

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

KAATOPAIKKAKAASUN HYÖTYKÄYTTÖMAHDOLLISUUDET
ANJALANKOSKEN EKOPARKISSA

Työn tarkastajat: Professori, TkT Mika Horttanainen
 Toimitusjohtaja, DI Jukka Köppä, Kymenlaakson Jäte Oy

Työn ohjaaja: Professori, TkT Mika Horttanainen

Lappeenrannassa 14.11.2007

Päivi Karttunen

Korpikunnaankatu 5 C 30

53850 LAPPEENRANTA

p. 040 545 1524

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Päivi Karttunen

Kaatopaikkakaasun hyötykäyttömahdollisuudet Anjalankosken Ekoparkissa

Diplomityö

2007

141 sivua, 47 kuvaa, 7 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Mika Horttanainen
Toimitusjohtaja, DI Jukka Köppä, Kymenlaakson Jäte Oy

Hakusanat: kaatopaikkakaasu, metaani, biokaasu, sähköntuotanto, lämmöntuotanto, kaukolämpö, terminen kuivaus, vitrifiointi, kaatopaikkavesien haihdutus

Keywords: landfill gas, methane, biogas, electricity production, heat production, district heating, thermal drying, vitrification, leachate evaporation

Kaatopaikalle sijoitetut biohajoavat orgaaniset jätteet muodostavat jätetäytön hapettomissa olosuhteissa kaatopaikkakaasua, joka koostuu pääasiassa metaanista ja hiilidioksidista. Kaatopaikkakaasun sisältämän metaanin takia, kaasu sisältää merkittävästi energiaa, joka on hyödynnettävissä eri tavoin. Tämän diplomityön tavoitteena oli tarkastella vaihtoehtoja Anjalankosken Keltakankaan kaatopaikoilla muodostuvan kaatopaikkakaasun hyödyntämiseksi. Tarkastellut vaihtoehdot tarjoavat ympäristöllisten hyötyjen lisäksi liiketoiminnallista hyötyä Ekoparkissa toimiville yritysille.

Tutkimuksessa tehdyt laskelmat osoittivat, että työssä tarkastellut kaatopaikkakaasun hyötykäyttövaihtoehdot ovat sekä taloudellisesti että kaasun riittävyyden kannalta hyödynnettävissä. Esimerkiksi kaatopaikkakaasun hyödyntämisellä kaukolämmön tuotannossa voidaan kattaa noin kolmannes Anjalankosken vuotuisesta kaukolämmön tarpeesta. Kaatopaikkakaasun lietteen kuivauskapasiteetti kattaa Pohjois-Kymenlaaksossa muodostuvan jätevesilietteen käsitteilytarpeen. Biopolttoaineen kuivauskapasiteetti on riittävä olemassa oleviin valmistuslaitosten tuotantokapasiteetteihin verrattuna. Myös perinteisillä sähkön- ja lämmöntuotantotekniikoilla voidaan kattaa Ekoparkin oma sähkön- ja lämmöntarve.

Kaatopaikkavesien haihdutus ei tulosten perusteella ole sekä taloudellisesti että kaasun riittävyyden kannalta hyödynnettävissä. Tuhkan vitrifioinnissa haasteen muodostaa investointikustannuksen suuruus. Anjalankosken Ekoparkin yritykset voivat hyödyntää työn tuloksia uuden liiketoiminnan kehittämiseen. Lisäksi tuloksia voidaan hyödyntää soveltaen eri kokoluokan kaatopaikkojen kaatopaikkakaasujen hyötykäyttöä suunniteltaessa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Environmental Technology

Päivi Karttunen

Utilisation Possibilities of Landfill Gas at Anjalankoski Ekopark

Master's Thesis

2007

141 pages, 47 figures, 7 tables and 2 appendices

Examiners: Professor, D. Sc. (Tech.) Mika Horttanainen
Chief Executive, M. Sc. (Tech.) Jukka Köppä, Kymenlaakson Jäte Oy

Keywords: landfill gas, methane, biogas, electricity production, heat production, district heating, thermal drying, vitrification, leachate evaporation

Biodegradable organic wastes disposed of to a landfill site form landfill gas when they decompose under anaerobic conditions. Landfill gas consists mainly of methane and carbon dioxide. Because of the methane, landfill gas has a high energy content. Thus landfill gas is usable for energy production. The aim of this Master's thesis was to study options to utilise landfill gas in ways that would create both environmental and economic benefits for companies operating in the Ekopark area.

The results of the study indicate that the options examined can be considered exploitable economically and in terms of landfill gas sufficiency. Using landfill gas for district heating would cover almost one third of the annual need for district heating in Anjalankoski. Sewage sludge formed in the northern Kymenlaakso region can be treated by thermal drying using landfill gas formed in the Ekopark area. The drying capacity of biomass fuels is adequate compared with present manufacturers' production capacity of biomass fuels. Traditional electricity and heat production by landfill gas is high enough for covering the energy need of companies operating in the Ekopark area.

Still, the evaporation of landfill leachate was found disadvantageous. The vitrification of ashes poses a challenge with regard to energy intensity and high investment costs. Companies operating in the Ekopark area can use these results for creating new business activities and developing current ones. The results can also be applied to planning the utilisation of landfill gas at various landfill sites.

ALKUSANAT

Lapsena halusin trapetsitaiteilijaksi. Minusta tulee kuitenkin tämän diplomityön myötä diplomi-insinööri 20 vuotta sen jälkeen, kun astelin ensimmäisen kerran opintojen tielle. Tämä diplomityö on toteutettu jätehuoltotekniikan professori - Alueellinen tutkimus- ja koulutustoiminnan kehittämishankkeessa Anjalankosken Ekoparkille. Hankkeen rahoittajina toimivat Kymenlaakson liitto, Etelä-Karjalan liitto, Anjalankosken kaupunki, Anjalankosken Ekopark sekä kaakkoissuomalainen teollisuus. Työn tavoitteena on ollut löytää kaatopaikkakaasulle uusia hyötykäyttövaihtoehtoja, joista olisi ympäristöhyötyjen lisäksi myös liiketoiminnallista hyötyä Ekoparkissa toimiville yrityksille.

Haluan kiittää työni tarkastajia toimitusjohtaja Jukka Köppää Kymenlaakson Jäte Oy:stä ja professori Mika Horttanaista Lappeenrannan teknillisestä yliopistosta työni ohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää työni ohjausryhmän jäseniä yhteistyöstä diplomityön valmistumisen aikana. Kiitos myös yritysten ja muiden organisaatioiden edustajille, jotka ovat avuliaasti vastanneet tiedusteluihini diplomityöhön liittyvissä asioissa.

Opinnoissani ja unelmissani ovat vuosien saatossa tukeneet useat henkilöt: ystävät, työkaverit, sukulaiset, tuttavat. Kiitokset teille kaikille. Sydämellinen kiitos vanhemmilleni siitä, että olette uskoneet minuun ja tukeneet kaikki nämä vuodet. Aki, kiitos!

Lappeenrannassa 14.11.2007

Päivi

SISÄLTÖ

	TIIVISTELMÄ	
	ABSTRACT	
	ALKUSANAT	
	SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	
	KUVALUETTELO	
	TAULUKKOLUETTELO	
1	JOHDANTO	10
	1.1 Työn tausta.....	10
	1.2 Anjalankosken Ekopark.....	12
	1.3 Työn tavoitteet	14
	1.4 Työn rakenne ja rajaus.....	16
2	KAATOPIAIKKAKAASUN MUODOSTUMINEN	17
	2.1 Jätteen hajoaminen.....	17
	2.2 Muodostumiseen vaikuttavat tekijät	20
	2.2.1 Jätteen ominaisuudet.....	20
	2.2.2 Vallitsevat olosuhteet.....	23
	2.2.3 Kaatopaikan ominaisuudet.....	25
	2.3 Koostumus ja ominaisuudet.....	28
3	KATSAUS NYKYTILANTEESEEN	31
	3.1 Kaatopaikkakaasun tuotanto	31
	3.2 Kaatopaikkakaasun talteenotto	35
	3.3 Kaatopaikkakaasun puhdistus.....	37
	3.4 Kaatopaikkakaasun hyötykäyttö.....	39
	3.4.1 Käyttö energiantuotannossa.....	41
	3.4.2 Käyttö liikennepolttoaineena	48
	3.4.3 Käyttö maakaasuverkostossa	49

3.4.4	Käyttö kemianteollisuudessa.....	49
3.5	Tarkasteltavat kaatopaikat.....	50
3.5.1	Keltakankaan käytössä oleva kaatopaikka.....	50
3.5.2	Keltakankaan vanha kaatopaikka.....	51
4	KAATOPAIKKAKAASUN HYÖTYKÄYTTÖ EKOPARKISSA.....	52
4.1	Vaihtoehtojen rajaus	52
4.2	Laskennan lähtötiedot	54
4.3	Lämmöntuotanto	57
4.3.1	Lämmöntuotanto kiinteistöllä	57
4.3.2	Kaukolämmön tuotanto.....	61
4.3.3	Kaatopaikkavesien haihdutus.....	74
4.4	Sähköntuotanto	79
4.5	Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto	88
4.6	Jätevesilietteen terminen kuivaus.....	95
4.7	Tuhkan terminen käsittely.....	102
4.7.1	Vitrifiointiprosessi	104
4.7.2	Vitrifiointitekniikat	107
4.7.3	Käsittelykapasiteetti ja investointikustannus	111
4.8	Biopolttoaineiden kuivaus.....	115
5	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	120
6	YHTEENVETO.....	123
	LÄHTEET.....	128

KUVALUETTELO

Kuva 1. Ekoparkin tulevaisuuden toimintamalli.....	13
Kuva 2. Kaatopaikkakaasun koostumuksen vaihtelu hajoamisen ja kaasun muodostuksen eri vaiheissa.....	19
Kuva 3. Kumulatiivinen kaasun tuotanto yhdyskuntajätteen biologisesti hajoavalle orgaaniselle ainekselle.....	22
Kuva 4. Metaanin kulkeutuminen kaatopaikan jätetäytössä.....	27
Kuva 5. Metaanipäästön jakautuminen eri ihmiskunnan toiminnoille maailmanlaajuisesti vuonna 2000.....	32
Kuva 6. Biokaasun tuotanto laitostyypeittäin vuonna 2005.....	34
Kuva 7. Kaatopaikkalaitosten tuottaman kaasun määrän kehitys vuosina 1994 - 2005.....	35
Kuva 8. Kaatopaikkakaasun luokittelu puhdistusasteen perusteella.....	38
Kuva 9. Kaatopaikkakaasun perinteiset hyötykäyttömuodot ovat sähkön- ja lämmöntuotannon eri vaihtoehtoja.....	41
Kuva 10. Lämmöntuotantokapasiteetti kaatopaikkakaasulla, kun lämmöntuotannon hyötysuhde on 80 prosenttia tai 95 prosenttia. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.....	58
Kuva 11. Kiinteistökohtaisen lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun vuotuinen kaatopaikkakaasun tuotantomäärä on 1,0 miljoonaa m ³	60
Kuva 12. Kiinteistökohtaisen lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun vuotuinen kaatopaikkakaasun tuotantomäärä on 3,5 miljoonaa m ³	61
Kuva 13. Kaukolämmön tuotantokapasiteetti Ekoparkissa muodostuvalla kaatopaikkakaasulla. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät. ...	63
Kuva 14. Kaukolämmön tuotantopotentiaali biokaasulla ja kaatopaikkakaasulla yhteensä. ...	64
Kuva 15. Kaukolämmön tuotannon suurin sallittu investointikustannus lämmön ostohinnan funktiona, kun kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus on 45 tilavuusprosenttia.	65
Kuva 16. Anjalankosken Ekoparkissa muodostuvalla kaatopaikkakaasulla kuumennettavan kiviaineksen määrä asfalttiaseman raaka-aineeksi. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.....	68

Kuva 17. Suurin sallittu investointikustannus asfalttiaseman muutostöille, kun kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus on 40 tilavuusprosenttia ja polttoöljyn hintana 60 €/MWh.	69
Kuva 18. Pilaantuneiden maa-ainesten käsittelykapasiteetti termodesorptiolaitteistolla, kun ominaisenergiankulutus on 580 kWh käsiteltyä maa-ainestonna kohden. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.	72
Kuva 19. Pilaantuneen maa-aineksen termisen käsittelyn ja kaukolämmön tuotannon suurin sallittu investointikustannus maa-aineksen vastaanottohinnan funktiona kaatopaikkakaasun määrällä 3,5 miljoonaa m ³	74
Kuva 20. Kaatopaikkavesien haihdutusprosessi	76
Kuva 21. Kaatopaikkavesien haihdutuskapasiteetti kaatopaikkakaasulla. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.	77
Kuva 22. Kaatopaikkavesien haihduttamon suurin sallittu investointikustannus kaatopaikkakaasun määrän funktiona.	79
Kuva 23. Sähköntuotanto mikroturbiinilla (a) ja kaasumootorilla (b).	80
Kuva 24. Vuosittainen sähköntuotantopotentiaali 25 ja 40 prosentin hyötysuhteilla, kun metaanipitoisuus vaihtelee välillä 30 - 45 tilavuusprosenttia. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.	82
Kuva 25. Sähköntuotantopotentiaali, kun kaatopaikkakaasu yhdistetään biojätteen mädätyslaitoksesta saatavan biokaasun kanssa.	83
Kuva 26. Sähköntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun kaikki tuotettu sähkö myydään valtakunnan verkkoon.	85
Kuva 27. Sähköntuotannon suurin sallittu investointikustannus sähkön ostohinnan funktiona, kun tuotetusta sähköstä käytetään omaa kulutusta vastaava osuus (1 800 MWh/a) ja ylijäävä myydään valtakunnan verkostoon.	86
Kuva 28. Sähköntuotannon suurin sallittu investointikustannus sähkön ostohinnan funktiona, kun tuotetusta sähköstä käytetään omaa kulutusta vastaava osuus (2 200 MWh/a) ja ylijäävä myydään valtakunnan verkostoon.	87
Kuva 29. Mikroturbiini (a) ja kaasumootori (b) CHP-laitosten kokoonpano.	89

Kuva 30. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon kapasiteetti mikroturbiinilla kokonaishyötysuhteen ollessa 75 % ja sähköntuotannon hyötysuhteen 25 %. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.	90
Kuva 31. Yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotannon kapasiteetti kaasumoottorilla kokonaishyötysuhteen ollessa 85 % ja sähköntuotannon hyötysuhteen 35 %. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.	91
Kuva 32. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun kaikki tuotettu sähkö ja lämpö myydään. Tarkasteltava kaatopaikkakaasun määrä on 1,0 miljoonaa m ³ vuodessa.	92
Kuva 33. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun kaikki tuotettu sähkö ja lämpö myydään. Tarkasteltava kaatopaikkakaasun määrä on 3,5 miljoonaa m ³ vuodessa.	93
Kuva 34. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun tuotetusta sähköstä ja lämmöstä käytetään omaa kulutusta vastaava osuus ja loppu myydään. Lämmöstä saatava hinta 20 €/MWh.	95
Kuva 35. Lietteen kuivauskapasiteetti kaatopaikkakaasulla ominaisenergiankulutuksen ollessa 583 kWh/t tai 756 kWh/t. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.	98
Kuva 36. Lietteen kuivauksen suurin sallittu investointikustannus, kun käytettävissä olevan kaatopaikkakaasun määrä on noin 1,0 miljoonaa m ³ vuodessa.	100
Kuva 37. Lietteen kuivauksen suurin sallittu investointikustannus lietteen vastaanottohinnan funktiona, kun lietteen käsittelykapasiteetti on 6 000 t/a ja käytettävissä olevan kaatopaikkakaasun määrä on 3,5 miljoonaa m ³	101
Kuva 38. Lietteen kuivauksen suurin sallittu investointikustannus, kun lietettä kuivataan vuosittain noin 13 000 tonnia ja käytettävissä olevan kaatopaikkakaasun määrä on 3,5 miljoonaa m ³	102
Kuva 39. Tuhkan vitrifointiprosessi.	105
Kuva 40. Poltinkäyttöiset sulatusuunit: a) pintasulatusuuni, b) pyörivä pintasulatusuuni ja c) pyörrevirtasulatusuuni.	108
Kuva 41. Japanissa tuhkan vitrifointi yhdistetään tyypillisesti jätteenpolttoprosessiin (* magneettierotin, murskaus, seulonta).	110

Kuva 42. Tuhkan käsittelypotentiaali kaatopaikkakaasulla. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.	111
Kuva 43. Tuhkan käsittelypotentiaali, kun huomioidaan mädätyslaitoksesta saatava biokaasu.	112
Kuva 44. Tuhkan vitrifioinnin suurin sallittu investointikustannus 8 000 tonnin ja 15 000 tonnin vuotuisilla käsittelykapasiteeteilla.	115
Kuva 45. Biopolttoaineen kuivauskapasiteetti. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.	118
Kuva 46. Pelletin kuivauksen suurin sallittu investointikustannus kuivatun raaka-aineen hinnan funktiona.	119
Kuva 47. Lietteiden kuivauksen yhdistäminen jätteenpolton lentotuhkan ja APC-jätteen termiseen käsittelyyn, kun kaatopaikkakaasulla tuotetaan sähköä.	122

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Kaatopaikkakaasun tyypillinen koostumus metanogeneesivaiheessa.....	28
Taulukko 2. Arvio kaatopaikkasijoituksen metaanin tuotannosta vuosina 1990 - 2020, miljoonaa tonnia CO ₂ -ekvivalenttia.....	33
Taulukko 3. Sähköntuotantotekniikoiden asettamat vaatimukset kaatopaikkakaasulle sekä tuotantoarvot	46
Taulukko 4. Laskennassa käytettävät metaanipitoisuudet ja niitä vastaavat kaatopaikkakaasun lämpöarvot.	55
Taulukko 5. Tarkasteltavia metaanipitoisuuksia vastaavat adiabaattiset palamislämpötilat...	56
Taulukko 6. Käytössä olevien vitrifiointilaitosten prosessitietoja.	109
Taulukko 7. Kaatopaikkakaasun hyötykäyttövaihtoehtojen vertailu	126

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

CHP	<i>Combined Heat and Power</i> , yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto
COD	<i>Chemical Oxygen Demand</i> , kemiallinen hapen kulutus
DOC	<i>Degradable Organic Carbon</i> , biokemiallisesti hajoava hiili
EU	<i>European Union</i> , Euroopan Unioni
HTTD	<i>High Temperature Thermal Desorption</i> , korkealämpötila desorptio
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> , Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli
LTTD	<i>Low Temperature Thermal Desorption</i> , matalalämpötila desorptio
NMVOC	<i>Non-methane Volatile Organic Compounds</i> , haihtuvat orgaaniset yhdisteet lukuun ottamatta metaania
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i> , Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö
PAH	Polysyklinen aromaattinen hiilivety
PCB	Polykloorattu bifenyylä
U.S. EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> , Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto
VNp	Valtioneuvoston päätös
VOC	<i>Volatile Organic Compounds</i> , haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Alaindeksit

H ₂ O	vesi
jäte	loppusijoitettu jäte
liete	yhdyskuntaliete
MSW	<i>Municipal Solid Waste</i> , yhdyskuntajäte
tuhka	jätteenpolton tuhka

MÄÄRITELMÄT

Advektio	Liuenneiden tai suspendoituneiden aineiden kulkeutumista virtaussuunnassa virtaavan veden mukana.
Anaerobinen mädätys	Orgaanisen aineksen muuntuminen biologisen toiminnan tuloksena metaaniksi ja hiilidioksidiksi hapettomissa olosuhteissa.
APC-jäte	<i>Air Pollution Control Residue</i> , kaasujen puhdistusprosesseissa (mm. pesuri, katalyyttiset menetelmät, märkä- ja kuivamenetelmä) muodostuvaa jätettä.
Asetogeneesi	Etikkahappokäyminen, rasvahapot muuntuvat muun muassa etikkahapoksi ja hiilidioksidiksi hapettomissa olosuhteissa.
Asidogeneesi	Yksinkertaisten monomeerien hajoaminen haihtuviksi rasvahoiksi hapettomissa olosuhteissa.
Biohajoava aines	Yhdiste, joka hajoaa tai muuttuu yksinkertaisemmiksi yhdisteiksi mikrobien toiminnan tuloksena.
Fermentaatio	Happokäyminen hapettomissa olosuhteissa.
Hydrolyysi	Veden vaikutuksesta tapahtuvaa yhdisteen hajoamista yksinkertaisiksi monomeereiksi.
Inhibiittori	Tekijä, joka estää tai hidastaa biologisen tai kemiallisen reaktion.
Kaatopaikka	Jätteiden käsittelypaikka, jossa jätettä sijoitetaan maan päälle tai maahan hallitusti (VNp 4.9.1997/861).
Kaatopaikkakaasu	Kaatopaikalle sijoitetusta jätteestä muodostuvaa kaasua (VNp 4.9.1997/861).
Metanogeneesi	Metaanin muodostumista etikkahaposta hapettomissa olosuhteissa.
Orgaaninen aines	Kemiallinen yhdiste, joka sisältää hiiltä ja muita alkuaineita. Orgaaninen aines hajoaa mikrobiologisen toiminnan tuloksena ja on myös palavaa.
Suspendoitunut aines	Vedessä oleva hienojakoinen aines.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Ihmiskunnan toiminta vapauttaa ilmakehään kasvihuonekaasuiksi määriteltyjä yhdisteitä, kuten metaania (CH₄) ja hiilidioksidia (CO₂). Kasvihuonekaasupäästöjä aiheutuu muun muassa fossiilisten polttoaineiden käytöstä energiantuotannossa, liikenteestä sekä aerobisista ja anaerobisista ihmiskunnan ja luonnon omista prosesseista. Kasvihuonekaasupäästöt aiheuttavat ilmaston muutosta eli maapallon keskilämpötilan nousua ja äärimmäisiä sääilmiöitä. Kansainvälisten tutkimusten mukaan maapallon keskilämpötila on noussut 0,6 °C sadassa vuodessa ja lämpötilan uskotaan nousevan vuoteen 2100 mennessä noin 1 - 6 °C verrattuna vuoden 1990 lämpötiloihin (Euroopan yhteisöjen komissio 2005, 3).

Merkittävin ihmisen toimintaan liittyvä metaanipäästöjen aiheuttaja on jätehuolto. Jätehuollon aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä kaatopaikoilta vapautuva metaanipitoinen kaatopaikkakaasu aiheuttaa suurimman osan (Sipilä et al. 2003, 147). Jätteen sisältämä biologisesti hajoava orgaaninen aines hajoaa vuosikymmenten kuluessa ja muodostaa kaatopaikkakaasua, joka pääasiassa on metaania. Suomessa kaatopaikoille sijoitetaan vuosittain hieman alle 1,5 miljoonaa tonnia yhdyskuntajätettä ja moninkertainen määrä teollisuusjätettä. Suomen vuotuinen kaatopaikkakaasun tuotannon on arvioitu olevan yli 200 miljoonaa m³ (Kuittinen et al. 2003, 41). Kaatopaikkakaasu muodostaa nykyisten arvioiden mukaan jopa noin kaksi prosenttia Suomen kasvihuonekaasupäästöistä (Pipatti et al. 1996, 16) ja maailmanlaajuisesti 3 - 4 prosenttia kasvihuonekaasupäästöistä. Arvioiden mukaan vuonna 2010 jätehuolto aiheuttaa yli puolet ihmiskunnan aiheuttamista metaanipäästöistä Suomessa. (Eggleston et al. 2006.)

Kaatopaikkakaasun talteenotto ja hyötykäyttö on Suomessa ollut vähäistä verrattuna muihin läntisen Euroopan maihin. Kaatopaikkakaasun hyötykäyttöä rajoittaa niiden muodostumisalueiden eli kaatopaikkojen kaukainen sijainti käyttökohteista, kuten kaukolämpölaitoksista (Pipatti et al. 1996, 16; Tuhkanen 2002, 39). Kaatopaikkakaasun talteenotolla vähennetään kasvi-

huonekaasupäästöjä, mutta vähennetään myös kaasun aiheuttamia hajuhaittoja sekä haitallisten aineiden leviämistä kaatopaikoilta lähiympäristöön. Lisäksi metaanin palo- ja räjähdysalttiutta voidaan hallita paremmin. (Pipatti et al. 1996, 16.) Koska metaani on hiilidioksidia yli 20 kertaa voimakkaampi, mutta huomattavasti lyhyt kestoisempi kasvihuonekaasu, on talteenoton kasvihuoneilmiötä hidastava vaikutus merkittävä. Suomen kaatopaikkojen metaanipäästöjä on mahdollista vähentää eri keinoin 1,5 miljoonaa tonnia hiilidioksidi ekvivalenttina vuodessa. Tästä kaatopaikkakaasun talteenoton osuus olisi noin 0,6 miljoonaa tonnia hiilidioksidi ekvivalenttina. (Sipilä et al. 2003, 156.)

Suotuisten ympäristövaikutusten lisäksi kaatopaikkakaasua kannattaa kerätä sen hyödynnettävyyden takia. Kaatopaikkakaasu on hyödynnettävissä energianlähteenä sen sisältämän metaanin takia. Tyypillisesti kaatopaikkakaasua käytetään sähkön ja lämmön tuotantoon, liikennepolttoaineena, maakaasuverkossa lisäpolttoaineena sekä teollisuusprosesseissa. Erilaisia termisiä sovelluksia tutkitaan, kuten esimerkiksi kaatopaikkakaasun hyödyntämistä pilaantuneen maa-aineksen termisessä käsittelyssä. Kaatopaikkakaasua voidaan pitää uusiutuvana polttoaineena, sillä se muodostuu ihmiskunnan toiminnan sivutuotteena (Knaebel et al. 2002, 87 - 89) biohajoavista jätteistä. Lisäksi biohajoavien jätteiden sisältämä hiili on fossiilisten polttoaineiden hiiltä huomattavasti lyhyemmässä kierrossa. Korvattaessa fossiilisia polttoaineita kaatopaikkakaasulla vähennetään energiantuotannon aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä. (Sipilä et al. 2003, 150.)

Kaatopaikkakaasun keräilyistä ja hyödyntämisestä säädetään Euroopan Unionin kaatopaikkadirektiivissä (1999/31/EY) sekä sitä soveltavassa valtioneuvoston päätöksessä kaatopaikoista (4.9.1997/861, muutettu 18.11.1999/1049, 13.6.2001/552, 10.1.2002/13 ja 23.3.2006/202). Kaatopaikkadirektiivin ja Valtioneuvoston päätöksen tarkoituksena on parantaa kaatopaikkojen tasoa asettamalla vaatimukset muun muassa kaatopaikan suunnittelulle, toiminnalle sekä jälkihoidolle loppusijoituksen päätyttyä. Lainsäädännössä on asetettu kaatopaikan haltijalle velvoite kaatopaikkakaasun hallinnasta. Valtioneuvoston päätöksen (4.9.1997/861) kaatopaikoista liitteen 1 mukaan kaatopaikkakaasun kertymistä ja purkautumista on valvottava samaisen asetuksen liitteen 3 mukaisesti. Kaatopaikkakaasu on kerättävä yhteen ja mahdollisuuksien mukaan käytettävä hyödyksi. Keräysjärjestelmän tulee olla toiminnassa uusilla kaatopaikoilla

käytön alusta saakka ja vanhemmille kaatopaikoille järjestelmä tulee rakentaa vuoden 2007 loppuun mennessä. Mikäli kaasun hyödyntäminen on hankalaa, tulee kaatopaikkakaasu käsitellä polttamalla soihdussa. Päätöksen mukaisesti kaatopaikkakaasun kertymistä ja purkautumisista on seurattava erityisesti niillä kaatopaikoilla, joille on sijoitettu helposti biologisesti hajoavaa, runsaasti kaasua muodostavaa jätettä.

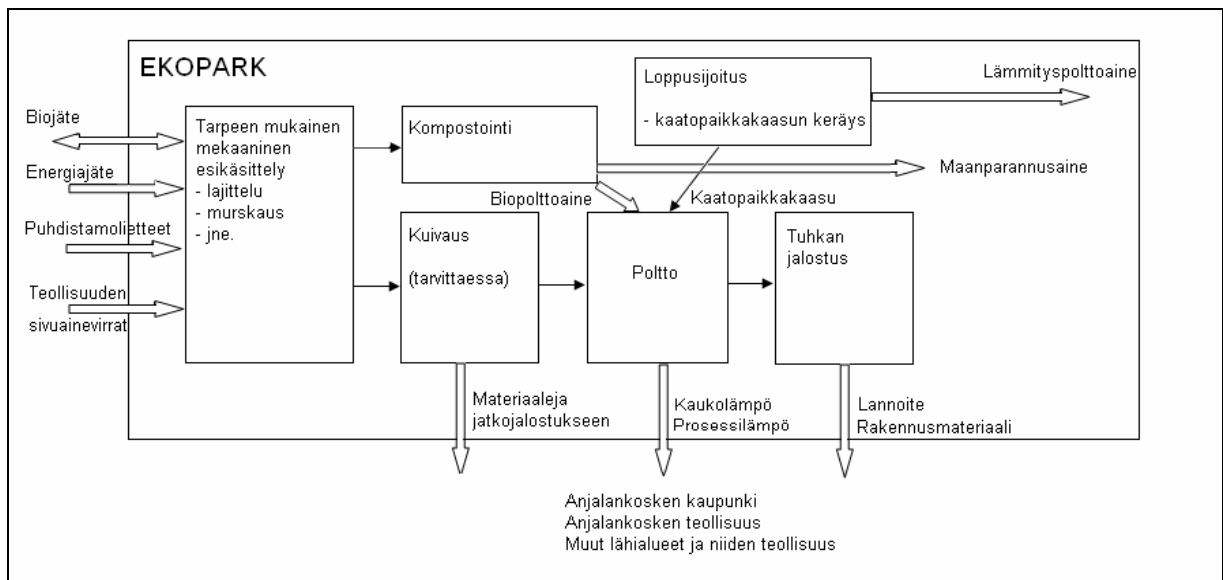
Lisäksi Valtioneuvoston päätöksessä edellytetään, että kaatopaikkakaasun määrä, paine ja kaasun ainesosien pitoisuudet metaanin, hiilidioksidin ja hapen osalta on määritettävä kuukausittain kaatopaikan käyttöaikana ja puolivuositain jälkihoitovaiheessa. Lisäksi velvoitetaan tarkastamaan kaasunkeräysjärjestelmät säännöllisesti. Näistä vaatimuksista voidaan poiketa viranomaisen myöntämin ohjein, mikäli voidaan osoittaa, ettei toiminnasta aiheudu lainsäädännönmukaista haittaa tai vaaraa terveydelle eikä ympäristölle.

Kaatopaikkakaasun tarkkailu- ja hyödyntämisvelvoitteen lisäksi kaatopaikkadirektiivissä ja sitä soveltavissa Valtioneuvoston päätöksissä säädetään biologisesti hajoavan orgaanisen jätteen kaatopaikkasijoituksen huomattavasta vähentämisestä tulevaisuudessa. Tavoitteena on vähentää biohajoavan jätteen loppusijoitusta asteittain: 25 prosenttia vuonna 2006, 50 prosenttia vuonna 2009 ja 65 prosenttia vuonna 2016 vuoden 1994 loppusijoitetun biohajoavan jätteen määrästä (1999/31/EY; Ympäristöministeriö 2004, 2). Koska kaatopaikkakaasun muodostuminen on vuosikymmeniä kestävä prosessi, biohajoavan jätteen kaatopaikkasijoituksen määrän väheneminen näkyy muodostuvissa kaatopaikkakaasumäärissä vasta pitkällä aikavälillä. (Sipilä et al. 2003, 147.) Näin ollen kaatopaikkakaasua tulee edelleen kerätä, käsitellä ja käyttää hyödyksi muuttuvasta jätehuollosta huolimatta.

1.2 Anjalankosken Ekopark

Ekopark on Anjalankoskella Kymenlaaksossa toimiva ympäristöteknologiaan keskittyvä yrityspuisto. Ekopark kehitysprojekti käynnistyi vuonna 2001. Ekopark muodostaa merkittävän jätteiden hyötykäytön kehittämiskeskuksen, joka tarjoaa muun muassa jätteiden käsittelyyn,

tutkimukseen ja tuotekehitykseen liittyviä palveluita. (Ekopark 2007; Pallonen 2007.) Horttanaisen (2006) mukaan Ekoparkin toimintamalli muodostuu jätteen käsittelystä. Ekoparkin yritykset toimivat yhteistyössä muodostaen jakeiden käsittelyketjun mekaanisesta esikäsittelystä hyötykäyttöön. Tavoitteena on muodostaa kokonaisuus, jossa yhdistetään sekä jätteen biologinen ja terminen käsittely sekä hyödyntämättömien jakeiden loppusijoitus. Ekoparkin tulevaisuuden toimintamalli on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Ekoparkin tulevaisuuden toimintamalli (Horttanainen 2006).

Ekoparkissa on useita sisäisiä hankkeita, kuten käynnissä oleva Ekopark tap -hanke, jonka tavoitteena on Kouvolan seudun ympäristö- ja bioenergiatoimialan yritysten kehittämisideoiden ja -tarpeiden vieminen eteenpäin sekä yritysten välisten verkostojen sekä yritysten ja tutkimuskoulutuslaitosten välisten yhteyksien parantaminen. Ekopark on mukana toimijana ja rahoittajana Suomen ensimmäisessä jätehuoltotekniikan professuurihankkeessa, jonka merkittävin tulos on tutkimusyhteistyö Lappeenrannan teknillisen yliopiston kanssa. (Ekopark 2007; Pallonen 2007.)

Tällä hetkellä Ekopark-yrityspiiston muodostaa kolmetoista yritystä: Ekokem-Palvelu Oy, ISS Teollisuuspalvelut Oy, Jarmo Toikka Ky, Jätehuolto Erkki Parkkinen Ky, JM-Ekoturve Oy, Kymenlaakson Jäte Oy, NCC Roads Oy, Puukas Ky, Umacon Oy, JH-Kaivu Ky, T:mi SF-

Kaivuu, Kuljetus Sinkkonen Oy sekä Vapo Oy. Kymenlaakson Jäte Oy on alueellinen jätehuolto-yhtiö, jonka omistaa 13 kuntaa, neljä metsäteollisuusyhtiötä sekä Kouvolan seudun kuntayhtymä. Ekokem-Palvelu Oy harjoittaa yrityspuiston alueella pilaantuneiden maa-ainesten käsittelyä ja väli-varastointia. Jarmo Toikka Ky käsittelee kivi-, asfaltti- ja puujätteitä. ISS Teollisuuspalvelut Oy harjoittaa teollisuuspuhdistusta. JM-Ekoturve käsittelee suodatusjätteitä energijätteeksi ja kompostoi biojätettä. NCC Roads Oy:llä on alueella asfalttiasema. Puukas Ky harjoittaa alueella puusepänteollisuutta. Umacon Oy käsittelee alueella metalliromua. Jätehuolto Erkki Parkkinen Ky varastoi alueella jätteiden kuljetuskalustoa, tulevaisuudessa tarkoituksena on harjoittaa myös rakennusjätteiden lajittelua.

Maarakennusta harjoittavan JH-Kaivu Ky:n ja puutavarankierrättävän T:mi SF-Kaivuun toiminta on vasta alkamassa ja toiminta Ekoparkin alueella on lähinnä kaluston varastointia. Kuljetus Sinkkonen Oy kuljettaa jätevesilietettä sekä kompostoi sitä. Vapo Oy kompostoi Ekoparkissa Kymenlaakson Jäte Oy:n toimialueen kuntien rivi- ja kerrostaloista sekä yrityksistä ja laitoksista erilliskerättävää biojätettä membraanitekniikalla. Työntekijöitä Ekoparkin yrityksissä ja hankkeissa on noin 160 henkilöä. (Ekopark 2007; Pallonen 2007.)

1.3 Työn tavoitteet

Anjalankosken Keltakankaan käytössä olevalla kaatopaikalla kaatopaikkakaasun keräysjärjestelmän rakentaminen on aloitettu vuonna 2007 (Kymenlaakson Jäte Oy 2007, 11). Jätetäyttö on ollut käytössä vasta viitisen vuotta, joten kaatopaikkakaasun muodostuminen on vielä vähäistä. Keltakankaan vanha kaatopaikka on suljettu vuonna 2001. Kaatopaikkakaasun keräys on aloitettu vuonna 2004 ja kaasun tuotanto oli vuonna 2005 noin 0,7 miljoonaa m³ (Kuittinen et al. 2006, 71).

Työn tavoitteena on tarkastella Anjalankosken Keltakankaan vanhalla ja uudella kaatopaikalla muodostuvalle kaatopaikkakaasulle teknisesti ja taloudellisesti kannattavia hyödyntämistekniikoita. Työssä tarkastellaan hyötykäyttövaihtoehtoja, joista on ympäristöllisten hyötyjen li-

säksi myös liiketoiminnallista hyötyä Ekoparkissa toimiville yrityksille. Työssä tarkastellaan kirjallisuuden perusteella kaatopaikkakaasun soveltuvuutta valittuihin hyötykäyttövaihtoehtoihin sekä laskennallisesti Anjalankosken Ekoparkissa muodostuvan kaatopaikkakaasun riittävyttä tai vaihtoehtoisesti kaasun mahdollistamaa käsittelykapasiteetin suuruutta kunkin vaihtoehdon toteuttamiseksi. Lisäksi työssä lasketaan suurin sallittu investointikustannus kullekin tarkastellulle hyötykäyttövaihtoehdolle varioimalla laskennassa käytettäviä parametreja, kuten esimerkiksi sähkön ja lämmön osto- ja myyntihintaa, kaatopaikkakaasun metaanipitoisuutta sekä määrää. Suurin sallittu investointikustannus kuvaa investoinnin määrää, joka tarvittaviin laitteistoihin voidaan sijoittaa, että laitos on investointina kannattava.

Kansallinen ja kansainvälinen lainsäädäntö (VNp 4.9.1997/861, Neuvoston direktiivi 1999/31/EY) velvoittavat kaatopaikan omistajan muodostuvan kaatopaikkakaasun keräilyyn ja hyötykäyttöön. Tämä diplomityö tarjoaa vaihtoehtoja Keltakankaan uuden ja vanhan kaatopaikan kaatopaikkakaasujen hyötykäyttöön. Anjalankosken Ekoparkin yritykset voivat hyödyntää työn tuloksia uuden liiketoiminnan kehittämiseen. Lisäksi työn tuloksia voidaan hyödyntää soveltaen kaikenkokoisilla kaatopaikoilla kaatopaikkakaasun hyödyntämistä suunniteltaessa.

Diplomityö toteutetaan jätehuoltotekniikan professori – Alueellisen tutkimus- ja koulutus-toiminnan kehittämishankkeeseen liittyen. Hankkeen rahoittajina toimivat Kymenlaakson liitto, Etelä-Karjalan liitto, Anjalankosken kaupunki, Anjalankosken Ekopark sekä kaakkoissuomalainen teollisuus. Työn ohjaajina ja tarkastajina toimivat toimitusjohtaja Jukka Köppä Kymenlaakson Jäte Oy:stä sekä professori Mika Horttanainen Lappeenrannan teknillisestä yliopistosta. Diplomityön ohjausryhmään kuuluvat maankäyttökemisti Kirsi Hokkanen Anjalankosken kaupungilta, kehityspäällikkö Pekka Reponen Anjalankosken Stora Enson tehtailta, toimialapäällikkö Raili Pallonen ja projektiassistentti Marja Valtonen Ekopark tap-hankkeesta sekä palvelupäällikkö Hanna Alatalo Kymenlaakson Jäte Oy:stä.

1.4 Työn rakenne ja rajaus

Tarkastelun kohteena ovat työn tavoitteen mukaisesti kaatopaikkakaasun hyötykäyttömahdollisuudet Anjalankosken Ekoparkissa. Työssä tarkastellaan kaatopaikkakaasun soveltuvuutta ja riittävyttä energiantuotantoon. Erityisesti pyritään tarkastelemaan kaatopaikkakaasun hyötykäyttömahdollisuuksia, joita on tutkittu vasta vähän. Tarkasteltavat vaihtoehdot on valittu siten, että ne tarjoavat mahdollisuuksia Ekoparkin palvelujen ja toimintojen kehittämiseen. Hyötykäyttömahdollisuuksista rajataan pois muun muassa kaatopaikkakaasun hyödyntäminen liikennepolttoaineena sekä käsittelytekniikoista nykyisin käytössä oleva soihutpoltto. Pois rajatuista vaihtoehdoista ei ole nähtävissä taloudellista tai liiketoiminnallista hyötyä Ekoparkissa toimiville yrityksille. Tarkastelun tarkemmat rajaukset esitetään hyötykäyttövaihtoehtoja käsittelevissä luvuissa.

Ekoparkin alueen kaatopaikoille on tehty kaksi kaatopaikkakaasun hyödyntämisselvitystä. Vuonna 2001 Electrowatt-Ekonon tekemässä selvityksessä oli mukana Kymenlaakson Jäte Oy, Anjalankosken kaupunki ja Anjalankosken Energia Oy. Selvityksessä tarkasteltiin sekä vanhan että uuden kaatopaikan sekä mahdollisen biojätelaitoksen biokaasupotentiaalia sekä kaasun energiahyötykäyttöä. IP-Tekniikka Oy on vuonna 2005 tehnyt kaasun hyödyntämisselvityksen Kymenlaakson Jäte Oy:n uudella kaatopaikalla muodostuvalle kaatopaikkakaasulle. Selvityksessä on tarkasteltu ainoastaan lämmöntuotantoa. (Electrowatt-Ekono Oy 2001; Suomen IP-Tekniikka Oy 2005.) Maailmanlaajuisesti kaatopaikkakaasun hyötykäyttömahdollisuuksien tutkimus on keskittynyt energiantuotannon sovelluksiin.

Työn rakenne jakautuu kahteen osaan: teoriaan ja laskennalliseen, soveltavaan osaan. Työssä esitetään kirjallisuuden perusteella teoreettinen tausta kaatopaikkakaasun muodostumiselle aina jätteen hajoamisesta muodostumiseen vaikuttaviin tekijöihin luvussa kaksi. Lisäksi teoriaosuudessa eli luvussa kolme tarkastellaan kaatopaikkakaasun tuotannon, talteenoton, puhdistuksen ja hyötykäytön nykytilaa maailmalla, Suomessa ja Anjalankoskella. Soveltavassa osuudessa eli luvussa neljä tarkastellaan teorian pohjalta sekä laskennallisesti työn rajauksen mukaisia kaatopaikkakaasun hyötykäyttömahdollisuuksia Anjalankosken Ekoparkissa.

2 KAATOPAIKKAKAASUN MUODOSTUMINEN

2.1 Jätteen hajoaminen

Kaatopaikkakaasulla tarkoitetaan kaatopaikalle sijoitetusta jätteestä kontrolloimattomasti muodostuvaa biokaasua. Biokaasu muodostuu kolmella eri prosessilla orgaanisesta aineksesta: biologisesti hajoamalla, haihtumalla ja kemiallisten reaktioiden kautta. Erityisesti haihtuvat orgaaniset yhdisteet metaania lukuun ottamatta (NMVOC) voivat muodostua haihtumalla, kun kaatopaikalle sijoitetut orgaaniset yhdisteet muuttuvat nestemäisestä tai kiinteästä olomuodosta höyryksi. Jätteen sisältämät kemikaalit voivat reagoida kemiallisesti jätetäytössä muodostaen haitallisia yhdisteitä kaatopaikkakaasuun. Kaatopaikkakaasun pääkomponentit, metaani ja hiilidioksidi, sekä muutamat muut yhdisteet muodostuvat kaatopaikkatäytössä anaerobisissa eli hapettomissa olosuhteissa orgaanisesta jätteestä biologisen hajoamisen tuloksena. (ATSDR 2001, 3.) Yhdestä yhdyskuntajätetonnista muodostuu kaatopaikkakaasua noin 100 - 200 m³. Yksinkertaistetusti bakteerit hajottavat jätteen orgaanisen aineksen veden läsnä ollessa biohajonneeksi orgaaniseksi aineeksi ja kaasuksi, josta pääosa on metaania ja hiilidioksidia, kuten reaktioyhtälössä R1 on esitetty.



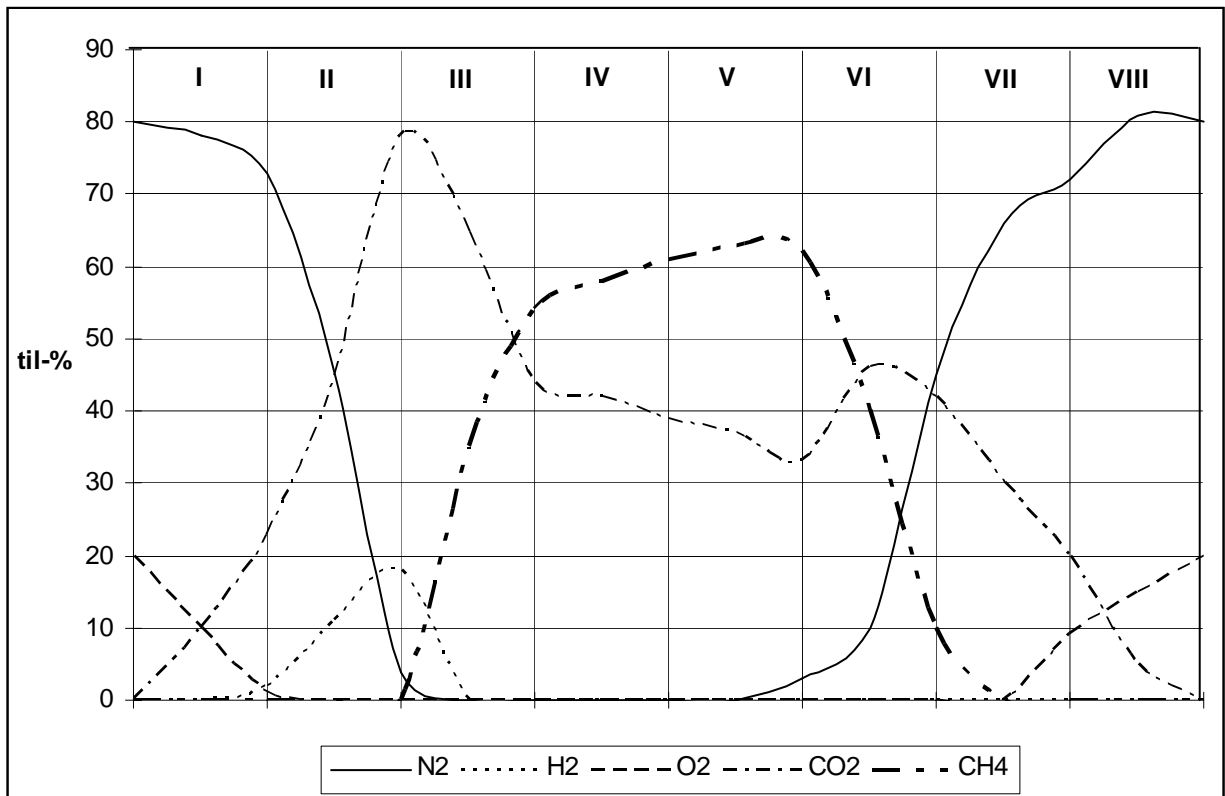
Jätteen hajoaminen ja kaasun muodostuminen kaatopaikalla voidaan jakaa kahdeksaan vaiheeseen. Vaiheet vaikuttavat toisiinsa, eikä niitä voida selvärajaisesti erottaa toisistaan. Kaatopaikkakaasun yhdisteiden pitoisuudet vaihtelevat aiheutuen siitä, mikä jätteen hajoamisketjun vaiheista jätetäytössä on käynnissä. Hajoamisen nopeuden määrittää prosessin hitain vaihe. Ensimmäinen on aerobinen vaihe (**I**) eli hapellisissa olosuhteissa tapahtuvaa jätteen hajoamista. Muodostuva kaasu sisältää lähinnä typpeä, happea, hiilidioksidia ja vesihöyryä. Vaihe kestää tyypillisesti muutamista päivistä kuukausiin riippuen lähinnä jätetäytön ja ympäristön lämpötilasta ja kosteudesta. (Smith et al. 2001, 90; Tchobanoglous 1993, 386.)

Toinen vaihe hajoamisessa on happokäyminen eli fermentaatio (**II**), joka on ensimmäinen anaerobinen vaihe. Se käynnistyy välittömästi aerobisen vaiheen jälkeen. Vaihe koostuu kolmesta toisiaan seuraavasta prosessista. Hydrolyysissä hydrolyyttiset bakteerit hajottavat isomolekyylisen orgaanisen aineen (muun muassa lipidit, polysakkaridit, proteiinit, nukleiinihapot) muiden mikrobien aineenvaihduntaan soveltuviksi liukoisiksi yhdisteiksi, kuten aminohapoiksi, rasvahapoiksi ja monosakkarideiksi. Hydrolyysiä seuraavassa asidogeneesissä rasvanmuodostajabakteerit muuttavat hydrolyysin lopputuotteet hajoaviksi rasvahapoiksi, hiilidioksidiksi ja vedyksi. Kaatopaikkakaasun typpipitoisuus alenee hiilidioksidin ja vedyn muodostuksesta johtuen. Asidogeneesissä muodostuneet tuotteet muuttuvat etikkahappokäymisen eli asetogeneesin kautta etikkahapoksi eli asetaatiksi, joka on metaanintuotannon raaka-aine. Happokäymisvaihe kestää viikoista vuosiin riippuen vallitsevista olosuhteista. (Kettunen 2006, 7; Marttinen et al. 2000, 17; Pipatti et al. 1996, 17; Smith et al. 2001, 90; Tchobanoglous 1993, 386.)

Kolmas hajoamisen ja kaasun muodostuksen vaihe on epästabiili metaanikäyminen (**III**). Mikrobien aineenvaihdunta alentaa happipitoisuutta jätetäytössä ja mahdollistaa metaanibakteerien kasvun. Muodostuvan metaanin pitoisuus kasvaa ja samalla vedyn ja hiilidioksidin pitoisuudet kaatopaikkakaasussa alkavat laskea. Neljännessä vaiheessa epästabiili metaanin tuotanto muuttuu stabiiliksi metaanikäymiseksi (**IV**). Metaanipitoisuus vakiintuu noin 40 - 60 tilavuusprosentin välille. Vetyä ei enää muodostu ja hiilidioksidin muodostuminen vakiintuu hieman pienemmäksi kuin metaanin pitoisuus. Kaasu sisältää myös pieniä määriä, noin 1 - 2 prosenttia, haisevia rikkiyhdisteitä ja haihtuvia rasvahappoja sekä vesihöyryä. Neljäs vaihe kestää 10 - 20 vuotta. (Smith et al. 2001, 90; Pipatti et al. 1996, 17.)

Viidennessä vaiheessa metaanikäyminen alkaa hiipua biologisesti hajoavan orgaanisen aineksen vähetessä (**V**). Kun metaanin muodostuminen vähenee, pääsee jätetäyttöön ilmaa, jolloin sen yläosaan alkaa muodostua aerobisia alueita. Hiilidioksidin ja typen määrä muodostuvassa kaatopaikkakaasussa alkaa lisääntyä. Kuudes vaihe on metaanin hapettuminen (**VI**). Metaanikäyminen on olematonta, jolloin aerobiset alueet jätetäytössä lisääntyvät. Metaania kulkeutuu aerobisten alueiden läpi ja hapettuu hiilidioksidiksi. Metaanipitoisuus kaasussa laskee samalla kun hiilidioksidipitoisuus kasvaa tasaisesti. (Smith et al. 2001, 90.)

Seitsemäs vaihe tapahtuu täysin aerobisissa olosuhteissa ja sitä kutsutaan hiilidioksidivaiheeksi (VII). Kaatopaikkakaasun muodostuminen on ehtynyt biologisesti hajoavan orgaanisen aineksen hajottua ja jätetäytön muututtua jälleen aerobiseksi. Anaerobisissa olosuhteissa hajoamatta jäänyt orgaaninen kiintoaine hajoaa nyt aerobisissa olosuhteissa hiilidioksidiksi. Viimeisessä eli kahdeksannessa vaiheessa kaikki biologisesti hajoava orgaaninen aines on hapetettu, eikä kaatopaikkakaasua enää muodostu. Kaatopaikkakaasun koostumuksen vaihtelut kaasun muodostuksen eri vaiheissa on esitetty kuvassa 2. Kuvassa esitetyt roomalaiset numerot vastaavat tekstissä esitettyjä vaiheiden numeroita. Vaiheiden pituuksia ei ole kuvassa skaalattu niiden keston mukaan.



Kuva 2. Kaatopaikkakaasun koostumuksen vaihtelu hajoamisen ja kaasun muodostuksen eri vaiheissa. Vaiheita ei ole skaalattu niiden keston mukaan (Christensen & Kjeldsen 1995, Smith et al. 2001, 91 mukaan).

Edellä kuvattu jätteen hajoamis- ja kaasun muodostumisvaiheet kuvaavat homogenisoitua jätemassaa. Todellisella kaatopaikalla, jossa jätetäyttö on koostumukseltaan ja rakenteeltaan heterogeeninen, hajoamisketju ja kaasun muodostuminen voivat olla hyvinkin poikkeavat teorettisesta ketjusta. Kunkin vaiheen kesto riippuu vallitsevista olosuhteista, kuten jätteen laadusta, pintarakenteista, jätetäytön tiivistysasteesta ja -tavasta sekä kierrätettävän suodosveden määrästä.

2.2 Muodostumiseen vaikuttavat tekijät

2.2.1 Jätteen ominaisuudet

Jätteen koostumus. Kaatopaikalle sijoitettavan jätteen tulee sisältää biologisesti hajoavaa orgaanista aineista, että metaania muodostuu jätetäytössä. Jätteet voidaan jakaa hitaasti ja nopeasti biohajoaviin jätteisiin. Esimerkiksi keittiöbiojäte, keräyspaperi, pahvi ja puutarhajäte lehtien ja ruohon osalta luetaan nopeasti biohajoaviin jätteisiin. Hitaasti biohajoavia jätteitä ovat tekstiilit, kumi, nahka, puu ja puutarhajätteen puumaiset osat. Yksi merkittävimmistä kaatopaikkakaasun muodostumiseen vaikuttavista jätteen ominaisuuksista on sen koostumus. Eniten kaasun muodostukseen vaikuttavat jätteen hiilipitoisuus ja hiiliyhdisteiden keskimääräinen hapetusluku.

Jätejakeet sisältävät eri osuuksia biokemiallisesti hajoavaa orgaanista hiiltä (DOC), joka on metaanin lähde kaatopaikkatäytössä. Suurin DOC-pitoisuus on jätevesilietteillä, lehtipaperilla ja kartongilla. Märkä keittiö- ja puutarhabiojäte sisältävät suhteellisen vähän biokemiallisesti hajoavaa hiiltä, noin 16 painoprosenttia, ja hidastavat aluksi metaanin tuotantoa voimakkaan happokäymisen takia. Yhdyskuntajätteen kuiva-aineen DOC-pitoisuus on keskimäärin 20 prosenttia, josta noin 25 prosenttia muodostaa metaania, 25 prosenttia hiilidioksidia ja loput 50 prosenttia varastoituvat jätetäyttöön tai liukenevat hiiliyhdisteinä suotovesiin. Koostumus vaikuttaa myös muiden yhdisteiden muodostumiseen jätetäytössä. Esimerkiksi NMVOC-yhdisteitä muodostuu haihtumalla sekä kemiallisilla reaktioilla sitä todennäköisemmin ja suu-

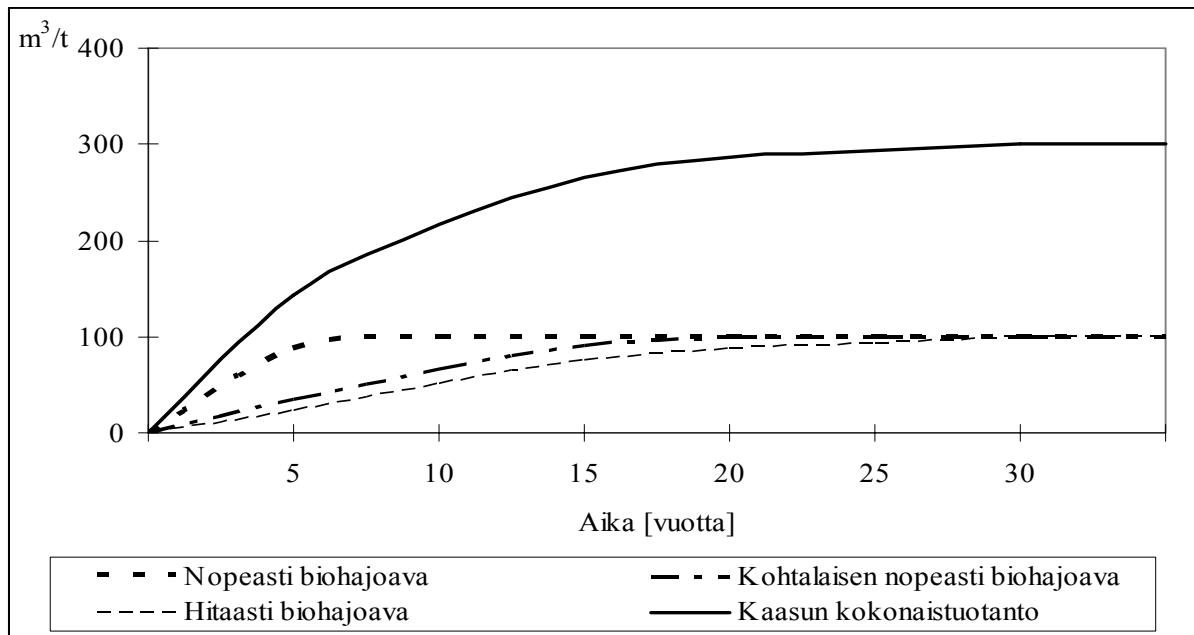
rempina pitoisuuksina, mitä enemmän kaatopaikalle sijoitetaan kemikaalijätteitä. (ATSDR 2001, 6; Pipatti et al. 1996, 20; Tchobanoglous et al. 1993, 389; Tuhkanen 2002, 19.)

Partikkelikoko. Jätteen palakoon pienentäminen murskaamalla lisää jätteen homogeenisuutta, pinta-alaa, vähentää vettä pidättäviä kerroksia jätetäytössä ja tasoittaa kosteuspitoisuutta jätteen stabiloitumisen nopeuttamiseksi. Palakoon pienentäminen ei kuitenkaan lyhyellä aikavälillä kiihdytä metaanin tuotantoa. Jätteen palakoon pienentämisellä voi olla myös käänteinen vaikutus eli se voi kiihdyttää happokäymistä estäen tai viivyttää metaanin muodostumisen alkamisen. Palakoon pienentäminen tehostaa muun muassa hydrolyysiä ja asidogeneesiä, mikäli happokäymisen kiihtyminen kyetään estämään kaasun muodostumisen alkuvaiheessa. (Christensen et al. 1996, 37; Marttinen et al. 2000, 40.)

Tiiveys. Suomessa jätetäytön tavoitetiiveys on noin 700 kg/m^3 . Tiivistämällä säästetään kaatopaikan tilavuutta sekä parannetaan jätteen ja veden kontaktipintaa. Jätetäyttö tiivistyy ja vajoaa biologisen toiminnan tuloksena noin 20 - 25 prosenttia. Luonnollisen tiivistymisen lisäksi jätettä tiivistetään mekaanisesti. Tiivistetyssä jätetäytössä kosteus jakaantuu tasaisemmin ja biologisen toiminnan kontaktipinta-ala muodostuu suuremmaksi kuin tiivistämättömässä jätetäytössä. Liiallisella mekaanisella tiivistämisellä voidaan kuitenkin estää biologinen hajoamistoiminta. Erittäin märässä jätetäytössä tiivistäminen voi johtaa metaanin tuotannon hidastumiseen, sillä sen on todettu kiihdyttävän happokäymistä. (Christensen et al. 1996, 38; Pipatti et al. 1996, 20.)

Ikä. Jätteen hajoaminen alkaa muutamia päiviä tai viikkoja sen loppusijoituksen jälkeen. Nopeasti biohajoavilla jätteillä kaasun tuotanto on runsainta hajoamisen alkuvaiheessa ja tuotanto alkaa hiipua jätteen sisältämän biohajoavan aineksen vähentyessä. Biologisesti hitaasti hajoavilla jätteillä kaasun tuotantopotentiaali on suurimmillaan usein vasta vuosikymmenten kuluttua. Hitaasti biohajoavan jätteen (muun muassa puu, tekstiilit, rakennusjäte) hajoamisaika on 10 - 50 vuotta ja nopeasti biohajoavan jätteen (muun muassa keittiöbiojäte, puutarhajäte) 0,5 - 1,5 vuotta. (World Bank 2004, 18.) Jätteen hajoamisnopeuden vaikutus kaatopaikkakaasun tuotantoon on esitetty kuvassa 3. Jätteen kaasuntuotantopotentiaali ei siis ole suoraan riippuvainen jätteen iästä, vaan lähinnä jätteen hajoamisen nopeudesta. Yleisesti ottaen kaasuntuo-

tanto saavuttaa metanogeenisen vaiheen kahdessa vuodessa loppusijoituksesta ja metaanin tuotannon huippu sijoittuu 5 - 7 vuoteen loppusijoituksesta. Kaasun tuotantoa voi jatkua jopa yli 50 vuotta. Yksinkertaistaen alle 10 vuotta sitten loppusijoitettu jäte tuottaa enemmän kaa-
topaikkakaasua kuin yli 10 vuotta sitten läjitetty. (ATSDR 2001, 6.)



Kuva 3. Kumulatiivinen kaasun tuotanto yhdyskuntajätteen biologisesti hajoavalle orgaaniselle ainekselle (Hoeks 1983, Gendebien et al. 1992, 123 mukaan).

Inhiboivat aineet. Metaanin muodostumisprosessi on erityisen herkkä inhiboiville eli toimintaa estäville aineille. Merkittävimmät prosessia häiritsevät inhibiittorit ovat happi, vety ja sulfaatti. Makroravinteista natrium, kalium, kalsium, magnesium ja ammonium voivat suurina pitoisuuksina (> tuhansia mg/l) vaikuttaa metaanin muodostumiseen heikentävästi. Myös tietyt orgaaniset yhdisteet voivat estää metaanin muodostumisen. Inhiboivat aineet esiintyvät jäte-
täytössä kuitenkin harvoin niin suurina pitoisuuksina, että ne estäisivät metaanin muodostumisen täysin, vaikkakin ne voivat laskea metaanipitoisuutta muodostuvassa kaasussa. (Christensen et al. 1996, 35.)

2.2.2 Vallitsevat olosuhteet

Lämpötila. Lämpötila on anaerobista hajoamista voimakkaasti säätelevä tekijä. Mesofiilinen hajoaminen tapahtuu lämpötila-alueella 30 - 38 °C ja termofiilinen hajoaminen välillä 55 - 60 °C. Optimaalinen lämpötila metaanin tuotannolle kaatopaikkatäytössä on noin 32 - 35 °C. Lisäksi lämpötilan tulee olla mahdollisimman tasainen, vaihtelua saa olla korkeintaan 0,5 °C päivässä. Alle 10 °C lämpötilassa bakteerien toiminta taantuu. Suomessa vallitsevan ilmaston kylmät ajanjaksot vaikuttavat ainoastaan kaatopaikkatäytön yläosissa tapahtuvaan hajoamiseen. Anaerobinen hajoaminen itsessään tuottaa lämpöä, mutta kuitenkin vain 6 - 7 prosenttia vastaavan aerobisen hajoamisen tuottamasta lämmöstä. Lämpötila säätelee jätetäytössä kemiallisten reaktioiden ja haihtumisen kautta vapautuvien kaasujen muodostumista. Lämpötila vaikuttaa myös muiden kaasumaisten yhdisteiden muodostumiseen, esimerkiksi NMVOC-päästö kaksinkertaistuu aina, kun lämpötila nousee noin 7 asteella. (ATSDR 2001, 7; Christensen et al. 1996, 35; Tchobanoglous et al. 1993, 702.)

Kosteus. Anaerobinen hajoaminen vaatii kosteutta, sillä osa reaktioista tapahtuu vedessä tai veden välityksellä. Jätetäytön kosteus riippuu sadannasta, veden haihdunnasta kaatopaikan pinnalta, jätteiden vesisisällöstä, jätetäytön peittämisestä ja pintamateriaalin vedenläpäisevyydestä. Jätetäytön vedenpitävyys ja -varastointikyky riippuvat läjitettävien jätteiden laadusta ja jätteiden koneellisesta tiivistämisestä ja painovoimasta aiheutuvasta tiivistymisestä. Kosteuspitoisuus vaikuttaa merkittävästi jätteen hajoamisasteeseen ja -nopeuteen. Kaatopaikkakaasun muodostuminen on lineaarista kosteuspitoisuuden ollessa välillä 20 - 60 prosenttia. Alle 20 prosentin kosteuspitoisuudella kaasua ei muodostu, koska jätteen hajoamista ei juuri tapahdu. Liian suuri kosteuspitoisuus, yli 75 prosenttia, puolestaan kiihdyttää happojen muodostumista ja siten pH:n alentumista, jolloin metaania tuottavien mikrobien toiminta laantuu. (Kettunen 2006, 6; Pipatti et al. 1996, 21.)

Metaanin muodostukselle optimaalinen kosteuspitoisuus on yli 50 prosenttia. Koska suomalaisten kaatopaikkojen kosteuspitoisuus on tyypillisesti 13 - 50 prosenttia, voidaan metaanin tuotannon kiihdyttämiseksi jätetäytön kosteuspitoisuutta nostaa kierrättämällä kaatopaikkavettä jätetäytössä. Kosteuspitoisuuden kasvun lisäksi veden virtaus kiihdyttää metaanin muodos-

tumista parantamalla kontaktia jätteen, liukoisen ravinnon ja mikrobin välillä. Veden kierrätystä tulee kuitenkin välttää aivan metaanin tuotannon alussa. Kierrätyksen tulee olla tasapainossa hajoamisprosessin kanssa, sillä liian suuret virtaamat poistavat jätetäytöstä puskurikapasiteettia ja mikrobeita. (Kettunen 2006, 6; Pipatti et al. 1996, 21.)

pH. Metaanin muodostuminen kaatopaikkatäytössä on riippuvainen myös vallitsevasta happamuudesta eli pH:sta. Metaanibakteerit toimivat normaalisti pH:n ollessa 6 - 8, happamammissa tai emäksisemmissä olosuhteissa metaanin muodostuminen on hidasta tai sitä ei tapahdu lainkaan. Optimi pH metaanin tuotannolle on 7 eli neutraalit olosuhteet. Happamuutta alentaa muun muassa liian suuresta kosteuspitoisuudesta aiheutuva happojen nopea muodostuminen, joita metanobakteerit eivät ehdi käyttää aineenvaihduntaansa. (Houghton et al. 1996; Pipatti et al. 1996, 21.)

Ravinteet. Anaerobisen hajoamisen edellytyksenä on suotuisa orgaanisen aineksen ja ravinteiden suhde. Tärkeitä ravinteita kaasun muodostukselle ovat typpi ja fosfori, joista fosfori on eniten anaerobista hajoamista rajoittava ravinne. Optimaalinen orgaanisen aineksen suhde kemiallisena hapen kulutuksena suhteutettuna ravinteisiin on COD:N:P=100:0,44:0,08. Vastaa vasti optimaalinen hiili-typpisuhde on 30:1 ja typpi-fosforisuhde 7:1. Anaerobiseen hajoamiseen vaikuttavat myös mikroravinteiden, kuten raudan, kalsiumin, sinkin, kuparin, magnesiumin, bariumin ja sulfaatin pitoisuudet. Yhdyskuntajäte sisältää tyypillisesti riittävästi hajoamisessa tarvittavia makro- ja mikroravinteita, mutta jätetäytön heterogeenisuuden takia kaatopaikoille voi muodostua ravinnepöyhä ja vastaavasti ravinnerikkaita alueita, joilla jätteen hajoamisessa voi esiintyä ongelmia. (Christensen et al. 1996, 34; Pipatti et al. 1996, 21.)

Happi. Anaerobisten bakteerien toiminta, ja sen johdosta metaanin tuotanto estyvät, jos jätetäyttöön pääsee happea. Jätetäytön happipitoisuutta kuvataan redox-potentiaalilla eli hapetus-pelkistyspotentiaalilla. Mitä pienempi redox-arvo on, sitä pienempi on happipitoisuus jätetäytössä. Metaanintuotantobakteereille redox-potentiaalilla tulee olla alle -330 mV optimaalisen metaanin tuotannon ylläpitämiseksi (Christensen et al. 1996, 32). Jätetäyttö voidaan jakaa vertikaalisuuntaisesti karkeasti happipitoisuuden perusteella kolmeen vyöhykkeeseen: 0 - 1,5 metrin syvyydessä aerobinen vyöhyke, 1 - 2,0 metrin syvyydessä transitiivinen vyöhyke ja yli 1,5 metrin

syvyydessä anaerobinen vyöhyke. Transitiivisessa vyöhykkeessä tapahtuu sekä metaanin happettumista että metaanin muodostumista. (Marttinen et al. 2000, 17.)

Vety. Vetyä muodostuu anaerobisessa hajoamisessa sekä happokäymisessä että asetogeneesissä. Happokäymisen bakteerit tuottavat vetyä, hiilidioksidia ja etikkahappoa alhaisessa vedyn osapaineessa, mutta vetyä, hiilidioksidia ja etanolia, voihippaa ja propionihappoa korkeassa vedyn osapaineessa. Voihippo, propionihappo ja etanoli hajoavat asetogeneesissä, mikäli vedyn osapaine on alhainen. Vedyn osapaineen kasvaessa pH laskee, kun happamat voihippo ja propionihappo eivät hajoa. Tämä johtaa edelleen haihtuvien orgaanisten happojen muodostumiseen sekä metaanin tuotannon estymiseen. (Christensen et al. 1996, 33 - 34.)

Sulfaatti. Sekä sulfaatinpelkistäjä- että metaanibakteerit kuluttavat aineenvaihduntaansa etikkahappoa ja vetyä. Sulfaatin esiintyessä jätetäytössä suurina pitoisuuksina, metaanin tuotanto laskee voimakkaasti. Sulfaatti ei ole metaanintuotantoa inhiboiva tekijä, vaan tuotannon aleneminen johtuu bakteerien välisestä kilpailusta käytettävissä olevista ravinteista. (Christensen et al. 1996, 33 - 34.)

2.2.3 Kaatopaikan ominaisuudet

Koko. Kaatopaikkakaasun muodostukseen vaikuttaa kaatopaikan koko, erityisesti pinta-alan ja tilavuuden suhde. Suuri pinta-alan ja tilavuuden suhde tarkoittaa matalaa jätetäyttöä. Matala jätetäyttö on alttiimpi ilmaston aiheuttamalle rasitukselle ja lisää myös aerobisten alueiden esiintymistä jätetäytössä. Altistuminen kylmälle ja kuumalle ilmalle sekä hapelle vähentää metaanin muodostusta ja hidastaa jätteen stabiloitumista. Myös metaanin hapettuminen täytön pintakerroksissa kasvaa. (Pipatti et al. 1996, 20.)

Rakenteet. Kaatopaikan rakenteet vaikuttavat kaatopaikkakaasun tuotantoon. Tiiviillä kaatopaikan pintarakenteella estetään ulkopuolisen veden pääsy jätetäyttöön suotoveden määrän pienentämiseksi. Toisaalta on otettava huomioon, että jätetäytön liiallinen kuivuminen hidastaa jätteen hajoamista sekä estää kaatopaikkakaasun muodostuksen. Tiivis pintakerros voi es-

tää myös kaatopaikkakaasun purkautumisen ilmakehään. Tämä aiheuttaa räjähdysvaaran sekä pintakerroksen vaurioitumisriskin, mikäli kaatopaikkakaasua ei hallitusti johdeta pintakerrosten läpi. (Suomen ympäristökeskus 2001, 22, 51.) Liian huokoinen pintakerros puolestaan päästää happea jätetäytön pintakerrokseen, mikä haittaa jätteen anaerobista hajoamista. Jätetäytön peittäminen päivittäin maa-aineksella lisää kaatopaikan puskurikykyä pH:n muutoksia vastaan (Christensen et al. 1996, 38). Päivittäisen jätesolun peitemateriaalilla voidaan vaikuttaa myös veden kulkeutumiseen ympäristöstä jätetäyttöön (Marttinen et al. 2000, 41).

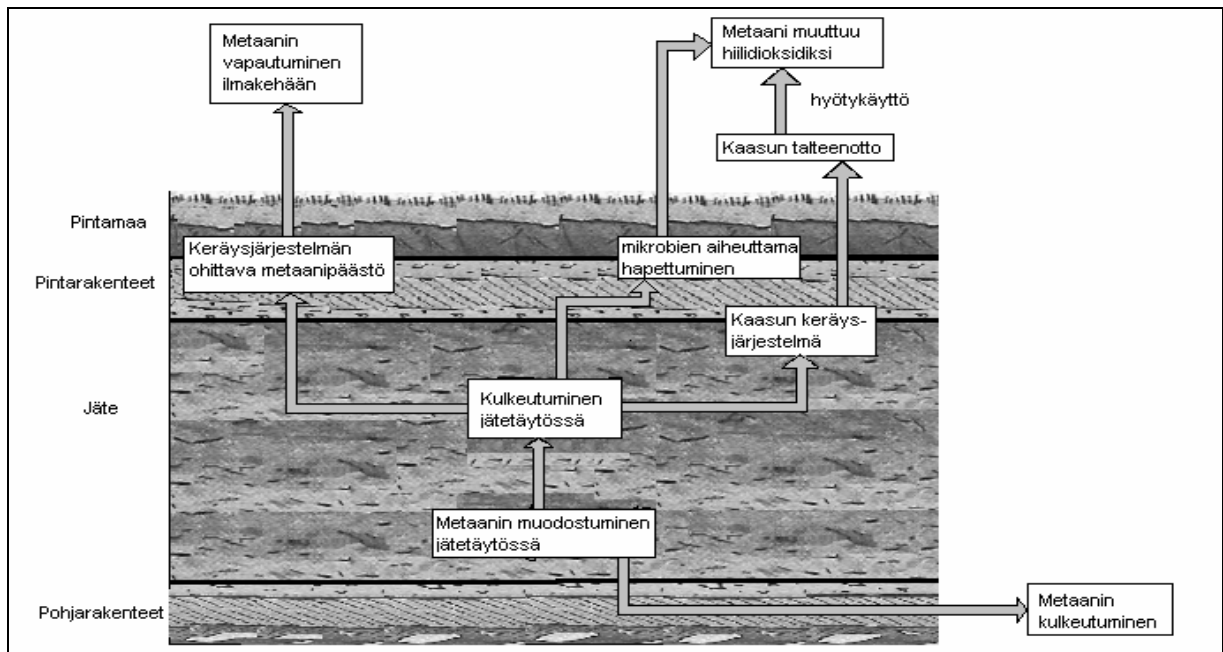
Mikrobikanta. Metaania tuottavat mikrobit ovat herkkiä vallitsevien olosuhteiden muutoksille. Mikrobikanta kasvaa luontaisesti hitaasti, ja sitä voidaankin nopeuttaa esimerkiksi sijoittamalla kaatopaikalle jätevesilietettä, sellulaasientsyymiä tai kierrättämällä kaatopaikan suotovettä. Luontaisesti kasvanut mikrobikanta alkaa tuottaa metaania 6 - 7 vuoden kuluessa, kun taas entsyymilisäyksellä ja veden kierrätyksellä varustetulla kaatopaikalla metaanin tuotanto voi alkaa jo 2 - 3 kuukauden kuluessa jätteen sijoituksesta. Kullekin kaatopaikalle muodostuu oma, yksilöllinen mikrobikanta. Mikrobit eivät ole levittäytyneet jätetäyttöön tasaisesti heterogeenisen jätetäytön takia, vaan mikrobikanta vaihtelee. Vaihtelu aiheutuu jätetäytön muista ominaisuuksista. (Houghton et al. 1996; Korhola et al. 1994, Pipatti et al. 1996, 21 mukaan.)

Jätteen sijoitus. Biologisesti hajoava jäte voidaan sijoittaa kaatopaikalla omalle alueelleen, jolloin kaasun muodostuminen on tehokkaampaa ja nopeampaa pinta-alayksikköä kohden, kuin siinä tapauksessa, että hajoava jäte olisi sijoitettu muun hitaasti hajoavan tai hajoamattoman jätteen sekaan. Myös kaatopaikkakaasun talteenotto on edullisempaa suppeammalta alueelta. Jätevesilietteen sijoituksella kaatopaikalle voidaan tehostaa kaasuntuotantoa sen sisältämän runsaan mikrobikannan ja kosteuden takia. Liian runsas lietteen loppusijoitus voi kuitenkin estää kaasun tuotantoa muodostamalla liian tiiviitä kerrostumia jätetäytössä. (Pipatti et al. 1996, 26.)

Kaasun kulkeutuminen. Kaatopaikkakaasun kulkeutumiseen jätetäytössä vaikuttaa kaasun tuotantonopeus, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden muodostuminen, jätetäytön sisäiset esteet kaasun kulkeutumiselle sekä kaasutaskut, joihin kaasua voi varastoitua. Kaatopaikkakaasu liikkuu jätetäytössä muun muassa diffuusiolla ja advektiolla. (Smith et al. 2001, 89.) Advekti-

olla tarkoitetaan liuenneiden tai suspendoituneiden aineiden kulkeutumista virtaussuunnassa virtaavan veden mukana (Marttinen et al. 2002, 11). Metaani voi kulkeutua jätetäytössä myös vaakasuuntaisesti. Tästä metaanista osa kulkeutuu lopulta jätetäytön pintaosiin ja ilmakehään. (Pipatti et al. 1996, 19.)

Kaikki kaatopaikalla muodostuva kaasu ei kuitenkaan kulkeudu ilmakehään, vaan osa hapetuu hiilidioksidiksi ja vedeksi kaatopaikan pintakerroksissa tai hapellisissa vyöhykkeissä jätetäytön sisällä (Pipatti et al. 1996, 19). Pintakerroksissa hapettuvan metaanin määräksi on arvioitu enintään 10 prosenttia muodostuvasta metaanista (Bogner & Spokas 1993, Pipatin et al. 1996, 19 mukaan). Lisäksi kaasun sisältämät yhdisteet voivat sitoutua maa-aineshiukkasiin tai laimentua jätetäytön sisältämään veteen. Toisaalta osa muodostuvasta metaanista pääsee karkaamaan ilmakehään pintarakenteiden halkeamista ja kaatopaikan reunoilta. Kaatopaikkakaasun karkaamiseen kaatopaikan reunarakenteista vaikuttavat maaperän läpäisevyys, huokoisuus, vesipitoisuus, orgaanisen aineksen pitoisuus sekä halkeamat maa- ja kallioperässä. (Kjeldsen 1996, 91; Pipatti et al. 1996, 19; Smith et al. 2001, 89.) Kuvassa 4 on esitetty metaanin kulkeutuminen kaatopaikan jätetäytössä.



Kuva 4. Metaanin kulkeutuminen kaatopaikan jätetäytössä. (Smith et al. 2001, 91)

2.3 Koostumus ja ominaisuudet

Kaatopaikkakaasu on räjähtävä, tukahduttava, myrkyllinen ja pahalle haiseva kaasu. Se muodostuu jopa satojen erilaisten yhdisteiden seoksesta. Kaatopaikkakaasun koostumus vaihtelee kaatopaikkojen välillä sekä kaatopaikkojen sisällä. Lisäksi yhdisteiden pitoisuudet vaihtelevat johtuen siitä, mikä jätteen hajoamisketjun vaiheista jätetäytössä on käynnissä. Kaatopaikkakaasu sisältää suurimmaksi osaksi metaania ja hiilidioksidia sekä pieniä määriä muita yhdisteitä. Kaasun räjähdysalttius johtuu kaasun sisältämästä metaanista ja tukahduttava vaikutus metaanin ja hiilidioksidin happea syrjäyttävästä kyvystä. (Pipatti et al. 1996, 17; Gendebien et al. 1992, 109.) Kaatopaikkakaasun tyypillinen koostumus on esitetty taulukossa 1.

Metaani ja hiilidioksidi ovat merkittäviä ilmastonmuutosta vahvistavia yhdisteitä. Yksi ilma-kehään vapautuva metaanitonni vastaa 21 tonnia hiilidioksidia sadan vuoden ajanjaksolla. Lisäksi metaanin elinikä ilmakehässä on vain 9 - 15 vuotta eli metaani hajoaa noin 20 kertaa nopeammin kuin hiilidioksidi. Metaanin on arvioitu aiheuttavan noin 40 prosenttia ilmaston lämpenemisestä. Lisäksi metaani hajotessaan muodostaa alailmakehässä haitallista otsonia ja yläilmakehässä vesihöyryä sekä osallistuu otsonikatoa aiheuttaviin prosesseihin. (Alakangas 2000, 145.)

Taulukko 1. Kaatopaikkakaasun tyypillinen koostumus metanogeesivaiheessa. (Tchobanoglous 1993, 382)

Yhdiste	Tilavuusprosenttia
metaani CH ₄	45 - 60
hiilidioksidi CO ₂	40 - 60
typpi N ₂	2 - 5
happi O ₂	0,1 - 1,0
sulfidit, disulfidit, merkaptani jne.	0 - 1,0
ammoniakki, NH ₃	0,1 - 1,0
vety, H	0 - 0,2
hiilimonoksidi, CO	0 - 0,2
muut yhdisteet pieninä pitoisuuksina	0,01 - 0,6

Kaatopaikkakaasun pääkomponenteiksi muodostuu metaani ja hiilidioksidi jo varhaisessa vaiheessa jätteen hajoamisprosessia, noin viikkojen ja kuukausien kuluttua jätteen loppusijoituksen jälkeen. Tyypillinen metaanipitoisuus vaihtelee 45 - 60 tilavuusprosentin välillä, hiilidioksidipitoisuuden ollessa hieman alhaisempi. Pääkomponenttien pitoisuus pysyy melko vakaana metaanituotannon aikana. Metaanipitoisuus kaasussa kasvaa hieman metaanikäymisen voimistuessa vuosien kuluessa. Metaanin ja hiilidioksidin pitoisuudet alkavat laskea vasta, kun anaerobinen hajoaminen alkaa hiipua ja jätetäyttöön pääsee jälleen ilmaa. Suomessa kerättävän kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus vaihtelee välillä 27 - 53 prosenttia. Metaanipitoisuuden kasvaessa hajujen muodostuminen lisääntyy, metaanipäästö ja metaanin kulkeutuminen kasvavat ja kaatopaikkakaasun aiheuttamat ympäristövaikutukset voimistuvat. Metaani on räjähtävä yhdiste kaasuihmaseoksena. Se voi räjähtää, mikäli kaasussa on metaania 5 - 15 tilavuusprosenttia, ja kun kaasuseoksen happipitoisuus on yli 11 tilavuusprosenttia. (Stegmann 1996, 15; Rettenberger et al. 1996, 51 - 52; Kuittinen et al 2006; The World Bank 2004, 35.)

Metaanin ja hiilidioksidin lisäksi kaatopaikkakaasun sisältää muun muassa happea, typpeä, vetyä ja hiilimonoksidia sekä erittäin pieninä pitoisuuksina esimerkiksi haihtuvia orgaanisia yhdisteitä ja hajuja aiheuttavia rikkiyhdisteitä. Nämä pääkomponenttien lisäksi kaasussa esiintyvät yhdisteet ovat pääsääntöisesti haitallisia joko hyötykäytön tai ympäristön ja terveyden kannalta. Esimerkiksi kaatopaikkakaasun korkea happipitoisuus lisää kaatopaikkapalojen riskiä sekä hajujen muodostumista. Yhdisteiden esiintyminen kaasussa riippuu pääsääntöisesti loppusijoitettavan jätteen koostumuksesta. Ne muodostuvat jätteen orgaanisen aineksen hajoessa biologisten ja kemiallisten reaktioiden kautta. Biologisesti muodostuu happiyhdisteitä, rikkiyhdisteitä sekä hiilivetyjä. (Rettenberger et al. 1996, 52 - 57; The World Bank 2004, 35.)

Happiyhdisteitä muodostuu erityisesti jätteen hajoamisen alkuvaiheessa. Näitä yhdisteitä ovat esimerkiksi etanoli, metanoli sekä asetoni. Muodostuvat rikkiyhdisteet aiheuttavat lähinnä hajuja, mutta jotkin yhdisteistä voivat olla myrkyllisiä, kuten merkaptani. Hiilivedyt muodostuvat jätteen hajoamisprosessissa sekä haihtamalla suoraan loppusijoitetuista jätteistä. Suoraan jätteestä peräisin olevia yhdisteitä ovat muun muassa aromaattiset ja klooratut hiilivedyt. Aromaattiset hiilivedyt, kuten bentseeni, tolueeni ja ksyleeni ovat ongelmallisia lähinnä siitä syystä, että kaatopaikan työntekijät altistuvat niiden karsinogeenisille vaikutuksille. Klooratut

hiilivedyt osallistuvat suolahapon muodostukseen, joka aiheuttaa korroosiota kaasun keräily- ja käsittelylaitteistoissa. (Rettenberger et al. 1996, 52 - 57.)

Haitallisten yhdisteiden lisäksi ongelman muodostaa kaatopaikkakaasun sisältämä kosteus. Kosteutta kaatopaikkakaasuun sitoutuu kaasun purkautuessa lämpimästä jätetäytöstä. Vesi esiintyy kaatopaikkakaasussa kylläisessä muodossa. Kaatopaikkakaasun kosteuspitoisuus vaihtelee tyypillisesti 1 - 10 tilavuusprosentin välillä. (Tchobanoglous et al. 1993, 382.) Kaasun sisältämä kosteus on ongelmallinen keräys- ja hyötykäyttölaitteiden kestävyiden kannalta, sillä se aiheuttaa korroosiota yhdessä muiden kaasun sisältämien haitallisten yhdisteiden kanssa. Lisäksi kosteus alentaa kaasun lämpöarvoa ja vaikuttaa siten kaasun hyötykäyttöön.

Kaatopaikkakaasun lämpöarvo on alhainen, kun kaasun ominaisuuksia tarkastellaan pitkällä aikavälillä. Kaatopaikkakaasun lämpöarvo vaihtelee sen metaanipitoisuuden ja palamattomien yhdisteiden pitoisuuksien mukaan. Lisäksi lämpöarvoon vaikuttaa mahdollinen kaatopaikkakaasun käsittely. Käsittelemättömän raajan kaatopaikkakaasun lämpöarvo on alhaisempi kuin puhdistetun korkealaatuisen kaatopaikkakaasun, johtuen kaasun sisältämien muiden yhdisteiden, kuten hiilidioksidin ja veden, pitoisuuksista. Lisäksi jo yli kahden tilavuusprosentin happipitoisuus laimentaa kaatopaikkakaasua, alentaen merkittävästi sen lämpöarvoa. (The World Bank 2004, 35.) Tyypillinen lämpöarvo on välillä 14 - 21 MJ/m³ (Thobanoglous et al. 1993, 382). Metaanipitoisuuden ollessa 50 tilavuusprosenttia, lämpöarvo on noin 16,8 MJ/m³ eli noin puolet vastaavasta maakaasun lämpöarvosta (Lagerkvist 2000, 8).

Kaatopaikkakaasun tiheys riippuu sen koostumuksesta eli sisältävien kaasujen osuuksista ja niiden tiheyksistä. Keskimääräinen kaatopaikkakaasun tiheys on noin 1,02 - 1,07 kg/m³. Kaatopaikkakaasun lämpötila riippuu puolestaan jätetäytön lämpötilasta, ja se voi vaihdella eri osissa jätetäyttöä. Tyypillinen kaasun lämpötila vaihtelee välillä 35 °C - 50 °C. (Thobanoglous et al. 1993, 382.)

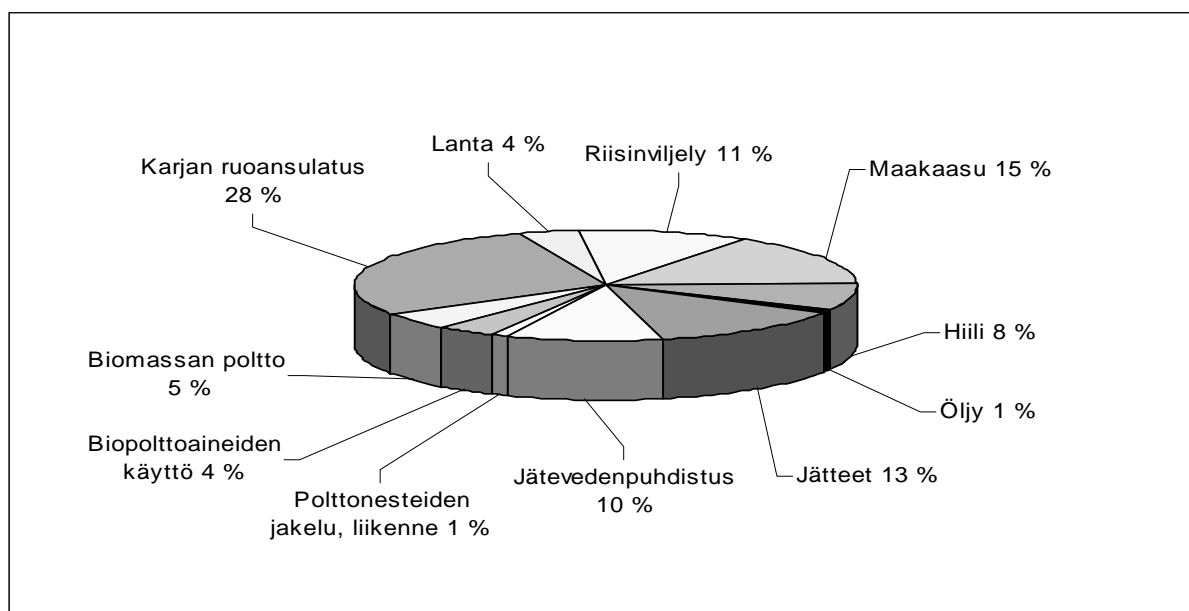
3 KATSAUS NYKYTILANTEeseen

3.1 Kaatopaikkakaasun tuotanto

Ensimmäinen kaatopaikkakaasun keräys- ja käsittelyjärjestelmä rakennettiin jo 1970-luvulla Yhdysvalloissa. Vuosikymmen myöhemmin järjestelmät tulivat Pohjoismaihin, ensin Tanskaan ja Ruotsiin. (Birkeland 2003, 15.) Suomeen ensimmäinen kaatopaikkakaasulaitos rakennettiin Helsingin Vuosaareen vuonna 1990. Maailmalla on käytössä jo yli 950 kaatopaikkakaasulaitosta (v. 2001). Määrällisesti eniten laitoksia on Yhdysvalloissa sekä Saksassa ja Iso-Britanniassa. Pohjoismaissa laitoksia vuonna 2000 oli 139 kaatopaikalla, kun toiminnassa olevien kaatopaikkojen lukumäärä oli 650. Suomessa kaatopaikkakaasun kerääminen on kiihtynyt vuodesta 1997, jota ennen Suomeen oli rakennettu vasta kuusi kaatopaikkakaasulaitosta. Vuoden 1997 jälkeen rakennettiin useita laitoksia lähes vuosittain, vuonna 2002 jopa yhdeksän laitosta. Kaiken kaikkiaan vuonna 2005 Suomessa oli 33 kaatopaikkakaasulaitosta, kun toiminnassa olevia kaatopaikkoja oli noin 80. (Kuittinen et al. 2006, 8 - 11, 41; Lagerkvist 2000, 7; Willumsen 2001.)

Arvioiden mukaan ihmiskunta tuottaa kaatopaikalle loppusijoitettavaa jätettä noin 1,5 miljardia tonnia vuodessa. Tonni esikäsittelemätöntä yhdyskuntajätettä tuottaa kaatopaikkakaasua noin 150 - 200 m³ 20 vuoden kuluessa loppusijoituksesta. Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto (U.S. EPA) on arvioinut ihmiskunnan toiminnasta muodostuvan metaanin määräksi 282,6 miljoonaa tonnia, joista 13 prosenttia eli noin 36,7 miljoonaa tonnia aiheutuu kaatopaikoilta vapautuvasta metaanista vuonna 2000 (ks. kuva 5) ja vuoden 2005 metaanin määräksi 35,2 miljoonaa tonnia eli 747,38 miljoonaa tonnia hiilidioksidi ekvivalenttina (Scheehle 2006). Ihmiskunnan tuottama metaani on arvioiden mukaan 60 prosenttia koko maailmanlaajuisesta metaanipäästöstä, loput 40 prosenttia metaanipäästöistä muodostuu luonnon omista lähteistä kuten suomailta, meristä ja ikiroudan sulamisesta. (U.S. EPA 2006.)

Themelis (et al. 2006, 1249) on arvioinut kaatopaikkasijoituksen metaanin tuotantoa loppusijoitettavan jätemäärän ja yhdyskuntajätetonnista muodostuvan kaasumäärän perusteella. Metaanipäästö on noin 54 miljoonaa tonnia, kun laskennassa käytetään alhaisinta raportoitua metaanin ominaispäästöä $50 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{MSW}}$. Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto arvioi maailman kaatopaikkojen metaanin tuotannon kasvavan vuoteen 2020 mennessä noin seitsemän prosenttia vuoden 1990 tasosta. Kasvuun vaikuttaa merkittävästi kehittyvien maiden väestön kasvu, elintason nousu ja laajeneva teollistuminen, jotka lisäävät kaatopaikoille loppusijoitettavan jätteen määrää. Metaanin muodostuminen kasvaa erityisesti maissa, joissa talous ja väkiluku kasvavat nopeasti. (Scheehle 2006.)



Kuva 5. Metaanipäästön jakautuminen eri ihmiskunnan toiminnoille maailmanlaajuisesti vuonna 2000. (Themelis et al. 2006, 1249)

OECD- ja EU-maat tuottavat tällä hetkellä suurimman osan maailman kaatopaikoilla muodostuvasta metaanista. Arvioiden mukaan Euroopan Unionin alueella loppusijoitettavista jätteistä 68 prosenttia päätyy kaatopaikoille, joissa on kaatopaikkakaasun keräysjärjestelmä (Smith et al. 2001, 101). Vuonna 1990 OECD-maiden osuus metaanipäästöistä oli 49 prosenttia, mutta sen uskotaan pienenevän 32 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä, kun metaanin tuotanto laskee 374,78 miljoonasta tonnista hiilidioksidi ekvivalenttia noin 259 miljoonaa tonniin. Vakaan

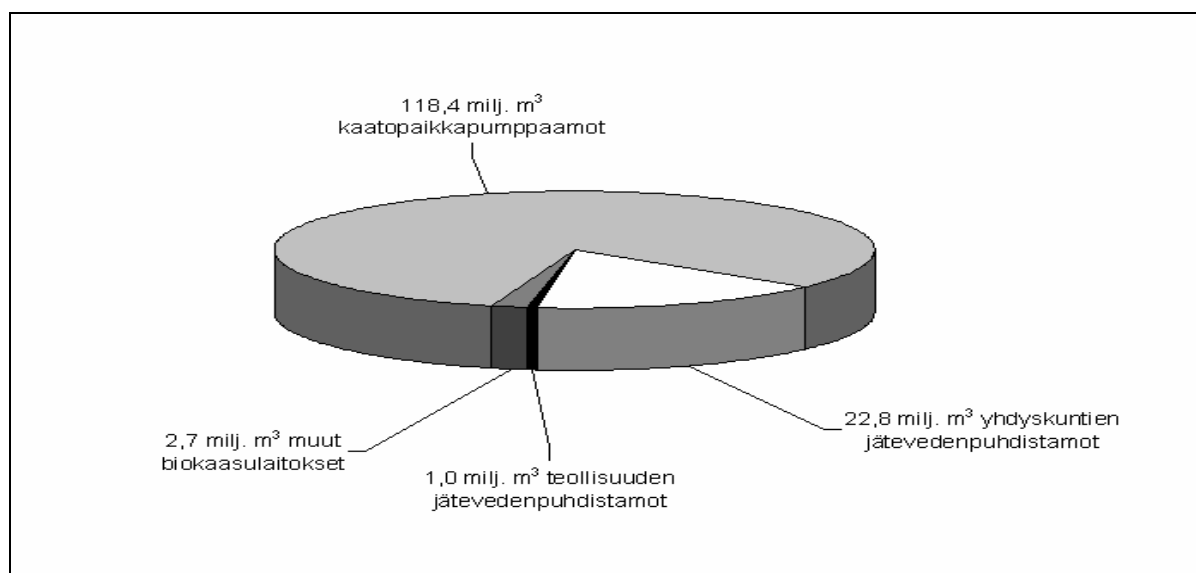
talouden ja hidastuneen kasvun maissa kaatopaikkojen metaanin tuotannon kasvu on kehittyviä maita hitaampaa. Metaanin tuotannon pienenemiseen vaikuttaa kehittynyt jätehuolto sekä kaatopaikkakaasun hyötykäyttö. Lisäksi erityisesti OECD- ja EU-maiden kaatopaikkakaasupäästöjen kehitystä ohjaa EU:n kaatopaikkadirektiivi sekä kansalliset tavoiteohjelmat. Edellä mainitut arvot perustuvat taulukossa 2 esitettyihin Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston laatimiin arvioihin metaanin muodostumisen kehityksestä vuodesta 1990 vuoteen 2020.

Taulukko 2. Arvio kaatopaikkasijoituksen metaanin tuotannosta vuosina 1990 - 2020, miljoonaa tonnia CO₂-ekvivalenttia. (Scheehle 2006)

	1990	2000	2005	2010	2015	2020
Suomi	3,68	3,01	2,91	2,73	2,36	2,00
OECD90 ja EU *)	374,78	299,03	282,21	263,91	260,33	259,26
Maaailma	761,40	730,32	747,38	760,63	788,07	816,86
*) Australia, Itävalta, Belgia, Bulgaria, Kanada, Tsekki, Tanska, Viro, Suomi, Ranska, Saksa, Kreikka, Unkari, Islanti, Irlanti, Italia, Japani, Latvia, Liechtenstein, Liettua, Luxemburg, Monaco, Hollanti, Uusi Seelanti, Norja, Puola, Portugali, Romania, Slovakia, Slovenia, Espanja, Ruotsi, Sveitsi, Turkki, Iso-Britannia, Yhdysvallat, muut OECD-maat						

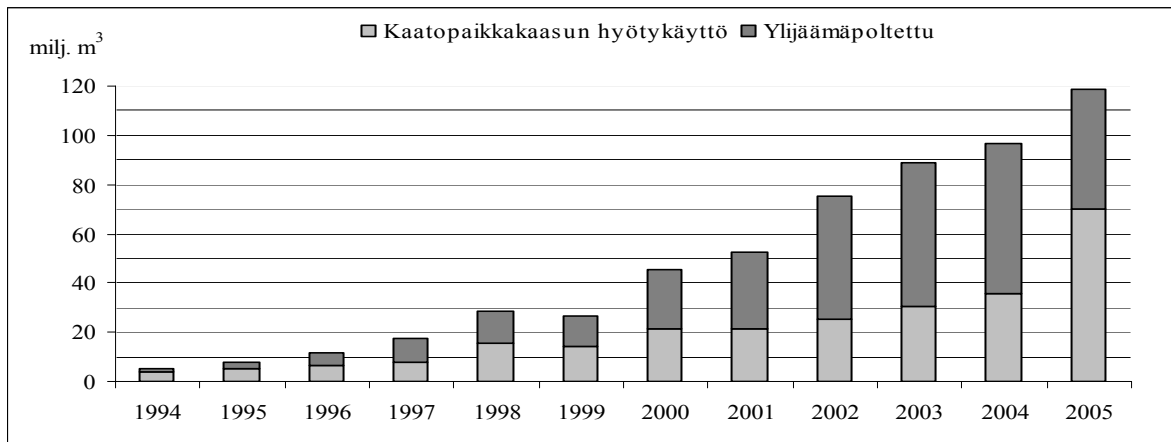
Suomen metaanin tuotannosta 54 prosenttia muodostuu kaatopaikoilla ja jätevedenpuhdistamoilla, 38 prosenttia karjataloudesta eli karjan ruoansulatuksesta ja lannasta, ja loput 7 prosenttia energiantuotannossa. Suomalaisen kaupungin keskikokoinen kaatopaikka tuottaa noin 200 - 400 m³ kaatopaikkakaasua tunnissa. Suomalaisten arvioiden mukaan suomalaisilla kaatopaikoilla muodostuu kaatopaikkakaasua yli 200 miljoonaa m³ vuodessa. Vuonna 2005 Suomessa kerättiin talteen noin 144,9 miljoonaa m³ biokaasua, josta noin 80 prosenttia eli 118,5 miljoonaa m³ oli kaatopaikkalaitoksista ja loput noin 20 prosenttia teollisuuden ja yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilta sekä muilta biokaasulaitoksilta, kuten maataloudesta. Biokaasun tuotannon jakautuminen eri biokaasulaitosmuodoille on esitetty kuvassa 6. Pohjoismaiden suurimman kaatopaikan, Espoon Ämmäsuon kaatopaikkakaasun tuotanto on yli puolet koko Suomen kaatopaikkakaasun tuotannosta. Kerätystä kaatopaikkakaasusta noin 70,3 miljoonaa m³ hyödynnettiin sähkön- ja lämmöntuotannossa ja loput poltettiin soihdussa vuonna 2005. (Alakangas 2000, 145; Kuittinen et al. 2006.)

Elektrowatt-Ekono on vuonna 2003 arvioinut, että Suomen kaatopaikkojen biokaasupotentiaali vuonna 2010 on noin 160 miljoonaa m³ eli 720 GWh. Elektrowatt-Ekonon mukaan kaasun talteenoton kannalta merkittävimmät kaatopaikkapumppaamot ovat jo toiminnassa, ja edellä mainitun biokaasupotentiaalin saavuttaminen vaatii noin 50 kaatopaikkakaasupumppaamon lisäystä. Lisäpotentiaali muodostuu suhteellisen pienistä, noin 2 - 5 hehtaarin kaatopaikoista sekä vanhoista kaatopaikoista, joita Valtioneuvoston päätös (861/1997) ei koske. (Ohlström & Savolainen 2005, 51 mukaan.)



Kuva 6. Biokaasun tuotanto laitostyypeittäin vuonna 2005. (Kuittinen et al. 2006, 10)

Taulukossa 2 esitettyjen Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston arvioiden mukaan Suomen metaanin tuotanto laskee yli 40 prosenttia vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä, jolloin metaanituotanto olisi 2,0 miljoonaa tonnia CO₂-ekvivalenttia eli noin 130 miljoonaa m³ metaania. Kuvassa 7 on esitetty suomalaisten kaatopaikkakaasulaitosten tuottaman kaasun määrän kehitys vuodesta 1994 vuoteen 2005. Suomen kaatopaikkojen kaasun tuotanto on kasvanut lähes lineaarisesti, ja kasvu on voimistunut vuoden 1997 jälkeen, kun kaatopaikkakaasulaitosten rakentaminen kiihtyi. Kaatopaikkakaasun hyötykäyttö on pysynyt suhteellisen tasaisena aina vuoteen 2005 saakka, jolloin sen hyötykäyttöä on kaatopaikoilla lisätty entisestään. Kaasun lisääntynyt hyötykäyttö on vähentänyt kaasun soih tupoltta.



Kuva 7. Kaatopaikkalaitosten tuottaman kaasun määrän kehitys vuosina 1994 - 2005. (Kuittinen et al. 2006, 9)

3.2 Kaatopaikkakaasun talteenotto

Kaatopaikkakaasu ei varastoidu jätetäyttöön. Kaatopaikkakaasun talteenotto aloitetaan usein vasta, kun jätteen läjitys kaatopaikalle on lopetettu, jolloin metaania on vapautunut ilmakehään useiden vuosien ajan. Kaatopaikkakaasun talteenotolla vähennetään kasvihuonekaasupäästöjä, kaasusta aiheutuvia hajuhaittoja, metaanin aiheuttamaa palo- ja räjähdysvaaraa kaatopaikalla, haitallisten aineiden leviämistä ympäristöön sekä kasvillisuusvaurioita (Pipatti et al. 1996, 26). Talteen otetulla kaasulla voidaan tuottaa sähköä ja lämpöä, sitä voidaan käyttää teollisuuden raaka-aineena, jalostaa liikennepolttoaineeksi tai käyttää termisten käsittelymenetelmien polttoaineena.

Kaasun talteenottojärjestelmä koostuu pääsääntöisesti imukaivoista, kokoojaputkistoista ja -kaivoista sekä pumppaamosta sekä käsittelylaitteistoista. Kaasun hyötykäytöstä riippuen tarvitaan lisäksi erilaisia vedenpoisto- sekä mittauslaitteistoja. Imukaivot voidaan asentaa joko vaakaan tai pystyyn jätetäytön sisään. Kalanruotokuvioisesti tai ympyrän muotoon asennettuja kokoojaputkistoja pitkin kaatopaikkakaasu siirretään pumppaamolle. Pumppaamalla muodostetaan alipaine kokoojaputkistoon kaasun siirtämiseksi jätetäytöstä. Pumputta kaasua johdetaan ylipaineisena hyötykäyttöön tai soihtupolttoon. (Lagerkvist 2000, 15.)

Pumppaamon aiheuttamalla alipaineella on tärkeä rooli keräysjärjestelmän toimivuuden ja tehokkuuden kannalta. Liian suuri alipaine ja suuri kaasun virtausnopeus keräysputkistoissa aiheuttavat jätetäytön epätasaista painumista sekä ilman tunkeutumista jätetäyttöön, jonka seurauksena metaanin tuotanto häiriintyy ja kaatopaikkakaasun happi- ja typpipitoisuus kasvaa. Jätetäyttöön päässen ilman takia myös kaatopaikkapalojen riski kasvaa ja haisevien yhdisteiden muodostuminen lisääntyy. Toisaalta liian pieni alipaine ja alhainen kaasun virtausnopeus aiheuttaa myös haisevien yhdisteiden muodostumista, kun kaatopaikkakaasun talteenottojärjestelmä on tehoton ja sen toiminnassa esiintyy ongelmia, kuten tukkeumia. Kaatopaikkakaasua vapautuu ilmakehään hallitsemattomasti, josta aiheutuu suuri metaanipäästö ympäristöön. Päästö aiheuttaa paikallisesti ympäristöongelmia. (The World Bank 2004, 35.)

Talteenottojärjestelmiä on kahta tyyppiä: vertikaaleja ja horisontaaleja. Vertikaaleja eli pystysuoraan asennettavia kaasunkeräyskaivoja käytetään niiden helpon asennuksen takia. Kaivot porataan kaatopaikkatäyttöön sen saavutettua maksimikorkeutensa tai täytön aikana, jolloin säästetään porauskustannuksissa. Ongelmana pystysuuntaisissa kaivoissa on niiden suhteellisen pieni vaikutusalue, jolloin kaivoja on asennettava tiheään tehokkaan talteenoton varmistamiseksi. Talteenoton tehokkuutta voidaan parantaa täyttämällä kaatopaikkaa osastoittain ja aloittamalla kaasun keräys jo täytön aikana. (Pipatti et al. 1996, 26.)

Horisontaalisessa keräysjärjestelmässä imukaivot asennetaan täytön aikana, ja kaasun talteenotto voidaan aloittaa, kun täytön korkeus on kolme metriä. Putkistoja asennetaan useaan kerrokseen 6 - 10 metrin päähän toisistaan. Horisontaalisen keräysjärjestelmän tehokkuus on arvioiden mukaan 20 prosenttia parempi kuin vertikaalisten tehokkuus. Toisaalta järjestelmän asennus on kalliimpaa ja toiminta häiriöherkempää verrattuna vertikaaliseen järjestelmään. Merkittävin horisontaalisten keräyskaivojen toimintaa haittaava tekijä on biologisesta toiminnasta aiheutuva jätetäytön vajoaminen. (Pipatti et al. 1996, 26.)

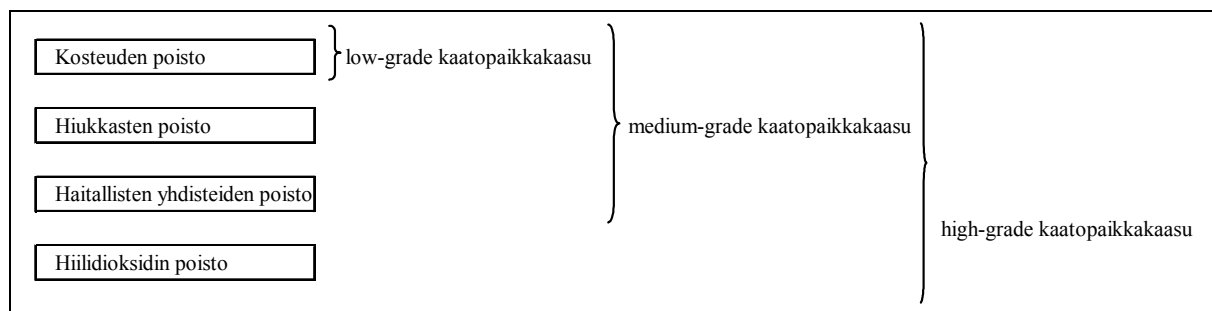
Keräysjärjestelmän tehokkuuden määrittäminen on erittäin hankalaa, koska tarkkoja mittaus- ja laskentamenetelmiä kaasun muodostumiselle ja ilmakehään vapautumiselle ei ole. Talteenoton kokonaistehokkuuteen vaikuttaa missä vaiheessa kaasun talteenotto jätetäytöstä on aloitettu, mitä talteenottomenetelmää käytetään ja kuinka täytön pintarakenne estää metaanihävi-

öiden muodostumisen (Pipatti 1997, 43). Ilmatieteenlaitos on kehittänyt mittalaitteiston, jolla voidaan jatkuvatoimisesti tarkkailla kaatopaikkojen kasvihuonekaasupäästöjä. Mittalaitteiston tuottamia tuloksia voidaan hyödyntää pintarakenteiden sekä kaasun keräysjärjestelmän suunnittelussa ja rakentamisessa, sekä kaatopaikan jälkitarkkailussa. (Ilmatieteen laitos 2004.)

Kaatopaikkakaasun keräystehokkuudesta on tehty useita tutkimuksia ja arvioita. Oonk (1994) on tutkimuksessaan todennut, että pystysuorilla kaasukaivoilla, jotka on asennettu kaatopaikan sulkemisen jälkeen, kaasun talteenottotehokkuus on keskimäärin 39 prosenttia. Osastoittain pystytetyillä pystysuorilla kaasukaivoilla vastaava talteenottotehokkuus on noin 55 prosenttia, horisontaalisella talteenottojärjestelmällä noin 45 prosenttia ja pintaan asennetuilla salaojaputkilla noin 30 prosenttia. (ks. Pipatti et al. 1996, 27.) Moderneilla ja nykymääräysten mukaan perustetuilla kaatopaikoilla kaatopaikkakaasun talteenottotehokkuus voi olla jopa 70 - 90 prosenttia. EU:n laajuisesti on arvioitu, että 68 prosentilla toiminnassa olevilla kaatopaikoilla on kaasun keräysjärjestelmät ja kaasun keräystehokkuus on keskimäärin 54 prosenttia. (Smith et al. 2001, 101.) Koska talteenotossa ei pystytä saavuttamaan 100 prosentin tehokkuutta, kaatopaikkakaasua pääsee vapautumaan ilmakehään keräysjärjestelmän ohi.

3.3 Kaatopaikkakaasun puhdistus

Kaatopaikkakaasun puhdistamisen tarve riippuu sen hyötykäyttötavasta. Pääsääntöisesti kaatopaikkakaasusta pyritään poistamaan sen hyötykäyttöä haittaavat yhdisteet, kuten kosteus, hiukkaset, korroosiota aiheuttavat yhdisteet ja hiilidioksidi. Metaanipitoisuuden ollessa alle 35 - 40 prosenttia ja kaasun muodostuksen ollessa suhteellisen alhainen, 30 - 50 m³/h, kaatopaikkakaasun käsittely tulee teknisesti ja taloudellisesti kannattamattomaksi. (Haubrichs et al. 2005, 408 - 409.) Kaatopaikkakaasua voidaan jakaa kolmeen luokkaan puhdistamisasteen perusteella. Nämä luokat ovat: *low-grade*, *medium-grade* ja *high-grade*. Kuvassa 8 on esitetty kaatopaikkakaasun luokittelu puhdistusasteen perusteella.



Kuva 8. Kaatopaikkakaasun luokittelu puhdistusasteen perusteella. (Lagerkvist 2000, 33)

Low-grade eli niin kutsuttu raaka kaatopaikkakaasu vaatii vähiten puhdistusta. Kaasun sisältämä kosteus voidaan poistaa osana kaasunkeräysjärjestelmää muun muassa erilaisilla mekaanisilla kosteuden erottimilla, jäädyttämällä kaasun lämpötila lähelle 0 °C, adsorboimalla kosteus esimerkiksi glykoliin tai absorboimalla vesi siligageeliin, aluminiumoksiidiin tai silikaattiyhdisteisiin. Alennetun kosteuspitoisuuden jälkeen kaasu soveltuu lämmöntuotantoon kaukolämpölaitoksissa, höyryntuotannon polttoaineeksi sekä sähköntuotantoon höyryturbiinilla. Useimmissa laitteistoissa kosteuden poiston lisäksi kaasun hiukkaspitoisuus alenee. *Low-grade* kaasulla on alhainen lämpöarvo, ja sen sisältämät haitalliset yhdisteet voivat aiheuttaa korroosiota laitteistoissa. (Lagerkvist 2000, 8 - 9, 34.)

Medium-grade kaatopaikkakaasu voidaan jalostaa *low-grade* kaasusta alentamalla kosteuspitoisuutta edelleen, poistamalla hiukkaset sekä haitallisia yhdisteitä. Kaasusta poistetaan muun muassa haihtuvat orgaaniset yhdisteet, merkaptaanit, rikkiyhdisteet ja kosteus erilaisilla pesu- ja suodatuslaitteistoilla sekä kosteudenpoistajilla. Hiukkaset poistetaan suodattimilla. Osa kaasun sisältämistä hiukkasista erottuu jo poistettaessa kaasun sisältämää vettä. Erityisesti haihtuville orgaanisille yhdisteille ja hiilivedyille suodatinmateriaalina käytetään aktiivihiihtä. Aktiivihiihi absorboi myös hiukkasia sekä kosteutta kaasusta. Selektiivisillä liuottimilla voidaan erityisesti absorboida vetysulfideja, hiilidioksidia ja hiilivetyjä. *Medium-grade* kaasua voidaan käyttää tehokkaammin energiantuotantoon kuin *low-grade* kaasua. Kaasulla on lähes sama lämpöarvo kuin raaka'inkin kaasulla, mutta sen sähkön- ja lämmöntuotannon hyötysuhde kasvaa ja käytettävyys monipuolistuu, myös kaasun korrodoivat vaikutukset jäävät pienemmäksi. Kaasua voidaan hyödyntää lämmön- ja sähköntuotantoon mäntämoottoreilla, mikroturbiineilla

ja kaasuturbiineilla, sekä yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon sekä samoihin prosesseihin kuin *low-grade* kaasua. (Lagerkvist 2000, 10 - 12.)

High-grade kaatopaikkakaasu vaatii eniten käsittelyä ennen hyötykäyttöä. Kaasu puhdistetaan kuten *medium-grade* kaasu, ja sen lisäksi kaasun pääkomponentit metaani ja hiilidioksidi erotetaan toisistaan esimerkiksi adsorptiolla tai membraanierotuksella. Erotetun metaanin lämpöarvo on noin 37,3 MJ/m³. Erotuksen jälkeen metaani voidaan esimerkiksi syöttää maakaasuverkostoon tai käyttää liikennepolttoaineena. *High-grade* kaasua voidaan käyttää lisäksi polttokennoissa sekä kemianteollisuuden tuotteiden jalostuksessa, kuten metanolin valmistuksessa. Erotettu hiilidioksidi voidaan hyödyntää teollisuuden raaka-aineena. (Lagerkvist 2000, 12 - 14.)

3.4 Kaatopaikkakaasun hyötykäyttö

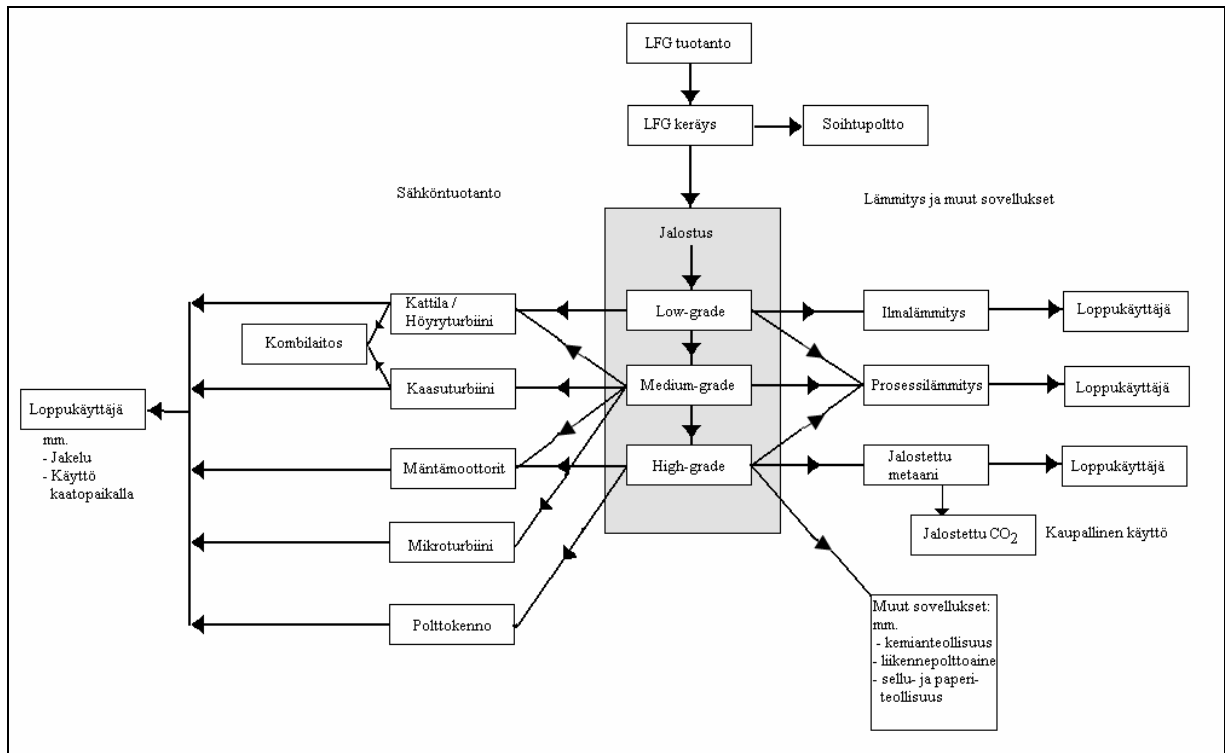
Kaatopaikkakaasu muodostaa merkittävän osan ihmisperäisistä metaanipäästöistä koko maapallolla. Kaatopaikkakaasun keräämisellä ja hyötykäytöllä vähennetään paikallisesti työntekijöiden altistumista kaasun sisältämille haitallisille yhdisteille, kasvillisuusvaurioita, hajuhaittoja, kaatopaikkapalojen riskiä sekä fossiilisten polttoaineiden käyttöä paikallisessa energiantuotannossa. Maailmanlaajuisesti kaatopaikkakaasun hyötykäytöllä alennetaan kasvihuonekaasupäästöjä ja vaikutetaan siten heikentävästi ilmastonmuutokseen. Lisäksi kaasun hyödyntämisestä voidaan paikallisesti saada taloudellista hyötyä.

Kaatopaikkakaasun muodostumista voidaan vähentää rajoittamalla biologisesti hajoavan orgaanisen jätteen loppusijoitusta tai esikäsittämällä biologisesti hajoava jäte ennen loppusijoitusta. Edellä mainittujen toimenpiteiden vaikutukset näkyvät muodostuvissa päästöissä vasta vuosien kuluttua. Nopeasti kaatopaikkakaasupäästöjä voidaan hallita ainoastaan ottamalla kaasu talteen tai käyttämällä metaania hapettavaa kaatopaikan pintakerrosratkaisua. (Tuhkanen 2002, 11.) EU:n kaatopaikkadirektiivi velvoittaa keräämään kaatopaikkakaasun talteen ja hyö-

dyntämään sen mahdollisuuksien mukaan. Mikäli kaasun hyödyntäminen on hankalaa, tulee kaatopaikkakaasu käsitellä polttamalla soihdussa.

Yksinkertaisin kaatopaikkakaasun käsittelytekniikka on polttaa se ilman haitta-aineiden poistamista soihdussa metaanin voimakkaan kasvihuoneilmiötä voimistavan vaikutuksen pienentämiseksi. Haubrichsin (et al. 2005, 408 - 409) mukaan soihtupoltto on kannattavaa metaanipitoisuuden ollessa vähintään 20 - 25 prosenttia ja kaasun määrän vähintään 10 - 15 m³/h. Tätä alhaisemmilla arvoilla kaatopaikkakaasu on kannattavinta hapettaa jätetäytön pintakerroksessa. Soihtun hajotustehokkuus on 98 - 99,5 prosenttia. Toisaalta jalostettuna kaatopaikkakaasua voidaan käyttää polttoaineena kattiloissa ja moottoreissa. Kaasun jalostaminen energiantuotantoon soveltuvaksi voi kuitenkin olla huomattavasti kalliimpaa kuin soihtupoltto riippuen kaasun sisältämistä epäpuhtauksista. Mikäli kaasu sisältää muun muassa VOC-yhdisteitä tai piitä sisältäviä yhdisteitä, voivat laitteistojen huoltokustannukset nousta merkittäviksi. (Knaebel et al. 2002, 87 - 89.)

Kaatopaikkakaasua käytetään tyypillisesti sähkön- ja lämmöntuotannossa, yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa, polttoaineena teollisuusprosesseissa, kuten tiilenvalmistuksessa, sekä liikennepolttoaineena. Teknisesti kaatopaikkakaasua voidaan hyödyntää kaikissa maa-kaasulle suunnitelluissa laitetekniikoissa ja joissakin nestemäisillä polttoaineilla, kuten neste-kaasulla ja öljyllä, toimivissa ratkaisussa (Ohlström et al. 2005, 49). Kuvassa 9 on esitetty kaatopaikkakaasun perinteiset hyötykäyttömuodot jaoteltuna kaasun laadun mukaan. Energiahyötykäyttö eli kaatopaikkakaasun käyttö sähkön- ja lämmöntuotantoon on tutkituin kaatopaikkakaasun hyötykäyttömuoto. Vuonna 2005 Suomessa hyödynnettiin kaatopaikkakaasua noin 70,3 miljoonaa m³, jolla tuotettiin lämpöä 289 GWh ja sähköä 9,5 GWh. Lämpöä Suomessa tuottaa 19 kaatopaikkalaitosta, sähköä yksi laitos, yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa kaatopaikkakaasua hyödynnetään kolmessa laitoksessa ja kymmenessä laitoksessa kaatopaikkakaasu poltetaan soihdussa. Sähkön ja lämmön tuotannon lisäksi kaatopaikkakaasua on Suomessa hyödynnetty vähäisiä määriä teollisuusprosesseissa, muun muassa vuorivillan valmistuksessa. (Kuittinen et al. 2006.)



Kuva 9. Kaatopaikkakaasun perinteiset hyötykäyttömuodot ovat sähkön- ja lämmöntuotannon eri vaihtoehtoja. (The World Bank 2004, 40)

3.4.1 Käyttö energiantuotannossa

Kaatopaikkakaasu sisältää useita kaasukomponentteja, mutta ainoastaan metaani on hyödynnettävissä energiantuotannossa. Yksi kuutiometri kaatopaikkakaasua, jonka metaanipitoisuus on 60 prosenttia ja hiilidioksidipitoisuus 40 prosenttia, vastaa noin 0,5 litraa dieselöljyä. (Pipatti et al. 1996, 38.) Kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus ja muodostuvan kaasun määrä vaihtelevat biohajoavan orgaanisen aineksen hajoamisvaiheen mukaan. Vaihtelusta johtuen energiantuotanto kaatopaikkakaasulla on rajoitettua. Kaatopaikkakaasua voidaan pitää uusiutuvana energiana, ja käytettynä energiantuotannossa korvaamassa fossiilisia polttoaineita, vähennetään energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä. Suomessa kaatopaikkakaasusta saatava energiamäärä on arvioiden mukaan alle 300 GWh. Suomen primäärienergian kulutus vuonna 2006 oli Tilastokeskuksen (2007b) mukaan on noin 390 TWh, joten kaatopaikkakaasun hyötykäytön vaikutus energiantuotannon päästöjen vähentymiseen jää melko pieneksi. Paikallises-

ti kaatopaikkakaasun energiahyötykäytöllä voi kuitenkin olla merkitystä. (Sipilä et al. 2003, 150; Haubrichs et al. 2005, 408 - 409.)

Kaatopaikkakaasun energiahyötykäytössä muodostuu tavanomaisia palamisen päästöjä, kuten hiilidioksidia, rikin oksideja, typen oksideja ja hiukkasia. Hiilidioksidipäästö muodostuu pääasiassa metaanin palamisesta, mutta pieni osa, alle yksi prosentti muodostuu NMVOC-yhdisteiden palamisesta. Rikinoksiedeita muodostuu sitä enemmän, mitä enemmän kaatopaikkakaasu sisältää rikkiyhdisteitä. Rikinoksidipäästöt voidaan kuitenkin hallita poistamalla kaasusta rikkiyhdisteet ennen kaasun polttamista. Kaatopaikkakaasun palamisessa voi muodostua myös suolahappoa klooratuista yhdisteistä, mikäli niitä ei ole poistettu ennen kaasun energiahyötykäyttöä. (U.S. EPA 1995.)

Sähköntuotanto. Gendebienin (1992) mukaan taloudellisin vaihtoehto kaatopaikkakaasun energiantuotantovaihtoehtoista on tuottaa kaatopaikkakaasulla sähköä joko lämmön talteenotolla tai ilman. Kaatopaikkakaasun käyttö sähköntuotantoon vaatii vähäisesti kaasun esikäsittelyä, vain kosteuden ja hiukkasten poiston. Kaatopaikkakaasulla voidaan tuottaa sähköä määntäpolttomootoreilla, kaasu- ja höyryturbiineilla sekä polttokennoilla. Myös stirlingmootoreita on käytetty, mutta niiden kehitystyö on muiden vaihtoehtojen takia hidastunut. Käytetyimmät laitteistot sähköntuotannossa kaatopaikkakaasulla ovat kaasumootoreita. (Gendebien 1992, 203.) Suomessa kaatopaikkakaasua käytetään sähköntuotantoon kahdella kaatopaikalla. Esimerkiksi Mikkelissä sähköä tuotetaan mikroturbiinilla. Vuonna 2005 Mikkelissä tuotettiin 0,2 miljoonalla m³ kaasua, jonka keskimääräinen metaanipitoisuus oli 50 tilavuusprosenttia, noin 345 MW sähköä. (Kuittinen et al. 2005, 59.)

Höyryturbiini. Kaatopaikkakaasua voidaan käyttää polttoaineena kattilassa, jolla tuotetaan vesihöyryä lämmöntuotantoon tai höyryturbiinille sähköntuotantoon. Kaatopaikkakaasu vaatii vain vähän käsittelyä, sillä sen sisältämät haitta-aineet eivät kulkeudu turbiiniosaan. Muilla polttoaineilla toimivat höyrykattilat tulee muuttaa kaatopaikkakaasulle sopivaksi kaasun alhaisen lämpöarvon takia. Höyryturbiini soveltuu sähköntuotantoon suurille kaatopaikoille, joiden sähköntuotantokapasiteetti on yli 10 MW. (The World Bank 2004, 41.)

Kaasumoottori. Kaasumoottorit ovat käytetyimpiä laitteistoja kaatopaikkakaasun hyötykäytössä, johtuen niiden hyvästä sähköntuotantohyötysuhteesta. Kaasumoottorit voidaan jakaa kipinäsytytteisiin, kuten ottomoottori, ja puristussytytteisiin, kuten dieselmoottori tai kaksoispolttoainemoottori. Kaasumoottoreita on saatavilla useita eri kokoa, 0,5 MW:n sähkötehosta jopa yli 3 MW:n sähkötehoon. Kaasumoottorien sähköntuotannon hyötysuhde on korkeampi kokoon suhteutettuna kuin kaasuturbiinilla. Kaasumoottoreiden pääomakustannus on alhaisempi ja hyötysuhde korkeampi kuin esimerkiksi kaasuturbiinilla. Kaasumoottoreissa erityisenä etuna on mahdollisuus lisätä kapasiteettia lisäämällä moottoreiden määrää kaasun tuotannon muuttuessa kaatopaikalla. Lisäksi kaasumoottoreita voidaan asentaa keräyskaivokohtaisesti ja siirtää kaivolta toiselle kaasun muodostuksen vaihdella. Kaasumoottoreiden ongelmana on kuitenkin sen vaatima korkea, keskimäärin 38 prosentin metaanipitoisuus, korrosioalttius sekä korkeat päästöt. (Bove et al. 2005, 1395; Lappalainen et al. 2004, 25; The World Bank 2004, 42; Gendebien 1992, 204.)

Kaasumoottorit tarvitsevat jonkin verran muutoksia, että niitä voidaan käyttää kaatopaikkakaasulle. Muutostarve aiheutuu kaatopaikkakaasun sisältämistä epäpuhtauksista, jotka voivat vaurioittaa moottoria. Moottoreihin tulee muun muassa lisätä kaasutin sopivan stokiometrisen ilma-kaasuseoksen muodostamiseksi polttokammioon. Lisäksi matalan lämpöarvon takia seos on vaikea sytyttää kipinällä, joten kipinäsytytteiset moottorit tarvitsevat esipalotilan ilma-kaasuseoksen rikastamiseksi. Kaksoispolttoainemoottori on diesel-moottori, joka toimii kaasumaisella polttoaineella, kun nestemäisen polttoaineen ruiskutuksella pidetään yllä tarvittavia sytytysolosuhteita. Tämä ominaisuus on merkittävä, sillä kaatopaikkakaasun sisältämä hiilidioksidi alentaa metaanin itsesyttymiskykyä. (The World Bank 2004, 42; Gendebien 1992, 204.)

Kaasumoottorit ovat eniten päästöjä aiheuttavia sähköntuotantotekniikoita kaatopaikkakaasua käytettäessä. Niiden käytöstä aiheutuu eniten hiilimonoksidi-, typenoksidi- ja dioksiinipäästöjä käytössä olevasta polttoteknologiasta. Kipinäsytytteisiä moottoreita voidaan käyttää myös CHP-laitoksissa sähkön- ja lämmöntuotannossa. (Bove et al. 2005, 1395.)

Kaasuturbiini. Kaasuturbiiniprosessissa polttoaine poltetaan polttokammiossa ja sillä lämmitetään ilmaa. Kuuma ilma ja savukaasu johdetaan turbiinin läpi, ja turbiinin tekemästä mekaanisesta työstä tuotetaan generaattorilla sähköä. Kaatopaikkakaasukäyttöisten kaasuturbiinien sähköteho on tyypillisesti 1 - 8 MW. Kaasuturbiini soveltuu ilman muutoksia kaatopaikkakaasulle, kun kaasun lämpöarvo on välillä 13 - 18 MJ/m³. Lisäksi kaatopaikkakaasun tuotannon tulee olla vakaa. Jos lämpöarvo on alhaisempi, kaksoispolttoainetekniikan käyttö on kannattavampaa. Tämä tarkoittaa sitä, että käynnistys tehdään joko maakaasulla tai nestemäisellä polttoaineella. Kaasuturbiini tilantarve on pienempi kuin kaasumoottoreiden tai höyryturbiinin. Kaasuturbiinin hukkalämpöä voidaan käyttää ilman esilämmittämiseen, vesihöyryn tuottamiseen höyryturbiinille, jolloin kyse on kombilaitoksesta tai lämmöntuotantoon CHP-laitoksessa. (Gendebien 1992, 206.)

Kombivoimala. Kombilaitoksessa tuotetaan sähköä kaasuturbiinilla. Kaasuturbiinin hukkalämpö hyödynnetään jätelämpökattilassa, jossa höyrystetään vettä. Vesihöyryllä tuotetaan lisäsähköä höyryturbiinilla. Lisäsähköntuotannon ja lämmön talteenoton takia voimalan hyötysuhde on korkea, jopa 90 prosenttia. Kaasukombilaitokset tuottavat enemmän sähköä suhteessa lämpöön eli niiden rakennusaste on korkea. Kombilaitosten sähköntuotannon hyötysuhde on korkeampi kuin CHP-laitoksissa lisäsähköntuotannon takia. Laitokset ovat kustannustehokkaita, kun niiden teho on yli 10 MW eli tekniikka soveltuu erityisesti isoille kaatopaikoille, joiden kaasun tuotantopotentiaali on suuri. (The World Bank 2004, 44.)

Mikroturbiini. Kaatopaikkakaasua voidaan hyödyntää sähköä tuottavassa mikroturbiinissa. Mikroturbiinit edustavat pienen kokoluokan kaasuturbiinitekniikkaa, joiden kannattavuus perustuu sarjatuotettuihin laitteistoihin. Turbiiniyksiköt ovat tyypillisesti kooltaan 25 - 250 kW. Tekniikka perustuu suurempiin turbiineihin, mutta keskeisenä eroavaisuutena on mikroturbiinin huomattavasti suurempi pyörimisnopeus. Lisäksi mikroturbiini soveltuu alhaisille kaatopaikkakaasun lämpöarvoille, noin 13 MJ/m³ sekä alhaisille metaanipitoisuuksille (30 - 35 tilavuusprosenttia). Mikroturbiinin pienen kapasiteetin takia, se soveltuu erityisen hyvin vanhoille, pienille ja kaukaisille kaatopai-

koille, joissa on alhainen kaatopaikkakaasun tuotanto. Mikroturbiinin aiheuttamat päästöt ovat matalat ja sen melutaso on alhainen. Mikroturbiinien osalta ongelmana on sähköntuotannon matala hyötysuhde ja käyttökokemukset vasta lyhyeltä ajalta. Matalaa sähköntuotannon hyötysuhdetta voidaan parantaa ottamalla turbiinin hukkalämpö talteen ja esilämmittämällä sillä palamisilmaa. (Lappalainen et al. 2004, 23 - 24; The World Bank 2004, 42.)

Polttokenno. Kaatopaikkakaasua voidaan käyttää polttokennoissa. Polttokennoa voidaan verrata suureen sähköparistoon. Polttokennossa polttoaineen ja hapettimen kemiallinen energia muutetaan sähköenergiaksi ilman palamisprosessia. Erona sähköparistoon on, että sähköparistossa reagoivat aineet vähenevät hitaasti paristoa käytettäessä, kun taas polttokennoon tuodaan reagoivia aineita ulkopuolelta. Polttokennoilla sähköntuotannon hyötysuhde on jopa 40 - 50 prosenttia. Lisäksi polttokennotekniikka on ympäristöystävällistä alhaisten päästöjen takia, esimerkiksi typenoksidipäästöt jäävät alhaisiksi johtuen matalasta reaktiolämpötilasta. (Willumsen 2001.)

Järjestelmien sähköntuotannonhyötysuhde on tyypillisesti 25 - 45 prosenttia aiheutuen käytettävästä sähköntuotantotavasta. Taulukossa 3 on esitetty sähköntuotantotapojen vaatimat tyypilliset kaatopaikkakaasun tilavuusvirrat, jotka vaihtelevat mikroturbiinin 3,0 m³ minuutissa aina yli 700 m³ minuutissa. Tarvittavien tilavuusvirtojen perusteella voidaan tarkastella kunkin tuotantotavan soveltuvuutta erikokoisille kaatopaikoille. Kaasu- ja höyryturbiinien kapasiteetit voivat olla huomattavasti esimerkiksi kaasumoottoria suuremmat, ja ne soveltuvat siten suurille kaatopaikoille. Kombilaitoksen sähköntuotannon hyötysuhde on muita tekniikoita parempi, johtuen kaasu- ja höyryturbiinin yhdistämisestä sähköntuotannossa. Yleisesti sähköntuotannon hyötysuhde vaihtelee 25 - 45 prosentin välillä. Taulukossa 3 esitetyissä sähköntuotannon hyötysuhteissa ei ole huomioitu lämmön talteenottoa.

Taulukko 3. Sähköntuotantotekniikoiden asettamat vaatimukset kaatopaikkakaasulle sekä tuotantoarvot. (The World Bank 2004, 49 - 50; Lagerkvist 2000, 12)

	Tyypillinen tilavuusvirta [m ³ /min]	Suosittelun laitoksen koko	Alin CH ₄ -pitoisuus [til-%]	Alin kaatopaikkakaasun lämpöarvo [MJ/m ³]	Sähköntuotannon hyötysuhde [%] (ei lämmön talteenottoa)
Mikroturbiini	< 3	< 250 kW	30 - 35	-	25 - 30
Kaasumoottori	> 4 - 140	0,5 - 12 MW	38	15	32 - 40
Kaasuturbiini	> 110 - 570	3 - 18 MW	40	13,4	25 - 32
Höyryturbiini	> 170 - 710	10 - 50 MW	20	7,5	24 - 29
Kombilaitos	> 140 - 710	> 10 MW	40	13,4	38 - 45

Lämmöntuotanto. Lämmöntuotantoon voidaan käyttää sekä *low-grade* että *medium-grade* kaatopaikkakaasua. Suora poltto on yksinkertaisin ja edullisin tapa käyttää kaatopaikkakaasua energiantuotannossa. Kaasun suora käyttö kattiloissa on yksinkertaista sekä poltettaessa pelkästään kaatopaikkakaasua että rinnakkaispoltossa maakaasun kanssa. Kaasua käytetään yleisesti suurissa teollisuuskattiloissa, tiilenpoltouuneissa, kalkkikivi- ja sementtiuuneissa. Lisäksi kaatopaikkakaasua voidaan käyttää kasvihuoneiden lämmitykseen ja kaukolämpölaitoksissa polttoaineena, laitosten höyryntuotannossa sekä esimerkiksi kompostoinnin sisäänpuhallusilman lämmittämiseksi. Myös jätevesilietettä voidaan kuivata käyttämällä kaatopaikkakaasua. Suorassa poltossa edellytyksenä on, että kaasun käyttäjä sijaitsee lähellä kaasun tuotantopistettä eli kaatopaikkaa. Taloudellisesti kannattavana etäisyytenä pidetään yleisesti alle 10 kilometriä. (Gendebien 1992, 203; Lagerkvist 2000, 8.)

Järjestelmän soveltuvuus ja sen muuttaminen kaatopaikkakaasulle soveltuvaksi riippuu käytetystä polttimesta. Tarvittavat muutokset johtuvat lähinnä kaatopaikkakaasun maakaasua matalammasta lämpöarvosta. Muutostarve on vielä vähäisempi, mikäli kaasu poltetaan maakaasun kanssa seoksena. Järjestelmään tulee lisätä vain hiukkassuodatin sekä vedenpoistolaitteisto korroosion ja muiden laitteistovaurioiden välttämiseksi. Lisäksi kaatopaikkakaasun käyttö kattiloissa aiheuttaa alhaisemmat typenoksidi ja hiilimonoksidipäästöt verrattuna muihin poltto-tekniikoihin. (Gendebien 1992, 203; Pipatti et al. 1996, 38.)

Yhdysvalloissa kaatopaikkakaasua käytetään myös melko yleisesti kaatopaikan suotovesien käsittelyssä. Suotovettä haihdutetaan yleensä alipaineisena, jolloin lopputuotteena muodostuu puhdistettua kaatopaikkavettä eli lauhdetta ja konsentraattia, joka sisältää haihtumattomat yhdisteet, kuten raskasmetallit (Marttinen et al. 2000, 57). Lauhde voi sisältää muun muassa suotovedestä haihtuneita orgaanisia aineita, joten lauhde on tarpeen mukaan käsiteltävä esimerkiksi aktiivihiilisuodatuksella ennen ympäristöön johtamista. Konsentraatti voidaan johtaa takaisin jätetäyttöön. Haihdutuslämpötila on tyypillisesti 80 - 90 °C. Suotoveden haihuttamiseen kuluu energiaa noin 3 000 - 3 500 kJ/kg_{H₂O}. Haihuttamiseen tarvittava energiamäärä muodostuu veden höyrystymislämmöstä, lämpösisällöstä sekä lämpöhäviöistä. Haihuttamisen lisäksi kaatopaikkakaasulla voidaan pitää kaatopaikkavesille tarkoitettu jätevesijärjestelmä lämpimänä ilmasto-olosuhteissa, joissa jäätyminen on ongelma. (Willumsen 2001.)

Sähkön- ja lämmöntuotanto. Sähköntuotannon hyötysuhde kaatopaikkakaasulla on suhteellisen alhainen, joten suurella kaasun määrällä ja korkealla metaanipitoisuudella kannattavin hyötykäyttömuoto on yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto. Lämmöntuotannon yhdistäminen sähköntuotantoon edellyttää lämmön hyödyntämiskohteen riittävän läheistä sijaintia. Yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa energiantuotannon hyötysuhdetta saadaan kasvatettua, kun sähköntuotannon hukkalämpö hyödynnetään. Hyötysuhde on yleensä 70 - 90 prosenttia, josta sähköntuotannon hyötysuhde on 10 - 30 prosenttia ja lämmöntuotannon 50 - 60 prosenttia. CHP-laitosten (*Combined Heat and Power*) hukkalämmöllä tuotetaan höyryä, joka käytetään lämpönä prosessin tarpeisiin tai esimerkiksi kaukolämpöverkostossa. CHP-laitoksen sähköntuotannon hyötysuhde on alhaisempi kuin kombilaitoksen, koska höyryä ei hyödynnetä lisäsähköntuotantoon, vaan käytetään ainoastaan lämmöntuotantoon. (Oland 2004, 34.)

Kaasumoottoreiden CHP-sovellusten hyötysuhde on jopa 70 - 80 prosenttia, johtuen kuumien savukaasujen talteen otetun ja moottorin jäähtytyksen lämmön käyttämisestä kuuman veden tai matalapainehöyryn valmistukseen. Myös mikroturbiineita voidaan hyödyntää yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa. Mikroturbiinien energiantuotannon hyötysuhde on noin 60 - 70 prosenttia. Suurten kaasuturbiinien kokonaishyötysuhde on 70 - 75 prosenttia, josta sähköntuotannon hyötysuhteen osuus on 22 - 36 prosenttia (Oland 2004, 34).

Suomessa sähköä ja lämpöä tuotettiin vuonna 2005 kolmella kaatopaikalla muodostuvasta kaatopaikkakaasusta: Tampereen Tarastenjärvellä, Simpeleen M-real Oyj:n Konkamäellä sekä Vantaan Seutulassa. Tampereella noin 5 544 MWh sähköä vuodessa tuotetaan kaasumoottorilla, jonka hukkalämmöstä noin 60 MWh käytetään kiinteistöjen lämmittämiseen sekä kesäisin asfalttiaseman energiantuotantoon. Vantaan Seutulän kaatopaikalla muodostuva kaasu toimitetaan Vantaan Energialle yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotantoon. Tuotetun sähkön määrä vuonna 2005 oli noin 3 289 MWh ja lämmön tuotanto noin 4 921 MWh. Simpeleellä sähköä tuotettiin vuonna 2005 noin 430 MWh ja lämpöä noin 615 MWh. Vantaalla ja Tampereella kaatopaikkakaasun keskimääräinen metaanipitoisuus on ollut noin 50 tilavuusprosenttia, kun Simpeleellä se on ollut vain noin 27 tilavuusprosenttia. (Kuittinen et al. 2006, 66 - 70.)

3.4.2 Käyttö liikennepolttoaineena

Kaatopaikkakaasu voidaan jalostaa liikennepolttoaineeksi ja käyttää maakaasukäyttöisissä ajoneuvoissa. Kaasu vaatii ensin runsaasti puhdistusta ja paineistuksen 250 bar:in paineeseen. Kaasusta tulee poistaa ensisijaisesti suurin osa hiilidioksidista sekä rikkivety. Liikennepolttoaineeksi soveltuu maakaasuluokkainen kaatopaikkakaasu, jossa metaania on noin 98 prosenttia ja loput kaksi prosenttia hiilidioksidia. (Gendebien et al. 1992, 207; Ohlström et al. 2005, 50.)

Kaatopaikkakaasun liikennekäyttö vaatii jalostuksen lisäksi kaasulla toimivan autokannan sekä kaasun jakeluverkoston. Kaatopaikkakaasua käytetään muun muassa linja-autoissa, henkilöautoissa, jäteautoissa sekä kaatopaikkakoneissa. Liikennekäyttöä rajoittaa jakeluverkoston ja autokannan lisäksi kaatopaikkakaasun niin maantieteellisesti kuin määrällisestikin vaihteleva saatavuus. (Gendebien et al. 1992, 207; Ohlström et al. 2005, 50.) Liikennekäyttöön kaatopaikkakaasua käytetään muun muassa Ruotsissa, Islannissa, Ranskassa, Yhdysvalloissa ja Alankomaissa (Wellinger & Lindberg 2000, 18 - 19).

3.4.3 Käyttö maakaasuverkostossa

Poistamalla kaatopaikkakaasusta kosteus ja epäpuhtaudet sekä erottamalla siitä hiilidioksidi siten, että jäljelle jää lähes puhdas metaani (> 98 tilavuusprosenttia), voidaan kaasu syöttää maakaasuverkostoon. Kaasuun lisätään ainoastaan haiseva suojakaasu turvallisuussyistä. Edellytyksenä on, että kaatopaikan läheisyydessä on maakaasuverkosto. Jalostuksen taso riippuu siitä, mitkä ovat kansalliset vaatimukset maakaasuverkostoon syötettävälle kaasulle. Heikkolaatuinen kaatopaikkakaasusta jalostettu metaani alentaa maakaasun laatua. (Gendebien et al. 1992, 208 - 209; Lagerkvist et al. 2000, 13.)

Kaatopaikkakaasun jalostaminen maakaasuverkostoon soveltuvaksi on kallista. Kaatopaikkakaasun tuotanto on pientä suhteessa jalostuslaitteiston investointikustannukseen, joten jalostaminen maakaasuverkostoon soveltuvaksi ei ole taloudellista. Toisaalta laadukkaampi kaasu vähentää ongelmia energiantuotantolaitteistoissa ja vähentää kunnossapitokustannuksia. Kaatopaikkakaasun jalostamisessa maakaasuverkostoon sopivaksi muodostuu sivutuotteena hiilidioksidia, jota voidaan käyttää esimerkiksi kemianteollisuuden raaka-aineena. Maakaasuverkostoon kaatopaikkakaasua jalostetaan muun muassa Ruotsissa ja Alankomaissa. (Gendebien et al. 1992, 208 - 209; Lagerkvist et al. 2000, 13.)

3.4.4 Käyttö kemianteollisuudessa

Kaatopaikkakaasua voidaan käyttää petrokemian prosesseissa, joissa metaania voidaan käyttää raaka-aineena. Metaanista voidaan tuottaa useita kemikaaleja synteetikaasun eli hiilimonoksidin ja vetyseoksen kautta. Merkittävin prosessi on metanolin valmistus. (Gendebien et al. 1992, 209 - 211.) Merkittäväksi metanolin valmistuksen kaatopaikkakaasusta tekee metanolin käyttömahdollisuus bensiini- ja dieselmoottoreissa korvaavana polttoaineena tai polttoaineen lisäaineena sekä mahdollisuus korvata sellu- ja paperiteollisuuden valkaisuprosessissa käytettävää klooria. Tekniikan kustannukset ovat kuitenkin vielä melko korkeat, joten se on taloudellisesti kannattavaa vain suurilla kaatopaikoilla. (Lagerkvist et al. 2000, 13.)

3.5 Tarkasteltavat kaatopaikat

3.5.1 Keltakankaan käytössä oleva kaatopaikka

Keltakankaan käytössä oleva kaatopaikka on otettu käyttöön vuoden 2001 lopulla, kun Anjalankosken kaupungin omistama Keltakankaan vanha kaatopaikka ja Kymenlaakson muut kaatopaikat lopettivat toimintansa. Keltakankaan nykyisen, käytössä olevan kaatopaikan omistaa Kymenlaakson Jäte Oy, joka myös huolehtii kaatopaikan toiminnasta. Kaatopaikalle läjitetään energiahyötykäyttöön ja materiaalikierrätykseen kelpaamaton sekä suoraan loppusijoitettava yhdyskuntajäte. Kaatopaikalle sijoitettavan jätteen määrä on pysynyt suhteellisen tasaisena kuluneen viiden vuoden aikana. Vuonna 2006 kaatopaikalle sijoitettiin 62 000 tonnia jätettä, kun se enimmillään on ollut vuonna 2003, jolloin kaatopaikalle sijoitettiin 72 000 tonnia jätettä. Biojätteen erilliskeräys rivi- ja kerrostaloista sekä yrityksistä ja laitoksista on aloitettu syksyllä 2005, joten kaatopaikalle sijoitettavan biohajoavan ja kaasua muodostavan jätteen määrä on vähentynyt. Vuotuiseksi biojättekertymäksi on arvioitu 4 500 - 6 000 tonnia. Vuonna 2006 biojätettä kerättiin noin 4 700 tonnia. (Kymenlaakson Jäte Oy 2007, 2, 6.)

Anjalankosken Keltakankaan nykyisellä kaatopaikalla kaasunkeräysjärjestelmän imukaivojen rakentaminen on aloitettu vuonna 2007 (Kymenlaakson Jäte Oy 2007, 11). Kaatopaikalle asennetaan pystysuuntainen kaasunkeräysjärjestelmä. Jätetäyttö on ollut käytössä vasta viitisen vuotta, joten kaatopaikkakaasun muodostuminen on vielä vähäistä. Kaatopaikkakaasu on alun perin suunniteltu käytettävän lämmöntuotantoon. (Köppä 2007.)

Electrowatt-Ekonon vuonna 2001 tekemässä biokaasuselvityksessä kaatopaikkakaasun tuotoksi on arvioitu $50 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{jäte}}$. Tällöin vuonna 2008 muodostuvan kaasun määrä olisi noin 0,8 miljoonaa m^3 vuodessa ja vuonna 2014 noin 1,6 miljoonaa m^3 . IP-Tekniikan (2005) tekemässä kaasun hyödyntämiselvityksessä kaasun maksimimäärä saavutettaisiin noin vuonna 2008, jolloin muodostuvan kaasun määrä olisi 3 miljoonaa m^3 , josta talteenottoaste olisi 80 prosenttia.

3.5.2 Keltakankaan vanha kaatopaikka

1960-luvun vaihteessa käyttöön otettu Anjalankosken kaupungin omistama Keltakankaan vanha kaatopaikka on suljettu vuoden 2001 lopussa. Kaatopaikalle on pääasiassa sijoitettu Anjalankosken kunnan alueella muodostunutta yhdyskuntajätettä. Vuosina 1998 - 2000 kaatopaikalle sijoitettiin jätettä myös lähikunnista, kuten Kouvolasta. Kaatopaikalle sijoitetuista jätteistä ei ole tarkkaa tilastoa kaatopaikan alkuajoilta. Arvioiden mukaan kaatopaikalle on sijoitettu noin 900 000 m³ jätettä. (Kosonen 2007.)

Kaatopaikkakaasun keräys on aloitettu vuonna 2004. Kaasun tuotanto oli vuonna 2005 noin 0,7 miljoonaa m³, kun taas vuonna 2006 määrä oli 0,9 miljoonaa m³. (Sarlin Oy Ab 2007; Sarlin Hydor Oy 2006.) Kaasu kerätään pystykaivoista, joita kaatopaikalle on asennettu neljätoista kappaletta. Kaatopaikan pintarakennetta on tehty osissa, joten katetun pinta-alan lisääntyminen lisää pumpattavan kaasun määrää vähentämällä kaasun kulkeutumista ilmakehään. Kaatopaikan pintarakenteen rakentaminen on edelleen kesken, joten rakennustyön valmistuttua kaasun määrän voidaan olettaa hieman kasvavan. Electrowatt-Ekono (2001) on arvioinut vuosittaisen kaasuntuotanto olevan 1,0 - 1,2 miljoonaa m³ aina vuoteen 2010 saakka, jonka jälkeen kaasuntuotanto kääntyy laskuun. Kaatopaikalla on rakenteet valmiina suotoveden takaisinkierätystä varten jätteen stabiloitumisen sekä kaatopaikkakaasun muodostumisen tehostamiseksi (Kosonen 2007).

Pumpattava kaatopaikkakaasu poltetaan soihdussa. Soihtu on Sarlin Oy Ab:n valmistama BS-300 poltin. Soihtun automaattinen toiminta perustuu paine- ja lämpötilamittauksiin. Mittausohjelmalla vanhalla kaatopaikalla on Genesis 32-valvomo-ohjelma. (Valovirta 2007b.) Biokaasulaitoksen toimintaparametrit mittaa ja raportoi Sarlin Oy. Mitattavia toimintaparametreja ovat pumppaamon käyttötunnit (h) ja kokonaiskäyttöaika (%), kaasun keskimääräinen virtaama (Nm³/h) ja keskimääräinen polttoaineteho (kW), pumpattu kaasun kokonaismäärä (milj. Nm³) sekä tuotettu kokonaisenergia (GWh). Kerätyistä kaasusta analysoidaan ainoastaan metaani-, hiilidioksidi- ja happipitoisuudet (%). Kuukausittain kaasusta määritetään lisäksi käsimittareilla metaani-, hiilidioksidi- ja happipitoisuus, lämpötila ja virtaama pumppaamon venttiilien säätämiseksi. Yhdisteiden pitoisuudet määritetään kuivasta kaasusta. (Valovirta 2007a.)

4 KAATOPAIKKAKAASUN HYÖTYKÄYTTÖ EKOPARKISSA

4.1 Vaihtoehtojen raja

Anjalankosken Ekoparkin alueella sijaitseva Kymenlaakson Jäte Oy:n Keltakankaan kaatopaikka on iältään nuori, eikä siellä jätteestä biologisen toiminnan tuotteena muodostuvaa kaatopaikkakaasua vielä kerätä ja hyödynnetä. Käytössä olevan kaatopaikan läheisyydessä sijaitsee Anjalankosken kaupungin omistama, jo suljettu vanha Keltakankaan kaatopaikka. Vanhan kaatopaikan kaasu poltetaan soihdussa. Kymenlaakson Jäte Oy on alustavasti suunnitellut hyödyntävänsä kaatopaikkakaasun lämmöntuotannossa Suomen IP-Tekniikka Oy:n ja Electrowatt-Ekonon tekemien selvitysten mukaisesti. Asukasluvultaan vastaavankokoisilla kaatopaikoilla kaatopaikkakaasu käsitellään perinteisesti. Esimerkiksi Oulun Jätehuolto Oy:n kaatopaikalla muodostuva kaatopaikkakaasu hyödynnetään jätekeskuksen omassa lämmöntuotannossa ja osa kaasusta toimitetaan Oulun yliopistollisen sairaalan höyryn tuotantoon. Jätekuukko Oy:n kaatopaikalla muodostuva kaatopaikkakaasu toimitetaan Kuopion Energian kaukolämpövoimalaitokselle. Päijät-Hämeen Jätehuollossa kaatopaikkakaasu hyödynnetään osittain jätekeskuksen lämmöntuotantoon, mutta pääosa kaasusta johdetaan Hartwallin Lahden tehtaille prosessihöyryn tuotantoon. (Jätekuukko Oy 2007; Oulun Jätehuolto 2007; Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy 2007.)

Tässä diplomityössä tarkastellaan Keltakankaan vanhalla ja käytössä olevalla kaatopaikoilla muodostuvan kaatopaikkakaasun hyötykäyttömahdollisuuksia energiantuotannossa, yhdyskuntajätevesilietteen ja biopolttoaineiden termisessä kuivauksessa sekä tuhkan ja pilaantuneen maa-aineksen termisessä käsittelyssä. Kuten diplomityön johdannossa on todettu, työssä keskitytään perinteisiä hyötykäyttövaihtoehtoja vähemmän tutkittuihin vaihtoehtoihin, joista voi olla ympäristöhyötyjen lisäksi myös liiketoiminnallista hyötyä Ekoparkissa toimiville yrityksille. Diplomityössä tarkasteltavat kaatopaikkakaasun hyötykäyttövaihtoehdot ovat kuvassa 1 esitetyn Ekoparkin tulevaisuuden toimintamallin mukaiset. Tarkasteltavat hyötykäyttövaihtoehdot voidaan toteuttaa joko erikseen tai ne voidaan kytkeä toisiinsa.

Työssä tarkastellaan perinteistä kaatopaikkakaasun energiantuotantokäyttöä kiinteistökohtaisesti sekä kaukolämpökeskuksessa. Kiinteistökohtaisella energiantuotannolla korvataan ösot sähköä ja -lämpöä. Kaukolämmön tuotannosta kesäisin ylijäävä kaatopaikkakaasu voidaan puolestaan käyttää kohteissa, joissa lämmöntarve on suurin kesäisin. Nykyisin alueella käytetään lämmöntuotannossa polttoöljyä, joten tarkasteltavassa tapauksessa kaatopaikkakaasulla korvattaisiin fossiilista polttoainetta. Ekoparkin oman energiantuotannon lisäksi tarkastellaan kaukolämmön tuottamista Keltakankaan kaukolämpökeskuksessa, jolloin kaatopaikkakaasu hyödynnettäisiin kotitalouksien ja liikekiinteistöjen lämmittämiseen. Koska kaukolämmöllä on kysyntää ainoastaan talvikuukausina, tarkastellaan rinnakkaisena käyttökohteena kaasun hyödyntämistä NCC Roads Oy:n asfalttiasemalla ja vaihtoehtoisesti pilaantuneiden maa-ainesten termisessä käsittelyssä.

Lappeenrannan teknillisen yliopiston jätehuoltotekniikan professori Mika Horttanaisen (2006) mukaan jätteenpolton tuhkan käsittelyssä hyötykäyttöä varten voidaan käyttää energialähteenä kaatopaikkakaasua sekä lietteen polton ylijäämäenergiaa. Kaatopaikkakaasua voidaan käyttää myös polttoaineena lietteen kuivaamisessa ja termisessä käsittelyssä, jolloin saadaan polttoaineksi soveltuvaa lietettä, jolla on hyvä lämpöarvo. Lietettä polttamalla voidaan tuottaa CHP-laitoksessa sähköä ja lämpöä. Tuotettu lämpö voidaan käyttää lietteen polton ja jätteenpolton tuhkien termiseen käsittelyyn. Tuhkien termisen käsittelyn jätelämpöä voidaan johtaa hyötykäyttöön, kuten biopolttoaineiden kuivausprosessiin. Horttanaisen mukaan kaatopaikkakaasun hyödyntämisellä tuhkan käsittelyssä on mahdollista saavuttaa useita hyötyjä. Käsittelemällä tuhka hyötykäytettävään muotoon vältetään kaatopaikkamaksu sekä jätevero. Samalla kaatopaikkakaasulle saadaan taloudellinen arvo.

Koska Kymenlaakson Jäte Oy kuuluu hankintarenkaaseen, joka toimittaa kierrätyspolttoainetta Kotkaan valmistuvalle jätteenpolttolaitokselle, on tarkastelu kaatopaikkakaasun käytöstä jätteenpolton tuhkan käsittelyssä perusteltua. Lisäksi Kymenlaakson Jäte käsitteli yhdyskuntaliettä vuosina 2005 ja 2006 kompostoimalla. Vuoden 2007 alusta Anjalankoskella muodostuva jätevesiliete on toimitettu Kotkaan käsiteltäväksi. Kymenlaakson Jäte Oy:llä on voimassa oleva ympäristölupa lietteen käsittelyyn (Alatalo 2007b). Lietteen kuivaaminen kaatopaikkakaasulla on siten perusteltua lietteen käsittelyn nykytilanteen takia Anjalankoskella. Lietteen

kuivaukseen voidaan yhdistää myös lietteen poltto, jota on tarkasteltu Tekesin rahoittamassa PAKU-hankkeessa, jossa yhtenä tarkastelukohteena on Kymenlaakson alue. Lietteen terminen kuivaus ja poltto tarjoavat mahdollisuuden lietteen käsittelyyn ja sitä kautta energiantuotantoon Ekoparkissa.

Bioenergia-ala laajenee Suomessa ja maailmalla kiihtyvällä vauhdilla. Biopolttoaineiden jalostus on merkittävässä asemassa myös Kymenlaaksossa. Erityisesti pellettien valmistaminen vaatii raaka-aineen kuivaamiseen haluttuun loppukosteuteen. Pellettituotannon kiihtyessä valmiiksi kuivan raaka-aineen saatavuus laskee, jolloin erilliset kuivausjärjestelmät ovat tarpeen pelletin tuotannon turvaamiseksi. Kaatopaikkakaasulla voidaan kuivata raaka-ainetta edullisesti ja samalla kaatopaikkakaasulle saadaan hyötykäyttöä ja taloudellinen arvo.

4.2 Laskennan lähtötiedot

Tässä diplomityössä ei lasketa Keltakankaan vanhan ja uuden kaatopaikan biokaasupotentiaalia, vaan laskelmissa käytetyt kaasunmäärät perustuvat aikaisemmin kyseisille kaatopaikoille tehtyihin biokaasuselvityksiin sekä vanhan kaatopaikan osalta myös mittaustuloksiin. Suomen IP-Tekniikan tekemässä tutkimuksessa on kaasun määrän laskennan perustana käytetty Scholl-Canyonin ensimmäisen kertaluvun hajoamismallia (Suomen IP-Tekniikka Oy 2005). Electrowatt-Ekonon selvityksessä kaasun määrän arvioinnin laskentaperustetta ei ole esitetty.

Laskennassa käytettävä vuosittainen kaasun määrä on 0,2 - 7,0 miljoonaa m³. Keltakankaan vanhan kaatopaikan kaasun määrä vaihtelee mittaustietojen sekä Electrowatt-Ekonon ja Suomen IP-Tekniikan tekemien selvitysten mukaan välillä 0,5 - 1,5 miljoonaa m³ vuodessa. Uuden kaatopaikan kaasuntuotantomäärän on arvioitu olevan 0,8 - 3,5 miljoonaa m³ vuodessa. Lisäksi työssä tarkastellaan kaasun määriä, joissa on huomioitu mahdollisen lietteen ja biojätteen mädätykseen tarkoitettun bioreaktorin tuottama biokaasun määrä, jonka on Electrowatt-Ekonon (2001) tekemässä tutkimuksessa arvioitu olevan 1,9 miljoonaa m³ vuodessa. Muodostuvan biokaasun määrä perustuu arvioihin, joiden mukaan mädätysreaktorissa käsiteltäisiin

lietettä noin 16 000 tonnia ja biojätettä 9 000 tonnia vuodessa.

Työssä suoritetaan kaatopaikkakaasun metaanipitoisuuden herkkyystarkastelua kaatopaikkakaasun tuotannonvaihtelujen huomioimiseksi. Työssä tarkasteltavat kaatopaikkakaasun metaanipitoisuudet ja niitä vastaavat lämpöarvot on esitetty taulukossa 4. Keltakankaan vanhan kaatopaikan metaanipitoisuus on mittausten mukaan ollut vuonna 2005 keskimäärin 37 tilavuusprosenttia ja vuonna 2006 keskimäärin 32 tilavuusprosenttia. Mittausten perusteella vanhan kaatopaikan metaanipitoisuus on alhainen, joten tarkasteltaviksi metaanipitoisuuksiksi valitaan 30, 35 ja 40 tilavuusprosenttia. Käytössä olevalla kaatopaikalla muodostuvan kaasun koostumusta ei tiedetä. Koska kaatopaikalle sijoitettavan biojätteen määrä on vähäinen järjestetyn erilliskeräyksen takia, käytetään tarkasteltavina metaanipitoisuuksina 35, 40 ja 45 tilavuusprosenttia. Bioreaktorin ja kaatopaikkojen kaasusta muodostuvan seoskaasun metaanipitoisuutta on vaikea ennustaa, joten laskennassa käytetään bioreaktorikaasun tyypillistä metaanipitoisuutta, joka vaihtelee välillä 60 - 70 tilavuusprosenttia.

Taulukko 4. Laskennassa käytettävät metaanipitoisuudet ja niitä vastaavat kaatopaikkakaasun lämpöarvot.

	Keltakankaan vanha kaatopaikka			Keltakankaan käytössä oleva kaatopaikka			Bioreaktorikaasu yhdistettynä kaatopaikkakaasuun		
	30	35	40	35	40	45	60	65	70
CH ₄ -pitoisuus [til-%]	30	35	40	35	40	45	60	65	70
Lämpöarvo [kWh/m ³]	3,0	3,5	4,0	3,5	4,0	4,5	6,0	6,4	7,0

Tarkastelussa kaatopaikkakaasun määrän ollessa alle 1,8 miljoonaa m³ vuodessa käytetään vanhan kaatopaikan kaasulle oletettuja metaanipitoisuuksia. Kun kaasun määrä on yli 1,8 miljoonaa m³ vuodessa käytetään tarkastelussa uuden kaatopaikan kaasun metaanipitoisuuksia. Kaasun metaanipitoisuus vaihtuu siis aina 1,8 miljoonaa m³ kohdalla 30 tilavuusprosentista 35 tilavuusprosenttiin, 35 tilavuusprosentista 40 tilavuusprosenttiin ja 40 tilavuusprosentista 45 tilavuusprosenttiin. Metaanipitoisuuden nousu kaasun määrän kasvaessa johtuu uudella kaatopaikalla muodostuvan kaasun arvioidusta korkeammasta metaanipitoisuudesta. Käytettävä metaanin lämpöarvo on 9,9 kWh/m³. Kaatopaikkakaasun lämpöarvo lasketaan metaanin lämpöarvosta kaasun metaanipitoisuuden perusteella.

Kaatopaikkakaasun adiabaattisen lämpötilan määrittäminen on oleellista tarkasteltaessa kaasun soveltuvuutta termisiin tuhkan, lietteen, biopolttoaineen sekä pilaantuneiden maiden käsittelymenetelmiin. Adiabaattisella palamislämpötilalla tarkoitetaan ideaalisesti eristetyssä tulipesässä täydellisestä palamisesta muodostuvien reaktiotuotteiden loppulämpötilaa. Adiabaattisen lämpötilan perusteella voidaan arvioida kaatopaikkakaasun poltolla saavutettavaa lämpötilaa. Adiabaattiset lämpötilat on laskettu taulukossa 4 ilmoitetuilla metaanipitoisuuksilla. Laskentayhtälöt on esitetty liitteessä 1. Tarkasteltavia metaanipitoisuuksia vastaavat adiabaattiset palamislämpötilat on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Tarkasteltavia metaanipitoisuuksia vastaavat adiabaattiset palamislämpötilat.

	30	35	40	45	60	65	70
Metaanipitoisuus [til-%]	30	35	40	45	60	65	70
Hiilidioksidipitoisuus [til-%]	30	35	40	45	30	25	20
Tyyppi- ja muiden yhdisteiden pitoisuus [til-%]	40	30	20	10	10	10	10
Adiabaattinen palamislämpötila [°C]	1 500	1 560	1 560	1 600	1 690	1 710	1 730

Todellinen palamislämpötila on tyypillisesti parisataa astetta adiabaattista lämpötilaa alhaisempi, mutta tarkasti sitä on mahdotonta arvioida laskennallisesti. Näin ollen kaatopaikkakaasun todellinen palamislämpötila hyvin eristetyssä jäähdyttämättömässä tulipesässä olisi tarkasteltavilla metaanipitoisuuksilla välillä 1 300 - 1 500 °C. Kaatopaikkakaasun adiabaattisen palamislämpötilan perusteella voidaan todeta kaasun soveltuvan tässä työssä tarkasteltavien termisten hyötykäyttövaihtoehtojen polttoaineeksi.

Kaatopaikkakaasun hyötykäyttövaihtoehtojen taloudellista kannattavuutta tarkastellaan laskeamalla suurin sallittu investointikustannus vaihdellen laskennassa käytettäviä parametreja, kuten esimerkiksi sähkön ja lämmön osto- ja myyntihintoja, kaatopaikkakaasun määrää sekä metaanipitoisuutta. Suurin sallittu investointikustannus kuvaa investoinnin määrää, joka tarvittaviin laitteistoihin voidaan sijoittaa, että laitos on investointina kannattava. Tapauskohtaiset alkuarvot ja laskennan perusteet on esitetty liitteessä 2. Kaatopaikkakaasulla ei varsinaisesti ole hintaa kuten kaupallisilla polttoaineilla. Tuhkanen (2002, 40) on arvioinut energiantuotantoon

käytettävän kaatopaikkakaasun talteenoton kustannukseksi 3,4 - 4,5 €/MWh. Käytetään laskennassa kaatopaikkakaasulle hintana 3,5 €/MWh. Osassa laskentaa, kuten tarkasteltaessa kaatopaikkakaasun käyttöä asfalttiaseman polttoaineena, kaatopaikkakaasun hinta vaihtelee välillä 0 - 15 euroa megawattitunnilta.

4.3 Lämmöntuotanto

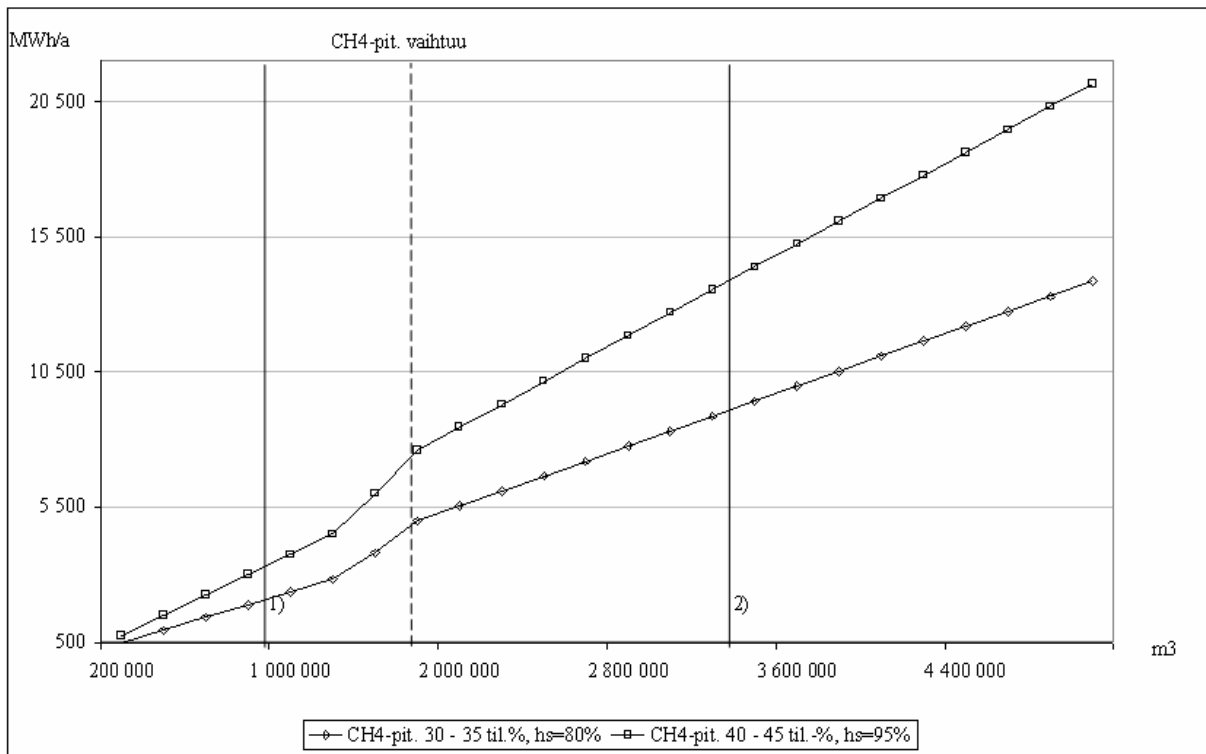
4.3.1 Lämmöntuotanto kiinteistöllä

Kaatopaikkakaasua voidaan käyttää kiinteistökohtaisesti polttamalla kaasua kattilassa. Kaatopaikkakaasulle soveltuvat polttimet poikkeavat vain vähän kaasu- ja öljypolttimista. Kaatopaikkakaasua soveltuu poltettavaksi maakaasupolttimissa pienin säädöin. Nykyisellään Ekoparkin alueen kiinteistöt lämpenevät öljyllä ja sähköllä. Esimerkiksi Kymenlaakson Jäte Oy:n toimistorakennuksen lämmityksen sekä Ekokem-Palvelu Oy:n öljynkulutus on noin 20 000 litraa eli yhteensä noin 400 MWh vuodessa. (Hokkanen 2007.) Kymenlaakson Jäte Oy:n muut rakennukset, kuten murskaus- ja lajittelulaitos lämpenevät sähköllä. Yrityksen vuotuinen sähkönkulutus on noin 1 600 MWh vuodessa. Rakennusten lisäksi öljyisten vesien allasta voidaan lämmittää sähköllä. (Savolainen 2007.)

Kymenlaakson Jäte Oy on ensisijaisesti suunnitellut käyttävänsä kaatopaikkakaasun kiinteistöjensä lämmitykseen (Köppä 2007). Myös muut Ekoparkin yritykset ovat kiinnostuneet mahdollisuudesta käyttää kaatopaikkakaasua lämmöntuotannossa. Esimerkiksi Ekokem-Palvelu Oy:llä on valmius ottaa kaatopaikkakaasua vastaan lämmöntuotantotarkoituksiin. Yhtiö on rakentanut kaasunsiirtolinjan kiinteistöltä tontin rajalle. (Karppanen 2007.)

Lämmöntuotannon hyötysuhteena käytetään tyypillisesti 90 prosenttia, mutta kaatopaikkakaasulle hyötysuhde voi usein olla alhaisempi. Laskennassa käytetään hyötysuhteina 80 ja 95 prosenttia, jotka muodostavat minimin ja maksimin kaasusta saatavalle lämmölle. Kuvassa 10 on esitetty lämmöntuotantokapasiteetti kaatopaikkakaasulla. Kuvaan on merkitty ainoastaan

lämmöntuotannon minimi ja maksimi tarkasteltavilla hyötysuhteilla ja kaasun metaanipitoisuuksilla. Kuten kuvasta voidaan havaita, kaatopaikkakaasusta saatava lämpö on melko suurta verrattuna esimerkiksi Kymenlaakson Jäte Oy:n vuotuisen lämmönkulutukseen. Vanhan kaatopaikan tuottamalla kaatopaikkakaasulla voidaan tuottaa lämpöä noin 2 400 MWh ja uuden kaatopaikan kaasulla noin 14 400 MWh vuodessa. Kiinteistöjen omasta lämmitysjärjestelmästä ylijäävä kaatopaikkakaasu on mahdollista toimittaa esimerkiksi kaukolämpökeskukseen tai muuhun hyötykäyttöön, kuten lietteen termiseen kuivaamiseen tai asfalttiaseman lämmöntuotantoon.



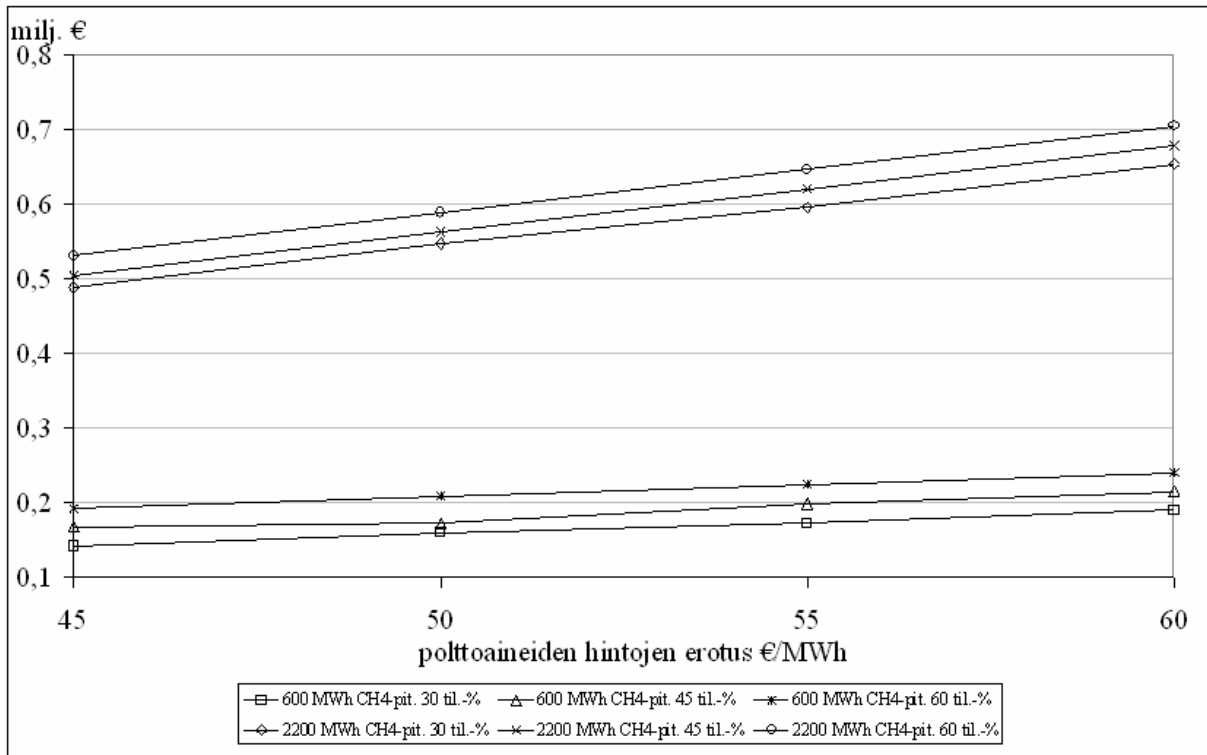
Kuva 10. Lämmöntuotantokapasiteetti kaatopaikkakaasulla, kun lämmöntuotannon hyötysuhde on 80 prosenttia tai 95 prosenttia. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.

Kiinteistökohtaista lämmöntuotantoa ei tarkastella kaasumäärillä, joissa on huomioitu mahdollisen mädätyslaitoksen tuottama biokaasu. Tarkastelua ei tehdä siitä syystä, että jo alhaisimmillakin kaasun määrillä ja metaanipitoisuuksilla voidaan tuottaa huomattava määrä lämpöä verrattuna alueen yritysten lämmönkulutukseen. Lämmöntuotanto suurilla kaasun määrillä on

huomioitu luvussa 4.3.2, jossa tarkastellaan kaatopaikkakaasun hyödyntämistä kaukolämpökeskuksessa.

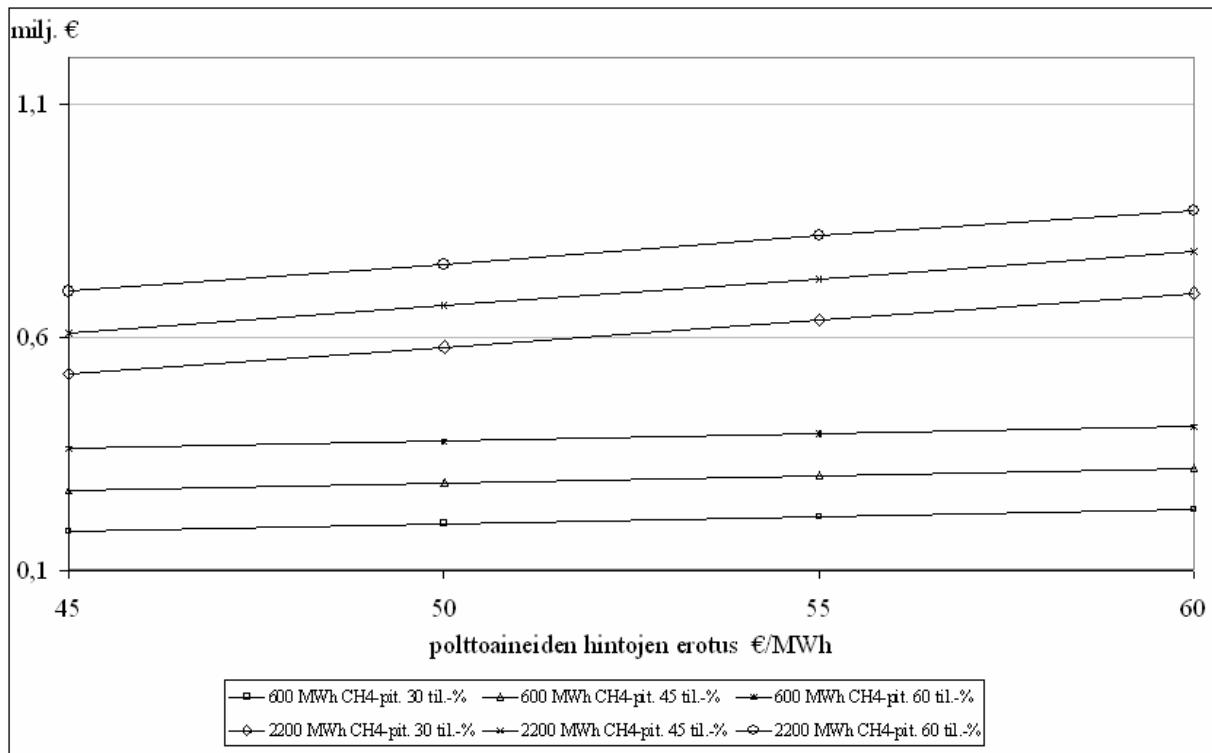
Tarkastellaan kiinteistökohtaisen lämmöntuotannon suurinta sallittua investointikustannusta korvattavan polttoaineen ja kaatopaikkakaasun hankintahintojen erotuksen funktiona. Tarkasteltavat kustannustekijät muodostuvat säästöstä, kun omalla lämmöntuotannolla korvataan ostetulla polttoaineella tai sähköllä tuotettua lämpöä. Koska oma lämmönkulutus on kaatopaikkakaasusta saatavaa lämpöenergiaa huomattavasti pienempi, oletetaan, että ylimääräinen kaasu myydään kaukolämmön tuotantoon. Kuluja aiheuttaa kaasun hankinta sekä ylijäämäkaasun siirtäminen kaukolämpöverkoston. Suurinta sallittua investointikustannusta tarkastellaan kahdella eri vuotuisella lämmönkulutuksella: 600 MWh ja 2 200 MWh. Korvattavan polttoaineen hinta on 60 €/MWh ja kaatopaikkakaasun hinta vaihtelee välillä 0 - 15 €/MWh. Lisäksi käytettävän kaatopaikkakaasun metaanipitoisuutena käytetään arvoja: 30, 45 ja 60 tilavuusprosenttia. Metaanipitoisuus 60 tilavuusprosenttia kuvaa tilannetta, jossa suurin sallittu investointikustannus sisältää kaatopaikkakaasun erotuslaitteiston investoinnin. Kuvissa 11 ja 12 esitetyillä suurimmilla sallituilla investointikustannuksilla tulee voida kattaa olemassa olevissa lämmityslaitteissa tarvittavat muutokset sekä uudet laitteistohankinnat, jotta investointi on tarkastelluilla parametreilla kannattava.

Kiinteistökohtaisen lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus vanhalla kaatopaikalla muodostuvaa kaatopaikkakaasua vastaavalla määrällä on esitetty kuvassa 11. Alueen oman lämmönkulutuksen ollessa noin 600 MWh vuodessa, suurimman sallitun investoinnin arvo on noin 140 000 - 240 000 euroa. Oman lämmönkulutuksen ollessa 2 200 MWh, voidaan tarvittaviin laitteistoihin investoida enemmän omasta tuotannosta aiheutuvan säästön takia, kun korvataan öljyllä tuotettavaa lämpöä. Mikäli korvattavan polttoaineen ja kaatopaikkakaasun hintojen välinen erotus on 45 euroa megawattitunnilta, voidaan tarvittaviin laitteistoihin investoida kaasun metaanipitoisuuden vaihteluista johtuen noin 490 000 - 530 000 euroa. Nykyisellä öljyn myyntihinnalla, eli noin 60 €/MWh, voidaan investoida keskimäärin 700 000 euroa laitteistoihin, kun kaatopaikkakaasulle ei lasketa hintaa.



Kuva 11. Kiinteistökohtaisen lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun vuotuinen kaatopaikkakaasun tuotantomäärä on 1,0 miljoonaa m³.

Kuvassa 12 on esitetty lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun 3,5 miljoonaa m³ kaatopaikkakaasua hyödynnetään kiinteistökohtaisen lämmön tuottamiseen. Suurin sallittu investointikustannus on suurin, kun oma lämmönkulutus on 2 200 MWh vuodessa ja kaukolämmön tuotantoon myytävän kaasun metaanipitoisuus on 60 tilavuusprosenttia. Tällöin tarvittaviin laitteistoihin voidaan investoida noin 0,7 - 0,9 miljoonaa euroa polttoaineiden hinnan erotuksen vaihdella 45 - 60 euroa megawattitunnilta. Suurin sallittu investointikustannus alhaisemmalla lämmönkulutuksella eli 600 MWh vuodessa on 0,2 - 0,4 miljoonaa euroa polttoaineiden hinnan erotuksen ja kaatopaikkakaasun metaanipitoisuuden vaihdella.



Kuva 12. Kiinteistökohtaisen lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun vuotuinen kaatopaikkakaasun tuotantomäärä on 3,5 miljoonaa m³.

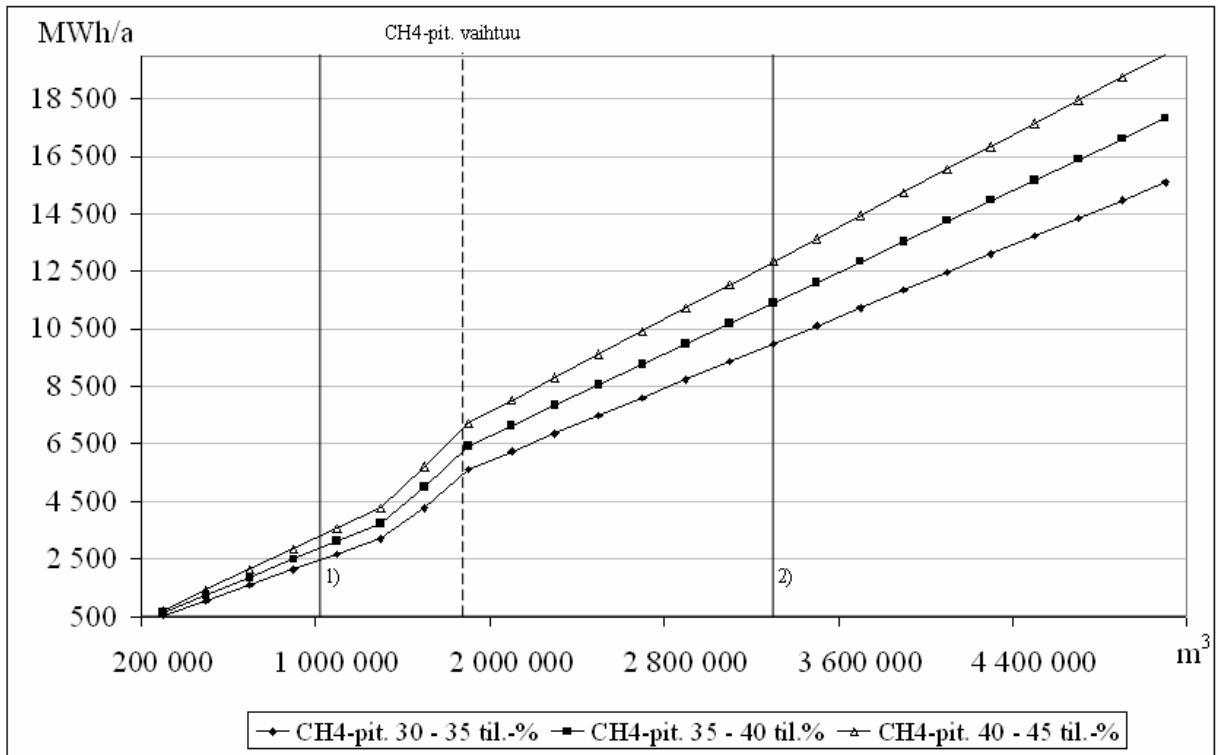
4.3.2 Kaukolämmön tuotanto

Kaatopaikkakaasua voidaan hyödyntää kaukolämpövoimalaitoksissa ja -keskuksissa. Kaukolämpövoimalaitoksissa polttoaine muutetaan sekä sähköksi että kaukolämmöksi, kun taas kaukolämpökeskuksissa tuotetaan polttoainetta polttamalla ainoastaan lämpöenergiaa. Kaatopaikkakaasua voidaan käyttää kaukolämmöntuotannon polttoaineena. Suomessa ainakin kymmenellä kaatopaikalla muodostuvaa kaatopaikkakaasua käytetään kaukolämmöntuotantoon. Espoon Ämmäsuolla muodostuvasta kaatopaikkakaasusta hyödynnetään kaukolämmöntuotannossa yli puolet. Tuotettu kaukolämpö kattaa noin seitsemän prosenttia Espoon lämmöntarpeesta. Kaukolämpöä tuotetaan kaatopaikkakaasulla myös Kuopiossa, Turussa, Helsingin Vuosaarella, Joensuussa, Jyväskylässä, Keravalla, Hyvinkäällä, Porvoossa ja Rovaniemellä. Hyödynnettävän kaatopaikkakaasun keskimääräinen metaanipitoisuus vaihtelee välillä 37 - 52 tilavuusprosenttia. (Kuittinen et al. 2006, 44 - 68.)

Anjalankosken Keltakankaan lämpökeskus käyttää polttoaineena maakaasua. Lämpökeskuksen maksimiteho on 4 MW. Vuonna 2006 Anjalankosken Energia myi noin 39 GWh kaukolämpöä. Lämpökeskuksen vaatima minimi metaanipitoisuus polttoaineelle on 45 prosenttia ja optimi metaanipitoisuus on 60 prosenttia. (Myllylä 2007.) Koska Keltakankaan vanhan kaatopaikalla muodostuvan kaasun metaanipitoisuus on keskimäärin ollut huomattavasti alle 40 tilavuusprosenttia, se ei ole soveltunut kaukolämpökeskuksen polttoaineeksi. Kaukolämmöntuotantoa tarkastellaan työssä kuitenkin samoilla metaanipitoisuuksilla kuin muitakin vaihtoehtoja eli 30, 35, 40 ja 45 tilavuusprosenttia. Tarkastelussa käytetään kaukolämmöntuotannon hyötysuhteena 90 prosenttia. Kaukolämmön tarve on riippuvainen vuodenajasta sekä kiinteistöjen lämmitystarpeesta. Tästä syystä työssä tarkastellaan kaukolämmön tuotannon lisäksi kaatopaikkakaasun hyödyntämistä kesäisin asfaltin valmistuksessa, kaatopaikkavesien haihdutuksessa sekä pilaantuneiden maa-ainesten termisessä käsittelyssä.

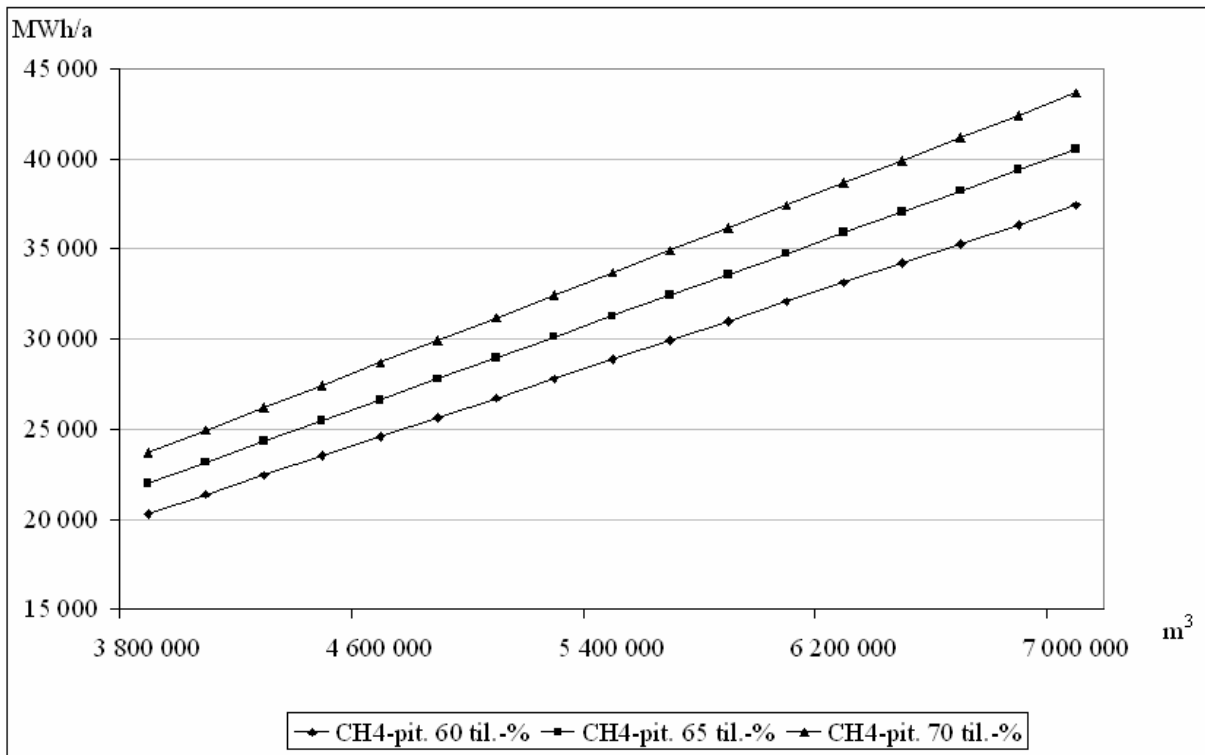
Kuvassa 13 on esitetty kuinka paljon Keltakankaan uudella ja vanhalla kaatopaikalla muodostuvasta kaasusta voidaan saada kaukolämpöä. Kaukolämpökeskuksessa hyödynnettävissä olevan kaatopaikkakaasun metaanipitoisuuden tulisi olla vähintään 40 tilavuusprosenttia. Myös sitä alhaisemmilla metaanipitoisuuksilla kaukolämmöntuotanto on mahdollista, mutta lämmöntuotannon hyötysuhde laskee ja biokaasukattila altistuu toimintahäiriöille. Alle 2,0 miljoonan m³ kaasumäärällä, joka vastaa vanhan kaatopaikan kaasuntuotantoa, kaukolämmöntuotanto on alle 5 000 MWh vuodessa eli noin 12 prosenttia Anjalankosken vuotuisesta myynnistä. Keltakankaan uuden kaatopaikan kaasuntuotantomäärän on arvioitu olevan maksimissaan noin 3,5 miljoonaa m³. Tällä määrällä voidaan tuottaa kaukolämpöä noin 13 000 MWh vuodessa, kun kaasun metaanipitoisuus on yli 40 tilavuusprosenttia. Määrä vastaa noin kolmasosaa Anjalankosken Energian vuotuisesta myynnistä.

Vanhan ja uuden kaatopaikan kaasujen tuotantomäärän ollessa maksimissaan voidaan kaukolämpöä saada noin 18 000 MWh vuodessa. Vanhan kaatopaikan kaasuntuotanto alkaa kuitenkin hiipua lähivuosina, joten kaukolämpönä kaasusta saatava hyöty jäänee maksimissaan 13 000 MWh vuodessa. Lisäksi tulee ottaa huomioon kaatopaikkakaasun tuotannon vaihtelu sekä kaukolämmön tarve vuodenajoittain. Kesäaikoina kaukolämmölle ei ole kysyntää, joten kesäkuukausina kaatopaikkakaasu tulee hyödyntää muilla tavoin tai polttaa soihdussa.



Kuva 13. Kaukolämmön tuotantokapasiteetti Ekoparkissa muodostuvalla kaatopaikkakaasulla. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.

Kaatopaikkakaasun ja mädätyksestä saatavan biokaasun kaukolämmöntuotantopotentiaali on esitetty kuvassa 14. Biokaasun korkeampi metaanipitoisuus verrattuna kaatopaikkakaasun metaanipitoisuuteen nostaa kaasuseoksen lämmöntuotannon kapasiteettia. Metaanipitoisuuden ollessa esimerkiksi 60 tilavuusprosenttia alle 4,0 miljoonalla m³ edellä mainittua kaasuseosta voidaan tuottaa kaukolämpöä noin 20 000 MWh vuodessa, joka vastaisi lähes puolta Anjalankosken Energian vuotuisesta myynnistä. Anjalankosken Energian vuotuinen myynti voitaisiin tuottaa kokonaan kaasuseoksella, kun kaasua olisi käytettävissä noin 7,0 miljoonaa m³. Tämä tarkoittaisi biokaasun ja kaatopaikkakaasun maksimituotantoa Anjalankoskella.

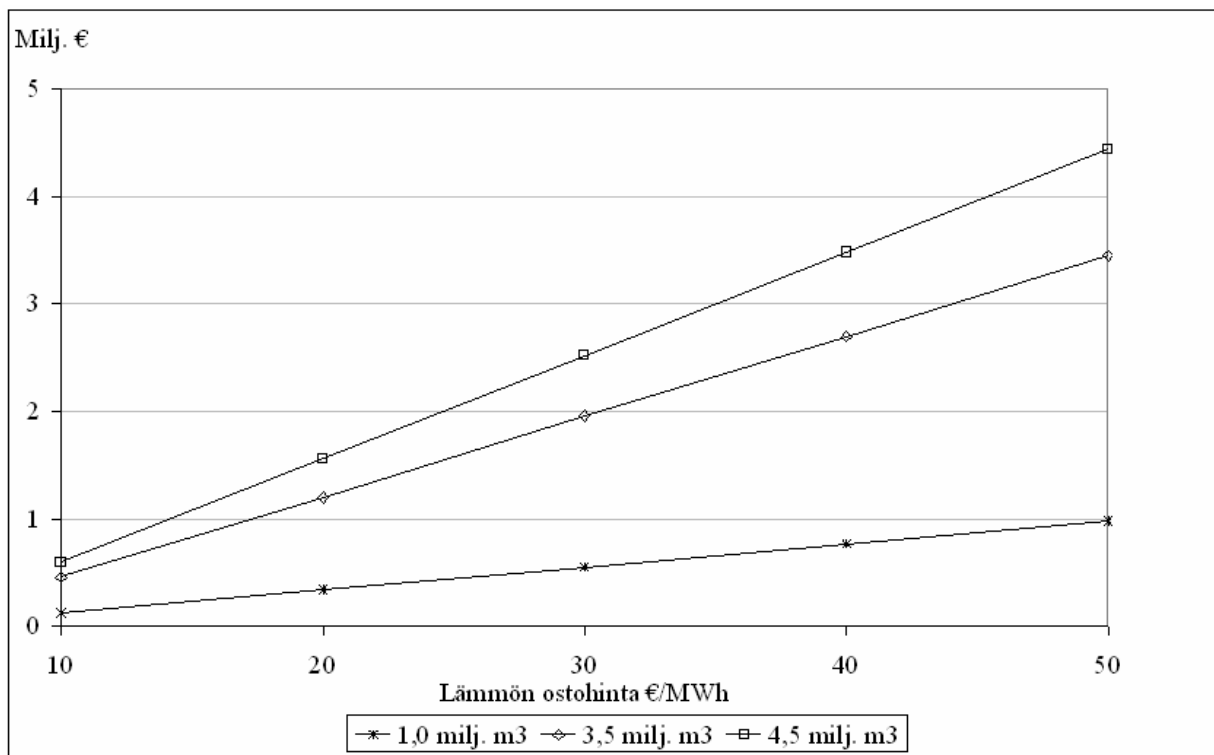


Kuva 14. Kaukolämmön tuotantopotentiaali biokaasulla ja kaatopaikkakaasulla yhteensä.

Kaukolämmöntuotannon suurinta sallittua investointikustannusta on tarkasteltu kolmella eri kaatopaikkakaasun määrällä 1,0; 3,5 ja 4,5 miljoonaa m³. Investointikustannus on ilmoitettu lämmön ostohinnan funktiona. Koska kaukolämmön todellista ostohintaa ei ole tiedossa, varioidaan hintaa välillä 10 - 40 €/MWh. Kaukolämmön myyntihinta kuluttajille on diplomityön valmistumisen aikana noin 41 €/MWh. Tarkastelussa kaasun metaanipitoisuudeksi on valittu 45 tilavuusprosenttia, joka vastaa Anjalankosken Energian asettamaa alhaisinta metaanipitoisuutta kaatopaikkakaasulle. Laskennassa tarkasteltavat kustannustekijät ovat kaatopaikkakaasun tai tuotetun lämmön myynnistä saatavat tuotot sekä kaasun hankinnasta aiheutuvat kulut.

Suurimmalla sallitulla investointikustannuksella pitäisi pystyä kattamaan kaasun siirtoon tarvittavat investoinnit, kaukolämpökattilan sekä polttimen hankinnan ja lisäksi kesäisin kaasun hyötykäyttökohteena olevalla asfalttiasemalla tarvittavat investoinnit. Investointikustannus sisältää myös mahdolliset kaukolämpöverkoston muutos- ja laajennusinvestoinnit. Kuvassa 15 on esitetty kaukolämmön tuotannon suurin sallittu investointikustannus edellä mainituilla parametreilla.

Mikäli tuotetusta kaukolämmöstä saadaan kaukolämmön nykyhintaa vastaava hinta, voidaan vanhan kaatopaikan kaasuntuotantoa vastaavalla määrällä investoida tarvittaviin laitteistoihin noin 0,8 miljoonaa euroa. Uuden kaatopaikan kaasuntuotantoa vastaavalla kaatopaikkakaasun määrällä, 3,5 miljoonaa m³, on suurin sallittu investointikustannus noin 2,7 miljoonaa euroa kaukolämmön kuluttajahinnalla. Kun kaatopaikkakaasun tuottaja tuottaa kaukolämpöä ja myy sen kaukolämmön jakelijalle, ei myyjä saa kuluttajahintaa vastaavaa arvoa lämmölle. Näin ol- len kaasun tuottajan saadessa lämmöstä esimerkiksi 20 €/MWh, voidaan tarvittaviin laitteis- toihin investoida noin 1,2 miljoonaa euroa, jos kaukolämpöä tuotetaan 3,5 miljoonalla m³ kaa- topaikkakaasua. Mikäli sekä vanhalla että uudella kaatopaikalla muodostuvalla kaatopaikka- kaasulla eli noin 4,5 miljoonalla m³, tuotetaan kaukolämpöä, voidaan edellä mainitulla läm- mön arvolla, 20 €/MWh, investoida noin 1,6 miljoonaa euroa investoinnin ollessa vielä kan- nattava.



Kuva 15. Kaukolämmön tuotannon suurin sallittu investointikustannus lämmön ostohinnan funktiona, kun kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus on 45 tilavuusprosenttia.

Anjalankosken Energian asettama minimi metaanipitoisuus kaatopaikkakaasulle on 45 tilavuusprosenttia ja optimipitoisuus 60 tilavuusprosenttia. Keltakankaan vanhan kaatopaikan kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus on ollut alle 40 tilavuusprosenttia. Metaanipitoisuutta voidaan nostaa kaasun todellisesta metaanipitoisuudesta erotuslaitteistoilla. Jos kaukolämmöksi myydystä lämmöstä saadaan 20 €/MWh, on suurin sallittu investointikustannus kaasun metaanipitoisuuden ollessa 60 tilavuusprosenttia noin 1,6 miljoonaa euroa, kun käytettävissä olevan kaatopaikkakaasun määrä on 3,5 miljoonaa m³. Tämä on noin 400 000 euroa enemmän kuin metaanipitoisuudella 45 tilavuusprosenttia. Tässä tapauksessa investointikustannuksella täytyisi voida kattaa kaukolämmön tuottamiseen ja kaasun siirtoon tarvittavien laitteistojen lisäksi kaasun puhdistuslaitteiston investointi metaanipitoisuuden nostamiseksi.

Polttoainekäyttö asfalttiasemalla

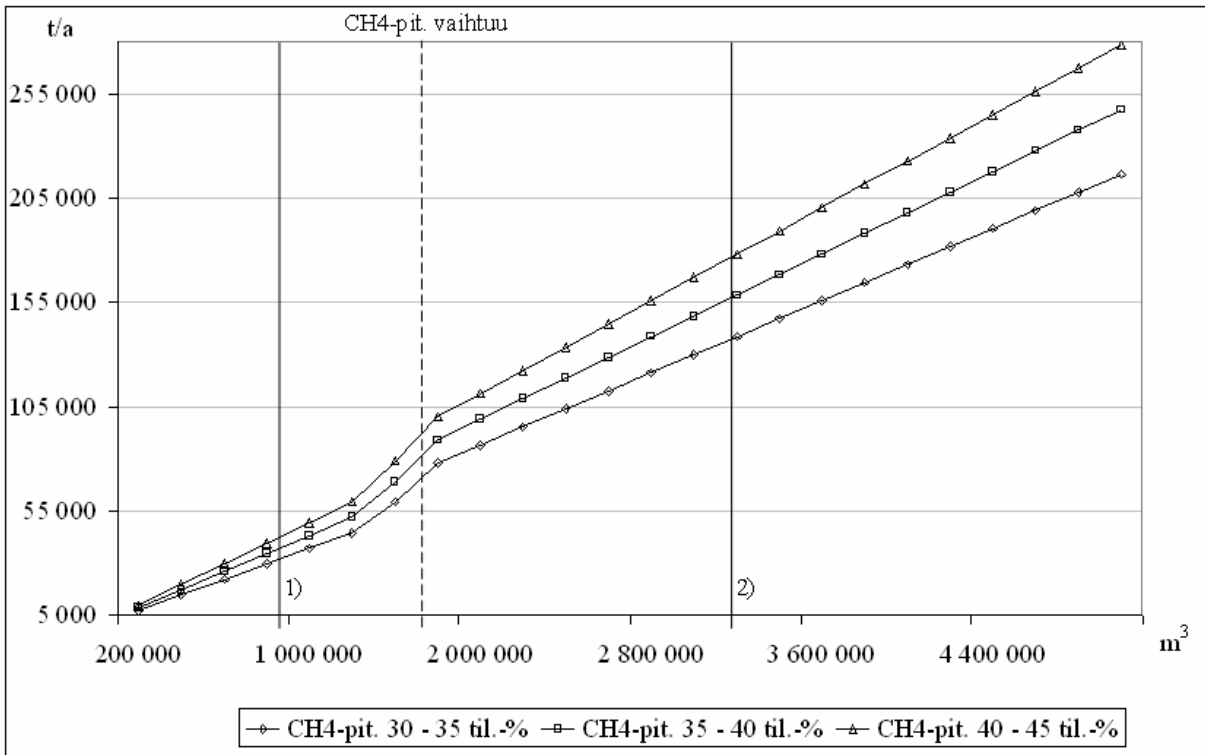
Kaukolämmön tarve on kesäkuukausina vähäistä, kun taas esimerkiksi asfalttiasemilla aika on kiireisintä. NCC Roads Oy:llä on Anjalankosken Ekoparkin alueella kiinteä Ammann-asfalttiasema. Asemalla valmistetaan asfalttia keskimäärin 40 000 - 50 000 tonnia vuodessa. Polttoaineella tuotettavaa lämpöä tarvitaan asfaltinvalmistukseen käytettävän kiviaineksen kuivaamiseen ja lämmittämiseen sekä bitumin lämmittämiseen. Anjalankosken asemalla lämpö tuotetaan polttoöljyllä, jota tarvitaan yhden asfalttitonnin valmistukseen noin 5,91 kg eli noin 70 kWh. Asfalttiaseman lämmöntarve on toukokuusta marraskuun loppuun. (Grönholm 2007.)

Tarkastellaan kaatopaikkakaasun hyödyntämistä Anjalankosken Ekoparkissa sijaitsevalla asfalttiasemalla rinnakkaisena vaihtoehtona kaukolämmön tuotannolle. NCC Roads Oy on kiinnostunut kaatopaikkakaasun käytöstä asfalttiaseman lämmöntuotannossa. Asemalla on maa-kaasun käyttövalmius, mutta sitä ei ole kustannussyistä otettu käyttöön. (Grönholm 2007.) Tampereen kaupungin omistamalla asfalttiasemalla käytetään koeluontoisesti Tarastenjärven kaatopaikalla muodostuvaa kaatopaikkakaasua. Amomatic-asfalttiasema on varustettu kombipolttimella, joka mahdollistaa kevyen ja raskaan polttoöljyn sekä maa- ja biokaasun polttami-

seen. Tampereella on tarkoituksena tuottaa toimintaan tarvittava lämpö puoliksi kaatopaikkakaasulla ja puoliksi polttoöljyllä. (Junno 2007.)

Asfaltin valmistuksessa käytettävän kiviaineksen lämmittämiseen tarvitaan energiaa noin 70 kWh tuotettua asfalttitonnia kohden. Laskelmissa käytetään kaatopaikkakaasun tarpeena 80 kWh/t. Lämmönkulutuksen korotuksella pyritään huomioimaan kaatopaikkakaasun laadun vaihteluista aiheutuvat ongelmat lämmöntuotannossa. Kuvassa 16 esitettyjen laskennan tulosten perusteella Anjalankosken asfalttiaseman tuotantokapasiteettia vastaava kaasun määrä on metaanipitoisuuden vaihtelun takia noin 1,0 - 1,2 miljoonaa m³. Asfalttiaseman tuotannon lämmittämiseen riittäisi siis laskennallisesti alle puolet uuden kaatopaikan vuotuisesta kaatopaikkakaasun maksimituotannosta eli 3,5 miljoonasta m³ tai vanhalla kaatopaikalla muodostuva kaatopaikkakaasu, joka on enimmillään noin 1,5 miljoonaa m³. Kaatopaikalla muodostuu kaasua tasaisesti vuoden ympäri, kuitenkin asfalttiaseman toiminta ajoittuu tuotannon tarpeen mukaan toukokuusta marraskuun alkuun. Loppuosa kaasusta olisi siis käytettävissä talvikausina kaukolämmön tuotantoon. Lisäksi asfalttiasema toimii pääsääntöisesti arkipäivisin. Asfalttiaseman toiminta-aikojen ulkopuolella kaatopaikkakaasu voidaan polttaa esimerkiksi soihdussa.

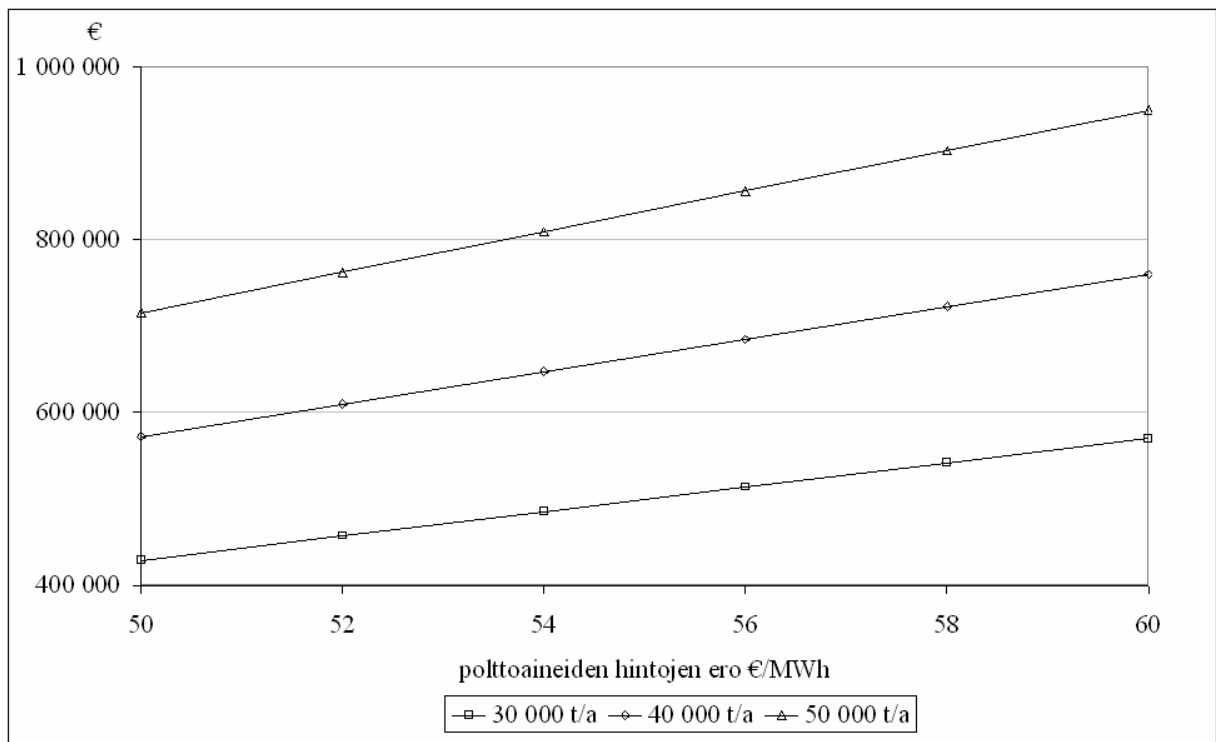
Mikäli alueelle tulisi biojätteen ja lietteen mädätyslaitos, ja sieltä saatava biokaasu yhdistettäisiin kaatopaikkakaasun kanssa seokseksi ja hyödynnettäisiin asfaltinvalmistuksessa, nousisi kiviaineksen ja bitumin lämmityskapasiteetti yli 200 000 tonniin vuodessa ja jopa maksimituotantoarvoilla lähelle 400 000 tonnia. Todellisuudessa näin suurelle asfaltin tuotantokapasiteetille ei ole tarvetta. Koska kaatopaikkakaasun tarve asfalttiaseman lämmöntuotantoon ei ole läheskään tuotantokapasiteetin suuruinen ja kulutus vaihtelee ajallisesti, kaatopaikkakaasua jää käytettäväksi muun muassa kaukolämmöntuotantoon sekä mahdollisesti myös muihin hyötykäyttösovelluksiin.



Kuva 16. Anjalankosken Ekoparkissa muodostuvalla kaatopaikkakaasulla kuumennettavan kiviaineksen määrä asfalttiaseman raaka-aineeksi. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.

Lasketaan suurin sallittu investointikustannus pelkälle asfalttiaseman muutokselle kaatopaikkakaasulle soveltuvaksi. Vuotuiseen asfaltin tuotantoon riittää periaatteessa vanhalla kaatopaikalla muodostuva kaasu, joten oletetaan suurimman kaasun tarpeen olevan 1,0 miljoonaa m³ vuodessa. Tällöin uudella kaatopaikalla muodostuva kaasu eli noin 3,5 miljoonaa m³ vuodessa on käytettävissä kaukolämmön tuotantoon. Tarvittavat investoinnit liittyvät todennäköisesti ainoastaan poltinmuutokseen sekä kaasun siirtoon kaatopaikalta asfalttiasemalle. Suurin sallittu investointikustannus esitetään käytössä olevan polttoöljyn ja kaasun hinnan erotuksena, joka kuvaa tilannetta, kun kaatopaikkakaasulla korvataan nykyisin kiviaineksen lämmittämiseen käytettävää öljyä. Öljyn hintana käytetään 60 €/MWh ja kaatopaikkakaasun hinta vaihtelee välillä 0 - 10 €/MWh. Kaatopaikkakaasun metaanipitoisuutena käytetään 40 tilavuusprosenttia.

Kuvassa 17 on esitetty asfalttiaseman muutostöiden suurin sallittu investointikustannus kolmelle eri asfaltin tuotantokapasiteetille: 30 000, 40 000 ja 50 000 tonnia vuodessa. Edellä mainituilla tuotantokapasiteeteilla lämmöntuotantoon tarvittava kaatopaikkakaasun määrä vastaa Keltakankaan vanhan kaatopaikan vuotuista kaasuntuotantoa eli 0,8 - 1,4 miljoonaa m³. Koska kaasuntuotanto ajoittuu koko vuoden ajalle ja asfalttiaseman lämmöntarve ainoastaan kesäkuukausille, joudutaan kiviaineksen lämmittämiseen käyttämään lisäksi Keltakankaan uudelta kaatopaikalta muodostuvaa kaasua. Mikäli kaatopaikkakaasulle ei aseteta hintaa, voidaan asfalttiaseman muutostöihin ja kaatopaikkakaasun siirtoon investoida 30 000 tonnin vuotuisella asfaltintuotantokapasiteetilla noin 570 000 euroa ja 50 000 tonnin tuotantokapasiteetilla noin 950 000 euroa. Mikäli kaatopaikkakaasun hinnaksi asetetaan 10 euroa megawattitunnilta, suurin sallittu investointikustannus on noin 430 000 euroa, kun asfalttia tuotetaan 30 000 tonnia vuodessa ja noin 715 000 euroa, kun asfaltin vuotuinen tuotanto on noin 50 000 tonnia.



Kuva 17. Suurin sallittu investointikustannus asfalttiaseman muutostöille, kun kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus on 40 tilavuusprosenttia ja polttoöljyn hintana 60 €/MWh.

Kun kaatopaikkakaasua käytetään sekä asfalttiasemalla että kaukolämpölaitoksessa polttoaineena, suurin sallittuinvestointikustannus on sama kuin esitetty kuvassa 14. Tällöin asfalttiasemalla tarvittavat investoinnit sisältyvät edellä laskettuun kaukolämmön suurimpaan sallittuun investointikustannukseen.

Pilaantuneen maan terminen käsittely

Ekoparkin alueella toimii useita pilaantuneiden maiden vastaanottoon ja käsittelyyn erikoistuneita yrityksiä. Kymenlaakson Jäte Oy:llä on vuodesta 2002 ollut toiminnassa öljyisten maiden vastaanotto- ja käsittelyalue. Yrityksen alueella on myös tilat pilaantuneiden maiden vastaanottoon, mutta varsinaisesta toiminnasta vastaa Ekokem-Palvelu Oy. Vuonna 2006 Kymenlaakson Jäte Oy otti vastaan öljyisiä maita noin 4 350 tonnia, josta 1 260 tonnia voitiin sijoittaa suoraan kaatopaikan peiterakenteeseen. (Kymenlaakson Jäte Oy 2007.) Ekokem-Palvelu Oy:llä on voimassa oleva ympäristölupa pilaantuneiden maiden stabiloinnille, alipainekäsittelylle ja pesulle. Ekokem-Palvelu Oy myös välivarastoi pilaantuneita maa-aineksia alueelle ennen siirtämistä muualle käsiteltäväksi. Termisesti käsiteltävät maa-ainekset siirretään Ekokemin Riihimäen laitokselle. (Karppanen 2007; Uimarihuhta 2007.)

Pilaantunutta maaperää voidaan puhdistaa tietyistä haitta-aineista termisesti. Termisiä käsittelytekniikoita on useita, muun muassa matalan ja korkean lämpötilan desorptio sekä poltto. (Sarkkila et al. 2004, 89.) Tässä diplomityössä tarkastellaan termodesorptiota, jossa tarvittava lämpö tuotetaan osittain tai jopa kokonaan kaatopaikkakaasulla. Suomessa siirrettävät termodesorptiolaitteistot ovat käytössä Niska & Nyysönen Oy:llä sekä Savaterra Oy:llä. Ekokem Oy:llä on Riihimäellä kiinteä keskilämpötilalaitteisto, jossa voidaan käsitellä pilaantuneita maamassoja.

Desorptiossa haitta-aineet irrotetaan maa-aineksesta muuttamalla ne lämmöllä kaasumaiseen olomuotoon. Menetelmässä ei tuhota orgaanisia yhdisteitä, vaan käsittelyn lämpötila valitaan siten, että yhdisteet haihtuvat mutta eivät hapetu. Terminen desorptio soveltuu orgaanisille haitta-aineille, kuten haihtuville ja puolihaihtuville orgaanisille yhdisteille sekä PAH- ja PCB-

yhdisteille. Menetelmä soveltuu kaikille maalajeille. Hienojakoisten maa-ainesten käsittely vaatii ainoastaan pidemmän viipymäajan. Desorptio voidaan jakaa käsittelylämpötilan perusteella matalalämpötila desorptioon (*low temperature thermal desorption*, LTTD) ja korkealämpötila desorptioon (*high temperature thermal desorption*, HTTD). Matalalämpötila desorptiossa käsittelylämpötila on 90 - 320 °C. Korkealämpötila desorptiossa käsittelylämpötila on 320 - 560 °C. (Penttinen 2001, 32.)

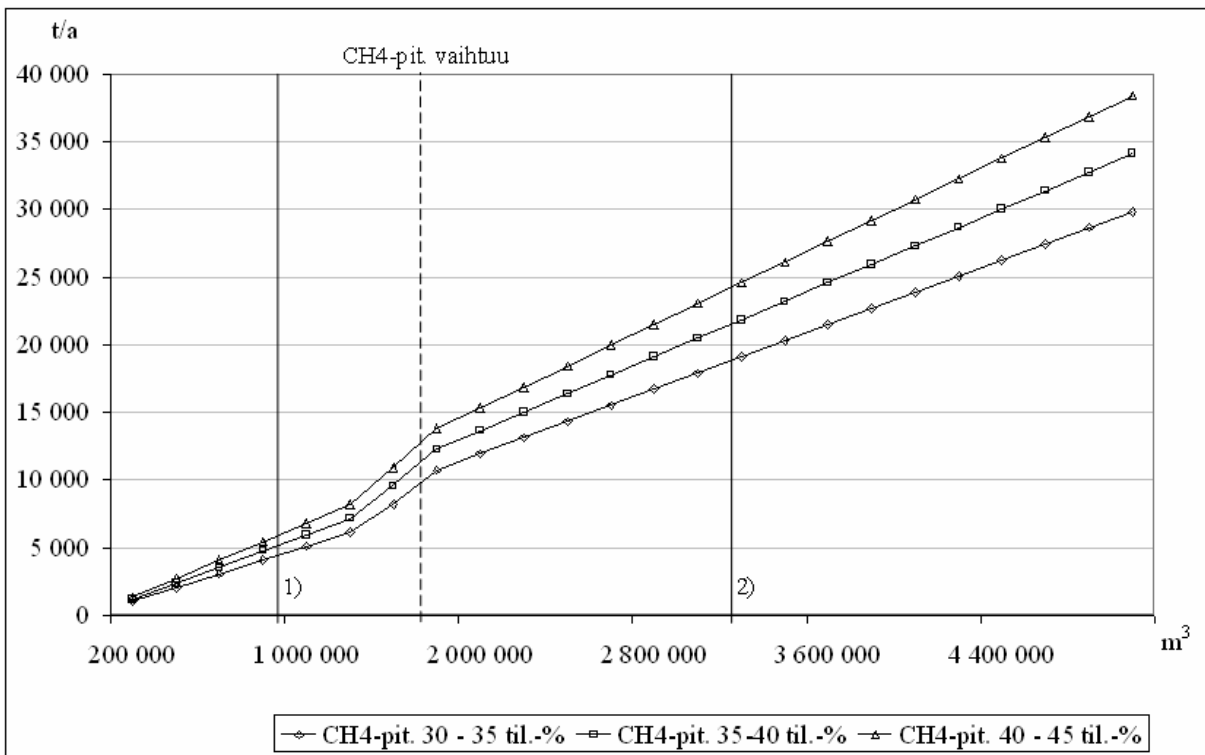
Desorptiotekniikoita on kolme: suorapoltto, epäsuorapoltto ja epäsuoralämmitteinen tekniikka. Suorassa poltossa maa-aines on suorassa kosketuksessa avoliekin kanssa. Epäsuorassa poltossa suoralämmitteinen rumpukuivain lämmittää ilmaa. Lämmennyt ilma johdetaan käsiteltävään maa-ainekseen haitallisten yhdisteiden haihduttamiseksi. Epäsuoralämmitteisessä tekniikassa rumpukuivaimessa olevaa maa-ainesta lämmitetään ulkopuolelta. Kaikissa kolmessa desorptiotekniikassa muodostuvat poistokaasut tulee käsitellä. Haitta-aineet poistetaan yleensä kondensoimalla, aktiivihiilisuodatuksella, jälkipoltolla tai katalyyttisellä hapetuksella. (Penttinen 2001, 32; Sarkkila et al. 2004, 89.)

Termodesorptiossa tarvittava lämpö tuotetaan tyypillisesti kevyellä polttoöljyllä, mutta laitteistoissa voidaan käyttää myös maakaasua, nestekaasua tai kaatopaikkakaasua. Laitteiston energiankulutus vaihtelee käsiteltävän maa-aineksen ominaisuuksista, kuten kosteudesta ja haitta-aineiden pitoisuuksista, johtuen. (Karppinen 2007.) Savaterra Oy:n ympäristöluvassa (ESA-2003-Y-26-121) on termodesorptiolaitteiston maksimienergiatarpeen arvioitu olevan 106 250 MJ/h, kun käsittelykapasiteetti on 50 tonnia tunnissa. Lisäksi ympäristöluvassa on esitetty vuosittaiseksi energiankulutukseksi 41 615 GJ, käsitellyn maa-aineksen määrän ollessa keskimäärin 20 000 tonnia vuodessa. Edellä mainittujen tietojen perusteella laskettaessa ominaisenergian kulutukseksi saadaan 570 - 590 kWh/t.

Keskimäärin 20 000 tonnia pilaantunutta maata käsittelevän laitteiston lämmöntuottamiseen tarvitaan metaanipitoisuuden vaihdella 2,6 - 3,4 miljoonaa m³ kaatopaikkakaasua. Näin ollen Keltakankaan kaatopaikoilla muodostuva kaasu riittäisi jopa noin 30 000 tonnin pilaantuneen maa-ainesmäärän termiseen käsittelyyn, jos käsittelyä tehdään ympäri vuoden. Pilaantuneiden maiden termisen käsittelyn yhdistäminen kaukolämmöntuotantoon on kaasun riittävyys-

den kannalta kuitenkin mahdollista, kun pilaantuneiden maiden käsittelytarve on kesäisin, jolloin kaukolämmön tarve on lähes olematonta. Tosin pilaantuneiden maa-ainesten käsittelyn yhdistämisessä kaukolämmön tuotantoon on vähemmän potentiaalia hyödynnettävissä molempiin toimintoihin kuin kaukolämmön ja asfalttiaseman lämmöntuotannon yhdistämisessä.

Kuvassa 18 on esitetty pilaantuneiden maa-ainesten käsittelykapasiteetti, kun tarvittava lämpö tuotetaan kaatopaikkakaasulla. Laskennassa käytettävä energiankulutus on 580 kWh maa-ainestonnia kohden. Desorptiolaitteiston käsittelykapasiteetin ollessa 20 000 tonnia vuodessa kaatopaikkakaasua tarvitaan noin 3,0 miljoonaa m³ kaatopaikkakaasua, jonka metaanipitoisuus on 35 - 40 tilavuusprosenttia. Näin ollen kaukolämmön tuotantoon jää noin 500 000 m³, mikäli vuotuinen kaasun tuotanto on keskimäärin 3,5 miljoonaa m³ vuodessa. Alhaisemmalla pilaantuneiden maiden käsittelytarpeella kaukolämmön tuotantoon jää enemmän kaasua.



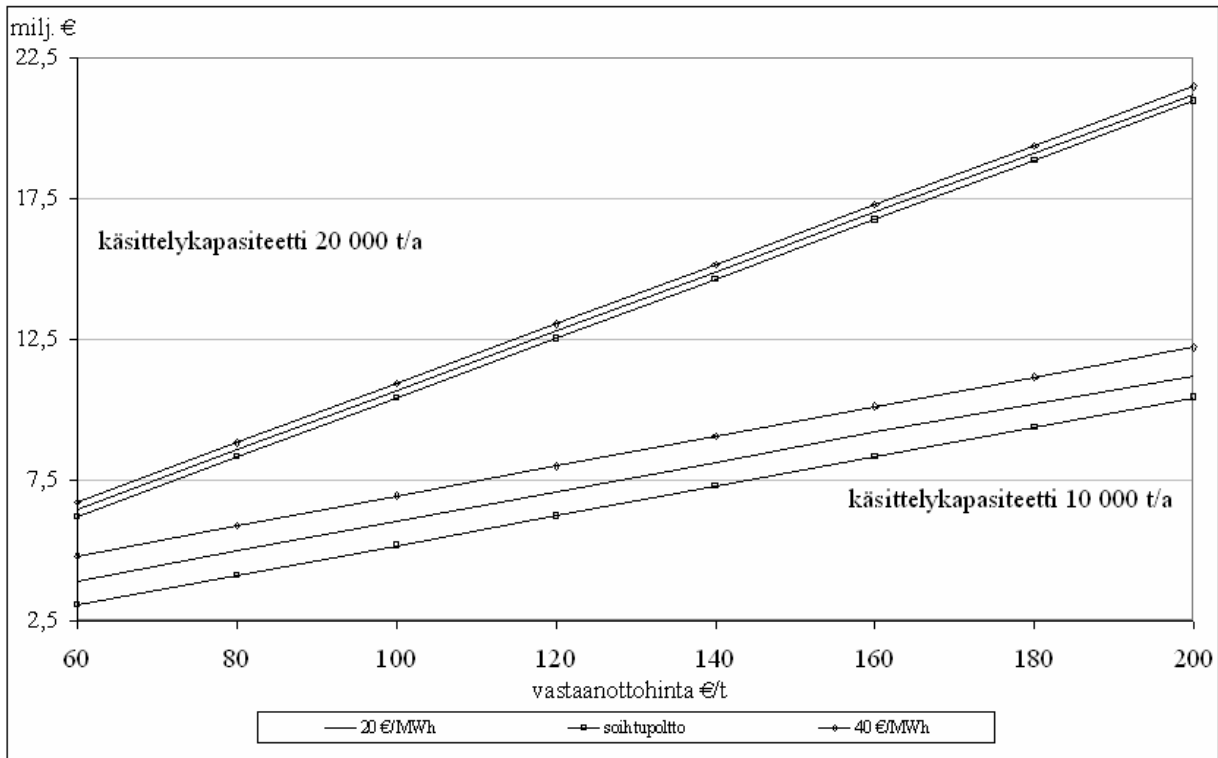
Kuva 18. Pilaantuneiden maa-ainesten käsittelykapasiteetti termodesorptiolaitteistolla, kun ominaisenergiankulutus on 580 kWh käsiteltyä maa-ainestonnia kohden. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.

Pilaantuneiden maiden termisen käsittelyn ja kaukolämmön tuotannon investointikustannustarkastelussa kustannustekijöistä tuottoja ovat pilaantuneen maa-aineksen vastaanotosta perittävä maksu sekä kaukolämmöstä saatava hinta. Vaihtoehdon kulut aiheutuvat kaasun hankinnasta, termisen käsittelylaitteiston sähkön kulutuksesta sekä käyttökustannuksista. Lopputuotteena muodostuvan puhtaan maa-aineksen käytöllä ei oleteta olevan vaikutusta investointikustannukseen eli sen arvo on nolla euroa. Investointikustannustarkastelu on tehty kahdelle käsittelykapasiteetille 10 000 tonnia ja 20 000 tonnia vuodessa. Pilaantuneiden maiden käsittelystä ylijäävä kaasu käytetään kaukolämmön tuotantoon. Kaukolämmön tuotannon lisäksi laskennassa on tarkasteltu vaihtoehtoa, jossa ylijäämäkaasu poltetaan soihdussa. Kaukolämmön arvona käytetään 20 €/MWh ja 40 €/MWh, kuten tarkasteltaessa kaatopaikkakaasua kaukolämmön tuotannossa sekä käyttöä asfalttiaseman polttoaineena. Soihutupolttu kuvaa myös tilannetta, jossa tuotetulla lämmöstä ei saada maksua.

Investointikustannus tarkastelussa käytetty kaatopaikkakaasun määrä on 3,5 miljoonaa m³ vuodessa ja laitteiston energiankulutus on 580 kWh maa-ainestonnia kohden. Suurin sallittu investointikustannus on esitetty pilaantuneen maa-aineksen vastaanottohinnan funktiona. Maa-aineksen vastaanottohinta vaihtelee tarkastelussa välillä 60 - 200 euroa tonnilta. Kuten kuvasta 19 voidaan todeta, termisen maa-ainekäsittelyn ja kaukolämmön tuotannon suurin sallittu investointikustannus on melko suuri jo alhaisella pilaantuneen maa-aineksen vastaanottohinnalla. Käsittelykapasiteetin ollessa 10 000 tonnia vuodessa, suuremmasta kaukolämmön tuotannosta huolimatta suurin sallittu investointikustannus jää alhaisemmaksi kuin käsittelykapasiteetilla 20 000 tonnia vuodessa. Tämä aiheutuu pilaantuneen maa-aineksen vastaanottohinnan suuremmasta arvosta verrattuna kaukolämmöstä saatavaan hintaan.

Laitteiston käsittelykapasiteetin ollessa 20 000 tonnia vuodessa 60 euron vastaanottohinnalla suurin sallittu investointikustannus on noin 6,2 miljoonaa euroa, kun lämmöstä saatava hinta on 20 €/MWh ja noin 6,0 miljoonaa euroa, kun kaasusta ei saada taloudellista korvausta tai se poltetaan soihdussa. Vastaanottohinnan ollessa 140 euroa tonnilta, suurin sallittu investointikustannus voi olla noin 15,0 miljoonaa euroa. Käsittelykapasiteetin ollessa 10 000 tonnia vuodessa, suurin sallittu investointikustannus 60 euron vastaanottohinnalla vaihtelee 2,8 - 4,6 miljoonan euron välillä ja vastaavasti 140 euron vastaanottohinnalla 7,1 ja 8,8 miljoonan euron

välillä lämmöstä saatavasta arvosta riippuen. Tuloksista huomataan, että polttoaineella ei ole suurta prosentuaalista vaikutusta investointikustannuksen suuruuteen. Suurimmalla sallitulla investointikustannuksella tulisi voida kattaa kaukolämmön tuotantoon tarvittavat laitteistot, kuten kattilan ja polttimeen sekä kaasun siirtolaitteistot sekä termodesorptiolaitteiston hankinta.



Kuva 19. Pilaantuneen maa-aineksen termisen käsittelyn ja kaukolämmön tuotannon suurin sallittu investointikustannus maa-aineksen vastaanottohinnan funktiona kaatopaikkakaasun määrällä 3,5 miljoonaa m³.

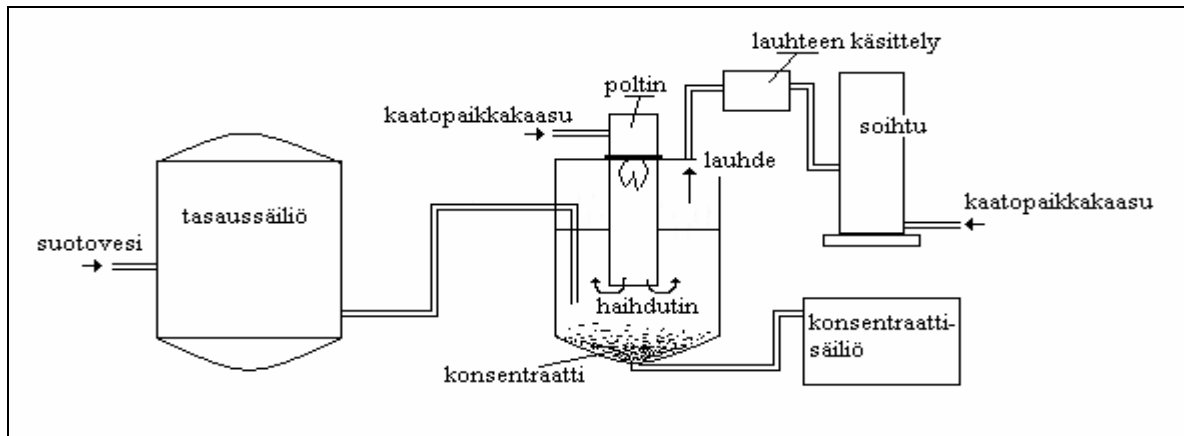
4.3.3 Kaatopaikkavesien haihdutus

Valtioneuvoston päätöksen kaatopaikoista (861/1997) mukaan kaatopaikalla muodostuvat kaatopaikkavedet tulee kerätä hallitusti yhteen, käsitellä kaatopaikalla tai johtaa muualle käsiteltäväksi. Kaatopaikkavedellä tarkoitetaan kaatopaikalle sijoitetun jätteen läpi suotautuvaa eli suotovettä tai muuta kaatopaikalla muodostuvaa likaantunutta nestettä (VNp 861/1997). Kel-takankaan vanhalla kaatopaikalla kaatopaikkavedet johdetaan viemäriin ja sieltä edelleen kun-nalliselle jätevedenpuhdistamolle käsiteltäväksi. Kaatopaikalla on jo rakennettuna valmius

kaatopaikkaveden takaisinkierätykseen jätepenkereeseen. (Kosonen 2007.) Keltakankaan uudella kaatopaikalla kaatopaikkavesiä on kerätty toiminnan aloittamisesta eli vuodesta 2002 saakka. Kaatopaikkavedet sekä alueella kertyvät sadevedet johdetaan kahteen tasausaltaaseen, joiden tilavuus on noin 3 500 m³. Kaatopaikkavettä ilmastetaan pintailmastimilla sekä hapetetaan happimaton avulla hajuhaittojen estämiseksi. Kaatopaikkavedet johdetaan Anjalankosken kaupungin Halkoniemen jätevedenpuhdistamoon käsiteltäväksi kuten vanhankin kaatopaikan kaatopaikkavedet. Vuonna 2006 kaatopaikkavettä muodostui noin 44 390 m³. (Alatalo 2007a.)

Kaatopaikkavesien haihduttamisella pienennetään kaatopaikkavesien tilavuutta ennen vesien johtamista viemäriverkoston, jolloin säästetään jätevesikustannuksissa. Myös orgaanisten yhdisteiden pitoisuus pienenee, niiden palaessa haihduttimen lämpötilassa. Toisaalta haihduttamisen lopputuotteena saatava väkevä kaatopaikkavesi soveltuu kierrätettäväksi kaatopaikan jätetäyttöön kaatopaikkakaasun muodostumisen voimistamiseksi sekä jätteen stabiloitumisen nopeuttamiseksi. Suomessa ensimmäinen haihduttamo rakennettiin Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy:n Kujalan kaatopaikalle Lahteen vuonna 1996 (Seppälä 2007). Laitteiston käytöstä on luovuttu. Myös Rosk'n Rollin Munkkaan kaatopaikalla on ollut käytössä sähköinen kaatopaikkavesien haihdutin. Haihduttamon käytöstä on luovuttu muun muassa toimintahäiriöiden takia (Lehtonen 2007).

Haihduttamista on useita erilaisia teknisiä ratkaisuja, ne eroavat toisistaan lämmönsiirtotekniikan sekä poistokaasujen ja lauhteen puhdistustekniikan perusteella. Lämmön tuottamiseen tarvittavat polttimet voivat sijaita joko haihduttimen pohjalla, katossa tai sivuilla. Lämmönsiirrinosa voi olla sijoitettuna poltinten sijainnista riippuen haihduttimen alaosassa tai esimerkiksi spiraalina haihduttimen vesitilan alueella. Lämpö voidaan siirtää kaatopaikkaveteen myös suoraan ilman lämpöä johtavaa pintaa. (Roe et al. 1998, 25 - 27.) Haihduttimessa kaatopaikkavettä kuumennetaan höyrystymispisteeseen. Haihdutin toimii alipaineisena, jolloin toimintalämpötila on noin 50 - 60 °C. Lahden käyttökokemuksen perusteella haihdutuksessa käsiteltävästä kaatopaikkavedestä 14 prosenttia muodostaa konsentraattia ja noin 80 prosenttia lauhdetta. Lauhde muodostuu, kun höyrystynyt vesi lauhdutetaan nesteeksi. (Ettala et al. 1994, 14 - 17; Seppälä 2007.) Haihduttamisprosessi on esitetty kuvassa 20.



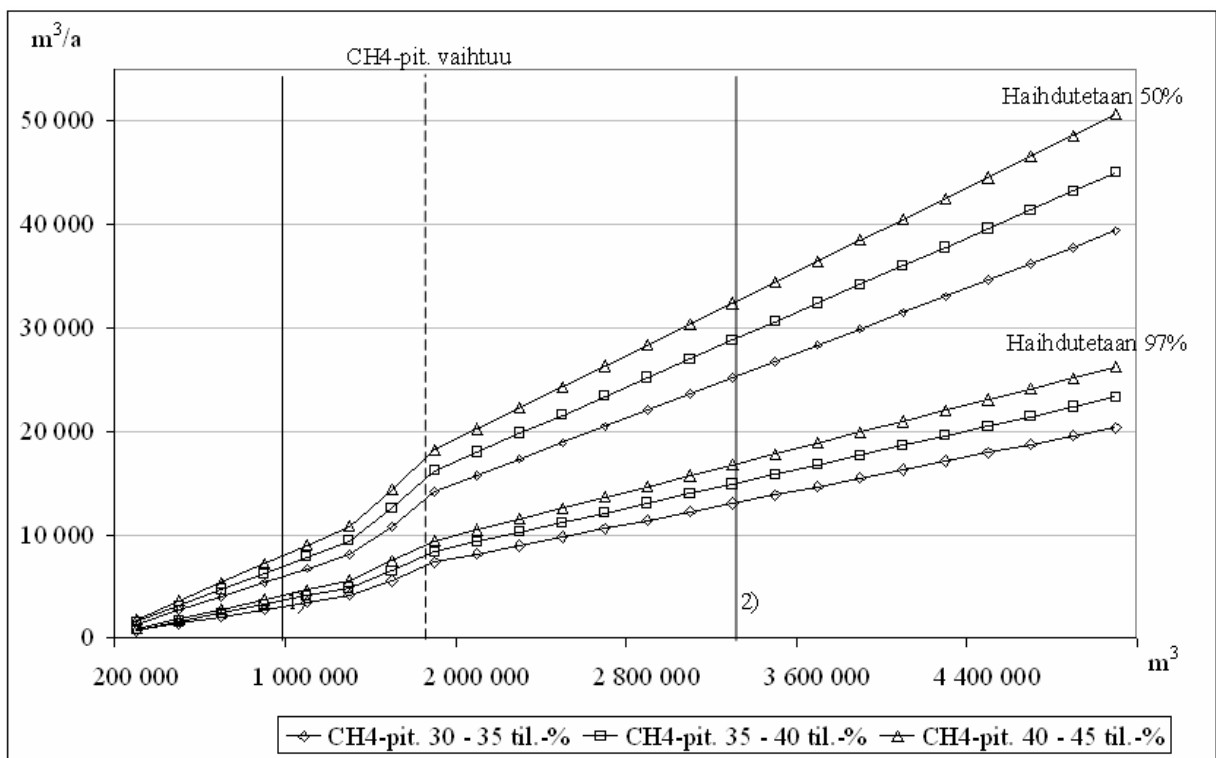
Kuva 20. Kaatopaikkavesien haihdutusprosessi (Roe et al. 1998, 26).

Haihdutuksessa muodostuu myös poistokaasua, joka Lahden käyttökokemusten perusteella on pääosin hiilidioksidia, happea ja typpeä (Seppälä 2007). Kaasujen käsittely voidaan tehdä erillisellä puhdistuslaitteistolla tai siitä voidaan erottaa vesi ja johtaa soihtuun, jossa se voidaan polttaa ylijäämäkaatopaikkakaasun seassa. Konsentraatin kuiva-ainepitoisuus on keskimäärin 30 prosenttia, se voidaan muun muassa kierrättää takaisin jätetäyttöön. (Roe et al. 1998, 25 - 27.)

Haihduttamoissa käytetään yleensä fossiilisia polttoaineita tai sähköä lämmöntuottamiseen käsiteltäessä muun muassa jätevesiä. Erityisesti Yhdysvalloissa kaatopaikoilla kaatopaikkavesien haihduttamiseen on käytetty kaatopaikkakaasua (U. S. EPA 2006). Tässä diplomityössä lasketaan kuinka paljon Anjalankoskella muodostuvalla kaatopaikkakaasulla voidaan käsitellä kaatopaikkavesiä. Laskennassa yhtä käsiteltävää kuutiometriä kohden tarvitaan 850 kWh lämpöä, että kaatopaikkaveden tilavuuden pientymä on 97 prosenttia (Roe et al. 1998, 26). Lisäksi lasketaan kaatopaikkavesien haihduttamista 50 prosenttia alkutilavuudesta, jolloin tarvittava energiankulutus on noin 440 kWh käsiteltävää m^3 kohti. Tarvittavassa lämpöenergiassa on huomioitu veden höyrystämiseen tarvittava lämpö, noin 2,4 MJ/kg, sekä lämpöhäviöt.

Kaatopaikkavesien haihduttaminen vie runsaasti energiaa. Keltakankaan vanhalta kaatopaikalta muodostuvalla kaatopaikkakaasulla, jonka metaanipitoisuus on 35 - 40 tilavuusprosenttia, voidaan haihduttaa noin 6 300 m^3 kaatopaikkavettä eli käsitellä noin 6 500 m^3 , kun tilavuuden

pienentymä on noin 97 prosenttia. Mikäli kaatopaikkavedestä haihdutetaan vain 50 prosenttia, voidaan vanhalla kaatopaikalla muodostuvalla kaasulla käsitellä noin 12 600 m³ kaatopaikkavettä. Mikäli uudelta Keltakankaan kaatopaikalta muodostuva kaatopaikkakaasu on metaanipitoisuudeltaan 45 tilavuusprosenttia, voidaan haihduttimessa käsitellä noin 17 800 m³ kaatopaikkavettä, kun tilavuutta pienennetään 97 prosenttia. Mikäli tilavuutta pienennetään 50 prosenttia, voidaan uudella kaatopaikalla muodostuvalla kaatopaikkakaasulla käsitellä noin 34 400 m³. Kaatopaikkaveden haihdutuskapasiteetti on esitetty kuvassa 21.



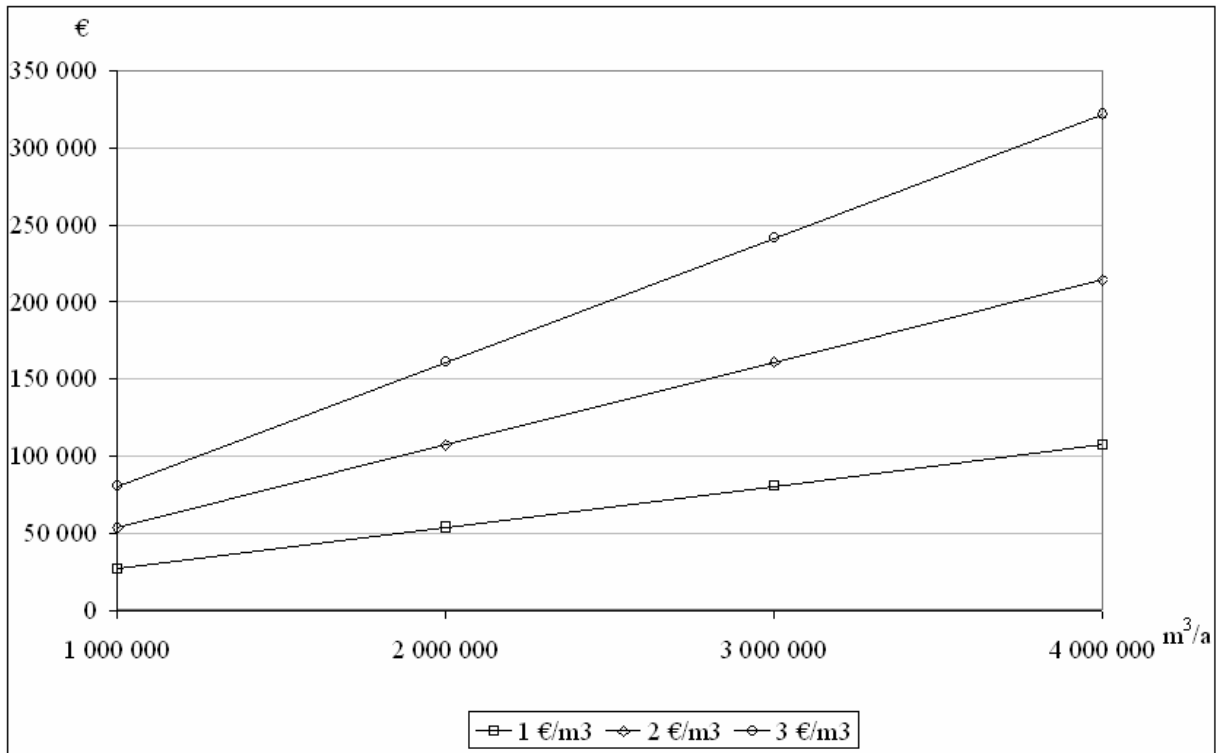
Kuva 21. Kaatopaikkavesien haihdutuskapasiteetti kaatopaikkakaasulla. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.

Tarkastellulla haihduttamisen energiankulutuksella ei siis saavuteta Keltakankaan kaatopaikoilla muodostuvien kaatopaikkavesien määrää vastaavaa käsittelykapasiteettiä. Tarvittava käsittelykapasiteetti voidaan saavuttaa kaatopaikkakaasulla, mikäli molemmilta kaatopaikoilta saadaan arvioidut kaasun maksimituotannot sekä laadukasta kaasua eli metaanipitoisuudeltaan vähintään 45 tilavuusprosenttia. Tällöinkin voidaan muodostuvista kaatopaikkavesistä haihduttaa 50 prosenttia. Todennäköisimmin tarvittava käsittelykapasiteetti on saavutettavissa, mi-

käli kaatopaikkakaasu yhdistettäisiin mädätysreaktorissa saatavan biokaasun kanssa. Kaasuseoksen suuri määrä, 3,8 - 7,0 m³ vuodessa, ja korkea metaanipitoisuus mahdollistavat haihdutuskapasiteetin, jonka suuruus vaihtelee välillä 30 000 - 57 000 m³ vuodessa.

Lasketaan kaatopaikkakaasun haihduttamiselle suurin sallittu investointikustannus. Investointikustannukseen vaikuttavat kustannustekijät muodostuvat viemäriin johdettavan kaatopaikkaveden alhaisemmasta määrästä aiheutuvasta säästöstä sekä kaasun hankinnasta aiheutuvista kuluista. Investointilaskelmien perusteella suurimpaan sallittuun investointikustannukseen vaikuttavat ainoastaan käytettävissä olevan kaasun määrä sekä jätevedestä maksettava vesimaksu. Investointikustannukseen ei vaikuta haihdutuksen ominaisenergiankulutus eikä myöskään haihdutusaste. Vähäisemmällä energiankulutuksella saavutettava suurempi käsittely- mutta alhaisempi haihdutuskapasiteetti lisää viemäriin johdettavan veden määrää. Vastaavasti korkeampi energiankulutus alentaa käsittelykapasiteettia, mutta nostaa tilavuuden pienenemää, jolloin viemäriin johdettavan kaatopaikkaveden määrä on alhaisempi. Jos kaatopaikkakaasun hintana käytetään 3,5 €/MWh, on suurin sallittu investointikustannus kaikilla tarkastelluilla kaatopaikkakaasun määrillä negatiivinen. Lasketaan suurin sallittu investointikustannus, kun kaasun arvo on 0 €/MWh.

Suurin sallittu investointikustannus kaatopaikkakaasun määrän funktiona on esitetty kuvassa 22. Kaatopaikkavesien haihdutuksen suurin sallittu investointikustannus vanhan kaatopaikan kaasun määrällä on enintään 50 000 euroa, mikäli jätevedestä maksettava vesimaksu on 2 €/m³. Uudella kaatopaikalla muodostuvalla arvioidulla kaatopaikkakaasun määrällä suurin sallittu investointikustannus on noin 180 000 euroa, kun jätevesimaksu on 2 €/m³. Yhden euron jätevesimaksun korotus noin kaksinkertaistaa taloudelliseen investointiin käytettävissä olevan kustannuksen. Edellä mainituilla suurimmilla sallituilla investointikustannuksilla tulisi pystyä kattamaan kaatopaikkaveden haihdutinlaitteisto sekä veden siirtämiseen tarvittavat laitteistot.



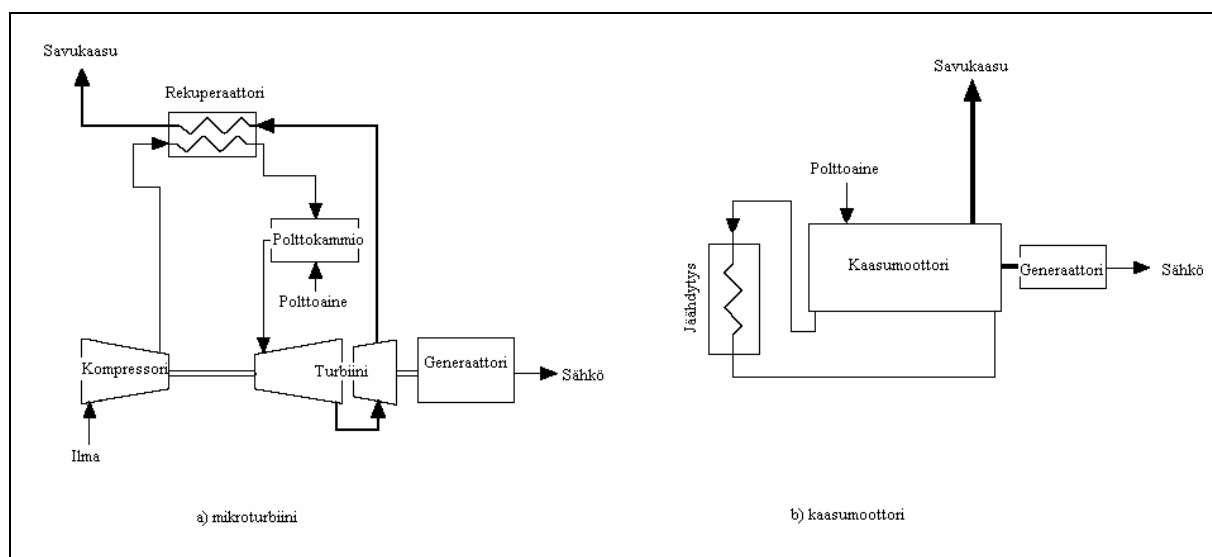
Kuva 22. Kaatoaikkavesien haihduttamon suurin sallittu investointikustannus kaatoaikkakaasun määrän funktiona.

Ekokem-Palvelu Oy:n toiminnasta muodostuu myös kaatoaikkavesiä. Lisäksi Ekokem-Palvelu Oy laajentavat toimintaansa Anjalankosken Ekoparkissa. Laajennuksen myötä alueella tullaan käsittelemään myös nestemäisiä ja lietemäisiä jätteitä. Kaatoaikkakaasun soveltuvuutta lietemäisten ja nestemäisten jätteiden käsittelyyn tulee tarkastella erikseen.

4.4 Sähköntuotanto

Kymenlaakson Jäte Oy:n kokonaissähkönkulutus vuonna 2006 oli 1 603 MWh. Eniten energiaa kuluu murskauslaitoksen toimintaan sekä alueen valaistukseen. (Kymenlaakson Jäte Oy 2007, 6.) Muiden yritysten sähkönkulutus on vähäisempää kuin Kymenlaakson Jäte Oy:llä. Muun muassa JM Ekoturve Oy:n sähkönkulutus on noin 14 MWh vuodessa ja Jarmo Toikka Ky:n sähkönkulutus keskimäärin 15 MWh vuodessa (Hokkanen 2007). Kaikkien Ekoparkissa toimivien yritysten sähkönkulutus on arviolta 1 700 MWh vuodessa.

Kaatopaikkakaasua polttoaineena käyttävät sähköntuotantotekniikat on esitetty kootusti taulukossa 3. Kaasu- ja höyryturbiinit sekä näiden turbiinien yhdistelmät eli kombiprosessit soveltuvat suurille kaatopaikoille, joissa kaasun tilavuusvirta on yli $100 \text{ m}^3/\text{min}$. Keltakankaan vanhan kaatopaikan osalta tiedetään kaasun keskimääräinen virtaama mittausten perusteella. Vuonna 2005 kaasun virtaama oli keskimäärin $98 \text{ m}^3/\text{h}$ ja vuonna 2006 keskimäärin $123 \text{ m}^3/\text{h}$ (Sarlin Oy Ab; Sarlin Hydor Oy). Käytössä olevan kaatopaikan kaasun keskimääräisiä virtaamia voidaan arvioida muodostuvan kaasun määrän perusteella. Kaasuntuotannon ollessa 3 miljoonaa m^3 vuodessa ja pumppaamon käyttöajalla 8 000 tuntia, saadaan keskimääräiseksi virtaamaksi noin $350 \text{ m}^3/\text{h}$. Tarkasteltavien kaatopaikkojen kaasujen keskimääräiset virtaamat ovat alhaiset, joten kaasu- ja höyryturbiinitekniikat eivät sovellu Ekoparkin alueen sähköntuotantoon. Tästä johtuen tässä diplomityössä tarkastellaan ainoastaan sähköntuotantoa mikroturbiinilla ja kaasumootoreilla, jotka soveltuvat pienen kokoluokan sähköntuotantoon (ks. kuva 23).



Kuva 23. Sähköntuotanto mikroturbiinilla (a) ja kaasumootorilla (b) (Oland 2004, 120).

Mikroturbiini soveltuu alhaisille metaanipitoisuuksille. Kaatopaikkakaasun sisältämä palamaton hiilidioksidi lisää turbiinille johdettavan kaasun tilavuusvirtaa, joka lisää sähköntuotannon tehoa. Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston (U.S. EPA 2002) mukaan alhaisin metaanipitoisuus mikroturbiinille johdettavassa kaatopaikkakaasussa voi olla jopa 30 tilavuusprosenttia,

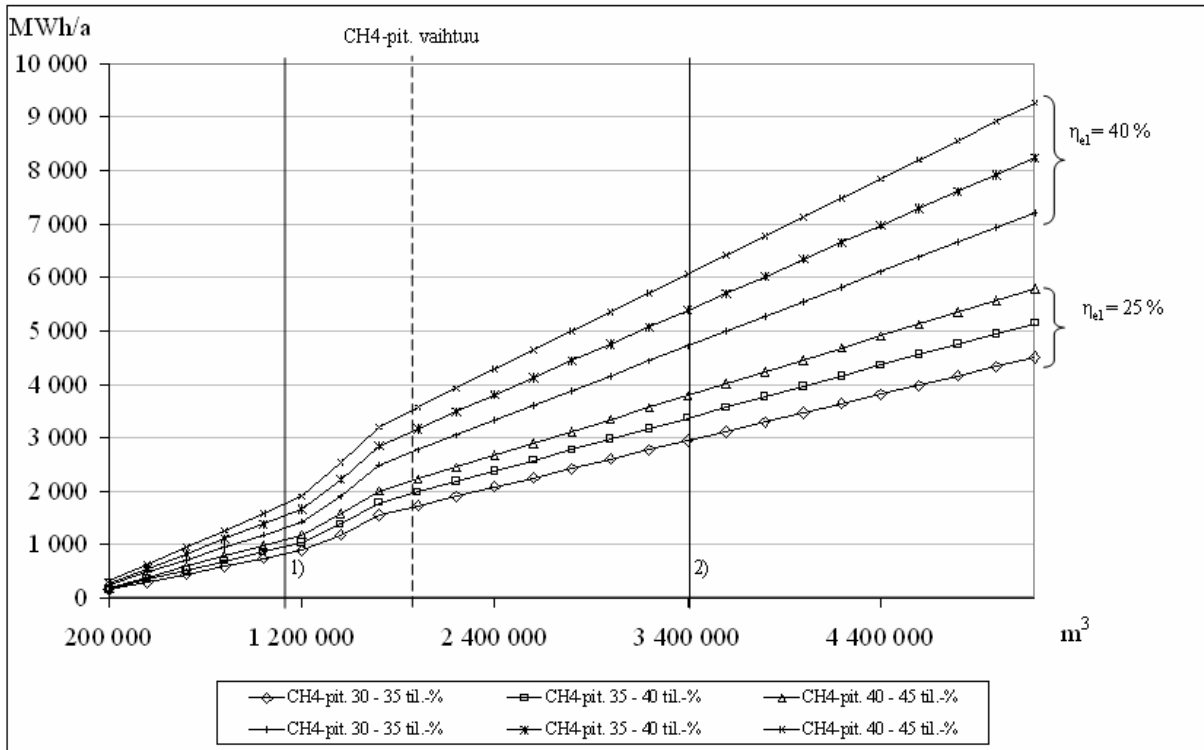
kun taas Capstone (2006) ja Ingersoll Rand (2007) turbiinivalmistajat ovat ilmoittaneet omille mikroturbiineilleen alhaisimman sallitun metaanipitoisuuden olevan 40 tilavuusprosenttia. Capstonen valmistamien mikroturbiinien tehot ovat tyypillisesti 30 ja 65 kW. Ingersoll Rand valmistaa pienten, noin 70 - 92 kW:n, mikroturbiinien lisäksi suurempia, noin 250 - 300 kW:n mikroturbiineja.

Keltakankaalla muodostuvan kaatopaikkakaasun määrä on suhteellinen pieni, joten sähköntuotannon hyötysuhde on todennäköisesti todellisuudessa melko alhainen. Kaasumoottorin sähköntuotannon hyötysuhde käytettäessä kaatopaikkakaasua on 30 - 40 prosenttia ja mikroturbiinin hyötysuhde 25 - 30 prosenttia. Verrattuna kaasumoottoreihin mikroturbiinit ovat sähköntuotannon hyötysuhteeltaan heikompia, mutta soveltuvuudeltaan heikkolaatuisemmalle kaatopaikkakaasulle ja pienille kaatopaikoille parempia. Työssä tarkastellaan sähköntuotantopotentiaalia hyötysuhteilla 25 ja 40 prosenttia, jotka muodostavat sähköntuotannon minimin ja maksimin tarkasteltavilla laitteistoilla.

Kaatopaikkakaasulla tuotettavan sähkön määrä on riippuvainen kaasun määrästä, metaanipitoisuudesta sekä sähköntuotannon hyötysuhteesta. Kuvassa 24 on esitetty Anjalankosken Ekoparkissa muodostuvan kaatopaikkakaasun sähköntuotantopotentiaali 25 ja 40 prosentin sähköntuotantohyötysuhteella. Metaanipitoisuuden vaihtuminen kuvaa uuden kaatopaikan oletettua korkeampaa metaanipitoisuutta verrattuna vanhan kaatopaikan kaasun metaanipitoisuuteen. Kuvaajassa on huomioitu myös vanhan kaatopaikan kaasun määrän, 0,5 - 1,5 miljoonaa m³, ja uuden kaatopaikan arvioidun kaasuntuotannon, 0,8 - 3,5 miljoonaa m³, yhdistetty kokonaismäärä eli noin 1,3 - 5,0 miljoonaa m³.

Alhaisimmilla metaanipitoisuuksilla eli metaanin määrän vaihdellessa välillä 30 - 35 tilavuusprosenttia, sähköntuotannon määrä Keltakankaan vanhan kaatopaikan kaasuntuotantolukuja vastaavilla kaasun määrillä on alle 1 000 MWh vuodessa, joka ei riitä Ekoparkin nykyisen sähkönkulutuksen kattamiseen. Uudella kaatopaikalla muodostuvalla kaasulla voidaan alhaisemmalla sähköntuotannon hyötysuhteella tuottaa sähköä noin 3 000 MWh. Kuvassa 24 esitetyt sähköntuotantokapasiteetit on ilmoitettu metaanipitoisuuden, kaasun määrän ja sähköntuotannon hyötysuhteen vaihdellessa. Parhaiten sähköä pystytään tuottamaan yli 40 tilavuuspro-

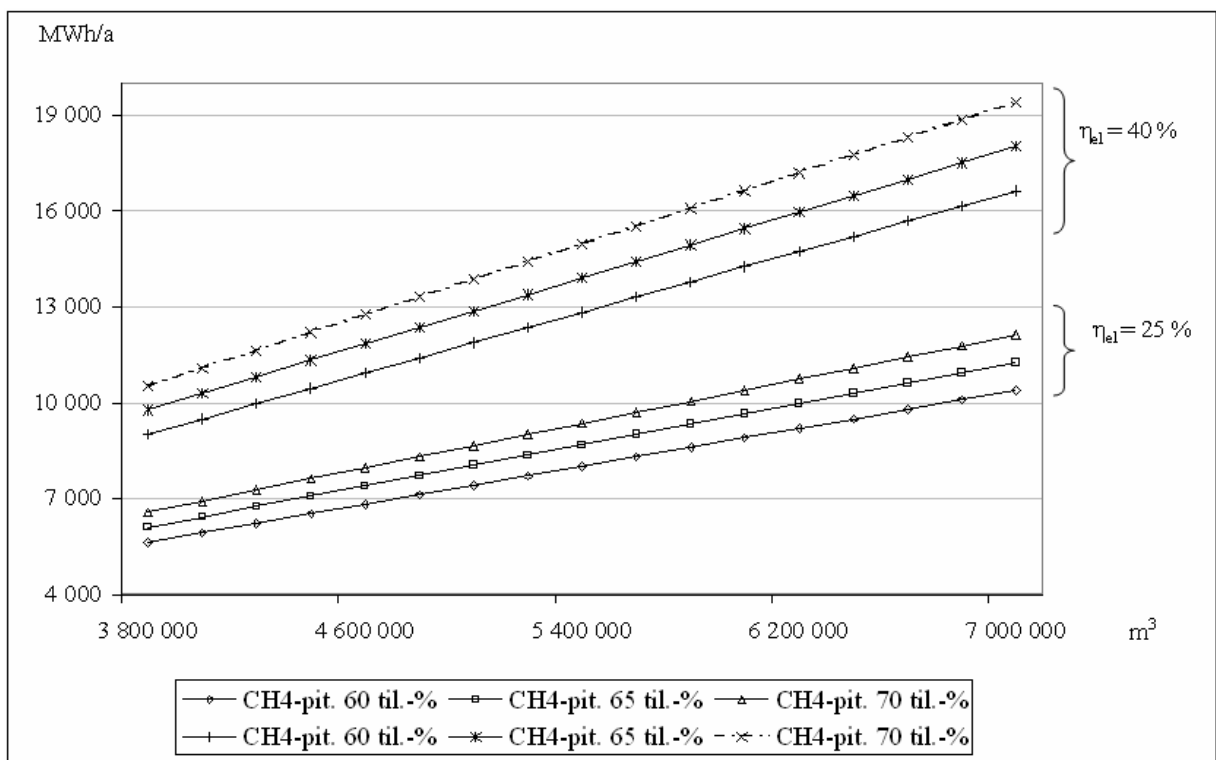
sentin metaanipitoisuudella sähköntuotannon hyötysuhteen ollessa 40 prosenttia. Näillä tuotantoarvoilla sähköä voidaan tuottaa noin 6 400 MWh, kun käytettävissä olevan kaatopaikkakaasun määrä on 3,5 miljoonaa m³ vuodessa. Kuvassa esitetyt tuotantokapasiteetit ovat optimistiset, kun tarkasteltavilla kaasun määrillä laitospääte tulee todellisuudessa olemaan pieni. Lähempänä todellisuutta on sähköntuotannon tarkastelu 25 prosentin hyötysuhteella.



Kuva 24. Vuosittainen sähköntuotantopotentiaali 25 ja 40 prosentin hyötysuhteilla, kun metaanipitoisuus vaihtelee välillä 30 - 45 tilavuusprosenttia. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.

Mikäli kaatopaikkakaasun lisäksi sähkön tuotantoon käytetään biojätteen ja lietteen mädätyksestä saatavaa biokaasua, nousee sähköntuotantokapasiteetti huomattavasti. Kasvu aiheutuu suuremmasta kaasun määrästä sekä korkeammasta metaanipitoisuudesta verrattuna pelkkään kaatopaikkakaasun käyttöön. Kuvassa 25 on esitetty sähköntuotantokapasiteetti biokaasun vuosituotannon funktiona metaanipitoisuuden vaihdeltaessa 60 - 70 tilavuusprosentin välillä. Sähköntuotannon hyötysuhteena on käytetty edellisen tarkastelun tapaan 25 ja 40 prosenttia. Alemmalla sähköntuotannon hyötysuhteella ja biokaasun tuotannon minimillä eli 3,8 miljoonaa

nalla m^3 vuodessa voidaan tuottaa noin 5 500 - 6 500 MWh sähköä vuodessa. Vastaavasti biokaasuntuotannon maksimiarvolla, noin 7,0 miljoonaa m^3 , vuotuinen sähköntuotanto on jopa 10 000 - 12 000 MWh. Sähköntuotannon hyötysuhde 40 prosenttia on mahdollista saavuttaa korkeamman ja laadukkaamman kaasuntuotannon takia. Biokaasun tuotannon ollessa noin 4,0 miljoonaa m^3 vuodessa voidaan tuottaa noin 9 000 - 10 500 MWh vuodessa, kun taas suurimmalla kaasuntuotantomäärällä sähköä voidaan tuottaa jopa 16 500 - 19 500 MWh kaasun metaanipitoisuuden vaihdellessa välillä 60 - 70 tilavuusprosenttia.



Kuva 25. Sähköntuotantopotentiaali, kun kaatopaikkakaasu yhdistetään biojätteen mädätyslaitoksesta saatavan biokaasun kanssa.

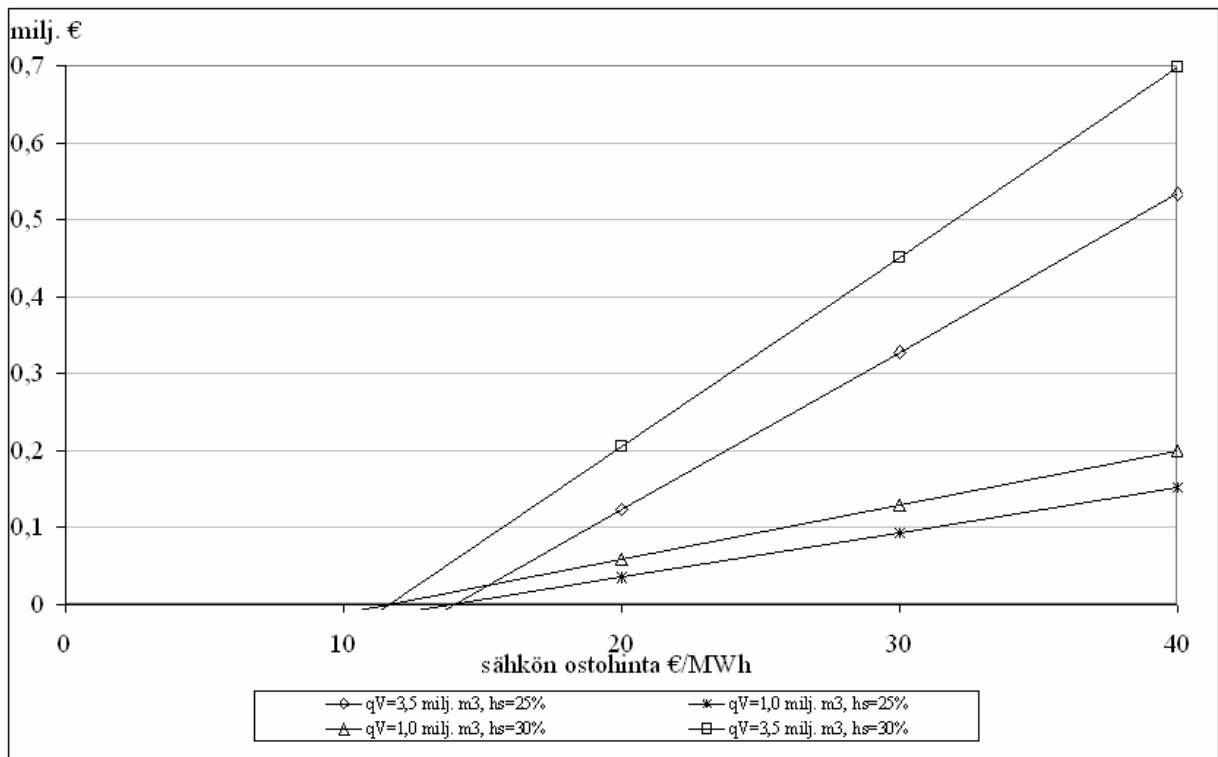
Sähköntuotannon suurinta sallittua investointikustannusta on tarkastelu kahdella eri tavalla: olettaen, että kaikki tuotettu sähkö myydään valtakunnan verkkoon sekä siten, että sähköä käytetään oman kulutuksen kattamiseksi ja loput sähköstä myydään valtakunnan sähköverkkoon. Investointikustannus esitetään sähkön ostohinnan funktiona. Sähkön tuotannon ostohinta vaihtelee. Ostohinnalla tarkoitetaan hintaa, joka maksetaan sähköntuottajalle sähkön tuottamisesta valtakunnan verkostoon. Sähkön ostohintana käytetään 0 - 40 €/MWh. Tarkastelussa kaato-

paikkakaasun määränä käytetään sekä 1,0 miljoonaa m³ että 3,5 miljoonaa m³ vuodessa. Kaasun hankinnasta aiheutuvat kulut ovat 3,5 €/MWh. Lisäksi sähköntuotannonhyötysuhteena on käytetty sekä 25 että 30 prosenttia. Esitetyillä suurimmilla sallituilla investointikustannuksilla tulee voida kattaa sähköntuotantoon tarvittavat laitteistot, kuten mikroturbiinien tai kaasumoottorien hankinnan sekä sähkön siirtoon tarvittavat laitteistot, että investointi on vielä taloudellisesti kannattava. Lisäksi investointiin kuuluu maksut liittymisestä valtakunnan verkkotoon.

Sähkön myynti

Tässä tarkastelussa Keltakankaan kaatopaikoilla muodostuvalla kaasulla tuotettu sähkö myydään valtakunnan sähköverkkoon. Tarkastelun kustannustekijät muodostuvat sähkön myynnistä saatavasta tuotosta ja kaasun hankinnan aiheuttamista kuluista sekä käyttökustannuksista.

Kuvassa 26 on esitetty suurin sallittu investointikustannus sähkön ostohinnan funktiona. Laskelemien mukaan sähkön ostohinnan tulee olla yli 10 €/MWh, että investointi on mahdollinen tarkastelluilla kaatopaikkakaasun määrillä. Ostohinnan ollessa esimerkiksi 20 €/MWh voidaan tarvittaviin laitteistoihin investoida noin 35 000 euroa, jos kaasun määrä on 1,0 miljoonaa m³ ja sähköntuotannon hyötysuhde 25 prosenttia. Kaasun määrän ollessa suurempi, 3,5 miljoonaa m³ ja sähköntuotannon hyötysuhteen 30 prosenttia, voidaan laitteistoihin investoida noin 200 000 euroa. Sähkön todellinen ostohinta on noin 30 - 40 euroa megawattitunnilta, joten suurin sallittu investointi nykyisellä sähkön ostohinnalla olisi keskimäärin 150 000 euroa kaasunmäärän ollessa 1,0 miljoonaa m³ ja sähköntuotannon hyötysuhteen 25 prosenttia. Vastavasti 3,5 miljoonan m³ kaasuntuotannolla ja 30 prosentin sähköntuotannon hyötysuhteella suurin sallittu investointikustannus olisi keskimäärin 700 000 euroa. Sähköntuotannon suurimpaan sallittuun investointikustannukseen vaikuttaa voimakkaasti kaasun määrä sekä sähkön ostohinta. Suurella kaasun määrällä sähkön ostohinnan vaikutus on suhteessa suurempi kuin alhaisemmalla kaatopaikkakaasun määrällä.



Kuva 26. Sähköntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun kaikki tuotettu sähkö myydään valtakunnan verkkoon.

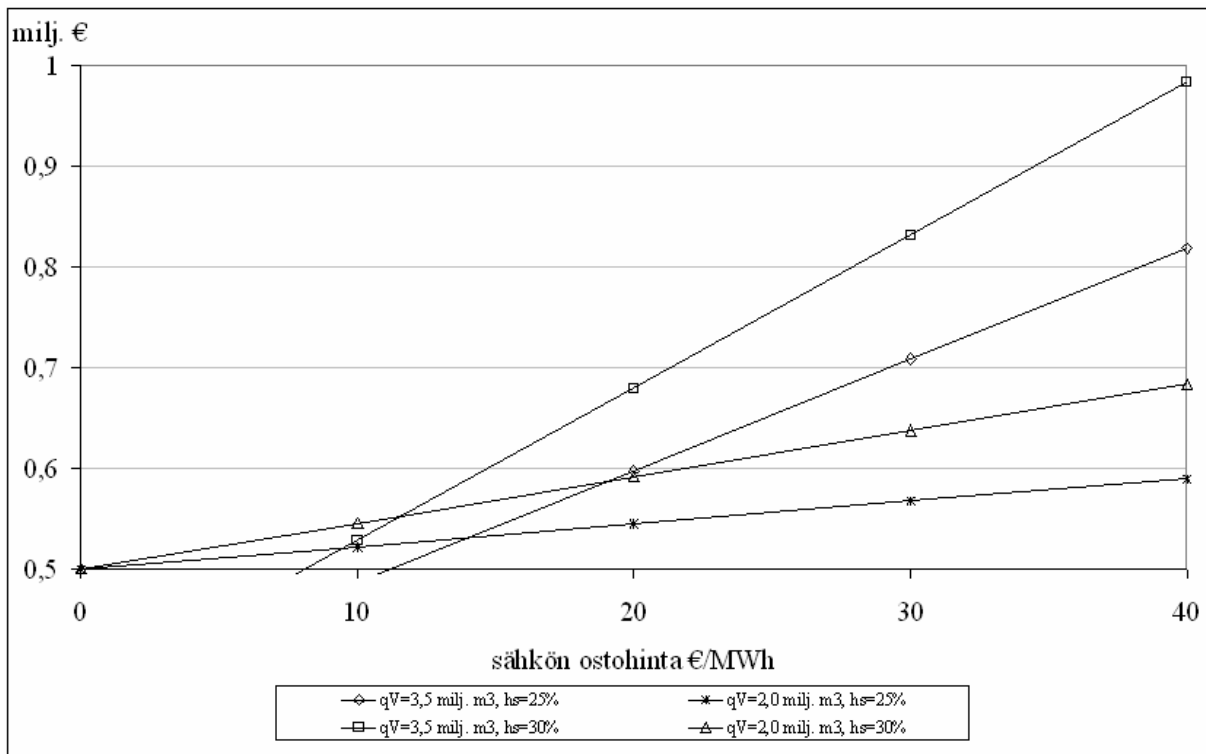
Käyttö omaan kulutukseen ja myyntiin

Toisessa sähköntuotannon kustannustarkastelussa tuotetusta sähköstä käytetään omaa kulutusta vastaava osuus ja ylimääräinen sähkö myydään valtakunnan verkostoon. Omaan sähkönkulutukseksi on käytetty arvoja 1 800 MWh ja 2 200 MWh vuodessa. Tarkasteltavat kustannustekijät muodostuvat säästöstä, kun omalla tuotannolla vältetään ostosähkön hankinta sekä sähkön myynnistä aiheutuvista tuloista. Sähkön oston välttämisestä aiheutuva säästö on 70 €/MWh eli sähkön myyntihinta. Menoja vaihtoehdossa aiheuttavat kaasun hankinta sekä käyttökustannukset.

Kun kaatopaikkakaasun määrä on 1,0 miljoonaa m³ vuodessa ei sähköä riitä oman kulutuksen jälkeen myyntiin, vaan sekä 1 800 MWh:n että 2 200 MWh:n sähkönkulutuksella sähköä joudutaan ostamaan. Suurin sallittu investointikustannus on tässä tapauksessa noin 440 000 -

530 000 euroa sähköntuotannon hyötysuhteen vaihdella 25 - 30 prosentin välillä. Koska vanhan kaatopaikan kaasuntuotantoa vastaavalla määrällä sähköä ei riitä myyntiin, käytetään tarkastelussa kaasun määränä 3,5 miljoonan m³ lisäksi 2,0 miljoonaa m³.

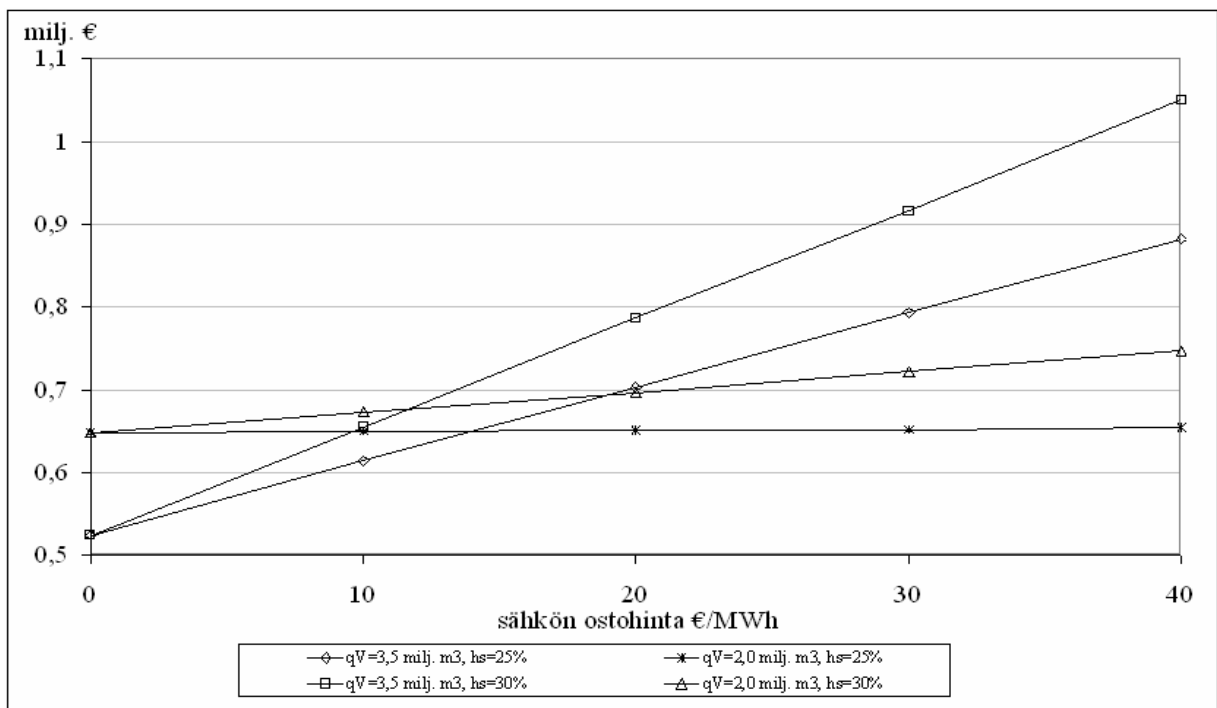
Kuvassa 27 on esitetty suurin sallittu investointikustannus sähkön ostohinnan funktiona, kun tuotetusta sähköstä käytetään omaa kulutusta vastaava osuus ja loput myydään valtakunnan verkostoon. Sähkön ostohinta vaihtelee 30 ja 40 euron välillä tuotettua megawattituntia kohden. Ostohinnan nykyarvoa vastaava investointikustannus 2,0 miljoonan m³ kaasuntuotannolla ja 25 prosentin sähköntuotannon hyötysuhteella on keskimäärin 580 000 euroa. Suurin sallittu investointikustannus 3,5 miljoonan m³ kaasun vuosituotannolla ja 30 prosentin sähköntuotannon hyötysuhteella on keskimäärin 0,9 miljoonaa euroa.



Kuva 27. Sähköntuotannon suurin sallittu investointikustannus sähkön ostohinnan funktiona, kun tuotetusta sähköstä käytetään omaa kulutusta vastaava osuus (1 800 MWh/a) ja ylijäävä myydään valtakunnan verkostoon.

Sähkön ostohinnalla 20 €/MWh voidaan mikroturbiinilaitteistoihin laskelmien mukaan investoida noin 550 000 euroa ja kaasumoottoriin noin 600 000 miljoonaa euroa kaasun määrällä 2,0 miljoonaa m³. Uuden kaatopaikan kaasuntuotantoa vastaavalla määrällä ja sähkön ostohinnalla 20 €/MWh suurin sallittu investointikustannus kaasumoottoriin on noin 680 000 euroa ja mikroturbiiniin noin 600 000 euroa.

Kuvassa 27 esitettiin sähköntuotannon suurin sallittu investointikustannus Ekoparkin yritysten oman sähkönkulutuksen ollessa noin 1 800 MWh vuodessa. Kuvassa 28 on esitetty suurin sallittu investointikustannus sähköntuotannolle, kun oma sähkönkulutus on 2 200 MWh vuodessa. Verrattuna 1 800 MWh:n vuosikulutukseen suurin sallittu investointikustannus on hieman suurempi. Sähkön ostohinnan keskimääräisellä nykyarvolla investointikustannus voi olla noin 1,0 miljoonaa euroa ollakseen kannattava, kun kaasun tuotanto on 3,5 miljoonaa m³ vuodessa ja sähköntuotannon hyötysuhde 30 prosenttia. Sähkön kulutuksen kasvun aiheuttama suuremman investoinnin mahdollisuus johtuu oman sähköntuotannon aiheuttamasta säästöstä, kun sähköä ei tarvitse ostaa energiayhtiöltä.



Kuva 28. Sähköntuotannon suurin sallittu investointikustannus sähkön ostohinnan funktiona, kun tuotetusta sähköstä käytetään omaa kulutusta vastaava osuus (2 200 MWh/a) ja ylijäävä myydään valtakunnan verkostoon.

Kaatopaikkakaasun määrän ollessa 2,0 miljoonaa m³ ja sähköntuotannon hyötysuhteen 25 prosenttia, ei suurin sallittu investointikustannus juurikaan vaihtele sähkön ostohinnan funktiona. Tämä johtuu oman kulutuksen jälkeen myyntiin jäävän sähkön alhaisesta määrästä, noin 25 MWh. Suurin sallittu investointikustannus tässä tapauksessa on noin 650 000 euroa. Korkeammalla sähköntuotannon hyötysuhteella oman kulutuksen jälkeen myyntiin jää noin 470 MWh, jolloin sähkön ostohinnan vaikutus suurimpaan sallittuun investointikustannukseen on suurempi. Sähkön ostohinnan ollessa 40 €/MWh, voidaan tarvittaviin laitteistoihin investoida noin 750 000 euroa. Korkeammalla kaatopaikkakaasun määrällä sähköä jää myyntiin enemmän, jolloin ostohinnan vaikutus suurimpaan sallittuun investointikustannukseen on merkittävämpi.

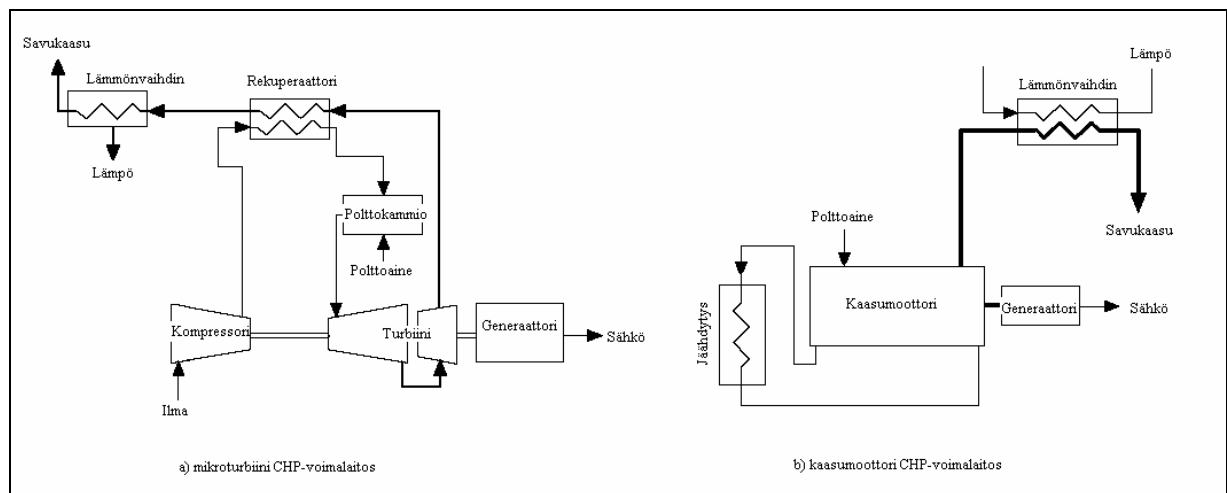
Kuvista 27 ja 28 voidaan huomata, että alhaisemmalla tarkastellulla kaatopaikkakaasun määrällä suurin sallittu investointikustannus pysyy suhteellisen vakaana sähkön ostohinnan vaihtelusta huolimatta. Tämä johtuu siitä, että kaatopaikkakaasun määrän ollessa 2,0 miljoonaa m³ oman kulutuksen jälkeen sähköä jää myyntiin 470 MWh tai 870 MWh kaasun määrän vaihtelusta johtuen, jolloin myynnistä saatavat tulot suhteessa omasta tuotannosta saatavaan säästöön on huomattavasti pienemmät. Tarkasteltaessa korkeampaa kaatopaikkakaasun määrää, 3,5 miljoonaa m³, on myytävän sähkön määrä suurempi kuin oma kulutus, jolloin sähkön ostohinnalla on suhteessa suurempi vaikutus suurimpaan sallittuun investointikustannukseen kuin alhaisemmalla kaatopaikkakaasun määrällä. Lisäksi suurimpaan sallittuun investointikustannukseen vaikuttaa suhteessa enemmän kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut, kun kaatopaikkakaasun määrä on suurempi.

4.5 Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto

CHP-laitoksessa sähköntuotannossa muodostuvien savukaasujen lämpö otetaan talteen ja käytetään esimerkiksi kaukolämmön tai höyryn tuotantoon. Luvussa 4.4 sähköntuotannon tarkastelu on rajattu koskemaan ainoastaan kaasumoottoreita ja mikroturbiineja muodostuvan kaasun määrän ja tilavuusvirran perusteella. Samaa rajausta käytetään myös yhdistetyn sähkön- ja

lämmöntuotannon tarkastelussa. Kuvassa 29 on esitetty prosessikuvaus CHP-voimalaitoksesta sekä mikroturbiinille että kaasumootorille. Yksinkertaisimmillaan savukaasut johdetaan lämmönvaihtimeen, jossa kaasujen sisältämä lämpö otetaan talteen.

Kaasumootorista poistuvien savukaasujen lämpötila on noin 500 °C. Lämmöstä noin 30 - 50 prosenttia voidaan käyttää kuuman käyttöveden tai matala- tai korkeapainehöyryn tuottamiseen. Lisäksi moottorin jäähdytyksestä voidaan saada lämpöä talteen matalassa lämpötilassa. Jäähdytyskierron lämpötila on usein alle 70 °C. Mikroturbiinien savukaasujen lämpötila on huomattavasti alhaisempi kuin kaasumootorissa muodostuvien. Lämpötila vaihtelee välillä 200 - 320 °C. Lämpöä voidaan hyödyntää kuuman käyttöveden tai höyryn tuottamiseen tai erillisen lämmöntuotantoprosessin veden esilämmittämiseen. (Oland 2004, 112, 115.)

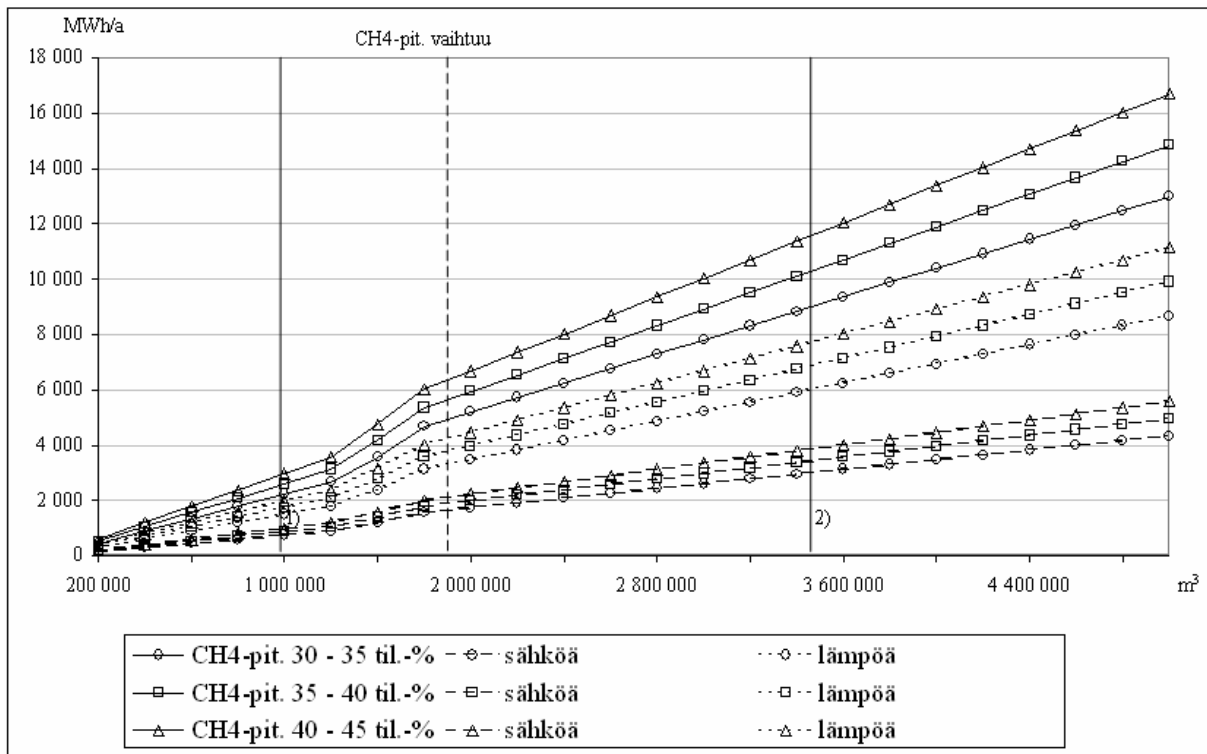


Kuva 29. Mikroturbiini (a) ja kaasumootori (b) CHP-laitosten kokoonpano (Oland 2004, 113, 115).

Kaasumootorilla tuotetun sähkön- ja lämmöntuotannon hyötysuhteen on arvioitu olevan 70 - 80 prosenttia, josta sähköntuotannon hyötysuhde on 22 - 40 prosenttia (Oland 2004, 34). Capstone on ilmoittanut valmistamalleen CR65-ICHP mikroturbiineille yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotannon hyötysuhteeksi 62 prosenttia, josta sähkön osuus on 29 prosenttia. Yleisesti Capstone ilmoittaa mikroturbiinien yhdistetyn tuotannon hyötysuhteeksi 75 prosenttia, josta sähköntuotannon osuus 25 prosenttia ja 50 prosenttia lämmöntuotannon hyötysuhde. (Capsto-

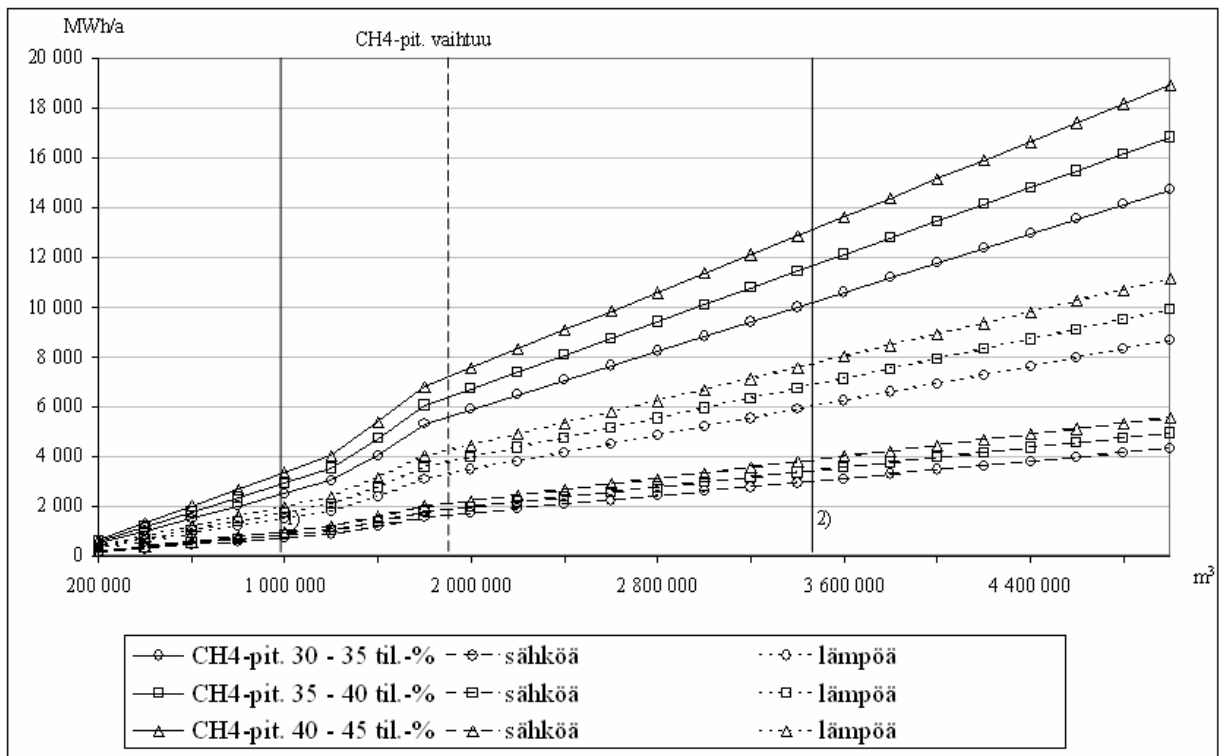
ne 2006.) Olandin (2004, 34) mukaan mikroturbiinien kokonaishyötysuhde CHP-laitoksissa on 65 - 75 prosenttia, josta sähköä 18 - 29 prosenttia.

Työssä lasketaan Keltakankaan kaatopaikoilla muodostuvalla kaatopaikkakaasulla saatava yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon kapasiteetit mikroturbiinille, kun kokonaishyötysuhde on 75 prosenttia, josta 25 prosenttia on sähköntuotannon hyötysuhde. Kuvassa 30 on esitetty yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotannon määrät, kun kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus vaihtelee välillä 30 - 45 tilavuusprosenttia. Vanhan kaatopaikan kaasuntuotannolla, 1,0 miljoonaa m^3 , voidaan tuottaa yhdistetyssä tuotannossa keskimäärin 1 700 MWh lämpöä ja 870 MWh sähköä. Keltakankaan uuden kaatopaikan arvioitu suurin kaatopaikkakaasun määrä tulee olemaan noin 3,5 miljoonaa m^3 vuodessa. Tällä määrällä voitaisiin tuottaa yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa noin 6 700 MWh lämpöä ja noin 3 400 MWh sähköä, kun kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus on 40 tilavuusprosenttia.



Kuva 30. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon kapasiteetti mikroturbiinilla kokonaishyötysuhteen ollessa 75 % ja sähköntuotannon hyötysuhteen 25 %. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.

Lasketaan myös sähkön- ja lämmöntuotannon määrä kaasumootorilla, kun kokonaishyötysuhde on 85 prosenttia ja sähkön hyötysuhde 35 prosenttia. Kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus vaihtelee välillä 30 - 45 tilavuusprosenttia. Kuvassa 31 on esitetty yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotannon määrät. Vanhan kaatopaikan maksimikaasuntuotannolla, 1,0 miljoonaa m³, voidaan tuottaa yhdistetyssä tuotannossa keskimäärin 1 700 MWh lämpöä ja 1 200 MWh sähköä. Uuden kaatopaikan arvioidulla kaasun maksimituotannolla voitaisiin tuottaa kaasumootorilla yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa noin 6 700 MWh lämpöä ja noin 4 700 MWh sähköä, kun kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus on 40 tilavuusprosenttia.



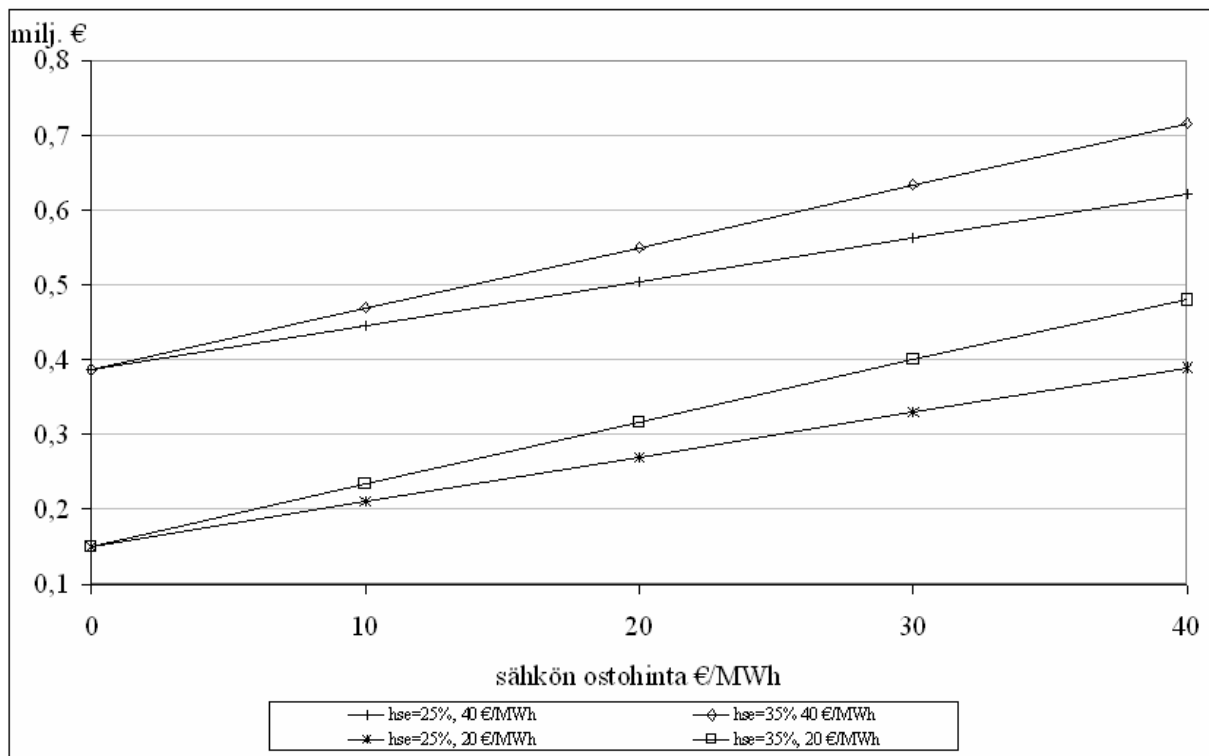
Kuva 31. Yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotannon kapasiteetti kaasumootorilla kokonaishyötysuhteen ollessa 85 % ja sähköntuotannon hyötysuhteen 35 %. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.

Suurin sallittu investointikustannus yhdistetyllä sähkön- ja lämmöntuotannolle lasketaan kaatopaikkakaasun määrällä 1,0 ja 3,5 miljoonaa m³ vuodessa. Laskennassa käytetään sähköntuotannon hyötysuhteena 25 ja 35 prosenttia, jotka kuvaavat mikroturbiinin ja kaasumootorin sähköntuotannon hyötysuhteita yhdistetyssä tuotannossa. Lämmöntuotannon hyötysuhteena

käytetään 50 prosenttia, tällöin yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon kokonaishyötysuhteet ovat 75 ja 85 prosenttia. Investointikustannuksen suuruutta tarkastellaan kahdessa tapauksessa: Toisessa tuotettu sähkö ja lämpö myydään kokonaisuudessaan. Toinen laskenta perustuu tarkasteluun, jossa tuotetusta sähköstä ja lämmöstä käytetään omaa kulutusta vastaava osuus ja loppu myydään. Myydylle lämmölle hintana käytetään 40 €/MWh sekä 20 €/MWh.

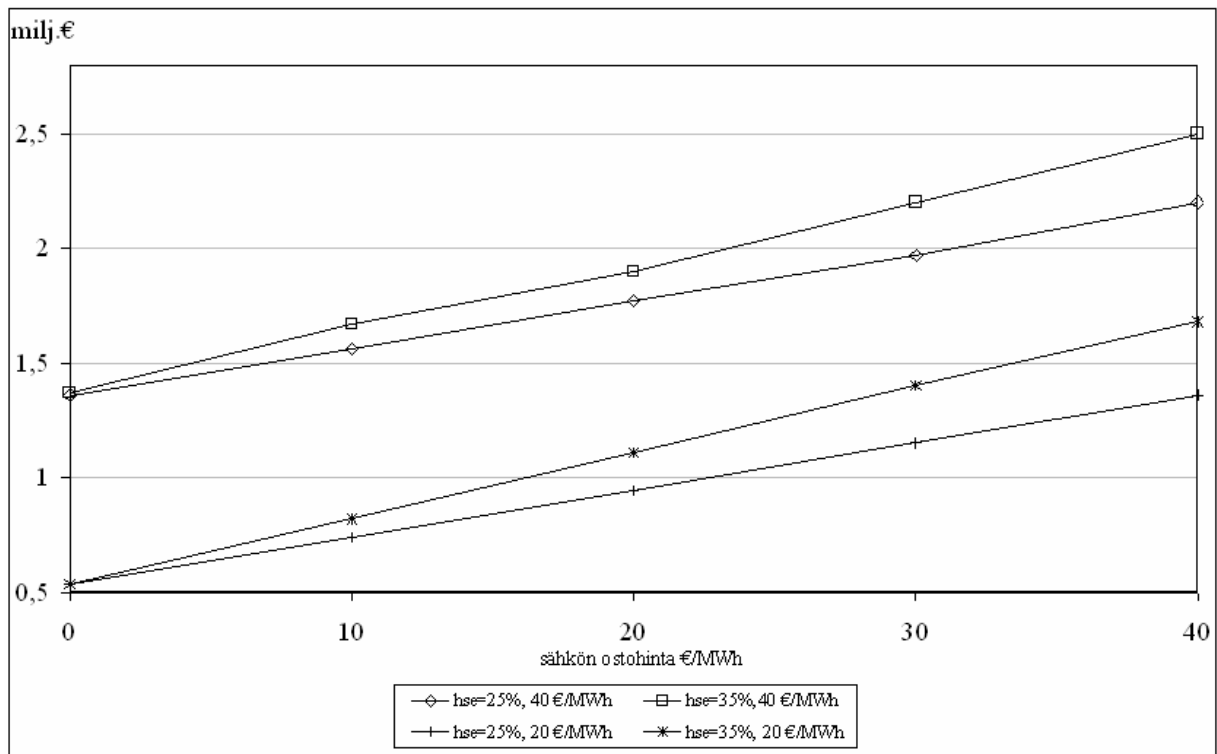
Sähkön ja lämmön myynti

Kuvassa 32 on esitetty suurin sallittu investointikustannus yhdistetyllä sähkön- ja lämmöntuotannolla, kun kaikki tuotettu sähkö ja lämpö myydään ja tarkasteltava kaatopaikkakaasun määrä on 1,0 miljoonaa m³. Investointikustannus ilmoitetaan sähkön ostohinnan funktiona. Kuten kuvaajasta voidaan päätellä, tarvittaviin laitteistoihin voidaan investoida sitä enemmän, mitä suurempi on sähkön ostohinta sekä lämmöstä saatava hinta.



Kuva 32. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun kaikki tuotettu sähkö ja lämpö myydään. Tarkasteltava kaatopaikkakaasun määrä on 1,0 miljoonaa m³ vuodessa.

Lämmön hinnan ollessa 40 €/MWh voidaan sähkö luovuttaa valtakunnan verkkoon ilman hintaa ja tarvittaviin laitteistoihin voidaan tehdä vielä noin 400 000 euron investointi, kun käytettävissä oleva kaasun määrä on 1,0 miljoonaa m³. Syksyllä 2007 sähkön ostohinta on ollut noin 30 €/MWh. Vanhan kaatopaikan kaatopaikkakaasulla käytettävään yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon laitteistoihin voidaan investoida noin 600 000 euroa sähkön ostohinnalla 30 €/MWh, kun lämmön arvo on 40 €/MWh ja noin 350 000 euroa, kun lämmöstä saatava hinta on 20 €/MWh. Kuvassa 33 on esitetty suurin sallittu investointikustannus, kun yhdistetyssä tuotannossa tuotetaan sähköä ja lämpöä 3,5 miljoonalla m³ kaatopaikkakaasua.



Kuva 33. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun kaikki tuotettu sähkö ja lämpö myydään. Tarkasteltava kaatopaikkakaasun määrä on 3,5 miljoonaa m³ vuodessa.

Kaasun määrällä 3,5 miljoonaa m³ voidaan laitteistoihin investoida noin 1,4 miljoonaa euroa. Lämmöstä saatavan hinnan ollessa 20 €/MWh on suurin sallittu investointikustannus vanhan kaatopaikan kaasuntuotantoa vastaavalla kaasun määrällä noin 150 000 euroa ja uuden kaatopaikan kaasuntuotantoa vastaavalla määrällä noin 0,5 miljoonaa euroa. Sähkön nykyisellä ostohinnalla Keltakankaan uuden kaatopaikan kaasun tuotantomaksimia vastaavan kaasumäärän

käyttävään mikroturbiiniin voitaisiin investoida noin 2,0 miljoonaa euroa ja kaasumoottoriin noin 2,2 miljoonaa euroa, kun myytävän lämmön arvo on 40 €/MWh. Vastaavasti lämmön arvon ollessa 20 €/MWh mikroturbiiniin tarvittaviin investointeihin voidaan tehdä noin 1,15 miljoonan euron ja kaasumoottoriin noin 1,4 miljoonan euron investoinnit.

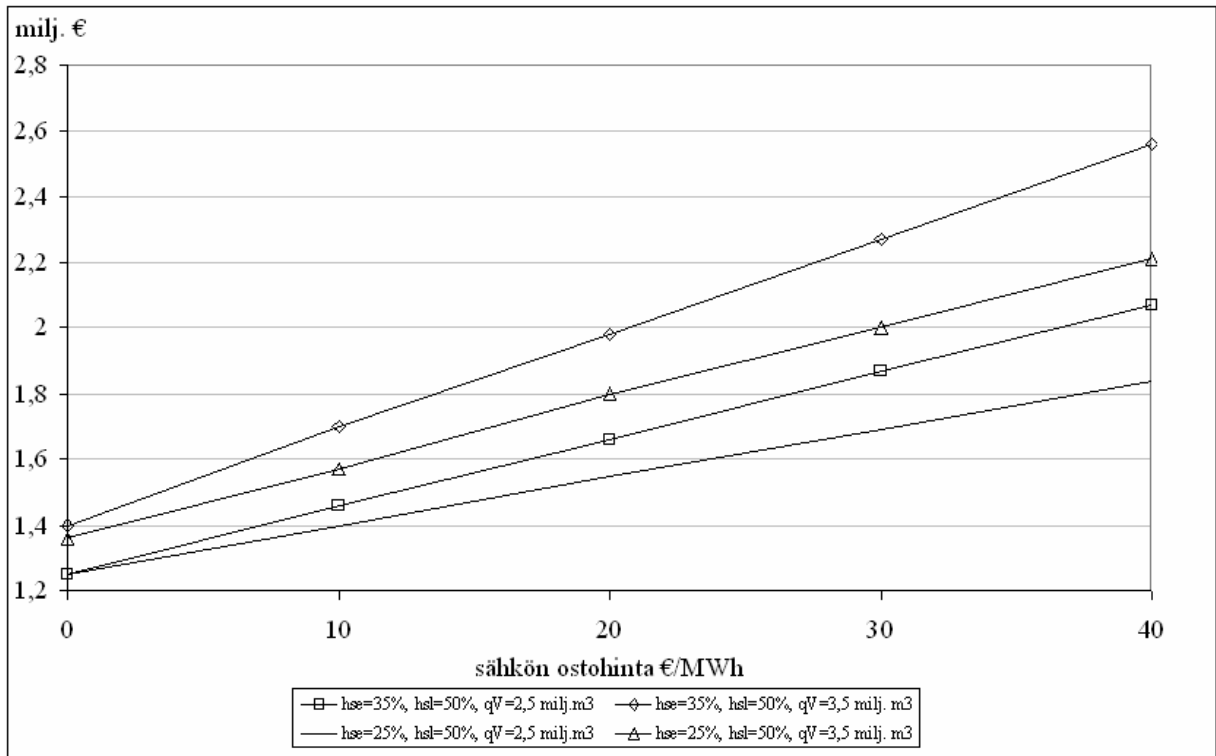
Käyttö omaan kulutukseen ja myyntiin

Toisessa kustannustarkastelussa tuotetusta sähköstä ja lämmöstä käytetään omaa kulutusta vastaava osuus ja loppu myydään. Vanhan kaatopaikan tuotantoa vastaava kaatopaikkakaasun määrä, noin 1,0 miljoonaa m³ vuodessa, ei riitä kattamaan yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa omaa sähkökulutusta, joten sähköä joudutaan ostamaan. Tässä tapauksessa suurin sallittu investointikustannus on noin 590 000 euroa mikroturbiinille laskettuna ja noin 750 000 euroa kaasumoottorille laskettuna.

Laskennassa käytetään kaatopaikkakaasun määränä sekä 2,5 että 3,5 miljoonaa m³ vuodessa ja sähköntuotannon hyötysuhteena 25 ja 35 prosenttia, jotka kuvaavat mikroturbiinin ja kaasumoottorin sähköntuotannon hyötysuhteita yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa. Lämmöstä saatava hinta on 20 €/MWh. Koska kaatopaikkakaasusta tuotetulla sähköllä korvataan ostosähköä, säästetään myyntisähkön hinta eli 70 €/MWh. Lämpö tuotetaan Ekoparkissa öljyllä, jonka hinta on noin 65 €/MWh. Tämä hinta säästetään, kun tarvittava lämpö tuotetaan kaatopaikkakaasulla. Laskennassa varioidaan ostosähkön hintaa välillä 0 - 40 €/MWh. Laskennassa omaksi sähkön kulutukseksi on arvioitu 1 800 MWh ja lämmön kulutukseksi 600 MWh.

Kuvassa 34 on esitetty suurin sallittu investointikustannus, kun oman kulutuksen jälkeen ylimääräinen sähkö ja lämpö myydään. Kuvasta voidaan huomata, että kaasun määrällä 2,5 miljoonaa m³ tarvittava investointi voi olla noin 1,25 miljoonaa euroa ja kaasun määrällä 3,5 miljoonaa m³ noin 1,4 miljoonaa euroa, vaikka verkkoon tuotetusta sähköstä ei saada taloudellista hyötyä, mutta lämmöstä saatava hinta on 20 €/MWh. Tämä johtuu siitä, että kaatopaikkakaasulla tuotetulla sähköllä ja lämmöllä korvataan verkosta ostettavaa sähköä ja öljyä, jota käytetään lämmöntuotannossa. Omasta tuotannosta saatava säästö verrattuna ostoon on merkittävä.

Sähkön ostohinnalla 30 €/MWh voidaan investoida mikroturbiinilaitteistoihin noin 2,0 miljoonaa euroa ja kaasumoottoriin noin 2,3 miljoonaa euroa, kun kaatopaikkakaasun määrä on 3,5 miljoonaa m³. Alhaisemmalla kaasuntuotantomäärällä, 2,5 miljoonaa m³, voidaan mikroturbiiniin investoida noin 1,7 miljoonaa euroa ja kaasumoottoriin noin 1,9 miljoonaa euroa.



Kuva 34. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus, kun tuotetusta sähköstä ja lämmöstä käytetään omaa kulutusta vastaava osuus ja loppu myydään. Lämmöstä saatava hinta 20 €/MWh.

4.6 Jätevesilietteen terminen kuivaus

Kymenlaakson Jäte Oy aloitti vuonna 2005 Anjalankosken, Kouvolan ja Kotkan jätevedenpuhdistamoilla muodostuvan yhdyskuntalietteiden aumakompostoinnin, mutta toiminta lopetettiin vuoden 2006 lopussa. Vuonna 2006 jätehuolto-yhtiö otti vastaan hieman vajaa 13 000 tonnia yhdyskuntalietettä. (Kymenlaakson Jäte Oy 2007.) Vuoden 2007 alusta Anjalankosken jätevedenpuhdistamolla muodostuva liete on toimitettu Kotkan Mussaloon käsiteltäväksi, kun Anjalankoski, Pyhtää ja Kotka muodostivat yhteisen osakeyhtiön Kymen Vesi Oy:n. Kouvo-

lan lietteet käsitellään Joutsenossa Vapo Oy:n laitoksella ja Haminan jätevedenpuhdistamolla muodostuvat lietteet kompostoi Ekoparkissa toimiva Kuljetus Sinkkonen Oy. Kouvolan Vesi ja Kymen Vesi Oy ovat kilpailuttaneet vuoden 2007 aikana lietteen käsittelijät. (Alatalo 2007b.)

Yhdyskuntaliete muodostuu yhdyskuntien jätevesien käsittelyssä. Jätevedenpuhdistamolla liete yleensä kuivataan mekaanisesti ennen varsinaista lietteen käsittelyä, kuten kompostointia, mädätystä tai termistä käsittelyä. Esikuivattu liete sisältää noin 20 - 30 prosenttia kuiva-ainetta ja 70 - 80 prosenttia vettä. Vesipitoisuuden vaihtelu aiheutuu käytettävästä kuivauslaitteesta. Esikuivattu liete on helpompi kuljettaa, varastoida ja syöttää termiseen kuivauslaitteistoon. (Stasta et al. 2006, 1423.)

Lietteen termiseen käsittelyyn käytettävät laitteistot voidaan jakaa suoriin ja epäsuoriin kuivaimiin. Suora kuivain tarkoittaa polttoaineen polttamisesta muodostuvien kuumien savukaasujen johtamista suoraan käsiteltävään lietteeseen. Suorat kuivaimet voidaan edelleen jakaa hiutalekuivaimiin, pyöriviin kuivaimiin ja leijukerroskuivaimiin. Epäsuorissa kuivaimissa savukaasuja ei johdeta suoraan käsiteltävän lietteen sekaan, vaan kaasujen lämpö siirretään lämpöä johtavan seinämän läpi lietteeseen. Savukaasujen lämmöllä voidaan myös kuumentaa työaine, jolla liete kuumennetaan haihdutuslämpötilaan. (Metcalf & Eddy Inc. 2003, 1579 - 1584.)

Tässä diplomityössä tarkastellaan lietteen termistä kuivausta kaatopaikkakaasulla. Termisessä kuivauksessa esikuivatusta lietteestä haihdutetaan vettä lämmöllä polttoa edeltävänä esikäsitteilynä tai tilavuuden pienentämiseksi ennen loppusijoitusta tai hyötykäyttöä. Kuivauslämpötila on laitteistokohtainen. Sähköenergiaa kuivaukseen tarvitaan 4 - 5 kWh / m³ mekaanisesti kuivattua lietettä ja lämpöä 2 700 - 3 500 kJ/kg määritettynä haihdutettua vesimassaa kohti. (Lohiniva et al. 2001, 61; Stasta et al. 2006, 1425.) Lämmönkulutus muodostuu veden höyrystyslämmöstä sekä laitteistokohtaisista lämpöhäviöistä. Sähkön ja lämmön kulutuksen vaihtelu aiheutuu käytettävästä laitteistosta. Terminen kuivaus voi olla kannattavaa yhdistää lietteen polttoon tai lietteen mädätykseen suuren lämmönkulutuksen takia. Yli 90 prosentin kuiva-ainepitoisuuden saavuttanut liete on stabiilia ja poltettavaksi soveltuvan lietteen kuiva-

ainepitoisuuden tulee olla 35 - 60 prosenttia. (Lohiniva et al. 2001, 61.) Sähköntuotannon hyötysuhde lietteen poltossa on sitä suurempi, mitä korkeampi on lietteen kuiva-ainepitoisuus.

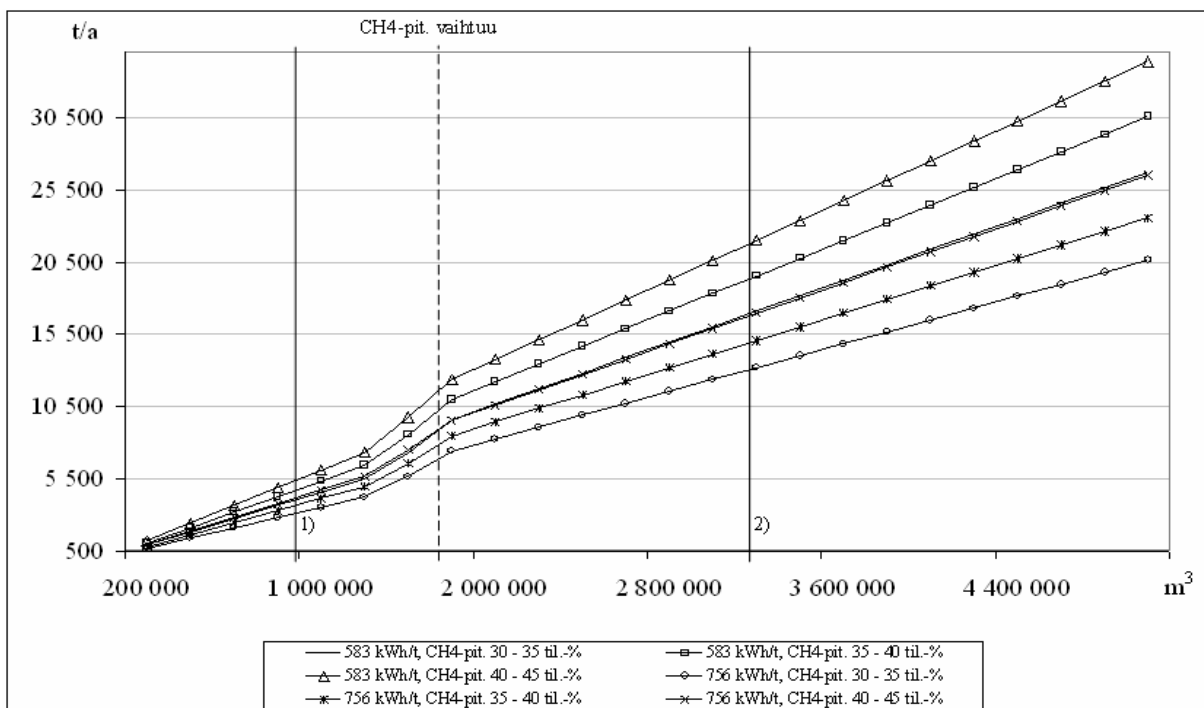
Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa meneillään olevassa Tekesin DENSITY-teknologiaohjelman rahoittamassa PAKU-hankkeessa tarkastellaan yhdyskunnan tuottamien sivuainevirtojen hyödyntämistä CHP-laitoksessa. Hankkeessa on tehty diplomityö yhdyskuntalietteen ja biopolttoaineiden käsittelyketjujen ja polton teknis-taloudellisesta tarkastelusta. Tarkastelussa Anjalankosken Ekoparkissa poltetaan pohjoisessa Kymenlaaksossa muodostuva yhdyskuntaliete eli noin 6 000 tonnia vuodessa. Pelkän lietteen poltossa saadaan sähköä ja lämpöä hyötykäyttöön, kun lietteen kuiva-ainepitoisuus on yli 16 prosenttia. Yhdyskuntalietteen (kuiva-ainepitoisuus 20 prosenttia, tuhkapitoisuus 25 prosenttia, kuiva-aineen alempi lämpöarvo 17,3 MJ/kg) poltosta saatava sähköntuotantoteho on noin 67 kW ja lämmöntuotannon teho noin 120 kW. Energiantuotannon hyötysuhde on noin 60 prosenttia. Mikäli lietteen kuiva-aineen lämpöarvo on korkeampi, kuten 21 MJ/kg, on energiantuotannonhyötysuhde yli 70 prosenttia, ja sähköteho noin 84 kW ja lämpöteho noin 255 kW. (Manninen 2007.) Holmberg (et al. 1999) on todennut, että termisesti kuivatusta lietteestä saadaan polttamalla energiaa enemmän kuin mitä lietteen terminen kuivaus, pelletointi ja kuljetus kuluttaa.

Lisäksi on otettava huomioon, että Wertherin (et al. 1999) mukaan 80 prosentin kuiva-ainepitoisuuteen esikuivattua lietettä voidaan käsitellä sulatusuuneissa, jotka soveltuvat tuhkan termiseen käsittelyyn. Esikuivattu liete syötetään sulatusuuniin, jossa lämpötila on lietteen tuhkan sulamispisteen yläpuolella eli noin 1 400 - 1 500 °C. Tässä lämpötilassa lietteen sisältämä orgaaninen aines palaa ja jäljelle jää sulaa kuonaa. Jäähdytettynä sula kuona muodostaa lasimaisen tai kidemäisen rakenteen, johon lietteen sisältämät raskasmetallit sitoutuvat. Sulatusuunit perustuvat samaan tekniikkaan kuin luvussa 4.7 esitetyt jätteen polton tuhkan termisen käsittelyn tekniikat. Lisäksi sulatetusta lietteestä muodostuvaa lopputuotetta voidaan käyttää kuten tuhkan vitrifioinnissa muodostuvaa lopputuotetta. Näin ollen käsiteltävä liete ja jätteenpolton tuhka voidaan käsitellä samassa laitteistossa.

Tämän diplomityön laskennassa oletetaan, että yhdyskuntaliete on kuivattu mekaanisesti 20 prosentin kuiva-ainepitoisuuteen ennen termistä kuivausta. Laskennassa tarkastellaan kuinka

paljon muodostuvalla kaatopaikkakaasulla voidaan kuivata lietettä 90 prosentin kuiva-ainepitoisuuteen. Lämmönkulutuksen ominaisarvoina on käytetty miniminä 583 kWh/t_{liete} ja maksimina 756 kWh/t_{liete} 90 prosentin kuiva-ainepitoisuuden saavuttamiseksi.

Yhdyskuntalietettä voidaan kuivata esimerkiksi polttoon soveltuvaksi kaatopaikkakaasulla. Kaatopaikkakaasulla voidaan kuivata myös lietteen ja biojätteen mädätyksessä muodostuvaa lietettä. Kymenlaakson Jäte Oy on käsitellyt vuonna 2006 noin 13 000 tonnia lietettä, jonka kuivaamiseen tarvittaisiin noin 1,8 - 2,6 miljoonaa m³ kaatopaikkakaasua, jos kuivauksessa käytettävän laitteiston energiankulutus on noin 580 kWh/t. Suuremmalla energiankulutuksella, noin 760 kWh/t, ja samalla kaasun määrällä kuivattavan lietteen käsittelykapasiteetti on pienempi, hieman alle 10 000 tonnia vuodessa. Vanhan kaatopaikan kaasun maksimituotannolla ja uuden kaatopaikan kaasun minimituotannolla eli alle kahdella miljoonalla m³ kaatopaikkakaasua voitaisiin kuitenkin kuivata noin 6 000 tonnia yhdyskuntalietettä, jonka on arvioitu kertyvän pohjoisesta Kymenlaaksosta, kuten PAKU-hankkeessa on oletettu. Kuivauskapasiteetti on esitetty kuvassa 35.



Kuva 35. Lietteen kuivauskapasiteetti kaatopaikkakaasulla ominaisenergiankulutuksen ollessa 583 kWh/t tai 756 kWh/t. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.

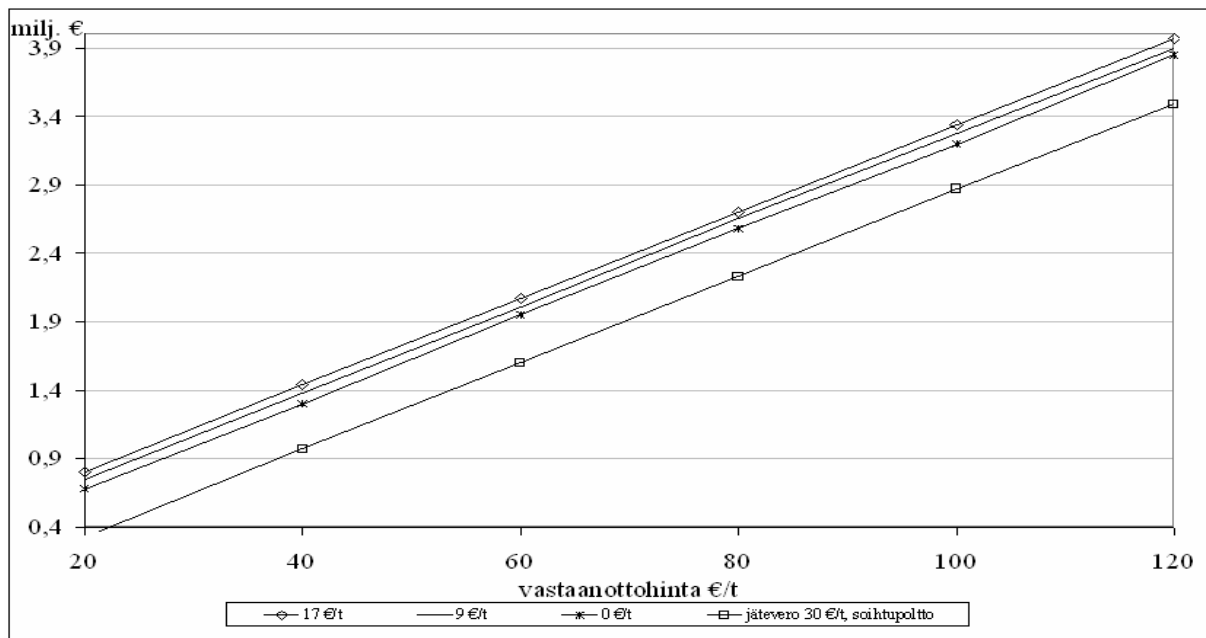
Sekä uuden että vanhan kaatopaikan kaasun tuotantomaksimiarvoilla lietteen kuivauskapasiteetti on 20 000 - 35 000 tonnia vuodessa. Tulosten perusteella voidaan siis todeta, että lietteen kuivaaminen alueella muodostuvalla kaatopaikkakaasulla on mahdollista, eikä kuivaamiseen tarvita muuta polttoainetta, vaan kaasu riittää tarvittavan lämmön tuottamiseen. Määdätyksestä saatava biokaasu lisää lietteen kuivauskapasiteettia edellä mainitusta. Yhdistämällä biokaasu sekä kaatopaikkakaasut, voidaan lietettä kuivata 35 000 - 75 000 tonnia kaasun metaanipitoisuuden vaihdella 60 - 75 tilavuusprosentin välillä. Kaatopaikkakaasua sekä biokaasua muodostuu yhteensä määrä, jota ei kannata käyttää pelkästään lietteen kuivaamiseen. Muodostuvalla kaasulla ja siitä saatavalla energialla kannattaa lietteen termisen käsittelyn lisäksi tuottaa sähköä tai lämpöä kiinteistöjen käyttöön.

Lietteen termisen kuivauksen suurinta sallittua investointikustannusta tarkastellaan lietteen vastaanottohinnan funktiona. Lietteen vastaanottohinta vaihtelee välillä 20 - 120 €/t. Tarkastellut lietteen kuivauskapasiteetit ovat 6 000 tonnia ja 13 000 tonnia vuodessa. 6 000 tonnin vuosikapasiteetti vastaa PAKU-hankkeessa tarkasteltua lietteen määrää, jonka on arvioitu muodostuvan Kymenlaakson pohjoisosista. 13 000 tonnia vastaa puolestaan Kymenlaakson Jäte Oy:n vastaanottamaa vuotuista lietemäärää, kun yritys käsitteli lietettä kompostoimalla. Lietteen kuivauksesta ylijäävä kaasu käytetään kaukolämmön tuotannossa. Suurimmalla sallitulla investointikustannuksella tulee voida kattaa lietteen siirtoon tarvittavat laitteistot, kuivauslaitteiston sekä ylijäämäkaasun siirtoon ja kaukolämmön tuotantoon tarvittavat investoinnit.

Suurimman sallitun investointikustannuksen kustannustekijät muodostuvat lietteen vastaanottohinnasta ja kaukolämmön myynnistä aiheutuvista tuotoista sekä kaasun hankinnasta, käyttökuluista ja sähkönkulutuksesta aiheutuvista menoista. Tarkastelussa ylijäämäkaasulla tuotetulle lämmölle käytetään samoja arvoja kuin kaukolämmön tuotannossa luvussa 4.3.2 eli 40 €/MWh ja 20 €/MWh. Lisäksi on tarkasteltu vaihtoehtoa, jossa ylijäämä kaasulla ei ole arvoa tai se poltetaan soihdussa. Lopputuotteena saatavalle kuivalle lietteelle on käytetty kolmea hintaa: Mikäli liete sijoitetaan kuivauksen jälkeen kaatopaikalle, voidaan lietteestä aiheutuvaksi kustannukseksi olettaa jäteveron suuruinen maksu eli 30 €/t. Kuivattu liete voidaan käyttää myös hyödyksi. Maksuttomasti hyötykäyttöön toimitettavan lietteen arvona käytetään 0 €/t. Lietettä voidaan myös käyttää polttoaineena voimalaitoksissa, joten käytetään lietteelle lisäksi

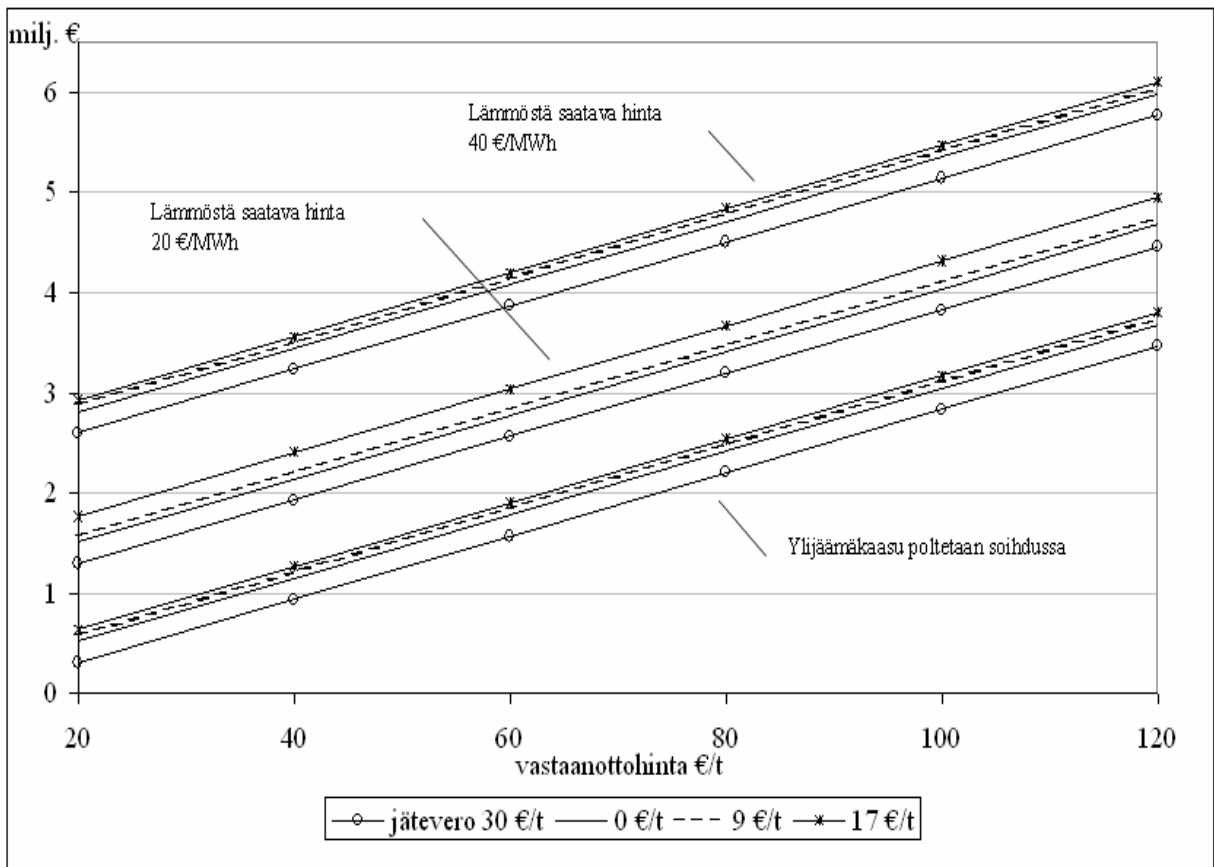
kierrätyspolttoaineen hintaa vastaavaa arvoa eli noin 4 €/MWh eli 17 €/t, kun lietteen lämpöarvoksi oletetaan 15 MJ/kg. Lisäksi lietteen arvona voidaan käyttää kompostituotteen arvoa. Kompostituotteen arvo on noin 9 €/t. Laskennassa käytetyn kaatopaikkakaasun määrä on 1,0 ja 3,5 miljoonaa m³. Puhdistamolietteen tyypillinen vastaanottohinta on noin 40 - 80 €/t.

Kuvassa 36 on esitetty lietteen kuivauksen suurin sallittu investointikustannus, kun lietettä kuivataan vanhalla kaatopaikalla muodostuvalla kaatopaikkakaasulla, jonka maksimituotannon on arvioitu olevan 1,0 miljoonaa m³ vuodessa. Vuotuinen kuivauskapasiteetti on 6 000 t/a. Investointikustannuksen minimi muodostuu, kun lietteen kuivauksesta ylijäävä kaasu poltetaan soihdussa ja kuivattu liete sijoitetaan kuivauksen jälkeen kaatopaikalle, jolloin loppusijoituksesta maksetaan jätevero. Maksimi-investointikustannus muodostuu, kun ylijäämäkaasu käytetään kaukolämmön tuotantoon ja lämmön arvo on 20 €/MWh. Lisäksi kuivattua lietettä käytetään hyötykäyttöön ja sen arvo vastaa kierrätyspolttoaineen arvoa eli noin 17 €/t. Kuvassa on esitetty myös lopputuotteen hinnoilla 9 €/t ja 0 €/t suurin sallittu investointikustannus. Näin ollen, suurin sallittu investointikustannus on vastaanottohinnalla 40 €/t noin 1,0 - 1,4 miljoonaa euroa ja vastaanottohinnalla 80 €/t noin 2,3 - 2,7 miljoonaa euroa.



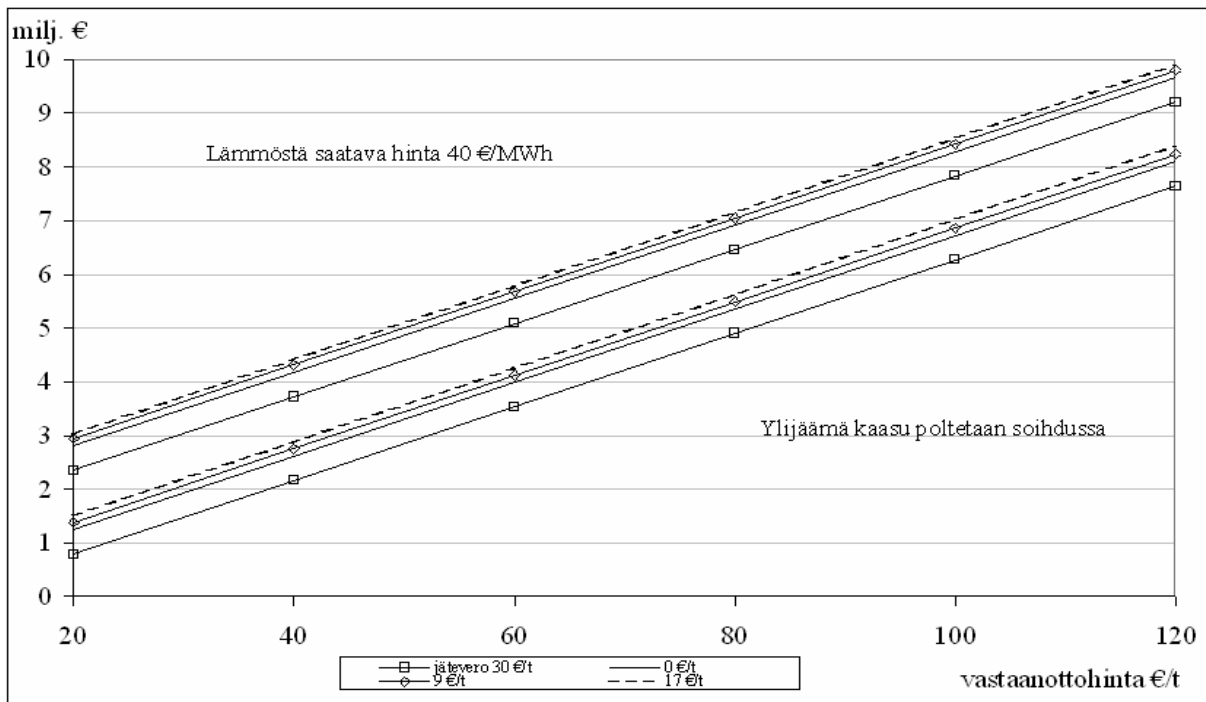
Kuva 36. Lietteen kuivauksen suurin sallittu investointikustannus, kun käytävissä olevan kaatopaikkakaasun määrä on noin 1,0 miljoonaa m³ vuodessa.

Tarkastellaan seuraavaksi kuivauskapasiteettia 6 000 tonnia vuodessa, kun kaatopaikkakaasua on käytettävissä 3,5 miljoonaa m³ vuodessa. Jos keskimääräisenä lietteen vastaanottohinta käytetään 60 euroa lietetonnilta, saadaan suurimmaksi sallituksi investointikustannukseksi 1,5 miljoonaa euroa, mikäli ylijäävä kaasu poltetaan soihdussa tai sille ei määritellä hintaa ja kuivattu liete sijoitetaan kaatopaikalle. Mikäli liete toimitetaan voimalaitokselle polttoaineeksi, voidaan samaisessa tapauksessa laitteistoihin investoida noin 1,9 miljoonaa euroa. Jos ylijäämäkaasusta saatava hinta vastaa kaukolämmön myyntihintaa, voidaan tarvittaviin laitteistoihin investoida noin 4,0 miljoonaa euroa. Lietteen kuivauksen ja ylijäämäkaasulla tuotettavan kaukolämmön suurin sallittu investointikustannus on esitetty kuvassa 37. Kuvasta voidaan huomata, että lietteen kuivauksen lopputuotteen hyötykäytön hinnalla ei ole prosentuaalisesti merkitystä suurimpaan sallittuun investointikustannukseen. Merkittävimmin lopputuotteen hinta vaikuttaa, kun ylijäämäkaasulla tuotetun lämmön arvo on 20 €/MWh.



Kuva 37. Lietteen kuivauksen suurin sallittu investointikustannus lietteen vastaanottohinnan funktiona, kun lietteen käsittelykapasiteetti on 6 000 t/a ja käytettävissä olevan kaatopaikkakaasun määrä on 3,5 miljoonaa m³.

Lietteen kuivauksen 13 000 tonnin käsittelykapasiteetti on noin kaksinkertainen edellä tarkasteltuun 6 000 tonnin käsittelykapasiteettiin. Keskimääräisellä lietteen vastaanottohinnalla voidaan tarvittaviin laitteistoihin investoida noin 3,5 - 4,3 miljoonaa euroa, jos ylijäämäkaasu poltetaan soihdussa tai sille ei määritellä arvoa, ja noin 5,1 - 5,8 miljoonaa euroa, jos ylijäämäkaasusta saadaan 40 €/MWh. Kuvassa 37 on esitetty lietteen kuivauksen suurin sallittu investointikustannus 13 000 tonnin vuotuiselle kuivauskapasiteetille lietteen vastaanottohinnan funktiona. Suurin sallittu investointikustannus 13 000 tonnin kuivauskapasiteetille on esitetty kuvassa 38.



Kuva 38. Lietteen kuivauksen suurin sallittu investointikustannus, kun lietettä kuivataan vuosittain noin 13 000 tonnia ja käytettävissä olevan kaatopaikkakaasun määrä on 3,5 miljoonaa m³.

4.7 Tuhkan terminen käsittely

Tilastokeskuksen (2007a) mukaan vuonna 2005 Suomessa kertyvästä jätteestä noin 14 prosenttia päätyi energiahyötykäyttöön. Suomessa toimii yksi massapolttolaitos Turussa ja muita jätteen polttolaitoshankkeita on vireillä yli 20. Yksi jätteenpolttolaitoshankkeista on Kotkan

Energia Oy:n rakennuttama Hyötyvoimala, jonka on määrä valmistua vuoden 2008 kuluessa. Laitoksella poltetaan arviolta 100 000 tonnia kierrätyspoltoainetta vuosittain. (Laine-Ylijoki et al. 2005.) Kymenlaakson Jäte Oy on yksi Kotkan voimalaitoksen polttoaineen toimittajista. Hankintarenkaaseen kuuluvat lisäksi Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy, Metsä-Sairila Oy ja Itä-Uudenmaan Jätehuolto Oy. (Alatalo 2007b.) Kaakkois-Suomen ympäristökeskuksen myöntämän ympäristöluvan (Dnro KAS-2003-Y-706-111) mukaan Kotkan hyötyvoimalaitoksessa jätteenpoltossa muodostuu pohjatuuhkaa vuosittain arviolta 18 000 tonnia ja lentotuuhkaa sekä APC-jätettä noin 6 700 tonnia. APC-jäte ja lentotuuhka on tarkoitus kiinteyttää tai stabiloida jätteenpolttolaitoksella ja kuljettaa sen jälkeen kaatopaikalle loppusijoitettavaksi.

Jätteen termisessä käsittelyssä muodostuu palamatonta ainesta: pohjatuuhkaa, lentotuuhkaa, kattilatuuhkaa sekä kaasujen puhdistusjätettä. Muodostuvan tuhkan määrään vaikuttaa polttoaineen koostumus ja erityisesti tuhkapitoisuus, tuhkan palamattoman aineksen osuus sekä kosteuspiitoisuus, polttolämpötila ja polttoprosessi. (Laine-Ylijoki et al. 2005, 23.) Pohjatuuhka kertyy tulipesän pohjalle ja sitä muodostuu arinapoltossa noin 20 - 30 prosenttia poltettavan jätteen painosta. Hienojakoista kattilatuuhkaa muodostuu energian talteenottolaitteistoissa noin 0,5 prosenttia jätteen painosta. Lentotuuhkaa koostuu tuhkapartikkeleista ja se erotetaan savukaasuista esimerkiksi sähkösuodattimen tai syklonien avulla. Lentotuuhkaa muodostuu huomattavasti vähemmän kuin pohjatuuhkaa, vain noin kaksi prosenttia jätteen painosta. Kaasujen puhdistusjäte (APC-jäte) muodostuu savukaasujen puhdistusprosessissa, kuten esimerkiksi typpiyhdisteiden poistolaitteissa. Kaasujen puhdistusjätettä, joka sisältää myös puhdistusprosessin ylimääräisen reagenssin, muodostuu noin kaksi prosenttia syötetyn jätteen painosta. Muodostuvan APC-jätteen määrään vaikuttaa käytettävä savukaasujen puhdistustekniikka, esimerkiksi kuivaprosessi tuottaa enemmän APC-jätettä kuin märkäprosessi. (Laine-Ylijoki et al. 2005, 23.)

Ympäristöministeriön päätöksessä (867/96) yleisimpien jätteiden sekä ongelmajätteiden luettelosta yhdyskuntajätteen poltossa muodostuva lento- ja kattilatuuhka sekä APC-jäte on määritelty ongelmajätteeksi lähinnä niiden sisältämien raskasmetallien ja dioksiinin takia. Jätteen polton pohjatuuhka on ominaisuuksiltaan muita muodostuvia tuhkia ympäristölle ja terveydelle haitattomampaa, eikä sitä ole luokiteltu ongelmajätteeksi. Jätteen polton tuhkaa voidaan käsi-

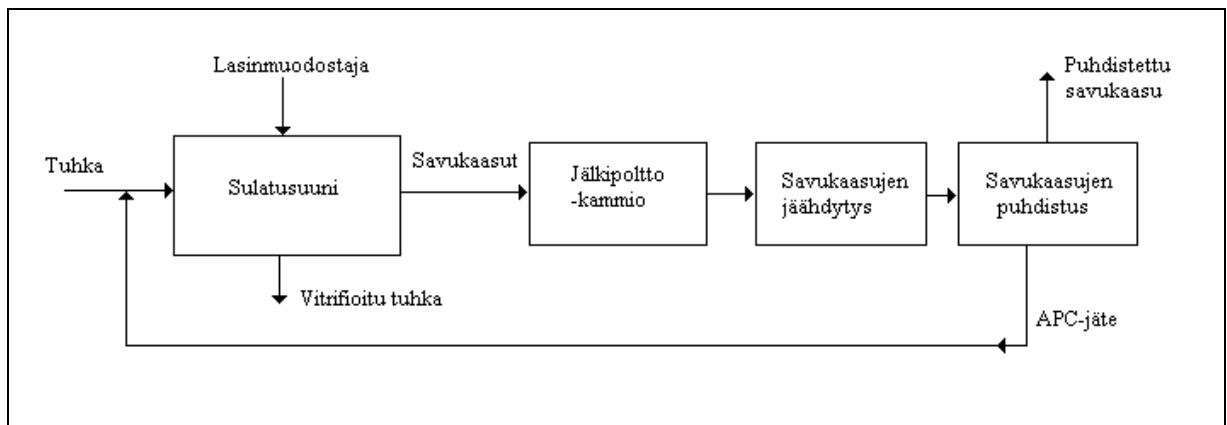
tellä usealla eri tavalla sen ominaisuuksien parantamiseksi, muun muassa ikäännyttämällä, pesu- ja uuttotekniikoilla, stabiloimalla tai käsittelemällä termisesti (Laine-Ylijoki et al. 2005, 56). Maailmanlaajuisesti jätteenpolton lentotuhka ja APC-jäte käsitellään pääasiassa kiinteyttämällä tai stabiloimalla ja loppusijoittamalla kaatopaikalle. Pohjatuhkaa hyödynnetään erilaisissa maarakenteissa sekä betoni- ja asfalttituotteiden raaka-aineena. (Laine-Ylijoki et al. 2005, 39.) Tuhkan termisiä käsittelytekniikoita ei juurikaan käytetä Euroopassa, toisin kuin Japanissa, jossa on noin 40 laitosta käytössä. Termisiä tuhkan käsittelymenetelmiä ovat vitrifiointi, fuusiointi sekä sintraus. (Laine-Ylijoki et al. 2005, 57, 64.) Käsittelyn tavoitteena on parantaa tuhkan ominaisuuksia siten, että se soveltuu hyötykäyttöön tai se voidaan sijoittaa tavanomaisen jätteen kaatopaikalle.

Tässä diplomityössä tarkastellaan tuhkan käsittelyä termisesti vitrifioinnilla. Työssä esitetyt vitrifiointitekniikat ovat sovellettavissa myös tuhkan fuusiointiin, joka eroaa vitrifioinnista lähinnä lasinmuodostaja-aineen käytön osalta. Vitrifiointitekniikat voidaan jakaa poltinkäyttöisiin sekä sähköisiin tekniikoihin lämmöntuottamistavan perusteella. Tässä työssä sähköiset vitrifiointitekniikat rajataan pois. Työssä tarkastellaan poltinkäyttöisiä tekniikoita, joissa pääsääntöisesti polttoaineena käytettävät polttoöljy, kerosiini ja maakaasu olisivat korvattavissa kaatopaikkakaasulla. Japanissa tuhkan sulatukseen käytetään myös jätteenpolttolaitosten tuottamaa energiaa. Tyypillisesti tuhka kuljetetaan kaatopaikoille käsiteltäväksi ja loppusijoitettavaksi. Kaatopaikoilla muodostuva kaatopaikkakaasu olisi siis edullista energiaa käytettäväksi tuhkan käsittelyyn loppusijoituskustannusten pienentämiseksi tai tuhkan ominaisuuksien parantamiseen hyötykäyttöä varten.

4.7.1 Vitrifiointiprosessi

Vitrifioinnilla tarkoitetaan prosessia, jossa lasinmuodostaja-aine ja tuhka sulatetaan 1 100 - 1 500 °C:n lämpötilassa yksifaasiseksi amorfiseksi lasituotteeksi. Vitrifioinnin haitta-aineiden pidätysmekanismit perustuvat epäorgaanisten yhdisteiden ja lasinmuodostajan välisiin kemiallisiin sidoksiin ja ainesosien kapseloitumiseen lasimaiseen materiaaliin (Sabbas et al. 2001, 83). Vitrifiointitekniikoita on useita ja ne eroavat toisistaan käytettävän sulatusuunin, toimin-

nan ja prosessikemian mukaan. Vitrifiointitekniikka perustuu suurelta osin valimoteollisuudessa käytössä olevaan laitetekniikkaan. Vitrifioinnin lopputuotetta voidaan käyttää muun muassa teiden pinta- ja pohjarakenteissa, betonirakenteissa hiekan lisäksi, lasikeramiikan raaka-aineena, eristemateriaalin valmistuksen raaka-aineena, hiekkapuhalluksessa puhallusmateriaalina sekä harkkojen ja tiilien valmistuksessa (Ferreira et al. 2003, 207; Werther et al. 1999, 70).



Kuva 39. Tuhkan vitrifiointiprosessi.

Lasinmuodostaja-aineena käytetään kvartsia, joka koostuu pääosin piidioksidista (SiO_2). Pohjois-Koreassa tehdyn tutkimuksen mukaan lentotuhkan vitrifioinnissa tarvittava lasinmuodostaja- eli piidioksidipitoisuus on vähintään 5 painoprosenttia tuhkan massavirrasta. Tutkimuksessa todettiin, että tuhkan vitrifiointi onnistuu myös ilman lasinmuodostaja-aineen lisäämistä, mikäli tuhka sisältää yli 35 painoprosenttia kvartsia ja alle 15 painoprosenttia kloridia. Ilman lasinmuodostajaa tapahtuvaa tuhkan sulatusta kutsutaan fuusioinniksi. Liian korkea piidioksidipitoisuus voi kuitenkin vaikuttaa vitrifioinnin lopputuotteen käytettävyyteen, sillä piidioksidipitoisuuden kasvaessa lopputuotteen kestävyys on todettu heikentyvän. (Park & Heo 2002, 83 - 84.) Alankomaissa tehdyn pohjatuhkan vitrifiointitutkimuksen mukaan, jätteen polton pohjatuhka sisältää yleensä riittävän määrän piidioksidia vitrifioinnin onnistumiseksi ja kestävä lasimaisen rakenteen muodostumiseksi (Xiao et al. 2007, 2). Lentotuhkaa ei voida vitrifoida ilman lasittaja-ainetta, sillä lentotuhka sisältää huomattavasti vähemmän piidioksidia kuin pohjatuhka. Kvartsin lisäksi lasittaja-aineena voidaan käyttää myös lasimurskaa, joka on tehty kierrätyslasista. (Li et al. 2003, 2307.)

Tuhkan ja lasittaja-aineen sisältämät kalsiumoksidi (CaO) ja piidioksidi (SiO₂) stabiloivat ja vitrifioivat tuhkan. Optimaalisen vitrifiointituloksen saavuttamiseksi käsiteltävän tuhkan tulisi sisältää alle viisi prosenttia vettä, alle kolme prosenttia palamatonta ainesta ja alle 20 painoprosenttia raskasmetalleja. Lisäksi tuhkan raekoon tulisi olla alle 100 millimetriä. (ISWA 2003, 26 - 27.) Laitevalmistajat ovat myös asettaneet omille laitteistoilleen optimaaliset tuhkan ominaisvaatimukset. Esimerkiksi Mitsubishin sulatusuunissa, jossa on yhdistetty pintasulatus- sekä pyörrevirtauunin tekniikka, vesipitoisuus saa olla enintään 15 painoprosenttia, metallipitoisuus alle 5 painoprosenttia, palamattomien osuus alle 10 prosenttia ja tuhkan raekoko enintään 10 millimetriä (GEC 2007).

Tuhkan ominaisuuksista sulamispiste on merkittävin vitrifioinnin onnistumiseksi. Suomessa KELPO-hankkeessa (Kierrätyspolttoaineiden ja lietteiden energiakäyttöselvitys Pohjois-Savossa) tehtyjen analyysien mukaan kierrätyspolttoaineen tuhkan sulamispiste on 1 214 - 1 320 °C (Heikkinen et al. 2002). Alakankaan (2000, 113) mukaan kierrätyspolttoaineiden tuhkan sulamislämpötilat vaihtelevat välillä 1 100 - 1 270 °C. Lentotuhkan sulamispiste on 1 280 - 1 330 °C ja tuhaseoksen, joka muodostuu sekä pohja- että lentotuhkasta, sulamislämpötila on 50 - 100 °C alhaisempi kuin lentotuhkan sulamispiste. Tuhkan eri komponenttien sulamislämpötilat vaihtelevat eri yhdisteiden välillä, esimerkiksi haitallisten metallien (muun muassa elohopea, kadmium, sinkki, alumiini) sulamispisteet vaihtelevat välillä -39 - 660 °C. Metallit, joilla on korkea kiehumispiste, päätyvät vitrifioinnin lopputuotteeseen, kun taas matalan kiehumispisteen omaavat metallit höyrystyvät ja päätyvät savukaasuihin. (Abe et al. 1996, 433 - 434.)

Vitrifioinnissa muodostuu savukaasua, joka sisältää muun muassa happea, hiilimonoksidia ja typen oksideita, vetykloridia (HCl) sekä rikin oksideita. Savukaasu sisältää myös tuhkaa ja raskasmetalleja. Poltinlämmiteisissä sulatusuuneissa savukaasuun haihtuu enemmän raskasmetalleja sekä tuhkaa kuin sähköisissä sulatusuuneissa palamisilman suuren tilavuusvirran takia. Vitrifioinnissa muodostuva savukaasu tulee sen sisältämien epäpuhtauksien takia käsitellä ennen ympäristöön johtamista. Tuhka voidaan erottaa savukaasusta esimerkiksi syklonilla tai sähkösuodattimella, ja palauttaa takaisin sulatuskammioon vitrifioitavaksi. Savukaasusta erotettu tuhka voidaan käyttää myös sementinvalmistuksen raaka-aineena. (Ito 1996, 459; Steiner

2006, 29.) Tuhkan sisältämistä raskasmetalleista savukaasuihin haihtuneet poistetaan kondensoimalla, suodattamalla tai pesurilla (Ranta & Wahlström 2002, 43; Steiner 2006, 29).

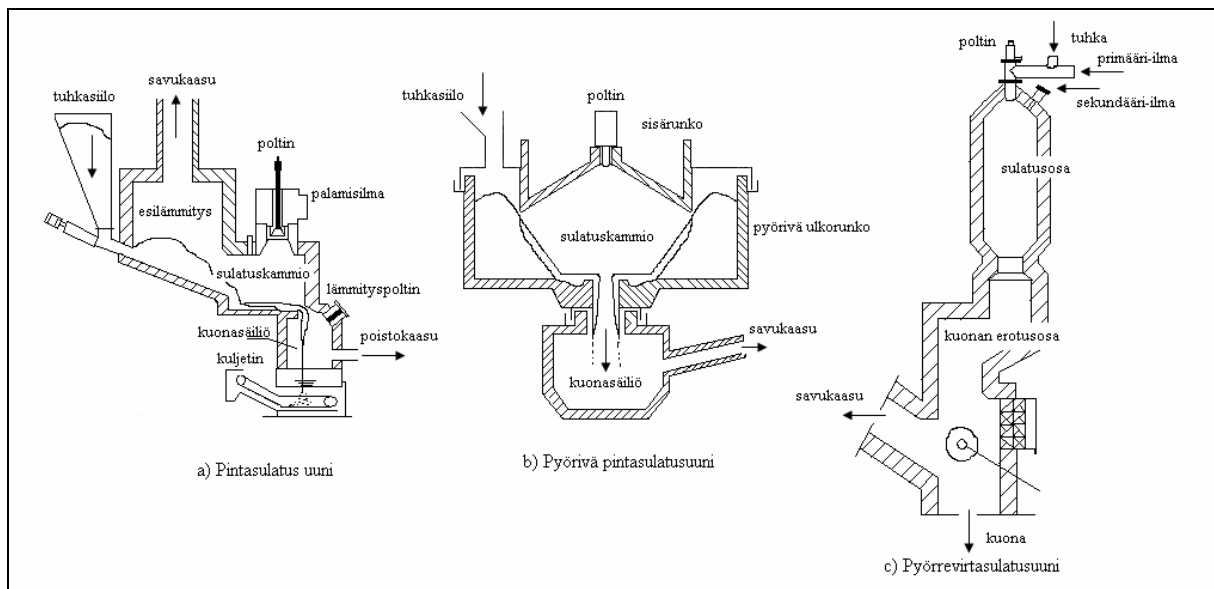
Tuhkan vitrifioinnilla saavutetaan useita etuja. Vitrifioinnin lopputuotteena saada inerttiä materiaalia, jonka veden, kemikaalien ja lämmön kestävyys on hyvä. Lisäksi tuhkan sisältämien raskasmetallien liukoisuus laskee merkittävästi. Alentunut liukoisuus tarkoittaa mahdollisuutta sijoittaa lopputuote tavanomaisen jätteen kaatopaikalle ongelmajätteen kaatopaikan sijasta, mikäli lopputuotetta ei toimiteta hyötykäyttöön. Jätteen polton lentotuhka sisältää tyypillisesti raskasmetallien lisäksi orgaanisia yhdisteitä, kuten dioksiinia ja furaania. Vitrifioimalla lentotuhka orgaanisten yhdisteiden pitoisuus pienenee keskimäärin 98 - 99 prosenttia. Vitrifiointi on muihin tuhkan käsittelymenetelmiin, kuten stabilointiin ja kemialliseen käsittelyyn verrattuna huomattavasti tehokkaampi dioksiinin tuhoamisessa. (Li et al. 2003, 2311; Xiao et al. 2007, 4.)

Vitrifioinnilla myös pienennetään tuhkan tilavuutta lasinmuodostajan lisäämisestä huolimatta. Lentotuhkan osalta massan pienenemä aiheutuu pääasiassa tuhkan sisältämien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ja raskasmetallien höyrystymisestä (Park & Heo 2002, 83 - 84). Pohjatuhkan sisältämällä raskasmetalleilla on korkeampi kiehumispiste kuin lentotuhkan raskasmetalleilla. Tästä, sekä pohjatuhkan suuremmasta piidioksidipitoisuudesta johtuen, pohjatuhkan tilavuus pienenee vähemmän kuin lentotuhkan. Pohjatuhkasta voidaan kuitenkin ennen vitrifiointia ja vitrifioinnin aikana erottaa metalleja, kuten rautaa ja kuparia, jolloin massan pienenemä on keskimäärin 17 prosenttia. (Li et al. 2003, 2311; Xiao et al. 2007, 4.)

4.7.2 Vitrifiointitekniikat

Tässä diplomityössä tarkastellaan ainoastaan niitä vitrifiointimenetelmiä, joissa tarvittava lämpö tuotetaan polttoaineella. Tarkasteltavia poltinuuneja ovat pintasulatusuunit (*surface melting furnace*) sekä pyörrevirtasulatusuuni (*swirling-flow melting furnace*). Poltinkäyttöinen rumpusulatusuuni (*rotary kiln melting furnace*) on rajattu tarkastelun ulkopuolelle tarvittavien lähtötietojen, kuten toimintaperiaatteen ja energiankulutuksen, puuttumisen takia. Eri uunityy-

pit on esitetty kuvassa 40. Vitrifiointi soveltuu sekä lento- että pohjatuhkan sekä APC-jätteen käsittelyyn. Kiertosulatusuunissa voidaan tuhkan lisäksi vitrifoida muun muassa yhdyskunta-jätettä tai ongelmajätettä sekä lietettä (ks. luku 4.6). Lisäksi on syytä ottaa huomioon, että fuusiointi eroaa vitrifioinnissa ainoastaan lasinmuodostaja-aineen käytön osalta. Fuusioinnissa tuhka sulatetaan sellaisenaan ilman lasinmuodostajaa kidemäisen lopputuotteen saavuttamiseksi. Työssä esitetyt tekniset tiedot vitrifioinnista ovat sovellettavissa siis myös tuhkan fuusiointiin.



Kuva 40. Poltinkäyttöiset sulatusuunit: a) pintasulatusuuni, b) pyörivä pintasulatusuuni ja c) pyörrevirtasulatusuuni (Ito 1996, 454; Sakai et al. 2000, 251).

Pintasulatusuunit. Pintasulatusuunit muodostuvat tuhkan syöttölaitteistosta, rungosta, polttimesta sekä sulatuskammioista. Pintasulatusuunit ovat jatkuvatoimisia. Sulanut tuhka valuu sulatuskammion alla sijaitsevaan kuonasäiliöön. Pintasulatusuuneja on useita eri tyyppisiä. Yksinkertaisimmillaan pintasulatusuuneissa polttimet kuumentavat tuhkan vitrifointilämpötilaan. Sulatuskammion katto voidaan päällystää kuumuutta heijastavalla materiaalilla vaadittavan sulatuslämpötilan ylläpitämiseksi. Toisessa pintasulatusuunityyppissä sulatuskammioista tulevilla poistokaasuilla esilämmitetään tuhkaa ennen varsinaista sulatusta (kuva 40a). (Sakai et al. 2000, 250 - 251.) Pintasulatusuunien vitrifointitehokkuuteen vaikuttaa käsiteltävän tuhkan koostumus. Lentotuhkasta noin 88 prosenttia vitrifioituu käsittelyssä, kun taas lento- ja pohja-

tuhkan seoksesta vitrifioituu keskimäärin 86 prosenttia. Tuhkaseoksen vitrifioinnissa myös poistokaasun tuhkapitoisuus on suurempi kuin lentotuhkan käsittelyssä. Pelkän pohjatuhkan vitrifiointitehokkuus on vain noin 70 prosenttia. (Nishigaki 1996, 449.)

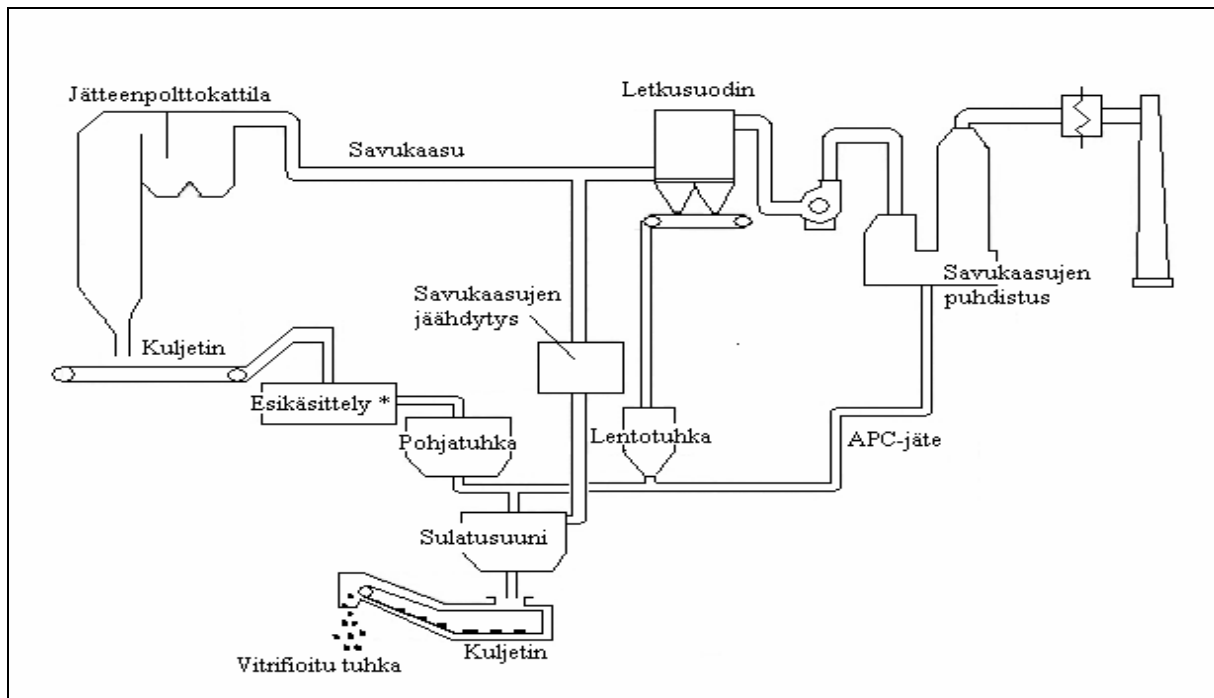
Pyörivässä pintasulatusuunissa sulatuskammio, johon käsiteltävä tuhka johdetaan, pyörii poltinosan ympärillä (kuva 40b) (Sakai et al. 2000, 250 - 251). Pyörivässä sulatusuunissa lämpötila sulatuskammiossa vaihtelee välillä 1 400 - 1 500 °C. Tuhannen kilon tuhkamäärän vitrifiointiin tarvitaan energiaa 2 600 - 2 800 kWh. Pyörivän pintasulatusuunin vitrifiointitehokkuus on parhaillaan 88 prosenttia ja keskimäärin 80 prosenttia. Lopusta tuhkasta osa erottuu savukaasuista sähkösuodattimessa ja osa jää poistokaasuun. (Abe et al. 1996, 432.)

Pyörrevirtasulatusuuni. Pyörrevirtasulatusuunissa lentotuhka ja palamisilma syötetään sulatuskammioon toisiinsa sekoitettuina lähelle poltinta (kuva 40c). Voimakas palamisilman syöttö aiheuttaa sulatuskammiossa voimakkaan pyörteisen virtauksen. Virtauksessa oleva lentotuhka lämpenee voimakkaasti ja sulaa lämpötilassa, joka pidetään polttimella noin 100 °C tuhkan sulamispistettä korkeampana. Sulanut tuhka törmää pyörivän virtauksen takia kammion seinään ja valuu alas kuonasäiliöön. Pyörrevirtasulatusuunin vitrifiointitehokkuus on keskimäärin 80 prosenttia. (Ito 1996, 454.)

Taulukko 6. Käytössä olevien vitrifiointilaitosten prosessitietoja.

Menetelmä	Kapasiteetti [kg/h]	Lämpötila sulatuskammiossa [°C]	Energian kulutus [kWh/t _{tuhka}]	Lähde
Pyörivä pintasulatusuuni	600 - 670	1 400 - 1 500	2 600 - 2 800	Abe et al. 1996, 433
	3 500	-	3 900 ± 900	Ecke et al. 2000, 44
Pyörrevirtasulatusuuni	250 - 1 200	1 300	2 470 - 3 280	Ito 1996, 456
	-	-	2 900 ± 400	Ecke et al. 2000, 44
Pintasulatusuuni	42 - 1 000 (jopa 6 500)	-	- (jopa 8 550 ± 350)	Ecke et al. 2000, 44
	182 - 354	1 385 - 1 432	1 568 - 3 472	Nishigaki 1996, 449

Vitrifointi on erittäin energiaintensiivinen menetelmä käsitellä tuhkaa, ja menetelmän kalleus perustuukin osin suureen energiankulutukseen. Taulukossa 6 on esitetty Japanissa käytössä olevien pintasulatusuunien, pyörivien pintasulatusuunien sekä pyörrevirtasulatusuunien kapasiteetit sekä energiankulutukset tuhkatonna kohden. Polttoaineena vitrifointiuuneissa käytetään tyypillisesti raskasta polttoöljyä, kerosiinia tai nestekaasua. Japanissa, jossa vitrifointilaitteistoja on käytössä useita, tuhkan sulatukseen käytetään jätteenpolttolaitoksen tuottamaa energiaa. Kuvassa 41 on esitetty tuhkan vitrifointiuunin sijoittaminen jätteenpolttolaitoksessa. (Laine-Ylijoki et al. 2005, 48). Lämpöenergian lisäksi erityisesti pyörivä pintasulatusuuni tarvitsee toimiakseen sähköä. Pyörivän pintasulatusuunin sähkönkulutus on noin 250 - 500 kWh tuhka tonnia kohden (Ecke et al. 2000, 46).

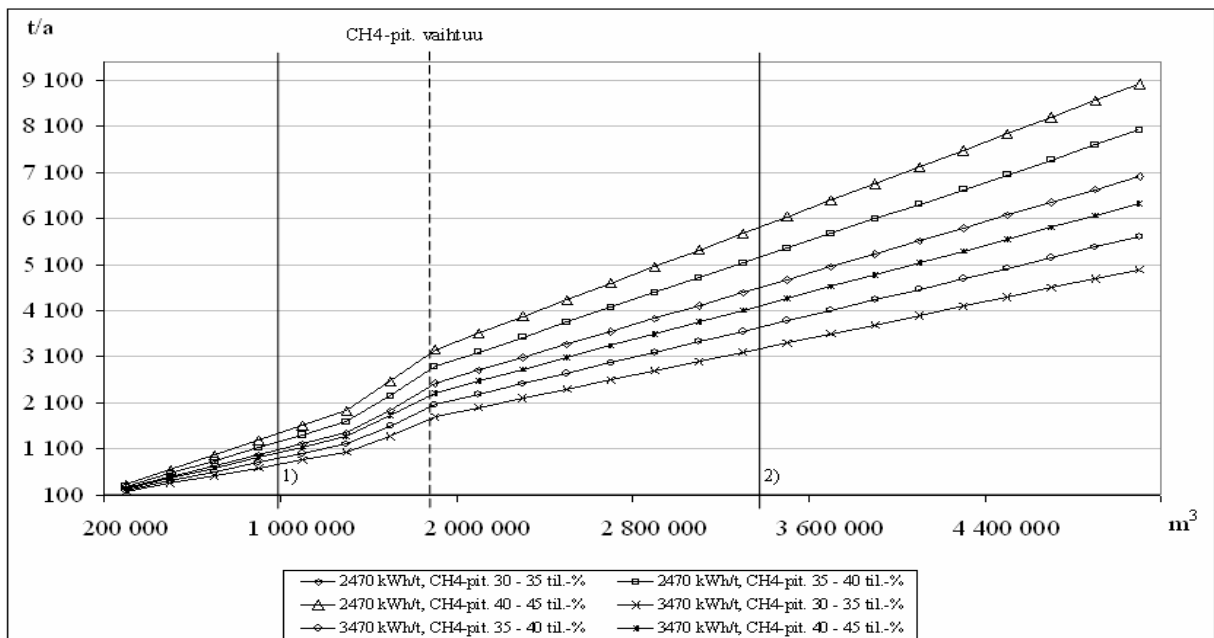


Kuva 41. Japanissa tuhkan vitrifointi yhdistetään tyypillisesti jätteenpolttoprosessiin (* magneettierotin, murskaus, seulonta) (Nishigaki 2000, 186).

4.7.3 Käsittelykapasiteetti ja investointikustannus

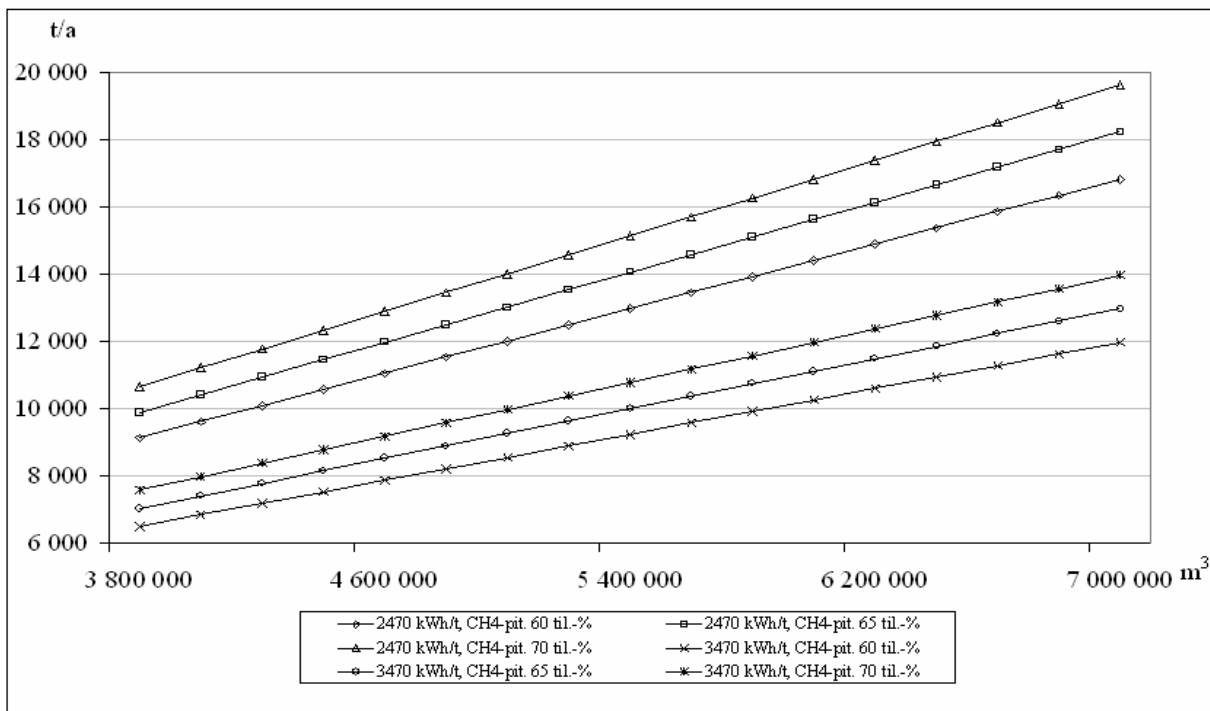
Laskennassa tarkastellaan kuinka paljon tuhkaa voidaan vuodessa käsitellä vitrifioimalla, kun lämmön tuottamiseen käytetään kaatopaikkakaasua. Laskennassa käytettävät ominaisenergiankulutukset tuhkatonna kohden on valittu taulukossa 6 esitetyistä tiedoista. Laskennassa käytetään energiankulutuksina arvoja 2 470 kWh/t ja 3 470 kWh/t. Lisäksi vitrifioinnille lasketaan suurin sallittu investointikustannus.

Tarkastelluilla energiankulutuksilla ei Anjalankosken Ekoparkissa muodostuva kaatopaikkakaasu riitä esimerkiksi Kotkan hyötyvoimalaitokselta arvioidun lentotuhkan ja APC-jätteen käsittelyyn termisesti. Kuten kuvasta 42 voidaan havaita, Kotkassa muodostuvien tuhkan käsittely vaatisi alhaisen energiankulutuksen, 2 470 kWh/t, korkealaatuisen kaatopaikkakaasun, CH₄-pitoisuus yli 40 tilavuusprosenttia, ja kaasun määrän tulisi olla yli 4 miljoonaa m³ vuodessa. Kotkan tuhkan vitrifiointi edellyttäisi siis sekä vanhan että uuden kaatopaikan kaasuntuotannon maksimia. Toisaalta vitrifioinnissa tarvittavaa lämmöntuotantoa voisi tukea esimerkiksi maakaasulla.



Kuva 42. Tuhkan käsittelypotentiaali kaatopaikkakaasulla. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.

Kun huomioidaan mahdollisesta biojätteen ja lietteen mädätyksestä saatavan kaasun vaikutus käytettävissä olevan biokaasun määrään ja metaanipitoisuuteen, voidaan todeta, että Kotkan hyötyvoimalaitoksessa muodostuvan lentotuhkan ja APC-jätteen käsittely on mahdollista (kuva 43). Ominaisenergiankulutuksen ollessa 3 470 kWh/t ei tuhkan vitrifiointi kaatopaikkakaasulla ole mahdollista, mikäli kaatopaikoilta muodostuvan kaasun määrä on tarkastelussa käytetty minimi eli 0,5 ja 0,8 miljoonaa m³ vuodessa. Tällöin kokonaiskaasunmäärässä jäädyään alle 3,5 miljoonan m³ ja muodostuvan tuhkan vitrifiointiin vaadittava kaasun määrä on vähintään 3,8 miljoonaa m³.



Kuva 43. Tuhkan käsittelypotentiaali, kun huomioidaan mädätyslaitoksesta saatava biokaasu.

Anjalankosken Ekoparkissa muodostuva kaatopaikkakaasu ei siis riitä Kotkassa muodostuvan lentotuhkan ja APC-jätteen termiseen käsittelyyn. Lisäksi mahdollisesti biojätteen ja lietteen mädätyslaitoksesta saatavan biokaasun lisäys vaatii korkean kaatopaikkakaasun tuotannon vitrifioinnin onnistumiseksi pelkällä biokaasulla. Tuhkan vitrifioinnissa tarvittavan lämmön muodostumista tulisi siis tukea esimerkiksi maakaasulla tai polttoöljyllä.

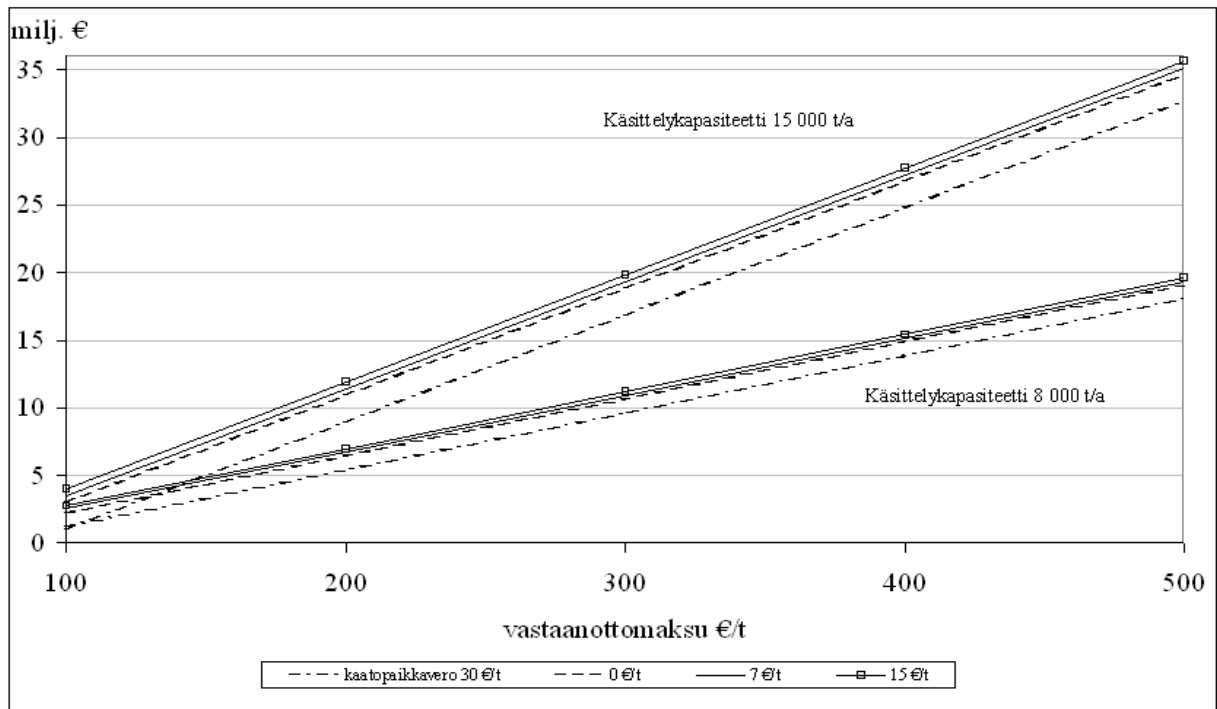
Vitrifioinnin kalleus perustuu tekniikan energiaintensiivisyyteen sekä korkeisiin investointikustannuksiin. Vitrifioinnin kustannuksia voidaan alentaa, mikäli tuhkan käsittelyn lopputuotteesta saadaan taloudellista hyötyä. Tästä johtuen käsiteltyä tuhka tulisikin pyrkiä käyttämään hyödyksi kaatopaikkasijoituksen sijaan. Ecken (et al. 2000, 46) mukaan tuhkan vitrifioinnissa polttoaineen hankintakustannukset voivat olla jopa 70 prosenttia laitteiston käyttökustannuksista. Vitrifioinnissa käytettävät lasinmuodostaja aineet ovat edullisia ja kvartsin sijasta lasittaja-aineena voidaan käyttää kierrätyslasimurskaa.

Vitrifioinnin kustannuksista on saatavissa suhteellisen vähän tietoa, mutta esimerkiksi VTT:n selvitysten mukaan tuhkan käsittely vitrifioimalla maksaa noin 100 - 500 euroa käsiteltyä tuhkatonna kohden (Laine-Ylijoki et al. 2005, 66). Vitrifiointilaitteiston investointikustannukseksi on arvioitu 20 miljoonaa euroa, kun laitoksessa käsitellään 1,0 - 1,5 tonnia tuhkaa tunnissa (ISWA 2003, Koivusen 2007, 71 mukaan). Ecken (et al. 2000, 44) mukaan tuhkatonnin vitrifiointikustannukset vaihtelevat perinteisillä pintasulatusuuneilla välillä 80 - 570 euroa ja pyörivällä pintasulatusuunilla välillä 160 - 350 euroa. Kun käsittelykustannuksissa huomioidaan laitteistojen arvonalennus, on kustannuksen vaihteluväli 410 - 980 euroa käsiteltyä tuhkatonna kohden. Saksassa 1990-luvun lopulla tehtyjen kokeiden perusteella tuhkan vitrifioinnin käsittelykustannus olisi noin 170 euroa tonnia kohden (Brereton 1996, 259).

Tässä diplomityössä tuhkan termiselle käsittelylle lasketaan suurin sallittu investointikustannus tuhkan vastaanottohinnan funktiona. Investointikustannus sisältää tuhkan syöttölatteiden ja sulatusuunin lisäksi lopputuotteen käsittelylaitteistoihin tarvittavat investoinnit sekä sulatuksessa muodostuvien savukaasujen puhdistuslaitteistot. Tuhkan vastaanottohinta on 100 - 500 €/t. Tarkasteltavat käsittelykapasiteetit ovat 8 000 tonnia vuodessa ja 15 000 tonnia vuodessa. Käsittelykapasiteetti 8 000 tonnia vuodessa mahdollistaa Kotkan rakenteilla olevassa hyötyvoimalaitoksessa muodostuvan lentotuhkan ja APC-jätteen sekä lietteen poltossa muodostuvan tuhkan termisen käsittelyn. 15 000 tonnin vuotuisella käsittelykapasiteetilla voidaan kattaa Kotkan hyötyvoimalaitoksessa sekä toisessa vastaavankokoisessa jätteenpolttolaitoksessa muodostuvan lentotuhkan ja APC-jätteen käsittelytarve.

Tuhkan käsittelyn kustannustekijöitä ovat tuhkan vastaanotosta saatavat tuotot sekä kulut, jotka aiheutuvat kaasun hankinnasta, sähkön kulutuksesta sekä lasinmuodostajan ja lisäpolttoaineen hankinnasta. Vitrifioinnissa muodostuvasta lopputuotteesta voidaan saada joko tuottoja tai kustannuksia. Mikäli lasittunut tuhka sijoitetaan kaatopaikalle, siitä joudutaan maksamaan vähintään kaatopaikkaveron, 30 €/t. Jos taas lopputuote luovutetaan maksutta hyötykäyttöön, on sen arvo 0 €/t. Toisaalta lasittunutta tuhkaa voidaan käyttää esimerkiksi tierakenteissa korvaamassa murskettä, jonka arvo on noin 7 euroa tonnilta. Vitrifioitua tuhkaa voidaan myös jalostaa pidemmälle, jolloin sen arvo voi olla huomattavasti suurempi. Koska tietoa tuhkan jalostusarvosta ei ole, käytetään tarkastelussa arvoa 15 €/t.

Kuvassa 44 on esitetty tuhkan vitrifiointilaitteiston suurin sallittu investointikustannus tuhkan vastaanottohinnan funktiona käsittelykapasiteeteille 8 000 tonnia ja 15 000 tonnia vuodessa. Verrattuna edellä mainittuun arvioon sulatuslaitteiston investointikustannuksesta 20 miljoonaa euroa, tulisi tuhkan vastaanottohinnan olla noin 500 euroa tonnilta. Lisäksi lopputuotteesta saatavan hinnan tulisi olla vähintään 15 euroa tonnilta. Mikäli sulatuslaitteisto suunniteltaisiin pelkästään Kotkan hyötyvoimalalta muodostuvien lentotuhkan ja APC-jätteen käsittelyyn, suurin sallittu investointikustannus 100 euron vastaanottohinnalla olisi alle viisi miljoonaa euroa ja 500 euron vastaanottohinnalla noin 20 miljoonaa euroa.



Kuva 44. Tuhkan vitrifioinnin suurin sallittu investointikustannus 8 000 tonnin ja 15 000 tonnin vuotuisilla käsittelykapasiteeteilla.

Vitrifioinnissa muodostuu savukaasuja, jotka ovat sulatuskammiosta poistuessaan jopa yli 900 asteiset. Savukaasujen sisältämää lämpöenergiaa voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämmöntuotantoon tai biopolttoaineen kuivaukseen, jolloin hukkalämmölle saadaan taloudellista arvoa. Hukkalämmön hyötykäytöllä voidaan lisätä suurinta sallittua investointia. Hukkalämmön hyötykäyttöä ei tarkastella tässä diplomityössä.

4.8 Biopolttoaineiden kuivaus

Biomassasta valmistettava biopolttoaine sisältää luontaisesti runsaasti vettä lukuun ottamatta heinäkasveja, jotka korjataan suhteellisen kuivuneina. Puuperäisten biopolttoaineiden kosteuteen vaikuttavat muun muassa puulaji, kasvupaikka ja puun ikä. Heinäkasvien eli selluloosapohjaisten biopolttoaineiden kosteuspitoisuus vaihtelee kasvilajikkeen, kasvupaikan ja -alustan sekä korjuuajankohdan mukaan. Esimerkiksi oljen kosteuspitoisuus on tyypillisesti välillä 17 -

25 prosenttia, ruokohelven 15 - 30 prosenttia, hakkeen 30 - 60 prosenttia ja kuoren 45 - 65 prosenttia (Alakangas 2000). Kostean polttoaineen kuivauksella parannetaan polttoaineen lämpöarvoa ja vähennetään kosteuden aiheuttamia ongelmia polttolaitteistoissa.

Eri biopolttoaineet vaativat erilaisen kosteuspitoisuuden ennen kuin ne soveltuvat jalostukseen ja polttoaineeksi. Lisäksi polttoaineen käyttökohde vaikuttaa puun loppukosteuden vaatimukseen. Suuret laitokset voivat polttaa melko kosteaakin biopolttoainetta, kun taas kotitalouksissa käytettävän polttoaineen tulee olla kuivaa. Tulisijoissa käytettävien puupolttoaineiden suosittu kosteuspitoisuus on 15 - 20 prosenttia ja keskuslämmityskattiloissa käytettävälle puulle alle 25 prosenttia. Voimalaitoshakkeen kosteuspitoisuuden tulee olla alle 40 prosenttia. Biopolttoainejalosteiden, kuten brikettien ja pellettien, kosteuspitoisuus saa olla enintään 15 prosenttia. Peltokasveista esimerkiksi oljen kosteuspitoisuus tulee olla alle 20 prosenttia ja ruokohelven alle 15 prosenttia. (Alakangas 2000, 40, 74 - 76, 98, 104.)

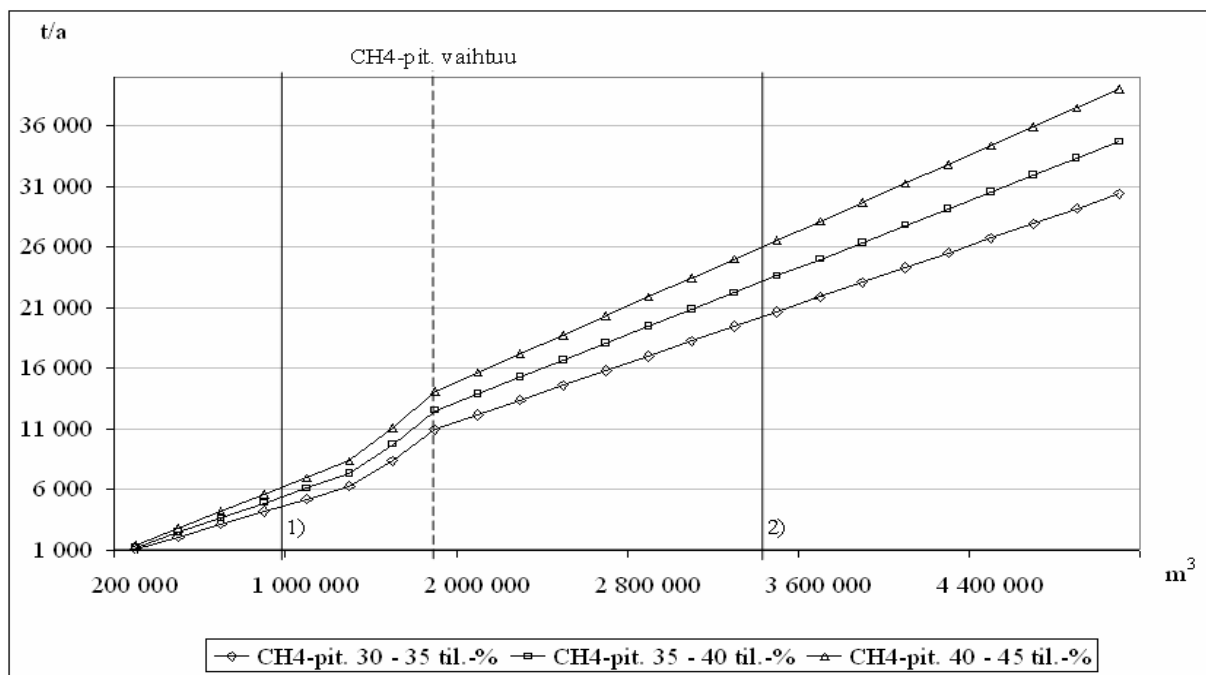
Biopolttoaineita voidaan kuivata useilla eri laitteistoilla. Kuivurit voidaan jakaa savukaasu- ja höyrykuivaimiin. Savukaasukuivaimet perustuvat kuumien savukaasujen johtamiseen kuivattavan polttoaineen sekaan. Savukaasukuivureita ovat muun muassa myllypuhallin, flash-savukaasukuivuri, rumpukuivuri sekä kiertomassakuivuri. Savukaasukuivureissa on otettava huomioon savukaasujen lämpötila, ettei kuivattava polttoaine pyrolysoitu savukaasujen kuumuudesta. Höyrykuivainten toiminta perustuu tulistetun höyryn käyttöön kuivauksessa. Höyry johdetaan suoraan kuivattavan polttoaineen sekaan. Höyry lämmittää kuivattavan polttoaineen kylläiseen lämpötilaan, jolloin polttoaineen sisältämä vesi höyrystyy tulistettuun höyryyn. Höyrykuivaimia ovat muun muassa MODO-kuivuri, NIRO-kuivuri, höyryrumpukuivuri, sekoituskuivuri sekä WTA-kuivuri. (Flyktman 2003, 30 - 33.) Kuten myös lietteen kuivauksessa, biopolttoainetta voidaan kuivata epäsuorilla kuivaimilla, joissa savukaasujen tai höyryn sisältämä lämpö siirretään lämmönsiirtopinnan läpi kuivattavaan biopolttoaineeseen.

Laskennassa käytetään biopolttoaineille yhtenevää alku- ja lopputilan kosteuspitoisuutta. Ennen kuivausta polttoaineen kosteuspitoisuudeksi on määrätty 65 prosenttia ja kuivauksen jälkeen 15 prosenttia. Flyktmanin (2003, 8) mukaan savukaasukuivureiden hyötysuhde on keskimäärin 70 prosenttia. Vastaavasti höyrykuivaimille hyötysuhde on noin 80 prosenttia. Bio-

polttoaineen kuivaamiseen tarvittava lämpömäärä perustuu veden höyrystymislämpöön, joka on 2,43 MJ/kg_{H₂O}. Kun huomioidaan kuivureiden hyötysuhteet, voidaan todeta, että yhden vesikilon haihduttamiseen tarvitaan noin 3 - 3,5 MJ lämpöä. Laskettaessa biopolttoaineen kuivauskapasiteettia, käytetään suurinta lämmönkulutusta eli 3,5 MJ/kg_{H₂O}. Lämmönkulutus halutun loppukosteuden saavuttamiseksi käsiteltävää polttoainetonnin kohden on siis 570 kWh/t.

Anjalankosken Ekoparkissa muodostuvalla kaatopaikkakaasulla voidaan kuivata biopolttoaineita, esimerkiksi pellettien raaka-aineena käytettävää sahanpurua. Kuvassa 45 on esitetty kuivauskapasiteetti kaatopaikkakaasun määrän funktiona. Kuten kuvasta voidaan havaita, jo suhteellisen alhaisella kaatopaikkakaasun määrällä päästään hyvään kuivauskapasiteettiin. Esimerkiksi 1,0 - 2,0 miljoonaa m³ kaatopaikkakaasua voidaan kuivata 6 000 - 12 000 tonnia raaka-ainetta. Keltakankaan uudelta kaatopaikalta on arvioitu saatavan enimmillään kaatopaikkakaasua 3,5 miljoonaa m³ vuodessa. Tällä määrällä voidaan kuivata biopolttoaineita noin 20 000 - 26 000 tonnia kaasun metaanipitoisuudesta riippuen. Mikäli sekä uudella että vanhalta kaatopaikalla kaasuntuotanto on maksimissaan, voidaan tällä noin 5,0 miljoonalla m³ kaasua kuivata biomassaa 30 000 - 40 000 tonnia vuodessa. Esimerkiksi Vapon pellettitehtaiden keskituotanto on hieman yli 40 000 tonnia vuodessa.

Mahdollisesta biojätteen ja lietteen mädätyslaitoksesta saatavan biokaasun vaikutus biomassan kuivauskäsittelyyn on huomattava. Biokaasun ja kaatopaikkakaasun yhteismäärä vaihtelee kaatopaikkakaasun tuotannon vaihteluista johtuen välillä 3,8 - 7,0 miljoonaa m³. Kaasulla kuivattavan raaka-aineen määrä olisi jopa 40 000 - 85 000 tonnia vuodessa. Kuivauskapasiteettia lisää biokaasun kaatopaikkakaasua korkeampi metaanipitoisuus.

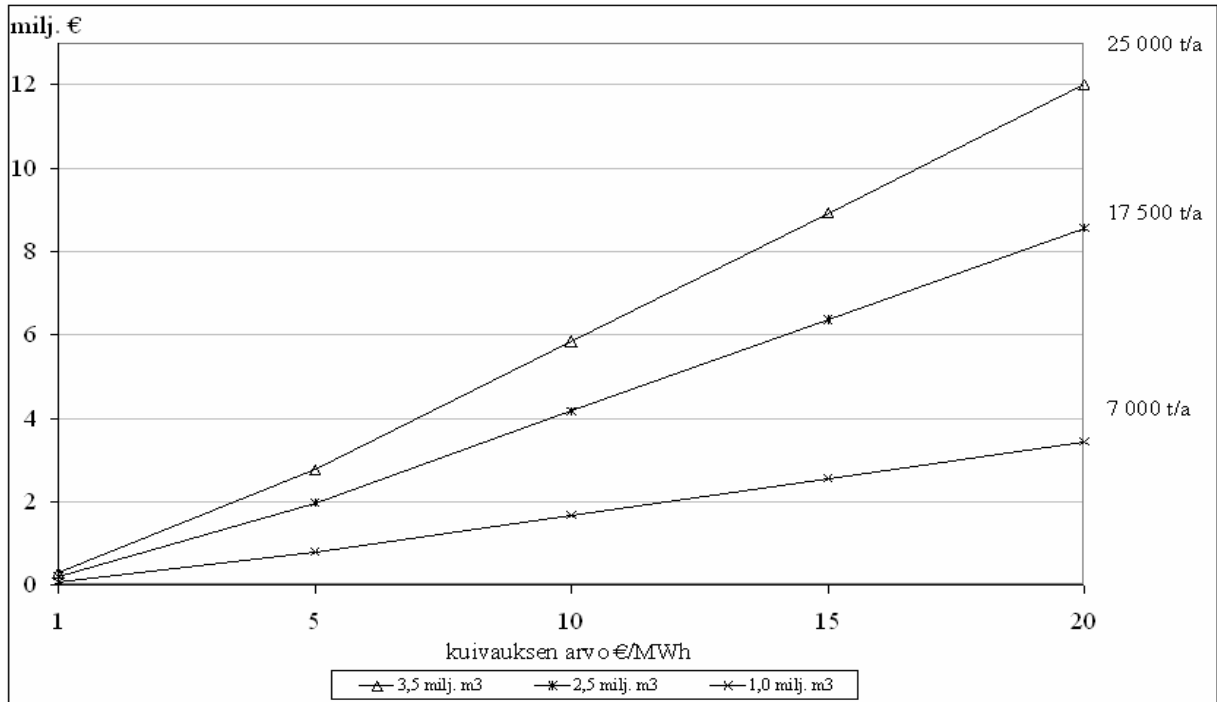


Kuva 45. Biopolttoaineen kuivauskapasiteetti. Kuvaan merkitty vanhan kaatopaikan (1) ja uuden kaatopaikan (2) kaasuntuotantomäärät.

Käytetään investointikustannustarkastelussa esimerkkinä raaka-aineen eli sahanpurun kuivaamisesta pelletinvalmistukseen soveltuvaksi. Tarkastellaan investointikustannuksen suuruutta, kun raaka-aineen alkukosteus on 65 prosenttia. Raaka-aine kuivataan 15 prosentin loppukosteuteen. Tarkasteltavat kustannustekijät muodostuvat kuivauksen arvosta saatavasta tuotosta sekä sähkönkulutuksesta, kaasun hankinnasta ja muista käytöstä aiheutuvista kuluista. Investointikustannus saadaan kuivauksen arvon funktiona. Kuivauksen arvo saadaan laskettua kostean ja kuivan raaka-aineen hintojen erotuksena. Kuivauksen arvo muuttuu kostean ja kuivatun raaka-aineen arvon muuttuessa. Kuivauksen arvoa varioidaan välillä 1 - 15 €/MWh. Kostean raaka-aineen ja kuivatun raaka-aineen hintojen kehitystä on vaikea arvioida, mutta kuivatun biopolttoaineen arvo nousee todennäköisemmin, kun kysyntä kasvaa. Lisäksi kostea raaka-aine voi olla ilmaistakin.

Laskennassa tarkastellaan kolmea eri kaatopaikkakaasun määrää: 1,0; 2,5 ja 3,5 miljoonaa m³. Raaka-aineen alkukosteudella 65 prosenttia 3,5 miljoonaa m³ vastaa kuivauskapasiteetilta 25 000 tonnia vuodessa. Tarkasteltavalla 2,5 miljoonalla m³ kaatopaikkakaasua vuodessa voi-

daan kuivata raaka-ainetta noin 17 500 tonnia vuodessa. Keltakankaan vanhan kaatopaikan kaasun tuotantomaksimia vastaava kuivauskapasiteetti on noin 7 000 tonnia vuodessa. Kuvassa 46 on esitetty pelletin kuivauksen suurin sallittu investointikustannus kuivauksen arvon funktiona. Suurimmalla sallitulla investointikustannuksella tulee voida kattaa muun muassa kuivaukseen tarvittavat syöttö- ja kuivauslaitteistot.



Kuva 46. Pelletin kuivauksen suurin sallittu investointikustannus kuivatun raaka-aineen hinnan funktiona.

Kuivatun raaka-aineen hinta on syksyllä 2007 ollut noin 12,5 euroa megawattitunnilta ja koston raaka-aineen hinta noin 9 euroa megawattitunnilta (Manninen 2007) eli kuivauksen arvo on noin 3,5 €/MWh. Tällä kuivauksen arvolla suurin sallittu investointi olisi noin 1,8 miljoonaa euroa, kun käytettävän kaatopaikkakaasun määrä on 3,5 miljoonaa m³. Mikäli kuivatun polttoaineen arvo kaksinkertaistuu nykyisestä arvosta, voidaan biopolttoaineiden kuivauslaitteistoon investoida noin 8,9 miljoonaa euroa suurimmalla tarkastellulla kaasun määrällä. Mikäli kuivauksen arvo on noin 5 €/MWh, suurimman sallitun investointikustannuksen arvo on noin 800 000 euroa, kun käytettävissä on 1,0 miljoonaa m³ kaatopaikkakaasua. Uuden kaatopaikan kaatopaikkakaasulla kuivattuna vastaava arvo investointikustannukselle olisi noin 2,8 miljoonaa euroa.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä esitetty teoria ja laskennan pohjatiedot perustuvat diplomityön valmistumisen aikana saatavilla olleisiin henkilökohtaisiin tiedonantoihin ja lähdekirjallisuuteen, jotka on mainittu työn lähdeluettelossa. Laskennan toteuttamiseksi on jouduttu tekemään oletuksia ja yksinkertaistuksia. Työssä esitetyt tulokset voivat poiketa todellisesta tilanteesta tehtyjen oletusten ja yksinkertaistuksien takia, joten työn tulokset ovat suuntaa-antavia. Kaatopaikkakaasua ei kannata hyödyntää ilmaston muutoksen torjumiseksi, vaan sen hyödynnettävyys perustuu sen sisältämään energiaan. Energiantuotannon kannalta kaatopaikkakaasu on paikallinen ja uusiutuva energianlähde, jolla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita. Kaasua muodostuu jatkuvasti, joten se on suhteellisen luotettava polttoaine erilaisiin energiantuotantosovelluksiin.

Työssä tarkasteltuja hyötykäyttövaihtoehtoja ei voida verrata toisiinsa suoraan niiden kapasiteettien tai investointikustannusten perusteella. Jokaisessa tarkastellussa vaihtoehdossa on omat etunsa ja haasteensa, eikä niiden joukosta voida suoraan todeta yhtä muita selkeästi parempaa hyötykäyttötapaa. Työssä saatujen tulosten perusteella tarkastellut kaatopaikkakaasun hyötykäyttövaihtoehdot ovat kaikki hyödynnettävissä Anjalankosken Ekoparkissa tietyin edellytyksin. Ainoastaan kaatopaikkakaasun haiduttaminen on selvästi tulosten perusteella kannattamaton kaatopaikkakaasun riittävyden suhteen. Myös tuhkan vitrifioinnissa kaatopaikkakaasun riittävyys tarvittavan energian tuottamiseksi on haaste.

Perinteiset sähkön- ja lämmöntuotantotekniikat ovat luotettavia ja tunnettuja vaihtoehtoja hyödyntää kaatopaikoilla muodostuvaa kaatopaikkakaasua. Tulosten perusteella ne kattaisivat Ekoparkin alueen sähkön- ja lämmöntarpeen. Ne eivät kuitenkaan tarjoa merkittävää liiketoiminnallista hyötyä Ekoparkin alueen yrityksille, vaan niiden hyödyt liittyvät ympäristöllisten hyötyjen lisäksi taloudellisiin hyötyihin. Lietteen ja biopolttoaineen kuivaus sekä jossakin määrin tuhkan terminen käsittely tarjoavat uudenlaista liiketoimintamahdollisuutta alueen nykyiseen liiketoimintakonseptiin. Lisäksi kaukolämmöntuotannon ja esimerkiksi asfalttiaseman lämmöntuotannon tai pilaantuneiden maiden termisen käsittelyn yhdistäminen tarjoaisivat toimivan kokonaisuuden kaatopaikkakaasun hyödyntämiseksi polttoaineen tarpeen vuodena-

kaisen vaihtelun huomioiden.

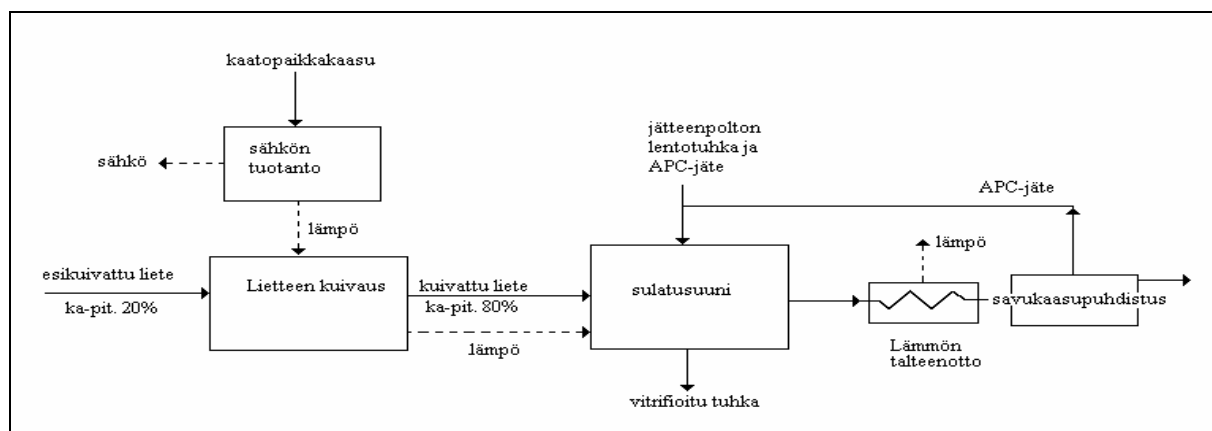
Huomattava yhtäläisyys tarkasteltujen hyötykäyttövaihtoehtojen käyttöönoton haasteissa on kaatopaikkakaasun määrän ja laadun vaihteluista aiheutuvat ongelmat. Todellisuudessa kaatopaikkakaasun muodostuminen on usein alhaisempaa kuin mitä kaatopaikoille laadittujen selvitysten mukaan on voitu olettaa. Tämä johtunee kaasun määrän arviointiin käytettävien menetelmien puutteista huomioida vallitsevien olosuhteiden, jätemäärän ja koostumuksen muutosten aiheuttama vaikutus kaatopaikkakaasun muodostumiseen. Riski kaasun laadun vaihteluista tulee huomioida investointeja suunniteltaessa toimintahäiriöiden välttämiseksi. Laadun ja määrän vaihteluiden takia herkimmissä hyötykäyttövaihtoehdoissa on kaatopaikkakaasun rinnalla perusteltua käyttää tukipolttoainetta toimintahäiriöiden välttämiseksi.

Työssä määritettiin kullekin kaatopaikkakaasun hyötykäyttövaihtoehdolle suurin sallittu investointikustannus, joka kuvaa laitteistoihin sijoitettavissa olevan taloudellisesti kannattavan investoinnin suuruutta tarkastelluilla kustannustekijöillä. Tulosten perusteella näyttää siltä, että lämmöntuotanto vaihtoehdoissa sekä kiinteistökohtaisesti että kaukolämpökeskuksessa, ja lisäksi yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa, on mahdollista olemassa olevia teknisiä ratkaisuja käyttäen kattaa tarvittavat hankinnat suurimmalla sallitulla investointikustannuksella. Sähköntuotannon ja kaatopaikkavesien haihdutuksen osalta voidaan todeta, että tietyin edellytyksin investointien kattaminen työn tuloksena saaduilla suurimmilla sallituilla investointikustannuksilla voi olla haasteellista. Lisäksi lietteen ja biopolttoaineen termisen kuivauksen noin 2,0 miljoonan euron suurin sallittu investointikustannus mahdollistaa laitehankintojen tekemisen. Tuhkan vitrifointi on investointikustannuksiltaan haasteellinen, ja tarkastelluilla kustannustekijöillä ei taloudellisesti kannattavan investoinnin tekeminen ole mahdollista.

Koska tämän diplomityö puitteissa ei vaihtoehtojen tarkastelussa päästä riittävän syvälle, on eräistä tarkastelluista hyötykäyttövaihtoehdoista tarpeen tehdä tarkempaa tutkimusta. Tässä diplomityössä kaatopaikkakaasun hyötykäyttövaihtoehtoja on tarkasteltu yksittäisinä ja toisistaan erillisinä vaihtoehtoina. Ainoastaan kaukolämmön tuotannon tarkasteluun on yhdistetty kesäaikaisella kaasun hyötykäytölle soveltuvat vaihtoehdot. Eri käsittelyvaihtoehtoja yhdistämällä voidaan päästä teknisesti ja taloudellisesti kannattavaan laitoskokonaisuuteen, jolla voi

olla erityistä liiketoiminnallista hyötyä Ekoparkin alueen yrityksille.

Työssä tarkastellut kaatopaikkakaasun hyötykäyttövaihtoehdot tarjoavat runsaasti jatkotutkimusaiheita. Professori Mika Horttanaisen esittämä lietteen kuivauksen ja termisen käsittelyn yhdistäminen tuhkan termiseen käsittelyyn on yksi niistä (ks. luku 4.1). Kuvassa 47 on esitetty integraatio, jossa kaatopaikkakaasulla tuotetun sähköntuotannon hukkalämpö käytetään lietteen kuivaamiseen. Kuivattu liete ja jätteenpolton lentotuhka sekä APC-jäte käsitellään samassa sulatusuunissa, jossa lietteen orgaaninen aines palaa ja tuhkat vitrifioituvat korkeassa lämpötilassa. Koska vitrifioinnissa muodostuvat savukaasut ovat usein yli 900 asteiset, voidaan sulatuksen hukkalämmöllä tuottaa esimerkiksi kaukolämpöä. Edellä mainittu vitrifioinnin yhdistäminen muuhun toimintaa voi tuoda merkittäviä etuja tekniikan hyödynnettävyyden kannalta.



Kuva 47. Lietteän kuivauksen yhdistäminen jätteenpolton lentotuhkan ja APC-jätteen termiseen käsittelyyn, kun kaatopaikkakaasulla tuotetaan sähköä.

Toinen jatkotutkimuskohde on lietteen termisen kuivaus. Perinteisesti liete on käsitelty biologisesti kompostoimalla tai mädättämällä. Lietteän termisessä kuivaamisessa saavutettava lopputuotteen suuri kuiva-ainepitoisuus mahdollistaa lietteän monipuolisemman käytön verrattuna biologisilla käsittelymenetelmillä saatavaan lopputuotteeseen. Lisäksi haitallisia yhdisteitä sisältävien nestemäisten lietteiden ja jätevesien käsittelyä kaatopaikkakaasulla tulisi tarkastella. Termisten menetelmien hukkalämpöä voidaan puolestaan hyödyntää biopoltoaineiden kuivauksessa.

6 YHTEENVETO

Tämä diplomityö toteutettiin jätehuoltotekniikan professuuri - Alueellisen tutkimus- ja koulustoiminnan kehittämishankkeeseen liittyen. Hankkeen rahoittajina toimivat Kymenlaakson liitto, Etelä-Karjalan liitto, Anjalankosken kaupunki, Anjalankosken Ekopark sekä kaakkois-suomalainen teollisuus. Diplomityön tavoitteena oli tarkastella Anjalankosken Ekoparkin alueella sijaitsevien Keltakankaan uudella ja vanhalla kaatopaikalla muodostuvan kaatopaikkakaasun hyödyntämisvaihtoehtoja, joilla on ympäristöllisten hyötyjen lisäksi myös liiketoiminnallista hyötyä Ekoparkissa toimiville yrityksille.

Diplomityössä tarkasteltiin kahdeksaa eri hyötykäyttövaihtoehtoa kaatopaikkakaasun hyödyntämiseksi. Tarkasteltaviksi vaihtoehtoiksi valittiin perinteisten sähkön- ja lämmöntuotannon lisäksi kaukolämmön tuotanto, jätevesilietteen ja biopolttoaineen terminen kuivaus sekä tuhkan terminen käsittely vitrifioimalla. Kaukolämmön tuotannon ohella tarkastelussa otettiin huomioon kaatopaikkakaasun kesäaikainen käyttö asfalttiasemalla tai vaihtoehtoisesti pilaantuneiden maiden termisessä käsittelyssä. Perinteiset energiantuotantovaihtoehdot tarjoavat Ekoparkille mahdollisuuden omavaraiseen energiantuotantoon. Muista tarkastelluista hyötykäyttövaihtoehtoista voi olla liiketoiminnallista hyötyä Ekoparkissa toimiville yrityksille. Hyötykäyttövaihtoehtojen edut ja haasteet sekä suurimmat sallitut investointikustannukset on esitetty taulukossa 7 yhteenvetona.

Kaatopaikkakaasun hyötykäyttömahdollisuuksia tarkasteltiin kaatopaikkakaasun riittävyyden kannalta laskennallisesti. Kaatopaikkakaasun riittävyyden lisäksi tarkasteltiin hyötykäyttövaihtoehtojen kustannuksia suurimman sallitun investointikustannuksen näkökulmasta. Työssä saadut tulokset osoittivat lämmöntuotannon olevan yksinkertainen vaihtoehto kaasun hyödyntämiseen usein pienillä muutoksilla kaatopaikan läheisten kiinteistöjen lämmitysjärjestelmissä. Alueella muodostuu kaatopaikkakaasua riittävästi kiinteistöjen lämmitystarpeen kattamiseksi. Vanhan kaatopaikan tuottamalla kaatopaikkakaasulla voidaan tuottaa lämpöä noin 2 400 MWh ja uuden kaatopaikan kaasulla noin 14 400 MWh vuodessa. Lisäksi kaasua voidaan lämmityksen rinnalla hyödyntää muihin käyttökohteisiin. Suurimman sallitun investointikustannustar-

kastelun perusteella tarvittaviin laitteistoihin ja olemassa olevien laitteistojen muutostöihin on mahdollista tehdä tarvittavat investoinnit.

Kaatopaikkakaasua voidaan käyttää myös suuremman kokoluokan lämmöntuotannossa. Anjalankosken tapauksessa kaatopaikkakaasulla voidaan korvata alueellisessa kaukolämpökeskuksessa maakaasua. Kaatopaikkakaasulla voidaan tuottaa kaukolämpöä, joka kattaisi noin kolmanneksen Anjalankosken nykyisestä kaukolämmön myynnistä. Koska kesäaikana kaukolämmön tuotannon tarve on vähäistä, mutta kaatopaikkakaasun tuotanto aktiivista, voidaan kaasua kesäaikoina hyödyntää läheisen asfalttiaseman lämmöntuotantoon tai pilaantuneen maan termisen käsittelylaitteiston polttoaineena. Vanhalla kaatopaikalla muodostuvalla kaasulla voidaan kattaa NCC Roads Oy:n vuotuinen asfalttiaseman lämmöntarve. Vastaavasti kesäaikana muodostuvalla kaatopaikkakaasulla voidaan käsitellä pilaantuneita maa-aineksia määrä, joka vastaa Suomessa käytössä olevien termodesorptiolaitteistojen keskimääräistä käsittelykapasiteettia.

Lämmöntuotannon lisäksi perinteisiä kaatopaikkakaasun hyödyntämistekniikoita ovat sähköntuotanto sekä yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto. Molemmat mahdollistavat energiaomavaraisuuden sekä uuden kaatopaikan kaasuntuotantoa vastaavalla kaasun määrällä ylimääräisen sähkön ja lämmön myynnin. Koska sähkön- ja lämmöntuotanto ovat eniten kaatopaikkakaasun hyödyntämiseen käytettäviä vaihtoehtoja, on tuotantolaitteistojen kehitys pitkällä ja niiden toimivuudesta ja luotettavuudesta on saatavissa runsaasti tutkimustietoa. Kuten kaukolämmön ja kiinteistökohtaisen lämmön tuotannossakin, sähkön- ja yhdistetyn tuotannon suurin haaste on kaatopaikkakaasun mahdolliset laadunvaihtelut. Mikroturbiinilla sähköä voidaan tuottaa vanhan kaatopaikan kaasua vastaavalla määrällä noin 860 MWh vuodessa ja uudella kaatopaikalla muodostuvalla kaasulla noin 3 500 MWh. Kun sähköntuotantoon yhdistetään lämmön talteenotto, tuotetun sähkön lisäksi voidaan lämpöä saada noin 1 730 MWh ja 6 700 MWh edellä mainituilla kaatopaikkakaasun määrillä.

Kaatopaikkakaasua soveltuu myös polttoaineeksi erilaisiin laitteistoihin, joissa kulutetaan lämpöenergiaa. Esimerkiksi kaatopaikkavesien haihduttaminen kaatopaikkakaasulla on mahdollista. Työssä saatujen tulosten mukaan Ekoparkin alueella sijaitsevilla kaatopaikoilla ei muodos-

tu riittävästi kaasua kaikkien alueella muodostuvien kaatopaikkavesien käsittelyyn. Myöskään taloudellisen tarkastelun perusteella kaatopaikkavesien haihduttaminen ei ole hyödynnettävissä. Muita sovelluksia, joissa kaatopaikkakaasua voidaan käyttää polttoaineena, ovat työssä tarkastellut tuhkan terminen käsittely sekä lietteen ja biopolttoaineen terminen kuivaus.

Jätevesilietteen ja biopolttoaineen terminen kuivaus perustuvat pääasiassa samanlaiseen kuivaustekniikkaan. Lietteen kuivaamisella saavutetaan hygienisoitunut lopputuote, joka suuren kuiva-ainepitoisuutensa ansiosta soveltuu erityisen hyvin polttoaineeksi tai hyötykäytettäväksi materiaalina. Anjalankosken Ekoparkin alueella sijaitsevien kaatopaikkojen kaatopaikkakaasua riittää hyvin Kymenlaaksossa muodostuvan yhdyskuntalietteen kuivaamiseen. Vanhalla kaatopaikalla muodostuvalla kaatopaikkakaasulla voidaan kuivata noin 4 000 tonnia yhdyskuntaliettä ja uuden kaatopaikan kaasulla noin 18 000 tonnia. Kaatopaikkakaasulla voidaan kuivata myös kostea biopolttoainetta noin 27 000 tonnia. Vanhan kaatopaikan kaatopaikkakaasun määrällä biopolttoaineen kuivauskapasiteetti on noin 6 000 tonnia. Suomessa puupelletin tuotanto ja kysyntä kasvaa vuosi vuodelta. Kuivan raaka-aineen tarjonta on rajallista, jolloin koston polttoaineen edulliselle kuivaamiselle on tarvetta.

Tuhkan vitrifioinnin suurin haaste on sen energiaintensiivisyys sekä laitteiston suuri investointikustannus. Laskennassa saatu suurin sallittu investointikustannus vitrifiointilaitteistolle, noin 6,0 miljoonaa euroa, ei ole mahdollinen, sillä laitteistojen todelliset investointikustannukset ovat yli 20 miljoonaa euroa. Huolimatta kustannuksen asettamasta haasteesta, vitrifiointi tarjoaa useita etuja verrattuna muihin tuhkan käsittelymenetelmiin. Vitrifioinnilla saadaan ongelmajätteenä pidetystä jätteenpolton lentotuhkasta ja APC-jätteestä hyötykäytettävä lopputuote, jonka liukoisuus- ja kestävyysominaisuudet ovat hyvät. Vitrifioidusta tuhkasta voidaan valmistaa pitkälle jalostettuja lopputuotteita. Lisäksi vitrifiointilaitteistot tarjoavat mahdollisuuden käsitellä yhdyskuntien jätevesilietteitä sekä ongelmajätteitä termisesti. Keltakankaan kaatopaikoilla muodostuvalla kaatopaikkakaasulla voidaan käsitellä jätteen polton tuhkaa noin 5 000 tonnia, kun ominaisenergiankulutus on 2 470 kWh/t_{tuhka} ja noin 4 000 tonnia, kun ominaisenergiankulutus on 3 470 kWh/t_{tuhka}. Alueella muodostuva kaatopaikkakaasua ei tulosten perusteella riitä esimerkiksi Kotkan rakenteilla olevan hyötyvoimalaitoksen lentotuhkan ja APC-jätteen termiseen käsittelyyn.

Taulukko 7. Kaatopaikkakaasun hyötykäyttövaihtoehtojen vertailu.

VAIHTOEHTO	EDUT	HAASTEET	SUURIN SALLITTU INVESTOINTIKUSTANNUS Kaasua 1,0 milj. m ³	Kaasua 3,5 milj. m ³
Lämmön tuotanto kiinteistöillä	<ul style="list-style-type: none"> - korvataan öljyllä tuotettua lämpöä - vähäinen muutosarve nykyisiin laitteistoihin - lämmöntuotannon omavaraisuus - polttoaineen riittävyys - mahdollisuus käyttää kaasua lämmöntuotannon lisäksi toiseen käyttökohteeseen 	<ul style="list-style-type: none"> - kaatopaikkakaasua ylimäärin verrattuna tarpeeseen - kaatopaikkakaasun laadun vaihtelut, erityisesti metaanipitoisuuden muutokset - lämmöntarpeen vaihtelut vuodenaikojen ja säätölojen suhteen 	<ul style="list-style-type: none"> - 200 000 €, kun lämmönkulutus 600 MWh - 530 000 €, kun lämmönkulutus 2 200 MWh 	<ul style="list-style-type: none"> - 300 000 €, kun lämmönkulutus 600 MWh - 800 000 €, kun lämmönkulutus 2 200 MWh
Kaukolämmön tuotanto	<ul style="list-style-type: none"> - korvataan maakaasulla tuotettua kaukolämpöä - maakaasua voidaan käyttää vara-polttoaineena - kaatopaikkakaasun riittävyys - kesäisin kaasu käytettävissä esim. asfaltiasemalla tai pilaantuneiden maiden käsittelyyn 	<ul style="list-style-type: none"> - kaatopaikkakaasun laadun vaihtelut, erityisesti metaanipitoisuuden muutokset - suhteellisen pitkä matka kaatopaikalta läheisempään kaukolämpökeskukseen - kaukolämpöverkkojen yhdistämistarve - lämmöntarpeen vaihtelut vuodenaikojen ja säätölojen suhteen 	<ul style="list-style-type: none"> - 800 000 € - kaukolämpö ja asfaltiasema: 720 000 € 	<ul style="list-style-type: none"> - 2,7 milj. € - kaukolämpö ja termodesorptio: 6,0 milj. €, kun vastanottohinta 100 €/t ja kapasiteetti 10 000 t/a
Kaatopaikkavesien haidutus	<ul style="list-style-type: none"> - viemäriverkostoon johdettavan kaatopaikkaveden pienempi tilavuus - konsentraatilla voidaan kiihdyttää metanin tuotantoa ja jätteen stabi-loitumista jäteäytössä - haidutuksella poistetaan veden sisältämiä haitta-ainetta 	<ul style="list-style-type: none"> - laskennallisesti investointi ei ole kannattava - suuri energiantarve - kokemus laitteistoista Suomessa vähäistä, haittureissa havaittu ongelmia - kaatopaikkakaasun laadun vaihtelut, erityisesti metaanipitoisuuden muutokset 	<ul style="list-style-type: none"> - 50 000 €, kun jätevesimaksu 2 €/m³ 	<ul style="list-style-type: none"> - 180 000 €, kun jätevesimaksu 2 €/m³
Sähköntuotanto	<ul style="list-style-type: none"> - korvataan ostettavaa sähköä - sähkön tuotannon omavaraisuus - polttoaineen riittävyys - mahdollisuus sähkön myyntiin - yksinkertainen ja luotettava laiteisto 	<ul style="list-style-type: none"> - kaatopaikkakaasun laadun vaihtelut, erityisesti metaanipitoisuuden muutokset - osaava käyttö- ja huoltohenkilöstö - kaatopaikkakaasun määrän vaihtelut - sähkölämmityksen vuoden aikaiset vaihtelut 	<ul style="list-style-type: none"> - sähkö myydyään 100 000 - 160 000 € - omaan kulutukseen 560 000 - 650 000 € 	<ul style="list-style-type: none"> - sähkö myydyään 320 000 - 450 000 € - omaan kulutukseen 700 000 - 830 000 €

VAIHTOEHTO	EDUT	HAASTEET	SUURIN SALLITTU INVESTOINTIKUSTANNUS Kaasua 1,0 milj. m ³ Kaasua 3,5 milj. m ³
Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto	<ul style="list-style-type: none"> - polttoaineen riittävyys - ostetun sähkön ja öljyllä tuotetun lämmön korvaaminen - ylijäämäenergian myyntimahdollisuus - yksinkertainen ja luotettava laitteisto 	<ul style="list-style-type: none"> - kaatopaikkakaasun riittävyys ja laadun vaihtelut ongelmana - lämmöntarpeen vuodenaikaiset vaihtelut - sähköntarpeen vuodenaikaiset vaihtelut sähkölämmitteisissä kiinteistöissä - osaaava käyttö- ja huoltohenkilöstö 	<ul style="list-style-type: none"> - 350 000 €, kun energia myydään - 1,7 – 1,9 milj. €, kun oman kulutuksen jälkeen loput energiasta myydään - 1,3 milj. €, kun energia myydään - 2,0 - 2,3 milj. €, kun oman kulutuksen jälkeen loput energiasta myydään
Jätevesilietteen terminen kuivaus	<ul style="list-style-type: none"> - lietteen tilavuus pienenee - kuivattu liete soveltuu energiantuotannon polttoaineeksi - liete hygienisoitunutta - kaatopaikkakaasun riittävyys - kuivattu liete voidaan käsitellä myös yhdessä jätteenpolton tuhkan kanssa 	<ul style="list-style-type: none"> - kaatopaikkakaasun riittävyys ja laadun vaihtelut ongelmana - kuivatun lietteen hyötykäyttötarve 	<ul style="list-style-type: none"> - 2,0 milj. € - 5,7 milj. €
Tuhkan terminen käsitteleminen	<ul style="list-style-type: none"> - jätteenpolton lentotuhkasta ja APC-jätteestä hyötykäytettävä lopputuote - tuhkan tilavuus pienenee - tuhkan sisältämien raskasmetallien liukoisuus pienenee - tuhkan sisältämät orgaaniset yhdisteet hajoavat - voidaan käsitellä muita jätteitä samassa laitteistossa - mahdollisuus savukaasujen hyötykäyttöön 	<ul style="list-style-type: none"> - energiantensiivinen - kaatopaikkakaasun riittävyys ja laadun vaihtelut ongelmana - vaatii varapolttoaineen käytön - suuri investointikustannus - muodostuvat savukaasut käsiteltävä ennen ympäristöön johtamista 	<ul style="list-style-type: none"> - ei laskettu - 6,0 milj. €, kun tuhkan vastaanotto-maksu on noin 200 €/t
Biopolttoaineiden kuivaus	<ul style="list-style-type: none"> - kostean raaka-aineen arvoa voidaan nostaa edullisesti käyttämällä kaatopaikkakaasua - biopolttoaineen kysynnän kasvu 	<ul style="list-style-type: none"> - kaatopaikkakaasun riittävyys ja laadun vaihtelut ongelmana 	<ul style="list-style-type: none"> - 840 000 € - 2,0 milj. €

LÄHTEET

Säädökset

1999/31/EY. Neuvoston direktiivi 26.4.1999 kaatopaikoista. EYVL N:o L 182/1.

Etelä-Savon ympäristökeskus. 2004. Päätös ympäristönsuojelulain 35 §:n mukaisesta ympäristölupahakemuksesta. Luvan hakija: Savaterra Oy. Dnro ESA-2003-Y-26-121. Annettu julkipanon jälkeen 14.1.2004.

Kaakkois-Suomen Ympäristökeskus. 2004. Päätös ympäristönsuojelulain 35 §:n mukaisesta ympäristölupahakemuksesta. Luvan hakija: Kotkan Energia Oy. Dnro KAS-2003-Y-706-111. Annettu julkipanon jälkeen 15.10.2004.

VNp 4.9.1997/861. Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista.

YMp 867/96. Ympäristöministeriön päätös yleisimpien jätteiden sekä ongelmajätteiden luettelosta.

Kirjallisuuslähteet

Abe, S., Kambayashi, F. & Okada, M. 1996. Ash melting treatment by rotating type surface melting furnace. Waste Management, 1996: vol 16, nro 5 - 6. S. 431 - 443. ISSN 0956-053X.

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), VTT Energia. 172 s. VTT Tiedotteita 2045. ISBN 951-38-5699-2.

Birkeland, K. H. 2003. Collection and utilisation of landfill gas in the Nordic countries. Copenhagen: Nordic Council of Ministers / Environment. 44 s. TemaNord 2003:561. ISBN 92-893-0970-9.

Bove, R. & Lunghi, P. 2006. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. *Energy Conversion and Management*, 2006: vol 47, nro 11 - 12. S. 1391 - 1401. ISSN 0196-8904.

Brereton, C. 1996. Municipal solid waste - incineration, air pollution control and ash management. *Resources, Conservation and Recycling*, 1996: vol 16, nro 1 - 4. S. 227 - 264. ISSN 0921-3449.

Christensen, T. H., Kjeldsen, P. & Lindhart, B. 1996. Gas-generating processes on landfills. Teoksessa: Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. (toim.) *Landfilling of Waste: Biogas*. USA, New York: Taylor & Francis 2005. S. 27 - 50. ISBN 0-419-19400-2.

Ecke, H., Sakanakura, H., Matsuto, T., Tanaka, N. & Lagerkvist, A. 2000. State-of-the-art treatment processes for municipal solid waste incineration residues in Japan. *Waste Management & Research*, 2000: vol 18, nro 1. S. 41 - 51. ISSN 0734-242X.

Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe, K. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Japan: The Institute for Global Environmental Strategies (IGES). ISBN 4-88788-032-4.

Ettala, M. & Rossi, E. 1994. Kaatopaikkavesien käsittely uudella haihdutustekniikalla. *Vesitalous*, 1994: nro 6. S. 14 - 18. ISSN 0505-3838.

Ferreira, C., Ribeiro, A. & Ottosen, L. 2003. Possible applications for municipal solid waste fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 2003: vol 96, nro 2 - 3. S. 201 - 216. ISSN 0304-3894.

Gendebien, A., Pauwels, M., Constant, M., Ledrut-Damanet, M.-J., Nyns, E.-J., Willumsen, H.-C., Butson, J., Fabry, R. & Ferrero, G.-L. 1992. Landfill gas – from environment to energy. Final Report. Luxembourg: Commission of the European Communities. 865 s. EUR 14017/1. ISBN 92-826-3672-0.

Haubrichs, R. & Widmann, R. 2005. Evaluation of aerated biofilter systems for microbial methane oxidation of poor landfill gas. *Waste Management*, 2006: vol 26, nro 4. S. 408 - 416. ISSN 0956-053X.

Holmberg, T. & Lilja, R. 1999. Lietteen termisen kuivauksen ja pelletoinnin kannattavuus. *Vesitalous*, 1999; nro 3. S. 34 - 36. ISSN 0505-3838.

Ito, T. 1996. Vitrification of fly ash by swirling-flow furnace. *Waste Management*, 1996: vol 16, nro 5 - 6. S. 453 - 460. ISSN 0956-053X.

Kettunen, R. 2006. Kaatopaikan jätetäytön prosessit ja veden merkitys. *Vesitalous*, 2006: XLVII, nro 6. S. 6 - 10. ISSN 0505-3838.

Kjeldsen, P. 1996. Landfill gas migration in soil. Teoksessa: Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. (toim.) *Landfilling of Waste: Biogas*. USA, New York: Taylor & Francis 2005. S. 87-132. ISBN 0-419-19400-2.

Knaebel, K. S. & Reinhold, H. E. 2002. Landfill gas: From rubbish to resource. *Adsorption*, 2003: vol. 9, nro 1. S. 87 - 94. ISSN 0929-5607.

Koivunen, Kirsi. 2007. Jätteenpolton tuhkien käsittelytekniikoiden ympäristövaikutukset. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Lappeenranta. 109 s.

Kuittinen, V., Huttunen, M. J. & Leinonen, S. 2006. Suomen biokaasulaitosrekisteri IX. Tiedot vuodelta 2005. Joensuu: Joensuun yliopisto, Karjalan tutkimuslaitos. 74 s. Karjalan tutkimuslaitoksen raportteja N:o 3/2006. ISBN 952-458-832-3.

Lagerkvist, A. (edit.). 2000. International perspective on energy recovery from landfill gas. United Kingdom: IEA CADDET Centre for Renewable Energy. 100 s. ISBN 9-00683-05-9.

Laine-Ylijoki, J., Mroueh, U.-M., Vahanne, P., Wahlström, M., Vestola, E., Salonen, S. & Havukainen, J. 2005. Yhdyskuntajätteiden termisen käsittelyn kuonista ja tuhkista hyötykäytettäviä ja loppusijoitettavia tuotteita. Kansainvälinen selvitys. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), VTT Prosessit. 83 s. VTT Tiedotteita 2291. ISBN 951-38-6546-0.

Lappalainen, S. & Kouvo, P. 2004. Evaluation of greenhouse gas emissions from landfills in the St. Petersburg area – utilization of methane in energy production, METGAS. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Northern Dimension Research Centre. 49 s. Publication 10. ISBN 951-764-992-4.

Li, C.-T., Huang, Y.-J., Huang, K.-L. & Lee, W.-J. 2003. Characterization of slags and ingots from the vitrification of municipal solid waste incineration ashes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003: vol 42, nro 11. S. 2306-2313. ISSN 0888-5885.

Lohiniva, E., Mäkinen, T. & Sipilä, K. 2001. Lietteiden käsittely – Uudet ja käytössä olevat tekniikat. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), VTT Energia. 146 s. VTT Tiedotteita 2081. ISBN 951-38-5795-6.

Metcalf & Eddy Inc. 2003. *Wastewater engineering, treatment and reuse*. 4th edition revised by Tchobanoglous, G., Burton, F. L. & Stensel, H. D. Boston: McGraw-Hill. 1819 s. ISBN 0-07-041878-0.

Nishigaki, M. 1996. Reflecting surface-melt furnace and utilization of the slag. *Waste Management*, 1996: vol 16, nro 5 - 6. S. 445 - 452. ISSN 0956-053X.

Ohlström, M. & Savolainen, I. 2005. Teknologiaa kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen – Taustatyö kansallisen ilmastostrategian päivitystä varten. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö. 182 s. KTM Julkaisuja 1/2005. ISBN 951-739-850-6.

Ørneberg, H., Birch, H., Reimann, D. O., Bader, C., Astrup, T., Crillesen, K., Marklund, S. & Bánhiby, J. 2003. Management of APC residues from WTE plants: An overview of important management options. Copenhagen: ISAWA General Secretariat. 47 s. Report 2003 DTU.

Park, Y. J. & Heo, J. 2002. Vitrification of fly ash from municipal solid waste incinerator. *Journal of Hazardous Materials*, 2002: vol 91, nro 1 - 3. S. 83 - 93. ISSN 0304-3894.

Pipatti, R., Hänninen, K., Vesterinen, R., Wihersaari, M. & Savolainen, I. 1996. Jätteiden käsittelyvaihtoehtojen vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), VTT Energia. 85 s. VTT Julkaisuja 811. ISBN 951-38-4520-6.

Pipatti, R. 1997. Suomen metaani- ja dityppioksidipäästöjen rajoittamisen mahdollisuudet ja kustannustehokkuus. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), VTT Energia. 62 s. VTT Tiedotteita 1835. ISBN 951-38-5116-8.

Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. Helsinki: International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. 750 s. ISBN 951-666-604-3.

Ranta, J. & Wahlström, M. 2002. Tuhkien laatu REF-poltossa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), VTT Prosessit. 53 s. VTT Tiedotteita 2138. ISBN 951-38-5885-5.

Rettenberger, G. & Stegmann, R. 1996. Landfill gas components. Teoksessa: Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. (toim.) *Landfilling of Waste: Biogas*. USA, New York: Taylor & Francis 2005. S. 49 - 58. ISBN 0-419-19400-2.

Sabbas, T., Poletini, A., Pomi, R., Astrup, T., Hjelmat, O., Mostbauer, P., Cappai, G., Magel, G., Salhofer, S., Speiser, C., Heuss-Assbichler, S., Klein, R. & Lechner, P. 2001. Management of municipal solid waste incineration residues. *Waste Management*, 2003: vol 23, nro 1. S. 62 - 88. ISSN 0956-053X.

Sakai, S. & Masakatsu, H. 2000. Municipal solid waste incinerator residue recycling by thermal processes. *Waste Management*, 2000: vol 20, nro 2 - 3. S. 249 - 258. ISSN 0956-053X.

Sarkkila, J., Mroueh, U.-M. & Leino-Forsman, H. 2004. Pilaantuneen maan kunnostus ja laadunvarmistus. Helsinki: Suomen Ympäristökeskus. S. 118. Ympäristöopas 110. ISBN 952-11-1600-5.

Sipilä, K., Lohiniva, E., Mäkinen, T., Tuhkanen, S., Turkulainen, T. & Petäjä, J. 2003. Jätehuollon kasvihuonekaasujen päästöjen hallinta edullista. Teoksessa: Savolainen, I., Ohlström, M. & Kärkkäinen, A. Ilmasto – haaste teknologialle. Näkemyksiä ja tuloksia Climtech-ohjelmasta. Helsinki: Teknologian kehittämiskeskus Tekes. S. 147 - 157. ISBN 951-37-3883-3.

Stasta, P., Boran, J., Bebar, L., Stehlik, P. & Oral, J. 2006. Thermal processing of sewage sludge. *Applied Thermal Engineering*, 2006: vol 26, nro 13. S. 1420 - 1426. ISSN 1359-4311.

Stegmann, R. 1996. Landfill gas utilization: An overview. Teoksessa: Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. (toim.) Landfilling of Waste: Biogas. USA, New York: Taylor & Francis 2005. S. 9 - 17. ISBN 0-419-19400-2.

Steiner, A. C. 2006. Foam glass production from vitrified municipal waste fly ashes. Väitöskirja. Technische Universiteit Eindhoven. The Netherlands. 28.8.2006. 222 s.

Suomen ympäristökeskus. 2001. Kaatopaikkojen lopettamisopas. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 109 s. Ympäristöopas 89. ISBN 952-11-1021-X.

Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S. 1993. Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues. USA, New York: McGraw-Hill International Editions Inc. 978 s. ISBN 0-07-112865-4.

Themelis, N. J. & Ulloa, P. A. 2006. Methane generation in landfills. *Renewable Energy*, 2007: vol 32, nro 7. S. 1243 - 1257. ISSN 0960-1481.

Tuhkanen, S. 2002. Jätehuollon merkitys Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä – Kaatopaikkojen metaanipäästöt ja niiden talteenotto. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), VTT Prosessit. 46 s. VTT Tiedotteita 2142. ISBN 951-38-5895-2.

Werther, J. & Ogada, T. 1999. Sewage sludge combustion. *Progress on Energy and Combustion Science*, 1999: vol 25, nro 1. S. 55 - 116. ISSN 0360-1285.

Xiao, Y., Oorsprong, M., Yang, Y. & Voncken, J. H. L. 2007. Vitrification of bottom ash from a municipal solid waste incinerator. *Waste Management*, 2007: vol 27. 7 s. ISSN 0956-053X.

Julkaisemattomat lähteet

Electrowatt-Ekono Oy. 2001. Kymenlaakson Jäte Oy, Anjalankosken kaupunki, Anjalankosken Energia Oy – Ekopark alueen biokaasuselvitys. 26.10.2001. 16 s.

Sarlin Hydor Oy. 2006. Biokaasulaitoksen toimintaraportti vuodelta 2005 – Keltakankaan kaatopaikka, Anjalankoski. Vantaa: 13.3.2006.

Sarlin Oy Ab. 2007. Biokaasulaitoksen toimintaraportti vuodelta 2006 – Keltakangas, Anjalankoski. Vantaa: 11.5.2007.

Suomen IP-Tekniikka Oy. 2005. Kymenlaakson Jäte Oy – Kaasun hyödyntämiselvitys. 16.9.2005. 10 s.

Henkilökohtaiset tiedonannot

Alatalo, Hanna. 2007a. Palvelupäällikkö, Kymenlaakson Jäte Oy. Keltakankaan kaatopaikan suotovedet [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Päivi Karttunen. Lähetetty 19.9.2007 klo 12.09. Liitetiedosto: ”Vuosikertomus 2006”.

Alatalo, Hanna. 2007b. Palvelupäällikkö, Kymenlaakson Jäte Oy. Lietteiden käsittely [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Päivi Karttunen. Lähetetty 21.9.2007 klo 10.27.

Grönholm, Birger. 2007. Työmaapäällikkö, NCC Roads Oy Anjalankoski. Puhelinkeskustelu 1.10.2007.

Horttanainen, Mika. 2006. Professori, TkT, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Jätteenpolton tuhkan käsittely hyötykäyttöä varten. Luottamuksellinen muistio. 17.11.2006.

Junno, Juha. 2007. Työnjohtaja, Tampereen kaupunki. Puhelinkeskustelu 1.10.2007.

Karppanen, Jari. 2007. Aluepäällikkö, Ekokem-Palvelu Oy. Puhelinkeskustelu 26.9.2007.

Karppinen, Minna. 2007. Projektipäällikkö, Niska & Nyysönen Oy. Termodesorptiolaitteisto [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Päivi Karttunen. Lähetetty 28.9.2007 klo 11.28.

Kosonen, Aarne. 2007. Kaupungininsinööri, Anjalankosken kaupunki. Keltakankaan kaatopaikan tietoja [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Päivi Karttunen. Lähetetty 18.9.2007 klo 10.43. Liitetiedosto: ”Keltakankaan kaatopaikan jätemäärät”.

Köppä, Jukka. 2007. Toimitusjohtaja, Kymenlaakson Jäte Oy. Anjalankoski: Diplomityöpala-
veri 16.8.2007.

Lehtonen, Sanna. Jätehuoltoinsinööri, Rosk'n Roll. Puhelinkeskustelu 26.10.2007.

Manninen, Hanna-Mari. 2007. Tekniikan yo, insinööri (AMK); diplomityöntekijä, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Puhelinkeskustelu 20.9.2007.

Myllylä, Jouko. 2007. Toimitusjohtaja, Anjalankosken Energia Oy. Anjalankoski: Diplomi-työpalaveri 16.8.2007.

Pallonen, Raili. 2007. Toimialapäällikkö, Ekopark Tap. Ekopark alueen yritykset [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Päivi Karttunen. Lähetetty 19.6.2007 klo 12.12. Liitetiedosto: ”Ekopark-yrityspuiston yritykset 19.6.2007”.

Savolainen, Paavo. 2007. Käyttöpäällikkö, Kymenlaakson Jäte Oy. Puhelinkeskustelu 5.10.2007.

Seppälä, Leena. 2007. Käsittelypäällikkö, Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy. Lahden kaatopaikan suotovedet [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Päivi Karttunen. Lähetetty 26.9.2007 klo 18.15.

Uimarihuhta, Heli. 2007. Projekti-insinööri, Ekokem-Palvelu Oy. Puhelinkeskustelu 28.9.2007.

Valovirta, Lauri. 2007a. Sarlin Oy Ab. Anjalankosken Keltakankaan kaatopaikan biokaasulaitos [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Päivi Karttunen. Lähetetty 7.9.2007 klo 12.22.

Valovirta, Lauri. 2007b. Sarlin Oy Ab. Anjalankosken Keltakankaan vanha kaatopaikka [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Päivi Karttunen. Lähetetty 25.9.2007 klo 15.42. Liitetiedosto: ”Soihdun toimintaselostus Anjalankoski” sekä ”Valvomo-ohjeet Anjalankoski”.

Internetlähteet

ATSDR – The Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2001. Landfill gas primer – An overview for environmental health professionals. [verkkodokumentti]. Marraskuu 2001 [viitattu 16.7.2007]. ATSDR: Department of Health and Human Services. Saatavissa: <http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/toc.html>.

Capstone. 2006. Solutions – Resource recovery: Biogas. [verkkodokumentti]. Ei päivitystietoja [viitattu 24.9.2007]. Capstone Microturbine Solutions. Saatavissa: <http://www.microturbine.com/prodsol/solutions/rabiogas.asp>.

Ekopark. 2007. Ekopark-yrityspuisto. [verkkodokumentti]. Ei päivitystietoja [viitattu 25.5.2007]. Ekopark-yrityspuisto. Saatavissa: <http://www.lca.fi/ekopark/yrityspuisto.htm>.

Euroopan yhteisöjen komissio. 2005. Maailmanlaajuisen ilmastonmuutoksen torjuminen. Komission tiedonanto neuvostolle, Euroopan parlamentille, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle sekä alueiden komitealle. {SEC(2005) 180}. [verkkodokumentti]. Bryssel 9.5.2005 [viitattu 19.10.2007]. Euroopan yhteisöjen komissio: KOM(2005) 35 lopullinen. 18 s. Saatavissa pdf-tiedostona: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/fi/com/2005/com2005_0035fi01.pdf.

Flyktman, M. 2003. Polttoaineen kuivauksen kannattavuus laitoksilla. [verkkodokumentti]. 14.1.2003 [viitattu 28.9.2007]. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), VTT Prosessit: Raportin nro PRO2/T6510/02. 38 s. Saatavissa pdf-tiedostona: http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Puuenergia/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ ja_aktivointi/Julkaisut/JORY-raportit/PUUJ10.pdf.

GEC. 2007. Ash melting furnace. Database on Japanese advanced environmental equipment. [verkkodokumentti]. Ei päivitystietoja [viitattu 19.9.2007]. Global Environment Centre Foundation. Saatavissa: http://nett21.gec.jp/JSIM_DATA/.

Horttanainen, M. 2006. Suomalais-venäläinen tutkimusympäristö Anjalankoskella. [verkkodokumentti]. Anjalankoski 02.02.2006 [viitattu 5.11.2007]. Ekopark seminaarin esitys. Saatavissa pdf-tiedostona: <http://www.lca.fi/ekopark/docs/LTY.pdf>.

Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Lim, B., Treaton, K., Mamaly, I., Bonduki, Y., Griggs, D. J. & Callander, B. A. (eds.). 1996. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Reference manual. Volume 3. [verkkodokumentti]. UK: syyskuu 1996. [viitattu 13.6.2007]. IPCC/OECD/IEA, Meteorological Office. Saatavissa: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.htm>.

Ilmatieteen laitos. 2004. Kaatopaikkojen kasvihuonekaasupäästöt selville uudella mittalaitteistolla. [verkkodokumentti]. Ilmatieteen laitos 15.9.2004. [viitattu 6.9.2007]. Saatavissa: <http://www.ilmatieteenlaitos.fi/uutiset/index.html?A=1&Id=1095155765.html>.

Ingersoll Rand. 2007. Microturbines. [verkkodokumentti]. Ei päivitystietoja [viitattu 24.9.2007]. Ingersoll Rand Industrial Technologies. Saatavissa: http://energy.ingersollrand.com/downloads/next_level.aspx?CatNum=2&SubCatNum=6.

Jäte kukko Oy. 2007. Vuosikertomus 2006. [verkkodokumentti]. Ei päivitystietoja [viitattu 20.9.2007]. Saatavissa pdf-tiedostona: http://www.jatekukko.fi/www/fi/liitetiedostot/vuosikertomukset/13-vuosikertomus_nayttoversio.pdf.

Kymenlaakson Jäte Oy. 2007. Kymenlaakson Jäte Oy - vuosikertomus. [verkkodokumentti]. Anjalankoski [viitattu 5.6.2007]. Kymenlaakson Jäte Oy. Saatavissa pdf-tiedostona: <http://www.kymenlaaksonjate.fi/>.

Marttinen, S., Jokela, J., Rintala, J. & Kettunen, R. 2000. Jätteiden hajoaminen kaatopaikalla sekä kaatopaikkavesien muodostuminen, ominaisuudet ja käsittely. [verkkodokumentti]. Jyväskylä 20.6.2000 [viitattu 27.6.2007]. KAATO 2001 – hanke. Saatavissa pdf-tiedostona: <http://www.jly.fi/katsaus2.pdf>.

Oland, C. B. 2004. Guide to combined heat and power systems for boiler owners and operators. [verkkodokumentti]. July 30, 2004 [viitattu 25.9.2007]. U.S. Department of Energy, Industrial Technologies Program. 162 s. Saatavissa pdf-tiedostona: http://www.oit.doe.gov/bestpractices/steam/pdfs/guide_chp_boiler.pdf.

Oulun Jätehuolto. 2007. Toimintakertomus 2006. [verkkodokumentti]. Ei päivitystietoja [viitattu 20.9.2007]. Saatavissa pdf-tiedostona: <http://www.ouka.fi/jatehuolto/pdf/JateToimkert06.pdf>.

Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy. 2007. Vuosi- ja ympäristökertomus 2006. [verkkodokumentti]. Ei päivitystietoja [viitattu 20.9.2007]. Saatavissa pdf-tiedostona: http://www.phj.fi/downloadable_material/Vuosi-_ja_ymparistokatsaus.pdf.

Roe, S., Reisman, J., Strait, R. & Doorn, M. 1998. Emerging technologies for the management and utilization of landfill gas. [verkkodokumentti]. Tammikuu 1998 [viitattu 20.9.2007]. U. S. Environmental Protection Agency: Office of Research and Development. 56 s. Saatavissa pdf-tiedostona: http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/etech_pd.pdf.

Scheehle, E. (ed.). 2006. Global anthropogenic non-CO₂ greenhouse gas emissions: 1990-2020. [verkkodokumentti]. Washington: kesäkuu 2006 [viitattu 10.7.2007]. U.S. Environmental Protection Agency: Office of Atmospheric Programs, Climate Change Division. Saatavissa pdf-tiedostona: <http://www.epa.gov/nonco2/econinv/pdfs/GreenhouseGas Report. pdf>.

Smith, A., Brown, K., Ogilvie, S., Rushton, K. & Bates, J. 2001. Waste management options and climate change. Final report to the European Commission, DG Environment. [verkkodokumentti]. Luxemburg: heinäkuu 2001 [viitattu 29.5.2007]. Office for Official Publications of the European Communities. Saatavissa pdf-tiedostona: http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/climate_change.pdf.

Tilastokeskus. 2007a. Jätteiden käsittely vuonna 2005. [verkkodokumentti]. Päivitetty 19.6.2007 [viitattu 13.9.2007]. Tilastokeskus. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/jate/2005/jate_2005_2007-06-20_tau_001.html.

Tilastokeskus. 2007b. Energian kokonaiskulutus energialähteittäin (TJ) ja CO₂-päästö (Mt). [verkkodokumentti]. Päivitetty 20.9.2007 [viitattu 22.10.2007]. Tilastokeskus. Saatavissa: http://www.tilastokeskus.fi/til/ehkh/2007/02/ehkh_2007_02_2007-09-20_tau_001.xls.

US. EPA. 1995. Emission factors & AP 42. Compilation of air pollutant emission factors, Volume 1: Stationary point and area sources. Fifth edition. [verkkodokumentti]. Päivitetty 21.6.2007 [viitattu 27.7.2007]. U.S. Environmental Protection Agency. Saatavissa: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/>.

U.S. EPA. 2002. Powering microturbines with landfill gas. [verkkodokumentti]. October 2002 [viitattu 24.9.2007]. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation. Saatavissa pdf-tiedostona: http://www.epa.gov/lmop/res/pdf/pwrng_mcrtrbns.pdf.

U.S. EPA. 2006. Methane. [verkkodokumentti]. Lokakuu 2006 [viitattu 19.7.2007]. U.S. Environmental Protection Agency. Saatavissa: <http://www.epa.gov/methane/index.html>.

Ympäristöministeriö. 2004. Kansallinen strategia biohajoavan jätteen kaatopaikkakäsittelyn vähentämiseksi. [verkkodokumentti]. Helsinki: 2.12.2004 [viitattu 20.6.2007]. Ympäristöministeriö. Saatavissa pdf-tiedostona: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=27161&lan=fi>.

Wellinger, A. & Lindberg, A. 2000. Biogas upgrading and utilisation. Task 24: Energy from biological conversion of organic waste. [verkkodokumentti]. Julkaistu 2000. [viitattu 7.9.2007]. IEA Bioenergy. Saatavissa pdf-tiedostona: <http://www.iea-biogas.net/Dokumente/Biogas%20upgrading.pdf>.

Willumsen, H. C. 2001. Energy recovery from landfill gas in Denmark and worldwide. [verkkodokumentti]. Lithuania: 2001 [viitattu 10.7.2007]. Seminaariesitys. Lithuanian Energy Institute: Utilisation of Landfill Gas to Energy Production. 9 s. Saatavissa pdf-tiedostona: <http://www.lei.lt/Opet/pdf/Willumsen.pdf>.

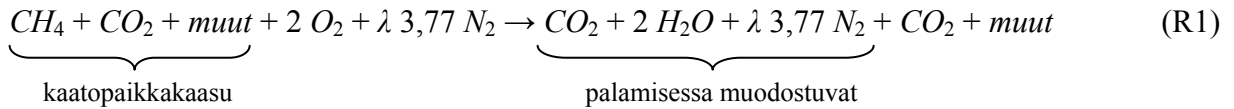
The World Bank. 2004. Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean. [verkkodokumentti]. Ontario: 2004 [viitattu 12.7.2007]. The World Bank, Energy Sector Management Assistance Programme. 191 s. Saatavissa pdf-tiedostona: http://www.bancomundial.org.ar/lfg/gas_access_008.htm.

LIITELUETTELO

- Liite 1. Adiabaattisen palamislämpötilan määrittäminen
- Liite 2. Kustannustarkastelu

ADIABAATTISEN PALAMISLÄMPÖTILAN MÄÄRITYS

Kaatopaikkakaasun palamisreaktio on esitetty reaktioyhtälössä R1.



Adiabaattinen palamislämpötila saadaan soveltamalla energiayhtälöä (ks. Raiko et al. 2002, 57, 148), jonka mukaan lähtöaineiden tuntuva entalpia sekä vakiopaineessa reaktiossa vapautuva palamislämpö ovat yhtä suuret kuin reaktiotuotteiden tuntuva entalpia.

$$\sum H_i' + Q = \sum H_i'' \quad (1)$$

, missä

$\sum H_i'$ on lähtöaineiden tuntuvien entalpioiden summa [MJ]

Q on palamislämpö [MJ]

$\sum H_i''$ on reaktiotuotteiden tuntuva entalpia [MJ].

Oletetaan sekä ilman että polttoaineen lämpötilan olevan $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, joka on laskennassa käytetyn taulukon (Raiko et al. 2002, 692-703) entalpia-arvojen nollapiste. Tällöin lähtöaineiden tuntuva entalpia $\sum H_i'$ on nolla.

Reaktioentalpia saadaan reaktiotuotteiden ja lähtöaineiden muodostumisentalpioiden erona, referenssitilassa ($p = 100 \text{ kPa}$, $T = 298,15 \text{ K}$) olevan alkuaineen - kuten $N_2(g)$ ja $O_2(g)$ - muodostumisentalpia on nolla. Hiilidioksidin muodostumisentalpia referenssitilassa H_{mf,CO_2}^0 on -393,505 MJ/kmol, veden H_{mf,H_2O}^0 on -241,826 MJ/kmol ja metaanin H_{mf,CH_4}^0 on -74,873 MJ/kmol. Reaktioentalpia voidaan laskea yhtälöllä (2).

LIITE I 2(4)

$$\Delta H_r = n''_{CO_2} \cdot H_{mf,CO_2}^0 + n''_{H_2O} \cdot H_{mf,H_2O}^0 - n'_{CH_4} \cdot H_{mf,CH_4}^0 - n'_{CO_2} \cdot H_{mf,CO_2}^0 \quad (2)$$

, missä

ΔH_r on reaktioentalpia [MJ]

n' on lähtöaineiden ainemäärä [kmol]

n'' on reaktiotuotteiden ainemäärä [kmol]

H_{mf}^0 on muodostumisentalpia [MJ/kmol]

Reaktioentalpian itseisarvo on palamislämpö Q .

$$Q = |\Delta H_r| \quad (3)$$

Adiabaattisen lämpötilan laskenta on iteratiivinen. Ensimmäisellä iteraatiokierroksella arvaetaan loppulämpötilaksi $T''_{f1} = 2\,000$ K. Laskennassa tarvittavat lämpökapasiteetit c_p ja entalpiat h_t kullekin yhdisteelle on otettu saatu Raiko et al. (2002) liitteen E taulukosta 2 000 K lämpötilalle.

	h_t [kJ/kg]	c_p [kJ / kg K]
CO ₂	2078,00	1,371
H ₂ O	4040,00	2,841
O ₂	1849,00	1,179
N ₂	2004,00	1,284

Reaktiotuotteiden tuntuva entalpia ensimmäisellä iteraatiokierroksella $\sum H''_{ti}$ lasketaan kunkin reaktiotuotteen tuntuvan entalpian summana, kuten yhtälössä (4) on esitetty. Alaindeksi i viittaa iterointikierrokseen.

$$\sum H''_{ti} = \sum m''_j \cdot h_{t,j} \quad (4)$$

, missä

$\sum H_{ii}''$ on reaktiotuotteiden tuntuva entalpia [MJ]

m_j'' on reaktiotuotteen j massa [kg]

$h_{i,j}$ on reaktiotuotteen j entalpia [kJ/kg]

Reaktiotuotteiden lämpökapasiteetti ensimmäisellä iteraatiokierroksella $\sum C_{pi}''$ lasketaan kukin reaktiotuotteen lämpökapasiteetin summana yhtälön (5) mukaisesti.

$$\sum C_{pi}'' = m_j'' \cdot c_{p,j} \quad (5)$$

, missä

$\sum C_{pi}''$ on reaktiotuotteiden lämpökapasiteetti [kJ/K]

m_j'' on reaktiotuotteen j massa [kg]

$c_{p,j}$ on reaktiotuotteen j lämpökapasiteetti [kJ / kg K]

Adiabaattinen palamislämpötilan määrittämiseksi on ratkaistava yhtälöstä (6) lämpötilakorjausermi ΔT_i . Yhtälön (6) mukaan lähtöaineiden tuntuva entalpia ja palamislämpö ovat yhteensä niin suuret kuin summa, jonka muodostavat reaktiotuotteiden tuntuva entalpia loppulämpötilassa ja reaktiotuotteiden lämpökapasiteetin ja lämpötilakorjausermin tulo.

$$\sum H_i' + Q = \sum H_{ii}'' + \sum C_{pi}'' \cdot \Delta T_i \quad (6)$$

, missä

$\sum H_i'$ on reaktiotuotteiden tuntuva entalpia [MJ].

Q on palamislämpö [MJ]

$\sum H_{ii}''$ on reaktiotuotteiden tuntuva entalpia [MJ]

LIITE I 4(4)

$\sum C_{pi}''$ on reaktiotuotteiden lämpökapasiteetti [kJ/K]

ΔT_i on lämpötilakorjaustermi [K]

Lämpötilakorjaustermiksi saadaan yhtälön (7) mukaisesti:

$$\Delta T_i = \frac{(\sum H'_t + Q) - \sum H''_{ti}}{\sum C_{pi}''} \quad (7)$$

Adiabaattiseksi palamislämpötilaksi saadaan:

$$T''_{f2} = T''_{f1} + \Delta T_i \quad (8)$$

Toinen iteraatiokierros lasketaan kuten edellä on esitetty lämpötilalla T''_{f2} . Toisen iteraatiokierroksen alkulämpötilan mukaiset lämpökapasiteetit ja entalpiat on laskettu excel-
taulukkolaskentaohjelmalla Raiko et al. (2002) liitteessä F esitettyjen polynomimuotoisten so-
viteyhtälöiden mukaisesti.

Kaatoapaikkakaasun adiabaattinen palamislämpötila vaihtelee kaasun sisältämien yhdisteiden pitoisuuksien mukaan. Lämpötila määräytyy pääasiassa kaasun sisältämän metaanin pitoisuuden perusteella, mutta kaasun sisältämä hiilidioksidi ja typpi alentavat adiabaattista lämpötilaa metaanin adiabaattisesta palamislämpötilasta. Adiabaattiset lämpötilat on laskettu luvun 4.2 taulukossa 5 ilmoitetuilla metaanipitoisuuksilla. Hiilidioksidipitoisuuden on oletettu olevan yhtä suuren kuin metaanipitoisuus ja loppukaasun koostuvan pääasiassa tyypestä sekä pieninä pitoisuuksina esiintyvistä yhdisteistä. Muiden yhdisteiden vaikutus adiabaattiseen palamis-
lämpötilaan on huomioitu tyyppinä laskennan yksinkertaistamiseksi. Laskennassa ilmakerroin $\lambda = 1,2$.

KUSTANNUSTARKASTELU

Kaatopaikkakaasun hyötykäyttövaihtoehtojen kustannustarkastelu perustuu investoinnin nykyarvon määrittämiseen. Tarkastelun tuloksena saadaan suurin investointikustannus, jolla laitos on vielä taloudellisesti kannattava. Laskennassa tarkasteltavat kustannustekijät vaihtelevat hyötykäyttövaihtoehtojen mukaan ja ne on esitetty kussakin tapauksessa erikseen. Laskennassa ei ole huomioitu mahdollisia investointi- ja verotukia. Hyötykäyttövaihtoehtojen kustannustarkastelussa on takaisinmaksuajaksi (n) valittu 10 vuotta ja korkokannaksi (i) 5 prosenttia. Laskennassa käytettävä vuosittaisten suoritusten nykyarvotekijä a , joka lasketaan yhtälöllä (1). Nykyarvotekijäksi saadaan 7,722.

$$a = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (1)$$

, missä

- a on vuosittaisten suoritusten nykyarvotekijä
- i on korkokanta [%]
- n on takaisinmaksuaika [v]

Investoinnin nykyarvo NA määritetään kustannustekijöiden eli tuottojen ja menojen sekä investoinnin I perusteella.

$$NA = C_{tuotot} - C_{kulut} - I \quad (2)$$

, missä

- NA on investoinnin nykyarvo
- C_{tuotot} on vuotuiset tuotot
- C_{kulut} on vuotuiset menot

Yhtälöstä (2) ratkaistava I on suurin sallittu investointikustannus, kun nykyarvo NA asetetaan nolllaksi.

$$I_{\max} = \frac{1}{1+r_k \cdot a} (C_{\text{tuotot}} - C_{\text{kulut}}) \quad (3)$$

, missä

- I_{\max} on suurin sallittu investointikustannus [€]
 r_k on vuotuisen käyttökustannusten osuus investointikustannuksesta
 a on nykyarvotekijä
 C_{tuotot} on tuotot
 C_{kulut} on kulut

Kaikissa hyötykäyttövaihtoehtoissa käytettävät laskennan alkuarvot on esitetty taulukossa 1. Hyötykäyttövaihtoehtokohtaiset alkuarvot on esitetty tämän liitteen sivuilla 3-16.

Taulukko 1. Laskennassa käytettävät alkuarvot, jotka ovat yhteisiä kaikissa tarkasteltavissa vaihtoehtoissa.

takaisinmaksuaika	n	10 vuotta
korkokanta	i	5 %
nykyarvotekijä	a	7,722
vuotuiset käyttökustannukset osuutena investointikustannuksesta	r_k	6 %
kaatopaikkakaasun hinta		3,5 €/MWh
kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus, jos ei erikseen mainittu		45 til-%

Kaikissa tarkastelluissa vaihtoehtoissa kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut, C_k , lasketaan samalla tavalla. Myös muiden kustannustekijöiden laskennassa käytetään samaa periaatetta soveltaen.

$$C_k = q_V \cdot Q_k \cdot h_k \cdot a \quad (4)$$

, missä

- C_k on kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut [€]
 q_V on kaatopaikkakaasun määrä [m^3/a]
 Q_k on kaatopaikkakaasun lämpöarvo [kWh/m^3]
 h_k on kaatopaikkakaasun hinta [€/MWh]
 a on nykyarvotekijä

Lämmöntuotanto

Lämmöntuotannon suurin sallittu investointikustannus lasketaan korvattavan lämmityspolttoaineen ja kaatopaikkakaasun hinnan erotuksen funktiona. Taulukossa 2 on esitetty lämmöntuotannon suurimman sallitun investointikustannuksen laskentaan käytetyt alkuarvot. Laskennassa varioidaan kaatopaikkakaasun metaanipitoisuutta, korvattavan lämmön myyntihintaa sekä alueen omaa lämmönkulutusta. Kustannustekijöitä ovat säästöt, jotka saadaan korvattavan ostolämmön hinnasta, tulot myydystä ylijäämäkaasusta sekä kulut kaasun hankinnasta. Suurin sallittu investointikustannus muodostuu yhtälön (3) mukaisesti:

$$I_{\max} = \frac{1}{1 + r_k \cdot a} (C_{l_s} + C_{k_m} - C_k) \quad (5)$$

, missä

C_{l_s} on säästö, joka muodostuu käytettävän lämmön korvaamisesta

C_{k_m} on ylijäämäkaasun myynnistä saatavat tuotot

C_k on kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut

Taulukko 2. Lämmöntuotannon investointikustannuslaskennassa käytetyt alkuarvot (* varioitavat parametrit, ** laskennassa muuttuvat tiedot).

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
lämmöntuotannon hyötysuhde	0,90	
korvattavan lämmön myyntihinta	60	€/MWh
kaasun vuosituotanto	3 500 000,0	m ³ /a
metaanin lämpöarvo	9,99	kWh/m ³
metaanipitoisuus	30 / 45 / 60 *	til-%
kaasun hinta	0 - 15*	€/MWh
kaasun ostohinta	17,3	€/MWh
lämmön tuotanto	**	MWh/a
lämmön kulutus	600 / 2 200 *	MWh/a
lämmön ylituotanto	**	MWh/a
ylijäämäkaasu	**	m ³ /a

Kaukolämmön tuotanto

Kaukolämmön suurin sallittu investointikustannus lasketaan kaatopaikkakaasun kaukolämmöstä saatavan hinnan funktiona. Taulukossa 3 on esitetty kaukolämmön tuotannon suurimman sallitun investointikustannuksen laskentaan käytetyt alkuarvot. Laskennassa tarkastellaan kaatopaikkakaasun määrän, metaanipitoisuuden sekä kaukolämmön arvon vaikutusta suurimpaan sallittuun investointikustannukseen. Investointikustannukseen vaikuttavat kustannustekijät muodostuvat kaukolämmön myynnistä saatavista tuotoista ja kaasun hankinnasta aiheutuvista kuluista. Suurin sallittu investointikustannus voidaan laskea yhtälöllä:

$$I_{\max} = \frac{1}{1 + r_k \cdot a} (C_{kl} - C_k) \quad (6)$$

, missä

C_{kl} on kaukolämmön myynnistä saatavat tulot

C_k on kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut

Taulukko 3. Kaukolämmöntuotannon investointikustannuslaskennassa käytetyt alkuarvot (* varioitavat parametrit, ** laskennassa muuttuvat tiedot).

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
lämmöntuotannon hyötysuhde	0,90	
kaukolämmön ostohinta	10 - 50*	€/MWh
kaasun vuosituotanto	2 500 000 - 4 500 000*	m ³
metaanin lämpöarvo	9,99	kWh/m ³
metaanipitoisuus	45*	til-%
kaasun lämpöarvo	**	kWh/m ³
kaukolämmön tuotanto	**	MWh

Polttoainekäyttö asfalttiasemalla

Kaatopaikkakaasua voidaan käyttää asfalttiasemalla lämmityspolttoaineena, kun kaukolämmön tarve on pieniä. Suurin sallittu investointikustannus asfalttiaseman muutostöitä varten on laskettu korvattavan polttoaineen ja kaatopaikkakaasun arvon erotuksen funktiona. Taulukossa 4 on esitetty suurimman sallitun investointikustannuksen laskentaan käytetyt alkuarvot. Laskennassa tarkastellaan asfalttiaseman tuotantokapasiteetin sekä öljyn korvauksen arvon vaikutusta suurimpaan sallittuun investointikustannukseen. Kustannustekijät muodostuvat öljyn korvaamisesta saadusta säästöstä sekä kaasun hankinnasta aiheutuvista kuluista. Yhtälön (3) mukaisesti suurin sallittu investointikustannus voidaan laskea:

$$I_{\max} = \frac{1}{1+r_k \cdot a} (C_{\ddot{o}_s} - C_k) \quad (7)$$

, missä

$C_{\ddot{o}_s}$ on öljyn korvaamisesta kaatopaikkakaasulla muodostuva säästö

C_k on kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut

Taulukko 4. Asfaltintuotantovaihtoehdon investointikustannuslaskennassa käytetyt alkuarvot (* varioitavat parametrit, ** laskennassa muuttuvat tiedot).

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
lämmöntuotannon hyötysuhde	0,90	
öljyn myyntihinta	60,0	€/MWh
öljyn lämpöarvo	10,0	kWh/ltr
kaasun lämpöarvo	4,0	kWh/m ³
kaasun hinta	0 - 10,0*	€/MWh
öljyn tarve	6,0	ltr/t
korvattavan öljyn määrä	**	ltr
korvattavan öljyn lämpöenergia	**	MWh
asfaltin tuotanto	30 000 - 50 000*	t/a
käsittelyn energian kulutus	80	kWh/t
kaasu määrä	**	m ³ /a

Pilaantuneen maan terminen käsittely

Suurin sallittu investointikustannus pilaantuneiden maiden termiseen käsittelyyn on laskettu maa-aineksen vastaanottohinnan funktiona käsittelykapasiteeteille 10 000 ja 20 000 tonnia vuodessa. Taulukossa 5 on esitetty suurimman sallitun investointikustannuksen laskentaan käytetyt alkuarvot. Investointikustannuksen suuruuteen vaikuttavat kustannustekijät ovat pilaantuneen maan vastaanotosta ja ylijäämäkaasun myynnistä kaukolämmön tuotantoon saatavat tuotot sekä kaasun hankinnasta ja sähkön kulutuksesta aiheutuvat kulut. Suurin sallittu investointikustannus voidaan laskea yhtälöllä:

$$I_{\max} = \frac{1}{1 + r_k \cdot a} (C_{pima} + C_{k_m} - C_k - C_s) \quad (8)$$

, missä

C_{pima} on pilaantuneiden maa-ainesten vastaanotosta saatavat tuotot

C_{k_m} on ylijäämäkaasun myynnistä saatavat tuotot

C_k on kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut

C_s on sähkön kulutuksesta aiheutuvat kulut

Taulukko 5. Pilaantuneiden maiden terminen käsittelyn investointikustannuslaskennassa käytetyt alkuarvot (* varioitavat parametrit, ** laskennassa muuttuvat tiedot).

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
lämmöntuotannon hyötysuhde	0,90	
kaukolämmön myyntihinta	0 - 41,0*	€/MWh
kaasun vuosituotanto	3 500 000,0	m ³
kaasun lämpöarvo	4,5	kWh/m ³
ylimääräinen kaasu	**	m ³ /a
kaukolämmön tuotanto	**	MWh
maan vastaanottohinta	60 - 200*	€/t
käsittelykapasiteetti	10 000 - 20 000*	t/a
käsittelyn energian kulutus	580	kWh/t
sähkönkulutus	5	kWh/t
sähkön hinta	70,0	€/MWh

Kaatopaikkavesien haihdutus

Suurin sallittu investointikustannus kaatopaikkavesien haihduttamiseen on laskettu kaatopaikkakaasun määrän funktiona. Taulukossa 6 on esitetty suurimman sallitun investointikustannuksen laskentaan käytetyt alkuarvot. Investointikustannuksen suuruuteen vaikuttavat kustannustekijät ovat kaatopaikkaveden tilavuuden pienentämisen seurauksena saatavat säästöt jätevesimaksusta sekä kaasun hankinnasta aiheutuvat kulut. Suurin sallittu investointikustannus voidaan laskea yhtälöllä:

$$I_{\max} = \frac{1}{1+r_k \cdot a} (C_{\text{suotovesi}_s} - C_s - C_k) \quad (9)$$

, missä

$C_{\text{suotovesi}_s}$ on viemäriin johdettavan pienemmän jätevesimäärän jätevesimaksussa saatava säästö

C_k on kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut

C_s on sähkön kulutuksesta aiheutuvat kulut

Taulukko 6. Kaatopaikkavesien haihdutuksen investointikustannuslaskennassa käytetyt alkuarvot (* varioitavat parametrit, ** laskennassa muuttuvat tiedot).

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
jätevesimaksu	1,5 - 3*	€/m ³
kaasun vuosituotanto	1 000 000 - 4 000 000,0	m ³
suotoveden määrä	**	m ³
kaasun hinta	0	€/MWh
ominaislämmön kulutus	440,0 - 850,0	kWh/m ³
kaasun lämpöarvo	4,5	kWh/m ³
tilavuuden pienenemä	0,50 - 0,97	
lopputuotteen määrä	**	m ³ /a

Sähköntuotanto

Sähkön tuotannon suurin sallittu investointikustannus lasketaan kahdelle vaihtoehdolle. Ensimmäisessä vaihtoehdossa kaikki tuotettu sähkö myydään valtakunnan verkkoon. Toisessa vaihtoehdossa tuotetusta sähköstä käytetään omaa kulutusta vastaava osuus ja loput sähköstä myydään valtakunnan verkkoon. Suurin sallittu investointikustannus esitetään sähkön ostohinnan funktiona. Laskennassa varioidaan sähköntuotantoon käytettävissä olevan kaatopaikkakaasun määrää sekä sähköntuotannon hyötysuhdetta. Taulukossa 7 on esitetty suurimman sallitun investointikustannuksen laskentaan käytetyt alkuarvot. Investointikustannuksen suuruuteen vaikuttavat kustannustekijät ovat sähkön myynnistä saatavat tuotot, sähkön omasta tuotannosta saatavat säästöt sekä kaasun hankinnasta aiheutuvat kulut. Suurin sallittu investointikustannus voidaan laskea yhtälöillä (10) ja (11):

Kaikki tuotettu sähkö myydään:

$$I_{\max} = \frac{1}{1+r_k \cdot a} (C_{s_m} - C_k) \quad (10)$$

, missä

C_{s_m} on sähkön myynnistä saatavat tulot

C_k on kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut

Käyttö omaan kulutukseen ja ylijäämä myyntiin:

$$I_{\max} = \frac{1}{1+r_k \cdot a} (C_{s_m} + C_{s_s} - C_k) \quad (11)$$

, missä

C_{s_m} on sähkön myynnistä saatavat tulot

C_{s_s} on sähkön omasta tuotannosta saatava säästö suhteessa sähkön ostoon

C_k on kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut

Taulukko 7. Sähköntuotannon suurimman sallitun investointikustannuksen laskennassa käytetyt alkuarvot (* varioitavat parametrit, ** laskennassa muuttuvat tiedot).

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
sähköntuotannon hyötysuhde	0,25 / 0,35*	
sähkön myyntihinta	70,0	€/MWh
sähkön ostohinta	0 - 40,0*	€/MWh
kaasun vuosituotanto	2 500 000 - 3 500 000,0*	m ³
kaasun lämpöarvo	4,5	kWh/m ³
sähkön tuotanto	**	MWh
oma kulutus	1 800 - 2 200 *	MWh
myynti	**	MWh

Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto

Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon tuotannon suurin sallittu investointikustannus laskeaan tilanteella, jossa kaikki tuotettu sähkö ja lämpö myydään sekä tilanteelle, jossa tuotetusta sähköstä ja lämmöstä käytetään omaa kulutusta vastaava osuus ja loput myydään. Suurin sallittu investointikustannus esitetään sähkön ostohinnan funktiona. Laskennassa varioidaan sähköntuotantoon käytettävissä olevan kaatopaikkakaasun määrää sekä sähköntuotannon hyötysuhdetta. Taulukossa 8 on esitetty suurimman sallitun investointikustannuksen laskentaan käytetyt alkuarvot.

Investointikustannuksen suuruuteen vaikuttavat kustannustekijät ovat sähkön ja lämmön myynnistä saatavat tuotot, sähkön ja lämmön omasta tuotannosta saatavat säästöt sekä kaasun hankinnasta aiheutuvat kulut. Suurin sallittu investointikustannus voidaan laskea yhtälöllä (12). Yhtälö kuvaa tuotetun energian myyntiä omaa kulutusta vastaavan osuuden käytön jälkeen. Yhtälö soveltuu kaiken tuotetun sähkön ja lämmön myynnin investointikustannuksen laskentaan, kun säästöä kuvaavat tekijät, C_{s_s} ja C_{l_s} , merkitään nolllaksi.

$$I_{\max} = \frac{1}{1 + r_k \cdot a} (C_{s_s} + C_{l_s} + C_{s_m} + C_{kl} - C_k) \quad (12)$$

, missä

C_{s_m} on sähkön myynnistä saatavat tulot

C_{s_s} on sähkön omasta tuotannosta saatava säästö suhteessa sähkön ostoon

C_{l_s} on säästö, joka muodostuu käytettävän lämmön korvaamisesta

C_{kl} on kaukolämmön myynnistä saatavat tulot

C_k on kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut

Taulukko 8. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon suurimman sallitun investointikustannuksen laskennassa käytetyt alkuarvot (* varioitavat parametrit, ** laskennassa muuttuvat tiedot).

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
sähköntuotannon hs	0,25 - 0,35	
lämmöntuotannon hs	0,50	
kaasun vuosituotanto	2 500 000,0 - 3 500 000,0*	m ³
kaasun lämpöarvo	4,5	kWh/m ³
sähkön ostohinta	0,0 - 40,0*	€/MWh
lämmön ostohinta	0,0 - 41,0*	€/MWh
sähkön myyntihinta	70,0	€/MWh
lämmön myyntihinta	65,0	€/MWh
sähkön tuotanto	**	MWh
lämmöntuotanto	**	MWh
oma lämmön kulutus	600	MWh
oma sähkön kulutus	1800	MWh

Lietteen terminen kuivaus

Suurin sallittu investointikustannus yhdyskuntalietteen termiseen kuivaukseen on laskettu lietteen vastaanottohinnan funktiona käsittelykapasiteeteille 6 000 ja 13 000 tonnia vuodessa. Taulukossa 9 on esitetty suurimman sallitun investointikustannuksen laskentaan käytetyt alkuarvot. Investointikustannuksen suuruuteen vaikuttavat kustannustekijät ovat lietteen vastaanotosta ja ylijäämäkaasun myynnistä kaukolämmön tuotantoon saatavat tuotot sekä kaasun hankinnasta ja sähkön kulutuksesta aiheutuvat kulut. Lisäksi investointikustannuksen suuruuteen vaikuttaa lopputuotteen käsittely ja hyötykäyttö. Loppusijoitus aiheuttaa kuluja vähintään jäteveron, 30 €/t, verran ja hyötykäytöstä on mahdollista saada tuottoja. Suurin sallittu investointikustannus voidaan laskea yhtälöllä:

$$I_{\max} = \frac{1}{1+r_k \cdot a} (C_{liete} + C_{kl} - C_k - C_s + C_{lk}) \quad (13)$$

, missä

- C_{liete} on lietteen vastaanotosta perittävästä hinnasta kertyvät tuotot
- C_{kl} on kaukolämmön myynnistä saatavat tulot
- C_k on kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut
- C_s on sähkön kulutuksesta aiheutuvat kulut
- C_{lk} on lopputuotteen hyötykäytöstä saatavat tuotot (kaatopaikkasijoituksesta kuluja)

Taulukko 9. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon suurimman sallitun investointikustannuksen laskennassa käytetyt alkuarvot (* varioitavat parametrit, ** laskennassa muuttuvat tiedot).

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
lietteen määrä	6 000,0 - 13 000	t/a
käsittely kaasulla	**	t/a
vastaanottohinta	20,0 - 120,0*	€/t
osto sähkö	70,0	€/MWh
lämmön myyntihinta	0,0 - 41,0*	€/MWh
kaasun vuosituotanto	3 500 000,0	m ³
kaasun lämpöarvo	4,5	kWh/m ³
ylijäämä kaasu	**	m ³ /a
kaukolämmön tuotanto	**	MWh
ominaislämmön kulutus	583,0	kWh/t
ominaissähkön kulutus	4,0	kWh/t
tilavuuden pienenemä	0,78	
lopputuotteen määrä	**	t/a
lopputuotteen käsittelymaksu	8,7	€/t

Tuhkan terminen käsittely

Suurin sallittu investointikustannus jätteen polton tuhkan termiseen käsittelyyn on laskettu tuhkan vastaanottohinnan funktiona käsittelykapasiteeteille 8 000 ja 15 000 tonnia vuodessa. Taulukossa 10 on esitetty suurimman sallitun investointikustannuksen laskentaan käytetyt alkuarvot. Investointikustannuksen suuruuteen vaikuttavat kustannustekijät ovat tuhkan vastaanotosta saatavat tuotot sekä kaasun hankinnasta, sähkön kulutuksesta, lasinmuodostajan ja varapolttoaineen hankinnasta aiheutuvat kulut. Lisäksi investointikustannuksen suuruuteen vaikuttaa lopputuotteen käsittely ja hyötykäyttö. Loppusijoitus aiheuttaa kuluja vähintään jäteveron, 30 €/t, verran ja hyötykäytöstä on mahdollista saada tuottoja. Suurin sallittu investointikustannus voidaan laskea yhtälöllä:

$$I_{\max} = \frac{1}{1 + r_k \cdot a} (C_{\text{tuhka}} - C_k - C_s - C_{\text{add}} - C_{\text{mk}} + C_{\text{lk}}) \quad (14)$$

, missä

- C_{tuhka} on tuhkan vastaanotosta perittävästä hinnasta kertyvät tuotot
- C_k on kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut
- C_s on sähkön kulutuksesta aiheutuvat kulut
- C_{add} on lasinmuodostajan hankinnasta aiheutuvat kulut
- C_{mk} on varapolttoaineen eli maakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut
- C_{lk} on lopputuotteen hyötykäytöstä saatavat tuotot (kaatopaikkasijoituksesta kuluja)

Taulukko 10. Tuhkan termisen käsittelyn suurimman sallitun investointikustannuksen laskennassa käytetyt alkuarvot (* varioitavat parametrit, ** laskennassa muuttuvat tiedot).

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
tuhkan määrä	8 000 - 15 000,0*	t/a
käsittely kaasulla	**	t/a
käsittely maakaasulla	**	t/a
vastaanottohinta	100,0 - 500,0*	€/t
lasittajan määrä	20	%
lasittajan hinta	25,0	€/t
osto sähkö	70,0	€/MWh
kaasun vuosituotanto	3 500 000,0	m ³
kaasun lämpöarvo	4,5	kWh/m ³
lisäpolttoaine tarve	**	t/a
maakaasun lämpöarvo	13,9	kWh/kg
maakaasun hinta	17,3	€/MWh
ominaislämmön kulutus	2 470,0	kWh/t
ominaissähkön kulutus	375,0	kWh/t
tilavuuden pienenemä	17	%
lopputuotteen käsittelymaksu	15,0	€/t

Biopolttoaineen kuivaus

Suurin sallittu investointikustannus biopolttoaineen termiselle kuivaukselle on laskettu taulukossa 11 esitettyjä alkuarvoja käyttäen. Laskennassa suurin sallittu investointikustannus on esitetty kuivauksen arvon funktiona. Investointikustannuksen suuruuteen vaikuttavat kustannustekijät ovat kuivatun biopolttoaineen arvon noususta saatavat tuotot sekä kaasunhankinnasta ja sähkönkulutuksesta aiheutuvat kulut. Suurin sallittu investointikustannus voidaan laskea yhtälöllä:

$$I_{\max} = \frac{1}{1 + r_k \cdot a} (C_{\text{kuivaus}} - C_k - C_s) \quad (15)$$

, missä

C_{kuivaus} on biopolttoaineen kuivauksen arvosta saatavat tuotot

C_k on kaatopaikkakaasun hankinnasta aiheutuvat kulut

C_s on sähkön kulutuksesta aiheutuvat kulut

Taulukko 11. Biopolttoaineen termisen kuivauksen suurimman sallitun investointikustannuksen laskennassa käytetyt alkuarvot (* varioitavat parametrit, ** laskennassa muuttuvat tiedot).

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
kuivauksen arvo	1,0 - 20,0*	€/MWh
kaasun vuosituotanto	2 500 000,0 - 3 500 000,0*	m ³
kaasun lämpöarvo	4,5	kWh/m ³
sähkön ostohinta	70,0	€/MWh
sähkönkulutus	4,0	kWh/t
lämmönkulutus	570	kWh/t
kuivattava määrä	**	t/a
raaka-aineen lämpöarvo	4,75	kWh/kg