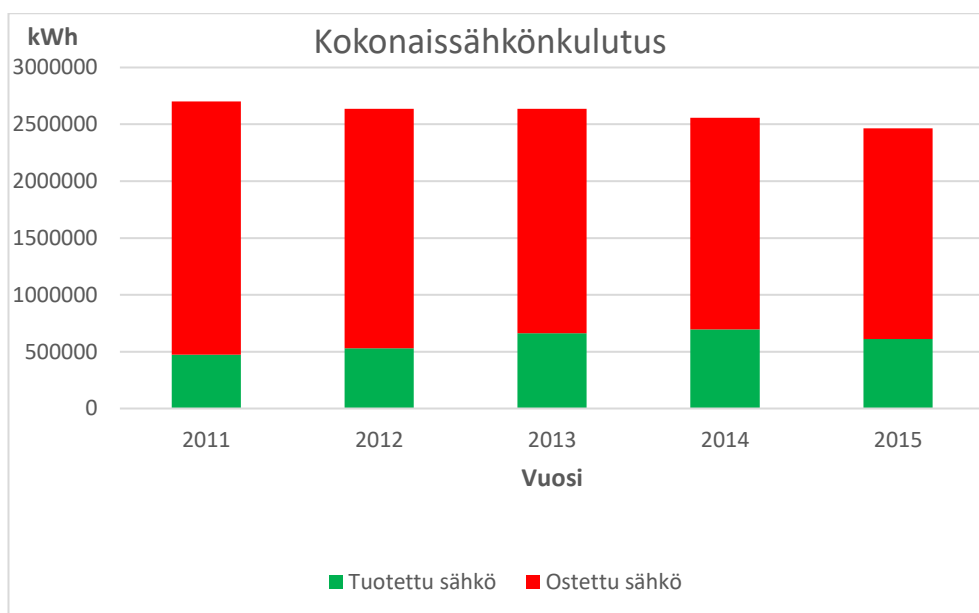
jossa $kWh_{tuotettu}$ on tuotetun sähköenergian määrä ja kWh/a on kokonaissähkönkulutus.

TAULUKKO 8. Sähköntuotannon omavaraisuus

Vuosi	2011	2012	2013	2014	2015
Ostettu sähkö (kWh)	2228105	2106147	1975446	1861517	1851491
Tuotettu sähkö (kWh)	474433	529999	661458	695834	612099
Kokonaissähkönkulutus (kWh)	2702538	2636146	2636904	2557351	2463590
Omavaraisuus-%	17,6	20,1	25,1	27,2	24,8

Sähköntuotannon omavaraisuusprosentti on noussut vuodesta 2011 lähtien arvosta 17,6 % vuoteen 2014 asti, jolloin päästiin 27,2 % omavaraisuuteen. Vuonna 2015 omavaraisuusprosentti oli kuitenkin laskenut edellisen vuoden arvosta 24,8 %:iin. Keskiarvo kaikille tarkasteltaville vuoseille 2011–2015 on ollut noin 23 %, jota voidaan pitää melko vaatimattomana. Luvussa 3.1 esitettiin arvio, jossa puhdistamo pystyisi tuottamaan kolmasosan kokonaissähkönkulutuksestaan itse. Tähän arvioituun omavaraisuuteen ei olla kuitenkaan päästy yhtenäkin tarkasteltavana vuotena.

Puhdistamon kokonaissähkönkulutuksesta luotiin pylväskuvaaja (kuva 11), jossa näkyvät ostetun ja tuotetun sähköenergian jakauma. Puhdistamon kokonaissähkönkulutus on pienentynyt vuoden 2011 arvosta vuoden 2015 arvoon noin 239 000 kWh. Myös ostetun sähköenergian tarve on vähentynyt samassa ajassa noin 377 000 kWh. Tuotetun sähköenergian määrä on pääsääntöisesti noussut, mutta eri vuosien tuotannoissa on havaittavissa isojakin eroja. Nousujohteinen tuotanto pysähtyi kuitenkin vuoteen 2015, jolloin sähköenergiaa tuotettiin noin 84 000 kWh vähemmän kuin edellisenä vuotena. Sähköntuotannon suuren vaihtelevuuden on aiheuttanut kaasumoottorin epävakaa toiminta.



KUVA 11. Ostetun ja tuotetun sähköenergian osuus kokonaissähkönkulutuksesta

3.3.2 Sähköntuotantoon hyödynnetty biokaasu

Kaasumootorin sähköntuotannon hyötysuhteen laskemiseksi, selvitettiin kaasumootorille ohjatun biokaasun tilavuus. Ensin laskettiin kaasumootorin vuosikohtaiset käyttötunnit, joiden laskemiseksi tarvittiin taulukkoon (8) kirjattuja tuotetun sähköenergian arvoja ja taulukossa (4) annettua generaattorin pätötehoa $P_{gen} = 277$ kW. Käyttötunnit t saatiin laskettua kaavalla (3) ja ne kirjattiin taulukkoon (9).

$$t = \frac{kWh_{tuotettu}}{P_{gen}}, \quad (3)$$

jossa P_{gen} on generaattorin pätöteho.

TAULUKKO 9. Kaasumootorin vuosikohtaiset käyttötunnit

Vuosi	2011	2012	2013	2014	2015
Kaasumootorin käyntitunnit (h)	1713	1913	2388	2512	2210

Kun tiedettiin kaasumootorin käyttötunnit vuotta kohti, voitiin laskea taulukossa (3) annetulla biokaasun virtauksen mitoitusarvolla ($126 \text{ m}^3/\text{n/h}$) kaasumootorille ohjatun biokaasun tilavuus kaavalla (4).

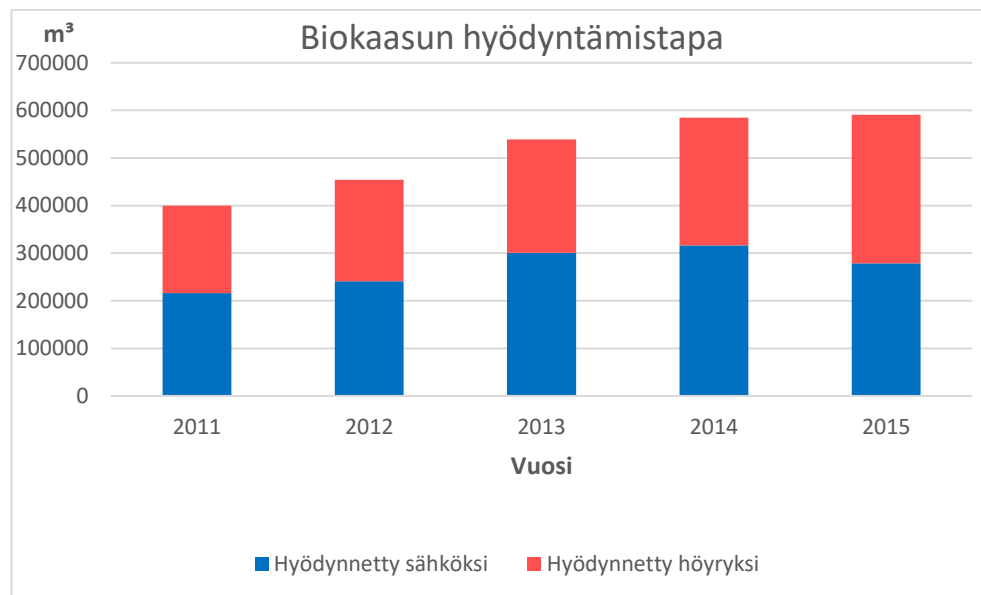
$$t \cdot q_V, \quad (4)$$

jossa q_V on biokaasun virtauksen mitoitusarvo.

Näin saadut sähköenergiaksi hyödynnetyt biokaasun tilavuudet kirjattiin taulukkoon (10). Samaan taulukkoon kirjattiin yhteenvedoksi puhdistamolla kokonaisuudessaan tuotettu biokaasun tilavuus sekä siitä hyödynnetyt tilavuus. Puhdistamolla hyödynnetyistä biokaasun tilavuudesta vähennettiin laskemalla saatu sähköenergiaksi hyödynnetyt osuus, jolloin taulukkoon saatiin kirjattua myös höyrykehittimelle ohjattu biokaasun tilavuus. Biokaasun hyödyntämisestä luotiin pylväskuvaaja, josta voidaan tarkastella biokaasun jakautumista sähköenergiaksi hyödyntämisen ja höyryksi hyödyntämisen välillä (kuva 12). Kuvasta nähdään, että hyödynnetyistä biokaasusta noin puolet on ohjattu kaasumoottorille ja puolet höyrykehittimelle.

TAULUKKO 10. Yhteenvedo biokaasun käytöstä Forssan jätevedenpuhdistamolla

Vuosi	2011	2012	2013	2014	2015
Tuotettu biokaasu (m ³)	537000	524145	568671	684464	680834
Hyödynnetyt biokaasu (m ³)	400000	454145	538671	584464	590834
Hyödynnetyt sähköksi (m ³)	215807	241083	300880	316517	278428
Hyödynnetyt höyryksi (m ³)	184193	213062	237791	267947	312406



KUVA 12. Biokaasun hyödyntämistapa

3.3.3 Kaasumoottorin hyötysuhteet

Kaasumoottorin sähköntuotannon hyötysuhde voitiin laskea, kun tiedettiin kaasumoottorille ohjatun biokaasun tilavuus (taulukko 10) ja kaasumoottorilla tuotetun sähköenergian määrä (taulukko 8). Kaasumoottorille ohjatun biokaasun tilavuus muutettiin sitä vastaavaksi energiasisällöksi kaavalla (1). Myös tuotettu sähköenergian määrä muutettiin samaan yksikköön (MWh). Näin saadut käytetyn ja tuotetun energian määrät kirjattiin taulukkoon (11). Samaan taulukkoon laskettiin kaasumoottorin sähköntuotannon hyötysuhde η kaavalla (5).

$$\eta = \frac{W_1}{W_2} \cdot 100 \% , \quad (5)$$

jossa W_1 on koneen ottama energia, ja W_2 on koneesta hyödyksi saatu energia.

TAULUKKO 11. Kaasumoottorin hyötysuhteet

Vuosi	2011	2012	2013	2014	2015
Käytetty energia (MWh)	1381,2	1542,9	1925,6	2025,7	1781,9
Tuotettu energia (MWh)	474,4	530,0	661,5	695,8	612,1
Sähköntuotannon hyötysuhde (%)	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4
Lämmöntuotannon hyötysuhde (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kokonaishyötysuhde (%)	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4

Kaasumoottorin sähköntuotannon hyötysuhteeksi saatiin jokaisena tarkasteltavana vuotena 34,4 %. Lämmöntuotannon hyötysuhde on nolla, sillä kaasumoottorin tuottamaa lämpöä ei hyödynnetä. Tästä johtuen kokonaishyötysuhde on yhtä suuri kuin pelkkä sähköntuotannon hyötysuhde.

3.4 Lämmöntuotanto

Forssan jätevedenpuhdistamolla on käytössä kolme lämmitysmuotoa. Höyrykehittimen ylijäävän höyryn hyödyntämisen lisäksi puhdistamon tiloja lämmitetään kaukolämmöllä ja kevyellä polttoöljyllä lämpökattilan avulla. Puhdistamon kokonaislämmöntarvetta oli hankala selvittää saatavissa olevilla tiedoilla. Höyrykehittimeltä saatua energian määrää voidaan kuitenkin arvioida laskemalla, ja kaukolämmön tarve saatiin tarkastelemalla kaukolämpölaskuja.

3.4.1 Höyrykehittimellä tuotettu energia

Teorian pohjalta höyrykehittimen hyötysuhdetta voidaan pitää minimissäänkin 88 % suuruisena. Kun tiedettiin höyrykehittimelle ohjatun biokaasun tilavuus (taulukko 10), saatiin laskettua sitä vastaava energiasisältö kaavalla (1). Tästä käytetystä energiasta saadaan siis teoreettisesti 88 % hyödynnettyä. Taulukkoon (12) kirjattiin höyrykehittimellä käytetty energia ja samaan taulukkoon laskettiin teoreettisen hyötysuhteen avulla höyrykehittimellä tuotettu energia.

TAULUKKO 12. Höyrykehittimellä tuotettu energia

Vuosi	2011	2012	2013	2014	2015
Käytetty energia (MWh)	1179	1364	1522	1715	1999
Tuotettu energia (MWh)	1037	1200	1339	1509	1759
Hyötysuhde (%)	88	88	88	88	88

3.4.2 Kaukolämpö

Puhdistamo on liitetty kaukolämpöverkkoon. Kaukolämpöä haluttaisiin käyttää mahdollisimman vähän. Vaikka päästäisiin tilanteeseen, jossa puhdistamo ei tarvitsisi kaukolämpöä ollenkaan, halutaan kaukolämpöliittymä kuitenkin pitää vararatkaisuna. Kaukolämmön tarve vuosina 2011–2015 kirjattiin taulukkoon (13). Kaukolämmön tarve on ollut voimakkaasti riippuvainen talven lämpötiloista. Kaukolämmön tarve on kuitenkin vähentynyt tarkasteltavalla vuosivälillä, mikä selittyy osin myös kevyen polttoöljyn hinnan laskulla vuosina 2014 ja 2015 [31]. Tällöin on ollut edullisempaa tuottaa lämpöä öljyn avulla kattilassa.

TAULUKKO 13. Kaukolämmön tarve

Vuosi	2011	2012	2013	2014	2015
Kaukolämpö (MWh)	565,13	691,23	577,57	337,06	262,8

4 TOIMENPITEET ENERGIAOMAVARAISUUDEN PARANTAMISEKSI

4.1 CHP-tuotantoon siirtyminen

Sähkön ja lämmön tuottamista biokaasusta Forssan jätevedenpuhdistamolla voidaan pitää edelleen järkevänä. Kaasumoottorilla pelkän sähköenergian tuottamisesta pitäisi kuitenkin ehdottomasti siirtyä CHP-tuotantoon. Sopivia CHP-tuotannon laitevaihtoehtoja jätevedenpuhdistamolle ovat lähinnä mikroturbiinit ja kaasumoottorit. Mikroturbiineja voidaan kuitenkin pitää soveltumattomana ratkaisuna Forssan puhdistamolle, sillä laitos on kokoluokaltaan pieni. Uuden kaasumoottorin hankkimista sen sijaan voidaan pitää järkevänä vaihtoehtona, jota voidaan perustella monella tapaa. Vaihtoehtoja tällöin olisivat nelitahtinen ottomoottori tai kaksoispolttoainemoottori. Teorian pohjalta kaksoispolttoainemoottori olisi taloudellisesti parempi ratkaisu pienen kokoluokan CHP-tuotantoon, mutta valinta näiden moottorityyppien välillä kannattaa tehdä jatkoselvitysten pohjalta.

4.1.1 Uusi kaasumoottori

Uuden kaasumoottorin hankkimista voidaan ensisijaisesti perustella vanhan kaasumoottorin epävakaalla toiminnalla. Teknisen elinikänsä lopussa oleva moottori on aiheuttanut biokaasun hyödyntämisprosessiin merkittäviä katkoja. Biokaasua ollaan jouduttu tämän takia polttamaan soihdussa kohtuuttoman paljon. Lisäksi sähköntuotannon omavaraisuusprosentti on tästä syystä pysynyt vaatimattomana. Toimiessaan vanhan kaasumoottorin sähköntuotannon hyötysuhde on ollut vuosina 2011–2015 yllättävänkin hyvä, sen ollessa jokaisena vuotena 34,4 %. Uusilla koneilla on kuitenkin mahdollista päästä sähköntuotannon osalta 40 %:n hyötysuhteeseen ja tätä hyötysuhdetta olisi hyvä pitää uuden kaasumoottorin mitoituksen lähtökohtana. Lisäksi uusien CHP-moottoreiden lämmön- tuotannon hyötysuhteeksi luvataan 45–50 %.

Kaasumoottorin pakokaasuista tulee jatkossa ehdottomasti ottaa talteen lämpöä hyödykäyttöön. Sopiva hyödyntämistapa Forssan puhdistamolle on esimerkiksi yksinkertainen pakokaasukattila, sillä ORC-laitteiston hankkiminen nostaisi investoinnit liian suuriksi. Kaasumoottorilta saatavan lämmön merkitystä tarkasteltiin laskemalla uuden kaasumoot-

torin teoreettisilla hyötysuhteilla vastaavat tuotannot vuosille 2011–2015. Käytetty energian määrä pysyi siis tarkastelussa samana. Laskuissa käytettiin uuden kaasumootorin sähköntuotannon hyötysuhteena 40 % ja lämmöntuotannon hyötysuhteena 45 %. Taulukkoon (14) kirjattiin tuotetun sähköenergian määrä, joka oltaisiin uudella kaasumootorilla pystytty tuottamaan. Samaan taulukkoon laskettiin lisäksi, kuinka paljon enemmän sähköenergiaa oltaisiin saatu tuotettua vanhaan kaasumootoriin verrattuna sekä mikä olisi ollut tällöin laitoksen energiaomavaraisuusprosentti. Olennaisinta oli kuitenkin laskea, kuinka paljon lämpöä oltaisiin pystytty tuottamaan hyödyntämällä kaasumootorin pako kaasujen sisältämä lämpö.

TAULUKKO 14. Uuden kaasumootorin hyötysuhteilla lasketut tuotannot

Vuosi	2011	2012	2013	2014	2015
Käytetty energia (MWh)	1381,2	1542,9	1925,6	2025,7	1781,9
Tuotettu sähkö (MWh)	552,5	617,2	770,3	810,3	712,8
Tuotettu enemmän (MWh)	78,0	87,2	108,8	114,4	100,7
Sähköomavaraisuus-%	20,4	23,4	29,2	31,7	28,9
Tuotettu lämpö (MWh)	621,5	694,3	866,5	911,6	801,9

On syytä muistaa, että laskuissa käytettiin vuosien 2011–2015 käytetyn energian arvoja, jolloin biokaasua ei olla pystytty hyödyntämään tehokkaasti kaasumootorin käyntiongelmien vuoksi. Vertailussa näkyvät siis ainoastaan uuden ja vanhan kaasumootorin hyötysuhteiden välinen vaikutus. Vuodessa keskiarvona sähköä oltaisiin pystytty vuosina 2011–2015 tuottamaan enemmän 98 MWh eli lähes 100 000 kWh ja lämpöä peräti 780 MWh.

Kaasumootorilta hyötykäyttöön saatu lämmön määrä olisi ollut merkittävän suuri verrattaessa sitä höyrykehittimellä tuotettuun lämpöön (taulukko 12). Toiminnaltaan vakaalla uudella kaasumootorilla lämmöntuotannon osalta voitaisiin jopa päästä tilanteeseen, jossa moottorilta saadulla lämmöllä pystyttäisiin korvaamaan höyrykehitin kokonaan. Kuvasta (12) nähtiin, että aiemmin biokaasua on ohjattu tasaisesti sekä kaasumootorille että höyrykehittimelle. Uuden kaasumootorin tuottaman lämmön hyödyntämisen myötä päästäisiin tilanteeseen, jossa aiemmin höyrykehittimelle ohjattu biokaasu pystyttäisiin hyödyntämään kaasumootorilla. Lämpöä saataisiin tuotettua edelleenkin vähintäänkin saman verran kuin aiemmin höyrykehittimellä, mutta samalla saataisiin tuotettua myös

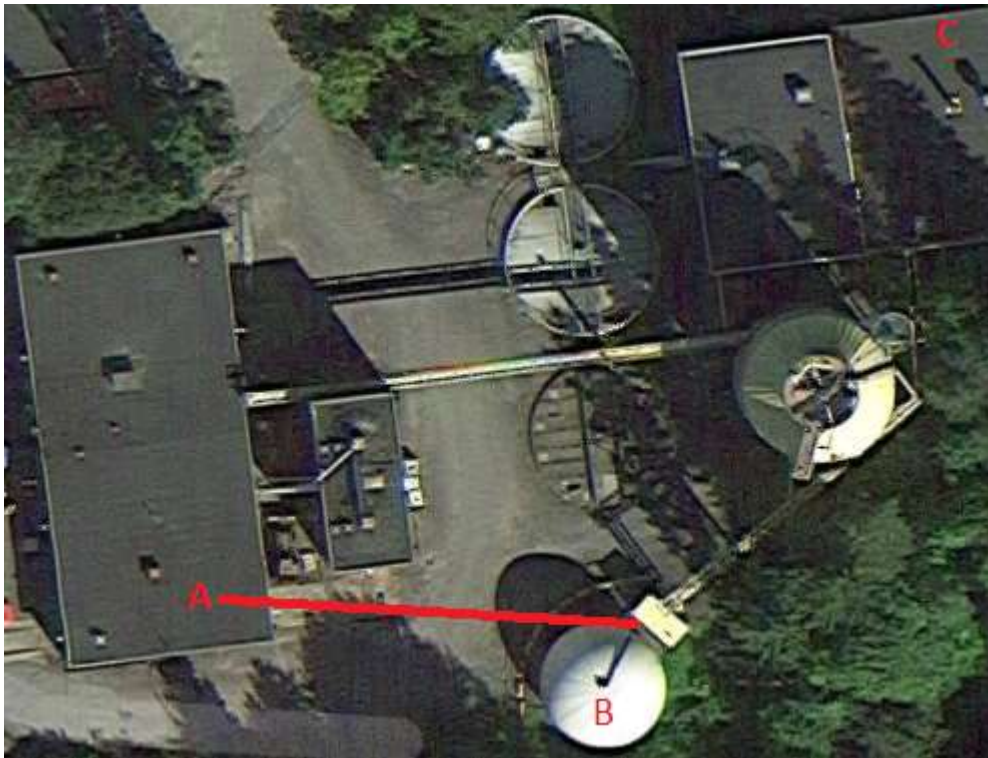
sähköenergiaa. Vanha höyrykehitin kannattaisi kuitenkin jättää prosessiin vararatkaisuksi. Uusi kaasumoottori nostaisi sähköntuotantoa merkittävästi, jolloin sillä olisi myös positiivinen vaikutus sähköntuotannon omavaraisuuteen.

4.1.2 Kaasuanalyysi

Ennen kaasumoottoriin investointia kannattaa puhdistamon biokaasulle tehdä kaasuanalyysi, jossa selvitetään siloksaanien pitoisuus biokaasussa. Forssan jätevedenpuhdistamon lähietäisyydellä sijaitsee teurastamo ja elintarviketeollisuutta, joiden jätevesien mukana mahdolliset siloksaanit voivat kulkeutua puhdistamolle. Yksi syy vanhan kaasumoottorin epävakaaseen toimintaan saattaa juuri olla biokaasun epäpuhtaus. Uudet kaasumoottorit kestävät yhä paremmin biokaasun epäpuhtauksia, mutta biokaasun puhdistamista suositellaan, mikäli siloksaanien pitoisuus biokaasussa ylittää 15 mg/Nm^3 [15]. Biokaasun puhdistukseen investointi maksaa itsensä takaisin, sillä se pidentää kaasumoottorin huolto- ja öljynvaihtovälejä.

4.2 Lämmöntuotannon hajauttaminen

Forssan jätevedenpuhdistamolla biokaasua hyödynnetään lämmöksi ainoastaan mädättämörakennuksessa (C-rakennus) höyrykehittimellä (kuva 13). Samassa tilassa sijaitsee myös kaasumoottori. Tästä syystä kaasulinja kaasuvärestöstä (B-rakennus) on rakennettu ainoastaan mädättämörakennukseen. Esikäsitteilyrakennuksessa (A-rakennus) lämpöä ollaan tuotettu lämpökattilassa polttamalla kevyttä polttoöljyä.



KUVA X. Puhdistamon biokaasulinjat. A = esikäsitely, B = kaasuvarasto ja C= mädättämö. [5]

Suunnitteilla on ollut hajauttaa lämmöntuotantoa rakentamalla kaasulinja myös esikäsitelyrakennukseen, jolloin biokaasua voitaisiin hyödyntää vanhassa lämpökattilassa. Kattilaan saadaan vaihdettua helposti kaasulle sopiva poltin, jolloin biokaasua voidaan alkaa hyödyntää lämmöksi korkealla hyötysuhteella. Lämmön tuottaminen kahdessa eri rakennuksessa tulisi lisäksi vähentämään kaukolämmön tarvetta ja kevyen polttoöljyn kuluusta, jolloin myös puhdistamon energiaomavaraisuus paranisi entisestään. Uuden kaasulinjan rakentamista voidaan perustella luvussa 2.3.1 esitetyllä teoriolla lämmöntuotannosta kattilan avulla.

5 POHDINTA

5.1 Yhteenveto

Forssan jätevedenpuhdistamolla on vuosina 2011–2015 jouduttu biokaasua polttamaan soihdussa kohtuuttoman paljon sen hyödyntämisen sijaan. Runsas soihtupoltto selittyy kaasumoottorin epävakaalla toiminnalla. Biokaasua on pystytty hyödyntämään höyryksi höyrykehittimellä, mutta biokaasun hyödyntäminen sähköenergiaksi kaasumoottorin avulla on ollut ongelmallista. Puhdistamon sähköntuotannon omavaraisuusprosentti on jäänyt epäkuntoisella kaasumoottorilla vaatimattomaksi vuosien 2011–2015 keskiarvon ollessa noin 23 %.

Heikentävästi puhdistamon energiaomavaraisuuteen vaikuttaa myös sähkön ja lämmön tuottaminen erikseen. Vaikka höyrykehittimessä biokaasua onkin pystytty hyödyntämään korkealla hyötysuhteella, ei kaasumoottorin tuottamaa lämpöä ole hyödynnetty millään tapaa. Puhdistamo on hukannut merkittävän määrän lämpöä, millä on ollut myös vaikutus kaukolämmön tarpeeseen sekä kevyen polttoöljyn kulutukseen.

Forssan jätevedenpuhdistamon energiaomavaraisuuden parantamiseksi tässä työssä ehdotettiin uuden kaasumoottorin hankkimista ja CHP-tuotantoon siirtymistä. Teknisen käyttöikänsä lopussa oleva vanha kaasumoottori tulisi korvata uudenaikaisella CHP-moottorilla, jonka tuottamista pakokaasuista hyödynnettäisiin niiden sisältämä lämpö. Pakokaasujen lämpö voitaisiin hyödyntää yksinkertaisella pakokaasukattilalla. Kaasumoottorin tuottaman lämmön hyödyntäminen laskisi merkittävästi kaukolämmön tarvetta sekä kevyen polttoöljyn kulutusta. Mahdollista olisi myös päästä lämmöntuotannossa tilanteeseen, jossa kaasumoottorin tuottamalla lämmöllä voitaisiin korvata vanha höyrykehitin kokonaan. Uuden kaasumoottorin mitoituksen lähtökohtana voitaisiin pitää 40 %:n sähköntuotannon hyötysuhdetta.

Lisäksi työssä otettiin kantaa jo suunnitteilla olevaan lämmöntuotannon hajauttamiseen. Uuden kaasulinjan rakentamista puhdistamon esikäsitteilyrakennukseen voidaan pitää perusteltuna ratkaisuna. Esikäsitteilyrakennuksen vanhaa lämpökattilaa voidaan hyödyntää vaihtamalla siihen biokaasulle sopiva poltin, jolloin biokaasua voidaan polttaa kattilassa

korkealla hyötysuhteella. Tämä vähentäisi kaukolämmön tarvetta sekä kevyen polttoöljyn kulutusta entisestään.

5.2 Luotettavuus ja eettisyys

Työssä käytettyjä lähteitä voidaan pitää luotettavina erityisen tarkan lähdekritiikin vuoksi. Teksti on luotu usean eri lähteen pohjalta, jolloin riski väärinymmärryksille pienenee. Tietoa työhön haettiin laajasti koko aihealueen ympäriltä, minkä jälkeen työn pohjalle valittiin luotettavimmat lähteet. Työn teoriaosuuden tärkeimpiä lähteitä olivat Markus Latvalan kirjoittamat julkaisut ”Jätevesilietteen anaerobinen käsittely ja biokaasun hyötykäyttö” sekä ”Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT), Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä”. Julkaisuja voidaan pitää erityisen luotettavina ja ammattikäyttöön tarkoitettuina. Muita erityisen tärkeitä ja luotettavia lähteitä olivat Suomen valtion omistaman Motiva Oy:n julkaisut.

Luvussa 3 esitetyt biokaasun tuotannon tilavuudet, kokonaissähkökulutukset sekä ostetun ja tuotetun sähköenergian määrät perustuvat puhdistamon omaan kirjanpitoon. Näiden pohjalta tehtyjä laskelmia on hyvä pitää suuntaa antavana arviona tarkkojen tulosten sijasta. Laskelmien ja niistä luotujen kuvaajien avulla pystyttiin kuitenkin onnistuneesti osoittamaan ongelmat puhdistamon energiaomavaraisuudessa ja konkretisoitua muutoksen tarve.

Tampereen ammattikorkeakoulu on sitoutunut Tutkimuseettisen neuvottelukunnan (TENK) tutkimuseettisiin ohjeisiin. Tämä työ on kirjoitettu näitä ohjeita kunnioittaen ja niitä on noudatettu koko opinnäytetyöprosessin aikana.

5.3 Jatkotutkimusaiheet

Uuden kaasumoottorin valinta nelitahtisen ottomoottorin ja kaksoispolttoainemoottorin välillä tulee tehdä huolella. Forssan jätevedenpuhdistamo luetaan pienen kokoluokan laitokseksi, jolloin teorian pohjalta kaksoispolttoainemoottori olisi taloudellisesti parempi ratkaisu. Tämä tieto on kuitenkin peräisin yhdeksän vuotta vanhasta julkaisusta, joten

jatkotutkimusta kannattaa tehdä päivitetyn tiedon pohjalta. Hyvä tapa tähän on esimerkiksi haastattelut laitteiden maahantuojaan kanssa. Lisäksi muiden jätevedenpuhdistamoiden kokemusten selvittäminen kyseisistä moottoreista voisi auttaa lopullisessa valinnassa. Lisäksi vanhan generaattorin kunto on järkevää tarkastaa. Mikäli generaattori on toimintakuntoinen, voidaan sitä käyttää hyvin uuden kaasumoottorin kanssa.

Ennen kaasumoottoriin investointia Forssan jätevedenpuhdistamolla syntyvälle biokaasulle olisi lisäksi järkevää tehdä kaasuanalyysi, jossa selvitetään siloksaaniin pitoisuus biokaasussa. Näin selviäisi mahdollinen biokaasun puhdistamisen tarve. Oleellista on myös selvittää, kuinka hyvin uudet kaasumoottorit sietävät biokaasun epäpuhtauksia.

Vaikka tällä hetkellä sähkön- ja lämmöntuotanto on vielä järkevää kaasumoottorin avulla, kannattaa tulevaisuuden kehittyvää tekniikkaa seurata aktiivisesti. Kun seuraava kaasumoottori on Forssan puhdistamolla ajettu käyttöikänsä loppuun, on tarjolla varmasti jo useampikin järkevä biokaasun hyödyntämismuoto. Silloin yhtenä vaihtoehtona voisi olla biokaasun jalostaminen liikennepolttoaineeksi. Biokaasua tullaan varmasti hyödyntämään sähköenergiaksi ja lämmöksi vielä pitkään, joten uusien CHP-tuotannon laitteiden merkitys yhä omavaraisemmassa jätevesien puhdistuksessa tulee olemaan suuri.

LÄHTEET

- [1] Anttonen K. 2010. Biokaasu pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Luettu 15.2.2017.
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/67043/nbnfi-fe201101141053.pdf?..>
- [2] Biokaasuauto. Biokaasun valmistus. Luettu 20.12.2016.
<http://www.biokaasuauto.fi/biokaasun-valmistus>
- [3] Bioste. Biokaasu. Luettu 20.12.2016.
<http://bioste.fi/bioenergia/biokaasu/>
- [4] Deublein D., Steinhauser A. 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources. Luettu 15.2.2017.
- [5] Google. 2017. Karttatiedot.
<https://www.google.fi/maps/place/Munkkiniementie,+30100+Forssa/@60.824362,23.6108596,132m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x468e9cbca25f6fbd:0x3767078779b85965!8m2!3d60.8256669!4d23.6096114?hl=fi>
- [6] Heiskanen A. 2015. Matkalla energiaomavaraiseen jätevedenpuhdistukseen, case Kulasalo Joensuu. Luettu 21.2.2017.
https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/96169/Heiskanen_Ari.pdf?sequence=1
- [7] Hintikka J. 2004. Biomassapohjaiset mikro-CHP-teknikat. Luettu 30.3.2017.
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20523/mikro-chp-raportti_nro8.pdf?sequence=3
- [8] Huhtinen M., Korhonen R., Pimiä T., Urpalainen S. 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu: Otava. Luettu 23.2.2017.
- [9] Höyrytys Oy. The Clayton Steam Generator, esite. Luettu 31.3.2017.
http://hoyrytys.fi/images/stories/esitteet/clayton_steam.pdf
- [10] Karjalainen T. 2012. Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus – laitteet ja niiden käyttöönotto. Luettu 21.2.2017.
<http://www oulu.fi/sites/default/files/content/files/Pien%20CHP%20raportti.pdf>
- [11] Kiviluoma-Leskelä L. 2010. Biokaasun tuottaminen ja hyödyntäminen Lappeenrannassa. Luettu 13.3.2017.
<https://core.ac.uk/download/pdf/39935795.pdf>
- [12] Korhonen R. 2014. Viikinmäen jätevedenpuhdistamon energiantuotannon tehostaminen. Luettu 30.3.2017.
<http://docplayer.fi/7712782-Viikinmaen-jatevedenpuhdistamon-energiantuotannon-tehostaminen.html>
- [13] Kymäläinen M., Pakarinen O. 2015. Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Luettu 21.2.2017.
https://issuu.com/hamkuas/docs/hamk_biokaasun_tuotanto_2015_ekirja

- [14] Latvala M. 2005. Jätevesilietteen anaerobinen käsittely ja biokaasun hyötykäyttö. Luettu 27.12.2016.
http://www.motiva.fi/files/7934/Jatevesilietteen_anaerobinen_kasittely_ja_biokaasun_hyotykaytto.pdf
- [15] Latvala M. 2009. Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Luettu 21.2.2017.
https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37998/SY_24_2009.pdf?sequence=1
- [16] Maaskola I., Kataikko M. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen, Lämpöpumppu- ja ORC -sovellukset. Luettu 30.3.2017.
https://www.motiva.fi/files/8807/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_lampopumppu_ORC_www.pdf
- [17] Motiva. Biokaasu. Luettu 20.12.2016.
http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/energiaa_pelloilta/biokaasu
- [18] Motiva. Kaasumoottori. Luettu 21.2.2017.
http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_tuotantotekniikka/polttotekniikka_kaasumaisille_polttoaineille/kaasumoottori
- [19] Motiva. Polttoaineiden lämpöarvot, hyötysuhteet ja hiilidioksidin ominaispäästöker-
toimet sekä energian hinnat. Luettu 20.12.2016.
http://www.motiva.fi/files/3193/Polttoaineiden_lampoarvot_hyotysuhteet_ja_hiilidioksidin_ominaispaastokertoimet_seka_energianhinnat_19042010.pdf
- [20] Pietarinen T. Sähköntuotantolaitteet, kaasumoottori. Luettu 15.2.2017.
http://www.oamk.fi/cdn/fileuploads/kaasumoottoritomi_pietarinen.pdf
- [21] Pirttinen J. Mikro turbiini. Luettu 27.3.2017.
http://www.oamk.fi/cdn/fileuploads/mikroturbiinijuho_pirttinen.pdf
- [22] Purhonen M. 2010. ORC -prosessin käyttö sähköntuotannossa. Luettu 30.3.2017.
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/66734/nbnfi-fe201101071019.pdf?sequence>
- [23] Pöyry Environment Oy. Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetel-
mien kilpailukyky -selvitys. Luettu 27.12.2016.
<http://www.sitra.fi/NR/rdonlyres/BFCEC181-4AD7-4B1A-B7B6-27045F8280FC/0/Lietteenk%C3%A4sittely.pdf>
- [24] Suomen Biokaasuyhdistys. Biokaasu. Luettu 20.12.2016.
<http://www.biokaasuyhdistys.net/tietoa-biokaasusta/>
- [25] Suomen Standardisoimisliitto. SFS-EN ISO 1716. Lämpöarvon määrittäminen.
- [26] Tampereen vesi. Vuosikertomus 2014. Raholan jätevedenpuhdistamo. Luettu 15.2.2017.
<http://www.tampereenvedenvuosikertomus.fi/vuosi2014/palvelut-ja-toiminta/viemarilaitos/raholan-jateveden-puhdistamo/>

- [27] Tukiainen T. 2009. Vesihuoltolaitosten kasvihuonepäästöt Suomessa. Luettu 21.2.2017.
- [28] Uusitalo A. 2015. Promaintlehti. Hukkalämmöstä sähköä. Luettu 30.3.2017.
<http://promaintlehti.fi/Turvallisuus-ja-ymparisto/Hukkalammosta-sahkoa>
- [29] Ylikunnallinen vesihuollon kehittämissuunnitelma 2013 – 2023. Luettu 27.3.2017.
<http://www.forssanvesihuoltoliikelaitos.fi/sisalto/uploads/Ylikunnallinen-vesihuollon-kehitt%C3%A4missuunnitelma-tekstiosuus.pdf>
- [30] Wikipedia. 2016. Polttomoottori. Luettu 23.2.2017.
<https://fi.wikipedia.org/wiki/Polttomoottori>
- [31] Öljy- ja biopolttoaineala ry. 2016. Öljytuotteiden kuluttajahintaseuranta. Luettu 23.5.2017.
<http://www.oil.fi/fi/tilastot-1-hinnat-ja-verot/11-oljytuotteiden-kuluttajahintaseuranta>