



## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Hanna Österman

### **Vanhan Seutulän kaatopaikan kaasun hyötykäyttömahdollisuudet**

Diplomityö

2018

67 sivua, 19 kuvaa, 3 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Mika Horttanainen  
Projektipäällikkö, DI Kirsi Karhu

Hakusanat: kaatopaikka, kaatopaikkakaasu, kaatopaikkakaasun hyödyntäminen, Stirling-moottori, mikroturbiini, lämpökattila

Keywords: landfill, landfill gas, landfill gas utilization, Stirling engine, microturbine, gas boiler

Diplomityön tavoitteena on selvittää vanhan Seutulän kaatopaikkakaasun hyödyntämiseen parhaiten soveltuva tekniikka. Vertailtavia hyödyntämismenetelmiä ovat Stirling-moottori, mikroturbiini, ORC-prosessi ja pelkän lämmön tuotanto kattilassa.

Vuonna 2017 Seutulässä kerättiin kaatopaikkakaasua 1,1 milj. Nm<sup>3</sup> metaanipitoisuudella 31 %. Tämä kaasumäärä vastaa 3,41 GWh:n energiaa. Kaatopaikkakaasusta saatava energiamäärä voisi olla vuodessa 4,3 GWh, jos kaikki potentiaalinen kaasu saataisiin hyödynnettyä kaatopaikalta keräysjärjestelmää mahdollisesti saneeraamalla ja laajentamalla. ORC-prosessi on jätetty pois tarkemmasta tarkastelusta, sillä tämän kokoluokan ORC-laitteistoja ei ole tällä hetkellä markkinoilla. Myöskään Stirling-moottoreita ei tällä hetkellä markkinoida aktiivisesti kaatopaikkakaasukohteisiin.

Mikroturbiini ja pelkkä lämmöntuotanto olisivat parhaat vaihtoehdot vanhan kaatopaikkakaasun hyödyntämiseksi. Näistä pelkällä lämmöntuotannolla on matalammat kokonaiskustannukset. Energiaa saadaan kaikilla tekniikoilla hyödynnettäväksi paljon enemmän kuin sille arvioidaan olevan HSY:n puolesta tarvetta. Jotta voitaisiin kunnolla hyötyä tuotetusta sähköstä ja/tai lämmöstä, tulisi keksiä energialle lisätarvetta joko omasta toiminnasta tai yrittää myydä sähköä tai lämpöä eteenpäin.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
Degree Programme in Environmental Technology

Hanna Österman

### **The utilization possibilities for landfill gas from the old landfill in Seutula**

Master's Thesis

2018

67 pages, 19 pictures, 3 tables and 2 appendices

Examiners: Professor, D. Sc. (Tech) Mika Horttanainen  
M. Sc. (Tech) Kirsi Karhu

Keywords: landfill, landfill gas, landfill gas utilization, Stirling engine, microturbine, gas boiler

The aim of this thesis is to examine the best utilization technology for landfill gas from the old landfill in Seutula. The utilization methods that are studied are Stirling engine, microturbine, ORC process and gas boiler.

In 2017 in Seutula 1,1 million Nm<sup>3</sup> landfill gas was collected and its methane content was 31 %. The collected gas contained 3,41 GWh energy. The energy amount that could be achieved if all the potential landfill gas would be collected by repairing and extending the collection network. ORC-process is left out of the thorough examination because there are no devices on the market for this size range. The Stirling engines using landfill gas as a fuel are also out of the active marketing.

Microturbine and gas boiler are the best solutions for utilization of the old landfills gas. The Gas boiler has lower total costs compared to microturbine. All studied technologies produce much more energy than it is estimated to be needed in Seutula. To benefit from the energy produced from the landfill gas, it would be necessary to find other use for it or to sell it to other actors.

## **ALKUSANAT**

Diplomityöni aihe on saatu HSY:n jätehuollon toimialalta. Työn ohjaajina HSY:llä ovat toimineet Kirsi Karhu ja Kimmo Koivunen. Heidän lisäksi tietoja ja kommentteja työhön ovat antaneet Sauli Kopalainen ja Jari Virmanen. Haluan kiittää kaikesta ohjauksesta ja ohjeistuksesta, joita olen työn tekemisen aikana HSY:n puolesta saanut.

LUT:n puolelta diplomityöni on ohjannut ja tarkastanut professori Mika Horttanainen. Kiitokset Mikalle tarkoista ja hyödyllisistä huomioista kommentteissa sekä joustavuudesta aikataulujen kanssa.

”Ymtetyttö”-ystäväni ovat olleet suuri tuki opiskelujen aikana. Haluan kiittää heitä sekä yhdessä vietetyistä opiskelurutistuksista että vapaa-ajalla vietetyistä hetkistä. Kiitos kuuluu myös perheelleni, josta jokainen on monella tapaa ollut tukena ja apuna opiskeluvuosieni aikana. Suurimmat kiitokset kuuluvat Aarolle niin diplomityön kirjoittamisen aikana tsemppaamisesta kuin koko opiskeluaajan kuuntelevana korvana toimimisesta ja hyvän seuran pitämisestä.

Helsingissä 23.5.2018

Hanna Österman

## SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO .....	6
1 JOHDANTO .....	7
1.1 Seutulan kaatopaikka .....	8
1.2 Työn tavoitteet .....	10
2 KAATOPAIKKAKAASU.....	12
2.1 Kaasun muodostuminen ja ominaisuudet .....	12
2.2 Ympäristövaikutukset .....	15
2.3 Kerääminen ja käsittely .....	17
3 SOVELTUVAT HYÖDYNTÄMISMENETELMÄT.....	20
3.1 Stirling-moottorit .....	20
3.1.1 Toimintaperiaate .....	21
3.1.2 Käyttö- ja ylläpitovaatimukset.....	22
3.2 Mikroturbiini.....	24
3.2.1 Toimintaperiaate .....	24
3.2.2 Käyttö- ja ylläpitovaatimukset.....	25
3.3 ORC-prosessi .....	27
3.3.1 Toimintaperiaate .....	27
3.3.2 Käyttö- ja ylläpitovaatimukset.....	29
3.4 Lämpökattila .....	29
3.4.1 Toimintaperiaate .....	30
3.4.2 Käyttö- ja ylläpitovaatimukset.....	31
4 TUTKIMUSMENETELMÄT JA TUTKIMUKSEN KOHDE.....	32
4.1 Tiedonhankinta .....	32
4.2 Seutulan vanhan kaatopaikan kaasut .....	33
5 HYÖTYKÄYTTÖMAHDOLLISUUDET SEUTULAN ALUEELLA.....	41
5.1 Laskenta .....	41
5.1.1 Hyötykäyttöön saatava energia.....	41
5.1.2 Kustannukset.....	45
5.1.3 Takaisinmaksuaika.....	46
5.1.4 Kasvihuonekaasupäästövähennys.....	49
5.2 Mahdolliset hyötykäyttäjät .....	51

5.3	Tulokset .....	53
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	56
7	YHTEENVETO.....	59
	LÄHTEET .....	61

## SYMBOLILUETTELO

$A$	tuotot	[€/a]
$E$	energia	[kWh], [MWh],
$E_{tarv}$	lämmöntarve	[W/m <sup>3</sup> ]
$h$	sähkön/lämmön hinta	[€/kWh]
$I$	investointi	[€]
$N$	takaisinmaksuaika	[a]
$P$	teho	[kW]
$Q$	lämmitysenergiankulutus	[Wh], [MWh]
$t$	laitteen käyttöaika	[h]
$t_h$	huipunkäyttöaika	[h]
$V$	tilavuus, veden kulutus	[m <sup>3</sup> ], [Nm <sup>3</sup> ], [m <sup>3</sup> /a]
$x$	pitoisuus	
$\eta$	hyötysuhde	

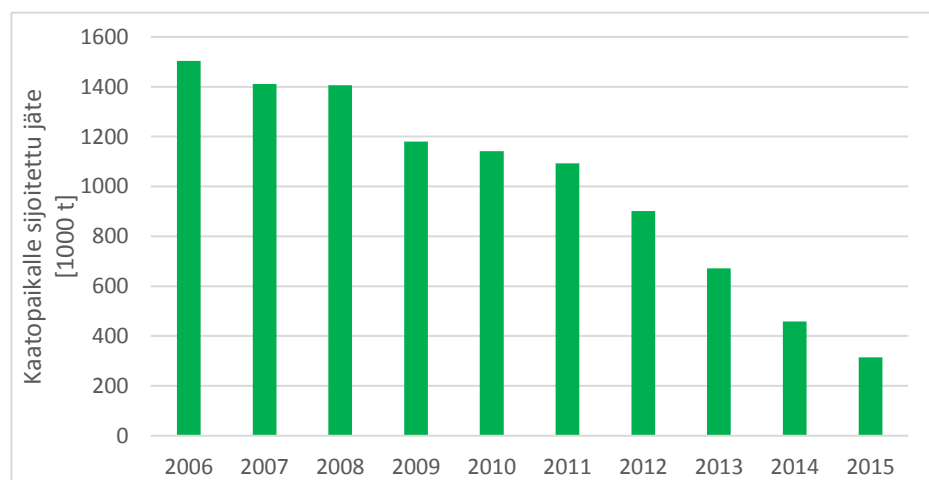
### Lyhenteet

CH <sub>4</sub>	metaani
CHP	Combined Heat and Power, yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto
CO <sub>2</sub>	hiilidioksidi
EU	Euroopan Unioni
H <sub>2</sub> O	vesi
H <sub>2</sub> S	rikkivety
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä
KHK <sub>väh</sub>	kasvihuonekaasupäästöjen vuosittainen vähenemä [gCO <sub>2</sub> /a]
LHV	lämpöarvo [kWh/Nm <sup>3</sup> ]
NH <sub>3</sub>	ammoniakki
NO <sub>x</sub>	typen oksidit
ominaisCO <sub>2</sub>	ominaishiilidioksidipäästökerroin [gCO <sub>2</sub> /kWh]
ORC	Organic Rankine cycle
YK	Yhdistyneet kansakunnat

## 1 JOHDANTO

Suomessa on monia kaatopaikkoja poistettu käytöstä siitä asti, kun Suomi on liittynyt Euroopan Unioniin, ja tämän myötä kaatopaikkojen toimintaan vaikuttava lainsäädäntö on muuttunut. Kaatopaikan käytöstä poistamisella tarkoitetaan sen toiminnan lopettamista ja sitä seuraavaa jälkihoitoa, johon kuuluu suljetun kaatopaikan päästöjen hallinta ja torjuminen. Vuonna 1994 voimaan astuneen uuden jätelainsäädännön mukaan kaatopaikoista on tullut lupavelvollisia, ja kaatopaikkojen ympäristövaikutuksia on pyritty vähentämään tiukemmillä vaatimuksilla. Lainsäädännön muuttumisen lisäksi käytöstä poistamisiin ovat vaikuttaneet valtakunnalliset päätökset ja tavoitteet kaatopaikkoja koskien. (Suomen ympäristökeskus 2008, 9-11.)

Kaatopaikkasijoituksen vähentymisen myötä, on jätteitä alettu kierrättää enemmän ja käyttää hyödyksi materiaalina tai polttoaineena. (Eurostat 2015, 76, 91.) Kuva 1 havainnollistaa kaatopaikoille sijoitetun jätteen vähenemisen vuodesta 2006 vuoteen 2015 (Tilastokeskus 2017; Eurostat 2017). Jätteiden sijoittamista kaatopaikalle on haluttu ruveta vähentämään niiden aiheuttamien ympäristöongelmien takia. Kaatopaikoista aiheutuu haitallisia päästöjä ilmaan sekä pinta- ja pohjavesiin. Lisäksi, sijoittamalla jätteitä kaatopaikalle, jää niistä hyödynnettäviksi kelpaavat materiaalit käyttämättömiksi. Hyödyntämällä jätettä voidaan korvata uusia raaka-aineita, ja näin vähentää päästöjä.



**Kuva 1.** Kaatopaikalle sijoitettu jäte Suomessa vuosina 2006–2015.



Kaatopaikoilla muodostuu päästöinä ilmaan hiilidioksidia ja metaania, jotka ovat kasvihuonekaasuja. Ne edistävät ilmastonmuutosta, ja kasvihuonekaasujen vähentämiseksi onkin asetettu tavoitteita sekä kansallisella että kansainvälisellä tasolla. Kansainvälisesti kasvihuonekaasujen vähentämistä ohjaavat Kioton pöytäkirja, YK:n ilmastopöytäkirja ja Pariisin sopimus. Lisäksi EU on asettanut omat ilmasto- ja energia-tavoitteet vuosille 2020, 2030 ja 2050. Vuoden tavoitteina on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vuoden 1990 tasosta 20 % vuoteen 2020 mennessä, vähintään 40 % vuoteen 2030 mennessä ja 80-95 % vuoteen 2050 mennessä. Vaikka selkeästi suurin osa Suomen kasvihuonekaasupäästöistä on peräisin energian tuotannosta ja kulutuksesta, päästölähteitä ovat myös teollisuusprosessit, maatalous ja jätteiden käsittely. Jätteiden käsittelystä syntyy noin neljä prosenttia koko Suomen kasvihuonekaasupäästöistä. Jättesektorin aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä 83 % on kaatopaikoilla syntyviä päästöjä. Päästöjä voidaan hillitä vähentämällä kaatopaikalle päätyvän jätteen määrää ja ottamalla talteen kaatopaikkakaasun sisältämää metaania polttoaineena hyödynnettäväksi. (Ympäristöministeriö et al. 2015.)

Kaatopaikoille sijoitetun jätteen hajotessa syntyy kaatopaikkakaasua. Jätteen hajoaminen ja kaasun muodostuminen jatkuu senkin jälkeen, kun kaatopaikka on poistettu käytöstä. Päästöjä voidaan hillitä keräämällä kaatopaikkakaasua ja hyödyntämällä se energiantuotantoon tai polttamalla soihdussa. Kaatopaikkakaasun muodostuminen kuitenkin vähenee ajan myötä, mikä hankaloittaa kaasun keräämistä ja hyödyntämistä. Kaasun metaanipitoisuus myös pienenee, mikä rajoittaa sen käyttämistä polttoaineena. (Tchobanoglous et al. 1993, 381-383; Nastev 2000, 199-200)

## **1.1 Seutulan kaatopaikka**

Vantaalla sijaitseva Seutulan kaatopaikka on ollut toiminnassa vuosina 1963–1987. Kaatopaikalla on nyt käynnissä jälkihoitovaihe, josta vastaa Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. Kaatopaikalla on kaasunkeräysjärjestelmä, ja sen avulla kaasua on otettu talteen ja käytetty vuosina 1993–2010 energian tuottamiseen. Kaatopaikkakaasua on tällöin käytetty polttoaineena kaasumootorissa ja -kattiloissa läm-

mön ja sähkön tuottamiseksi. Kaasusta moottorilla ja kattiloilla saatu energia on hyödynnetty lähellä sijaitsevalla Katriinan sairaalalla. Vuodesta 2010 alkaen kerättyä kaasua ei ole enää hyödynnetty, sillä sen metaanipitoisuus laski liian vähäiseksi toimiakseen kaasumoottorien polttoaineena. Nykyään Seutulan kaatopaikkakaasu poltetaan soihdussa. (Motiva 2014, 3.) Soihutupoltolla saadaan muutettua voimakasta kasvihuonekaasua, metaania, vähemmän ilmastoa kuormittavaksi hiilidioksidiksi, jolloin vaikutus ilmaston lämpenemiseen pienenee. Sillä ei kuitenkaan saada hyödynnettyä kaasun sisältämää energiaa polttoaineena sähkön- ja lämmöntuotannossa (Suomen ympäristökeskus 2008, 79). Seutulan kaatopaikan huoltorakennus ja soihutupoltin näkyvät kuvassa 2.

Seutulan kaatopaikka mainitaan HSY:n ympäristöohjelmassa vuodelle 2018. Ohjelmassa luetellaan HSY:n eri toimialojen ja tulosalueiden ympäristötavoitteet, joista Seutulan vanhaa kaatopaikkaa koskevat strateginen hanke jätteenkäsittelytoiminnan muuttamisesta ja strateginen päämäärä ympäristön tilan paranemisesta. Yhdeksi jätteenkäsittelytoiminnan muuttamista edistäväksi toimenpiteeksi mainitaan yritysyhteistyön laajentaminen Seutulan alueella. Ympäristön tilan paranemiseen johtaviin toimenpiteisiin taas kuuluu Seutulan kaatopaikkakaasun hyödyntäminen. HSY:n talous- ja toimintasuunnitelmassa vuosille 2018-2020 on mainittu suoraan, että vuosina 2017-2018 toteutetaan selvitys Seutulan kaatopaikkakaasun hyödyntämisteknologioista. (HSY 2017, 24, 48-49.) Tämän diplomityön tietoja voidaan käyttää myöhemmin myös muualla, kun etsitään kaasunhyödyntämismahdollisuuksia vastaavan kokoiselle vanhalle kaatopaikalle, jossa tuotanto on jo hidastunut.

HSY:n strategisia päämääriä vuodelle 2020 ovat muun muassa ympäristön tilan paraneminen, HSY:n merkittävä rooli alueen materiaali- ja energiatehokkuuden parantamisessa sekä materiaalivirtojen hyödyntämisessä sekä innovatiivisena edelläkävijänä oleminen (HSY 2014). Seutulassa nykyään soihutupolttoon päätyvien kaatopaikkakaasujen hyödyntäminen sopisi siis HSY:n strategiaan tavoitteisiin ja arvoihin. Hyödyntämällä kaatopaikkakaasut energiaksi saataisiin korvattua fossiilisilla polttoaineilla tuotettua energiaa uusiutuvalla. Vaikka hyödynnettävän kaasun määrä ei Seutulassa

tulisikaan olemaan suuri, vahvistaisi sen hyötykäyttö HSY:n imagoa haitallisten ympäristövaikutusten vähentäjänä. Kaasun hyödyntämisellä pienessäkin kohteessa voidaan levittää laajemmin ympäristön huomioon ottavaa ajattelutapaa.



**Kuva 2.** Seutulampi kaatopaikan huoltorakennus ja soihutuspoltin.

## 1.2 Työn tavoitteet

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää, mikä tekniikka sopisi parhaiten Seutulampi kaatopaikalta kerättyjen kaasujen hyödyntämiseen. Tarkoituksena on tutkia Stirlingmoottorin, mikroturbiinin, ORC-prosessin sekä lämpökattilan soveltuvuutta tähän kohteeseen. Eri tekniikoilta vertaillaan niiden käyttöönottoon ja ylläpitoon liittyviä vaatimuksia. Tutkitaan, onko tekniikoista jo olemassa olevia sovelluksia biokaasun hyödyntämiseksi. Tutkitaan myös, paljonko energiaa saataisiin kullakin tekniikalla hyödynnettäväksi, ja miten paljon tekniikan käyttöönotolla saataisiin vähennettyä kasvihuonekaasupäästöjä.

Työssä selvitetään myös arviot eri hyödyntämismuotojen kustannuksista, mutta kuitenkin pidetään painopiste tekniikoissa, energian hyödyntämisessä ja ympäristövai-

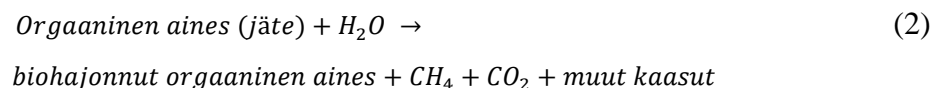
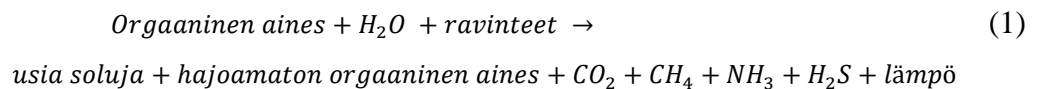
kutuksissa. Sopivimman tekniikan valintaan kaasun hyödyntämiseksi voi myös vaikuttaa sähkön ja lämmön hyötykäyttökohde, joten kartoitetaan mahdollisia energiaa käyttäviä toimintoja kaatopaikan lähialueella. Selvitetään, olisiko alueen ulkopuolisilla toimijoilla tarvetta tai kiinnostusta ottaa käyttöönsä Seutulän kaatopaikalla tuotettua uusiutuvaa energiaa.

## 2 KAATOPAIKKAKAASU

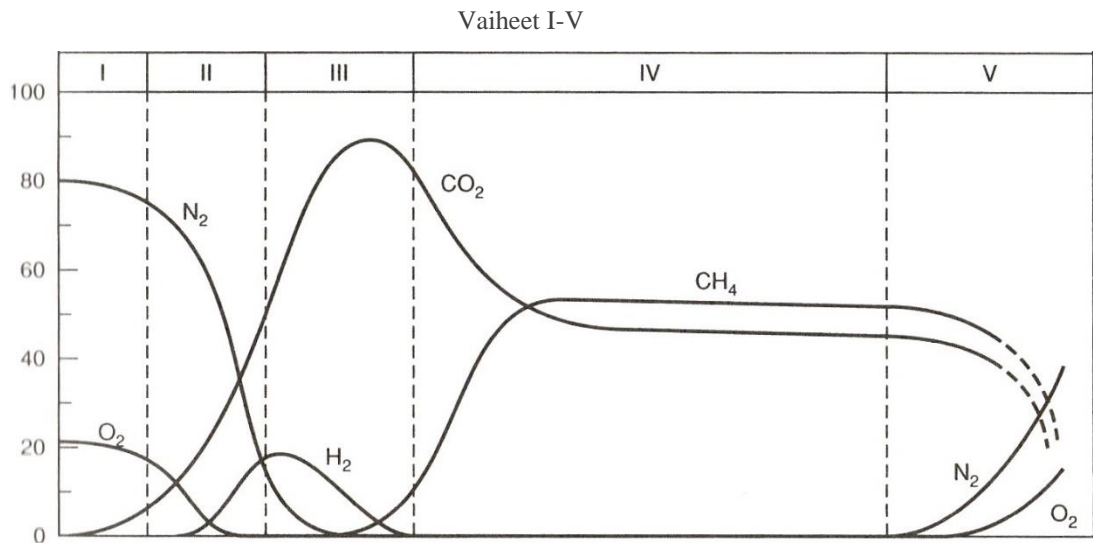
Kun kaatopaikalle sijoitettu jäteaines reagoi veden kanssa kemiallisesti, muodostuu kaatopaikkakaasua. Kaatopaikkakaasu sisältää enimmäkseen metaania ja hiilidioksidia, mutta myös useita muita kaasuja, joista osa on ympäristölle haitallisia. Kaasun haitallisia vaikutuksia ympäristöön vähennetään keräämällä kaasu kaatopaikalta hyödynnettäväksi tai poltettavaksi soihdussa. (Tchobanoglous et al. 1993, 381-383.)

### 2.1 Kaasun muodostuminen ja ominaisuudet

Yhdyskuntajätteen biohajoava osuus orgaanisesta aineksesta hajoaa kaatopaikalla hiilidioksidia ja metaania sisältäväksi kaatopaikkakaasuksi. Muita hajoamisprosessin lopputuotteita ovat hajoamaton orgaaninen aines, uudet solut, ammoniakki, rikkivety ja lämpö. (Tchobanoglous et al. 1993, 95, 385-387.)



Yhtälö 1 kuvaa orgaanisen aineen hajoamisprosessia. Yleisemmällä tasolla kiinteän jätteen anaerobinen eli hapeton hajoaminen voidaan kuvata yhtälöllä 2. Jätteen hajoaminen ajan mittaan kaatopaikkakaasuksi on hidaskeski, joka voidaan jaotella viiteen vaiheeseen. Kaatopaikkakaasun muodostumisen vaiheet ja kaasun koostumus kussakin vaiheessa on esitetty kuvassa 3. (Tchobanoglous et al. 1993, 95, 385-387.)



**Kuva 3.** Kaatopaikkakaasun muodostumisen vaiheet I-V. (Tchobanoglous et al. 1993, 385.)

Ensimmäinen vaihe (I-vaihe) kaatopaikkakaasun muodostumisessa tapahtuu lyhyen ajan kuluessa siitä, kun jäte on sijoitettu kaatopaikalle. I-vaiheessa biologinen hajoaminen on aerobista, eli orgaaninen aines reagoi hapen kanssa. Toisessa vaiheessa (II-vaiheessa) kaatopaikan tila muuttuu anaerobiseksi eli hapettomaksi. Kolmannessa vaiheessa (III-vaiheessa) käynnistyy jätteen anaerobinen hajoaminen. III- eli happovaihe voidaan jakaa kolmeen osaan: hydrolyysiin, asidogeneesiin ja asetogeneesiin. Hydrolyysissä entsyymit muuttavat yhdisteitä, joilla on suuri molekyyylimassa, hiileksi ja yhdisteiksi, jotka sopivat mikro-organismien energian lähteiksi. Asidogeneesi tarkoittaa happokäymistä, jonka aikana hydrolyysin tuoteyhdisteet muuttuvat orgaanisiksi hapoiksi. Asetogeneesin tuotteena syntyy etikkahappoa eli asetaattia, vetyä (H<sub>2</sub>) ja hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>). Hiilidioksidi on olennaisin vaiheessa III muodostuva kaasu, minkä voi havaita myös kuvasta 3. (Tchobanoglous et al. 1993, 385-386.)

IV-vaiheessa tapahtuu metanogeneesi eli metaanikäyminen, jossa asetaatti ja vety muuttuvat metaaniksi ja hiilidioksidiksi. Kun biohajoava orgaaninen jäteaine on enimmäkseen hajonnut metaaniksi ja hiilidioksidiksi, alkaa V- eli kypsymisvaihe. V-vaiheessa kaatopaikkakaasun muodostuminen vähentyy kaatopaikalla huomattavasti, kunnes loppuu lähes kokonaan. Kaatopaikkakaasun muodostuminen kaatopaikoilla kestää yhteensä vuosikymmeniä. Kaasun muodostumisen alkaa, kun kaatopaikka on

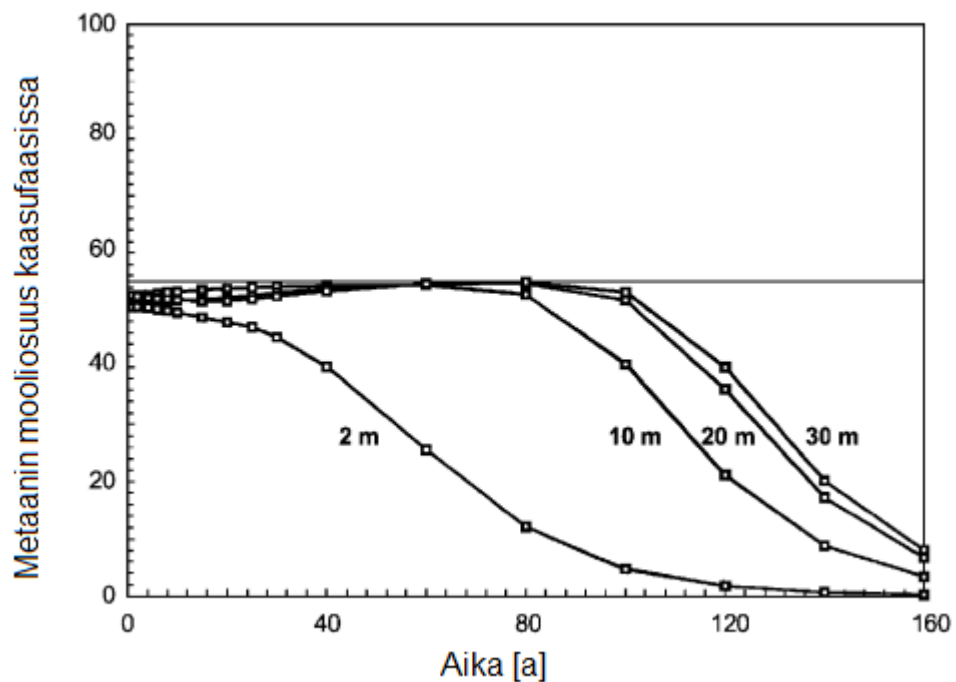
ollut täydessä toiminnassa vuoden ajan. Se saavuttaa huippunsa viiden vuoden sisällä muodostumisen alkamisesta, ja hidastuen ajan myötä jatkuu vielä pitkään, jopa 50 vuotta. (Tchobanoglous et al. 1993, 385-387, 392-393.)

Kaatopaikkakaasujen muodostumisen hitauteen ja syntyvän kaasun määrään vaikuttavat sekä kaatopaikan että sinne sijoitetun jätteen ominaisuudet. Kaatopaikkakaasun koostumus vaikuttaa olennaisesti sekä kaasun määrään että muodostumisnopeuteen. Jätteen sisältäessä paljon hitaasti hajoavia materiaaleja kuten muoveja, puuta, kuorta tai kovia pakkausjätteitä, on kaasun muodostuminen heikkoa. Sulfaattipitoiset jätteet ja torjunta-aineet ovat hajoamisprosessissa metanogeenien toimintaa hidastavia aineita. Myös suuret pH-muutokset voivat hidastaa hajoamista. Jätteen riittävällä kosteudella voidaan kasvattaa sekä kaasun määrää että nopeuttaa jätteen hajoamista. (Suomen ympäristökeskus 2008, 134-135.)

Muodostuvan kaatopaikkakaasun määrään voidaan vaikuttaa jätepenkereen korkeudella ja kaatopaikan peittämisellä. Jätepenkereen riittävä korkeus kaasun muodostumisen lisäämiseksi on useita metrejä. Pienillä kaatopaikoilla matalassa jätepenkereessä hajoaminen jää pitkäksi ajaksi aerobiseen tilaan, jolloin kaasun muodostuminen on hyvin vähäistä. Jätepenkereen korkeus vaikuttaa myös pintakerroksen alla olevan jätteen lämpötilaan. Jotta anaerobinen hajoaminen tapahtuisi ihanteellisesti, tulisi jätteen lämpötilan olla 35-37 °C tai 55-60 °C. Jos jätekerroksen paksuus on yli 4-5 metriä, on jätteen lämpötilan mahdollista pysyä tarpeeksi korkeana kaasun muodostumisen jatkumiselle kylmänäkin talvena. Suurin osa Suomen kaatopaikoista on kuitenkin matalia, ja niissä pintakerroksen alla jätteen lämpötila laskee vain 10-15 °C:een. (Suomen ympäristökeskus 2008, 134-135.)

Syntyvän kaatopaikkakaasun määrä vähenee vuosien saatossa, kun orgaaninen aines hajoaa, eikä kaatopaikalle tuoda enää uutta jätettä eli hajoavaa ainesta. Samalla hajoavan aineksen vähentyessä myös hajoamisprosessin tuotteiden pitoisuudet laskevat. Myös kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus pienenee ajan kuluessa. Kaasun muodostumisen ja sen koostumuksen muutosten arvioimiseen on kehitetty erilaisia matemaattisia malleja. Kuvassa 4 on piirrettynä kaatopaikkakaasun metaanin mooliosuuden

muutos ajan kuluessa yhden kanadalaistutkija Miroslav Nastevin käyttämän mallinustavan mukaan arvioituna. Kaasun metaanipitoisuus on arvioitu laskennallisesti neljälle eri jätetäytön syvyydelle. Kuvasta nähdään, että lähellä jätetäytön pintaa (kahden metrin syvyydessä) metaanipitoisuus alkaa laskea varhaisemmassa vaiheessa kuin syvällä kaatopaikkakasan sisällä. Kun jätetäytön syvyys on yli kymmenen metriä, se ei enää yhtä voimakkaasti vaikuta metaanipitoisuuden vähenemisnopeuteen. (Nastev 2000, 199-200.)



**Kuva 4.** Metaaniosuuden väheneminen kaasussa ajan funktiona kaatopaikan eri syvyyksissä.

## 2.2 Ympäristövaikutukset

Kaatopaikoilla on ympäristövaikutuksia sekä maaperään, ilmaan että vesistöön. Ilmaan kohdistuvia vaikutuksia ovat kasvihuoneilmiö ja otsonikato. Kaatopaikoilla syntyviä päästöjä ilmaan ovat haihtuvat orgaaniset yhdisteet, hajut sekä melu. Näistä kasvihuoneilmiö ja otsonikato ovat globaaleja ympäristövaikutuksia, eli kaatopaikoista



aiheutuvilla päästöillä on haitallisia vaikutuksia jopa maailmanlaajuisesti. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet, hajut ja melu vaikuttavat paikallisesti kaatopaikkaa ympäröivän alueen ilmaan. Ympäristövaikutukset ja päästöt ilmaan johtuvat melupäästöjä lukuun ottamatta kaatopaikalla syntyvästä kaasusta. (Christensen 2010, 695-702.)

Kaatopaikkakaasun sisältämät hiilidioksidi ja metaani ovat kasvihuonekaasuja, eli niiden pääseminen ilmakehään voimistaa kasvihuoneilmiötä. Kasvihuonekaasut heikentävät ilmakehän kykyä heijastaa auringosta ilmakehään osuvaa lämpösäteilyä takaisin pois päin maasta. Ne myös vähentävät maasta heijastuvan säteilyn pääsemistä pois maan ilmakehästä. Säteilyn jääminen ilmakehään nopeuttaa ilmaston lämpenemistä. Metaani on hyvin voimakas kasvihuonekaasu, jonka ilmastonlämmityspotentiaali sadan vuoden aikavälillä on noin 25-kertainen hiilidioksidiin verrattuna. Se voidaan kuitenkin kerätä ja polttaa soihdussa, jolloin metaani häviää ja muodostuu hiilidioksidia. (Christensen 2010, 696-697.) Ilmaston lämpenemisen vaikutuksia ovat muun muassa jäätiköiden sulaminen, merien vedenpinnan nousu, erilaiset sään ääri-ilmiöt sekä luonnon monimuotoisuuden väheneminen (Intergovernmental Panel on Climate Change 2002, 4-7).

Kun kaatopaikkakaasua käytetään polttoaineena tai poltetaan soihdussa, syntyy ilmakehään hiilidioksidipäästöjä. Koska se on peräisin biogeenisistä lähteistä, ei sitä kuitenkaan polttoainekäytössä huomioida päästötaseeseen ilmakehää kuormittavaksi hiilidioksidiksi. Koska kaatopaikkakaasu on uusiutuva polttoaine, voidaan ajatella laskeutuvasti, että sen polttaminen on hiilineutraalia. Kaatopaikkakaasun poltossa vapautuvan hiilen määrä on yhtä suuri kuin jätteeseen sitoutuneen hiilen määrä, mikä tarkoittaa, että hiilitase pysyy tasapainossa. (Väisänen 2016, 12, 15-16.) Kaatopaikkakaasusta saatavalla energialla voidaan korvata fossiilisilla polttoaineilla tuotettua energiaa, mikä vähentää hiilidioksidipäästöjä ilmakehään.

Kaatopaikkakaasu voi sisältää otsonikerrosta heikentäviä CFC-yhdisteitä, vaikka niitä sisältäviä laitteita ei enää ole laajasti käytössä (Christensen 2010, 698). Otsonikerros suojaa maapalloa auringon voimakkaalta säteilyltä, ja kerroksen suojelemiseksi sitä heikentävien aineiden käyttöä on rajoitettu. Suomessa näitä yhdisteitä sisältävä jäte on

käsiteltävä vaarallisena jätteenä (Ympäristöhallinto 2017). Riippuen kaatopaikalle päätyneen jätteen laadusta, kaatopaikkakaasu voi sisältää erilaisia myrkyllisiä aineita, mutta niiden vaikutukset ympäristöön ovat nykyisin hyvin maltillisia (Christensen 2010, 699).

Kaatopaikalla sijaitseviin rakennuksiin voi joskus päästä kulkeutumaan metaania esimerkiksi rakennusten perustuksia tai putkistoja pitkin. Jos metaanin osuus tilavuudesta on 5-15 %, se reagoi ilman kanssa muodostaen räjähtävän seoksen. Räjähdysvaaraa voidaan ehkäistä eristämällä kaasuvirtaus tiiviillä maakerroksella ja asentamalla kaasunpoistoputkistoja. (Suomen ympäristökeskus 2008, 135.) Kaatopaikkakaasun hajoaminen aiheuttaa myös riskin kaatopaikkapaloihin, joista leviävä savu sisältää lähiympäristölle ja ihmisten terveydelle haitallisia ja jopa myrkyllisiä aineita. Jos jätteen aerobisen hajoamisen aikana hapen kanssa pääsee reagoimaan metaania, syttyy palo. Kaasun talteenotolla voidaan pienentää kaatopaikkapalojen riskiä. (Aderemi & Ottiloju 2012, 23-25.)

### **2.3 Kerääminen ja käsittely**

Jotta saadaan pienennettyä kaatopaikkakaasun ympäristövaikutuksia ilmaan, kaasua kerätään talteen soihutupoltoa tai hyötykäyttöä varten. Keräysjärjestelmään kuuluvat keräyskaivot, keräysputket ja kaasunkeräysasema. (Dudek et al. 2010, 11.) Kaasun keräämiseen käytetään pystysuoraan sijoitettavia imukaivoja tai vaihtoehtoisesti horisontaalia salaojajärjestelmää. Imukaivoilta kaasu imetään pumppaamolle kaasunkeräysputkistolla. Pumppaamalla pumpataan keräysjärjestelmään alipaine, jolloin kaatopaikkakaasu ja hajut virtaavat kaivoihin, eivätkä kaatopaikan ympäristöön. Pumppaamalla säädetään imua ja mitataan kaasun koostumusta. Liian suuri happipitoisuus tai liian alhainen metaanipitoisuus voi johtaa keräysjärjestelmän pysäyttämiseen räjähdysvaaran vuoksi. (Suomen ympäristökeskus 2008, 78-79.)

Jos kaatopaikkakaasun keräysputkistoihin pääsee kaasun sisältämästä vesihöyrystä tiivistynyttä vettä, voi putkiston toiminnassa esiintyä ongelmia. Putkistoon kerääntyvä vesi pienentää kaasuvirtaukselle jäävää tilaa, ja näin syntyy painehäviöitä. Jos sekä

nestettä että kaasua virtaa samanaikaisesti putkessa, voi sinne syntyä värähtelyä, mikä vaikeuttaa vakaan ja hallittavan keräysjärjestelmän toiminnan saavuttamista. Likainen vesi voi aiheuttaa painehäviöitä kuluttamalla keräysputkien pintaa. (Dudek et al. 2010, 19.) Vesi voidaan ohjata pois putkistoista rakentamalla ne tarpeeksi kalteviksi ja rou-tarajan alapuolelle (Suomen ympäristökeskus 2008, 78). Jos kaasun lämpötila nousee putkistoon syntyvän paineen vuoksi liikaa, voi se kuluttaa putkistoa sekä lisätä mit-tausten epäluotettavuutta ja keräysjärjestelmän turvallisuusriskejä (Dudek et al. 2010, 20).

Kaatopaikkakaasu käsitellään joko polttamalla soihdussa tai hyödyntämällä energian-tuotannossa. Soihutupoltossa saadaan muutettua kaatopaikkakaasun sisältämä metaani hiilidioksidiksi, joka on metaaniin verrattuna vähemmän voimakas kasvihuonekaasu. Kaatopaikkakaasu sisältää usein kloori- ja fluorihiiilivetyjä. Sen polttamisen tulee olla hyvin hallittua, ettei palamisessa ilmaan pääse hyvin haitallisia palamistuotteita. Soih-tupoltossa on oltava tarpeeksi korkea ilmakerroin ja sekoitus, tasainen lämpötilaja-kauma (1000-1200 °C) ja ainakin 0,3:n sekunnin kestävä polttoaika. (Suomen ympä-ristökeskus 2008, 79-80.)

Muodostuvasta kaatopaikkakaasusta voidaan saada kerättyä jopa 70-90 %, jos kaasu kerätään tasaisesti koko jätetäytön alueelta hyvin suunnitellulla nykyaikaisella kaasun-keräysjärjestelmällä. Vuonna 2001 keskimääräiseksi kaasunkeräystehokkuudeksi EU:n kaatopaikoilla on arvioitu 54 %. (Smith et al. 2001, 99-101.) Tästä keräystehok-kuutta on saatu huomattavasti parannettua, sillä uudempien tutkimusten mukaan se vaihtelee yleisesti välillä 60-85 %, ja keskimäärin keräystehokkuudeksi voidaan arvi-oida 75 %. Kaasunkeräystehokkuuteen voidaan vaikuttaa etenkin kaatopaikan peittä-misellä sekä kaasunkeräysjärjestelmän riittävällä ulottuvuudella mahdollisimman suu-reen osaan jätetäyttöä. (Barlaz, A et al. 2012, 1400,1404.)

Kaatopaikkakaasua voidaan käyttää energiantuotannon polttoaineena sellaisenaan tai puhdistettuna. Jos kaasun metaanipitoisuus on n. 50 %, on yhden kaasukuutiometrin lämpöarvo suunnilleen 4,5 kWh. Kaatopaikalta saadusta biokaasusta voidaan tavalli-

sesti saada polttoainetehoa 100-200 kW/ha. Biokaasua voidaan käyttää pelkän lämmön- tai yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannossa. Sitä voidaan hyödyntää myös voimalaitoksissa ja liikenteessä polttoaineena. Kun tuotetaan pelkkää lämpöä, on järkevää, että lämmön käyttökohde sijaitsee kaatopaikan läheisyydessä. Biokaasun siirtäminen kauas kaatopaikalta lisää huomattavasti kustannuksia, eikä hyödyntäminen näin ole taloudellisesti kannattavaa. Kaatopaikkakaasua muodostuu kesällä enemmän kuin talvella, mutta lämpöenergialle olisi tarvetta talvisin. Tämä kausivaihtelukin hankaloittaa lämmöntuotantoa. Tehokkaampaa on tuottaa biokaasusta sekä sähköä että lämpöä. Yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon voidaan käyttää esimerkiksi kaasumoottoreita. Kaasumoottoreilla on kuitenkin taipumusta korroosioon, likaantumiseen ja lisääntyneisiin huoltotarpeisiin, kun polttoaineena käytetään biokaasua. Kaasumoottorit myös tarvitsevat käytettäväksi polttoaineeksi kaasun, jolla on tarpeeksi korkea lämpöarvo. (Suomen ympäristökeskus 2008, 80.)

### 3 SOVELTUVAT HYÖDYNTÄMISMENETELMÄT

Tutkittavat hyödyntämismenetelmät Seutulan kaatopaikkakaasulle ovat Stirling-moottorit, mikroturbiinit, ORC-prosessi ja lämpökattila. Lämpökattilalla saataisiin hyödynnettyä kaasun sisältämä energia pelkäksi lämmöksi, muilla tekniikoilla voitaisiin tuottaa sekä sähköä että lämpöä. Nämä tekniikat on valittu tutkittaviksi Seutulan vanhan kaatopaikan kaasun hyödyntämismenetelmiksi, sillä ne pystyvät tuottamaan energiaa, vaikka polttoaineen metaanipitoisuus olisi vähäinen.

Diplomityön alkuvaiheessa lämpökattilaa ei ollut valittu yhdeksi tutkittavaksi hyödyntämismenetelmäksi, sillä arveltiin hyötykäyttökohteen löytymisen pelkälle lämpöenergialle olevan haasteellista. Sähköä tuottaville tekniikoille arveltiin löytyvän helpommin hyötykäyttäjiä, sillä kaatopaikan lähialueella ei ole juurikaan tiloja, jotka tarvitsisivat lämmitysenergiaa. Lämpökattila otettiin kuitenkin myöhemmin mukaan tarkasteluun, kun huomattiin muista tekniikoista olevan Seutulan kaatopaikalle sopivia sovelluksia markkinoilla oletettua vähemmän. Kaasumoottorit ovat myös yleisiä sähkön ja lämmön tuotannossa käyttäen polttoaineena kaatopaikkakaasua. Kaasumoottoria ei kuitenkaan ole valittu Seutulan kaatopaikkakaasun hyödyntämisvaihtoehtojen tarkasteluun, sillä kaatopaikkakaasun metaanipitoisuuden tulisi olla suurempi kuin Seutulassa nykyinen 31 %. Esimerkiksi saksalainen yritys MWM myy kaasumoottoreita, jotka toimivat kaatopaikkakaasulla, jonka metaanipitoisuus on 35-60 % (MWM 2018).

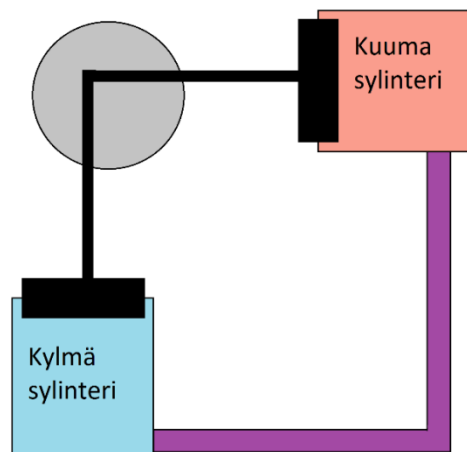
#### 3.1 Stirling-moottorit

Stirling-moottori tuottaa energiaa laajentaen ja puristaen kasaan työkaasua lämpötilaerojen avulla. Moottorityypin keksi vuonna 1816 skotlantilainen pappi Robert Stirling. Stirling-moottorissa on suljettu termodynaaminen kiertoprosessi. (Walker 1980, 1-2.) Stirling-moottorin etuja myös kaatopaikkakaasua polttoaineena käyttäviin ORC-prosessiin ja kaasuturbiiniin verrattuna ovat hyvä hyötysuhde, vähäinen polttoaineen tarve sekä vähäiset NO<sub>x</sub>- ja häkäpäästöt. (Budisulistiorini 2007, 11-12.) Koska lämpö tuodaan prosessiin ulkopuolelta, voidaan polttoaineena käyttää lähes mitä vain palavaa

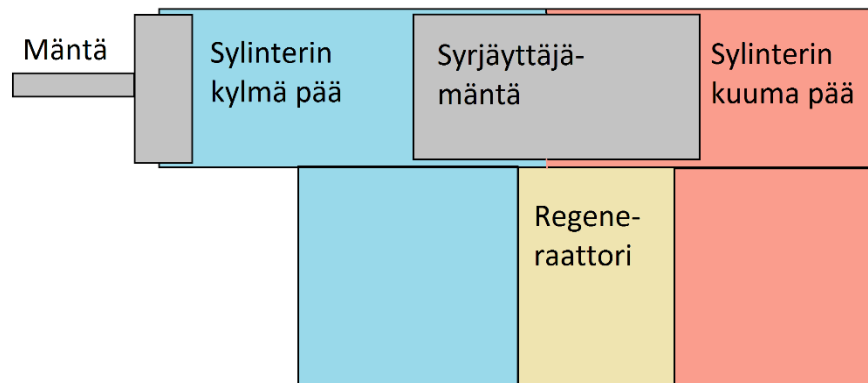
ainetta (Roe 1998, 49). Stirling-moottoreita käytetäänkin uusiutuvan energian tuotannossa hankkimalla prosessiin lämpöenergia auringon säteilystä tai käyttämällä biokaasua polttoaineena (Cleanergy 2018).

### 3.1.1 Toimintaperiaate

Stirling-moottorissa on työntävä ja syrjäyttävä mäntä, yksi tai kaksi sylinteriä ja lämmönsiirrin. Kuvissa 5 ja 6 näkyvät moottorin osat kahden ja yhden sylinterin Stirling-moottorimalleissa. Moottori toimii työkaasun lämpötilaerojen avulla. Kun kuumaa sylinteriä tai sylinterin kuumaa päätä kuumennetaan, siinä olevan työkaasun paine kasvaa, jolloin kaasu siirtää mäntää. Männät on kiinnitetty toisiinsa niin, että toisen liikkuessa myös toinen lähtee liikkumaan. Lämmönsiirtimellä voidaan parantaa moottorin hyötysuhdetta. Se ottaa lämpöä talteen, kun kuuma työkaasu virtaa sylinterin kylmään päähän ja lämmitteää talteen otetulla lämmöllä viileää kuumaan sylinteriin virtaavaa työkaasua. (Podešva & Poruba 2015, 341-342.)

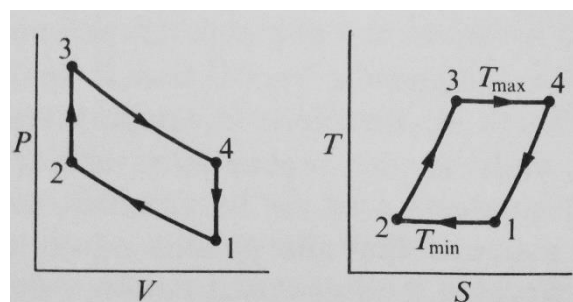


**Kuva 5.** Stirling-moottori, jossa on kaksi sylinteriä.



**Kuva 6.** Stirling-moottori yhdellä sylinterillä ja regeneraattorilla eli lämmönsiirtimellä.

Stirling-kiertoprosessissa on neljä tilapistettä, jotka on esitetty (P,V)- ja (T,S)-koordinaatistoissa kuvassa 7. Prosessin vaiheessa 1-tilapistestä 2-tilapisteeseen tapahtuu työkaasun isoterminen puristus, ja lämpöä siirtyy työkaasusta prosessin ulkopuolelle. Vaiheessa 2-3 työkaasun tilavuus säilyy vakiona, ja sen lämpötila nousee. Vaiheessa 3-4 tapahtuu isoterminen laajeneminen, jolloin prosessin ulkopuolelta siirtyy lämpöä kiertävään kaasuun. Neljännessä vaiheessa 4-1 työkaasun lämpötila laskee vakiotilavuudessa. (Walker 1980, 16-19.)



**Kuva 7.** Stirling-prosessi esitettyinä (P,V)- ja (T,S)-koordinaatistossa.

### 3.1.2 Käyttö- ja ylläpitovaatimukset

Stirling-moottorissa voidaan hyödyntää polttoaineena kaatopaikkakaasua, jonka metaanipitoisuus on vähintään 18 %, eli soveltuu hyvin käytöstä jo poistettujen kaatopaikkojen kaasujen hyödyntämiseen (Sahlin, C. 2016, 3). Doranovan projektipäällikkö

Timo Ylivinkan mukaan Stirling-moottorilla on useita etuja verrattuna mäntämoottoreihin ja mikroturbiineihin: polttoaineen laadun kanssa voidaan olla sallivampia, sillä moottorin toiminta perustuu ulkoisen lämmönlähteen käyttöön, laiteella on hiljainen käyntiääni, eli soveltuu paremmin käytettäväksi taajama-alueille ja lisäksi sillä on pitkä, n. 8000:n tunnin, huoltoväli. Tyypillisenä käyttöikä Stirling-moottorille voidaan pitää 15:ä vuotta (Takalo 2013, 11).

Yksi Stirling-moottoreiden valmistajista on ruotsalainen Cleanergy, joka on toimittanut Stirling-moottoreita kaatopaikkakaasun hyödyntämiseksi muun muassa Ruotsin Ulricehamniin vanhalla kaatopaikalle (Westholm 2016, 4-5). Ulricehamns Energi AB:llä on käytössä viisi Cleanergyn Stirling-moottoria. Niiden käyttöönotto sujui Säwen mukaan suhteellisen helposti. Cleanergy hoiti laitteiden asennuksen ja käynnistämisen. Alussa ei alueella ollut valmiita rakennuksia, joten moottorien avulla tuotettua lämpöä ei saatu hyötykäyttöön, ainoastaan sähköä. Säwen mukaan moottorit ovat tarvinneet paljon huoltoa, mutta se ei ole näkynyt taloudellisena tappiona, sillä Cleanergyn kanssa on ollut voimassa huoltosopimus. Osittain viat ovat johtuneet saapuvan kaasun säännöstelystä, joka on välillä johtanut siihen, ettei kaasumäärä ole ollut moottoreille riittävän suuri. Kun kaikki moottorit ovat olleet käynnissä, tämä ongelma on pahentunut ja johtanut välillä moottoreiden pysäyttämiseen. Huoltovälin tihentymiseen on vaikuttanut pysäyttämistä johtuva moottorien kuluminen. (Säwe 2018.)

Kahdessa myöhemmin Ulricehamniin hankituista Stirling-moottoreista osoittautui olevan valmistusvirheitä. Ne kestivät käytössä noin 3500 tuntia ennen kuin hajosivat kokonaan. Näiden tilalle kuitenkin tultiin vaihtamaan uudet moottorit ilman kustannuksia. Nyt laitteet toimivat kuten niiden kuuluukin. Moottorien avulla saatava lämpö käytetään viereisen sorttiaseman sulana pitoon, ja sähköstä osa otetaan omaan käyttöön ja osa johdetaan sähköverkkoon myyntiin. (Säwe 2018.) Valitettavasti Cleanergy on ilmoittanut lopettavansa kaasukäyttöisten Stirling-moottoreiden toimittamisen vuonna 2017 ja on antanut perusteluiksi strategiset ja taloudelliset syyt (Eklind 2017). Cleanergyn Stirling-moottoreita ei voida siis pitää vaihtoehtona hankittavaksi Seutulaan.



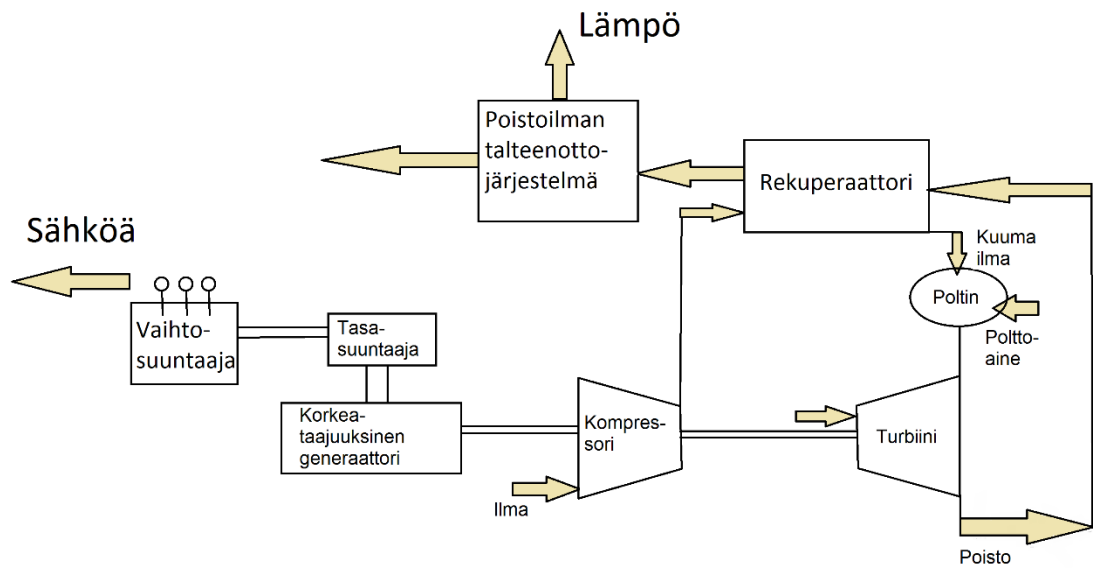
Suomalaisella ympäristötekniikan yrityksellä Doranovalla on aiemmin ollut myynnissä Qaloviksen CHP-laite, jossa moottorina on toiminut Qaloviksen valmistama Flexgen Stirling-moottori. Polttoaineena tässä laitteessa on käytetty puukaasutettua haketta. Doranova on luopunut laitteen aktiivisesta markkinoinnista pitkän takaisinmaksuajan takia. (Ylivinkka 2018.) Flexgen Stirling-moottorin teho on 38 kW, ja se toimii ulkopuolelta tuodulla lämmöllä, joka voidaan tuottaa esimerkiksi biokaasua polttamalla. Moottorin sähkön tuoton hyötysuhde on Qaloviksen mukaan 27-29 % ja kokonaishyötysuhde parhaimmillaan 81 %. Moottoria on mahdollista etäohjata, ja sillä on vuoden takuu. (Qalovis 2018.) Ylivinkan mukaan Flexgen Stirling-moottorin hyötysuhteet vaihtelevat välillä 15-29 %. Lisäksi Stirling-moottoreita on aiemmin valmistanut tanskalainen yritys Stirling Dk, mutta yritys on lopettanut toimintansa.

## **3.2 Mikroturbiini**

Mikroturbiineja käytetään hajautetussa ja yhdistetyssä lämpö- ja sähköenergian tuotannossa. Polttoaineena niissä voidaan käyttää esimerkiksi maakaasua, propaania, dieseliä ja kerosiinia. Myös uusiutuvan energian tuottaminen on mikroturbiinilla mahdollista, kun käytetään polttoaineeksi biokaasua kuten kaatopaikkakaasua tai jätevedenpuhdistamoilta kerättyä kaasua. (Soares 2007, xxvii.)

### **3.2.1 Toimintaperiaate**

Mikroturbiinit ovat pieniä kaasuturbiineita, jotka toimivat Brayton-kierrolla kuten suuremman kokoluokan kaasuturbiinit. Prosessissa kiertävä ilma paineistetaan, kuumentetaan ja laajennetaan. Ilma paineistetaan kompressorilla, minkä jälkeen sitä lämmitetään rekuperaattorissa. Lämmitetty ilma siirtyy poltettavaksi yhdessä polttoaineen kanssa. Palamisessa syntyvät kaasut laajenevat turbiinissa ja muuttavat lämpöenergian liike-energiaksi. Generaattori muuttaa tämän liike-energian sähköksi. Rekuperaattori hyödyntää turbiinista tulevan kuumen ilman kompressorilta polttimelle kulkevan ilman lämmittämiseen. Kuvassa 8 on esitettyä mikroturbiinin osat ja toimintaperiaate. (Soares 2007, 93-95.)



Kuva 8. Mikroturbiinin toimintaperiaatekaavio.

### 3.2.2 Käyttö- ja ylläpitovaatimukset

Suomessa kaatopaikkakaasua hyödyntäviä mikroturbiinilaitoksia toimittaa Sarlin Oy Ab. Sarlinin Energia & Ympäristö -osaston johtaja Kari Lammin mukaan Seutulan vanhalle kaatopaikalle voisi sopia kahden Capstone C65 -mikroturbiinin laitos. Samanlainen laitos otettiin käyttöön kaatopaikalla Lahdessa vuonna 2007. Taulukossa 1 on esitetty kyseisen mikroturbiinityypin teknisiä tietoja. (Lammi 2018.) Tyypillisenä käyttöikäenä mikroturbiinille voidaan pitää 15:ä vuotta (Takalo 2013, 11).

Taulukko 1. Capstone C65 –mikroturbiinin teknisiä tietoja.

Sähköteho [kW]	65
Sähköhyötysuhde [%]	29
Kuuman veden lämmöntalteenotto [kW]	74
Kokonaishyötysuhde, LHV [%]	62

Pirkanmaan jätehuolto Oy:n Tarastenjärven kaatopaikalla toimii biokaasupumppaamon ja mikroturbiinin yhdistelmälaitos (Pelto-Timperi 2016, 10). Laitoksen sähköntuottoteho on 1,0 MW ja lämmöntuottoteho 1,4 MW. Pienemmän kokoluokan kahden

turbiinin mikroturbiinilaitos on käynnistetty Lahdessa vuonna 2007 Päijät-Hämeen jätehuolto Oy:n Kujalan jätekeskuksella kaatopaikkakaasujen hyödyntämiseksi. Tämän laitos tuottaa sähköä 130 kW ja lämpöä 230 kW. Kujalan mikroturbiinilaitos näkyy kuvassa 9. (Lammi 2018.)



**Kuva 9.** Sarlinin mikroturbiinilaitos Lahdessa.

Pirkanmaan jätehuolto Oy:n käsittelypäällikkö Jarkko Jylhän mukaan mikroturbiinien käyttöönotto on sujunut helposti. Käyttöönoton on hoitanut kokonaisuudessaan turbiinien toimittaja Sarlin Oy. Kokonaistoimitukseen on sisältynyt kaikki kompressoriaseamista lähtien. Selvittelytyötä ja todistuksia on vaatinut vain valtakunnan verkkoon liittyminen. Tarvittavat huollot ja korjaukset on ulkoistettu pitkäaikaissopimuksella Sarlin Oy:lle. Isommille huolloille ei ole ollut tarvetta, mutta epäonnisen valmistusvirheen takia heti käytön alussa on tarvittu valmistajan toimenpiteitä. Turbiinien käyttö ja seuranta on ulkoistettu suurimmilta osin myös Sarlin Oy:lle, ja ne pystytään hoitamaan etänä. Vain normaalikäytöstä poikkeavat viat tulee käydä kuittaamassa paikan päällä. (Jylhä 2018.)

Kaatopaikkakaasun keräysmäärän ollessa  $150 \text{ Nm}^3/\text{h}$  ja kaasun metaanipitoisuuden ollessa n. 45 %, saadaan kaasumäärää vastaavaksi tehoksi 675 kW. Tämä on tasan se

määrä kaasua, minkä kolme mikroturbiinia tarvitsee polttoaineeksi. Kolmen C65-mikroturbiinin ja kahden kompressorin CHP-laitos on toiminnassa esimerkiksi Tampereen Raholan vedenpuhdistuslaitoksella. Laitoksen mikroturbiinit ja kompressorit näkyvät kuvassa 10. Raholan biokaasulaitos tuottaa noin 175 kW sähköä ja 340 kW lämpöä. (Ylivinkka 2018.)



**Kuva 10.** Sarlinin Capstone C65-mikroturbiineja ja samaan laitokseen kuuluvia kompressoreita.

### 3.3 ORC-prosessi

ORC-prosessilla voidaan tuottaa jollakin lämmönlähteellä, kuten teollisen prosessin hukkalämmöllä, sähköenergiaa. Se soveltuu hyvin hajautettuun ja pienen kokoluokan sähköntuotantoon. (Quoilin et al. 2013.) ORC-voimalat on kehitetty 1960-luvulla. Nykyään ORC-voimaloita käytetään moniin erilaisiin sovelluksiin eri teholuokissa. (Uusitalo 2015.)

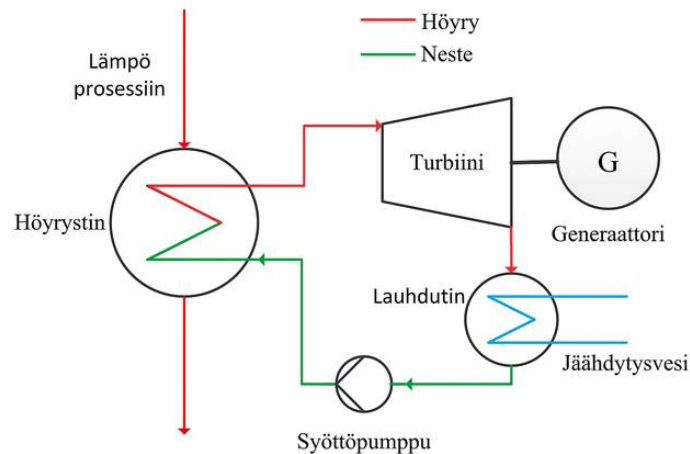
#### 3.3.1 Toimintaperiaate

ORC-prosessi toimii samalla periaatteella kuin höyryvoimaprozessi. Erona höyryvoimaprozessiin on prosessissa kiertävä aine, jolla on vettä alhaisempi höyrystymislämpötila. Näin ORC-prosessissa saadaan höyryn avulla pyöritettyä turbiinia ja tuotettua

sähköä alhaisemmalla lämmönlähteen lämpötilalla kuin höyryvoimaprosessissa. Monet uusiutuvan energian muodot sopivatkin tuottamaan ORC-prosessiin lämpöä, vaikka lämpötila ei riittäisi höyryvoimaprosessiin. (Quoilin et al. 2013, 169) ORC-prosessilla voidaan hyödyntää sähköksi muun muassa geotermistä lämpöä, biomassan polttamisesta saatavaa lämpöä sekä erilaisia hukkalämpövirtoja. Etenkin hukkalämmön hyödyntämisellä sähköksi on hyviä ympäristövaikutuksia, sillä prosessin energiatehokkuus paranee ja päästöt vähenevät. (Uusitalo 2015.)

ORC-prosessin kiertoaine voidaan valita prosessiin useista eri vaihtoehdoista. Usein kiertoaineena on jokin hiilivety, siloksaani eli piiöljy tai hiilifluoridi. ORC-prosessilla voidaan tuottaa sähköä prosessiin tuodusta lämpöenergiasta 5-20 %:n hyötysuhteella. Aurinkovoimalan avulla tuotetun lämmön hyödyntäminen ORC-prosessilla sekä pienen teholuokan sovellukset ovat vielä kehitysvaiheessa. On mahdollista, että vielä joskus ORC-prosessia hyödynnetään suurissa ajoneuvoissa paremman tehon ja energiatehokkuuden saavuttamiseksi. (Uusitalo 2015.) Tyypillinen käyttöikä ORC-laitteistoille on yli 20 vuotta (Takalo 2013, 11).

Kuvassa 11 näkyy ORC-prosessiin kuuluvat osat ja kiertoaineen kulku prosessissa. Prosessiin tuodaan ulkopuolelta lämpöä höyrystimelle, jossa kuumenemisen vuoksi kiertoaine höyrystyy ja liikkuu kaasuna turbiiniin. Turbiinissa kaasua, jonka paine on korkea, paisutetaan matalapaineiseksi. Syntyy mekaanista energiaa, jonka generaattori muuttaa sähköenergiaksi. Turbiinilta kaasumainen kiertoaine kulkee lauhduttimelle, jossa kiertoaineen lämpötila laskee, ja olomuoto palaa nestemäiseksi. Nesteeksi lauhduttunut kiertoaine pumpataan taas korkeapaineiseksi, ennen kuin se palaa höyrystimelle kuumennettavaksi. (Uusitalo 2015.)



**Kuva 11.** ORC-prosessi (Uusitalo 2015).

### 3.3.2 Käyttö- ja ylläpitovaatimukset

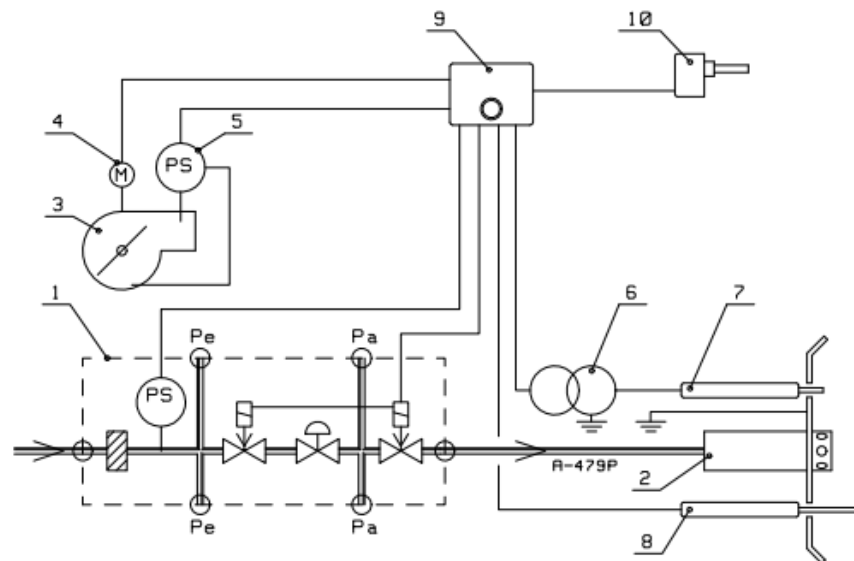
Suomessa ORC-tekniikalla sähköä tuottavia voimaloita myy Sarlin. Yksi Sarlinin ORC-sovellus on esimerkiksi jätevedenpuhdistamon kaasumootorin pakokaasuja hyödyntävä laitteisto. Lämmönlähde voi olla mikä vain, kunhan sen lämpötila on yli 350 °C. Kaatopaikkakaasuaakin voitaisiin siis käyttää polttoaineena ORC-prosessiin tuotavaksi lämmöksi. Kaasumootorilla lämmöntuotto ei Seutulän kaasun vähäisellä metaanipitoisuudella onnistu, mutta kaatopaikkakaasua voitaisiin käyttää ORC-prosessin lämmönlähteenä polttamalla sitä kattilassa. Pienen teholuokan ORC-laitteistoja ei kuitenkaan ole vielä laajasti markkinoilla. Sarlinilla ei energia- ja ympäristöosastonjohtaja Kari Lammin mukaan ole valikoimissa Seutulän kaatopaikan kokoluokkaan ORC-kattila-yhdistelmää (Lammi 2018).

## 3.4 Lämpökattila

Yksi tapa hyödyntää Seutulässä muodostuvia kaatopaikkakaasuja olisi pelkän lämmön tuottaminen. Polttamalla kaatopaikkakaasua kattilassa kaasupolttimella, voidaan kaasu hyödyntää lämpöenergiaksi. Ylipäätään kaasulla toimivia polttojärjestelmiä voidaan käyttää esimerkiksi voimalaitoksissa, teollisuudessa ja kiinteistöjen tai suurempien alueiden lämmityksessä (Oilon 2018b).

### 3.4.1 Toimintaperiaate

Lämpökattilan toimintaperiaate on yksinkertainen. Kattilassa kaasua tai muuta polttoainetta poltetaan polttimella, jolloin polttoaineen sisältämä lämpöenergia siirtyy prosessissa kiertävään väliaineeseen. Väliaineena käytetään tavallisesti vettä, jota kuljetetaan putkistoilla lämmitettävään tilaan sen kuumentamisen jälkeen. Kuvassa 12 näkyy kaasupolttimen osat ja toimintaperiaate. Kun kaasupolttimen moottori käynnistyy, syntyy sytytyskärjen ja liekkilevyn väliin valokaari. Kaasuventtiiliosan venttiilit avautuvat, ja kaasu pääsee purkautumaan suuttimesta. Valokaari sytyttää kaasun, ja liekki jää palamaan, kun ohjelmarele katkaisee valokaaren. Ohjelmarele on polttimen osa, jonka tarkoitus on ohjata ja valvoa polttimen toimintaa. Rele on sähköisesti kytketty polttimeen, ja se keskeyttää polttimen toiminnan, jos siinä esiintyy häiriöitä. Poltin pysyy toimimattomana siihen saakka, että häiriö kuitataan korjatuksi. (Oilon 2018a.)



- |                                                                                                                          |                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1 Kaasuventtiili<br>- suodatin<br>- kaasunpainekeytkin<br>- kaasuventtiili 1, virrattomana kiinni, NC<br>- paineensäädin | 4 Polttimen moottori                           |
| 2 Kaasusuutin<br>- kaasuventtiili 2, virrattomana kiinni, NC                                                             | 5 Ilmanpaine-erokytkin                         |
| 3 Polttimen puhallin                                                                                                     | 6 Sytytysmuuntaja                              |
|                                                                                                                          | 7 Sytytyskärki                                 |
|                                                                                                                          | 8 Liekinvalvontaelektrodi                      |
|                                                                                                                          | 9 Ohjelmarele                                  |
|                                                                                                                          | 10 Ohjauslaite<br>(termostaatti/pressostaatti) |

Kuva 12. Kaasupolttimen toimintaperiaate

### 3.4.2 Käyttö- ja ylläpitovaatimukset

Suomessa kaasua polttoaineena käyttäviä polttimia- ja kattiloita valmistaa ja markkinoi esimerkiksi Oilon Oy. Oilonin Sales Manager Kari Puron mukaan Seutulän kaatopaikalle löytyy varmasti soveltuvat polttimet ja lämpökattilat. Vastaavia kohteita ovat ainakin Kouvolan, Kuopion ja Suomenojan jätevedenpuhdistamot. Polttoainekaasun 31 %:n metaanipitoisuus on kuitenkin todennäköisesti sellaisenaan liian alhainen lämpökattilaan. Kaatopaikkakaasun ohelle tarvitaan luultavasti myös tueksi jotain muuta polttoainetta, jotta sitä voitaisiin hyödyntää lämmöksi. Kaatopaikkakaasun koostumus täytyy selvittää laajasti kaasuanalyysillä, jotta voidaan varmasti arvioida tukipolton tarve. Lisäksi sopivan polttimen valintaa varten täytyy arvioida tehontarve. (Puro 2018.)

Lämmityskattiloiden tekninen käyttöikä vaihtelee yleensä 20:n ja 25:n vuoden välillä. Kattilan vaihto on ajankohtaista, jos siihen syntyy ajan kuluessa vaurioita. Joskus myös vaihdetaan lämmityskattila uuteen korkeamman hyötysuhteen ja paremman taloudellisuuden saavuttamiseksi. Polttimen käyttöikä on lyhyempi, ja sitä kuuluu myös huoltaa tasaisin väliajoin. (Lämmitysenergiayhdistys 2018.) Oilonin teollisuudessa käytettäviin poltinvaihtoehtoihin on saatavilla polttimeen yhdistetty ohjausautomaatiotekniikka tai erillinen ohjauskeskus, mikä mahdollistaa sen etäkäytön. Tuotantokustusten ja käynnistymisen häiriöiden ehkäisemiseksi suositellaan polttimen vuosittaista huoltoa. (Oilon 2018b.)



## **4 TUTKIMUSMENETELMÄT JA TUTKIMUKSEN KOHDE**

Tutkimusmenetelminä tässä työssä on käytetty erilaisia tiedonhankinnan kanavia, lähteitä ja laskentakaavoja. Laskemalla on selvitetty tutkittavien hyödyntämistekniikoiden takaisinmaksuajat, hyötykäyttöön saatava energia ja päästöjen väheneminen korvaamalla uusiutumaton energia.

### **4.1 Tiedonhankinta**

Tässä diplomityössä tiedonhankintaan on käytetty kirjallisuuslähteitä, sähköpostikeskusteluja yritysten edustajien kanssa, yritysten Internet-sivuja ja HSY:llä työskentelevien asiantuntijoiden kanssa käytyjä keskusteluja. Kirjallisuuslähteinä on käytetty kirjoja, lehtiartikkeleita, erilaisia selvityksiä, julkaisuja ja esitteitä sekä verkkodokumentteja. Kirjallisuuslähteistä on haettu tietoa työn taustojen selvittämiseen ja kaatopaikkakaasuun sekä tutkittavien hyödyntämismenetelmien perustietoihin liittyvien asioiden tutkimiseen. Hyödyntämistekniikoiden valmistajien Internet-sivuilla on haettu tietoa laitteistoista ja mahdollisista referenssikohteista.

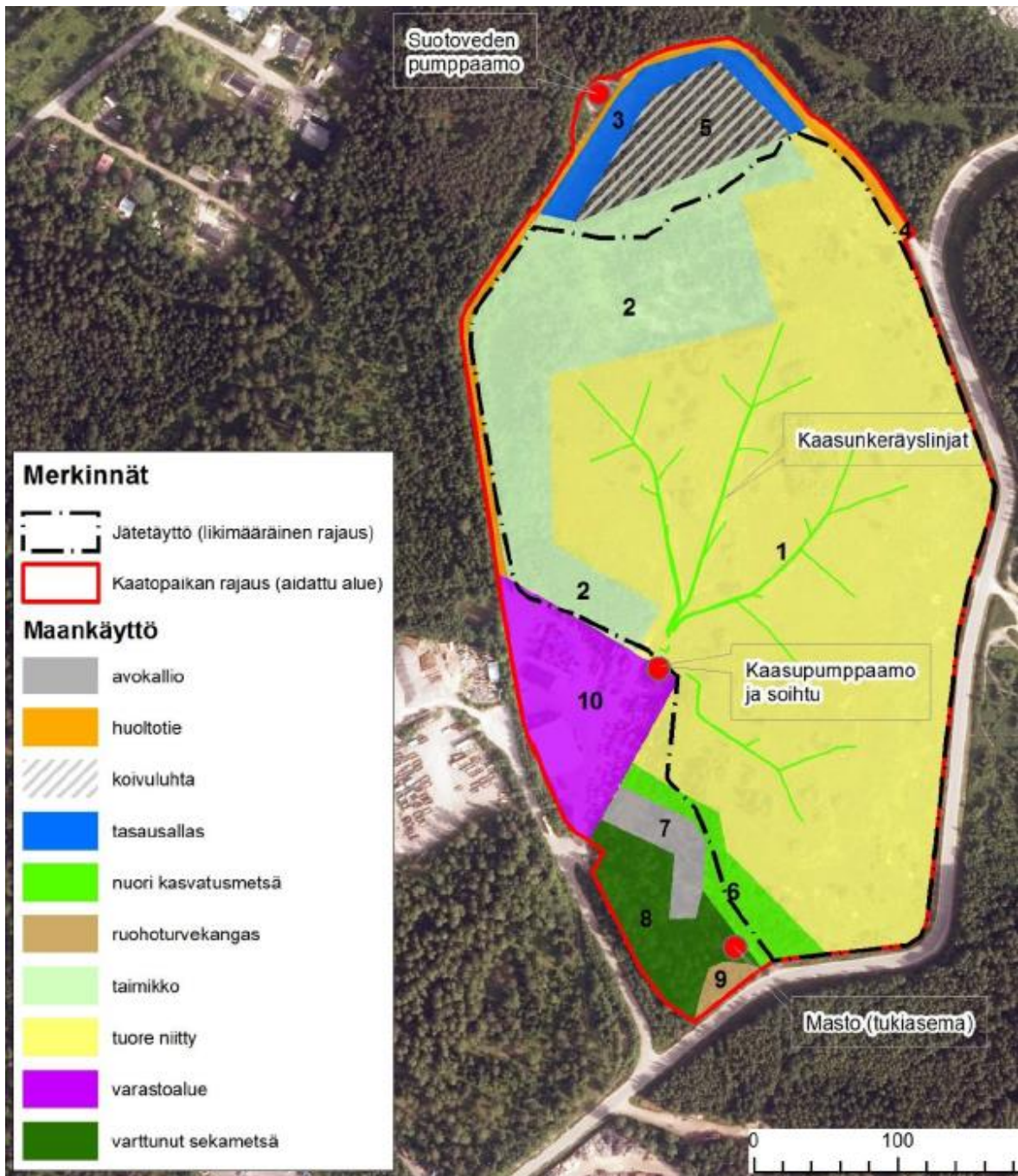
Sähköpostikeskusteluja on käyty hyödyntämistekniikoiden lisätietojen saamiseksi. Sähköpostitiedusteluja on lähetetty tutkittavia tekniikoita valmistaville yrityksille koskien kustannusarvioita, kaatopaikkakaasun soveltuvuutta kyseenomaiseen tekniikkaan ja mahdollisia muita vastaavia olemassa olevia referenssikohteita. Sähköpostitse on myös otettu yhteyttä tekniikoita käyttöön ottaneiden yritysten edustajiin. Heiltä on tiedusteltu kokemuksia tekniikoiden käytöstä, käyttöönotosta, huollontarpeesta, kustannuksista ja etäkäytön mahdollisuuksista.

HSY:ltä on saatu tietoa etenkin koskien Seutulan kaatopaikkaa. HSY:n henkilöstön kanssa käydyistä keskusteluista on saatu selville asioita ainakin Seutulan kaatopaikkakaasun hyödyntämisestä ennen pelkkään soih tupolttoon siirtymistä, aiemmin tehdystä kaasun hyödyntämiseen liittyvästä energiatukihakemuksesta ja myös mahdollisesta lämpöenergian hyötykäyttökohteesta Seutulan alueella. HSY:n sisäisesti on myös jaettu materiaaliksi tätä työtä varten selvityksiä ja vanhoja sähköpostikeskusteluja.

HSY:n puolesta on myös tilattu Saksasta kaatopaikkakaasujen kaasuanalyysi, jonka tulokset eivät ole saapuneet diplomityön teon aikana, mutta ne kannattaa ottaa myöhemmin huomioon, sillä ne vaikuttavat ainakin mikroturbiinin ja lämpökattilan kustannuksiin mahdollisen kaasun puhdistustarpeen takia.

## **4.2 Seutulän vanhan kaatopaikan kaasut**

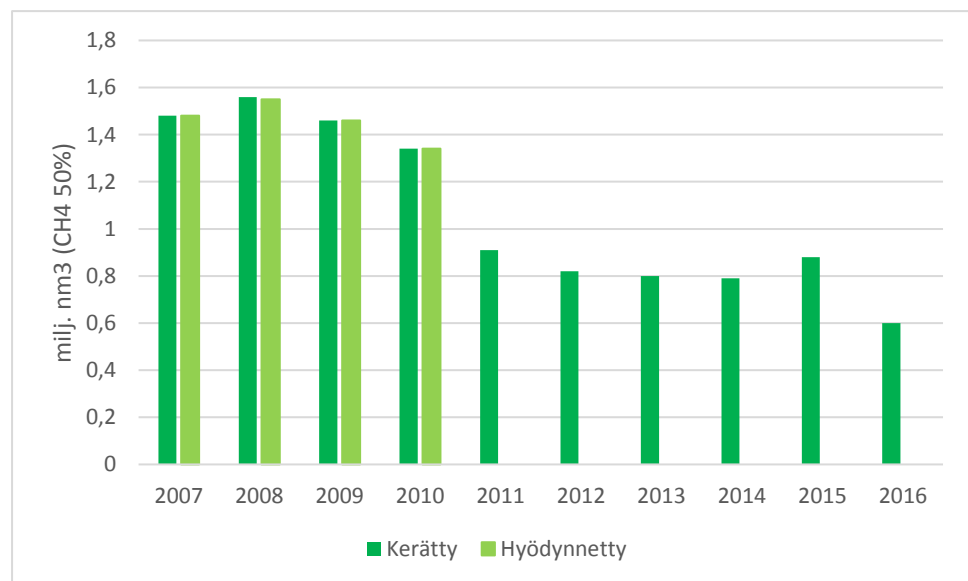
Kaasunkeräysjärjestelmä on rakennettu Seutulän kaatopaikalle vuonna 1993. Samana vuonna valmistuivat myös pumppaamo ja soihtupoltin. Alueella on 20 kaasunkeräyskaivoa, joista kaasu kuljetetaan pumppaamolle neljää päälinjaa pitkin. Kuvassa 13 näkyy Seutulän kaatopaikan kaasunkeräysverkosto karttakuvana, ja kuvassa 14 kaasunkeräyskaivo. Pumppaamossa on erillinen sähkötila ja säätöventtiilihuone, ja sen vieressä sijaitsee soihtupoltin. Pumppaamoä valvotaan etäyhteydellä, mutta kerran kuussa saavutaan paikan päälle mittaamaan manuaalisesti kaivoista kaasun koostumuksen ja tuotantomäärän arvot. Pumppaamolla mitataan lisäksi jatkuvatoimisesti koko keräysverkoston kaasuntuotantoa. Vuoteen 2010 saakka kaatopaikkakaasu hyödynnettiin läheisellä Katriinan sairaalalla sähköksi ja lämmöksi. Kun sairaala liittyi kaukolämpöverkkoon, alettiin Seutulän kaatopaikkakaasuja polttaa soihdussa. (Itkonen 2007, 7-12.) Kuvassa 15 on esitetty Seutulässä vuosina 2007-2016 kerätyn ja hyödynnetyn kaatopaikkakaasun määrä (HSY 2016, 32).



Kuva 13. Seutulan kaatopaikan kaasunkeräysjärjestelmä kartalla.



**Kuva 14.** Seutulän kaatopaikan kaasunkeräyskaivo.



**Kuva 15.** Seutulassa vuosina 2007-2016 kerätty ja hyödynnetty kaatopaikkakaasu.

Muodostuvan kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus vaihtelee jatkuvasti, mutta kuvan 15 vuosittaiset kerätyt kaasumäärät on muutettu vastaamaan kaatopaikkakaasun 50 %:n metaanipitoisuutta, jotta niitä on helpompi vertailla keskenään. Kerätyn kaasun määrien avulla voidaan selvittää, paljonko energiaa kerätty kaasu sisältää. Käyttämällä

kaavaa 3 voidaan laskea kunakin vuonna kerätyn kaasun sisältämä energia. Esimerkiksi vuonna 2007 kerätty kaasu sisältää n. 7,4 GWh energiaa.

$$E = V * x_{CH_4} * LHV_{CH_4} \quad (3)$$

$E$  = kerätyn kaasun sisältämä energia [kWh]

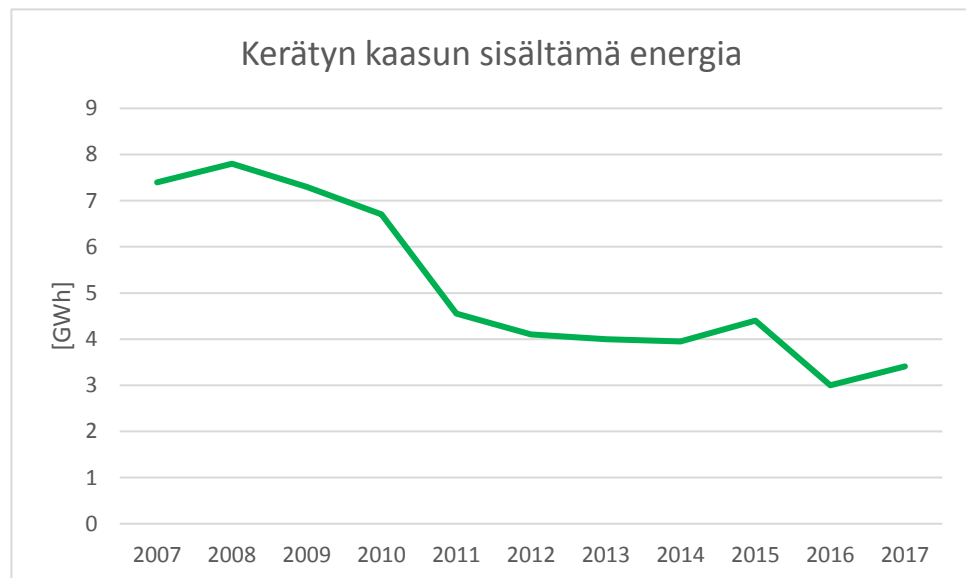
$V$  = kerätyn kaasun tilavuus [normaalikuutiometri,  $Nm^3$ ]

$x_{CH_4}$  = metaanipitoisuus

$LHV_{CH_4}$  = metaanin lämpöarvo [kWh/ $Nm^3$ ]

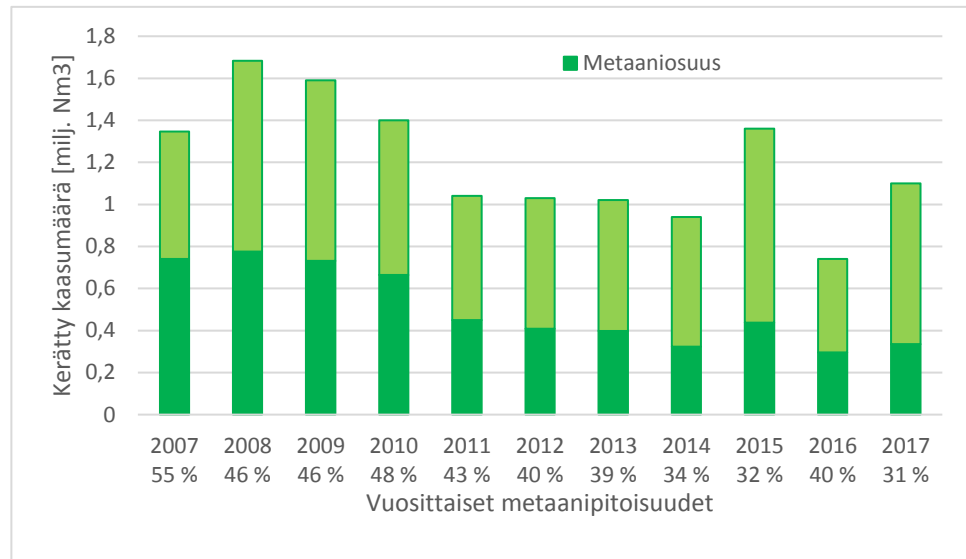
$$E_{2007} = 1,48 * 10^6 Nm^3 * 0,5 * 10 \frac{kWh}{Nm^3} = 7,4 * 10^6 kWh = 7,4 GWh$$

Vuonna 2017 Seutulan kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus oli 31 % ja kaasua saatiin kerättyä 1,1 milj.  $Nm^3$  (HSY jätehuolto 2017). Tämä vastaa 3,41 GWh:n energiamäärää. Vuosina 2007-2017 kerätyn kaatopaikkakaasun sisältämät energiamäärät on esitetty kuvassa 16.



**Kuva 16.** Kerätyn kaatopaikkakaasun sisältämä energia.

Kuvassa 17 on esitetty kerätyn kaatopaikkakaasun määrät vuosina 2007-2017 todellisella kunakin vuonna mitatulla metaanipitoisuudella. Kuvasta nähdään, että Seutulán kaatopaikalla sekä kaatopaikkakaasun määrä että kaasun metaanipitoisuus on laskenut viimeisen kymmenen vuoden aikana. (HSY jätehuolto 2017.)



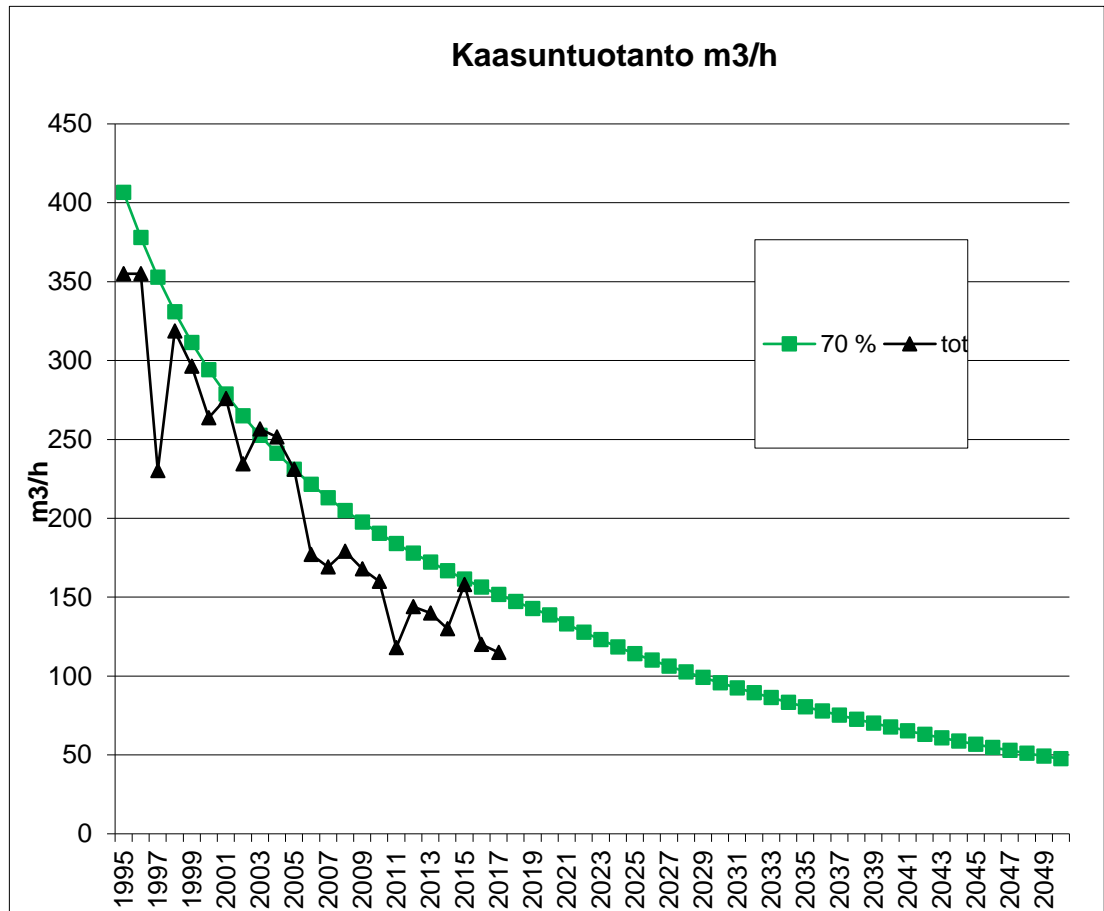
**Kuva 17.** Metaanin osuus kerätystä kaatopaikkakaasusta vuosina 2007-2017.

Liitteessä II on esimerkkimittauspöytäkirja 21.9.2016 kaasupumppaamolta mitatuista kaasukoostumuksista ja virtausmääristä. 31 %:n metaanipitoisuus on alhainen, ja se johtuu kaatopaikan iästä. Kaasun muodostuminen on hidastunut ajan myötä, ja jatkaa myös hidastumistaan tulevaisuudessa. Seutulán kaatopaikalle on tuotu yhdyskuntajätteen lisäksi myös rakennusjätettä, minkä takia Seutulassa biologisesti hajoavan jätteen osuus on pienempi kuin pelkkää yhdyskuntajätettä vastaanottaneilla kaatopaikoilla, ja täten kaasuntuotantokin on vähäisempää. Myös jätetäytön ikä vaikuttaa kaatopaikka-alueella metaanintuotannon hiipumiseen. Vuonna 2011 on tehty kaasunkeräysjärjestelmän saneeraus, jonka jälkeen kaasuntuotannon väheneminen on ollut lievempää kuin ennen saneerausta. Kaasuntuotanto vähenee muutaman prosentin vuodessa. Vuonna 2015 toteutunut kaasunkeräysmäärä tuntia kohden oli noin 158 m<sup>3</sup>/h. Toteutuneen kerätyn kaasumäärän ja Seutulán nykytilaselvityksessä arvioidun kaasun muodostumismäärän perusteella muodostuvasta kaatopaikkakaasusta saadaan keskimäärin kerättyä noin 65 %. Vuonna 2015 keräysteho on ollut 69 %. (Itkonen 2007, 28-46.)

Keväällä 2018 Seutulän kaatopaikkakaasuille tilattiin kaasuanalyysi, jonka tulokset näkyvät liitteessä I. Kaasuanalyysin tulokset ovat saapuneet juuri ennen tämän diplomityön palauttamista, eivätkä ne ehtineet vaikuttaa työn tuloksiin, mutta analyysi on työn jälkeenkin tarpeellinen HSY:n tehdessä päätöstä hyödyntämistekniikan valinnasta. Kaasun epäpuhtauksien pitoisuudet vaikuttavat sekä mikroturbiinin että lämpökattilan tapauksessa kaasun puhdistamisen tarpeeseen. Jos Seutulassa päädytään mikroturbiinin tai lämpökattilan käyttöön ottamiseen, on kaasun puhdistamisen tarpeellisuus olennainen tieto vaikuttaen sekä kustannuksiin että tekniikan käyttöön. Sarlin Oy Ab:n energiatekniikan tekninen tuki Pekka Öhman on kommentoinut Seutulän kaatopaikkakaasun epäpuhtauksien pitoisuuksien olevan matalia verrattuna Sarlinin mikroturbiinilaitoksissa nykyisin polttoaineena käytettäviin kaatopaikkakaasuihin. Siloksaani- ja rikkivetypitoisuudet ovat hyvin vähäiset, ja muitakin epäpuhtauksia on suunnilleen saman verran kuin puhtaimmissa käytetyissä kaatopaikkakaasuissa. (Öhman 2018.)

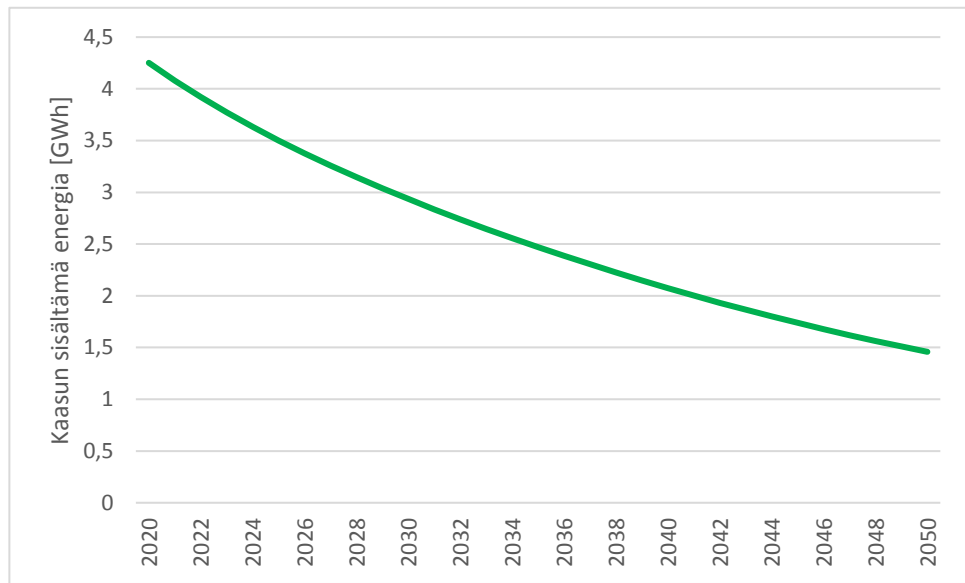
Kuvassa 18 on esitetty tuntia kohden toteutunut pumpattu kaatopaikkakaasun määrä vuosina 1995-2017 sekä ennustettu kaasun muodostumisen hidastuminen vuoteen 2050 asti. Näissäkin käyrissä tuotantomäärät vastaavat tuotantoa kaasulla, josta on 50 % metaania. Ennustekäyrä on laadittu Detes Nordic Oy:n tekemien päästömittausten ja FCG-suunnittelukeskuksen arvion perusteella, ja siinä on käytetty kaasunkeräykselle 70 %:n talteenottoastetta (Esterinen 2010, 3). 70 %:n talteenottoaste voisi olla todellisuudessakin mahdollinen, jos Seutulän kaasunkeräysjärjestelmää laajennettaisiin merkittävästi. 70 %:n kaasunkeräysasteen tuotantomäärän mukaan voidaan laskea potentiaalinen kerätystä kaasusta saatava energiamäärä. Esimerkiksi vuoden 2020 potentiaalinen kerättävä kaasuenergia olisi noin 4,3 GWh, jos saavutettaisiin 70 %:n kaasun talteenottoaste. Laskemisessa on käytetty metaanipitoisuutena 35 %, sillä säätämällä kaasun imua, voidaan kerätyn kaasun metaanipitoisuutta parantaa nykyisestä. Potentiaalinen kerättävä kaasuenergia vuoteen 2050 saakka kaasun 70 %:n talteenottoasteella on nähtävissä kuvasta 19.

$$E_{2020} = 138,7 \frac{m^3}{h} * 8760 h * 0,35 * 10 \frac{kWh}{m^3} = 4,25 * 10^6 kWh = 4,3 GWh$$



**Kuva 18.** Toteutunut kaasuntuotanto Seutulassa vuosina 1995-2013 ja suunnittelukeskuksen arvio 70 %:n talteenottoasteella 1995-2050.





**Kuva 19.** Potentiaalinen kerättävä kaasuenergia.

## 5 HYÖTYKÄYTTÖMAHDOLLISUUDET SEUTULAN ALUEELLA

Hyödyntämistekniikoiden teknisten ja taloudellisten ominaisuuksien lisäksi on hyvä kartoittaa Seutulassa toimivat mahdolliset sähkön tai lämmön hyötykäyttäjät. Taloudelliset ja päästöjä vähentävät vaikutukset toteutuvat vain, jos tuotettu sähkö ja/tai lämpö saadaan hyödynnettyä.

### 5.1 Laskenta

Lasketaan hyötykäyttöön saatavan energian määrät jokaisesta hyödyntämistekniikasta. Arvioidaan myös tekniikoiden kustannuksia, takaisinmaksuajat sekä kasvihuonekaasupäästöjen vähenemät.

#### 5.1.1 Hyötykäyttöön saatava energia

Polttoaineesta sähköä tuottavalla laitteella saatava sähköenergia voidaan laskea yhtälöllä 4. Käytetään Stirling-moottorin sähköhyötysuhteena Ylivinkan antamien hyötysuhdearvojen, 15-29 %, keskiarvoa 22 %. Vuonna 2017 Seutulasta kerätyn kaatopaikkakaasun energia määrä on ollut 3,41 GWh. Lasketaan ensin, paljonko Stirling-moottorilla saisi tuotettua sähköä, jos polttoaineen määrä ja metaanipitoisuus pysyisivät vuoden 2017 tasolla. Seutulasta teoriassa mahdollisen kerättävän kaatopaikkakaasun määrän sisältämä energia vuonna 2020 on 4,25 GWh. Lasketaan myös, paljonko tällä potentiaalisella kaasumäärällä voitaisiin tuottaa sähköä vuonna 2020.

$$E_{\text{sähkö}} = \eta_{\text{sähkö}} * E_{\text{polttoaine}} \quad (4)$$

$$E_{\text{sähkö}} = \text{sähköenergia [GWh]}$$

$$\eta_{\text{sähkö}} = \text{sähköntuotannon hyötysuhde}$$

$$E_{\text{polttoaine}} = \text{polttoaineen sisältämä energia [GWh]}$$

$$E_{sähkö,2017} = 0,22 * 3,41 \text{ GWh} = 750 \text{ MWh}$$

$$E_{sähkö,2020} = 0,22 * 4,25 \text{ GWh} = 940 \text{ MWh}$$

Jos Stirling-moottorin kokonaishyötysuhde on 75 %, saadaan lämmöntuoton hyötysuhteeksi suunnilleen 53 %. Yhtälöllä 5 voidaan laskea sähkön ja lämmön yhteistuotannossa saatava lämpöenergia.

$$E_{lämpö} = \eta_{lämpö} * E_{polttoaine} \quad (5)$$

$$E_{lämpö} = \text{lämpöenergia [GWh]}$$

$$\eta_{lämpö} = \text{lämmöntuotannon hyötysuhde}$$

$$E_{polttoaine} = \text{polttoaineen sisältämä energia [GWh]}$$

$$E_{lämpö,2017} = 0,53 * 3,41 \text{ GWh} = 1,8 \text{ GWh}$$

$$E_{lämpö,2020} = 0,53 * 4,25 \text{ GWh} = 2,3 \text{ GWh}$$

Lasketaan myös mikroturbiinille hyötykäyttöön saatavat sähkö- ja lämpöenergia käyttäen yhtälöitä 4 ja 5. Mikroturbiinin sähköhyötysuhde on 29 %, ja kokonaishyötysuhteen ollessa 62 %, on lämmöntuoton hyötysuhde noin 33 %.

$$E_{sähkö,2017} = 0,29 * 3,41 \text{ GWh} = 990 \text{ MWh}$$

$$E_{sähkö,2020} = 0,29 * 4,25 \text{ GWh} = 1,2 \text{ GWh}$$

$$E_{\text{lämpö},2017} = 0,33 * 3,41 \text{ GWh} = 1,1 \text{ GWh}$$

$$E_{\text{lämpö},2020} = 0,33 * 4,25 \text{ GWh} = 1,4 \text{ GWh}$$

Alankomaissa toimivan ORC-laitteita valmistaa Triogen. Sen ORC-tekniikkasovel-  
luksiin kuuluvat esimerkiksi ORC yhdistettynä kaasumoottoriin, biokaasuvoimalaan  
tai polttimeen. Yrityksen perustajan ja neuvonantajan, Jos van Buijtenenin, mukaan  
Triogeninkaan laitteistoista ei löydy tälle kokoluokalle sopivaa ORC-laitteistoa. Buij-  
tenin mukaan Seutulan kaatopaikan vuoden 2017 kerätyn kaasun määrällä 1,1 milj.  
 $\text{Nm}^3$  ja kaasun metaanipitoisuudella 31 % saatava lämpöteho, noin 400 kW, ei ole  
tarpeeksi korkea ORC-laitteistolla hyödynnettäväksi, vaan tarvittaisiin yli kaksinker-  
tainen lämpötehon arvo. (Buijtenen 2018.)

$$E_{\text{lämpö},2017} = 1,1 * 10^6 \text{ Nm}^3 * 0,31 * 35,9 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3} = 12\,241\,900 \text{ MJ}$$

$$\approx 12,24 * 10^6 \text{ MJ}$$

$$\frac{12,24 * 10^6 \text{ MJ} / 8760 \text{ h}}{3,6} \approx 390 \text{ kW}$$

Vuonna 2017 tuotettu lämpöenergia on laskettu kaavalla 3. Jos Seutulan kaasunke-  
räysverkostoa laajennettaisiin ja säädettäisiin imua metaanipitoisuuden nostamiseksi,  
voitaisiin kerätystä kaasusta saatavaa lämpötehoa parantaa. Vuonna 2020 potentiaali-  
nen kaatopaikkakaasusta saatava lämpöteho olisi noin 690 kW, joka on joka tapauk-  
sessa alle sen, mitä Triogenin ORC-laitteisto vaatisi.

$$E_{\text{lämpö},2020} = 138,7 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} * 8760 \text{ h} * 0,5 * 35,9 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3} = 21\,809\,465,4 \text{ MJ}$$

$$\approx 21,81 * 10^6 \text{ MJ}$$

$$\frac{21,81 * 10^6 \text{ MJ} / 8760 \text{ h}}{3,6} \approx 690 \text{ kW}$$

Voidaan siis havaita, ettei Seutulän kaatopaikan kokoisella kohteella ja sieltä kerättävän kaasun pienellä metaanipitoisuudella löydy vielä markkinoilta sopivaa ORC-tekniikkaa. ORC-laitteistojen kustannukset ja tarkemmat tekniset tiedot voidaan nyt jättää selvittämättä, kun tutkittavaan kohteeseen ei ole olemassa soveltuvaa laitteistoa.

Tyypillinen hyötysuhde tavanomaiselle lämmityskattilalle, jossa polttoaineena käytetään kaasua, on noin 87 % (Motiva 2010). Hyötykäyttöön saatava lämpöenergia lasketaan vastaavasti hyötysuhteen avulla kuten hyödynnettävän sähköenergian laskennassa. Käytetään polttoaineen sisältämän energian arvoina jälleen vuoden 2017 arvoa 3,41 GWh ja arvoa 6,07 GWh, joka on Seutulän kaatopaikalta potentiaalisesti kerättävän kaatopaikkakaasun sisältämä energia vuonna 2020. Käyttämällä kaavaa 5, selviää hyötykäyttöön saatavan lämpöenergian määräksi vuoden 2020 potentiaalisella kaasumäärällä 3,7 GWh. Jos kaasumäärät pysyvät vuoden 2017 tasolla, jää saatava lämpöenergia hieman matalammaksi (3,0 GWh).

$$E_{\text{lämpö},2017} = 0,87 * 3,41 \text{ GWh} \approx 3,0 \text{ GWh}$$

$$E_{\text{lämpö},2020} = 0,87 * 4,25 \text{ GWh} \approx 3,7 \text{ GWh}$$

### 5.1.2 Kustannukset

Qaloviksen mukaan Stirling-moottoreissa ylläpitokustannukset jäävät vähäisiksi, sillä niissä on muihin moottorityyppisiin verrattuna vähän liikkuvia osia, eli myös vaihdettavia varaosia on vähemmän. Moottorin osat eivät myöskään ole suoraan yhteydessä polttoprosessiin, minkä ansiosta osat kestävät pitkään. (Qalovis 2018.) Qaloviksen Flexgen Stirling-moottorille ei ole erikseen arvioitu budjettihintaa, mutta Doranovan Timo Ylivinkka arvioi Stirling-moottorien hinnaksi noin 2000 €/kW. Tämän lisäksi voidaan arvioida käyttö- ja kunnossapitokustannuksia 0,015 €/kWh (Takalo 2013, 11). 940 MWh:n sähköntuotannolla kustannukset olisivat noin 14 000 €. Kaavan 6 mukaan sähköenergia on yhtä suuri kuin sähköteho kerrottuna laitteen käyttöajalla. Tiedetään, että vuoden 2017 kaasun ominaisuuksilla sähköntuotanto Stirling-moottoreilla olisi 750 MWh. Sähkötehoksi tulisi silloin 86 kW, ja Stirling-moottoreiden hinnaksi 170 000 €. Potentiaalinen sähköntuotanto Stirling-moottoreilla vuonna 2020 on 940 MWh. Sähköteho on siis 110 kW, joten Stirling-moottoreiden hinnaksi tulisi noin 210 000 euroa.

$$E_{\text{sähkö}} = P_{\text{sähkö}} t \quad (6)$$

$$P_{\text{sähkö}} = \text{sähköteho [kW]}$$

$$t = \text{laitteen käyttöaika [h]}$$

$$P_{\text{sähkö},2017} = \frac{E_{\text{sähkö},2017}}{t} = \frac{750\,200 \text{ kWh}}{8760 \text{ h}} \approx 86 \text{ kW}$$

$$2\,000 \frac{\text{€}}{\text{kW}} * 85,64 \text{ kW} = 171\,279 \text{ €} \approx 170\,000 \text{ €}$$

$$P_{\text{sähkö},2020} = \frac{E_{\text{sähkö},2020}}{t} = \frac{940\,000 \text{ kWh}}{8760 \text{ h}} = 110 \text{ kW}$$

$$2\,000 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 107,3 \text{ kW} = 214\,611,9 \text{ €} \approx 210\,000 \text{ €}$$

Kolmen mikroturbiinin biokaasulaitoksen investointikustannus on arviolta 600 000 €. Huoltokustannukset sisältäen biokaasupumppaamon ovat noin 20.000 € vuodessa. Yleensä kaasu pitää puhdistaa aktiivihiilellä ennen sen käyttöä polttoaineena mikroturbiineissa, joten näihin kustannuksiin tulee luultavasti lisäksi kaasunpuhdistuksen aiheuttamat kustannukset. Tieto kaasunpuhdistuksen tarpeesta selviää, kun kaasun koostumukset tarkat tiedot ovat selvillä. (Valovirta 2018.)

Lämpökattilan ja polttimon hintaan ei ole saatu arviota Oilonilta puutteellisten kaasun ominaisuustietojen vuoksi. Kustannuksista voidaan saada arvio, kun tiedetään, millainen poltintyyppi kohteelle sopii, ja tarvitaanko ohelle tukipoltoa. Oikeanlaisen polttimen valintaa ja tukipolton tarpeen arviointia varten Oilonille tulisi toimittaa Seutulan kaatopaikkakaasusta tehdyn kaasuanalyysin tulokset. Kattila- ja polttimoinvestointien lisäksi kustannuksia voi syntyä mahdollisesta kaasunkäsittely tai -puhdistusjärjestelmästä.

Arvioituina investointikustannuksina yli 101-250 kW:n kaasukattiloille Suomessa voidaan pitää 110 €/kW (Fleiter, T et al. 2016, 12). Tämän perusteella vuoden 2020 potentiaalisella kaasunkeräysmäärällä lasketun tehon 110 kW mukaan investointikustannus olisi n. 12 000 €

$$110 \frac{\text{€}}{\text{kW}} * 110 \text{ kW} \approx 12\,000 \text{ €}$$

### 5.1.3 Takaisinmaksuaika

Stirling-moottorin tai mikroturbiinin tuottamalla sähköenergialla tai lämpökattilasta saatavalla lämpöenergialla voidaan korvata fossiilisilla energialähteillä tuotettua energiaa. Kaavalla 7 voidaan laskea kaatopaikkakaasua hyödyntämällä tuotetulla energialla saavutetut säästöt (Sirén 2015,15). Laskuissa oletetaan, että kaikki sähkö ja lämpö

saataisiin hyödynnettyä omaan käyttöön. Sähkön hintana käytetään vuoden 2017 sähkön hintaa keskiuurelle teollisuudelle 0,08 €/kWh, ja lämmön hintana käytetään tammikuulta 2018 kaukolämmön kuluttajahintaa 78,64 €/MWh (Tilastokeskus 2018). Säästöt lasketaan käyttäen energiantuottomääriä, jotka vastaavat potentiaalisia kaasumääriä.

$$A = E * h \quad (7)$$

$$A = \text{Tuotot } [€/a]$$

$$E = \text{Vuositainen tuotettu energia } [kWh/a]$$

$$h = \text{korvattavan sähkön/lämmön hinta } [€/kWh]$$

$$A_{\text{Stirling},2020} = E_{\text{sähkö},2020} * h_{\text{sähkö}} = 940\,000 \frac{kWh}{a} * 0,08 \frac{€}{kWh} = 75\,000 \frac{€}{a}$$

$$\begin{aligned} A_{\text{Mikroturbiini},2020} &= E_{\text{sähkö},2020} * h_{\text{sähkö}} = 1\,200\,000 \frac{kWh}{a} * 0,08 \frac{€}{kWh} \\ &= 96\,000 \frac{€}{a} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{\text{Lämpökattila},2020} &= E_{\text{lämpö},2020} * h_{\text{lämpö}} = 3\,700 \frac{MWh}{a} * 78,64 \frac{€}{MWh} \\ &= 290\,968 \frac{€}{a} \approx 290\,000 \frac{€}{a} \end{aligned}$$

Vertailun vuoksi lasketaan myös Stirling-moottorin ja lämpökattilan osalta syntyvät säästöt, jos kaasunkeräys pysyisikin vuoden 2017 tasolla.

$$A_{\text{Stirling},2017} = E_{\text{sähkö},2017} * h_{\text{sähkö}} = 750\,200 \frac{kWh}{a} * 0,08 \frac{€}{kWh} = 60\,000 \frac{€}{a}$$

$$A_{\text{Mikroturbiini},2017} = E_{\text{sähkö},2017} * h_{\text{sähkö}} = 990\,000 \frac{kWh}{a} * 0,08 \frac{€}{kWh} = 79\,200 \frac{€}{a}$$



$$\begin{aligned}
 A_{\text{Lämpökattila},2017} &= E_{\text{lämpö},2017} * h_{\text{lämpö}} = 2\,970 \frac{\text{MWh}}{a} * 78,64 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \\
 &= 233\,560,8 \frac{\text{€}}{a} \approx 230\,000 \frac{\text{€}}{a}
 \end{aligned}$$

Takaisinmaksuaika kuvaa sitä ajanjaksoa, jonka aikana hankinnasta saadut tuotot ylittävät alkuinvestoinnin. Takaisinmaksuaika voidaan laskea useilla eri menetelmillä, mutta yksinkertaisimmin se lasketaan kaavalla 8 alussa tehdyn investoinnin ja hankkeen vuosittaisten tuottojen mukaan. Tavallisesti takaisinmaksuaika on kahdesta kymmeneen vuotta. Oletetaan tässä laskennassa, että kaikki kaatopaikkakaasusta tuotettu energia saadaan hyödynnettyä omaan käyttöön. Laskennassa käytetään nettotuottoa, eli saaduista säästöistä vähennetään käyttö- ja huoltokustannukset sekä sähköntuotannon kustannukset. Takaisinmaksuaika pelkälle lämmön tuotannolle on tiedossa olevilla arvioilla kustannuksista ja lämmön tuotosta alle yhden vuoden. Tämä kuitenkin pitäisi paikkaansa vain, jos kaikki tuotettu lämpö saataisiin hyödynnettyä HSY:n omassa toiminnassa. (Sirén 2015, 11, 15.)

$$N = \frac{I}{A_{\text{netto}}} \quad (8)$$

N = Takaisinmaksuaika [a]

I = Investointi [€]

$$N_{\text{stirling},2020} = \frac{210\,000 \text{ €}}{(75\,000 \frac{\text{€}}{a} - 940\,000 \frac{\text{kWh}}{a} * 0,015 \frac{\text{€}}{\text{kWh}})} \approx 3,5 a$$

$$N_{\text{stirling},2017} = \frac{171\,300 \text{ €}}{(60\,000 \frac{\text{€}}{a} - 750\,000 \text{ kWh} * 0,015 \frac{\text{€}}{\text{kWh}})} \approx 3,6 a$$

$$N_{\text{mikroturbiini},2020} = \frac{600\,000 \text{ €}}{(96\,000 - 20\,000) \frac{\text{€}}{a}} \approx 7,9 a$$

$$N_{\text{mikroturbiini},2017} = \frac{600\,000 \text{ €}}{(79\,000 - 20\,000) \frac{\text{€}}{a}} \approx 10 a$$

$$N_{\text{lämpökattila},2020} = \frac{12\,000 \text{ €}}{290\,000 \frac{\text{€}}{a}} < 1$$

Uusiutuvan energian investoinneille voidaan hakea energiatukea. Tukea myönnetään energiahankkeille, jotka edistävät uusiutuvan energian tuotantoa tai käyttöä, niiden tehostamista, energiansäästöä tai energiajärjestelmän vähähiiliseksi muuttamista. Yhdeksi uusiutuvan energiankäyttöön liittyväksi tuettavaksi investointihankkeeksi on mainittu pienet sähkön- ja lämmöntuotantohankkeet. Ainakin siis Stirling-moottorille ja mikroturbiinille voitaisiin tämän puolesta hakea tukea. (TEM 2018.) Ylitarkastaja Pekka Grönlund työ- ja elinkeinoministeriöstä on kertonut, että myös pelkän lämmön hyödyntämiselle on mahdollista saada jonkin verran tukea. Hän on myös maininnut, että takaisinmaksuajan (ilman tukea) ollessa alle viisi vuotta tai yli 15 vuotta, tukea ei lähtökohtaisesti myönnetä (Karhu 2018.)

Kaatopaikkakaasuhankkeille tyypillinen tukiprosentti on noin 15-20 %. Jos hankkeessa käytettävä teknologia on uutta, on tukiprosenttia mahdollista korottaa 5-10 prosenttiyksikköä. Suurimmat mahdolliset tukiprosentit ovat tavanomaiselle teknologialle 30 % ja uudelle 40 %, mutta sellaisia tukiprosentteja myönnetään todella harvoin. (Grönlund 2018.) Mikroturbiinin takaisinmaksuaika osuu välille 5-15 a, joten voidaan laskea mikä sen takaisinmaksuajaksi tulisi, jos se saisi energiatukea 20 %:lla investointihinnasta.

$$N_{\text{tuettu}} = (1 - 0,2) * N_{\text{mikroturbiini}} = 0,8 * 7,9 a \approx 6,3 a$$

#### 5.1.4 Kasvihuonekaasupäästövähennemä

Kun tuotetaan kaatopaikkakaasusta energiaa, voidaan sillä korvata fossiilisilla lähteillä tuotettua, mikä vähentää kustannusten lisäksi myös kasvihuonekaasupäästöjä ilmaan.

Kaatopaikkakaasun polttaminen soihdussa ei tuota juurikaan enempää päästöjä kuin sen polttaminen energiantuotannossa. Vaikutukset ympäristöön ovat kuitenkin positiiviset, sillä uusiutumattoman energian tuotantoa voidaan korvata, jolloin energian tuotannon päästöt vähenevät. Kasvihuonekaasupäästövähennemä muun energiantuotannon korvaamisessa lasketaan yhtälöllä 9. Käytetään ominaishiilidioksidipäästöjen arvoina vuonna 2016 laskettuja kymmenen edeltävän vuoden keskiarvoja. Ominishiilidioksidipäästökerroin on siten 170 g<sub>CO2</sub>/kWh sähkön tuotannolle ja 242 g<sub>CO2</sub>/kWh kaukolämmölle. (Tilastokeskus 2016.) Tuotetun energian arvoina käytetään nyt potentiaalisia vuodelle 2020 laskettuja arvoja.

$$KHKväh = E * ominaisCO_2 \quad (9)$$

KHKväh = Kasvihuonekaasupäästöjen vuosittainen  
vähennemä [g<sub>CO2</sub>/a]

ominaisCO<sub>2</sub> = Ominishiilidioksidipäästökerroin [g<sub>CO2</sub>/kWh]

$$\begin{aligned} KHKväh (stirling) &= 940\,000 \frac{kWh}{a} * 170 \frac{g_{CO_2}}{kWh} + 2\,300\,000 \frac{kWh}{a} * 242 \frac{g_{CO_2}}{kWh} \\ &= 720 \frac{t_{CO_2}}{a} \end{aligned}$$

KHKväh (mikroturbiini)

$$\begin{aligned} &= 1\,200\,000 \frac{kWh}{a} * 170 \frac{g_{CO_2}}{kWh} + 1\,400\,000 \frac{kWh}{a} * 242 \frac{g_{CO_2}}{kWh} \\ &= 540 \frac{t_{CO_2}}{a} \end{aligned}$$

$$KHKväh (lämpökattila) = 3\,700\,000 \frac{kWh}{a} * 242 \frac{g_{CO_2}}{kWh} = 900 \frac{t_{CO_2}}{a}$$

## 5.2 Mahdolliset hyötykäyttäjät

Seutulan kaatopaikkakaasujen energiahyötykäyttöä on selvitetty vuonna 2014. Tällöin haasteena on ollut lämmön vieminen HSY:n ulkopuolisille käyttäjille, joilla ei ole tunnut olevan kiinnostusta ostaa Seutulan kaatopaikalla tuotettua lämpöä käyttöönsä. Yhtenä perusteluna tälle on ollut, ettei kaatopaikkakaasulla tuotetun lämmön ostaminen olisi ollut taloudellisesti kannattavaa. Mahdollisia HSY:n sisäisiä sähkön hyötykäyttäjiä alueella voisivat olla lähinnä pahvin vastaanoton toimistotilat ja varasto sekä kaatopaikan jätevesipumppaamo. HSY:n ulkopuolelta lähialueella toimii Katriinan sairaala ja Kuusakoski Oy:n vastaanottopiste. (Kopalainen 2017.) Alueelle on kuitenkin vähitellen tulossa enemmän HSY:n omia energiankäyttökohteita. Vuonna 2017 kaatopaikan viereiselle hakekentälle rakennettiin valaistusjärjestelmä, joka tarvitsee jonkin verran sähköä. Alueelle on myös suunniteltu jäteastioiden varasto- ja pesuhallin rakentamista, mutta muita rakennuksia Seutulaan ei ole nyt suunnitteilla. (Virmanen 2018.)

Seutulaan suunnitellaan siis hankittavan vuosina 2019-2020 HSY:n oma jätteenkeräysastioiden astiahalli. Astiahalliin kuuluisi eri jätejakeiden keräysastioiden huolto- ja pesutilat, varastointialue sekä työntekijöille tarkoitetut sosiaalitilat, joten sinne tarvittaisiin sekä sähköä että lämpöä. (HSY 2018.) Jos lämpöenergiaa saadaan hyötykäytettyä astiahallissa eli HSY:n omassa toiminnassa, on etuna varmuus lämmöntarpeen jatkuvuudesta.

Astiahallin kooksi voidaan arvioida 1400 m<sup>2</sup>. Tilan korkeus on noin 5 metriä, ja tilaa pidetään huoneenlämpöä viileämpänä 15 °C:n ja 20 °C:n välillä. Astiahalli tulee todennäköisesti myös sisältämään huoneenlämpöisiä (21 °C) sosiaalitiloja noin 100-150 m<sup>2</sup>. Hallin ja sosiaalitilojen lämmitys on ajankohtaista lähinnä talvikaudella. Sosiaalitiloissa ympärivuotisesti tarvitaan jonkin verran lämpöä käyttöveden lämmitykseen. Jos astiahallin pesuvettä lämmitettäisiin, saataisiin lisää ympärivuotista tarvetta lämmölle. Sähkön tarvetta on vielä haastavaa alkaa arvioimaan, kun ei ole tietoa, mitä kaikkea halli tulee sisältämään, mutta lämmön tarpeelle voidaan jo laskea alustavasti arviota. (Virmanen 2018.)

Rakennuksen lämmitysenergiankulutus voidaan laskea kaavalla 10. Asuinrakennusten lämmöntarveluku vaihtelee 12-20 W/m<sup>3</sup> välillä, ja tilavuudeksi voidaan arvioida noin kolme kertaa pinta-ala. Muilla rakennustyypeillä lämmöntarveluku vaihtelee välillä 5-30 W/m<sup>3</sup>. Huipunkäyttöaika on asuinrakennuksilla yleensä 1500-2500 tuntia ja muilla rakennuksilla 500-3000 tuntia. (Vantaan energia 2018.) Valitaan käytettäväksi huipunkäyttöajaksi sekä hallille että sosiaalityöille 1500 h. Sosiaalityö voi verrata asuinrakennukseen, joten käytetään sille lämmöntarpeen arvoa 15 W/ m<sup>3</sup>. Hallia ei tarvitse saada yhtä lämpimäksi, joten valitaan lämmöntarpeen arvoksi matalampi 8 W/ m<sup>3</sup>.

$$Q_{rak} \approx V * E_{tarv} * t_h \quad (10)$$

$Q_{rak}$  = Rakennuksen lämmitysenergiankulutus [Wh]

$V$  = Tilavuus [V/ m<sup>3</sup>]

$E_{tarv}$  = Lämmöntarve [W/m<sup>3</sup>]

$t_h$  = Huipunkäyttöaika [h]

$$Q_{halli} \approx 1400m^2 * 5m * 8 \frac{W}{m^3} * 1500 h = 84 MWh$$

$$Q_{sos.tilat} \approx 120m^2 * 3 * 15 \frac{W}{m^3} * 1500 h = 8,1 MWh$$

Käyttöveden lämmitykseen tarvittava energia voidaan laskea kaavalla 11, kun ei ole tiedossa mitattua arvoa lämpimän käyttöveden energiankulutuksesta. Toimistorakennuksen lämpimän veden kulutukseksi rakennuksen bruttoalaa kohden on arvioitu 100 dm<sup>3</sup>/brm<sup>2</sup>/a eli 0,1 m<sup>3</sup>/brm<sup>2</sup>/a. Kaavalla 12 lasketaan yhteen lämmitykseen ja käyttöveteen tarvittavat energiamäärät. Näillä oletuksilla voidaan arvioida, että Astiahalli tarvitsisi lämpöä 92,8 MWh. (Motiva 2018.)

$$Q_{lkv} = 58 \frac{kWh}{m^3} * V_{lkv} \quad (11)$$

$Q_{lkv}$  = Lämpimän käyttöveden lämmitysenergiankulutus [kWh/a]

$V_{lkv}$  = Lämpimän veden kulutus [ $m^3/a$ ]

$$Q_{lkv} = 58 \frac{kWh}{m^3} * \frac{0,1m^3}{brm^2} * 120brm^2 = 696 kWh/a$$

$$Q_{kok} = Q_{halli} + Q_{sos.tilat} + Q_{lkv} \quad (12)$$

$Q_{kok}$  = Kokonaisenergiankulutus [MWh]

$$Q_{kok} = (84\,000 + 8\,100 + 696) kWh \approx 92,8 MWh$$

### 5.3 Tulokset

Taulukossa 2 on kerätty yhteen Stirling-moottorin, mikroturbiinin ja lämpökattilan käyttöön ja käytettävyyteen liittyviä tietoja ja tunnuslukuja. ORC-prosessista ei ole selvitetty tarkempia teknisiä tietoja tai kustannuksia, sillä ORC-sovelluksia myyvien Sarlinin ja Triogenin mukaan Seutulan kaatopaikkakaasun määrä ja metaanipitoisuus eivät riitä vastaamaan ORC-laitteiston vaatimuksia. Taulukossa 3 vertaillaan kolmen tutkittavan hyödyntämismenetelmän kannattavuuteen ja ympäristövaikutuksiin liittyviä tietoja ja laskettuja arvoja.

Taulukko 2. Käytettävyyden vertailu.

	<b>Stirling-moottori</b>	<b>Mikroturbiini</b>	<b>Lämpökattila</b>
Etäkäyttö-mahdollisuus	Kyllä.	Kyllä.	Kyllä.
Kunnossapito	Voi tarvita paljon huoltoa.	Ei tarvetta isoille huolloille.	Suurten huoltojen ehkäiseminen säännöllisillä vuosihuolloilla.
Vaatimukset polttoaineelle	Ei vaatimuksia.	Kaasu mahdollisesti puhdistettava.	31 %:n metaanipitoisuus liian pieni riittääkseen ilman tuki-polttoa
Sähköntuoton hyötysuhde	15 %-29 %	29 %	-
Lämmöntuoton hyötysuhde	n. 53 %	n. 33 %	87 %
Kokonaishyötysuhde	< 80 %	62 %	87 %
Onko laitteita markkinoilla?	Tuote olemassa, mutta aktiivisesta markkinoinnista luovuttu. Qaloviksen Flexgen Stirling-moottori.	Kyllä. Esimerkiksi Sarlinin Capstone C65-mikroturbiinilaitos.	Kyllä. Esimerkiksi Oilonin poltin+kattila -laitos.
Onko laitevalmistajalla jo vastaavaa referenssikohdetta?	Ei.	Kyllä.	Kyllä.

Taulukko 3. Kannattavuustekijöiden vertailu.

	<b>Stirling-moottori</b>	<b>Mikroturbiini</b>	<b>Lämpökattila</b>
Investointi [€]	210 000	600 000	12 000
Käyttöikä [a]	15	15	20-25
Huoltokustannukset [€/a]	14 000	20 000	Vuosihuolto, hinta ei tiedossa.
Sähköntuotanto [MWh]	940	1 200	-
Lämmöntuotanto [GWh] (CHP)	2,3	1,4	3,7
Sähköntuotanto [GWh], jos kaasunke- räys säilyy 2017 ta- solla	0,75	0,99	-
Lämmöntuotanto [GWh], jos kaasunke- räys säilyy 2017 ta- solla	1,8	1,1	3,0
Oma tarve lämmölle [MWh]	92,8	92,8	92,8
Lämmön tarpeen osuus tuotetusta lämmöstä	0,04	0,07	0,03
Tuotot [€/a]	75 000	96 000	290 000
Tuotot [€/a], jos kaa- sunke- räys säilyy 2017 tasolla	60 000	79 000	230 000
Päästövähennykset [t <sub>CO2</sub> /a]	720	540	900
Takaisinmaksuaika [a], jos kaikki energia hyödynnetään (ilman tukea)	3,5	7,9	<1
Mahdollisuus energiatukeen	Uutta teknologiaa, mutta takaisinmaksajan oltava pi- dempi.	Kyllä.	Kyllä, jos takaisinmak- suaika 5 -15 a.



## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Seutulassa kerättävän kaatopaikkakaasun määrä on melko pieni, verrattuna moniin muihin kaatopaikkoihin, joilla kaasua hyödynnetään energiaksi. Energian saanti kaasusta on nykyisillä kaasuntuotantomäärillä ja metaanipitoisuudella vähäistä, mikä asettaa hyödyntämistekniikan valinnalle rajoituksia. Keräyskaivoja on alueella nyt vain 20, eivätkä ne kata koko kaatopaikan aluetta. Kerättyä kaasumäärää voitaisiin yrittää kasvattaa laajentamalla keräysverkostoa. Laajentamisessa voi olla haasteena kaasun saanti ajan myötä tiiviiksi painuneesta maa-aineksesta. Vuoden 2011 keräysjärjestelmän saneeraus paransi kaasuntuottoa vain hyvin vähän. Koska kaatopaikka on vanha, ei siellä välttämättä voida enää huomattavasti parantaa kerättävän kaasun määrää. Koska keräyskaivot ja -putket ovat kalliita, eikä tiedetä, saataisiinko laajentamisella parannusta kaasuntuottoon, on laajentamisen kannattavuus epävarmaa.

Hyödyntämismenetelmille lasketut takaisinmaksuajat ovat hyvin lyhyitä, vaikka todellisuudessa hankkeet luultavasti maksavat hitaammin itsensä takaisin. Laskennassa ei ole nyt otettu huomioon vuosittain energian tuotannossa syntyviä kustannuksia, paitsi huoltokustannukset. Kustannuksia syntyy todellisuudessa lisää mahdollisesti kaasunkeräysjärjestelmän laajentamisesta ja mikroturbiinille tai lämpökattilalle tarvittavasta kaasunpuhdistusjärjestelmästä. Kun takaisinmaksuajan laskentaan ei ole otettu mukaan kaikkia kiinteitä kustannuksia, on Stirling-moottorille takaisinmaksuaika sama sekä vuoden 2017 että 2020 kaasunkeräysmäärillä ja metaanipitoisuudella laskettuna.

Diplomityön alkuvaiheessa Stirling-moottori on vaikuttanut potentiaalisimmalta hyödyntämismenetelmältä valittavaksi Seutulan kaatopaikalle. Sen vaatimukset polttoaineelle ovat vähäisimmät, joten sen on arvellut olevan hyvin soveltuva kaatopaikkakaasun hyödyntämiseen. Kaatopaikkakaasussa on usein ongelmana kaasun epäpuhtaudet, ja siitä laitteisiin aiheutuvat haitat kuten kuluminen ja huono hyötysuhde. Stirling-moottoreita ei kuitenkaan ole laajasti markkinoilla. Vaikka yksinkertaistetusti laskettuna Stirling-moottorin takaisinmaksuaika näyttää hyvältä, on laitteen markkinoinnista luovuttu pitkien takaisinmaksuaikojen vuoksi. Tästä voidaan päätellä, että käyttö- ja

huoltokustannuksia voi aiheutua paljon, sillä arvioidun investointikustannuksen ja energian tuotannolla saatujen säästöjen suhde on niin hyvä. Stirling-moottorin sähkön tuotannon hyötysuhde ei ole yhtä hyvä kuin mikroturbiinilla, eikä tämän vuoksi myöskään energiantuotto yllä samalle tasolle. Stirling-moottorista ei myöskään löytynyt referenssikohdetta, jossa käytössä oli yhä myynnissä oleva laite. Stirling-moottoria ei kannatta valita Seutulaan hyödyntämismavaihtoehdoksi niin kauan kuin soveltuvia laitteita ei ole saatavilla.

Potentiaalisimmat hyödyntämismenetelmät näyttäisivät olevan mikroturbiini-laitos ja pelkän lämmön tuotanto kattilassa. Näihin molempiin löytyy soveltuvia laitteita, ja vastaavia hyödyntämismenetelmiä on jo käytössä muualla. Kummankin kohdalla tiedot etenkin kustannusten osalta tarkentuvat, kun Seutulan kaatopaikan kaasuanalyysi valmistuu. Molemmissa menetelmissä on mahdollisesti tarve kaasun puhdistamiselle, ja lämpökattilaan kaatopaikkakaasun rinnalle tarvitaan myös jokin muu polttoaine, jos kaasun nykyistä metaanipitoisuutta ei saada nostettua. Kummallekin on myös mahdollisuus hakea energiatukea, mutta tuen saamiseen vaikuttaa vielä kaasunpuhdistuksen tarpeen myötä tarkentuvat kustannukset.

Erona muihin tekniikoihin, pelkälle lämmöntuotannolle olisi valmiiksi tiedossa mahdollinen hyötykäyttökohde lähitulevaisuudessa, jos HSY rakentaa Seutulaan suunnitella olevan jäteastiahallin. Sen lisäksi, että lämpöä saadaan tuotettua tilojen ja käytöveden lämmitykseen, lämpöenergiaa jää hyödynnettäväksi esimerkiksi jäteastioiden pesuveden lämmittämiseen. Alueella on vain vähän muita toimijoita, ja vuoden 2014 selvitysten pohjalta niillä ei ole suurta kiinnostusta Seutulasta saatavaa kaatopaikkakaasuenergiaa kohtaan. Astiahallin etuna hyötykäyttäjänä olisi se, että hyötykäyttökohteen säilyminen olisi HSY:llä tiedossa, vaikka siitä ei myyntituottoja saakaan. Vaikka lämmöntuotannolle lasketut takaisinmaksuaika ja kasvihuonekaasupäästöjen vähenemä näyttävätkin olevan paremmat kuin toisilla hyödyntämismavaihtoehdoilla, se ei tarkoita, että päästäisiin käytännössä hyviin säästö- ja päästövähennyslukemiin, sillä lämpöä saadaan hyödynnettäväksi paljon enemmän kuin sille on vielä tarvetta. Jotta voitaisiin kunnolla hyötyä tuotetusta lämmöstä, tulisi keksiä lämmön lisätarvetta joko omasta toiminnasta tai yrittää myydä lämpöä eteenpäin.

Lämmöntuotanto on reilusti suurempi kuin astiahallin lämmöntarve olisi, mutta myös mikroturbiinin tai Stirling-moottorin tapauksissa tuotetulle energialle olisi hyvin haasteellista löytää energian hyödyntämiskohteita omista toiminnoista. Lämpökattila on näistä kolmesta vaihtoehdosta selkeästi edullisin, joten sillä voidaan saada maltillisilla kustannuksilla lämpöä hyödyksi, vaikka säästöjä lämmön ostamiseen verrattuna ei syntyisikään paljon. Jos kaatopaikkakaasua aletaan hyödyntää pelkäksi lämmöksi, kannattaa suunnitella voimalan sijainti ottamalla huomioon myös hyötykäyttökohteen eli jäteastiahallin sijainti. Jos voimala sijaitsee lähellä kaasupumppaamo, jossa on myös soihtupoltin, täytyy lämpöenergia siirtää väliaineen avulla putkessa hyötykäyttäjille astiahallille. Jos voimala laitetaan lähelle lämmön hyötykäyttöä, täytyy kaatopaikkakaasu siirtää pumppaamolta putkessa voimalalle. Voimalan sijaitessa astiahallin lähellä, voitaisiin ehkäistä lämmönsiirtämisen häviöitä putkessa voimalan jälkeen.

## 7 YHTEENVETO

Vantaalla sijaitsevalla Seutulan vanhalla kaatopaikalla on käytössä kaasunkeräysjärjestelmä, mutta kaasua ei ole vuoden 2010 jälkeen hyödynnetty energiaksi, vaan se poltetaan soihdussa metaanipäästöjen muuttamiseksi hiilidioksidiksi. Seutulan kaatopaikkakaasun hyödyntäminen on merkitty HSY:n ympäristöohjelmaan vuodelle 2018 yhdeksi ympäristön tilan paranemiseen johtavaksi toimenpiteeksi. Tässä diplomityössä on tutkittu Stirling-moottorin, mikroturbiinien, ORC-prosessin sekä pelkän lämmöntuotannon soveltuvuutta Seutulaa kaatopaikkakaasujen hyödyntämistekniikaksi.

Kaatopaikkakaasu on ympäristölle haitallinen kasvihuoneilmiötä voimistava kaasu, jota muodostuu kaatopaikoilla, kun orgaaninen jäteaines reagoi veden kanssa. Kaatopaikkakaasun muodostuminen hidastuu ja sen sisältämä metaanimäärä pienenee kaatopaikan vanhentuessa. Kaatopaikkakaasun sisältämät metaani ja hiilidioksidi ovat kasvihuonekaasuja, eli ne voimistavat ilmakehään päästessään ilmaston muutosta. Kaatopaikkakaasulla on riski syttyä palamaan tai jopa räjähtää sen sisältämän metaanin takia. Ympäristöhaittojen minimoimiseksi kaatopaikat peitetään maakerroksella, ja kaatopaikkakaasut kerätään pumppaamalla putkistoja pitkin hyödynnettäviksi tai soihtuun poltettaviksi. Vuonna 2017 Seutulassa kerättiin kaatopaikkakaasua 1,1 milj. Nm<sup>3</sup>, ja sen metaanipitoisuudella 31 % kaasumäärä vastaa 3,41 GWh:n energiaa. Kaatopaikkakaasusta saatava energiamäärä voisi olla vuodessa 4,3 GWh, jos kaikki potentiaalinen kaasu saataisiin hyödynnettyä kaatopaikalta keräysjärjestelmää mahdollisesti saneeraamalla ja laajentamalla.

Stirling-moottori kävisi kaatopaikkakaasukohteelle hyvin teoriassa, mutta tuotteita on markkinoilla vain yksi, ja senkin mainonta on lopetettu pitkien takaisinmaksuaikojen vuoksi. ORC-laitteistot puolestaan vaatisivat polttoainekaasulta paremman kaasun metaanipitoisuuden. Seutulan kaasusta saatavaa energiamäärää vastaavia tarpeeksi pieniä laitteita ei ole saatavilla. Tutkittavista menetelmistä markkinoilta löytyvien soveltuvien laitteiden sekä referenssikohteidensa ansiosta mikroturbiini ja lämpökattila

olisivat varteenotettavimmat kaasun hyödyntämismuutokset. Kaikkien tekniikoiden kohdalla tuotetulle energialle olisi haastavaa löytää tarpeeksi hyödyntämiskohteita, mutta kokonaiskustannuksiltaan edullisin vaihtoehto olisi pelkkä lämmöntuotanto.

Koska Seutulan alueella ei ole paljoa toimijoita, ja kaatopaikkakaasusta saatavan energian hyödyntäminen HSY:n sisäisissä toiminnoissa olisi HSY:n oma etu, on järkevää harkita hyötykäyttökohteena Seutulaan suunnitteilla olevaa HSY:n jäteastianpesuhallia. Astiahalli voisi alustavan arvion mukaan tarvita ainakin 92,8 MWh:a lämpöenergiaa tilojen ja käyttöveden lämmitykseen. Astiahalli tarvitsee myös sähköä, mutta sen tarvetta on vaikeampi arvioida ennen kuin selviää, mitä kaikkea toimintaa halliin on tulossa. Lämpöä saadaan kaikilla tekniikoilla hyödynnettäväksi paljon enemmän kuin sille on vielä tarvetta. Jotta voitaisiin kunnolla hyötyä tuotetusta lämmöstä, tulisi keksiä lämmön lisätarvetta joko omasta toiminnasta tai yrittää myydä lämpöä eteenpäin.

## LÄHTEET

Aderemi, A & Otitolaju, A. 2012. An Assessment of Landfill Fires and Their Potential Health Effects - a Case Study of a Municipal Solid Waste Landfill in Lagos, Nigeria. Teoksessa: World Academic Publishing, International Journal of Environmental Protection. Vol. 2 No. 2. Lagos: University of Lagos. 22-26.

Barlaz, A & Chanton, P & Green, B. 2012. Controls on Landfill Gas Collection Efficiency: Instantaneous and Lifetime Performance. Teoksessa: Journal of the Air & Waste Management Association. 59. Painos: 12. 1399-1404 s. DOI: 10.3155/1047-3289.59.12.1399. ISSN: 2162-2906.

Budisulistiorini, H. 2007. Electricity Generation from Landfill Gas. Teoksessa: PRESIPITASI Vol. 3 No.2. 9-15. ISSN 1907-187X.

Christensen, T. H. 2010. Solid Waste Technology & Management. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 1026 s. ISBN 987-1-405-17517-3.

Cleanergy. 2018. Technology, [Verkkosivu]. [Viitattu 23.4.2018]. Saatavilla: <http://cleanergy.com/technology/>

Dudek, J et al. 2010. Landfill Gas Energy Technologies. Krakova: Oil and gas institute - National Research Institute. 90 s.

Eklind, J. 2017. Letter to Customers. Cleanergy AB. 1 s.

Eurostat. 2015. Sustainable development in the European Union: 2015 monitoring report of the EU Sustainable Development Strategy. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.11.2017]. Saatavilla: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/6975281/KS-GT-15-001-EN-N.pdf/5a20c781-e6e4-4695-b33d-9f502a30383f>

Eurostat. 2017. Municipal waste by waste operations. [Verkkosivu]. [Viitattu 21.11.2017]. Saatavilla: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdpc240&language=en>

Esterinen, J. 2010. HSY Helsingin seudun ympäristöpalvelut – kuntayhtymä, Seutulan kaatopaikan kaasunkeräysjärjestelmän ja kaasun hyötykäytön arviointi. Pöyry Finland Oy. 13 s.

Fleiter, T et al. 2016. Mapping and analyses of the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables), Final report. Euroopan komissio. 222 s.

Grönlund, P. 2018. Ylitarkastaja, työ- ja elinkeinoministeriö. Sähköpostikeskustelu. 6.3.2018.

HSY. 2014. HSY Strategia 2020. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.11.2017]. Saatavilla: <https://www.hsy.fi/fi/tietoa-hsy/paatoksenteko/Documents/HSY-strategia-2020.pdf>

HSY. 2016. HSY:n jätehuollon vuositilasto 2016. 33 s.

HSY. 2017. Toiminta- ja taloussuunnitelma 2018 – 2020. 52 s.

HSY. 2018. Jäteastioiden huoltohalli ja varastotila (uudisrakennus). Hankekortti. 1s.

HSY jätehuolto. 2017. Ympäristötilasto. Kaatopaikkakaasun talteenotto suljetuilla kaatopaikoilla (yht.). Excel-taulukko.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2002. IPCC Technical Paper V: Climate change and biodiversity. 86 s. ISBN: 92-9169-104-7.

Itkonen, J et al. 2007. Helsingin seudun ympäristöpalvelut, Seutulan suljetun kaatopaikan nykytilaselvitys. Ramboll Finland Oy. 346 s.

Jylhä, J. 2018. Käsittelypäällikkö, Pirkanmaan Jätehuolto Oy. Sähköpostikeskustelu. 22.2.2018.

Karhu, K. 2018. Projektipäällikkö, jätehuolto, HSY. Sähköpostikeskustelu. 30.4.2018.

Kopalainen, S. 2017. Toimintovastaava, HSY jätehuolto. Espoo. Haastattelu. 15.11.2017.

Lammi, K. 2018. Johtaja, Energia&Ympäristö, Sarlin Oy Ab. Sähköpostikeskustelu. 6.3.2018.

Lämmitysenergiayhdistys. 2018. Kattilat ja polttimet. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.4.2018]. Saatavilla: <https://www.ley.fi/tietoa-lammityksesta/kattilat-ja-polttimet/>

Motiva. 2010. Polttoaineiden lämpöarvot, hyötysuhteet ja hiilidioksidin ominaispäästökerroimet sekä energian hinnat. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 23.4.2018]. Saatavilla: [https://www.motiva.fi/files/3193/Polttoaineiden\\_lampoarvot\\_hyotysuhteet\\_ja\\_hiilidioksidin\\_ominaispaastokertoimet\\_seka\\_energianhinnat\\_19042010.pdf](https://www.motiva.fi/files/3193/Polttoaineiden_lampoarvot_hyotysuhteet_ja_hiilidioksidin_ominaispaastokertoimet_seka_energianhinnat_19042010.pdf)

Motiva. 2014. Projektisuunnitelma: Seutulan kaatopaikkakaasun hyödyntäminen energian tuotannossa. 14 s.

Motiva. 2018. Laskukaavat: Lämmin käyttövesi. [Verkkosivu]. [Viitattu 28.4.2018]. Saatavilla: [https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kiinteiston\\_energiankaytto/kulutuksen\\_normitus/laskukaavat\\_lammin\\_kayttovesi](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energiankaytto/kulutuksen_normitus/laskukaavat_lammin_kayttovesi)

MWM. 2018. Distributed power generation with landfill gas, [Verkkosivu]. [Viitattu 23.4.2018]. Saatavilla: <https://www.mwm.net/mwm-chp-gas-engines-gensets-co-generation/mwm-competencies/gas-solutions/landfill-gas/>



Nastev, M et al. 2000. Gas production and migration in landfills and geological materials. Teoksessa: Ibaraki, M & Thierren R, Journal of Contaminant Hydrology. 52 (2001). 187–211.

Oilon. 2018a. Kaasupolttimien käyttö- ja huolto-ohjeet. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 23.4.2018]. Saatavilla: <http://onninen.procus.fi/documents/original/12043/6/1/ABI120.pdf>

Oilon. 2018b. Tervetuloa Oilonille. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.4.2018]. Saatavilla: <https://www.oilon.com/etusivu/>

Podešva, J & Poruba, Z. 2015. The Stirling engine mechanism optimization. Teoksessa: Elsevier GmbH, Perspectives in Science 7/2016. Ostrava: Technical University of Ostrava. 341-346.

Qalovis. 2018. FleXgen Stirling engine. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.4.2018]. Saatavilla: <http://www.qalovis.com/en/flexgen-stirling-engine-power-generation/>.

Quoilin, S et al. 2013. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. Teoksessa: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 22. painos. Elsevier Ltd. s. 168–186. ISSN: 1364-0321.

Pelto-Timperi, J. 2016. Kaatopaikkakaasusta lämpöä ja sähköä. Sarlin 360° - Sarlinin asiakaslehti, 2016, 47. vuosikerta, 2. numero. s. 8-13.

Puro, K. 2018. Sales Manager, Oilon Oy. Sähköpostikeskustelu. 12.4.2018.

Roe, S et al. 1998. Emerging technologies for the management and utilization of landfill gas. Rancho Cordova, California: E.H. Pechan & Associates, Inc. 57 s.

Sahlin, C. 2016. Stirling revolutions, made in Sweden. Cleanergy. 11 s.

Sirén, K. 2015. Rakennusten energiainvestointien kannattavuuden laskenta. Aalto yliopisto. 31 s.

Smith, A et al. 2001. Waste Management Options and Climate Change: Final report to the European Commission, DG Environment. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 206 s. ISBN 92-894-1733-1.

Soares, C. 2007. Microturbines: applications for more distributed energy systems. Elsevier. 271 s. ISBN: 978-0-7506-8469-9.

Suomen ympäristökeskus. 2008. Ympäristöhallinnon ohjeita 1: Kaatopaikkojen käytöstä poistaminen ja jälkihoito. Helsinki: Vammalan Kirjapaino Oy. 155 s. ISBN 1796-1645.

Säwe, H. 2018. Suunnitteluinsinööri, Ulricehamns Energi AB. Sähköpostikeskustelu. 23.2.2018.

Takalo, H. 2013. Mikro- ja pien-CHP: Teknologia- ja laitekantaselvitys sekä kannattavuuden tarkastelu tapausesimerkin avulla. Saksio, A. Iin Micropolis Oy. 32 s.

Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S. A. 1993. Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill International Editions. 978 s. ISBN 0-07-112865-4.

TEM. 2018. Työ- ja elinkeinoministeriö: Energiatuki. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.4.2018]. Saatavilla: <http://tem.fi/energiatuki>

Tilastokeskus. 2016. Energia 2017 -taulukkopalvelu, energia ja päästöt: sähkön ja lämmön tuotannon CO<sub>2</sub>-päästöt. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 28.4.2018]. Saatavilla: [http://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2017/html/suom0011.htm](http://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2017/html/suom0011.htm)

Tilastokeskus. 2017. Yhdyskuntajätteet Suomessa käsittelytavoittain 1997-2016. [Verkkosivu]. [Viitattu 21.11.2017]. Saatavilla: [http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_ymp\\_\\_jate/stat-fin\\_jate\\_pxt\\_001.px/table/tableViewLayout1/?rxid=260cb897-b978-48aa-bdbd-c392de7fabce](http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ymp__jate/stat-fin_jate_pxt_001.px/table/tableViewLayout1/?rxid=260cb897-b978-48aa-bdbd-c392de7fabce)

Tilastokeskus. 2018. Energian hinnat. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 28.4.2018]. Saatavilla: [https://www.stat.fi/til/ehi/2017/04/ehi\\_2017\\_04\\_2018-03-13\\_fi.pdf](https://www.stat.fi/til/ehi/2017/04/ehi_2017_04_2018-03-13_fi.pdf)

Uusitalo, A. 2015. Hukkalämmöstä sähköä. [Verkkoartikkeli]. Helsinki: Omnipress Oy/ Promaint-lehti. [Viitattu: 28.4.2018]. Saatavissa: <https://promaintlehti.fi/Turvallisuus-ja-ymparisto/Hukkalammosta-sahkoa>

Valovirta, L. 2018. Product Group Manager, M.Sc, Sarlin Oy Ab. Sähköpostikeskustelu. 6.3-20.4.2018.

van Buijtenen, J. 2018. Perustaja/neuvonantaja, Triogen B.V. Sähköpostikeskustelu. 27.3.2018.

Virmanen, J. 2018. Hankepäällikkö, HSY jätehuolto. Helsinki. Haastattelu. 2.3.2018.

Vantaan energia. 2018. [Verkkosivu]. [Viitattu 28.4.2018]. Saatavilla: <https://www.vantaanenergia.fi/lampo/ammattilaiset/kaukolampolaskurin-ohje/>

Väisänen, S. 2016. Greenhouse gas emissions from biogenic sources. BH60A0451 Air Pollution Control: luento 4, Lappeenrannan teknillinen yliopisto 26.9.2016.

Walker, G. 1980. Stirling engines. Oxford, UK: Oxford University Press. 532 s. ISBN 0-19-856209-8.

Westholm, M. 2016. Gammal soptipp blir mötesplats med modern miljöteknik. Vår nya energi, 2016: nro. 6. 4-5.

Ympäristöhallinto. 2017. Otsonikerrosta heikentäviä aineita koskevat rajoitukset. [Verkkosivu]. Suomen ympäristökeskus SYKE. Päivitetty: 14.3.2017. [Viitattu 17.11.2017]. Saatavilla: [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto\\_ja\\_ilma/Otsonikerroksen\\_suojelu/Otsonikerrosta\\_heikentavia\\_aineita\\_koskevat\\_rajoitukset](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto_ja_ilma/Otsonikerroksen_suojelu/Otsonikerrosta_heikentavia_aineita_koskevat_rajoitukset).

Ympäristöministeriö, maa- ja metsätalousministeriö ja työ- ja elinkeinoministeriö. 2015. Suomen ilmastopolitiikka – kohti vähähiilistä ja energiatehokasta yhteiskuntaa. 45 s.

Öhman, P. 2018. Tekninen tuki, Energiatekniikka, Sarlin Oy Ab: Energia & Ympäristö. Sähköpostikeskustelu. 17.8.2018.


**INSTITUT  
FRESENIUS**

SGS INSTITUT FRESENIUS GmbH · Im Paesch 1a · D-54340 Longuich

**SGS INSTITUT FRESENIUS GmbH**  
 Im Paesch 1a · 54340 Longuich · Germany  
 phone: +49 (0)6502-9339-0 (fax: -29)

 Sarlin Oy Ab  
 Kaivokselantie 3-5  
 01610 Vantaa  
 Finland

 mail: thomas.haeusler@sgs.com  
 www.sgs.com  
 www.umweltueberwachung.de  
 Longuich, 07.05.2018

**Report no. B180391953 / 07.05.2018**

sample description	Seutula
further information	raw gas
gas type	landfill gas
sample receipt	24.04.2018
sampling date / sampled by	18.04.2018 / customer
order no. / order date	HTY0007466 / 18.04.2018
sample ID / SAP-order-no.	180391953 / 4538581
gas bag / filling level	10 l Tedlar / 75 %
analyses period	24.04.2018 - 07.05.2018
executing laboratory	SGS INSTITUT FRESENIUS GmbH Laboratory Longuich

**Remarks**

\*) The Total Chlorine determination was disturbed. Instead of Total Chlorine determination by Wickbold combustion, we determined the Total Chlorine value by measuring fluorinated and chlorinated organic compounds and computed Total Chlorine from this data.

**i. V. Dr. Thomas Häusler**

(Laboratory Director)

**i. A. Ute Geißler**

(Assistant Laboratory Director)

WARNING: The sample(s) to which the findings recorded herein (the "Findings") relate was (were) drawn and / or provided by the Client or by a third party acting at the Client's direction. The Findings constitute no warranty of the sample's representativeness of any goods and strictly relate to the sample(s). The Company accepts no liability with regard to the origin or source from which the sample(s) is/are said to be extracted.

This document is issued by the Company subject to its General Conditions of Service ([www.sgs.com](http://www.sgs.com)). Attention is drawn to the limitations of liability, indemnification and jurisdictional issues established therein. This document is an original. If the document is submitted digitally, it is to be treated as an original within the meaning of UCP 600.

Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law. The test results refer exclusively to the examined test items and the date of the test under the test specifications.

SGS INSTITUT FRESENIUS GmbH | Im Maisel 14 | D-65232 Taunusstein | t +49 6128 744 - 0 | f +49 6128 744 - 130 | [www.institut-fresenius.sgs.com](http://www.institut-fresenius.sgs.com)  
 Member of the SGS Group (Société Générale de Surveillance)

Alle Dienstleistungen werden auf Grundlage der anwendbaren Allgemeinen Geschäftsbedingungen der SGS, die auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden, erbracht.  
 Die Veröffentlichung und Vervielfältigung unserer Prüfberichte und Gutachten zu Werbezwecken sowie deren auszugsweise Verwendung in sonstigen Fällen bedürfen unserer schriftlichen Genehmigung.  
 Geschäftsführer: Stefan Steinhardt, Aufsichtsratsvorsitzender; Dirk Heffemans, Sitz der Gesellschaft: Taunusstein, HRB 21543 Amtsgericht Wiesbaden.

## Report no. B180391953 / 07.05.2018

parameter	unit	result	100 % CH <sub>4</sub>
<b>Main components</b>			
Methane	vol.- %	27,9	-
Carbon dioxide	vol.- %	27,1	-
Oxygen	vol.- %	0,5	-
Nitrogen	vol.- %	44,0	-
<b>Inorganic trace gases</b>			
Ammonia	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,2	< 0,7
Hydrogen sulphide	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	28	100
<b>Halogenated Hydrocarbons</b>			
Dichlorodifluoromethane (F12)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	1,4	5,1
Vinylchlorid	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Trichlorofluoromethane (F11)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	0,1	0,4
1,1-Dichloroethene	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Dichloromethane	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
1,1,2-Trichloro-1,2,2-trifluoroethane (F113)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
trans-1,2-Dichloroethene	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
1,1-Dichloroethane	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
cis-1,2-Dichloroethene	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Trichloromethane	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
1,2-Dichloroethane	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
1,1,1-Trichloroethane	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Tetrachloromethane	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Trichloroethene	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
1,1,2-Trichloroethane	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Tetrachloroethene	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
1,1,1,2-Tetrachloroethane	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
<b>BTEX</b>			
Benzene	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	0,7	2,4
Toluene	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	0,1	0,5
Ethylbenzene	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	0,6	2,0
m-/p-Xylene	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	3,1	11,2
o-Xylene	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	0,2	0,7
<b>Silicon compounds</b>			
Tetramethylsilane	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Trimethylsilanol	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Hexamethyldisiloxane (L2)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Hexamethylcyclotrisiloxane (D3)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Octamethyltrisiloxane (L3)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Octamethylcyclotetrasiloxane (D4)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	0,3	1,1
Decamethyltetrasiloxane (L4)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Decamethylcyclopentasiloxane (D5)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 0,1	< 0,4
Sum silicon compounds (calc.)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	0,3	1,1
Sum silicon (calc.)	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	0,1	0,4
<b>Hydrocarbons</b>			
> n-Pentane, <= n-Decane		100	358
> n-Decane	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	24	86
<b>Total Cl, F, S content (Wickbold)</b>			
Total Fluorine	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	3,1	11,1
Total Chlorine <small>see remarks</small>	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 2,8	< 10,0
Total Sulphur	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	27,1	97,1
	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>		

n. d. = not determined, n. a. = not applicable

## Methods of analyses

The values in the column "100% CH<sub>4</sub>" refer to 100 % Methane.

Main components (CH <sub>4</sub> ,CO <sub>2</sub> ,O <sub>2</sub> ,N <sub>2</sub> ), H <sub>2</sub> , CO	according to DIN 51872-04-A (GC-TCD); main components refer to dry gas
Total Cl, F, S (Wickbold)	DIN EN 38409 H8 (Wickbold combustion), DIN EN 10304 (IC)
Silicon compounds	according to VDI 3865 Bl. 4 (GC-MS)
Ammonia	VDI 3496 / colorimetric
Hydrogen sulphide	DIN 51855-4 / colorimetric
Hydrocarbons	according to VDI 3865 Bl. 4 (GC-FID)
BTEX, LCHC, FCHC	according to VDI 3865 Bl. 4 (GC-MS)

- end of report -

YTV jätehuolto  
Aluepalvelut  
Hakkarainen

MITTAUSPÖYTÄKIRJA  
biokaasupumppaamo

Jaana  
0.

PUMPPAAMO:	Seutula			MAARA:	Nm3	
PAIVAYS:	21.9.2016			ENERGIA	MWh	
MITTAAJA:	Tapiola			TUNNIT:	h	82973,
SAATILA:	Aurinko:nen					
ILMANPAINE:	1015	mbar	16,0C			
LINJA	CH4 til.-%	CO2 til.-%	O2 til.-%	VIRTAUS Nm2/h	Imupaine mbar	Poltto: kW/h
1	30.6	32.1	0.0	4.3	-27.8	
2	44.5	38.0	0.3	16.9	-2.5	
3	34.3	34.3	0.0	14.8	-0.6	
4	32.2	33.8	0.1	22.9	-71.8	
5	31.3	32.8	0.0	6.3	-0.4	
6	41.8	34.8	0.0	46.4	-4.4	
7	9.0	13.0	4.6	0.0	-0.4	
8	39.2	33.7	0.0	18.3	-0.5	
9	17.0	14.1	7.5	0.0	-0.3	
10	24.9	27.9	0.0	0.0	-0.3	
11	2.1	9.9	10.7	0.0	-0.1	
12	7.9	17.1	1.0	0.0	-0.1	
13	27.2	30.0	0.0	22.6	-0.7	
14	35.9	32.9	0.0	14.2	-0.9	
15	18.1	25.9	0.0	8.4	-0.4	
16	31.6	31.5	0.0	21.6	-0.7	
17	18.1	26.8	0.0	1.9	-0.3	
18	32.3	31.7	0.4	39.1	-8.3	
19	31.9	34.3	0.0	28.1	-1.8	
20	18.6	27.3	0.0	5.9	-0.3	
Tukki	33.3	32.5	0.2	92.0	-130.3	
Taulu	-	-	-	-	-133.7	
Kaasun virtaus	Nm3/h					
Kiertomäntäpu	RPM			15,30		
Paine P1	mbar					
Paine P2	mbar					
Paine P3	mbar					