

HAJAUTETUN ENERGIA TUOTANNON MODULAARINEN YHDYSKUNNAN SIVUAINEVIRTOJA HYÖDYNTÄVÄ CHP-LAITOS

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT Energia – Energia-, Sähkö- ja Ympäristötekniikka

Postiosoite: PL 20, 53851 Lappeenranta
puh: +358 5 621 11
faksi: +358 5 621 6399

PROJEKTIORGANISAATIO

Projektin johtaja: TkT, professori Esa Marttila, LTY
s-posti: esa.marttila@lut.fi

Projektipäällikkö: VTM Riikka Bergman, LTY
s-posti: riikka.bergman@lut.fi

Tutkijat: Andrey Lana, DI, LTY
Hanna-Mari Manninen, DI, LTY
Janne Nerg, TkT, LTY
Juha Kaikko, TkT, dosentti, LTY
Juha Pyrhönen, TkT, professori, LTY
Juho Anttila, Tekn.yo., LTY
Jukka Malinen, DI, LTY
Katja Kakko, DI, LTY
Mika Horttanainen, TkT, professori, LTY
Mika Luoranen, DI, LTY
Minna Pasila-Lehtinen, DI, LTY
Riikka Bergman, VTM, LTY
Tuomo Lindh, TkT, LTY

Yritysyhteistyö: Biolan Oy, Kauttua
Einco Oy, Kotka
Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy, Lappeenranta
Enmac Oy, Kotka
Lappeenrannan Energia Oy, Lappeenranta
Lappeenranta Innovation Oy, Lappeenranta
Laitex Oy, Lappeenranta
The Switch, Lappeenranta

Projektin kesto: Tammikuu 2007 – elokuu 2008

Rahoitus: 422,500 € josta Tekesin osuus on 312,500 €

Kansikuva: Yhdyskuntalietteen kuivaus- ja polttolaitos, Einco Oy.

ALKUSANAT

Tämä raportti on yhteenveto Tekes – teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskuksen ” DENSY - Hajautettujen energiajärjestelmien teknologiat 2003-2007” – ohjelman tutkimushankkeen tuloksista.

Tutkimushankkeen rahoittajina toimivat Tekes, Biolan Oy, Einco Oy, Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy, Enmac Oy, Lappeenrannan Energia Oy, Lappeenranta Innovation Oy, Laitex Oy ja The Switch.

Hankkeen keskeisimpänä tavoitteena oli viedä tutkimuksellisesti eteenpäin poltto- ja generaattoritekniologiaa yhdyskunnan sivuainevirtojen hyödyntämiseksi lämmön ja sähkön yhteistuotannossa pienimuotoisessa laitoksessa. Hanke jakautui tekniseen ja liiketoimintatutkimukseen. Hankkeessa tutkittiin yhdyskunta- ja teollisuuslietettä sekä biopolttoaineita hyödyntävän modulaarisen pienvoimalaitoksen sähkön- ja lämmöntuotannon kaupallisia, teknisiä ja taloudellisia edellytyksiä tulevaisuuden markkinoilla ydinteknologioiden muodostamassa arvoverkossa.

Lappeenrannassa 11.12.2008

Projektin johtaja, professori Esa Marttila

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	7
2 YHDYSKUNTALIETTEEN KÄSITTELY ENNEN TERMISTÄ KUIVAUSTA JA POLTTOA	8
2.1 LIETTEEN KÄSITTELYN TOIMINTAPARAMETRI- JA KUSTANNUSTARKASTELU	10
2.2.1 Mekaaninen vedenerotus.....	10
2.2.2 Linko.....	10
2.2.3 Suotonauhapuristin.....	13
2.2.4 Siirto ja kuljetus	15
2.2.5 Kuljettimet.....	15
2.2.6 Autokuljetukset	18
2.2.7 Kuljetuskustannukset	18
2.2.8 Lietteen varastointi.....	20
2.2.9 Syöttö- ja purkumenetelmät.....	22
2.3 CASE-TARKASTELU	22
2.3.1 Polttoaineena käytettävän lietteen tietoja	23
2.3.2 Lietteen esikäsittelyn kustannusvaikutukset Ekoparkin tapauksessa	24
2.3.3 Lietteen esikäsittelyn kustannusvaikutukset EKJH:n tapauksessa.....	27
2.3.6 Lietteen esikäsittelyn kustannusvaikutukset Lappeenrannan tapauksessa	29
2.4 JOHTOPÄÄTÖKSET	32
3. HÖYRYPROSESSIN MALLINTAMINEN	37
3.1 TAUSTA JA TAVOITE.....	37
3.2 LAITOKSEN RAKENNE JA TEKNINEN SUORITUSKYKY	37
3.3 JOHTOPÄÄTÖKSET	43
LÄHTEET	45
4 PAKU-TUHKAN HYÖTYKÄYTTÖMAHDOLLISUUDET	46
4.1 TUHKASELVITYKSEN LÄHTÖKOHDAT.....	46
4.2 TUHKAN MERKITYS PAKU-PROSESSISSA	46
4.3 PAKU-TUHKAN HYÖTYKÄYTTÖMAHDOLLISUUDET	48
4.4 YHDYSKUNTALIETTEEN TUHKAN KOOSTUMUS	49
4.5 TUHKAN HYÖTYKÄYTTÖÖN LIITTYVÄ LAINSÄÄDÄNTÖ JA VIRANOMAISVAATIMUKSET	50
4.6 PAKU-TUHKALLE SOVELTUVAT HYÖTYKÄYTTÖKOHTEET JA -PROSESSIT	50
4.6.1 Yhdyskuntalietteen polton tuhkan soveltuvuus maarakennuskohteisiin	50
4.6.2 Yhdyskuntalietteen polton tuhkan soveltuvuus sementtiteollisuuden raaka-aineeksi.....	51
4.6.3 Yhdyskuntalietteen polton tuhkan soveltuvuus lannoitteeksi.....	51
4.7 JOHTOPÄÄTÖKSET	54
LÄHTEET	55
5 OPTIMAALISEN SÄHKÖNKÄYTTÖTEKNIIKAN KEHITYS	57
5.1 TURBIININ VALINTA.....	57
5.1.1 Kaupallisten turbiinien ominaisuuksien vertailu.....	58
5.2 TURBOGENERAATTORIVAIHTOEHDOT	59
5.2.1 Vaihteelliseen turbogeneraattoriin soveltuvien generaattorien ominaisuudet.....	61
5.2.2 Vaihteettomaan turbogeneraattoriin soveltuvien generaattorireiden ominaisuudet.....	62
5.3 VAIHTEELLISEN JA VAIHTEETTOMAN TURBOGENERAATTORIKONSTRUKTION VERTAILU	65
5.4 JOHTOPÄÄTÖKSET	66
LÄHTEET	67
6 PAKU-CHP-LAITOKSEN VERKKOONLIITYNTÄ JA VERKKOONLIITYNNÄN AUTOMAATIO	68
6.1 JOHDANTO.....	68
6.2 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	68
6.3 PAKU-CHP -LAITOKSEN VERKKOONLIITYNTÄ JA VERKKOONLIITYNNÄN AUTOMAATIO	68

6.4 VERKKOONLIITYNNÄN STANDARDIT.....	69
6.5 HAJAUTETUN TUOTANNON SUOJAUS.....	69
6.6 VERKKOONLIITYNNÄN AUTOMAATIO.....	71
6.6.1 Suoraan verkkoon kytketyn epätahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaatio.....	71
6.6.2 Suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaatio.....	73
6.6.3 Suoraan verkkoon kytketyn kestopagneettitahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaatio.....	75
6.6.4 Taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketyn kestopagneettitahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaatio.....	77
6.7 SUOJAUS.....	80
6.8 VERKKOONLIITYNTÄAUTOMAATION HANKINTAKUSTANNUKSET.....	80
6.9 PAKU-CHP -LAITOKSEN SÄÄTÖ JA OHJAUS.....	81
6.9.1 Prosessit ja säädöt.....	82
6.9.2 Polttoaineen ja ilman säätö.....	83
6.9.3 Pääkaavio.....	85
6.10 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	87
LÄHTEET.....	88
7. TALOUSMALLINUS.....	89
7.1 TAVOITE.....	89
7.2 LAITOKSEN KUSTANNUSARVIO.....	89
7.3 TALOUDELLINEN MALLINUS.....	91
7.4 LAITOTESIMERKIT.....	94
7.5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	98
LÄHTEET.....	100
8 LIIKETOIMINTAKONSEPTIN KEHITTÄMINEN.....	101
8.1 JOHDANTO.....	101
8.2 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET.....	101
8.3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA KÄYTETYT AINEISTOT.....	101
8.4 TUTKIMUKSEN RAJAUKSET.....	102
8.5 TEOREETTINEN VIITEKEHYS.....	102
8.6 LIIKETOIMINTAKONSEPTI JA -MALLI: KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELYÄ.....	102
8.7 LIIKETOIMINTAMALLIT YRITYKSEN INNOVATIIVISUUDEN PERUSTANA.....	103
8.7.1 Liiketoimintamallin ajatuksena avoin innovaatio.....	103
8.7.2 Vallankumouksellisen uudistumisen edellytykset.....	105
8.7.3 Liiketoimintamallien vertailua.....	105
8.8 YMPÄRISTÖTEKIJÄT LIIKETOIMINNAN KANNALTA.....	106
8.8.1 Poliittiset ja taloudelliset tekijät.....	106
8.8.2 Sosiaaliset ja yhteiskunnalliset tekijät.....	107
8.8.3 Ekologiset tekijät.....	107
8.8.4 Lainsäädännölliset tekijät.....	108
8.9 MARKKINOIDEN KEHITTYMINEN.....	108
8.10 PAKU- LAITOKSEN LIIKETOIMINTAKONSEPTI.....	109
8.10.1 Arvonluonti.....	109
8.10.2 Markkinasegmentin tunnistaminen.....	110
8.10.3 Arvoketju.....	110
8.10.4 Tarvittavat resurssit.....	111
8.10.5 Tuottomekanismi.....	112
8.10.6 Arvoverkosto.....	112
8.10.7 Kilpailustrategia.....	113
8.11 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	113
LÄHTEET.....	115
9 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	116
10 JATKOTUTKIMUSTARPEET.....	117

KUVIEN SISÄLLYSLUETTELO

KUVA 2-1. TUTKIMUKSESSA TARKASTELTAVA LIETTEENKÄSITTELYKETJU PÄÄPIIRTEISSÄÄN	8
KUVA 2-2. AKTIIVILIETEPROSESSIN YLEISET OSAT	9
KUVA 2-3. RUUVIKULJETTIMEN TIETOJA.	16
KUVA 2-4. RUUVIKULJETTIMEN RUUVI.	17
KUVA 2-5. SIIRTORUUVI PUHDISTUSPROSESSIN ALKUPÄÄSSÄ.	17
KUVA 2-6. LIETELAVOJA, JOILLE KUIVATTU LIETE JOHDETAAN JA JOILLA SE KULJETETAAN ETEENPÄIN.....	21
KUVA 2-7. LIETTEEN KUIVAUSRAKENNUS JA LIETESILOT.....	21
KUVA 2-8. KAAKKOIS-SUOMEN ALUEELLA SIJAITSEVAT KUNNAT.....	23
KUVA 3-1. TUTKITUN A) KIERTOLEIJUKUIVURIN JA B) KIERTOLEIJUREAKTORIN RAKENNE (EINCO 2007A-B).....	38
KUVA 3-2. PELKKÄÄ LIETETTÄ POLTTAVAN PAKU-LAITOKSEN PROSESSIKAAVIO (TAPAUS 1).	39
KUVA 3-3. LIETETTÄ JA BIOPOLTTOAINETTA POLTTAVAN PAKU-LAITOKSEN PROSESSIKAAVIO, KUN YLIMÄÄRÄINEN LÄMPÖ KÄYTETÄÄN KAUKOLÄMMITYKSEEN (TAPAUS 2A).....	40
KUVA 3-4. LIETETTÄ JA BIOPOLTTOAINETTA POLTTAVAN LÄMPÖLAITOKSEN PROSESSIKAAVIO (TAPAUS 3).	40
KUVA 3-5. PELKKÄÄ LIETETTÄ POLTTAVAN PAKU-LAITOKSEN SUORITUSKYVYN RIIPPUVUUS LIETTEEN KUIVA-AINEPITOISUUDESTA SEKÄ A) TUOREHÖYRYN PAINEESTA, B) LÄMPÖTILASTA, C) VASTAPAINEESTA SEKÄ D) TURBIININ ISENTROOPPISESTA HYÖTYSUHTEESTA.	42
KUVA 4-1. PAKU-LAITOKSEN TUHKANPOISTOJÄRJESTELMÄ.....	47
KUVA 4-2. TUHKAN TALOUDELLINEN MERKITYS PAKU-PROSESSISSA.....	48
KUVA 5-1. PERINTEISEN HÖYRYVOIMALAITOSPROSESSIN SÄHKÖNTUOTANNON LOHKOKAAVIO.	57
KUVA 5-2. KAUPALLISTEN 400 kW HÖYRYTURBIININ ESTIMOIDUT ISENTROOPPIHYÖTYSUHTEET	59
KUVA 5-3. TURBOGENERAATTORIN TOTEUTUSVAIHTOEHDOT.....	60
KUVA 5-4. TURBOGENERAATTORIKONSTRUKTION SOVELTUVIEN GENERAATTOREIDEN HYÖTYSUHTEET.....	62
KUVA 5-5. SUURNOPEUSINDUKTIOGENERAATTORIN HYÖTYSUHDE KUORMITUKSEN FUNKTIONA.....	63
KUVA 5-6. TYYPILLINEN SUURNOPEUSINDUKTIOGENERAATTORIKÄYTTÖ.....	64
KUVA 5-7. TYYPILLINEN JÄNNITEVÄLIPIIRIVERKKOVAIHTOSUUNTAAJAJÄRJESTELMÄ.	65
KUVA 5-8. VAIHTEELLISEN JA VAIHTEETTOMAN TURBOGENERAATTORIKONSTRUKTION VERTAILU.	65
KUVA 6-1. EPÄTAHTIGENERAATTORIN VERKKOONLIITYNNÄN AUTOMAATION LOHKOKAAVIO.	72
KUVA 6-2. EPÄTAHTIGENERAATTORI SUORALLA VERKKOLIITYNNÄLLÄ, SUOJAUSKAAVIO.....	73
KUVA 6-3. TAHTIGENERAATTORIN VERKKOONLIITYNNÄN AUTOMAATION LOHKOKAAVIO.....	74
KUVA 6-4. SUORAAN VERKKOON KYTKETYN TAHTIGENERAATTORIN SUOJAUSKAAVIO.....	75
KUVA 6-5. KESTOMAGNEETTITAHTIGENERAATTORIN VERKKOONLIITYNNÄN AUTOMAATION LOHKOKAAVIO.	76
KUVA 6-6. SUORAAN VERKKOON KYTKETYN KESTOMAGNETTITAHTIGENERAATTORIN SUOJAUSKAAVIO.	77
KUVA 6-7. VERKKOONLIITYNTÄ TAAJUUSMUUTTAJALLA, AUTOMAATION LOHKOKAAVIO.	78
KUVA 6-8. TAAJUUSMUUTTAJAN AVULLA VERKKOON KYTKETYN GENERAATTORIN SUOJAUSKAAVIO.	79
KUVA 6-9. PAKU-CHP-LAITOKSEN OHJAAAMISEN PERIAATE	82
KUVA 6-10. PÄÄSÄÄDINKYTKENTÄ (MYÖTÄKYTKENTÄ).....	83
KUVA 6-11. HÖYRYN LÄMPÖTILASÄÄTÖ	83
KUVA 6-12. SYÖTTÖVEDEN JA LIERIÖKATTILAN LIERIÖN PINNANSÄÄTÖ	84
KUVA 6-13. PALAMISILMAN KORJAUSSÄÄTÖ SAVUKAASUN O ₂ -PITOISUUDEN PERUSTELLA	84
KUVA 6-14. TULIPESÄN PAINEN SÄÄTÖ.....	85
KUVA 6-15. PAKU-CHP-LAITOKSEN PÄÄSÄÄTÖKAAVIO	86
KUVA 7-1. LAITOSVAIHTOEHTOJEN TAKAISINMAKSUAJAN RIIPPUVUUS SÄHKÖN HINNASTA, LIETTEEN VASTAANOTTOMAKSUSTA SEKÄ SÄHKÖN JA LÄMMÖN HINTOJEN SUHTEESTA. LIETTEEN VASTAANOTTOMAKSU ON ILMOITETTU REFERENSSIKUIVA-AINEPITOISUUDELLE 20 M-%.	93
KUVA 7-2. LIETETTÄ JA BIOPOLTTOAINETTA POLTTAVAN JA SÄHKÖÄ SEKÄ KAUKOLÄMPÖÄ TUOTTAVAN PAKU-LAITOKSEN (TAPAUS 2A) VUOTUISET TUOTOT JA KUSTANNUKSET.....	94
KUVA 7-3. KYMENLAAKSON LAITOTESIMERKKIEN TAKAISINMAKSUAJAN RIIPPUVUUS SÄHKÖN HINNASTA, LIETTEEN VASTAANOTTOMAKSUSTA SEKÄ SÄHKÖN JA LÄMMÖN HINTOJEN SUHTEESTA.....	97
KUVA 7-4. ETELÄ-KARJALAN LAITOTESIMERKKIEN TAKAISINMAKSUAJAN RIIPPUVUUS SÄHKÖN HINNASTA, LIETTEEN VASTAANOTTOMAKSUSTA SEKÄ SÄHKÖN JA LÄMMÖN HINTOJEN SUHTEESTA.....	97
KUVA 8-1. AVOIMEN INNOVAATION PARADIGMA	104
KUVA 8-2. JATKUVAA PARANTAMISTA PIDEMMÄLLE.....	105
KUVA 8-3. PAKU:N ARVOKETJU	110

TAULUKOIDEN SISÄLLYSLUETTELO

TAULUKKO 2-1. KOLMEN ERIKOKOISEN LINGON TOIMINTA-ARVOJA JA NIIDEN ARVIOITUJA KUSTANNUSTIETOJA	12
TAULUKKO 2-2. LINKOJEN TOIMINTA-ARVOJEN LASKENNASSA APUNA KÄYTETTYJÄ ARVOJA	12
TAULUKKO 2-3. KOLMEN ERIKOKOISEN SUOTONAUHAPURISTIMEN TOIMINTA-ARVOJA JA KUSTANNUKSIA.....	14
TAULUKKO 2-4. LIETTEEN MEKAANISEEN KUIVAUKSEEN VAIKUTTAVIA SEIKKOJA.....	15
TAULUKKO 2-5. LIETTEELLE SOVELTUVAN RUUVIKULJETTIMEN TIETOJA.	16
TAULUKKO 2-6. LIETTEEN SIIRTOON SOVELTUVAN TERÄSPUTKEN TIETOJA.	18
TAULUKKO 2-7. KULJETUSKUSTANNUSTEN VAIHTELUA 30 TONNIN KUORMAKOOLLA	19
TAULUKKO 2-8. KULJETUSKUSTANNUSTEN VERTAILUA MATKAN PITUUDEN MUKAAN. (AHO, 13.6.2007.).....	19
TAULUKKO 2-9. KOUVOLAN LIETTEIDEN KULJETUSKUSTANNUKSIA.	19
TAULUKKO 2-10. LIETTEEN VARASTOSÄILIÖIDEN TIETOJA KOLMESSA KOKOLUOKASSA.	20
TAULUKKO 2-11. LIETTEEN SYÖTTÖÖN LIITTYVIÄ TIETOJA.	22
TAULUKKO 2-12. TARKASTELTAVAN LIETTEEN KUIVA-AINEEN ALKUAINEKOOSTUMUS.	23
TAULUKKO 2-13. TARKASTELTAVAN LIETTEEN OMINAISUUKSIENTÄ VALITUT ARVOT JA TYPILLISET VAIHTELUVÄLIT.....	23
TAULUKKO 2-15. EKOPARK: PERUSTAPAUKSEN LIETTEENKÄSITTELY ERI VAIHEINEEN JA KUSTANNUKSINEEN.	24
TAULUKKO 2-16. EKOPARK: POLTTOLAITOKSEN OSUUS PAKU-LAITOKSEN LIETTEENKÄSITTELYKUSTANNUKSISTA.	25
TAULUKKO 2-17. EKOPARK: KULJETUSKUSTANNUSTEN VAIHTELUA LIETTEEN SIIJOITUSPAIKAN MUKAAN.	26
TAULUKKO 2-18. EKOPARK: KULJETUSKERTOJEN JA VARASTOINNIN KUSTANNUSTEN VERTAILUA.	26
TAULUKKO 2-19. EKOPARK: KÄSITTELYKETJU ILMAN LIETTEEN MEKAANISTA KUIVAUSTA.....	27
TAULUKKO 2-21. EKOPARK: POLTTOLAITOKSEN OSUUS PAKU-LAITOKSEN LIETTEENKÄSITTELYKUSTANNUKSISTA.	28
TAULUKKO 2-22. EKOPARK: KULJETUSKERTOJEN JA VARASTOINNIN VAIKUTUS KUSTANNUKSIIN.	28
TAULUKKO 2-23. LPR: PERUSTAPAUKSEN LIETTEENKÄSITTELY ERI VAIHEINEEN JA KUSTANNUKSINEEN.	29
TAULUKKO 2-24. LPR: LINGON KAPASITEETIN VAIKUTUS LIETTEENKÄSITTELYKUSTANNUKSIIN.....	30
TAULUKKO 2-25. LPR: POLTTOLAITOKSEN OSUUS LIETTEENKÄSITTELYKUSTANNUKSISTA.	31
TAULUKKO 2-26. LIETTEENKÄSITTELYN KUSTANNUKSIA MEKAANISEN KUIVAUSLAITTEEN MUKAAN JAOTELTUNA.	32
TAULUKKO 3-1. LASKENNASSA KÄYTETYT LIETTEEN JA METSÄTÄHDEHAKKEEN KUIVA-AINEIDEN POLTTOTEKNISET OMINAISUUDET.....	41
TAULUKKO 3-2. PROSESSIMALLINNUKSEN LÄHTÖARVOT (1 PELKKÄÄ SÄHKÖÄ TUOTTAVA PAKU-LAITOS, 2A JA 2B SÄHKÖÄ JA LÄMPÖÄ TUOTTAVAT PAKU-LAITOKSET, JOSSA LÄMPÖ KÄYTETÄÄN KAUKOLÄMMITYKSEEN TAI PELLETIN RAAKA-AINEEN KUIVAUKSEEN, 3 LÄMPÖÄ TUOTTAVA LÄMPÖLAITOS).....	41
TAULUKKO 3-3. LAITOSVAIHTOJEN SUORITUSKYKY.	42
TAULUKKO 4-1. HAITALLISTEN AINEIDEN OMINAISUUKSIA.....	49
TAULUKKO 4-2. SUOMALAISEN YHDYSKUNTALIIETTEEN OMINAISUUKSIA.	49
TAULUKKO 4-3. TUHKALANNOITTEIDEN TYPPIINIMET JA TYPPIKOHTAISET VAATIMUKSET.	52
TAULUKKO 4-4. HAITALLISTEN AINEIDEN ENIMMÄISPITOISUUDET TUHKASSA.	52
TAULUKKO 4-5. KAASTOPAIKKASIIJOITUKSEN LIUKOISUUDEN RAJA-ARVOT TAVANOMAISELLE JÄTTEELLE SUOMESSA	53
TAULUKKO 5-1. KARTOITUKSESSA KÄYTETYT TUOREHÖYRYN TILA-ARVOT.	58
TAULUKKO 6-1. VERKKOONLIITYNTÄAUTOMAATION HANKINTAKUSTANNUSARVOT.....	81
TAULUKKO 7-1. KONEIDEN JA LAITTEIDEN KUSTANNUSRYHMÄN KOMPONENTIT SEKÄ HINTATIETOJEN LÄHDE.	90
TAULUKKO 7-2. INVESTOINTIKUSTANNUKSEN MUODOSTUMINEN.....	90
TAULUKKO 7-3. LAITOSVAIHTOEHTOJEN INVESTOINTIKUSTANNUKSET.	90
TAULUKKO 7-4. TALOUSMALLINNUKSEN LÄHTÖARVOT.....	92
TAULUKKO 7-5. LAITOTESIMERKKIEN LASKENNASSA KÄYTETYT LIETTEEN JA RINNAKKAISPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET.....	95
TAULUKKO 7-6. LAITOTESIMERKKIEN LIETE- JA POLTTOAINEMÄÄRÄT, OMAKÄYTTÖTEHOT SEKÄ SUORITUSARVOT.....	96
TAULUKKO 7-7. LAITOTESIMERKKIEN INVESTOINTIKUSTANNUKSET.....	96

1 JOHDANTO

Tutkimushanke ”Hajautetun energiatuotannon modulaarinen yhdyskunnan sivuainevirtoja hyödynnettävä CHP-laitos” käynnistyi Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa 17.1.2007 ja päättyi 30.8.2008. Hankkeen keskeisenä tavoitteena oli luoda tutkimuksellisesti sovelluskonsepti hyödyntämään uutta poltto- ja generaattoriteknologiaa yhdyskunnan sivuainevirtojen hyödyntämiseksi lämmön ja sähkön yhteistuotannossa pienikokoisessa laitoksessa. Hankkeessa tutkittiin yhdyskuntaliettä sekä biopolttoaineita ja jäteperäisiä polttoaineita hyödyntävän modulaarisen pienvoimalaitoksen sähkön- ja lämmöntuotannon teknisiä ja taloudellisia edellytyksiä tulevaisuuden markkinoilla ydinteknologioiden muodostamassa arvoverkossa.

Tutkittava laitospkonsepti perustuu viiteen erilliseen toisiinsa kytkettävään moduuliin, jotka muodostavat pienen kokoluokan modulaarisen tuotantolaitoksen hajautettuun sähkön ja lämmöntuotantoon. Laitospkonseptin moduulit muodostuvat polttoaineen kuivauksesta, poltosta, sähköä ja lämpöä tuottavasta turbogeneraattorista, säätötekniikasta ja verkkoonliittynästä.

Tutkimushanke jakautui kahteen erilliseen tutkimuskokonaisuuteen: tekniseen tutkimukseen ja liiketoimintatutkimukseen. Nämä kokonaisuudet muodostuivat seuraavanlaisista tutkimusosa-alueista:

1. lietteen käsittely
2. höyryprosessin mallintaminen
3. tuhkan hyötykäyttö
4. automaatio ja verkkoonliittynä
5. talousmallinnus
6. liiketoimintakonsepti

Tekninen tutkimus sisältää polttoainevaihtoehtojen ja niiden yhdistelmien hyötykäyttömahdollisuuksien ja kuljetusprosessien sekä jäljelle jäävän tuhkan hyötykäyttömahdollisuuksien tarkastelun, teknistaloudellisen prosessilaskennan, optimaalisen sähkönkäyttötekniikan ja automaation valinnan ja suunnittelun sekä laitoksen etähallinnan suunnittelun. Lisäksi hankkeessa määriteltiin energiantuotantopotentiaali sekä arvioitiin koko laitoksen teknistaloudellisen valmius eli selvitettiin modulaarisen edellä mainittuja tekniikoita yhdistävän laitoksen valmistukseen ja muuhun toimintaan tarvittavat aineettomat ja aineelliset resurssit sekä niiden kustannusrakenne komponentti- ja järjestelmätasolla. Liiketoimintatutkimuksessa rakennettiin kaupallisesti hyödynnettävä liiketoimintakonsepti yhdistämällä makrotason kilpailuympäristötutkimus ja mikrotason resurssitutkimus keskenään.

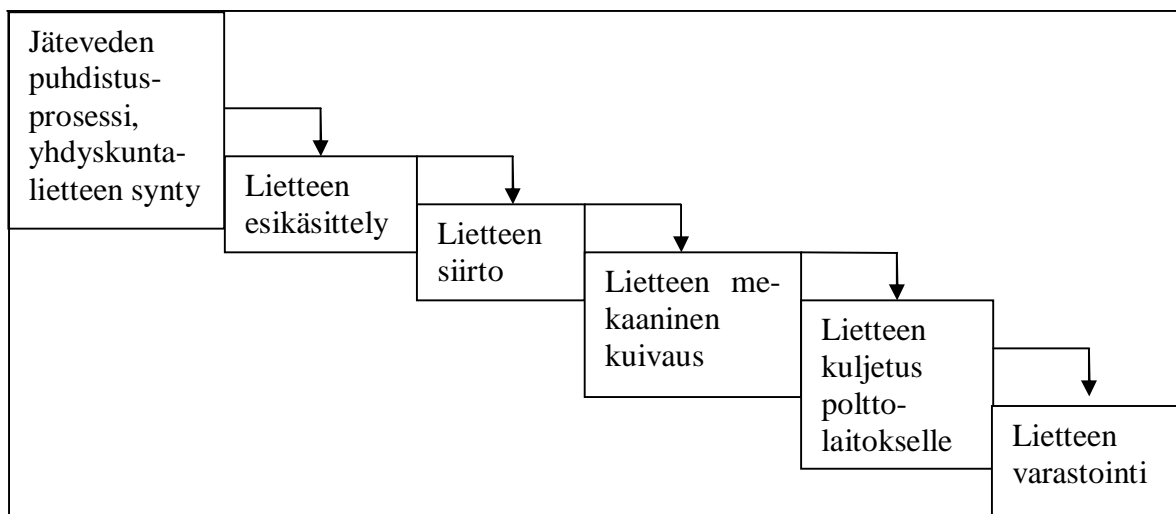
Loppuraportissa esitellään erikseen tutkimushankkeen eri osa-alueet ja niiden tärkeimmät tulokset. Raportissa paikoittain käytetyllä PAKU -konseptillä tai PAKU -prosessilla tarkoitetaan yhdyskuntaja teollisuuslietteiden yms. polttoainevaihtoehtojen kuivaukseen ja polttoon käytettävän tekniikan sekä sähkön ja lämmön tuotannon yhdistävää prosessia, jota voidaan hyödyntää hajautetussa energiantuotannossa. PAKU -käsite tarkoittaa ”lietteestä liiketoimintaa”.

2 YHDYSKUNTALIETTEEN KÄSITTELY ENNEN TERMISTÄ KUIVAUSTA JA POLTTOA

Suomen yhdyskunnissa muodostuu jätevettä vuosittain noin 500 miljoonaa kuutiometriä, mikä tarkoittaa 100 kuutiometriä asukasta kohti. Yhdyskunnissa syntyvä jätevesi käsitellään kunnallisissa puhdistamoissa useimmiten aktiivilietemenetelmällä, jonka tuloksena syntyy primääri- ja sekundääri-lietettä. Yhteensä märkää lietettä syntyy noin miljoona kuutiometriä vuodessa, kuiva-aineksi muutettuna määrä on noin 150 000 tonnia. (Ympäristöministeriö 2005).

Lietteitä käsitellään tiivistämällä ja erottamalla vettä esimerkiksi mekaanisesti. Lietteet voidaan myös stabiloida ja kuivata. Tämän jälkeen liete voidaan hyödyntää esimerkiksi maanparannusaineena tai polttaa joko erikseen tai yhdessä muiden polttoaineiden kanssa. Tällä hetkellä Suomessa suurin osa yhdyskuntalietteestä kompostoidaan ja käytetään edelleen eri tarkoituksiin. Käsittelyllä voidaan vähentää kuljetus- ja käsittelykustannuksia sekä lietteestä syntyviä hajuhaittoja. Arvokkaat aineet, kuten typpi ja fosfori, on mahdollista ottaa käsittelyllä talteen ja ympäristölle haitallisten aineiden määrää puolestaan vähentää. Tärkeintä on kuitenkin mahdollistaa lietteen turvallinen loppusijoitus siten, että vältetään ihmisiin kohdistuvat terveyshaitat ja elinympäristön saastuminen.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan lietteen ominaisuuksia, käsittelyketjua ja kuljetusta polttolaitokselle. Tärkeimmät lietteenkäsittelyvaiheet esitetään kuvassa 2-1.

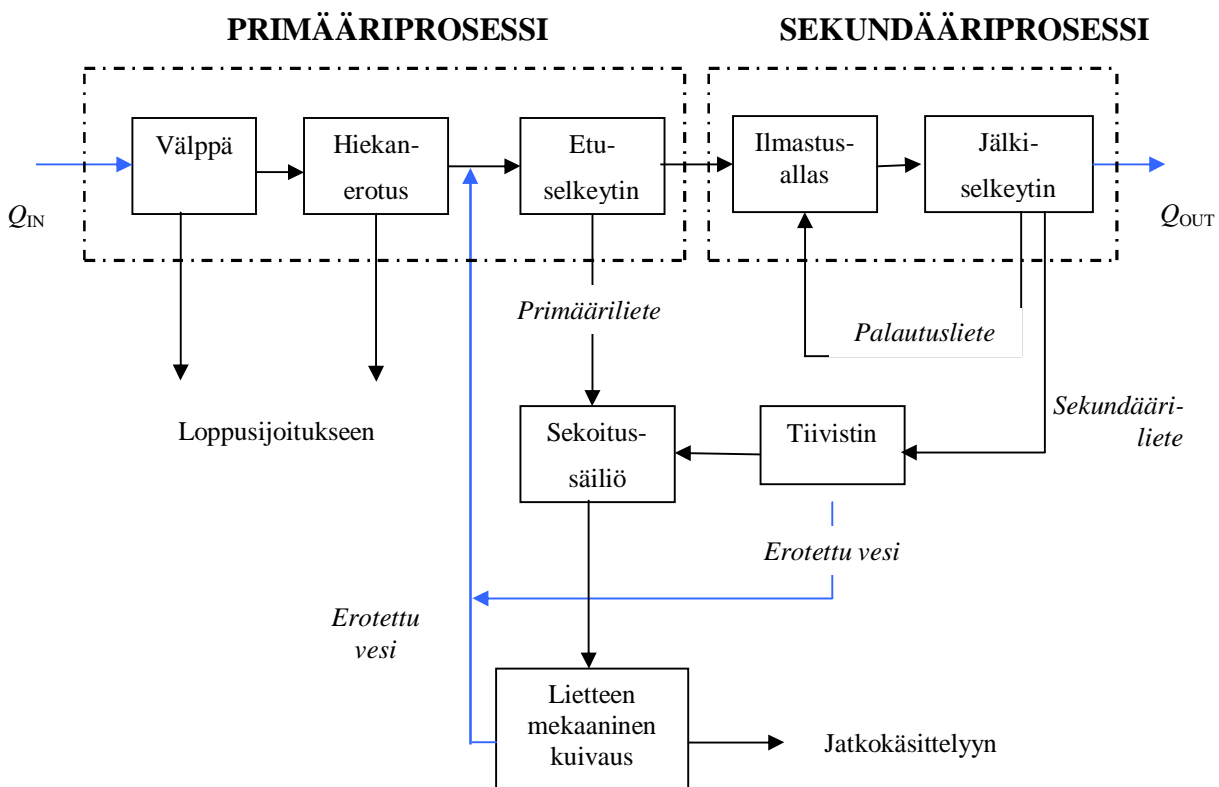


KUVA 2-1. TUTKIMUKSESSA TARKASTELTAVA LIETTEENKÄSITTELYKETJU PÄÄPIIRTEISSÄÄN

Tässä tutkimusosiossa tuodaan esiin vaihtoehdot kahden PAKU-hankkeen esimerkkitapauksen: Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy:n ja Anjalankosken Ekoparkin tarpeisiin. Tutkimuksessa kartoitetaan Kaakkois-Suomen alueen lietemäärät ja selvitetään, mitkä lietevirrat voidaan käsitellä PAKU -laitoksessa. Lisäksi tutkitaan, missä muodossa liete saa mennä termiseen kuivaukseen eli kuinka suuri on lietteen kuiva-ainepitoisuuden oltava ennen termistä kuivausta. Lietteen optimaalisimman kuiva-ainepitoisuuden määrittely on PAKU prosessin toimivuuden kannalta ratkaisevaa. Lietteen muodon lisäksi tutkimuksessa selvitetään lietteenkäsittelyketjun muuntelukyky. Tällöin lietteen termisen kuivauksen ja polton oletettiin olevan vakioita ja kuhunkin tilanteeseen optimoitiin parhaiten sopivat lietteenkäsittely-yhdistelmät. Näin esimerkiksi lietemäärien vaihteluihin voidaan varautua etukäteen.

Suurin osa Suomen jätevedenpuhdistamoista käyttää nykyisin biologiskemiallista aktiivilietemennettä. Lounais-Suomen ympäristökeskuksen alueella 70 % puhdistamoista käyttää kyseistä menetelmää. Koko Suomen mittakaavassa osuus on todennäköisesti samaa luokkaa. Muita jätevedenkäsittelymenetelmiä ovat muun muassa biologiskemiallinen bioroottorilaitos ja biologiskemiallinen jälkisaostuslaitos. Myös kemiallisen esisaostuksen, biologisten suodattimien ja typenpoiston yhdistelmää käytetään. (Lehtoranta 2006, 1-2.) Lähinnä pienet puhdistamot toimivat jonkin muun kuin aktiivilieteprosessin turvin, joten aktiivilietemennellä käsiteltäneiden Suomessa syntyvistä yhdyskuntajätevesistä yli 70 %.

Aktiivilietemennemmän yleiset yksikköprosessit esitetään kuvassa 2-2. Kuvan tapaiseen jätevedenkäsittelyyn kuuluvat primääri- ja sekundaariprosessit, joiden jälkeen suoritetaan lietteen käsittely. Puhdistamolle tullessaan jätevesi menee ensin välppälle, jossa siitä erottuvat kaikki suurehkot partikkelit. Tämän jälkeen vuorossa on hiekanerotus siihen tarkoitettussa altaassa. Hiekka laskeutuu painovoiman johdosta altaan pohjalle, josta se kerätään ja kuljetetaan eteenpäin. Välppä- ja hiekanerotusjäte loppusijoitetaan tavallisesti kaatopaikalle. Tämän jälkeen vesi virtaa etuselkeyttimelle, jossa siitä laskeutumalla erottuu kiintoainesta. Tätä erottuvaa ainesta kutsutaan primäärilietteeksi ja se johdetaan sekoitussäiliöön. Jäljelle jäänyt vesi virtaa etuselkeyttimeltä ylikaatona eteenpäin. Tämän mekaanisen käsittelyosuuden läpi käytyään jätevedestä on poistunut parhaimmillaan yli 50–70 % kiintoaineksesta ja 25–40 % biologisesta hapenkulutuksesta (BOD₅). Etuselkeyttimen pohjalta poistettava primääriliete sisältää 3–5 % kuiva-ainetta, joka on suurelta osin orgaanista ainesta. (Lohiniva et al. 2001, 17-18.)



KUVA 2-2. AKTIIVILIETEPROSESSIN YLEISET OSAT.

Primääriprosessin jälkeen vesi menee sekundaariprosessin ensimmäiseen vaiheeseen eli ilmastukseen. Ilmastuksesta vesi siirtyy jälkiselkeyttimelle, jossa siitä laskeutetaan muodostunutta biomassaa ja vedessä vielä jäljellä olevaa kiintoainetta. Suurin osa jälkiselkeyttimellä erotetusta lietteestä jatkaa matkaansa tiivistimelle, jossa edelleen nostetaan seoksen kiintoainepitoisuutta erottamalla

vettä. Tiivistimeltä liete johdetaan sekoitussäiliöön primäärilietteen seuraksi ja erottunut vesi puolestaan takaisin etuselkeyttimelle. Sekoitussäiliössä lietteet sekoitetaan, jonka jälkeen massa siirretään mekaaniseen vedenerotukseen. Erotettu vesi johdetaan takaisin etuselkeyttimelle yhdessä tiivistimeltä tulevan veden kanssa. Prosessissa syntynyt, kuiva-ainepitoisuudeltaan noin 20 prosenttinen liete voidaan ohjata jatkokäsittelyyn tai hyödyntää sellaisenaan esimerkiksi polttamalla. (Lohiniva et al. 2001, 17-18)

Aktiivilieteprosessissa fosfori saostetaan yleensä kemiallisesti ferro- tai ferrisulfaatin avulla. Kemiakaalia voidaan lisätä veteen ja lietteeseen useassakin vaiheessa, mutta yleisimmin lisäys tapahtuu ilmastuksessa sekä sekoitussäiliön jälkeen. Jätevedessä oleva typpi voidaan puolestaan poistaa erillisellä denitrifikaatio-nitrifikaatio-prosessilla, jossa nitraatit pelkistetään typeksi (N₂) heterotrofisten bakteerien avulla. Kyseiset bakteerit toimivat lietteen orgaanisen osan hiiltä hyödyntäen. (Lohiniva et al. 2001, 17-18.)

2.1 Lietteen käsittelyn toimintaparametri- ja kustannustarkastelu

Lietteen esikäsittelyn, vedenerotuksen, kuivauksen ja muiden tekniikoiden ohella lietteen varastointi, siirto ja kuljetus sekä syöttö- ja purkumenetelmät vaikuttavat kokonaisprosessin toimivuuteen ja kustannuksiin. Tässä kappaleessa kiinnitetään erityinen huomio näiden osa-alueiden laitteiden ja menetelmien toimintaparametreihin sekä kustannuksiin. Tutkimuksen investointilaskelmissa on kustannusten osalta käytetty takaisinmaksuaikana 10 vuotta ja korkokantana 10 %.

2.2.1 Mekaaninen vedenerotus

Koska Suomessa valtaosa kunnallisista puhdistamoista käyttää lietteen mekaaniseen kuivaukseen linkoa, on tässä tutkimuksessa perusteltua tarkastella lingon toimintaa ja ominaisuuksia. Toinen paljon käytetty laite on suotonauhapuristin. Esimerkiksi ruuvipuristin sen sijaan ei ole laajasti käytössä yhdyskuntalietteiden käsittelyssä. Monia käytössä olleita ruuveja korvataan tällä hetkellä linkoilla.

2.2.2 Linko

Lingon mitoituksessa olennaista on tietää käyttöaika eli onko linko jatkuvatoiminen vai pysäyteläänkö sitä usein. Normaali käytäntö on ajaa linkoja arkisin jatkuvatoimisesti ja pysäyttää korkeintaan öisin. Eräs tyypillinen toiminta-aika on 16 tuntia vuorokaudessa, viisi vuorokautta viikossa, mikä tarkoittaa noin 4200 tuntia vuodessa. Lingon toiminnan kannalta on parempi, jos laite saa käydä mahdollisimman paljon. Pysäytykset ja käynnistykset kuormittavat laitetta turhaan. (Söderlund, 11.6.2007.)

Lingon sähkömoottorin teho ei kerro suoraan laitteen tyypillistä käyttötehoa, joka on karkeasti puolet moottorin tehosta. Moottorit ovat ylimitoitettuja käynnistyksen vaatiman tehon takia. Taulukoissa esitetyt tehojen arvot pätevät parhaiten jatkuvassa käytössä oleville linkoille. Lingon asennus laskutetaan yleensä erikseen, koska asennuksen vaativuus vaihtelee paljon tilanteesta riippuen. Lingon asentaminen valmiille paikalle, betonialustalle vie noin viikon verran aikaa yhdeltä työntekijältä. Työkustannus voisi siis arviolta olla noin 5000 € Lietteen linkokuivaus vaatii aina polymeeriä, jonka tyyppi ja tarve määräytyvät lähinnä lietteen ominaisuuksien mukaan. Tavallisesti polymeeriä

kuluu 2-6 kg kuivattua lietetonna kohden. Lingon jatkuva käyttö vaatii normaalisti laakerin vaihdon vuosittain. Yleisemmin voidaan sanoa, että aina 8000 käyttötunnin tultua täyteen tarvitaan kaksi päivää kestävä huolto. Isoille ja keskikokoisille lingoille huoltokustannukset ovat noin 3000 € josta työn osuus on 2000 € ja uusien osien 1000 €. Pienempien linkojen omistajat selviävät luonnollisesti pienemmillä huoltokustannuksilla. (Söderlund, 11.6.2007.)

Pyöritettäessä linkoa nopeammin, vedenerotus heikkenee. Samoin käy, jos nostetaan syöttökapasiteettia. Näillä tavoilla olisi mahdollista vaikuttaa mekaanisesti kuivatun lietteen kuiva-ainepitoisuuteen. Merkittäviä eroja ei kuitenkaan voida lingolla aikaansaada eikä energiankulutus välttämättä putoa käytettäessä linkoa vähemmän. (Nuutinen, 12.6.2007.) Kyse on pienistä eroista, mutta linkoa joudutaan joka tapauksessa pyörittämään, koska lingolle on suotuisaa käydä yhtäjaksoisesti. Tämän vuoksi vähäisempi linkous voisi olla ongelmallista tai ainakin se täytyisi suunnitella ja toteuttaa huolella.

Taulukossa 2-1 on esitetty kolmen erikokoisen lingon toiminta-arvoja ja niiden perusteella arvioituja käyttöaikoja ja sähkönkulutuksia sekä investointi- ja huoltokustannuksia. Investointikustannukset sisältävät kuivausjärjestelmän kokonaisuudessaan. Hintaan sisältyvät muun muassa moottori, automatiikka, polymeeriyksikkö, lietepumppu, siirtoruuvi tai -pumppu, tarvittava pieni pituus putkea sekä asennus, jonka osuus on noin 10 000 €. Hinnat ovat esitetty verottomina.

Lingon kapasiteetti ei ole tiukasti sidottu vuotuisen kuivattavaan lietemäärään., Lingon koko vaihtelee päivittäisestä käyttöajasta riippuen. Taulukon 2-1 Laskelmien ensisijaisena lähtökohtana on käytetty lingon vuotuista tuottoa (20 % liete). Mitoituksessa on käytetty lisäksi muutamia arvioituja lukuja, jotka ilmenevät taulukosta 2-2. Suluissa olevat prosenttiarvot kuvaavat lietteen kuiva-ainepitoisuutta kyseisessä vaiheessa.

Taulukko 2-1. Kolmen erikokoisen linkon toiminta-arvoja ja niiden arvioituja kustannustietoja. (Stenberg, 12.6.2007; Söderlund, 11.6.2007.)

	Yksikkö	LINKO 1	LINKO 2	LINKO 3
Syöttö (5 %)	[m ³ /h]	5	10	20
Syöttö (5 %)	[m ³ /d]	92	154	231
Tuotto (20 %)	[m ³ /d]	27	45	68
Tuotto (20 %)	[m ³ /a]	7059	11 765	17 647
Tuotto (20 %)	[t/a]	6000	10 000	15 000*
Käyttöteho**	[kW]	10	20	30
Käyttöaika	[h/d]	24	15,4	7,7
Käyttöaika	[h/a]	6240	4004	2002
Sähkönkulutus	[MWh/a]	62	80	60
Sähkönkäytön kustannukset	[€a]	4370	5600	4200
Investointikustannus	[€]	60 000	90 000	130 000
Investoinnin vuosikustannus	[€a]	9770	14 650	21 160
Polymeerin kulutus	[t/a]	12	20	30
Polymeerikustannukset	[€a]	42 000	70 000	105 000
Huoltokustannukset	[€a]	5000	5000	5000
Kokonaisvuosikustannus	[€a]	61130	95 250	135 360
Kustannus kuivattua liete-tonnia kohden	[€/t/a]	10,20	9,50	9,00

* Linkomalli tarkoitettu lietemäärälle 20 000 t/a, sovellettu määrälle 15 000 t/a.

**Sähkösäätöteho on hieman todellista käyttötehoa korkeampi.

Taulukko 2-2. Linkojen toiminta-arvojen laskennassa apuna käytettyjä arvoja.

			Huomioita
Lietteen tiheys	[t/m ³]	0,85	
Mekaanisen kuivauksen käyttö	[d/a]	260	Käytössä arkipäivisin
Sähkön markkinahinta	[€MWh]	70	
Investoinnin pitoaika, n	[a]	10	
Laskentakorko, i	[%]	10	
Annuiteettitekijä, a_n	[-]	0,11746	$a_n = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$
Polymeerin kulutus	[kg/t]	2*	Kuivattua liete-tonnia kohden
Polymeerin hinta	[€/kg]	3,5*	

* (Mikkola, 27.6.2007.)

Kolmen erikokoisen lingon kustannusvertailua tarkasteltaessa huomataan, että käsiteltävien lietemäärien kasvaessa yksikkökustannukset pienenevät. Lingon valintaan kuitenkin vaikuttaa oleellisesti juuri lietemäärä, joka normaalisti on melko vakio tietyllä alueella.

Lietteen mekaanisen kuivauksen niin sanottu vähentäminen eli lietteen jättäminen kosteammaksi kuin tarvitsisi, ei juuri vähennä kuivauksen energiankulutusta. Lingon kohdalla suurin syy tähän on moottoreiden toimintatapa sekä lingon oman massan suhde kuivattavaan massaan. Nykyisin lingossa on rummun käyttömoottori sekä kierukkamoottori, joka jarruttaa linkoa. Näiden yhteisvaikutuksena tehonkulutus on noin 20 % vähemmän kuin aiemmin yksimoottorisilla lingoilla. Vähennä johtuu juuri jarruttavasta moottorista, mikä tarkoittaa, etteivät ainakaan pienemmät pyörimisnopeudet vähennä energiankulutusta. Lisäksi suurin osa käyttöenergiasta kuluu massaltaan noin 200 kg:n lingon pyörytykseen, joten sisällä pyörivän massan määrällä ei ole vaikutusta. Stenbergin mukaan on huomattava myös, että kosteaksi jätettävä liete on kuivaa lietettä tarttuvampaa, mikä aiheuttaa omat ongelmansa lingon toiminnassa. (Stenberg, 12.6.2007) Edellä esitettyjen seikkojen valossa näyttää siltä, että tarvittaisiin kokeellisia mittauksia, jotta saataisiin selville lingon energiankulutus ajotavan vaihdellessa.

2.2.3 Suotonauhapuristin

Pienten kuntien puhdistamoilla suotonauhapuristimella saatetaan ajaa vain kahtena tai kolmena päivänä viikossa, noin 8 h/d. Suuremmilla laitoksilla puolestaan käyttö voi olla päivittäistä, noin 16 h/d. (Suvanto, 11.6.2007.)

Taulukossa 2-3 on esitetty kolmen erikokoisen suotonauhapuristimen toiminta-arvoja ja niiden perusteella arvioituja käyttöaikoja ja sähkönkulutuksia eri lietemäärille. Laitetoimittajan esittämät investointikustannukset sisältävät kuivausjärjestelmän kokonaisuudessaan. Hintaan sisältyvät muun muassa polymeeriyksikkö, lietepumppu, siirtoruuvi tai -pumppu, tarvittava pieni pituus putkea sekä asennus, jonka osuus on noin 10 000 € Hinnat ovat esitetty verottomina. (Stenberg, 12.6.2007.)

Taulukko 2-3. Kolmen erikokoisen suotonauhapuristimen toiminta-arvoja ja kustannuksia. (Stenberg, 12.6.2007.)

	Yksikkö	Suotonauha- puristin 1	Suotonauha- puristin 2	Suotonauha- puristin 3
Syöttö (5 %)	[m³/h]	5	10	15
Syöttö (5 %)	[m ³ /d]	92	154	231
Tuotto (20 %)	[m ³ /d]	27	45	68
Tuotto (20 %)	[m ³ /a]	7060	11 770	17 650
Tuotto (20 %)	[t/a]	6000	10 000	15 000
Käyttöteho	[kW]	11	15	19
Käyttöaika	[h/d]	18,4	15,4	15,4
Käyttöaika	[h/a]	4780	4000	4000
Sähkönkulutus	[MWh/a]	53	60	76
Sähkönkäytön kustannukset	[€a]	3680	4200	5330
Investointikustannus	[€]	80 000	95 000	110 000
Investoinnin vuosikustannus	[€a]	13 020	15 460	17 900
Polymeerin kulutus	[t/a]	6	10	15
Polymeerikustannukset	[€a]	21 000	35 000	52 500
Huoltokustannukset	[€a]	400	400	400
Kokonaisvuosikustannus	[€a]	38 100	55 070	76 130
Kustannus kuivattua liette- tonnia kohden	[€/t/a]	6,40	5,50	5,10

Lietteen mekaaninen kuivaus on sinällään melko valmis ja pysyvä kokonaisuus, jota on vaikea mennä muuttamaan. Sekä lingon että suotonauhapuristimen tapauksessa saadaan tiettyyn kuiva-ainepitoisuuteen kuivattua lietettä. Molemmilla päästään tavanomaista suomalaista yhdyskuntalietettä käsiteltäessä keskimäärin 20 %:n kuiva-ainepitoisuuteen. Tosin pitoisuus vaihtelee huomattavasti lietteen laadusta riippuen, joten eri puhdistamoilla voidaan päästä hyvinkin erisuuruisiin kuiva-ainearvoihin. Joissain tapauksissa kunnallisen puhdistamon liete on hyvin hankala kuivata mekaanisesti. Esimerkiksi meijerivesiä käsittelevän laitoksen lietteenkuivauksessa saatetaan saavuttaa keskimäärin vain 10 %:n kuiva-ainepitoisuus eikä käytännössä millään keinolla päästä parempiin lukemiin. (Nuutinen, 12.6.2007.) Taulukkoon 2-4 on koottu tärkeimpiä lietteen mekaaniseen kuivaukseen liittyviä tekijöitä.

Taulukko 2-4. Lietteen mekaaniseen kuivaukseen vaikuttavia seikkoja.

Tekijöitä, jotka vaikuttavat:		Muuta huomioitavaa
Kuivauksen energiankulutukseen	Lietteen kuiva-ainepitoisuuteen	
<ul style="list-style-type: none"> • Laitteen käyttöaika [h/d] ja [d/a] • Kapasiteetti/teho vs. käsiteltävä lietemäärä 	<ul style="list-style-type: none"> • Lietteen laatu ja ominaisuudet tapauskohtaisesti • Polymeerin kulutus • Lingon pyörimisnopeus • Suotonauhapuristimen viiran nopeus • Viiran pesu (ei saisi tukkeutua) 	<ul style="list-style-type: none"> • Linko on yleinen kunnallisilla puhdistamoilla, hyvä käyttövarmuus ja -mukavuus • Yksikkökustannukset [€/t] pienenevät käsiteltävän määrän kasvaessa

2.2.4 Siirto ja kuljetus

Lietettä joudutaan normaalisti siirtämään lyhyehköjä matkoja sekä kuljettamaan pidempiä matkoja. Näitä kahta käsitettä on tässä työssä käytetty kuvaamaan kahta erityyppistä lietteen liikutusta paikasta toiseen. Siirtoa tapahtuu esimerkiksi siilon ja mekaanisen kuivauksen välillä vaikkapa ruuvikuljettimella. Kuljetusta puolestaan tarvitaan esimerkiksi puhdistamon ja polttolaitoksen välillä, kun ne eivät sijaitse vierekkäin. Tällöin on siis kyse autokuljetuksesta.

Yleisesti periaate on, että mitä kuivemmaksi liete voidaan kuivata ennen siirtoa, sen paremmat ovat siirtomahdollisuudet ja sen helpompi siirto on järjestää, koska etenkin pintakosteus aiheuttaa käsittelyongelmia. Ongelmana lietteen liikuttelussa Suomen mittakaavassa on se, että volyymit ovat pieniä. Vaikka useampi puhdistamo sijaitsisi lähekkäin, ja lietteet koottaisiin yhteen, määrät jäävät silti Suomen mittakaavassa pieniksi. Yleisesti ottaen on helpompi siirrellä suuria määriä materiaalia. Pienille määrille tehdyt laitteistot ovat herkkiä ja tästä aiheutuu hankaluuksia (Suvanen, 16.4.2007). Tällaisesta on vähän kokemusta, mutta juuri siksi kannattaa tutkia asiaa. Onhan aina mahdollista, että löytyykin hyvin sopiva ratkaisu pienille massavirroille.

Lietteenkäsittelyn kemikaaleista voi olla apua lietteenkäsittelyyn, joskin ne ovat suurehko ja ylimääräinen kustannustekijä, mikäli niitä joudutaan lietteeseen lisäämään vain kuljetuksen takia. Lisäksi ne tuovat omat ongelmansa polton jälkeiseen tuhkaan ja toisaalta lietemäärät kasvavat. Kokonaislaitosinvestoinnissa kuljetinjärjestelmän kustannukset eivät ole suuri osa esimerkiksi varastointiratkaisuihin verrattuna (Kurronen & Suvanen, 16.4.2007).

2.2.5 Kuljettimet

Lietteen lyhyisiin siirtomatkoihin soveltuu parhaiten suljettu ruuvikuljetin tai pumppaus putkea pitkin. Taulukossa 2-5 esitellään kahden eripituisen ruuvikuljettimen tietoja.

Taulukko 2-5. Lietteelle soveltuvan ruuvikuljettimen tietoja. (Suvanen, 27.7.2007.)

Kuljettimen pituus	[m]	5	15
Moottorin teho	[kW]	1,5	2,2
Investointikustannus	[€]	10 000	23 000
Investoinnin vuosikustannus	[€/a]	1 180	2 700

Kuljettimen kapasiteettia voidaan säädellä melko joustavasti kuljettimen leveyden mukaan tapauskohtaisesti. Kuvan 2-3 kapasiteetit on ilmoitettu pyörimisnopeudella 25 r/min, 100 %:n täyttöasteella. Oikea pyörimisnopeus valitaan tapauskohtaisesti siirrettävän materiaalin ominaisuuksien mukaan. (Laitex, 2007a,)

leveys mm	kapasiteetti m ³ /h	keskiputken halkaisija mm	suositeltu ruovin max. pituus
315	25	168,3	6 000
400	50	219,1	7 500
500	90	273,0	8 500
630	175	323,9	9 000
800	350	406,4	10 000
1000	700	508,0	11 000

KUVA 2-3. RUUVIKULJETTIMEN TIETOJA. (Laitex, 2007a, 2.)

Kuljetintyypeistä lietteelle soveltuu parhaiten ruostumattomasta teräksestä valmistettu ruuvikuljetin, joka pitää hajut sisällään. Kuvassa 2-4 esiintyy tällaisen kuljettimen ruuviosa. Avoimia kuljettimia, kuten hihnakuljetinta, tulisi välttää lietteenkäsittelyssä. Ruuvikuljetin ei myöskään ole kallis ratkaisu PAKU-laitoksen tyyppisiin tarpeisiin. Hihnakuljetin tosin olisi edullisin, mutta se ei oikeastaan sovellu yhdyskuntalietteille. Tavallisella ruuvikuljettimella voidaan siirtää lietettä korkeintaan 15 metrin matka. Tämän pidemmällä väleillä ilmenee jo mekaanisia ja pakkautumisongelmia. Yleinen ohje kuljetuksen maksimipituudesta on 12 kertaa kuljettimen halkaisijan pituus. Jos siirrettävä etäisyys on enemmän kuin 6-7 metriä, on parasta käyttää niin sanottua akselitonta kuljetinta, jossa on ainoastaan spiraali. Tällöin asiallinen kuljetusetäisyys on noin 20 metriä, mutta pidemmätkin etäisyydet, aina 50 metriin asti, ovat mahdollisia. Hyvin pitkille välimatkoille joudutaan valitsemaan esimerkiksi hihnakuljetin. (Suvanen, 24.5.2007) Lieteruuvi eroaa tavallisesta ruuvista siinä, että se ei sisällä ollenkaan keskiputkea vaan pelkän kierteen. Lietteen tarttumista voidaan hallita pyörimisnopeudella (Kurronen, 16.4.2007).



KUVA 2-4. RUUVIKULJETTIMEN RUUVI. (Laitex Oy 2007b.)

Kouvolan jätevedenpuhdistamolla on käytössä ruuvikuljettimia, joissa ei ole keskiputkea vaan ainoastaan kierre. Ne eivät myöskään ole täysin umpinaisia. Lietteen lisäksi neljän metrin pituisella ruuvilla kuljetetaan esimerkiksi välpejätettä ja lyhyemmät ruuvit ovat käytössä alumiinisulfaattisiiloilla. Kyseiset kuljettimet ovat kestäneet hyvin kymmenisen vuotta ilman suurempia korjailuja. (Nyyssönen, 28.5.2007.) Kuvassa 2-5 näkyy puhdistusprosessin alkupäässä vettä ja sakokaivolietettä ylöspäin siirtävä ruuvi.



KUVA 2-5. SIIRTORUUVI PUHDISTUSPROSESSIN ALKUPÄÄSSÄ. (Nyyssönen, 29.5.2007).

Jos liete halutaan siirtää pienessä kuiva-ainepitoisuudessa, pumppaus on yksinkertainen vaihtoehto. Raakalietepumppuina sekä linkojen syöttöpumppuina käytetään pakkosyöttöisiä monopumppuja, joiden maksiminostokorkeus on noin 25 metriä. Kouvolan Mäkikylän puhdistamolla etuselkeytyksen ja tiivistämön korkeusero on kaksi metriä ja putkisto kertyy vajaat 10 metriä. Tiivistämön ja linkojen korkeusero on 15 metriä ja putkisto 60 metriä. Lingoilta liete siirretään ruuvikuljettimella siiloihin. Esimerkiksi Kouvolassa raakalietepumppujen käyttöaika on 10-20 min/h/kpl ja tuotto 10-15 m³/h lietteen sakeuden ollessa 1-5 %. Lington syöttöpumppu käy noin 4-5 päivää viikossa. Viikonloppuna ja lietesiiilojen täytyessä pumppu ei yleensä ole käynnissä. Syöttö lingolle on 5-10 m³/h, lietteen sakeuden ollessa 2-6 %. (Nyyssönen, 8.6.2007.)

Putkimateriaalina voidaan käyttää ruostumatonta terästä tai muovia. Laitosten sisällä käytetään usein teräsputkia ja pitkinä siirtoputkina useasti myös muovisia. Taulukossa 2-6 on esitetty lietteelle

soveltuvan teräsputken tietoja. Putken hintaan ja näin ollen myös investointikustannuksiin sisältyvät tuet ja yksinkertaiset työt. (Lindqvist, 27.6.2007.)

Taulukko 2-6. Lietteen siirtoon soveltuvan teräsputken tietoja. (Lindqvist, 27.6.2007.)

Lietteen tilavuusvirta	[m ³ /a]	24 000-60 000
Lietteen tilavuusvirta	[m ³ /h]	3-7,5
Lietteen tilavuusvirta	[l/s]	0,8-2,1
Putkikoko (halkaisija)	[mm]	50
Putken massa	[kg/m]	2,35
Putken kilohinta	[€/kg]	23,00
Putken metrihinta	[€/m]	54,05
Investointikustannus 20 m putkelle	[€]	1080
Investoinnin vuosikustannus (20 m)	[€/a]	176
Investointikustannus 50 m putkelle	[€]	2700
Investoinnin vuosikustannus (50 m)	[€/a]	440
Investointikustannus 100 m putkelle	[€]	5400
Investoinnin vuosikustannus (100 m)	[€]	880

2.2.6 Autokuljetukset

Kuivattu liete kuljetetaan paikasta toiseen tavallisesti kuorma-autoilla, joko siirtolavoilla tai ilman. Jos liete halutaan siirtää pienessä kuiva-ainepitoisuudessa eikä pumppaus ole mahdollista etäisyyden tai muun syyn vuoksi, on käytettävä säiliöautokuljetusta. Myös haja-asutusalueen saostus- ja umpikaivolietteet kuljetetaan säiliöautoilla.

Tiekuljetuksilla on muita kuljetusmuotoja suuremmat ympäristövaikutukset, joten on perusteltua kiinnittää huomiota niihin myös lietteen kuljetuksen osalta. Yleisesti kuljetusten ympäristövaikutuksista merkittävimpiä ovat kaasumaiset päästöt sekä pöly, melu ja värinä. Määrältään suurimpia liikenteen tuottamia kaasumaisia päästöjä ovat typen oksidit, hiilimonoksidi eli häkä, hiilivedyt, hiilidioksidi sekä rikin oksidit. (Mäkelä et al. 2005, 138-139.)

Etenkin vakiintuneiden kuljetusreittien muuttuminen voi aiheuttaa esimerkiksi melua ja pölypäästöjä asuinalueille, joille niitä aiemmin ei ole kantautunut. Lietteen kuljetukset on hyvä suunnitella toimivaksi ja kannattavaksi kokonaisuudeksi. Mikäli varastointikapasiteetti polttolaitoksella riittää, kannattanee lietettä kuljettaa mahdollisimman suurissa yksittäisissä erissä, vaikka kuljetusmatka olisikin lyhyehkö.

2.2.7 Kuljetuskustannukset

Lietteen kuljetuskustannukset tyypillisellä 30 tonnin kuormalla ovat hiukan yli euron kilometriä kohden. Kustannukset lasketaan edestakaisena matkana. Karkeita kuljetuskustannuksia on hahmoteltu seuraavaan taulukkoon yksikkökustannuksen vaihtelu huomioiden.

Taulukko 2-7. Kuljetuskustannusten vaihtelua 30 tonnin kuormakoolla. (Aho, 13.6.2007.)

Kuormakoko	[t]	30	30	30	30
Kuljetuskustannus	[€/km]	1,0	1,1	1,2	1,3
Kuljetusmatka	[km]	10	10	10	10
Laskutettava matka (edestakaisin)	[km]	20	20	20	20
Todellinen kuljetuskustannus	[€/km]	2,0	2,2	2,4	2,6
Todellinen kuljetuskustannus	[€/t/km]	0,067	0,073	0,08	0,087

Taulukossa 2-8 vertaillaan kuljetuskustannuksia matkan vaihdella. Kuljetuskustannuksena käytetään taulukosta 2-7 vaihtoehtoa 2,2 €/km, joka vastanee parhaiten tämän hetkistä todellisuutta.

Taulukko 2-8. Kuljetuskustannusten vertailua matkan pituuden mukaan. (Aho, 13.6.2007.)

Kuljetusmatka		10 km	50 km	100 km
Kuormakoko	[t]	30	30	30
Todellinen kuljetuskustannus	[€/km]	2,2	2,2	2,2
Kuljetuskustannukset/kuorma	[€]	22	110	220

Esimerkiksi Kouvolan jätevedenpuhdistamolta ajetaan lietettä käytännössä 3-4 kuormaa viikossa. Teoriassa 6000 t/a lietettä tuottava laitos tarvitsee 30 tonnin kuljetuksia vuodessa 200 kappaletta, mikä tarkoittaa noin 3,8 kuljetuskuormaa viikkoa kohden. Kuiva-ainepitoisuudeltaan 20 %:n lietteen tiheys on noin 850 kg/m³. Tiivistettyä eli noin 5 %:n kuiva-ainepitoista lietettä puolestaan käsitellään samalla tiheydellä kuin vettä eli 1000 kg/m³. Näitä lukemia käytetään laskennassa. Taulukossa 2-9 on hahmoteltu kuljetuskustannuksia esimerkinomaisesti Kouvolan kokoisen kaupungin tuottamalle lietemäärälle 6000 t/a.

Taulukko 2-9. Kouvolan lietteiden kuljetuskustannuksia. (Aho, 13.6.2007.)

Kuljetusmatka	[km]	10 km	50 km	100 km
Kuljetuskustannukset/kuorma	[€]	22	110	220
Kuormien määrä	[kpl/vko]	3,8	3,8	3,8
Kuormien määrä	[kpl/a]	200	200	200
Kuljetuskustannukset	[€/vko]	84	418	836
Kuljetuskustannukset	[€/a]	4400	22 000	44 000

Kuten edellisistä taulukoista huomataan, kuljetuskustannukset kasvavat suoraan suhteessa kuljetettavaan matkaan. Todellisuudessa kuljetusurakoitsijoilla lienee jonkinlaista kustannusetua tarjottavaan pitkän matkan kuljetuksille.

Imuautopalvelu eli säiliöautokuljetus hinnoitellaan ajan mukaan, koska kuljetetun matkan lisäksi säiliön täyttö ja tyhjennys kuluttavat polttoainetta ja työaikaa. Lappeenrannassa Sita Finland Oy:llä on käytössään kaksi imuautoa, joiden tilavuudet ovat 9 m³ ja 13 m³. Kuljetusveloitus on verotto- mana noin 70 €/h (Korkeakangas, 27.6.2007).

2.2.8 Lietteen varastointi

Paras ratkaisu lietteenkäsittelyssä olisi varastoimattomuus. Toisin sanoen järjestelmän tulisi olla liukuva ja toimia katkottomasti. Kuitenkin jos ja kun ongelmia tasaisen prosessin kanssa on, kannattaa varautua poikkeustilanteisiin esimerkiksi kuljettamalla liete avokasaan jonnekin sille varattuun paikkaan ja sieltä sitten takasin lietteenkäsittelyketjuun. Näin välttyttäisiin vaativilta, hankalilta ja suurikustannuksisilta varastointiratkaisuilta. Toisaalta, jos liete on avoimessa tilassa, siitä aiheutuu yleensä hajuhaittoja. Hajuttomuus on nimenomaan etu PAKU-laitoksen edustamassa termisessä kuivauksessa, verrattuna esimerkiksi kompostointiin, joten tällaisella varastoinnilla menetettäisiin tuo etu. Siiloratkaisut voivat olla hankalia lietteen varastoinnissa ja purkulaitteilta vaaditaan erikoisuutta, kun puretaan seisonutta lietettä, joka helposti holvautuu seinämiin (Suvanen, 16.4.2007). Käytännössä lietettä on kuitenkin pakko varastoida, jotta polttolaitoksen tasainen toiminta voidaan varmistaa. Taulukossa 2-10 esitellään kolmen erikokoisen varastosäiliön kustannuksia. Varastosäiliön materiaali on ruostumaton teräs. Purkain on malliltaan niin sanottu porkkanaruuvi, jonka materiaali on lietteen koskettamilta osin ruostumaton teräs.

Taulukko 2-10. Lietteen varastosäiliöiden tietoja kolmessa kokoluokassa. (Suvanen, 27.7.2007.)

Tilavuus	[m ³]	20	50	100
Halkaisija	[m]	3	4	5
Korkeus	[m]	3,5	5	6
Säiliön investointikustannus	[€]	30 000	50 000	75 000
Eristyksen investointikustannus	[€]	10 000	20 000	100 000
Purkaimen investointikustannus	[€]	28 000	35 000	40 000
Investointikustannus yhteensä	[€]	68 000	85 000	215 000
Investoinnin vuosikustannus	[€/a]	11 070	13 830	34 990

Varastosäiliön tulee vaikeiden materiaalien kohdalla olla alaspäin päästävä eli alaspäin levenevä. Kun säiliön korkeus on enintään 1,5 kertaa halkaisijan pituus, selvittää suoralla seinällä. Tätä korkeammassa säiliöissä tulisi olla alaspäin levenevä seinä. Varastoitaessa lietettä säiliössä, sitä ei kannata sekoittaa, ainakaan jatkuvasti, koska se muuttuu helposti savimaiseksi (Kurronen & Suvanen, 16.4.2007).

Parhaan käytettävissä olevan tekniikan, BAT:n (Best Available Technique) mukaan lietteen ja muun nestemäisen jätteen varastointiin soveltuu kestävä kaukaloitu varastosäiliö, jossa liitoslaipat ja venttiilit sijoitetaan kaukaloinnin sisäpuolelle. Lisäksi säiliön tuuletusilma on johdettava poltettavaksi sekä kanavistot ja muut laitteet on varustettava räjähdysuojauksin. (Vesanto 2006, 46.)

Lappeenrannan jätevedenpuhdistamolla liete varastoidaan säiliöiden sijasta umpiniaisille lavoille, jotka kuljetetaan sellaisenaan eteenpäin. Lavojen ulkonäkö on kuvan 2-6 mukainen. Lavoja on yhteensä neljä kappaletta ja niiden täytyttyä liete ohjataan hetkellisesti avokatokseen. Vaihtolavoja on perinteisesti käytetty paljon juuri jätteenkäsittelyssä, sekä kuljetuksissa että tilapäisvarastoinnissa (Mäkelä et al. 2005, 122).



KUVA 2-6. LIETELAVOJA, JOILLE KUIVATTU LIETE JOHDETAAN JA JOILLA SE KULJETETAAN ETEENPÄIN.
(Toikansuon jätevedenpuhdistamo 2007)

Varastointi olisi mahdollista järjestää hieman samaan tapaan kuin Lappeenrannan puhdistamolla oleva vararatkaisu. Avokatos ei kuitenkaan riittäisi vaan tarvittaisiin suljettu rakennus, josta saadaan poistokaasut johdettua polttoon. Rakennuksessa täytyisi vallita alipaine, jotta kaasut eivät pääsisi karkaamaan ulos. Jos tällainen ratkaisu olisi polttolaitoksella, niin liete voitaisiin siirtää polttoon ilman kuljettimia. Siirtoon käytettäisiin esimerkiksi pyöräkuormaajaa, mikä tietysti kiinnittäisi yhden henkilön työskentelemään polttoaineen syötön parissa. Jos syöttösilon tilavuus olisi tarpeeksi suuri, ei öisin välttämättä tarvittaisi täydennystä, vaan täyttö aika ajoin riittäisi.

Kouvolan puhdistamolla kuivatun lietteen varastosäiliö on rakennettu teräksestä ja suojamaalattu lietteelle sopivaksi. Kuvan 2-7 säiliössä ei ole vuorausta, ainoastaan polyuretaanilevy tai muu vastaava kulutuslevy. Liette seisoessa varastosäiliössä viikonlopun yli syntyy vain hajuhaittoja. Aiemmin lietteen kuiva-ainepitoisuuden ollessa 16 % vesi erottui helposti säiliön pohjalle, jolloin säiliössä oli niin sanotut sukat, joihin vesi kerättiin. Enää tällaiselle ratkaisulle ei ole tarvetta. (Nyysönen, 28.5.2007.)



KUVA 2-7. LIETTEEN KUIVAUSRAKENNUS JA LIETESILOT. (Mäkikylän jätevedenpuhdistamo 2007.)

Lietteen varastoinnissa ja sen käytännöllisessä ja toimivassa toteuttamisessa riittää varmasti työtä tulevaisuudessakin. Vaikka esimerkiksi PAKU-laitos pystyttäisiin toteuttamaan ilman suuria varastointiratkaisuja, aina kuitenkin tarvitaan vähintään yön yli riittävää varastoa. Muuten laitokselle kuljetettavan lietevirran tulisi olla hyvin jatkuva ja täsmällinen, jotta lietettä voitaisiin syöttää prosessiin tasaisesti. Toisaalta tapauskohtaisesti kannattaa pohtia, kuinka suuri varasto on tarpeen, ja voidaanko varastointitarvetta kenties vähentää muuttamalla kuljetuskäytäntöjä. Ratkaisuihin vaikuttavat oleellisesti syntyvät kustannukset.

2.2.9 Syöttö- ja purkumenetelmät

Lietteen kuljetus ja syöttö on yleensä sitä helpompaa, mitä kuivempaa liete on. Syötön yhteydessä sijaitseva annostelusäiliö on myös kriittinen osa prosessia. Yleisesti prosessin materiaalivirta ei yleensä ole tasainen, joten välisäiliölle on tarvetta. Vaikeiden materiaalien purkaimia on paljon erityyppisiä, myös lietteelle soveltuvia (Kurronen & Suvanen, 16.4.2007).

Taulukossa 2-11 on koottuna syöttötietoja. Investoinnin vuosikustannuksen laskennassa on käytetty 10 %:n korkokantaa ja 10 vuoden takaisinmaksuaikaa.

Taulukko 2-11. Lietteen syöttöön liittyviä tietoja. (Suvanen, 8.8.2007.)

Massavirta	[t/a]	6000-15 000
Tilavuusvirta	[m ³ /a]	7100-17 600
Tilavuusvirta	[m ³ /d]	21-53
Investointikustannus	[€]	55 000
Investoinnin vuosikustannus	[€/a]	8950

2.3 Case-tarkastelu

Tässä kappaleessa tutkitaan tarkemmin kahden kaakkoissuomalaisen maakunnan lietteenkäsittelytilannetta ja mahdollisuuksia toteuttaa lietteen käsittely ja kuljetus PAKU-laitoksen edellyttämin ehdoin. Varsinaista PAKU-laitosta käsitellään tässä työssä myös nimellä polttolaitos. Kyseessä on kuitenkin yksi ja sama lietteenpolttolaitos. Lietteenkäsittelyllä tarkoitetaan tässä luvussa nimenomaan lietteen esikäsittelyä ennen termistä kuivausta ja polttoa. Kokonaiskäsittelyyn sisältyvät myös varsinaisen PAKU-laitoksen toiminnot, terminen kuivaus ja poltto.

Kuvassa 2-8 näkyvät Kaakkois-Suomen maakunnat Kymenlaakso ja Etelä-Karjala. Näillä alueilla suoritetaan tarkastelua PAKU-laitoksen mahdollisuuksista. Ensin tullaan käsittelemään Kymenlaakson tapaus ja sen jälkeen siirrytään Etelä-Karjalaan, jossa tutkitaan useampaakin vaihtoehtoista PAKU-laitoksen sijoituspaikkaa.



KUVA 2-8. KAAKKOIS-SUOMEN ALUEELLA SIJAITSEVAT KUNNAT. (Ympäristöministeriö 2003b, 9.)

2.3.1 Polttoaineena käytettävän lietteen tietoja

Lietteen ominaisuuksia on kartoitettu kirjallisuuden, verkkojulkaisujen sekä henkilöhaastattelujen perusteella. Case-tapauksissa tarkasteltavan lietteen koostumus on valittu kartoituksen tietojen avulla. Taulukossa 2-12 esiteltävä kuiva-aineen alkuainekoostumus pohjautuu kirjallisuuslähteisiin. Sen sijaan lietteen muut ominaisuudet ovat valittu usean eri lähteen tietojen valossa. Taulukkoon 2-13 on koottu käytettävien arvojen lisäksi tyypilliset vaihteluvälit kyseisille ominaisuuksille.

Taulukko 2-12. Tarkasteltavan lietteen kuiva-aineen alkuainekoostumus. (Mukaiillen Reimann 1999, 177; Werther et al. 1997, 93.)

Alkuaine	Osuus [%]
Hiili, C	33,6
Vety, H	5,0
Typpi, N	4,9
Happi, O	30,3
Rikki, S	1,2
Tuhka	25
Yhteensä	100

Taulukko 2-13. Tarkasteltavan lietteen ominaisuuksien valitut arvot ja tyypilliset vaihteluvälit. (Mukaiillen Reimann 1999, 177; Werther et al. 1997, 93)

Ominaisuus	Yksikkö	Valittu arvo	Vaihteluväli
Kuiva-ainepitoisuus	[%]	20	16-35
Tuhkapitoisuus	[%]	25	10-40
Kuiva-aineen lämpöarvo	[MJ/kg]	17,3	13,8-20,7

2.3.2 Lietteen esikäsittelyn kustannusvaikutukset Ekoparkin tapauksessa

Tässä kappaleessa esitetään lietteen esikäsittelyn kustannusvaikutuksia Kymenlaakson alueella sellaisessa tapauksessa, että Kouvolan jäteveden puhdistamolta kuljetetaan liete Anjalankoskelle Ekopark -jätteenkäsittelykeskukseen. Oletetaan, että Ekoparkissa käsitellään minimitapauksessa vain Kouvolan lietteet. Kouvolan puhdistamolla syntyy jätevesilietettä noin 6000 t/a. Kouvolan jätevedenpuhdistamon ja Anjalankosken Ekoparkin välimatka tietä pitkin on 12 km. Kun puhdistamon ja polttolaitoksen etäisyys on soveltumaton lietteen pumppaukselle, täytyy liete kuivata syntypaikassaan, puhdistamolla. Kuiva-ainepitoisuudeltaan noin 20 %:lle lietteelle tarvitaan autokuljetus. Ekoparkin perustapauksen käsittelyketju kokonaisuudessaan on kuvattu taulukossa 2-15. Laskennassa ei ole otettu huomioon pienimpiä kulueriä, kuten syöttö- ja purkulaitteiden sähkönkulutusta.

Taulukko 2-15. Ekopark: Perustapauksen lietteenkäsittely eri vaiheineen ja kustannuksineen.

	Käsittelyvaiheet	Kustannukset [€t]	Kustannukset [€/a]	Huomioita
1	Pumppaus tiivistimeltä/sekoitussäiliöstä	0,30	1700	Pumppu + putkisto 20 m, pumppu käytössä 10 h/d
2	Syöttö mekaaniseen kuivaukseen	1,50	9000	Syöttölaitteisto: annostelusäiliö, purkain, painelukko, sulkusyötin
3	Mekaaninen kuivaus	10,00	60 100	Linkolaitteisto, käytössä 18 h/d
4	Siirto säiliöön	0,40	2 100	Ruuvikuljetin, 5 m, käytössä 18 h/d
5	Lietesäiliö	2,30	13 800	Tilavuus 50 m ³ , kahden vuorokauden varastointitarve
6	Purku autonlavalle	Sisältyy säiliön kustannuksiin	Sisältyy säiliön kustannuksiin	Porkkanapurkain
7	Autokuljetus polttolaitokselle	0,90	5300	Kuormakoko 30 t, kuljetusmatka 12 km
8	Purku säiliöön	Ei kustannuksia	Ei kustannuksia	Kuorma kipataan alempana olevaan säiliöön
9	Varastosäiliö	2,30	13 800	Tilavuus 50 m ³ , kahden vuorokauden varastointitarve
10	Purku säiliöstä kuljettimelle	Sisältyy säiliön kustannuksiin	Sisältyy säiliön kustannuksiin	Porkkanapurkain
11	Siirto termiseen kuivaukseen	0,80	4 700	Ruuvikuljetin, 15 m, käytössä 18 h/d
12	Syöttö termiseen kuivaukseen	1,50	9000	Syöttölaitteisto: annostelusäiliö, purkain, painelukko, sulkusyötin
	Yhteensä	20,00	119 500	

Taulukossa 2-16 on muuten sama tilanne kuin edellisessä taulukossa 2-15, mutta nyt ketjua tarkastellaan pelkästään polttolaitoksen näkökulmasta. Taulukon käsittelyvaiheiden numerot viittaavat käsittelyjärjestykseen, joka näkyy kokonaisuudessaan edellisessä taulukossa. Käsittelyvaiheita jää siis pois useita, jolloin kustannuksetkin laskevat. Kustannustarkastelussa olennaista onkin, kenen kannalta kustannuksia lasketaan. Vaikka kokonaisuus tarvitseekin kaikki vaiheet, niiden jakautuminen puhdistamon ja polttolaitoksen välillä voi vaihdella melko paljon.

Taulukko 2-16. Ekopark: Polttolaitoksen osuus PAKU-laitoksen lietteenkäsittelykustannuksista.

	Käsittelyvaiheet	Kustannukset [€t]	Kustannukset [€a]	Huomioita
8	Purku säiliöön	Ei kustannuksia	Ei kustannuksia	Kuorma kipataan alempana olevaan säiliöön
9	Varastosäiliö	2,30	13 800	Tilavuus 50 m ³ , kahden vuorokauden varastointitarve
10	Purku säiliöstä kuljettimelle	Sisältyy säiliön kustannuksiin	Sisältyy säiliön kustannuksiin	Porkkanapurkain
11	Siirto termiseen kuivaukseen	0,80	4 700	Ruuvikuljetin, 15 m, käytössä 18 h/d
12	Syöttö termiseen kuivaukseen	1,50	9000	Syöttölaitteisto
	Yhteensä	4,60	27 500	

Kun lietteen käsittelyketjuun (taulukko 2-15) valitaan mekaaniseksi vedenerotuslaitteeksi linkon sijasta suotonauhapuristin, huomataan kokonaiskustannusten pienenevän. Vuotuinen kustannus on tällöin 97 000 € ja yksikkökustannus 16,20 €/t. Prosentuaalisesti kustannukset ovat 18 % pienemmät kuin käytettäessä linkoa.

Suotonauhapuristin on itsessään osoittautunut edullisemmaksi investoinniksi kuin linko, joten myös sen käyttö käsittelyketjun osana tuo kustannusetua. Pelkän kustannustarkastelun valossa voidaankin siis todeta suotonauhapuristin paremmaksi vaihtoehdoksi lietteenkäsittelyyn. Suotonauhapuristin vaatii kuitenkin jonkin verran enemmän työtä ylläpidon osalta kuin linko, minkä vuoksi linko on kasvattanut suosiotaan lietteen mekaanisessa kuivauksessa.

Kuljetuskustannukset vaikuttavat osaltaan merkittävästi päätökseen puhdistamoiden valitessa lietteelleen jatkokäsittelyvaihtoehtoa. Kouvolan puhdistamo sijaitsee 12 kilometrin päässä mahdollisesta Ekoparkin PAKU-laitoksesta. Jos ajatellaan, että PAKU-laitos sijoitettaisiin Ekoparkin sijaan Kotkaan, kuljetusmatka Kouvolasta olisi noin 55 km. Puolestaan jos Kouvolan lietteet kuljetettaisiin Joutsenoon, EKJH:n PAKU-laitokselle tai Lappeenrantaan, olisi matka noin 100 km. Taulukossa 2-17 vertaillaan kuljetuskustannusten vaikutusta vastaanottomaksuun. Kuljetuskustannukset on laskettu arvolla 0,073 €/t/km. Kuljetettava lietemäärä on Kouvolan 6 000 t/a.

Tulokseksi saatu kustannusero Ekoparkin kustannukseen nähden kertoo sen, kuinka paljon kalliimmaksi tulisi Kouvolan lietteiden kuljettaminen muualle kuin Ekoparkiin. Tämä ero voidaan ajatella hyödynnettävän Ekoparkin PAKU-laitoksen lietteen vastaanottoa hinnoiteltaessa. Täytyy kuitenkin muistaa, että tämä vertailu pätee vain, jos Kouvolan lähiseudulla ei ole tarjolla PAKU-laitosta edullisempaa lietteenkäsittelyvaihtoehtoa.

Taulukko 2-17. Ekopark: Kuljetuskustannusten vaihtelua lietteen sijoituspaikan mukaan.

		Kouvolan lietteiden sijoituspaikka		
		Ekopark, Anjalankoski	Kotka	EKJH, Joutseno/LPR
Kuljetusmatka	[km]	12	55	100
Kuljetuskustannus	[€/t]	0,88	4,02	7,30
Kustannusero Ekoparkiinnähdén	[€/t]	+/- 0	+ 3,14	+ 6,42

Teoriassa on mahdollista, että lisäämällä kuljetuskertoja puhdistamon ja polttolaitoksen välillä ja toisaalta pienentämällä polttolaitoksella sijaitsevan välivaraston kokoa voidaan säästää kokonaiskustannuksissa. Yövarastosiilolla saatavat säästöt ja viikonloppukuljetuksista aiheutuvat lisäkustannukset on tarkasteltu taulukossa 2-18. Laskennassa on oletettu kuljetuskerroiksi 200 ja 300 kpl/a eli arkipäivisin ja arkipäivien lisäksi myös viikonloppuisin. Kuljetuskustannusten laskennassa ei ole otettu huomioon mahdollisia viikonloppun aikana suoritetun kuljetuksen lisäkustannuksia. Varastointitarve on valittu toiseen tapaukseen noin kahden vuorokauden mittaiseksi ja toiseen alle vuorokauden mittaiseksi.

Taulukko 2-18. Ekopark: Kuljetuskertojen ja varastoinnin kustannusten vertailua.

		Kuljetuskertoja vuodessa [kpl/a]	
		200	300
Kuljetuskuorman koko	[t]	30	20
Kuljetuskustannus	[€/km]	0,073	0,097
Kuljetusmatka	[km]	12	12
Kuljetuskustannus	[€/t]	0,88	1,17
Varastosiilon tilavuus	[m ³]	50	20
Varastointikustannus	[€/t]	2,31	1,84
Kuljetus ja varastointi yhteensä	[€/t]	3,20	3,00

Kuljetuskertojen lisääntyessä ja kuormakoon pienentyessä kuljetuskustannukset kasvavat, kuten taulukosta huomataan. Varastointikulut kuitenkin tällöin pienenevät, koska pienempi siilo riittää välivarastoksi. Yhteenlasketuista kustannuksista näkyy, että kustannusten ero on melko pieni: 0,2 €/t. Kouvolan tapauksessa eli lietemäärällä 6000 t/a, tämä tarkoittaa kustannussäästöä 1020 €/a.

Taulukossa 2-19 esitetään Ekoparkin osalta tapaus, jossa liete vietään suoraan tiivistimeltä termiseen kuivaukseen. Tällöin mekaanista kuivausta ei suoriteta eli sen kustannukset jäävät kokonaisuudessaan pois. Kuljetuskustannukset puolestaan kasvavat, koska liete joudutaan kuljettamaan säiliöautoilla. Lisäksi lietteen kuivaamiseen kattilassa tarvitaan ylimääräistä lämpöä, jonka menetetty myyntiarvo lasketaan kustannuksena tälle tapaukselle. Lämmön laskennassa on käytetty veden (20 °C) ominaislämpökapasiteettia 4,18 kJ/kgK ja höyrystymislämpöä 2260 kJ/kg (100 °C) (Hälvä 1996).

Taulukko 2-19. Ekopark: Käsittelyketju ilman lietteen mekaanista kuivausta.

Käsittelyvaiheet	Kustannukset [€t]	Kustannukset [€a]	Huomioita
Säiliöauton täyttö, kuljetus polttolaitokselle ja kuorman purku siiloon	21,50	129100	Kustannuksena 70 €/h. Matka 12 km. Laskeaan kestoksi 1 h/kuorma. Kuorman tilavuus on 13 m ³ .
Lietesiilo	5,80	35 000	Tilavuus 100 m ³ , reilun vuorokauden varastointitarve
Pumppaus termiseen kuivaukseen	0,50	2 700	Pumppu + putkisto 20 m, pumppu käytössä 24 h/d
Syöttö termiseen kuivaukseen	1,50	9000	Syöttölaitteisto: annostelusäiliö, purkain, painelukko, sulkusyötin
Kuivaukseen tarvittavan ylimääräisen lämmön arvo	14,80	88 600	energiaa veden höyryttämiseen kuluu arviolta 0,7 MWh/t, energian hinta 20 €/MWh
Yhteensä	29,30	175 700	

Laskennasta huomataan, että ilman mekaanista kuivausta lietetonnille tulisi kustannukseksi noin 30 € joka on puolet korkeampi kuin perustapauksen 20 €/t. Tämän perusteella mekaaninen kuivaus on hyvin järkevää suorittaa ennen termistä kuivausta. Kustannussäästön lisäksi säästyy kuljetuskilometrejä, kun lietettä ei tarvitse kuljettaa pienellä säiliöautolla. Näin ollen myös ilmapäästöt kuljetuksen osalta ovat pienemmät. 30 €/t olisi melko suuri kustannus ajatellen PAKU-laitoksen kokonaiskustannusta, joka on suunnilleen välillä 50-70 €

2.3.3 Lietteen esikäsittelyn kustannusvaikutukset EKJH:n tapauksessa

Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy (EKJH) käsittelee vuodessa noin 15 000 t jätevesilietettä. Nykyisin käsittely tapahtuu kompostoimalla. Käsittelyä olisi mahdollista kehittää energiaa tuottavaksi hankkimalla alueelle PAKU-tekniikkaan perustuva laitos. EKJH:n PAKU-laitokselle tulisi lietteitä useasta eri paikasta, aivan kuten alueella nykyisin sijaitsevalle kompostointilaitoksellekin. Näin ollen lietteen kokonaiskäsittelyketjun kustannuksia ei voida tarkastella yksinkertaisesti. Suunnataan sen sijaan huomio polttolaitoksen osuuteen kustannuksista. Näitä laskelmia on esitetty alla taulukossa 2-21.

Tässä tapauksessa kustannukset jäävät suhteessa pienemmiksi kuin esimerkiksi Ekoparkin vastavassa tarkastelussa. Suurin syy tähän on käsiteltävä liettemäärä. Yksikkökustannukset pienenevät liettemäärän kasvaessa.

Taulukko 2-21. EKJH: Polttolaitoksen osuus PAKU-laitoksen lietteenkäsittelykustannuksista.

Käsittelyvaiheet	Kustannukset [€/t]	Kustannukset [€/a]	Huomioita
Purku säiliöön	Ei kustannuksia	Ei kustannuksia	Kuorma kipataan alempana olevaan säiliöön
Varastosäiliö	2,30	35 000	Tilavuus 100 m ³ , kahden vuorokauden varastointitarve
Purku säiliöstä kuljettimelle	Sisältyy säiliön kustannuksiin	Sisältyy säiliön kustannuksiin	Porkkanapurkain
Siirto termiseen kuivaukseen	0,20	3600	Ruuvikuljetin, 15 m, käytössä 18 h/d
Syöttö termiseen kuivaukseen	0,60	9000	Syöttölaitteisto
Yhteensä	3,20	47 600	

Taulukossa 2-22 on esitetty EKJH:n tapaukselle laskelma kuljetusten ja varastoinnin välisestä suhteesta. Samanlainen tarkastelu on edellä toteutettu Ekoparkin tapaukselle. Käytetyt arvot ovat muuten samoja, paitsi että kuljetuskertojen määrä ja varastointitarve muuttuvat, koska tässä EKJH:n tapauksessa tarkastellaan lietemäärää 15 000 t/a. Varastointitilavuus polttolaitoksella on mitoitettu puolen vuorokauden tarvetta vastaavaksi eli yön yli polttolaitos selviää ilman kuljetuksia. EKJH:n PAKU-laitokselle kuljetetaan lietettä usealta puhdistamolalta, suurin osa Lappeenrannasta (67 %) ja Imatralta (23 %). Tämä laskelma on toteutettu erittelemättä lietteen syntypaikkaa. Kuljetusmatkaksi on valittu 20 km sillä perusteella, että Lappeenrannasta matkaa tulee 16 km ja Imatralta 35 km. Kuljetuksia tulee enemmän Lappeenrannasta, joten valittu matka on lähempänä Lappeenrannan kuljetusmatkaa. Muista kunnista kuljetusmatkat ovat yleensä vielä pidemmät.

Taulukko 2-22. EKJH: Kuljetuskertojen ja varastoinnin vaikutus kustannuksiin.

		Kuljetuskertoja vuodessa [kpl/a]	
		500	750
Kuljetuskuorman koko	[t]	30	20
Kuljetuskustannus	[€/km]	0,073	0,097
Kuljetusmatka	[km]	20	20
Kuljetuskustannus	[€t]	1,46	1,94
Vuotuiset kuljetuskustannus	[€/a]	21 900	29 100
Varastosiilon tilavuus	[m ³]	100	20
Varaston vuosikustannus	[€/a]	34 990	11 070
Varastointikustannus	[€/t]	2,33	0,74
Kuljetus ja varastointi yhteensä	[€/t]	3,80	2,70

Yhteenlasketuista kustannuksista näkyy, että säästöä syntyy, kun kuljetetaan lietettä pienemmissä erissä ja varaston koko rajoitetaan minimiin. Kustannusten ero on 1,11 €/t. Kun lietettä käsitellään 15 000 t/a, tämä tarkoittaa kustannussäästöä 16 650 €/a. On toki huomioitava, että tällainen menetely tuottaa kuljetusten aikana syntyviä päästöjä, etenkin ilmapäästöjä, enemmän kuin kuormakool-

taan suuremmat kuljetukset. Valittaessa ihanteellista menettelytapaa PAKU-laitokselle onkin syytä pohtia, ovatko kustannukset kaikki kaikessa, vai voidaanko pienehkö kustannussäästö jättää käyttämättä, jos se on ympäristön kannalta parempi vaihtoehto. Kuljetusten ja varastointikoon keskinäisessä optimoinnissa on otettava huomioon myös se, että pienen säiliön kanssa saattaa esiintyä enemmän häiriötilanteita, eivätkä kuljetukset aina suju täysin ongelmitta. Toisaalta suurempi varastosäiliö voi aiheuttaa omat ongelmansa esimerkiksi kunnossapidossa tai polttoaineen syötössä.

2.3.6 Lietteen esikäsitteilyn kustannusvaikutukset Lappeenrannan tapauksessa

Lappeenrannan kaupungin tapauksessa käsiteltävä lietemäärä on noin 10 000 t/a. Mekaanisen kuivauslaitteen valinnassa on huomattava, että sen tulee käydä lähes jatkuvasti, jotta varastointi voidaan minimoida ja syöttö on silti tasaista. Näin ollen valitaan kyseiselle lietemäärälle kapasiteetiltaan vaihtoehtoista pienempi laite. Tällöin investointikustannusten osuus kokonaiskustannuksista pienenee, mutta toisaalta käyttökustannukset nousevat sähkönkäytön kasvun myötä. Taulukossa 2-23 näkyy lietteenkäsitteilyketju, joka sopisi Lappeenrannan tapaukselle.

Taulukko 2-23. LPR: Perustapauksen lietteenkäsitteily eri vaiheineen ja kustannuksineen.

	Käsittelyvaiheet	Kustannukset [€t]	Kustannukset [€a]	Huomioita
1	Pumppaus tiivistimeltä/sekoitussäiliöstä polttolaitokselle	0,30	3000	Pumppu + putkisto 50 m, pumppu käytössä 24 h/d
2	Syöttö mekaaniseen kuivaukseen	0,90	9000	Syöttölaitteisto: anostelusäiliö, purkain, painelukko, sulkusyötin
3	Mekaaninen kuivaus	6,10	61 000	Linkolaitteisto, käytössä 24 h/d, syöttö 6,4 m ³ /h
4	Siirto termiseen kuivaukseen	0,50	5000	Ruuvikuljetin, 15 m, käytössä 24 h/d
5	Syöttö termiseen kuivaukseen	0,90	9000	Syöttölaitteisto: anostelusäiliö, purkain, painelukko, sulkusyötin
	Yhteensä	8,70	87 000	
6	+ yksi varastosäiliö (tiivistetyn tai mekaanisesti kuivatun lietteen)	3,50	35 000	Tilavuus 100 m ³ , kahden vuorokauden varastointitarve
	Yhteensä	12,20	122 000	

Lieteketju muuttuu oleellisesti, kun polttolaitos sijaitsee puhdistamon vieressä. Tällöin ketjusta jää pois useampia muissa vaihtoehtoissa olennaisia tekijöitä. Tässä vaihtoehdossa selvittää yhdellä ruuvikuljettimella eikä tarvita useita purkulaitteistoja.

Teoriassa on myös mahdollista valita mekaaniseen kuivaukseen kapasiteetiltaan suurempi linko, jolloin lingon päivittäinen käyttöaika vähenee, mutta samalla lingotun lietteen hetkellinen varastoin-

titarve polttolaitoksella kasvaa. Tarkastellaan seuraavaksi taulukossa 2-24 samaa Lappeenrannan tapausta kuin edellisessä taulukossa, mutta valitaan kapasiteetiltaan kaksinkertainen linko. Varastosiilon koko 100 m³ riittää tässä tapauksessa lietteen lisävarastointiin, koska se on mitoitettu kahden vuorokauden lietemäärää vastaavaksi.

Taulukko 2-24. LPR: Lingon kapasiteetin vaikutus lietteenkäsittelykustannuksiin.

	Käsittelyvaiheet	Kustannukset [€t]	Kustannukset [€a]	Huomioita
1	Pumppaus tiivistimeltä/sekoitussäiliöstä polttolaitokselle	0,30	2700	Pumppu + putkisto 50 m, pumppu käytössä 7,7 h/d
2	Syöttö mekaaniseen kuivaukseen	0,90	9000	Syöttölaitteisto: anostelusäiliö, purkain, painelukko, sulkusyötin
3	Mekaaninen kuivaus	13,50	135 000	Linkolaitteisto, käytössä 7,7 h/d, syöttö 20 m ³ /h
4	Siirto termiseen kuivaukseen	0,50	5000	Ruuvikuljetin, 15 m, käytössä 24 h/d
5	Syöttö termiseen kuivaukseen	0,90	9000	Syöttölaitteisto: anostelusäiliö, purkain, painelukko, sulkusyötin
	Yhteensä	16,10	160 000	
6	+ yksi varastosäiliö (mekaanisesti kuivatun)	3,50	35 000	Tilavuus 100 m ³ , kahden vuorokauden varastointitarve
	Yhteensä	19,60	196 000	

Lingon kapasiteetin kasvaessa myös laitteen investointikustannus kasvaa, mutta samalla sähkönkulutus pienenee. Muutoksen myötä lingon käyttöaika on 7,7 h/d. Näin ollen tiivistetyn lietteen pumppaus joudutaan suorittamaan pienemmissä erissä, ei siis yhtä tasaisesti kuin perustapauksessa. Pumpun käyttöajaksi riittää tuo sama 7,7 h/d. Perustapauksessa olevan pumpun kapasiteetti riittää tähän muutokseen. Tällä laitevaihdoilla näyttää olevan voimakas vaikutus perustapaukseen siten, että kokonaisvuosikustannukset kasvavat paljon. Yksikkökustannus muuttuu arvosta 12,20 €/t arvoon 19,60 €/t. Voidaan siis todeta, että kapasiteetiltaan liian suuren lingon käyttäminen ei ole kannattavaa. Sähkönkulutuksen säästö on hyvin pieni, koska lingon koon kasvaessa myös sen teho kasvaa. Näin ollen lyhyemmällä päivittäisellä lingon käyttöajalla ei ole suurta vaikutusta.

Taulukossa 2-25 puolestaan ovat perustapauksen kustannukset polttolaitoksen omistajanäkökulmasta. Tällöin käsittelyketjun alkuosa jää pois laskuista.

Taulukko 2-25. LPR: Polttolaitoksen osuus lietteenkäsittelykustannuksista.

	Käsittelyvaiheet	Kustannukset [€t]	Kustannukset [€a]	Huomioita
4	Siirto termiseen kuivaukseen	0,50	5000	Ruuvikuljetin, 15 m, käytössä 24 h/d
5	Syöttö termiseen kuivaukseen	0,90	9000	Syöttölaitteisto
	Yhteensä	1,40	14 000	
	+ yksi varastosäiliö (tiivistetyn tai mekaanisesti kuivatun)	3,50	35 000	Tilavuus 100 m ³ , kahden vuorokauden varastointitarve
	Yhteensä	4,90	49 000	

Kun lietteen käsittelyketjuun valitaan mekaaniseksi vedenerotuslaitteeksi lingon sijasta suotonauhapuristin, huomataan kokonaiskustannusten pienenevän. Vuotuinen kustannus on tällöin 99 000 € ja yksikkökustannus 9,90 €/t. Prosentuaalisesti kustannukset ovat 19 % pienemmät kuin käytettävissä linkoa.

Lyhyessä ketjussa olennainen säästö syntyy lietteen varastoimattomuudesta. Syöttölaitteistojen annostelusäiliöt olisivat ainoat lietettä varaavat kohteet. Tämä tarkoittaa sitä, että käytännössä lietettä pumpattaisiin jatkuvasti tiivistimeltä tai sekoitussäiliöstä mekaaniseen kuivaukseen

Teoriassa tiivistetty liete olisi mahdollista myös kuljettaa säiliöautoilla useammalta puhdistamolta polttolaitokselle. Tästä olisi hyötynä se, että mekaaninen kuivaus voitaisiin toteuttaa yhtenä suurena kokonaisuutena. Esimerkiksi Etelä-Karjalassa maakunnan kaikki lietteet voitaisiin kuljettaa Joutsenoon EKJH:n PAKU-laitokseen. Tällöin puhdistamot eivät enää tarvitsisi omia laitteitaan mekaaniseen kuivaukseen, vaan kaikki liete käsiteltäisiin yhdellä laitteella, yhdessä paikassa. Näin ollen kaikki mekaaniseen kuivaukseen liittyvät kustannukset jäisivät pois puhdistamoilta. Toisaalta mekaanisen kuivauksen suurin kustannuserä ovat kemikaalit, joiden käyttö jatkuisi joka tapauksessa ennallaan. Tämä siksi, että kemikaalimäärä on sidonnainen käsiteltävän lietteen määrään. Jo pysyvän kemikaalitarpeen vuoksi kokonaiskustannussäästö jäisi suhteellisen pieneksi.

Tämän teoreettisen lietteenkäsittelymallin musertaa lopullisesti se, että kuljetuskustannukset tässä vaihtoehdossa nousisivat huimiin lukemiin. Säiliöautokuljetus on kallista. Karkeana arviona voidaan pitää 70 €/h. Lappeenrannan puhdistamolta vuotuisen 40 000 kuution tiivistetyn lietemäärän kuljetusmatkaksi tulee 16,5 km ja Imatralla kuljetettaisiin noin 14 000 m³/a 35 km:n matka. Säiliöauton tilavuus voi olla esimerkiksi 13 m³ (Korkeakangas, 27.6.2007). Jos ajatellaan, että yhden kuorman lastaaminen, kuljetus ja purkaminen kestäisivät noin 40 minuuttia, saadaan karkea arvio kuljetuskustannuksille. Tulokseksi saadaan noin 150 000 €/a.

Vertailun vuoksi todettakoon, että esimerkin kokoluokan linkojen ja suotonauhapuristimien hinnat pyörivät 100 000 euron molemmin puolin. Kyseisellä kuljetuskustannussummalla saataisiinkin hankittua hyvä linko tai suotonauhapuristin, vuosittain. Tällainen käsittelyketju ei siis ole kovin realistinen, ainakaan näin toteutettuna. Säiliöautokuljetukset voivat toki olla tarpeellisia ja kannattavia pienten puhdistamojen näkökulmasta. Kun lietettä kertyy vähän (alle 1000 t/a mekaanisesti kuivatuna), sen poiskuljetukseen riittäisi yksi kuorma päivittäin. Tällöin kuljetuskustannukset suurin piirtein 10 km:n matkalla jäisivät noin 20 000 euroon vuodessa.

2.4 Johtopäätökset

Taulukossa 2-26 on esitetty vuosikustannuksia ja yksikkökustannuksia kahdella eri mekaanisella kuivaimella. Tapauksia voi vertailla sisäisesti, mutta ei niinkään keskenään, koska lietteen käsittelymäärät ja näin myös käsittelyvaatimukset ovat tapauksissa erilaiset.

Taulukko 2-26. Lietteenkäsittelyn kustannuksia mekaanisen kuivauslaitteen mukaan jaoteltuna.

	Case 1: Kymenlaakso		Case 2: Etelä-Karjala	
	Ekopark, linko	Ekopark, Suotonauhapuristin	LPR, linko	LPR Suotonauhapuristin
Vuosikustannus [€a]	119 000	97 000	122 000	99 000
Yksikkökustannus [€/t]	19,90	16,20	12,20	9,90

Taulukosta voidaan todeta, että suotonauhapuristin on molemmissa tapauksissa kustannusten kannalta edullisempi vaihtoehto. Yksikkökustannusten pieneminen käsittelymäärien kasvaessa on myös havaittavissa luvuista. Ekoparkin käsittelymäärä on 6000 t/a ja Lappeenrannassa lietettä on melkein kaksinkertaisesti, 10 000 t/a. Lähiseudun maatalouden lietteistä voisi vielä mahdollisesti saada täydennystä paikallisesti poltettaviin lietemääriin. Näin PAKU-laitoksen polttoaineen massavirta kasvaisi ja yksikkökustannukset pienenisivät edelleen. Samoin teollisuuden tuottamien lietteiden polttokelpoisuuden laajempi selvittäminen saattaisi olla kannattavaa. Näiden osalta on täten olemassa selkeä jatkotutkimusmahdollisuus.

Vaikka linko on laskelmissa osoittautunut suotonauhapuristinta kalliimmaksi investoinniksi, sen valintaa mekaaniseksi vedenerottimeksi kuitenkin puoltaa käyttövarmuus ja käyttökokemukset nimenomaan kunnallisessa lietteenkäsittelyssä sekä vähäinen puhdistus- ja tarkkailutarve. Suomessa kunnalliset puhdistamot ovat melko pieniä laitoksia, joissa usein on työvuorossa ainoastaan yksi käyttökäyttäjä kerrallaan. Teollisuudessa sen sijaan saattaa olla paremmat mahdollisuudet esimerkiksi puhdistaa suotonauhapuristinta ja pestä sen viiraa säännöllisesti.

Sähkönkulutukset laitteilla ovat samaa luokkaa, joten kustannusero syntyy nimenomaan investoinnista eikä käytöstä. Polymeerin tarve laitteilla vaihtelee tämän työn tutkimustietojen mukaan siten, että linko kuluttaisi kyseistä kemikaalia kaksinkertaisesti verrattuna suotonauhapuristimeen. Tämä tulos on kuitenkin lähinnä suuntaa antava, koska työtä varten saadut polymeerin kulutustiedot ovat olleet karkeita arvioita, ja mikä tärkeintä, kuivauksessa tarvittava polymeerimäärä riippuu suurimmaksi osaksi kuivattavan lietteen koostumuksesta ja ominaisuuksista. Kemikaalimääriä voidaan siis lähinnä arvioida, oikeat määrät ja parhaiten soveltuvat kemikaalityypit selviävät yleensä vasta kokeilemalla.

Muun muassa kemikaalien sopivuuden takia PAKU-projektissa olisi ollut hyvä alkuvaiheessa toteuttaa jonkinlaisia kokeellisia lietetutkimuksia kohdealueiden lietteillä. Toinen tätä puoltava seikka on yhdyskuntalietteen alkuainekoostumus sekä lämpöarvo, jotka olisi ollut mahdollista selvittää laboratoriotutkimuksella. Näin olisi ollut käytettävissä luotettavaa tietoa laite- ja kustannustarkastelun avuksi. Nyt lietetiedot pohjautuvat kirjallisuuteen, keskimääräisiin löydettyihin arvoihin, jotka ovat lähinnä ulkomaisten yhdyskuntalietteiden tietoja. Suomen yhdyskuntalietteistä ei selvinnyt kovin hyvin juuri alkuainekoostumuksia. Niitä ei ole teetetty puhdistamojen tai muiden tahojen toi-

mesta, koska niitä ei normaalisti tarvita mihinkään. Kompostointi tai mädätys ei käsittelymenetelmänä tarvitse tällaisia tietoja, ja lietteen polton tutkimus ja käytännöt ovat Suomessa vielä alkutaipaleella. Raskasmetallianalyysija sen sijaan teetetään kunnallisista lietteistä säännöllisesti, koska tietoja tarvitaan esimerkiksi käsitellyn lietteen laillista maanparannuskäyttöä varten.

Lietteen yleinen vastaanottomaksu Joutsenossa EKJH:n kompostointilaitoksella on verollisena 76,95 €t ja verottomana 63,07 €t (Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy, 2007a). Lietteen kuiva-ainepitoisuus vaikuttaa vastaanottomaksuun siten, että mitä kuivempaa liete on, sitä edullisempaa sen vieminen kompostoitavaksi on. Keskimäärin vastaanotettava liete on kuiva-ainepitoisuudeltaan 20 %, mutta lietteen tuottajan kanssa tehtyyn palvelusopimukseen kirjataan vastaanottomaksu tapauskohtaisesti. Lietteen kuiva-ainepitoisuuden ollessa 10 % tai 25 %, voidaan karkeasti arvioida kuiva-ainepitoisuuden vaikutuksen näiden lietteiden hintaan olevan noin puolitoistakertainen (Salmi, 17.8.2007). Voidaan siis laskea, että jos 25 %:n lietteen vastaanottohinta olisi mainittu 63,07 €t, niin karkean arvion mukaan 10 %:lle lietteelle hinta olisi noin 95 €t. Tämä tosin on ääritapaus, koska 10 %:n kuiva-ainepitoista lietettä ei käytännössä viedä kompostointiin sillä niin vetistä massaa ei ole järkevä kompostoida (Salmi, 17.8.2007). Toisaalta voidaan laskea säästö toiseen suuntaan, ja todeta, että kuiva-ainepitoisuudeltaan 35 %:n lietteelle hinta olisi noin 50 €t. Hinta on saatu olettamalla hinnanmuutoksen olevan samansuuruinen molempiin suuntiin.

Lietteelle on tapauskohtaisesti myös ala- ja ylärajoja kuiva-ainepitoisuuden suhteen. Alaraja kompostoinnissa on usein noin 10 % ja yläraja 40–50 %. Nämä ovat olemassa siksi, että kompostointi on biologinen prosessi, joka tarvitsee toimiakseen tietyn vesimäärän. (Salmi, 17.8.2007)

PAKU-laitoksen kannalta tällainen hintavaihtelu on mielenkiintoista. Polttoon vastaanotettava liete voitaisiin todennäköisesti hinnoitella samalla tavoin. Kenties PAKU-laitokseen olisi mahdollista vastaanottaa myös märkää, 10 %:n kuiva-ainepitoista lietettä. Tällöin vastaanottomaksu voitaisiin nostaa siten, että se kuitenkin säilyisi kilpailukykyisenä esimerkiksi kompostointiin verrattuna. Toisaalta näin märän lietteen polttoon tarvittaisiin lisäenergiaa, joten tällaista lietettä tuskin on järkevä ottaa vastaan PAKU-laitokselle.

Lietteen vastaanottohinta vaihtelee alueittain ja laitoksittain, mutta Etelä-Karjalassa EKJH:ssa se on normaalisti verottomana jo mainittu 63,07 €t. PAKU-laitoksen maksimikustannus ei saa nousta yli nykyisten lietteen vastaanottohintojen, jotta poltto olisi kilpailukykyinen vaihtoehto lietteen käsitteilyyn.

Aiemmin tässä työssä esitetyistä case-laskelmista nähdään, että lietteen esikäsittelykustannus PAKU-laitoksella on 3-5 €t. Jos polttolaitoksen kokonaiskustannukseksi oletetaan 55 €t, on esikäsittelyn osuus 5-9 % laitoksen kokonaiskustannuksista. Lietteen esikäsittely saa siis aiheuttaa PAKU-laitoksen kustannuksista korkeintaan kymmenisen prosenttia.

Vesilaitokselle lietteen esikäsittely ja kuljetus puolestaan aiheuttavat kustannuksia noin 15 €t. Kun ajatellaan PAKU-laitoksen vastaanottomaksun olevan mainittu 63,07 €t, ovat esikäsittelykustannukset noin 24 % vastaanottomaksun suuruudesta. Vesilaitokselle aiheutuvat kokonaiskustannukset ovat siis noin 78 €t. Näin ollen lietteen esikäsittelyn ja kuljetuksen osuus kokonaiskustannuksista on noin 19 %.

Täytyy muistaa, että PAKU-laitoksen hinnoittelu tultaneen todellisuudessa tekemään vallitsevan kilpailutilanteen mukaan. Poltto sovitettaneen muiden käsittelyvaihtoehtojen hintoihin siten, että se on hieman edullisempi. Kaiken takana vallitsee kuitenkin liiketoimintaidea.

Tilanteessa, jossa PAKU-laitos sijaitsee puhdistamon vieressä ja haluaa tarjota puhdistamolle lietteenkäsittelyn kokonaisvaltaisen palvelun lietteen tiivistyksestä eteenpäin, voidaan vastaanottomaksua korottaa käsittelykustannusten mukaisesti. Lappeenrannan kokoisen puhdistamon tapauksessa tämä tarkoittaisi perusmaksuun 7,30 euron korotusta yksikköhintaan. Tämä korotus sisältää kustannukset lietteen pumppauksesta, syötöstä ja mekaanisesta kuivauksesta. Tällaisessa tilanteessa puhdistamon ei siis tarvitsisi investoida lietteenkäsittelyyn millään tapaa eikä myöskään huolehtia sen toimivuudesta. Voi olla, että tämäntyyppinen palveluntarjonta kiinnostaisi etenkin puhdistamoja, joilla on ongelmia lietteenkäsittelynsä kanssa. Esimerkiksi jos jollakin seudulla liete on laadultaan sellaista, että sitä ei saada kuivattua edes 20 %:n kuiva-ainepitoisuuteen, voisi olla mahdollista polttaa se PAKU-laitoksessa. Tällöin ei syntyisi ylimääräistä lämpöä, mutta syntyvä sähkö voitaisiin mahdollisesti myydä vesilaitokselle.

Vaihtoehtoisesti jos puhdistamo investoisi PAKU-laitokseen, ja laitos rakennettaisiin puhdistamon viereen, käsittelisi puhdistamo lietteen tuhaksi asti. Tällöin tulisi tarkastella PAKU:n kokonaislaitoskustannuksia suhteessa edellä mainittuihin käsittelykustannuksiin.

Laskelmat on tässä työssä suoritettu verottomilla hinnoilla. Tuloksia lukiessa on hyvä pitää mielessä, että ne eivät ole ehdottomia totuuksia kyseisistä laitteista tai kokonaisuuksista vaan lähinnä suuntaa antavia arvoja. Tulosten perusteella voi esimerkiksi vertailla laitteita ja tapauksia keskenään, koska kaikki laskelmat on suoritettu yhtä tarkoilla lähtöarvoilla.

Mekaanisen kuivauksen tehostaminen, kuiva-ainepitoisuuden nostaminen muutamalla prosenttiyksiköllä saattaisi mahdollisesti tuoda pientä hyötyä kuljetuskustannuksiin vähentyneen lietteen kuljetusmäärän myötä. Tätä tarkastelua ei kuitenkaan ole tämän työn puitteissa tehty, koska lietteestä ei ole ollut saatavilla tarpeellisia tietoja. Etenkään tiheydestä ja sen muutoksista kuiva-ainepitoisuuden mukaan ei ole ollut käytettävissä luotettavaa tietoa. On myös mahdollista, että muuttaman prosenttiyksikön muutos kohti kuivempaa lietettä, ei näkyisi ollenkaan esimerkiksi kuljetuskustannuksissa.

Lietteenkäsittelyn logistiikka kuljetuksineen ja varastointeineen on hyvä suunnitella toimivaksi ja kannattavaksi kokonaisuudeksi, koska se on tärkeä osa sekä PAKU-laitoksen kustannuksia että ympäristövaikutuksia. Esimerkiksi tarpeettoman pienet kuljetuskuormat aiheuttavat turhia kuljetuksen päästöjä. Oikeanlainen kuljetuskalusto ja aikataulu kannattaa suunnitella huolellisesti.

Tässä tutkimuksessa on kartoitettu aiheen piiriin lukeutuvia tekniikoita, menetelmiä ja käytäntöä, eikä niinkään pyritty tuottamaan yksioikoisia tuloksia, jotka olisivat hyödynnettävissä sellaisenaan. Lietteenpolttolaitos, sen suunnittelu ja toteutus ovat kuitenkin aina yksilökohtaisia projekteja, joiden tarkkaan käsittelyyn tarvittaisiin vähintään joitakin alustavia päätöksiä. Esimerkiksi laitoksen sijoituspaikan ratkaisu on yksi olennaisimmista tekijöistä, joka rajaa paljolti myös valittavaa lietteenkäsittelymallia. Lietteenkäsittelyvaihtoehdon valinta tapahtuu vasta muiden laitosta koskevien ja rajaavien päätösten teon jälkeen.

Lähteet

- Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy. 2007a. Hinnasto, yhdyskuntaliete [verkkodokumentti]. [viitattu 15.8.2007]. Saatavissa: http://www.ekjh.fi/hinnasto_ajooohje.html.
- Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy. 2007b. Yleistä [verkkodokumentti]. [viitattu 22.8.2007]. Saatavissa: <http://www.ekjh.fi/yleista.html>.
- Hälvä, Henna. 1996. Termodynamiikan taulukot. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energia-tekniikan osasto. Teknillinen termodynamiikka.
- Laitex Oy. 2007a. RK, ruuvikuljettimet [verkkodokumentti]. [viitattu 11.8.2007]. 2 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.laitex.fi/pdf/ruuvikuljettimet.pdf>.
- Laitex Oy. 2007b. Vierailu. Lappeenranta. 16.4.2007.
- Lehtoranta, Risto. 2006. Yhdyskuntien jätevesien käsittely 2005 [verkkodokumentti]. Lounais-Suomen ympäristökeskus. [Viitattu 24.7.2007]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=59225&lan=sv>.
- Lohiniva, Elina; Mäkinen, Tuula & Sipilä, Kai. 2001. Lietteiden käsittely. Uudet ja käytössä olevat tekniikat. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT tiedotteita 2081. 146 s. ISBN 951-38-5795-6.
- Mäkelä, Tommi et al. 2005. Logistiikka ja kuljetusjärjestelmät. Tampereen teknillinen yliopisto. Liikenne- ja kuljetustekniikan laitos. Opetusmoniste 38. 2. painos. Tampere: Juvenes-Print TTY. 165 s. ISBN: 952-15-1452-3.
- Reimann, Dieter O. 1999. Problems about sewage sludge incineration [verkkodokumentti]. 11 s. Osa artikkelikokonaisuutta: Session 3: Technology and innovative options related to sludge management, sivut: 155-212. [viitattu 15.5.2007]. Saatavissa PDF-muodossa: <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/workshoppart4.pdf>.
- Vesanto, Petri. 2006. Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä. Jätteenpolton BREF 2006. Suomen Ympäristö 27/2006. Suomen Ympäristökeskus. Helsinki: Edita Prima Oy. 101 s. ISBN: 952-11-2308-7.
- Werther, J.; Ogada, T. 1997. Sewage sludge combustion [viitattu 15.5.2007]. 62 s. 55-116.
- Ympäristöministeriö. 2003b. Kaakkois-Suomen alueellisen jätesuunnitelman seuranta ja tarkistaminen [verkkodokumentti]. 10.4.2003. [Viitattu 1.8.2007]. 48 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=1151&lan=fi>.
- Ympäristöministeriö. 2005. Yhdyskuntien jätevedet [verkkodokumentti]. [Viitattu 6.3.2007]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=22409&lan=fi>.

Suulliset lähteet ja sähköpostiviestit

Aho, Jouni. 2007. Vapo Ympäristö. Tuotepäällikkö. Puhelinhaastattelu. 13.6.2007.

Korkeakangas, Jari. 2007. Sita Finland Oy. Lappeenrannan yksikön päällikkö. Puhelinhaastattelu. 27.6.2007.

Kurronen, Kari. 2007. Laitex Oy. Toimitusjohtaja. Haastattelu. 16.4.2007.

Lindqvist, Bengt. 2007. Septek Oy. Myyntijohtaja. Puhelinhaastattelu. 27.6.2007.

Nuutinen, Pentti. 2007. Slamex Oy. Projektipäällikkö. Puhelinhaastattelu. 12.6.2007.

Nyyssönen, Veikko. 2007. Kouvolan Vesi. Mäkikylän jätevedenpuhdistamo. Käyttötietnikko. Haastattelu. 28.5.2007.

Salmi, Janne. 2007. Vapo Oy. Vapo Ympäristö. Tuotantopäällikkö, kompostointi. Puhelinhaastattelu. 17.8.2007.

Stenberg, Folke. 2007. Slamex Oy. Asiantuntija. Puhelinhaastattelu. 12.6.2007.

Suwanen, Kari. 2007. Laitex Oy. Johtaja, myynti- ja markkinointi. Puhelinhaastattelu. 8.8.2007.

Suvanto, Pekka. Preseco Oy. 2007. Myyntipäällikkö, kotimaan myynti. Puhelinhaastattelu. 11.6.2007.

Söderlund, Thomas. 2007. Alfa-Laval. Tuotepäällikkö, energia & ympäristö ja prosessiteollisuus. Puhelinhaastattelu. 11.6.2007.

3. Höyryprosessin mallintaminen

3.1 Tausta ja tavoite

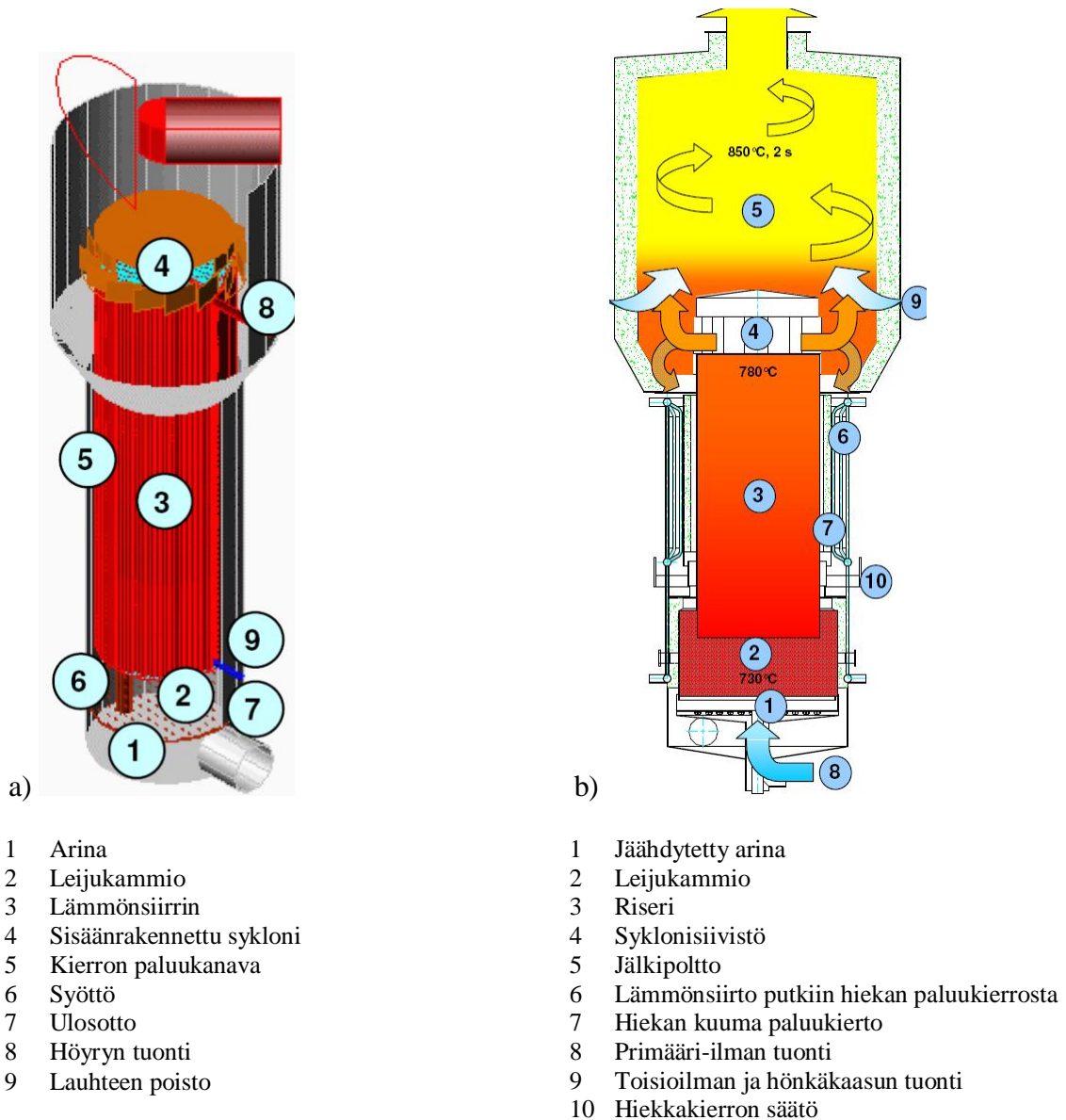
PAKU-laitoksen kaltaisen uudentyypin laitoksen kyseessä on tärkeää pystyä arvioimaan mahdollisimman aikaisessa vaiheessa laitoksen suorituskyky ja hinta. Näiden avulla voidaan määrittää laitoksen kilpailukyky valitussa liiketoimintaympäristössä ja tarvittaessa muuttaa toteutuksen yksityiskohtia kilpailukykyyn parantamiseksi.

Tässä osatehtävässä tarkastellaan PAKU-laitoksen kahta perusvaihtoehtoa: pelkkää lietettä polttava laitos sekä rinnakkaispolttovaihtoehto, jossa voidaan polttaa lietteen lisäksi biopolttoaineita tai kierätyspolttoaineita. Tässä tarkastelussa rinnakkaispolttoaineeksi on valittu metsätähdehake. Pelkkää lietettä poltettaessa laitoksen kokoa rajoittaa käytettävissä olevan lietteen määrä, kun taas rinnakkaispolton tapauksessa kokoluokkaa voidaan kasvattaa rinnakkaispolttoaineen avulla. Yhdyskuntalietteen keskimääräinen kuiva-ainepitoisuus on n. 20 m-%, mutta tässä tarkastelussa pitoisuus on valittu jonkin verran pienemmäksi, jolloin pelkän lietteen polton tapauksessa laitoksesta saadaan vain sähköä (ns. sähköntuotantokonsepti, tapaus 1). Pienempään kuiva-ainepitoisuuteen päästään tarvittaessa sekoittamalla jäteveden puhdistusprosessin läpikäynyttä tiivistettyä yhdyskuntalietettä sekä prosessista otettua mekaanisesti kuivattua lietettä. Rinnakkaispolton tapauksessa saadaan sähkön lisäksi myös lämpöä (sähkön ja lämmön yhteistuotantokonsepti). Lämpö käytetään joko kaukolämmitykseen (tapaus 2A) tai pelletin raaka-aineen kuivaamiseen (tapaus 2B). Kaukolämmityksen edellytyksenä on, että laitos on riittävän lähellä lämpökuormaa, jotta kytkeminen on taloudellisesti kannattavaa. Vastaavasti pelletin raaka-aineen kuivaaminen edellyttää käytännössä, että lähellä on pellettejä valmistavaa teollisuutta. PAKU-laitosvaihtoehtojen rinnalla tarkastellaan sovellusta, jossa liete ja hake poltetaan kuumavesikattilassa ja tuotettu lämpö käytetään kaukolämmitykseen (lämpölaitosvaihtoehto, tapaus 3). Tässä tapauksessa ei saada sähköä, mutta laitoksen rakenne on PAKU-vaihtoehtoja huomattavasti yksinkertaisempi.

Tässä osatehtävässä PAKU-laitokselle laaditaan tekninen malli ja määritetään laitosvaihtoehtojen suorituskyky. Mallin avulla tutkitaan lisäksi toimintaparametrien vaikutusta laitosvaihtoehtojen suorituskykyyn.

3.2 Laitoksen rakenne ja tekninen suorituskyky

PAKU-laitoksen lähtökohtana on kaupallinen kiertoletijutekniikka (Circulating Fluidized Bed, CFB) käytävä kuivuri, jossa liete kuivataan termisesti sekä vakio- $\text{lämpötilapalamisen}$ (Constant Temperature Combustion, CTC) periaatteella toimiva kiertoletijureaktori, jossa kuivattu liete ja hönnäkaasut poltetaan (Einco 2007a-b). Kuvassa 3-1 on esitetty kuivurin ja reaktorin rakenne sekä pääosat.

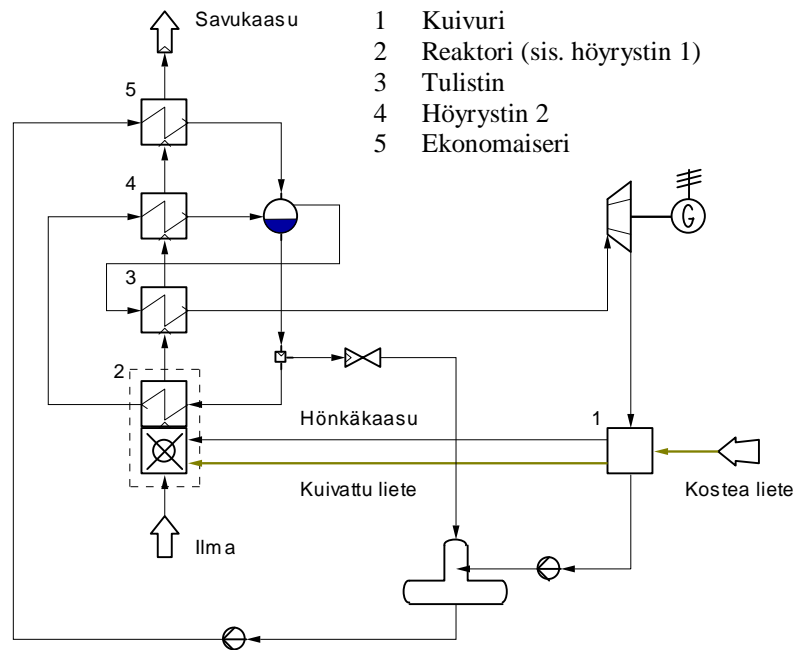


KUVA 3-1. TUTKITUN A) KIERTOLEIJUKUIVURIN JA B) KIERTOLEIJUREAKTORIN RAKENNE (EINCO 2007A-B).

Suunniteltu PAKU-laitos on rakenteeltaan mahdollisimman yksinkertainen lieriökattilalla varustettu vastapainevoimalaitos, jossa kiertoaineena on vesi (Horttanainen et al. 2007). Yksinkertaisella toteutustavalla pyritään edulliseen rakenteeseen, mikä on ensiarvoisen tärkeää pienen kokoluokan energiantuotannossa. Yksinkertaisuuden vuoksi laitoksessa ei ole esimerkiksi palamisilman esilämmitystä. Valitussa laitosratkaisussa syöttövesi esilämmitetään ensin savukaasukanavassa olevassa ekonomaisierissa ja johdetaan sen jälkeen lieriöön. Lieriöstä otettava kylläinen vesi höyrystetään kahdessa peräkkäisessä vaiheessa siten, että se kulkee ensin reaktorissa sijaitsevan höyrystimen läpi ja sen jälkeen laitoksen savukaasukanavassa olevan höyrystimen läpi. Kylläinen höyry tulistetaan tuorehöyryn tilaan tulistimessa ja johdetaan turbiiniin läpi, jolloin saadaan mekaanista energiaa. Laitoksessa on yksi sekoitusesilämmitin syöttövesisäiliön yhteydessä. Esilämmittimessä veden lämmitykseen käytetään lieriöstä otettavaa korkeapaineista kylläistä vettä, joten turbiinissa ei tarvita väliottoja. PAKU-laitoksen erityispiirteenä on, että turbiinista poistuva virtaus johdetaan kokonaan tai osittain kuivuriin, jossa virtauksen lämpöä käytetään höyrystämään lietteen sisältämää vettä. Kuivuri on välttämätön käytettäessä märkää lietettä, jotta saavutetaan jätteenpolttodirektiivin edellyttämä

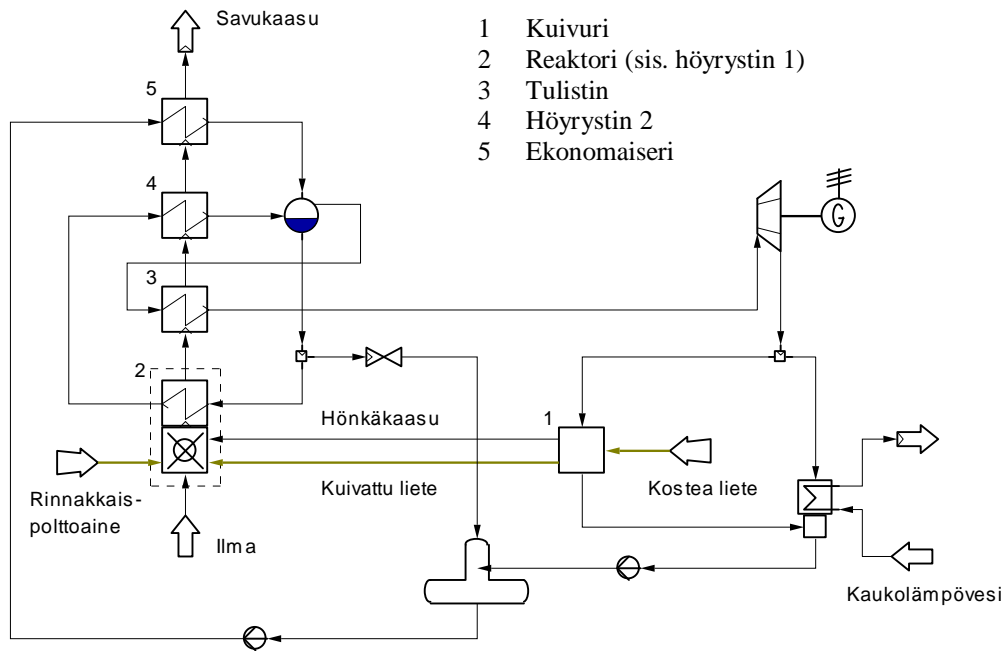
palamislämpötila 850 °C. Kuivurista palautuva lauhde pumpataan lauhdepumpulla syöttövesisäiliöön ja sieltä syöttövesipumpulla edelleen kattilaan.

Saapuvan lietteen kuiva-ainepitoisuus on valittu siten, että turbiinin jälkeen saatava lämpö kuluu pelkkää lietettä poltettaessa kokonaisuudessaan lietteen kuivaamiseen. Näin ollen laitoksesta saadaan vain sähköä. Toisaalta ei myöskään tarvita ulkopuolista jäähdytystä esimerkiksi kaukolämmönvaihtimen muodossa. Pelkkää lietettä polttavan PAKU-laitosvaihtoehdon (tapaus 1) prosessikaavio on esitetty kuvassa 3-2.



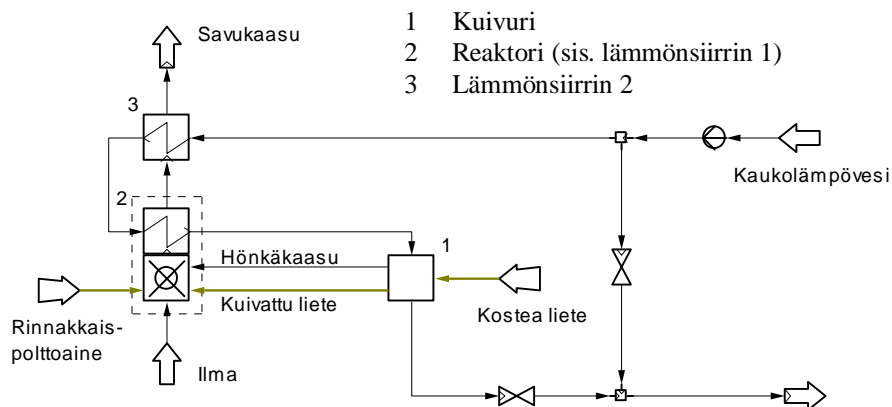
KUVA 3-2. PELKKÄÄ LIETETTÄ POLTTAVAN PAKU-LAITOKSEN PROSESSIKAAVIO (TAPAUS 1).

Rinnakkaispolton tapauksessa reaktoriin tuodaan myös biopolttoainetta, jolloin prosessista saadaan sähköä lisäksi lämpöä. Jos rinnakkaispolttoaineen määrä on pieni, kuivuria tarvitaan myös tässä tapauksessa jätteenpolttodirektiivin edellyttämän palamislämpötilan saavuttamiseksi. Lämmön poisto prosessista tapahtuu kuivuriprosessin kanssa rinnakkain. Kuvassa 3-3 on esitetty laitosvaihtoehdot (tapaus 2A), jossa lämpö käytetään kaukolämmitykseen. Laitosvaihtoehdot (2B), jossa lämpö käytetään pelletin raaka-aineen (purun) kuivaamiseen, on muuten kuvassa esitetyn kaltainen, mutta kaukolämmönvaihtimen tilalla on pellettiraaka-aineen kuivuri. Kuivurin rakenne on samankaltainen lietteen kuivurin kanssa.



KUVA 3-3. LIETETTÄ JA BIOPOLTTOAINETTA POLTTAVAN PAKU-LAITOKSEN PROSESSIKAAVIO, KUN YLIMÄÄRÄINEN LÄMPÖ KÄYTETÄÄN KAUKOLÄMMITYKSEEN (TAPAUS 2A).

Kuvassa 3-4 on esitetty PAKU-laitoksen yhtenä vaihtoehtona oleva lämpölaitos (tapaus 3). Se sisältää lietteen kuivurin ja reaktorin PAKU-laitosten tapaan, mutta ei vesihöyryn kiertoprosessia. Laitos käyttää lietettä ja biopolttoainetta ja tuottaa vain lämpöä. Toimiakseen se tarvitsee ulkopuolista sähkötehoa. Valitussa kattilaratkaisussa kaukolämpöverkosta palaava vesi lämpiää ensin savukaasukanavassa ja sen jälkeen reaktorin yhteydessä olevassa lämmönsiirtimessä. Kuumentunut vesi johdetaan kuivuriin, jossa sen lämmöllä kuivataan lietettä, ja kuivurin jälkeen takaisin kaukolämpöverkkoon. Lähtevän veden lämpötila säädetään halutuksi sekoittamalla siihen verkosta palaavaa kylmempää vettä.



KUVA 3-4. LIETETTÄ JA BIOPOLTTOAINETTA POLTTAVAN LÄMPÖLAITOKSEN PROSESSIKAAVIO (TAPAUS 3).

Kaikissa laitosvaihtoehdoissa poltettava lietemäärä on 38100 t/a ja kuiva-ainepitoisuus 14.2 m-%. Tämä vastaa 150000 asukkaan yhdyskunnan lietemäärää. Rinnakkaispoltossa käytetään lisäksi metsätähdehaketta 11400 t/a, jonka kosteus on 40 m-%. Rinnakkaispolttoaineen pienen määrän vuoksi kuivuria tarvitaan myös tässä tapauksessa. Laitosten vuotuinen käyttöaika on 8000 h. Laskennassa käytetty lietteen kuiva-aineen koostumus ja lämpöarvo vastaavat yhdyskuntalietteen keskimääräisiä arvoja (Horttanainen et al. 2007). Taulukossa 3-1 on esitetty lietteen ja metsätähdehakkeen poltotekniset ominaisuudet.

Taulukko 3-1. Laskennassa käytetyt lietteen ja metsätähdehakkeen kuiva-aineiden polttotekniset ominaisuudet.

		Liete	Hake
Alkuainekoostumus			
C	[m-%]	50.0	50.6
H	[m-%]	7.0	6.2
N	[m-%]	4.8	0.5
O	[m-%]	15.2	42.3
S	[m-%]	0.9	-
tuhka	[m-%]	22.1	0.4
Tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]	23.0	19.1

Laitoskomponenttien toimintaparametrit on valittu siten, että ne edustavat tarkastelun kohteena olevan kokoluokan tyypillisiä arvoja. Turbogeneraattorin toiminta-arvot vaikuttavat merkittävästi laitoksesta saatavan sähkön määrään ja sen vuoksi arvojen valintaan on kiinnitetty erityistä huomiota. Vaihtoehdossa 1 toiminta-arvot perustuvat kaupalliseen vaihteistolla varustettuun turbogeneraattoriin, jonka teho on n. 400 kW_e (Siemens 2007). Vaihtoehtojen 2A ja 2B toiminta-arvot on arvioitu kotimaisen, vielä tuotekehitysasteella olevan suurnopeustekniikkaa käyttävän n. 1000 kW_e -tehoisen laitteiston perusteella (Savonia Power 2008). Kuivureissa ja reaktorissa käytettävän kiertoletijutekniikan vuoksi laitosten omakäyttötehot ovat varsin suuria. Mallinnuksen tarkkuuden varmistamiseksi nämä on määritetty yhteistyössä kiertoletijukomponenttien valmistajan kanssa (Ruottu 2008). Prosessimallinnuksen lähtöarvot on esitetty taulukossa 3-2.

Taulukko 3-2. Prosessimallinnuksen lähtöarvot (1 pelkkää sähköä tuottava PAKU-laitos, 2A ja 2B sähköä ja lämpöä tuottavat PAKU-laitokset, jossa lämpö käytetään kaukolämmitykseen tai pelletin raaka-aineen kuivaukseen, 3 lämpöä tuottava lämpölaite).

		1	2A	2B	3
Lietteen kuiva-ainepitoisuus ennen kuivuria / kuivurin jälkeen	[m-%]	14.2 / 90.0			
Palamisen ilmakerroin	[-]	1.4			
Savukaasun lämpötila reaktorin jälkipoltto-kammion jälkeen / kattilan jälkeen	[°C]	850 / 230			850 / 150
Tuorehöyryn paine	[bar]	40			-
Tuorehöyryn lämpötila	[°C]	470			
Vastapaine	[bar]	4			-
Kuumavesikattilan paine	[bar]	-			10
Kuumavesikattilan lämpötila	[°C]				175
Kaukolämpöveden meno- / paluulämpötila	[°C]	-	90 / 45	-	90 / 45
Pellettiraaka-aineen kuiva-ainepitoisuus ennen kuivausta / kuivauksen jälkeen	[m-%]	-	-	45 / 85	-
Turbiinin isentrooppinen hyötysuhde	[%]	68	77		-
Turbiinin mekaaninen hyötysuhde	[%]	93	93		-
Vaihteiston hyötysuhde	[%]	97	-		-
Generaattorin hyötysuhde	[%]	95	96		-
Omakäyttöteho	[kW]	204	301	423	277

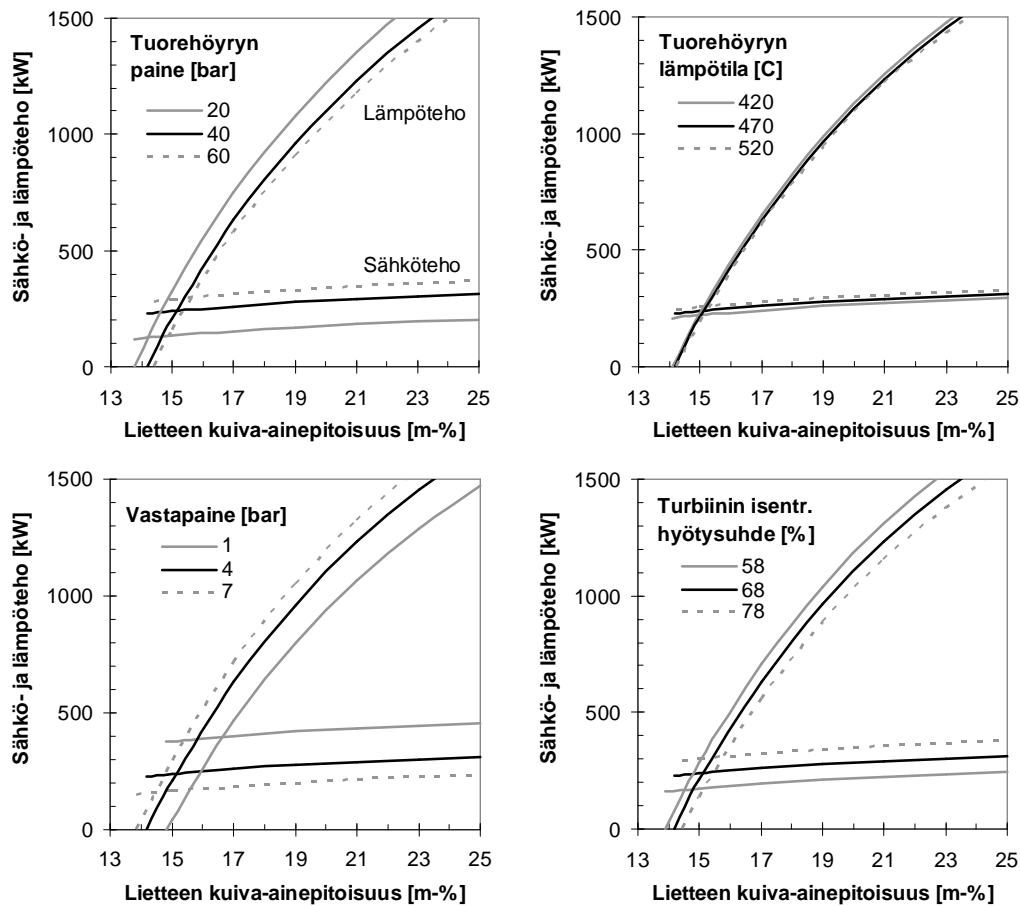
Kuivureille ja reaktorille on laadittu simulointimallit ja ne on ohjelmoitu IPSEpro-mallinnusohjelmalla (IPSEPro 2008). Saadut komponentit on liitetty osaksi IPSEprolla tehtyjä laitosmalleja. Mallinnuksen tuloksena saadut ja talouslaskennan perustana käytetyt laitosvaihtoehtojen suoritusarvot on esitetty taulukossa 3-3.

Taulukko 3-3. Laitosvaihtojen suorituskyky.

		1	2A	2B	3
Nettosähköteho	[kW]	228	730	608	-
Sähkötehon tarve	[kW]	-	-	-	277
Kaukolämpöteho	[kW]	-	2924	-	4664
Kuivatun pellettiraaka-aineen määrä	[t/a]	-	-	33220	-
Sähköntuottohyötysuhde	[%]	14.8	12.8	10.7	-

Pelkkää lietettä poltettaessa PAKU-laitoksen koko riippuu käytettävissä olevan lietteen määrästä. Rinnakkaispolttoaineen avulla kokoa voidaan kasvattaa. Tällöin sekä sähköteho että ylimääräinen lämpöteho kasvavat.

Kuvassa 3-5 on tarkasteltu lietteen kuiva-ainepitoisuuden sekä tärkeimpien prosessiarvojen vaikutusta PAKU-laitoksesta saatavan sähkö- ja lämpötehon määrään. Tarkastelun kohteena on pelkkää lietettä polttava laitosvaihtoehto 1, johon on lisätty kuivurin rinnalle kaukolämmönvaihdin. Lietteän kuiva-aineen massavirta on pidetty laskennassa vakiona.



KUVA 3-5. PELKKÄÄ LIETETTÄ POLTTAVAN PAKU-LAITOKSEN SUORITUSKYVYN RIIPPUVUUS LIETTEEN KUIVA-AINEPITOISUUDESTA SEKÄ A) TUOREHÖYRYN PAINEESTA, B) LÄMPÖTILASTA, C) VASTAPAINEESTA SEKÄ D) TURBIININ ISENTROOPPISESTA HYÖTYSUHTEESTA.

Lämpötehokäyrien nollakohdat osoittavat kuiva-ainepitoisuudelle sallitun minimiarvon, jolloin laitos tuottaa vain sähköä. Laitoksen prosessiarvojen vaikutus minimiarvoon on pieni. Kuiva-ainepitoisuuden kasvaessa ylimääräinen lämpöteho kasvaa voimakkaasti, mutta sähköteho sen sijaan vain vähän. Sähkötehon kasvu johtuu pääosin kuivurin tehontarpeen ja siten koko laitoksen omakäyttötehon pienemisestä lietteän kuiva-ainepitoisuuden kasvaessa. Tuorehöyryn paine, vas-

tapaine ja turbiinin isentrooppinen hyötysuhde vaikuttavat sähkö- ja lämpötehoon merkittävästi, tuorehöyryn lämpötilan vaikutus on näihin verrattuna sen sijaan pieni.

3.3 Johtopäätökset

Mallinnuksen tuloksena on saatu tieto tutkittujen PAKU-laitosvaihtoehtojen ja lämpölaitosvaihtoehdon suorituskyvystä sekä komponenttitason prosessiarvoista, virtauksista ja tehoista. Tiedot toimivat lähtökohtana hankkeen puitteissa tehtäville jatkotarkasteluille.

Tulokset osoittavat, että PAKU-prosessissa liete voidaan käsitellä termisesti siten, että samalla saadaan sähköä ja mahdollisesti myös lämpöä. Pelkkää lietettä poltettaessa laitoksen kokoa rajoittaa lietteen saatavuus, mutta kokoa voidaan kasvattaa käyttämällä rinnakkaispolttoainetta.

Tarkastelussa lietteen kuiva-ainepitoisuus on valittu pieneksi, jolloin mukaan on voitu ottaa myös pelkkää sähköä tuottava PAKU-laitos. Yhdyskuntalietteen keskimääräisellä kuiva-ainepitoisuudella 20 m-% myös pelkkää lietettä polttavasta laitoksesta saadaan sähkön lisäksi merkittävä määrä lämpöä: käytetyillä prosessiarvoilla tuotetun sähkön ja lämmön suhde (rakennusaste) on 0.22. Ylimääräinen lämpö mahdollistaa lisätuotot, mutta toisaalta rajoittaa laitoksen sijoittamista, sillä lämmölle on löydettävä myös kuluttaja.

Tutkittujen laitosvaihtoehtojen sähköntuottohyötysuhteet jäävät lietteen kuivauksesta huolimatta melko alhaiselle tasolle. Tähän vaikuttavia tekijöitä ovat omakäyttötehon lisäksi mm. tuorehöyryn arvot, vastapaine ja turbogeneraattorin suorituskyky. Pääsy laitoksen suureen omakäyttötehoon on kuivureissa ja reaktorissa käytetty kiertoleijutekniikka, esimerkiksi arinapolton käyttäminen pienentäisi omakäyttötehoa jonkin verran. Kuivatun lietteen jauhemaisen rakenteen vuoksi arinapoltoa ei käytännössä voi kuitenkaan käyttää pelkän lietteen poltossa.

PAKU-prosessin höyrynarvot edustavat pienissä vesihöyryvoimalaitoksissa tavallisesti käytettyjä arvoja. Esimerkiksi paineen kasvattaminen lisääi laitoksesta saatavaa sähkötehoa. Valitussa toteutuksessa höyry johdetaan turbiinin jälkeen kuivuriin, joten turbiinin vastapaine määräytyy kuivurin toiminnan perusteella. Mikäli käytettäisiin väliotolla varustettua turbiinia, kuivurin tarvitsema höyry voitaisiin ottaa väliotosta ja loppuhöyry voisi paisua turbiinissa joko kaukolämpösovelluksen tai lauhduttimen määräämään painetasoon saakka. Turbogeneraattorin valintaa rajoittaa kaupallisesti saatavilla olevien vaihtoehtojen vähäisyys. Yksi mahdollinen ratkaisu on suunnitella PAKU-laitosta varten oma turbogeneraattori, mikäli laitoksen kaupallinen potentiaali antaa siihen edellytykset.

Tutkimuksen lähtökohtana on ollut mahdollisimman yksinkertainen höyryprosessi. Mikäli rinnakkaispolttoaineen määrä olisi riittävän suuri, jätteenpolttodirektiivin edellyttämä palamislämpötila voitaisiin saavuttaa myös ilman lietteen kuivaamista. Kuivurin poisjättäminen yksinkertaistaisi PAKU-laitosta edelleen ja mahdollistaisi vastapaineen pienentämisen. Toisaalta prosessia voidaan kehittää edelleen lisäämällä siihen esimerkiksi ilman esilämmitys, savukaasun lauhdutus sekä edellä mainittu turbiinin väliotto ja matalapaineosa. Erilaisilla prosessikytkennöillä (esimerkiksi veden kierto kattilassa tai tulistuksen toteutus) voidaan saada merkittäviä etuja laitoksen rakenteeseen ja säätöominaisuuksiin.

Edellä mainitut prosessimuutokset vaikuttavat suorituskyvyn lisäksi myös laituskustannuksiin. Tämän vuoksi tieto muutosten kaupallisesta toteutettavuudesta tai mahdollinen prosessioptimointi edellyttävät koko laitoksen investoinnin, käytön ja kunnossapidon kattavaa taloudellista tarkastelua.

Lähteet

- Einco 2007a. Epäsuora kiertomassakuivuri. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 10.12.2007]. Saatavissa: <http://www.einco.fi/Epasuora%20kuivuri%20-%20site.pdf>
- Einco 2007b. CTC-reaktori. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.12.2007]. Saatavissa: <http://www.einco.fi/CTC-reaktori%20-%20site%20.pdf>
- Horttanainen Mika, Kaikko Juha, Bergman Riikka, Kakko Katja, Manninen Hanna-Mari ja Marttila Esa 2007. Advanced process for thermal treatment of wastewater sludge. Kalmar Eco-Tech 2007, 6th International Conference on Technologies for Waste and Wastewater Treatment, Energy from Waste, Remediation of Contaminated Sites and Emissions Related to Climate. s. 21-30.
- Ruottu Ari 2008. Einco Oy. Sähköpostiviesti 4.2.2008.
- Siemens Turbomachinery Equipment GmbH 2007. Tarjous 10.5.2007.
- Savonia Power 2008. Powex-konsepti. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 29.4.2008]. Saatavissa: <http://www.savoniapower.com/showpage.php?id=5>
- IPSEPro 2008. IPSEpro Overview. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 30.4.2008]. Saatavissa: <http://www.simtechnology.com/IPSEpro/english/IPSEpro.php>

4 Paku-tuhkan hyötykäyttömahdollisuudet

4.1 Tuhkaselvityksen lähtökohdat

Lietteenpolton tuhkien merkitys kasvaa tulevina vuosina johtuen yhdyskuntalietteiden käytön vähentymisestä maataloudessa (kiristynvä lannoitelainsäädäntö) ja lietteen kaatopaikoille tapahtuvan loppusijoituksen kieltämisestä monissa maissa. Käytännössä lannoitekäytön rajoittaminen ja kaatopaikkasijoituksen kieltäminen johtavat helposti lietteen energiahyötykäytön lisääntymiseen, kuten on tapahtunut esim. Ruotsissa.

Lietteen termisellä käsittelyllä saavutetaan seuraavia etuja:

- Jätteen määrä pienenee merkittävästi. Esimerkiksi (Case Ekopark): 28 000 t_{SS}/a (SS = Sewage Sludge; märän yhdyskuntalietteen määrä) ⇒ 1 400 t_{SSA}/a (SSA = Sewage Sludge Ash; yhdyskuntalietteen kuiva-aineen sisältämän tuhkan määrä)
 - Kuiva-ainepitoisuus: 20 %
 - Kuiva-aineen tuhkapitoisuus: 25 %
 - Kuivan tuhkan massa termisen käsittelyn jälkeen: 5 % märän lietteen massasta.
- Jätteessä oleva energia saadaan hyödynnettyä lietteen kuivauksessa ja nettoenergian tuotannossa.
- Termisen käsittelyn jälkeen tuhka on vapaa patogeeneistä.

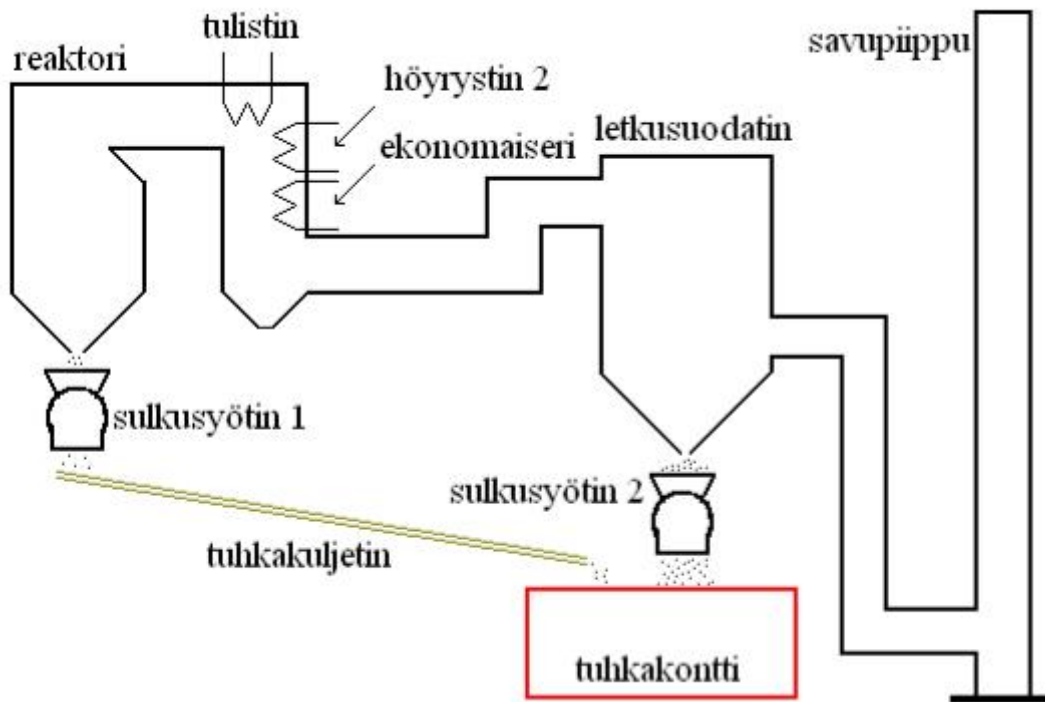
PAKU-prosessissa syntyvä tuhka voidaan lähtökohtaisesti luokitella, kuten tuhka yleensäkin polttoprosesseissa, ei-toivotuksi prosessin sivutuotteeksi. Perinteisesti erilaisten jäteperäisten polttoainesten sisältämä tuhka on luokiteltu kaatopaikkasijoitusta vaativaksi jätteeksi, monissa tapauksissa jopa ongelmajätteeksi. Tässä mielessä tuhkalla on perinteisesti ollut poltto-prosessien taloudellista kannattavuutta heikentävä vaikutus.

Tässä yhteydessä PAKU-laitoksen tuhkalle on etsitty ensisijaisesti prosesseja, joissa tuhkaa voitaisiin hyödyntää kaatopaikalla tapahtuvan loppusijoituksen sijaan. Tämä mahdollistaisi PAKU-konseptille hyötykäyttöasteen nostamisen myötä paremman laitostalouden. Hyödyntämistä on käsitelty sekä fysikaalisin perustein vertaamalla käytettävissä olleita tuhkan tunnettuja ominaisuuksia erilaisille hyödyntämisprosesseille määritettyihin rajoituksiin että lainsäädännöllisestä näkökulmasta. Selvitykset on tehty yhdyskuntalietteen tuhkalle.

4.2 Tuhkan merkitys PAKU-prosessissa

PAKU-prosessissa (kuva 4-1) syntyvää tuhkaa poistetaan lähtökohtaisesti kolmesta eri prosessivaiheesta (Ruottu, 2007):

- Pohjatuhka kattilasta: 10-20 m-% (jatkuva poisto)
- Lentotuhka letkusuodattimelta: 90-80 m-% (jatkuva poisto)
- Lämmönsiirryksikön pohjatuhka ≈ 0 (poisto manuaalisesti esim. huoltojen yhteydessä)

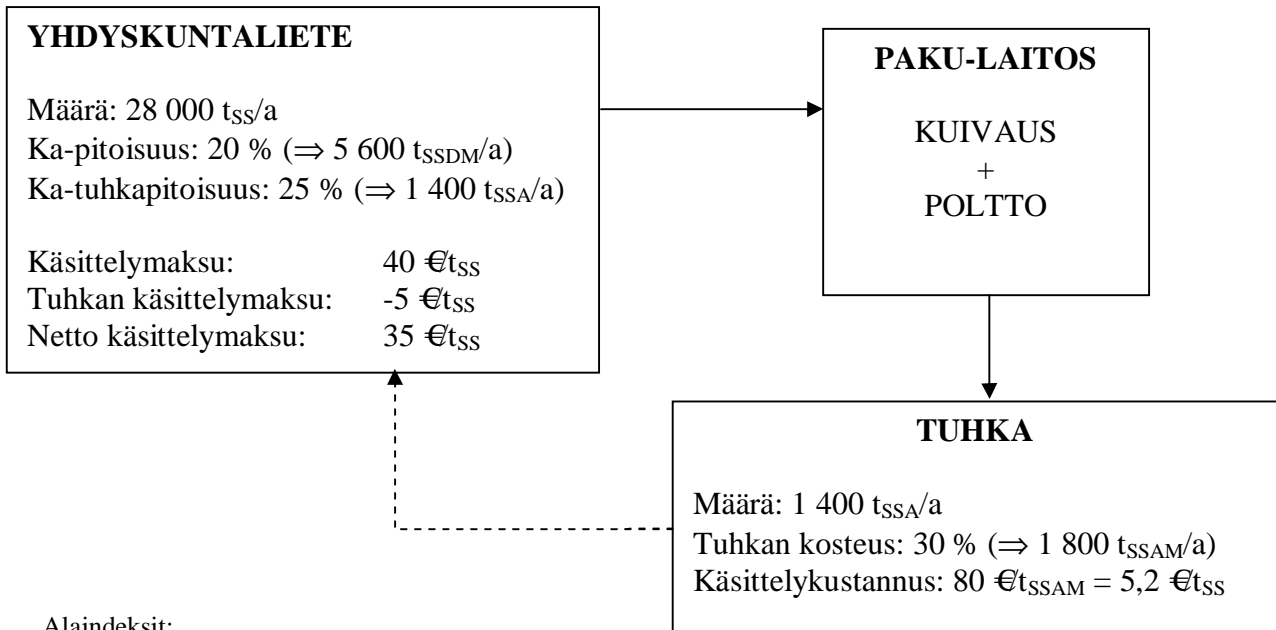


KUVA 4-1. PAKU-LAITOKSEN TUHKANPOISTOJÄRJESTELMÄ (Anttila J. 2008).

Tuhkan jakautuminen kattila- ja lentotuhkan välillä voi muuttua radikaalisti esim. rikinsidonta-ainetta prosessiin lisättäessä. Perusoletuksena voidaan käyttää seuraavaa jakaumaa:

- Pohjatuhka: 20 m-%
- Lentotuhka: 80 m-%

Kuvassa 4-2 on esitetty tuhkan taloudellinen merkitys PAKU-prosessissa suhteutettuna laitoksessa käsiteltävään lietemäärään. Tuhkan käsittelykustannusten voidaan katsoa pienentävän lietteen mukana laitokselle tulevaa nettotulovirtaa. Kuvan 4-2 mukaisessa esimerkissä (Case Ekopark) noin 13 % lietteen vastaanottomaksusta kuluu tuhkan käsittelyyn. Kun otetaan huomioon, että käytännössä PAKU-laitoksen investointikustannukset kuoletaan perimällä käsiteltävästä lietteestä vastaanottomaksu (jos laitos ei tuota merkittäviä määriä myytävää lämpöä ja/tai sähköä), voidaan todeta, että PAKU-laitoksen merkittävimpään tulovirtaan tuhkan käsittelykustannuksilla voi olla merkittävä vaikutus. Tuhkan hinnan muuttuminen negatiivisesta (kaatopaikkasijoitus) nolnaan/positiiviseksi (hyötykäyttö) parantaa täten laitoksen taloutta ja takaisinmaksuaikaa. Jos tuhkan hyötykäyttöön ohjaamisen taloudellisia vaikutuksiin luetaan myös välilliset vaikutukset, kuten mahdolliset säästöt kaatopaikkakustannuksissa (perustamis-, käyttö- ja ylläpitokustannukset), paranee konseptin talous entisestään. Tuhkan hyötykäytölle on olemassa täten resurssitehokkuuden lisäksi myös taloudelliset perusteet.



Alaindeksit:

SS (Sewage Sludge): PAKU-laitokselle saapuva märkä yk-liete

SSDM (Sewage Sludge, Dry Matter): yk-lietteen kuiva-aine

SSA (Sewage Sludge Ash): yk-lietteen sisältämä tuhka (% kuiva-aineesta)

SSAM (Sewage Sludge Ash, Moist): jatkokäsittelyyn ohjattava kostea PAKU-tuhka

KUVA 4-2. TUHKAN TALOUDELLINEN MERKITYS PAKU-PROSESSISSA (Ekopark-Case).

4.3 PAKU-tuhkan hyötykäyttömahdollisuudet

Tuhkan hyötykäyttö erilaisissa prosesseissa ja sijoituskohteissa säätelevät pääosin seuraavat tekijät:

- Tuhkan fysikaalisten ominaisuuksien määrittämä soveltuvuus ko. hyötykäyttöön
- Lainsäädännön asettamat lisävaatimukset ko. hyötykäytölle
- Tuhkalla hyötykäyttökohteessa korvattavien materiaalien saatavuus ja hinta.

Perinteisesti fysikaalisten ominaisuuksiensa osalta erilaiset tuhkat soveltuvat mm. seuraavissa kohteissa hyödynnettäviksi:

- Lannoitekäyttö/maanparannus
- Maarakennus
- Sementtiteollisuus.

Seuraavassa on tarkasteltu lyhyesti PAKU-tuhkan ominaisuuksia ja soveltuvuutta erilaisiin hyötykäyttökohteisiin.

4.4 Yhdyskuntalietteen tuhkan koostumus

Leijupolttoprosessista syntyvä tuhkan voidaan ajatella koostuvan alkuperäisestä polttoaineen sisältämästä tuhkasta, polttoaineen sisältämistä raskasmetalleista sekä muista polton kannalta inerteistä aineista, kuten rikinsidontaan käytettävät lisäaineet. PAKU-tuhka jakaantuu pohja- ja lentotuhkaan, joilla on erilaisia ominaisuuksia johtuen niiden sisältämistä aineista ja yhdisteistä. Tässä yhteydessä on oletettu, että kaikki kuivatettavan/pollettavan yhdyskuntalietteen sisältämät haitta-aineet päätyvät lopulta tuhkaan.

Pohjatuhka sisältää lentotuhkaa vähemmän raskasmetalleja, sillä monet raskasmetallit höyrystyvät polttoprosessissa suurimmaksi osaksi, ja päätyvät lentotuhkan mukana savukaasuihin. Höyrystyneet metallit kondensoituvat savukaasujen jäähtyessä ja kiinnittyvät hiukkasiin. Erityisesti elohopea (Hg) ja kadmium (Cd) päätyvät tyypillisesti lentotuhkahiukkasiin. Taulukossa 4-1 on esitetty joidenkin lietetuhkissa esiintyvien raskasmetallien sulamis- ja kiehumislämpötilat.

Taulukko 4-1. Haitallisten aineiden ominaisuuksia

Komponentti	Lyhenne	Olomuoto (NTP)	Sulamispiste [°C]	Kiehumispiste [°C]
Arseeni	As	Kiinteä	817	614*
Elohopea	Hg	neste	-39	357
Kadmium	Cd	kiinteä	321	767
Kromi	Cr	kiinteä	1907	2671
Kupari	Cu	kiinteä	1085	2562
Lyijy	Pb	kiinteä	327	1749
Nikkeli	Ni	kiinteä	1455	2913
Sinkki	Zn	kiinteä	420	907

*sublimoitumispiste

Taulukossa 4-2 on esitetty erään suomalaisen jätevesilietteen ominaisuuksia ja niistä lasketut tuhkan raskasmetallipitoisuudet. Laskennassa on oletettu, että lietteen kuiva-aineen sisältämät ravinteet tyyppiä lukuun ottamatta ja raskasmetallit päätyvät polton jälkeen tuhkaan.

Taulukko 4-2. Suomalaisen yhdyskuntalietteen ominaisuuksia.

OMINAISUUS/ALKUAINE	SYMBOLI	YKSIKKÖ	LIETE	TUHKA
pH			6.19	-
Kuiva-ainepitoisuus		paino-% t.p.	24.2 %	-
Tuhkapitoisuus		paino-% t.p.	6.9 %	-
Tuhkapitoisuus		paino-% k.a.	28.5 %	100.0 %
RAVINTEET				
kokonaistyyppi	N	g/kg k.a.	45	-
kokonaisfosfori	P	g/kg k.a.	24	84
kalium	K	g/kg k.a.	2.2	8
kalsium	Ca	g/kg k.a.	30	105
HAITTA-AINEET				
kromi	Cr	mg/kg k.a.	37	130
kupari	Cu	mg/kg k.a.	210	737
elohopea	Hg	mg/kg k.a.	0.29	1
nikkeli	Ni	mg/kg k.a.	13	46
lyijy	Pb	mg/kg k.a.	< 50	< 175
sinkki	Zn	mg/kg k.a.	350	1 228

t.p. = tuorepaino

4.5 Tuhkan hyötykäyttöön liittyvä lainsäädäntö ja viranomaisvaatimukset

Lainsäädännöllä ohjataan osaltaan jäte- ja sivuainevirtoja kohti asianmukaisia käsittelyprosesseja ja kohteita. Yhdyskuntalietteen polttoa ja sen tuhkan hyötykäyttöä ja loppusijoitusta ohjataan ja rajoitetaan Suomessa mm. seuraavilla säädöksillä ja ohjeilla:

- Jätteiden käsittely:
 - Ympäristönsuojelulaki 86/2000
 - Ehdotus valtakunnalliseksi jättesuunnitelmaksi vuoteen 2016
- Yhdyskuntalietteen hyödyntäminen:
 - Puhdistamoliettedirektiivi 86/278/ETY
 - Valtioneuvoston päätös puhdistamolietteen käytöstä maanviljelyksessä 282/1994
 - Maa- ja metsätalousministeriön ja Kasvintuotannon tarkastuskeskuksen ohje maataloudessa käytettävälle puhdistamolietteelle (Dnro MMELO 2915/835/2005)
- Lietteen poltto:
 - Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta 362/2003
- Tuhkan käyttö lannoitteena:
 - Lannoiteasetus (EY) N:o 2003/2003
 - Lannoitelaki 232/1993
 - Lannoitevalmistelaki 539/2006
 - Maa- ja metsätalousministeriön asetus 12/07 lannoitevalmisteista
- Kaatopaikkasijoituksen kelpoisuusvaatimukset:
 - VNa 202/2006 kaatopaikoista annetun valtioneuvoston päätöksen muuttamisesta.

Lietteen käsittelyä ja hyötykäyttöä koskevat säädökset vaihtelevat maittain. Tämä tulee ottaa huomioon, kun suunnitellaan PAKU-konseptin markkinoimista Suomen ulkopuolella.

4.6 PAKU-tuhkalle soveltuvat hyötykäyttökohteet ja -prosessit

4.6.1 Yhdyskuntalietteen polton tuhkan soveltuvuus maarakennuskohteisiin

Tuhkaa voidaan käyttää periaatteessa maarakennuskohteissa, esim. kaatopaikkojen ja tierakenteiden tiivistyskerroksissa, tai pintamateriaaleissa sekoitettuna muihin materiaaleihin. Suomessa lupa tuhkan käytölle maarakennuskohteissa on periaatteessa haettava jokaiselle kohteelle erikseen, jos kohteella ei ole tuotteistettu ja luvitettu sitä kautta laajemmin sovellettavaksi. Käytännössä monissa kohteissa ilmoitusmenettely riittää, kun hyödynnettävän tuhkan haitta-ainepitoisuuksien on todettu alittavan niille säädetyt raja-arvot. Maarakennuksessa yleisesti hyötykäytön lisäämisen vaikeutena on se, että neitseellisten materiaalien (kuten hiekka) korvaaminen muilla materiaaleilla (esim. kaivosteollisuuden rikastushiekka) ei ole usein kannattavaa: neitseelliset materiaalit voivat olla huomattavasti halvempia kuin korvaavat materiaalit. Tämä voi heijastua myös tuhkan hyötykäyttöön maarakennuskohteissa.

Hollannissa hyödynnetään jätteenpolttolaitosten pohjatuhkaa yleisesti tienrakennuksessa (100 % hyötykäyttöaste). Lentotuhka sen sijaan sijoitetaan kaatopaikalle, kuten Tanskassa, Ruotsissa, Saksassa, Englannissa, Walesissa ja Japanissa. Kaatopaikkasijoituksen lisäksi tanskalaista ja hollantilaisille lentotuhkille ja APC-jätteille on suunniteltu sijoitusta Saksan kaivoksiin. (Laine-Ylijoki et al. 2005)

4.6.2 Yhdyskuntalietteen polton tuhkan soveltuvuus sementtiteollisuuden raaka-aineeksi

Lietteenpolton tuhkaa on hyödynnetty sementtiteollisuudessa eri puolilla maailmaa. Erityisesti Japanissa, johtuen suurista jätteenpolton tuhkamääristä, lietetuhkaa käytetään betoniteollisuudessa kevyiden runkoaineiden, kuonien ja tiilien valmistuksessa. Portland-sementin valmistuksessa on käytetty myös kuivattua yhdyskuntalietettä ja tuhkaa seoksena.

Yhdyskuntalietteen polton tuhkan on todettu useissa tieteellisissä julkaisuissa soveltuvan seosaineena sementti- ja keramiikkateollisuudessa. Cheeseman ja Viridi (2005) ovat esittäneet yhdyskuntalietteen tuhkasta sintraamalla valmistetun kevyen runkoaineen (lightweight aggregate) omaavan kaupallisen tuotteen ominaisuudet. Jätevesilietteen tuhkasta valmistettujen pellettien markkinatilanne paranee tuhkan kaatopaikkasijoituksen kallistuessa ja kaukaa kuljetettävien ”luonnollisten” runkoaineiden hinnan nousun myötä. Chiou et al. (2006) ovat tutkimuksessaan todenneet jättevesilietetuhkan soveltuvan sementtituotteiden runkoaineeksi. Chen et al. (2006) havaitsivat tutkimuksissaan tuhkan käytön parantavan materiaalien lämmönkestävyyttä. Merino et al. (2007) ovat todenneet tutkimuksissaan yhdyskuntalietteen termisen käsittelyn tuhkan soveltuvan keraamisten rakennusmateriaalien valmistukseen sellaisenaan. Tuotteiden ominaisuuksia voidaan parantaa lisäämällä lasimurskaa tai savimaisia aineita aina 25 m-% asti.

Rajoituksena PAKU-tuhkan hyötykäytölle voi olla paikallisesti tai laajemmin se, että sementti- ja keramiikkateollisuudessa hyödynnettävän lietetuhkan määrä on tyypillisesti vain muutamia prosentteja raaka-aineiden kokonaismäärästä. Tämä asettaa rajoituksia hyödynnettävälle määrälle, koska tuotantokapasiteetti määrittää maksimimäärän hyödynnettävälle tuhkalle. Kuvan 4-1 mukaisen tuhkamäärän hyödyntäminen sementin seosaineena (5 % sementtimäärästä) edellyttäisi 28 000 t/a sementtituotantoa. Koko Suomen yhdyskuntalietteen (kuiva-aineena n. 150 000 t/a) tuhkan (n. 37 500 t/a) hyödyntäminen sementtiteollisuudessa vaatisi esimerkkilaskelman oletuksilla 750 000 t vuosituotannon. Sementin kokonaiskulutus Suomessa oli vuonna 2007 n. 2 Mt, tämä on tuhannesosa koko maailman sementin kulutuksesta (Finnsementti 2007). Lappeenrannassa sijaitsevan Finnsementin tehtaan (toinen kahdesta Suomessa sijaitsevasta sementin valmistusyksiköstä) tavoitteena on käyttää lähitulevaisuudessa sementin valmistuksessa lentotuhkaa 7-10 % (n. 60 000 t/a) raakaainemäärästä (Anttila H.-K. 2008).

4.6.3 Yhdyskuntalietteen polton tuhkan soveltuvuus lannoitteeksi

Suomessa tuhkan käyttöä lannoitevalmisteena valvoo Elintarviketurvallisuusvirasto Evira. Tuhkalle on annettu haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet kahteen eri käyttötarkoitukseen, peltotuhkalle ja metsätuhkalle. Suomessa lannoitevalmisteena voidaan Eviran mukaan käyttää vain puhtaan puun, turpeen tai peltobiomassojen poltossa muodostunutta tuhkaa. Yhdyskuntalietteen polton tuhka luokitellaan Suomessa jätteen polton tuhkaksi, jonka käyttö lannoitteena on kielletty. Täten yhdyskuntalietteen poltosta peräisin oleva tuhka ei tällä hetkellä voi saada hyväksyntää pelto- tai metsälannoitteeksi vaikka tuhka täyttäisi lannoitteille asetetut kriteerit. Lietetuhkan lannoitekäyttökielto on kuitenkin Eviran tulkinta, jota ei ole sellaisenaan kirjattu suoraan lakiin tai asetuksiin. Tilanne voi kuitenkin tulevaisuudessa muuttua, kun lietetuhkien (ja muiden tuhkien) määrät kasvavat ja kun

pystytään osoittamaan eri tuhkien käyttökelpoisuus myös lannoitekäytössä. Tässä yhteydessä asiaa on tarkasteltu ottamatta kantaa lietetuhkan lannoitekäytön lupakäytäntöön.

Eviran antamassa tiedotteessa (Evira 2007) esitetään peltotuhkalle ja metsätuhkalle lannoiteominaisuusvaatimukset (Taulukko 4-3) ja haitallisten metallien enimmäispitoisuudet (Taulukko 4-4).

Taulukko 4-3. Tuhkalannoitteiden tyyppinimet ja tyyppikohtaiset vaatimukset.

Tyyppinimi	Vaatimukset
Peltotuhka	<ul style="list-style-type: none"> • Lannoitteena sellaisenaan käytettävä tuhka. • Käyttökohteet: maa- ja puutarhatalous, maisemointi, viherrakentaminen ja metsätalous. • $P + K \geq 2 \%$, $Ca \geq 8 \%$.
Metsätuhka	<ul style="list-style-type: none"> • Lannoitteena sellaisenaan käytettävä tuhka. • Käyttö sallittu vain metsätaloudessa. • $P + K \geq 1 \%$, $Ca \geq 2 \%$.
Tuhkapitoinen kalkkirae	<ul style="list-style-type: none"> • Peltotuhkan ja sellaisenaan kalkitusaineena käytettävän sivutuotteen rakeistettu seos. • Neutraloiva kyky $\geq 15 \%$ (Ca).

Taulukko 4-4. Haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet tuhkassa.

Metalli	Symboli	RAJA-ARVOT [mg/kg k.a.]	
		Peltotuhka	Metsätuhka
Arseeni	As	25	30
Elohopea	Hg	1.0	1.0
Kadmium	Cd	1.5	17.5
Kromi	Cr	300	300
Kupari	Cu	600	700
Lyijy	Pb	100	150
Nikkeli	Ni	100	150
Sinkki	Zn	1500	4500

Sellaisenaan lannoitevalmisteena käytettävän sivutuotteen sisältämien metallien liukoisuuden tulee alittaa VNa 202/2006 mukaiset tavanomaisille jätteille tarkoitetut raja-arvot (Taulukko 4-5).

Taulukko 4-5. Kaatopaikkasijoituksen liukoisuuden raja-arvot tavanomaiselle jätteelle Suomessa (VNa 202/2006).

Aine/yhdiste		liukoisuusraja-arvot* [mg/kg ka]
		Tavanomainen jäte
As	Arseeni	2
Ba	Barium	100
Cd	Kadmium	1
Cr _{kok}	Kromi yhteensä	10
Cu	Kupari	50
Hg	Elohopea	0.2
Mo	Molybdeeni	10
Ni	Nikkeli	10
Pb	Lyijy	10
Sb	Antimoni	0.7
Se	Seleeni	0.5
Zn	Sinkki	50
Cl ⁻	Kloridi	15 000
F ⁻	Fluoridi	150
SO ₄ ²⁻	Sulfaatti	20 000
DOC	Liuennut orgaaninen hiili	800
TDS	Liuenneiden aineiden kokonaismäärä	60 000
TOC	Orgaanisen hiilen kokonaismäärä	5 %
pH		≥ 6.0
ANC	Haponneutralointikapasiteetti	tutkittava ja arvioitava

* L/S = 10 l/kg ka

Lisäksi lannoitevalmisteen käyttäjän on pidettävä kirjaa ko. valmisteiden käytöstä keskimääräisen Cd-kuormituksen määrittämiseksi.

Suomessa markkinoille saatettavien tuhkatuotteiden on kuuluttava kansalliseen lannoitevalmisteen tyyppiluettelo, jossa tyyppinimet ja tyyppikohtaiset vaatimukset on esitetty.

Yhdyskuntalietteen tuhkaa voidaan hyödyntää periaatteessa lannoitteena lietteen sisältämän fosforin ansiosta. Fosforin erotus leijupoltton tuhasta onnistuu paremmin, jos jäteveden käsittelyssä on käytetty alumiinisulfaattia rautasulfaatin sijasta (Pettersson et al. 2008a). Polttoprosessissa lietteen sisältämä typpi yleensä menetetään typen oksideina ja raakatyyppinä savukaasupäästöiksi.

Franz (2007) on tutkinut yhdyskuntalietteen tuhkan soveltuvuutta fosfaattilannoitteeksi. Laboratorio-olosuhteissa suoritetuissa tutkimuksissa todettiin, että Sveitsissä voimassa olevat haitallisten aineiden pitoisuusrajoitukset alitetaan tuhkan osalta, mutta raskasmetallien liukoisuuksien osalta lannoitekäytössä ilmeni ongelmia. Raskasmetalleja voidaan poistaa tuhasta saostamalla, mutta tarvittava prosessointi on vielä kallista. Samansuuntaisiin tuloksiin ovat päätyneet myös Pettersson et al. (2008b), joiden mukaan yhdyskuntalietteen ja puun rinnakkaispoltosta syntyvä tuhka soveltuu lannoitekäyttöön lukuun ottamatta tuhkan sisältämiä Cd-pitoisuuksia. Cd-pitoisuudet ylittivät kaikissa tuhkatyypeissä (sekundaarisyklonin tuhka, letkusuodatintuhka) lannoitekäytölle asetetut raja-arvot.

4.7 Johtopäätökset

PAKU-tuhkan hyötykäytöllä voidaan saavuttaa mm. seuraavat vaikutukset:

- Kokonaiskonseptin kustannustehokkuus kasvaa
- Resurssien käytön tehokkuus kasvaa
- Tuhkan hyötykäyttö toimii imagoetuna kokonaiskonseptin markkinoinnissa

Yhdyskuntalietteen poltosta kertyvää tuhkaa voidaan hyödyntää maanrakennuksessa ja sementtiteollisuudessa tietyin rajauksin. Maarakennuskohteissa tuhkan soveltuvuus esim. tiivistyskerroksien materiaalina riippuu lähinnä tuhkan sisältämien raskasmetallien liukoisuusominaisuuksista. Suomessa tuhkan hyötykäyttö on luvanvaraista, lupa haetaan ympäristöviranomaiselta jokaiseen kohteeseen erikseen. Joillekin tasalaatuaisille ja testatuille tuhille (esim. metsäteollisuuden puutuhkat) voidaan soveltaa ilmoitusmenettelyä maarakennuskohteissa.

Yhdyskuntalietteen tuhkan hyötykäyttömahdollisuuksista lannoitteena voidaan todeta hyötykäytön olevan mahdollista nykyisillä menetelmillä. Rajoittavana tekijänä ovat tuhkan sisältämät raskasmetallit, varsinkin kadmium. Raskasmetallien erottaminen tuhkasta on vielä kallista johtuen suuresta työmäärästä ja kemikaalien kulutuksesta, mutta kannattavuus parantunee tulevina vuosina erotusmenetelmien kehittyessä, synteettisten fosforilannoitteiden muiden tuhkan käsittelyvaihtoehtojen kallistuessa.

Yhdyskuntalietteen tuhkien hyödyntämispotentiaali kasvaa tulevaisuudessa lietteen suoran lannoitekäytön pienentyessä ja kaatopaikkasijoituksen loppuessa eri maissa. Joissakin maissa (mm. Itävalta, Saksa ja Ruotsi) lietteen kaatopaikkasijoitus on jo kielletty. Hyötykäytölle on kuitenkin luotava markkinat: tuhkatuotteita on vaikeaa myydä, jos muut vastaavat materiaalit ovat halvempia.

Tuotteistamalla tuhka tiettyyn hyötykäyttötarkoitukseen hyötykäyttö helpottuisi huomattavasti verrattuna kohteittaiseen luvan hankkimismenettelyyn. Lietteiden (kuten myös tuhkan) pitoisuudet kuitenkin vaihtelevat alueittain, ja yleispätevää laatutakuuta tietynlaiselle tuhakoostumukselle on vaikeaa hankkia. Lisäksi tuotteen laadunvalvonta voi aiheuttaa korkeat kustannukset, mikä osaltaan lisää PAKU-konseptin kokonaiskustannuksia.

Tuhkan hyötykäyttö tulisi liittää osaksi PAKU-laitoksen suunnittelua: Ensisijaisesti tuhkan hyödyntämistä tulisi tarkastella paikallisesta näkökulmasta. Tällöin yleensä myös kuljetusten aiheuttamat ympäristökuormat ja kustannukset minimoituvat. Hyötykäyttökohteiden valintaan vaikuttavat myös markkinaolosuhteet ja paikallinen tarve eri vaihtoehdoille (lannoite, sementti, maarakennus). Lain-säädännön taso vaihtelee maittain, joten paikalliset rajoitukset tulee ottaa huomioon hyötykäyttö-vaihtoehtoja mietittäessä.

Lisätutkimusta tarvitaan tuhkan ominaisuuksien selvittämiseksi (tämän tutkimuksen yhteydessä on tukeuduttu yleisiin saatavilla olleisiin koostumustietoihin) erityisesti lannoitekäyttöön liittyen. Typen erotusta ja talteenottoa olisi myös hyvä kehittää, näin korvattaisiin kalliita typpilannoitteita sekä vähennettäisiin typen oksidien päästöjä.

Lähteet

- Anttila, H.-K. (2008). Polttoainekoostumuksen vaikutus lentotuhkan laatuun ja hyötykäyttömahdollisuuksiin UPM-Kymmene Oyj:n Kaukaan tehtailla. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Anttila, J. (2008). Lietettä polttoaineenaan käyttävän pienen kokoluokan lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksen investointikustannus. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Cheeseman, C.R., Viridi, G.S. (2005). Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash. *Resources, Conservation and Recycling* 45, 18-30.
- Chen, C.-H., Chiou, I.-J., Wang, K.-S. (2006a). Sintering on cement bonded sewage sludge ash. *Cement & Concrete Composites* 28, 26-32.
- Chiou, I.-J., Wang, K.-S., Chen, C.-H., Lin, Y.-T. (2006). Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. *Waste Management* 26, 1453-1461.
- Evira (2007). Tuhkan käyttö lannoitevalmisteenä. Tiedote (7.6.2007), DNO/Dnr/DNr 447/700/2007.
- Finnsementti (2007). Sementti-opas. <http://www.finnsementti.fi/Sementti-opas.pdf>.
- Franz, M. (2007). Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA). *Waste Management*, doi:10.1016/j.wasman.2007.08.011.
- Fytili, D., Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 116-140.
- Gross, B., Eder, C., Grziwa, P., Horst, J., Kimmerle, K. (2007). Energy recovery from sewage sludge by means of fluidized bed gasification. *Waste Management*, doi:10.1016/j.wasman.2007.08.016.
- Laine-Ylijoki, J., Mroueh, U.-M., Vahanne, P., Wahlström, M., Vestola, E., Salonen, S., Havukainen, J. (2005). Yhdyskuntajätteen termisen käsittelyn kuonista ja tuhkista hyötykäytettäviä ja loppusijoitettavia tuotteita. Kansainvälinen esiselvitys [Current international status of MSW ashes and slags]. VTT Tiedotteita - Research Notes 2291. 83 s. + liitt. 4 s.
- Merino, I., Afevalo, L.F., Romero, L. (2007). Preparation and characterization of ceramic products by thermal treatment of sewage sludge ashes mixed with different additives. *Waste Management* 27, 1829-1844.
- Pettersson, A., Åmand, L.-E., Steenari, B.-M. (2008a). Leaching of ashes from co-combustion of sewage sludge and wood – Part I: Recovery of phosphorus. *Biomass and Bioenergy*, doi:10.1016/j.biombioe.2007.09.016.

Pettersson, A., Åmand, L.-E., Steenari, B.-M. (2008b). Leaching of ashes from co-combustion of sewage sludge and wood – Part II: The mobility of metals during phosphorus extraction. *Biomass and Bioenergy*, doi:10.1016/j.biombioe.2007.09.006.

Ruottu, A. (2007). Sähköpostitiedonanto 21.11.2007.

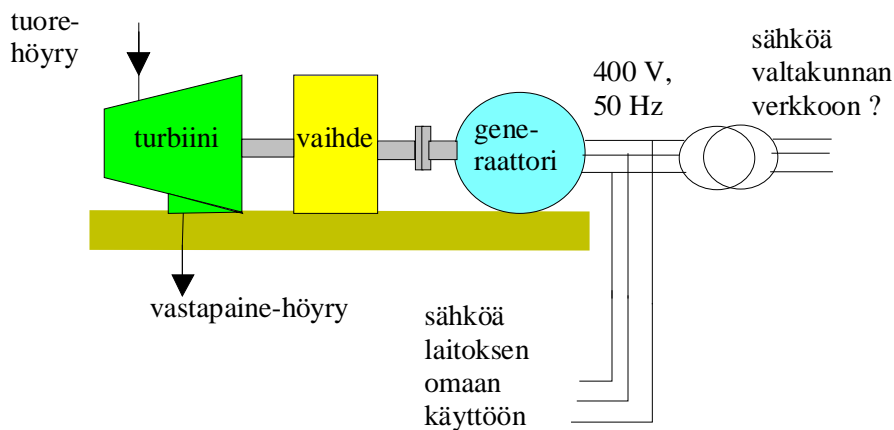
VNa (2006). Valtioneuvoston asetus 202/2006.

5 OPTIMAALISEN SÄHKÖNKÄYTTÖTEKNIIKAN KEHITYS

Sähkökäyttötekniikan tutkimustoiminta keskittyi lietettä polttoaineenaan käyttävän PAKU-laitoksen sähköntuotannon hyötysuhteen maksimointiin optimaalisen generaattorityypin valinnan kautta. Hankkeen tämän osan pääpaino oli kartoittaa kaupallisesti saatavissa olevien, perinteistä teknologiaa edustavien generaattorityyppien sekä uutta teknologiaa edustavien generaattorityyppien tekniset ominaisuudet ja käyttömahdollisuudet sähkötehoaltaan 400 – 1000 kW olevan lietteenpolttolaitoksen tapauksessa. Koska generaattorikonstruktiolta vaadittavat ominaisuudet liittyvät lähes suoraan höyryturbiinin pyörimisnopeuteen ja kokoon, kartoitettiin myös erilaisten, pienen kokoluokan kaupallisten höyryturbiinien teknisiä ominaisuuksia. Sähkökäyttötekniikan laboratorion tutkijoina toimivat DI Jukka Malinen, Tkt Janne Nerg ja prof. Juha Pyrhönen.

5.1 Turbiinin valinta

Alustavien tutkimusten mukaan höyryvoimalaitosprosessi vaikuttaisi olevan kaikkein soveltuvim tekniikka termisen energian muuttamiseksi sähköksi lietteen termisessä käsittelylaitoksessa. Höyryvoimalaitoksen sähkön tuotto toteutetaan perinteisesti kuvassa 5-1 esitettävän lohkokaaavion mukaisesti siten, että korkeassa paineessa oleva kuuma höyry paisutetaan höyryturbiinissa ja osa sen termisestä energiasta muunnetaan mekaaniseksi energiaksi, joka puolestaan muunnetaan sähköksi generaattorissa. Turbiinin ja generaattorin pyörimisnopeudet sovitetaan yhteen alennusvaihteen avulla. Osa tuotetusta sähköstä käytetään laitoksen oman sähkötarpeen tyydyttämiseksi ja loput voidaan syöttää esim. valtakunnan verkkoon.



KUVA 5-1. PERINTEISEN HÖYRYVOIMALAITOSPROSESSIN SÄHKÖNTUOTANNON LOHKOKAAVIO.

Turbiinityypin valinta on vahvasti riippuvainen poltettavan lietteen kosteuspitoisuudesta, polttoaineen (lietteen) kuivatusprosessista sekä käytetäänkö lietteen lisäksi jotain toista apupolttoainetta (esim. REF). Pelkkää lietettä polttavassa laitoksessa käytetään suurin osa höyrykattilan tuottamasta tuorehöyrystä polttoaineen (lietteen) kuivatukseen, jolloin turbiiniksi soveltuu vastapaineturbiini. Vastapaineturbiinin tapauksessa sähköntuotanto ei ole laitoksen primäritehtävä, koska sähköntuotantoon käytetään lietteenkuivatuksesta ylijäänyt lämpöenergia. Mikäli lietteen ohessa käytetään jotain muutakin polttoainetta, pienenee lietteen kuivaamiseen tarvittava suhteellinen lämpömäärä merkittävästi, ja turbiiniksi voidaan valita vastapaineturbiini. Vastapaineturbiinin taloudellisesti

järkevä käyttö edellyttää kuitenkin sitä, että turbiinilta tulevan höyryn sisältämä lämpöenergia voidaan ottaa talteen ja syöttää esimerkiksi kunnalliseen kaukolämpöverkkoon.

Turbiinikonstruktion valinnan apuna voidaan käyttää dimensiota, turbiinin koosta riippumatonta suuretta ns. turbiinin ominaispyörimisnopeutta n_s , joka kuvaa turbiinin maksimihyötysuhdetta vastaavaa pyörimisnopeutta vakioina pysyvien tehon ja höyryn tilavuusvirran tapauksessa. Turbiinin ominaispyörimisnopeus määritellään yhtälöllä (Dixon 1989)

$$n_s = \frac{n\sqrt{Q}}{\Delta h_{0s}^{3/4}}, \quad (5.1)$$

, missä

n on turbiinin pyörimisnopeus [1/s],

Q on turbiinin läpi menevä höyryn tilavuusvirta [m^3/s] ja

Δh_{0s} on turbiinissa tapahtuva isentrooppinen entalpiapudotus [J/kg].

Yhtälön (5.1) lasketun ominaispyörimisnopeuden avulla voidaan höyryvoimalaitosprosessiin parhaiten soveltuvat turbiinikonstruktiot valita kirjallisuudessa esitetyistä taulukoista.

Kuten yhtälöstä (5.1) havaitaan, on turbiinin ominaispyörimisnopeus suoraan verrannollinen turbiinin absoluuttiseen pyörimisnopeuteen, joten suuri absoluuttinen pyörimisnopeus johtaa väistämättä korkeaan ominaispyörimisnopeuteen. On myös muistettava, että höyryturbiinien isentrooppihyötysuhde kasvaa absoluuttisen pyörimisnopeuden funktiona. Varsinkin pienitehoisissa turbiinikonstruktioiden, joissa mahdollisimman hyvän isentrooppihyötysuhteen lisäksi myös turbiinikonstruktion pieni fyysinen koko on tärkeitä, on optimaalinen turbiinikonstruktiio nopeasti pyörivä yksiportainen turbiini esim. impulssiturbiini tai Curtis-pyörä. Turbiinin absoluuttisen pyörimisnopeuden lisäksi turbiinin isentrooppihyötysuhdetta voidaan parantaa valitsemalla yksiportaisen turbiinin asemesta useampiportainen konstruktiio. Valitettavasti useampiportaisia turbiineita ei ole kaupallisesti saatavissa lietteenpolttolaitoksen vaatimassa 400 – 1000 kW kokoluokassa, vaan niiden tehot ovat 10 MW ylöspäin.

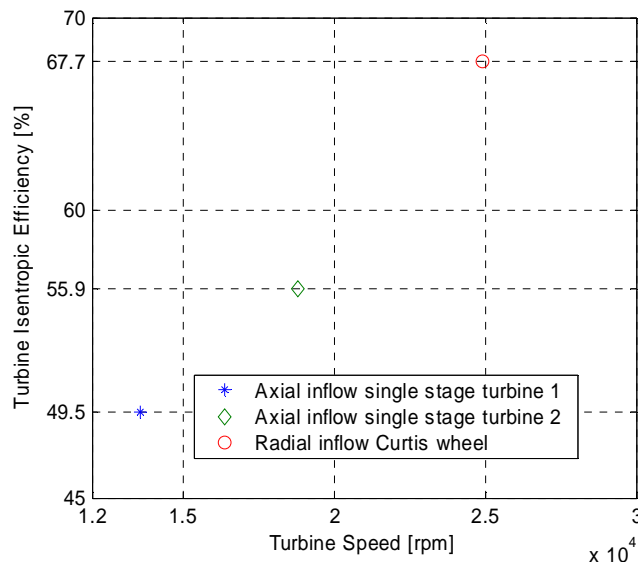
5.1.1 Kaupallisten turbiinien ominaisuuksien vertailu

Hankkeessa kartoitettiin kaupallisten höyryturbiinien tekniset ominaisuudet 400 kW:n tehotasolla. Kartoituksessa käytetyt tiedot saatiin suoraan turbiinivalmistajilta taulukossa 5-1 esitettävillä tuorehöyryn tila-arvoilla.

Taulukko 5-1. Kartoituksessa käytetyt tuorehöyryn tila-arvot.

Tuorehöyryn tulopaine (bar)	40
Höyryn paine turbiinin jälkeen (bar)	4
Tuorehöyryn lämpötila (°C)	450

Kartoituksen otoskoko jäi yllättävän pieneksi, sillä ainoastaan kolmen turbiinivalmistajan malleista löytyi valmiit turbiiniratkaisut 400 kW teholuokkaan. Tämä on selitettävissä sillä, etteivät pienen tehotason höyryturbiinit ole turbiinivalmistajien päämarkkina-alueita, vaan suurin osa toimituksista on kymmenien megawattien teholuokassa. Saatujen teknisten tietojen avulla määritettiin isentrooppihyötysuhteen arvot pyörimisnopeuden funktiona kahdelle yksiportaiselle aksiaaliturbiinille sekä radiaaliseen Curtis-pyörälle. Tulokset ovat esitettyinä kuvassa 5-2.



KUVA 5-2. KAUPALLISTEN 400 kW HÖYRYTURBIINIEN ESTIMOIDUT ISENTROOPPIHYÖTYSUHTEET. (Turbiinin pyörimisnopeuden funktiona)

Kuten kuvasta 5-2 voidaan havaita, on korkea pyörimisnopeus ehdoton vaatimus riittävän hyvän isentrooppihyötysuhteen ja siten myös kelvollisen sähköntuotannon hyötysuhteen saavuttamiseksi pienitehoisessa lietteenpolttolaitoksessa. Perinteisten turbiinien isentrooppihyötysuhteet ovat niiden kohtalaisen korkeasta pyörimisnopeudesta huolimatta matalia pääasiassa siitä syystä, että pyörimisnopeus ei sittenkään ole riittävän korkea. Pyörimisnopeutta olisikin nostettava selvästi nykyisten kaupallisten laitosten pyörimisnopeustasosta.

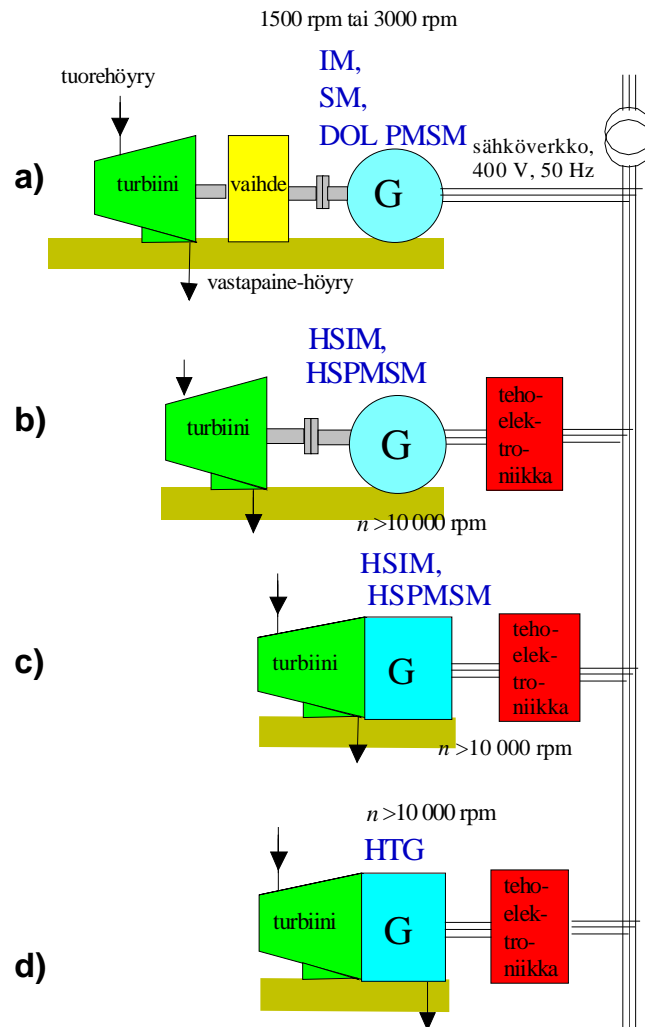
5.2 Turbogeneraattorivaihtoehdot

Turbiinin korkea pyörimisnopeus asettaa reunaehdot myös turbiinin ja generaattorin väliselle kytkennälle. Perinteisessä turbogeneraattorissa käytetään kaksi- tai kolmiportaista alennusvaihdetta nopeasti pyörivän turbiinin ja generaattorin välissä, joka osaltaan pienentää koko turbogeneraattorin sähköntuotannon hyötysuhdetta 1 – 1,5 % porrasta kohden. Alennusvaihteen käyttö yksinkertaistaa kuitenkin itse generaattorin valintaa, sillä esimerkiksi verkkotaajuudella toimittaessa voidaan generaattoriksi valita mikä tahansa vaihtovirtasähkökone.

Mikäli generaattorityypiksi valitaan suurnopeusgeneraattori, vältetään mekaanisen kytkimen aiheuttamalta tehohäviöltä. Tällaisen konstruktion ideana on kytkeä turbiini ja generaattori samalle akselille siten, että niiden pyörimisnopeudet ovat yhtä suuret. Samalla saavutetaan merkittävää tilansäästöä, sillä generaattorin pyörimisnopeuden kasvu pienentää huomattavasti sen fyysistä kokoa. Sähkökoneena suurnopeussovelluksissa kyseeseen tulevat kestopagnetoitu tahtikone ja massiiviroottorinen induktiokone. Suurnopeusgeneraattorin ja turbiinin välinen kytkentä voidaan tehdä kahdella eri tavalla: Ensimmäisessä konstruktiossa turbiinin ja suurnopeusgeneraattorin välissä on mekaaninen kytkin, jolloin turbogeneraattori voidaan rakentaa käyttäen erillisistä turbiinia ja generaattoria. Toinen vaihtoehto on integroida turbiini, generaattori sekä yleensä myös pääsyöttöpumppu samalle akselille ilman mekaanista kytkintä. Jälkimmäisessä tapauksessa on turbiinin ja generaattorin väliin asennettava akselitiiviste, joka estää kuumen prosessihöyryn pääsyn generaattorin sisälle. Edellä mainituissa vaihtoehdoissa generaattorin jäähdytys hoidetaan puhaltamalla koneen ilmavälin läpi ilmaa. Kolmas suurnopeusturbogeneraattorikonstruktio on hermeettinen, prosessihöyryllä jäähdytet-

tävä generaattori, jossa ei ole erillistä akselitiivistettä. Tällainen konstruktio on kuitenkin erittäin haastava sähkökoneen eristysten suhteen, sillä samanaikainen kuumuus ja kosteus on pahin mahdollinen ympäristö sähkökoneen eristysten kannalta. Kuvassa 5-3 on esitettyä turbogeneraattorikonstruktion toteutusvaihtoehdot.

Koska suurnopeustekniikan käyttö tarkoittaa sitä, että generaattorin navoissa olevan jännitteen taajuus on suurempi kuin verkon taajuus, on generaattorin kytkentä sähköverkkoon tehtävä verkko-vaihtosuuntaajan avulla. Verkkovaihtosuuntaajat ovat nykyään jo vakiintunutta tekniikkaa ja niitä on kaupallisesti saatavissa mm. useilta kotimaisilta valmistajilta.



KUVA 5-3. TURBOGENERAATTORIN TOTEUTUSVAIHTOEHDOT. a) Turbiini, vaihdelaatikko ja generaattori, joka on kytkettynä suoraan verkkoon. Tässä tapauksessa generaattori voi olla induktiogeneraattori, vierasmagnetoitu tahtigeneraattori tai kestmagneettitahtigeneraattori. b) Turbiini ja siihen mekaanisella kytkimellä liitetty suurnopeusgeneraattori, joka on kytketty tehoelektronikan välityksellä verkkoon. c) Turbiini ja suurnopeusgeneraattori, jotka ovat samalla akselilla. Generaattori on kytketty tehoelektronikan välityksellä verkkoon d) Turbiini ja keskinopeusinduktiogeneraattori, jotka ovat samalla akselilla. Verkkoon liittyminen tapahtuu tehoelektronikan välityksellä.

Seuraavassa käsitellään lyhyesti eri turbogeneraattorikonstruktioihin soveltuvien sähkökoneiden ominaisuudet.

5.2.1 Vaihteelliseen turbogeneraattoriin soveltuvien generaattorien ominaisuudet

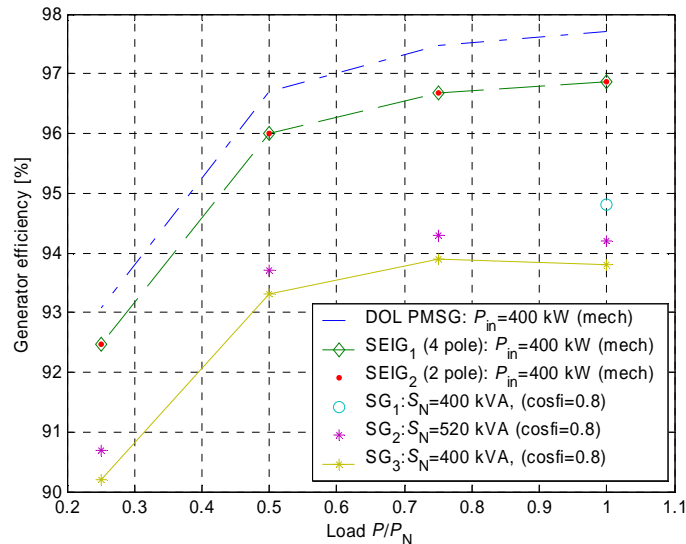
Alennusvaihteen käyttö mahdollistaa sen, että generaattorina voidaan käyttää mitä tahansa sähkökonetta. Teknistaloudelliselta kannalta kolme houkuttelevinta vaihtoehtoa ovat verkkomagnetoitu induktiogeneraattori, vierasmagnetoitu tahtigeneraattori ja suoraan verkkoon kytkettävä kestopagneettitahtigeneraattori.

Verkkomagnetoitu induktiogeneraattori on näistä taloudellisin vaihtoehto teholuokan ollessa alle 700 kW. Rakenteeltaan verkkomagnetoitu induktiogeneraattori on perinteinen häkkikäämyksellä varustettu induktiokone, jonka liittimiin on kytketty rinnan kondensaattorit tuottamaan koneen magnetointiin tarvittava loisteho. Induktiokone on rakenteeltaan yksinkertainen, mekaanisesti luja, vähän huoltoa tarvitseva sekä hinnaltaan edullinen. Esimerkiksi 400 kW teholuokassa vierasmagnetoitu tahtikone on n. 30 % verkkomagnetoitua induktiogeneraattoria kalliimpi. Verkkomagnetoituja, pienjännitteellä toimivia induktiogeneraattoreita on kaupallisesti saatavissa aina 1 MW tehoon saakka. Tätä suuremman tehon generaattorit on perinteisesti toteutettu vierasmagnetoituina tahtikoneina.

Vierasmagnetoituja tahtigeneraattoreita käytetään yleisesti suuritehoisten voimalaitosten turbogeneraattoreissa. Vierasmagnetoitun tahtigeneraattorin suurimpana etuna on sen hyvät loistehon säätöominaisuudet. Koneen magnetointi hoidetaan roottoripiirissä olevan magnetointikäämyksen avulla ja koneen loistehotasetta voidaan säätää koneen magnetointitilan säädön avulla. Vierasmagnetoitun tahtikoneen rakenne staattorin osalta on lähes identtinen induktiokoneen kanssa, mutta roottoripiiri poikkeaa siten, että vierasmagnetoitussa tahtikoneessa on erillinen magnetointikäämyks, johon johdetaan tasavirtaa erillisestä magnetointikojeesta, joka voi olla harjallinen tai harjaton ratkaisu. Vierasmagnetoitujen tahtigeneraattoreiden hyötysuhde on, johtuen erillisestä magnetointista, jonkin verran verkkomagnetoituja induktiogeneraattoreita heikompi. Yleisesti koneen magnetointiteho on n. 2 % staattorin tehosta (Kinnunen et al, 2007). Lisäksi varsinkin harjallisen magnetointikojeen tapauksessa huollon tarve kasvaa verkkomagnetoituun induktiogeneraattoriin verrattuna.

Hyötysuhteeltaan paras vaihtoehto on suoraan verkkoon kytkettävä kestopagneettitahtigeneraattori. Koska generaattori magnetoidaan kestopagneettien avulla, ei siinä ole periaatteessa lainkaan magnetoinnin aiheuttamia häviöitä. Kestopagneettitahtigeneraattori on kilpailukykyinen perinteisiin ratkaisuihin verrattuna myös valmistuskustannuksiltaan. Suoraan verkkoon kytkettäviä kestopagneettitahtigeneraattoreita on nykyään käytössä mm. pienissä vesivoimalaitoksissa Keski-Euroopassa, mutta niiden toiminnasta pitkäaikaisessa käytössä ei ole toistaiseksi paljon kokemusta. Suoraan verkkoon kytkettävien kestopagneettitahtigeneraattoreiden roottorit on varustettava erillisellä vaimennuskäämyksellä, joka tasaa koneen ominaisuuksia nopeiden transienttien ja verkkoon tahdistuksen aikana. Vaimennuskäämi on tasaisen käynnin varmistamiseksi oleellinen komponentti, sillä ilman sitä kone ei toimi verkossa, vaan värähtelee erilaisissa kuormanmuutostilanteissa kuin jousi, ja putoaa lopulta verkon tahdistasta.

Kuvassa 5-4 on esitettyinä vaihteelliseen turbogeneraattoriin soveltuvien generaattorityyppien hyötysuhteet kuormituksen funktiona.



KUVA 5-4. TURBOGENERAATTORIKONSTRUKTIOON SOVELTUVIEN GENERAATTOREIDEN HYÖTYSUHTEET. DOL PMSG on suoraan verkkoon kytketty kestmagneettitahtigeneraattori, SEIG on verkkomagnetoitu induktiogeneraattori ja SG on vierasmagnetoitu tahtigeneraattori.

Kuvasta 5-4 nähdään, että paras hyötysuhde täydellä kuormalla on suoraan verkkoon kytkettävällä kestmagneettitahtigeneraattorilla. Verkkomagnetoitujen induktiogeneraattoreiden hyötysuhde on noin yhden prosenttiyksikön vastaavantehoista suoraan verkkoonkytkettävää kestmagneettitahtigeneraattoria pienempi. Perinteisillä vierasmagnetoituilla tahtigeneraattoreilla on vastaavasti pienimmät hyötysuhteen arvot. On kuitenkin huomattava, että generaattoreiden hyötysuhteet ovat joka tapauksessa huomattavasti turbiinin hyötysuhdetta korkeammat.

Koska turbiinin ja generaattorin pyörimisnopeudet sovitetaan toisiinsa mekaanisen vaihteen avulla, määrittää turbiinin pyörimisnopeus ja vaihteen välityssuhde generaattorin maksimipyörimisnopeuden. Esimerkiksi käytettäessä kuvan 5-2 mukaisesti parhaan isentrooppihyötysuhteen ($\eta_{is} = 67.7\%$) omaavaa yksiportaista Curtis-pyörää, jonka pyörimisnopeus on n. 25000 rpm, saadaan vaihteiston välityssuhteella 14.9 generaattorin maksimipyörimisnopeudeksi 1500 rpm. Tähän pyörimisnopeuteen soveltuvat koneet ovat nelinapaisia eli niiden liitinjännitteen taajuus on 50 Hz. Seuraava mahdollinen generaattorin pyörimisnopeus on 1000 rpm, joka on toteutettavissa kuusinapaisella generaattorilla. Turbiinin maksimaalinen pyörimisnopeus putoaisi kuitenkin jo arvoon 15000 rpm, ja kuten kuvasta 5-2 havaitaan, putoaa turbiinin isentrooppihyötysuhde samalla huomattavasti. Kaksinapaisella generaattorilla ja välityssuhteeltaan 14.9 olevalla vaihteistolla on turbiinin maksimaalinen pyörimisnopeus yli 44000 rpm, mutta tällä pyörimisnopeudella pyörivää turbiinia ei PAKU-laitoksen vaatimasta teholuokasta kaupallisilta valmistajilta löydy.

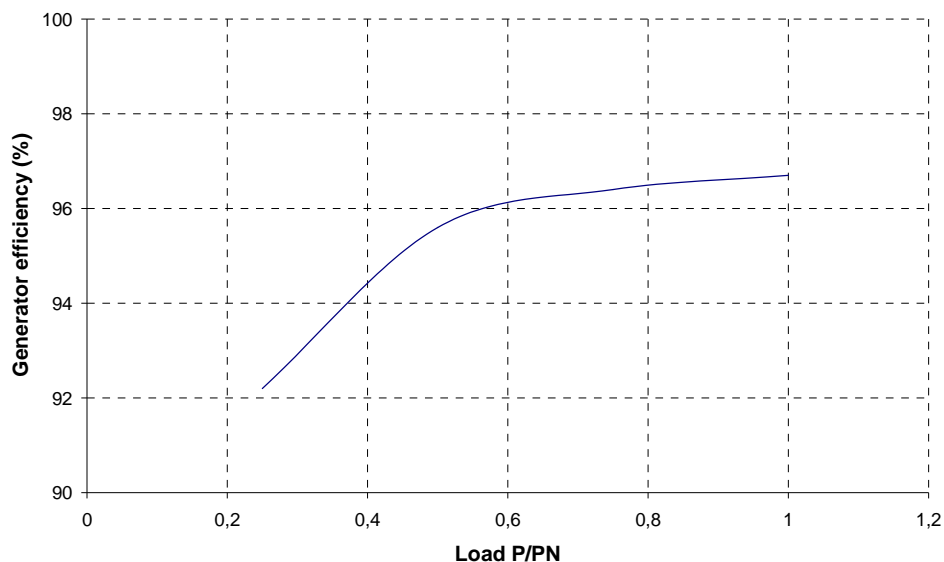
Loppupäätelmänä vaihteellisen turbogeneraattorin tapauksessa voidaan todeta, että vaikka konstruktio koottaisiin parhaat hyötysuhteet omaavista osista: yksiportainen Curtis-pyörä, kaksiportainen vaihteisto ja suoraan verkkoon kytkettävä kestmagneettigeneraattori, jäisi turbogeneraattorin kokonaishyötysuhde n. 65 %:iin, joka on sähköntuotannon kannalta varsin matala.

5.2.2 Vaihteettomaan turbogeneraattoriin soveltuvien generaattorireiden ominaisuudet

Vaihteeton turbogeneraattori voidaan toteuttaa käyttämällä massiiviroottorista induktiogeneraattoria tai kestmagneettitahtigeneraattoria. Molempien generaattorikonstruktioiden roottorit kannattaa mekaanisen lujuuden varmistamiseksi tehdä massiiviraudasta, sillä perinteinen laminoitu roottori-konstruktio ei kestä korkeiden pyörimisnopeuksien aiheuttamaa keskipakovoimaa. Massiivirootto-

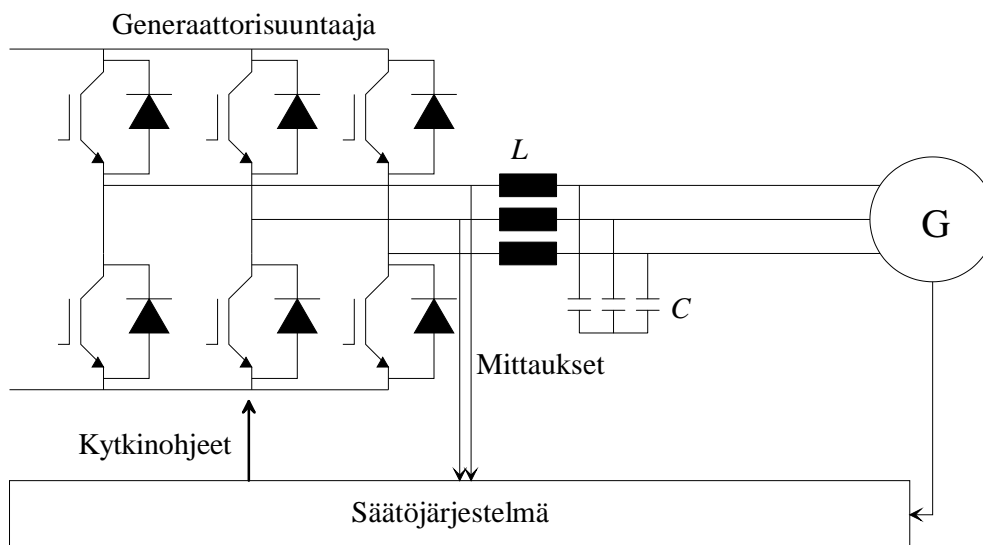
rinen induktiogeneraattori voidaan toteuttaa joko urittamalla massiiviroottorin pinta aksiaalisesti tai käyttämällä massiiviroottorin sisällä erillistä, hyvin sähköä johtavasta materiaalista valmistettua häkkikäämitystä. Kestomagneettisuurnopeustahgeneraattori on rakenteeltaan periaatteessa samanlainen kuin vaihteellisessa käytössä pyörivä hitaampi versio. Kestomagneettitahtikoneen tapauksessa ongelmaksi muodostuu magneettien kiinnitys sekä roottorin riittävä jäähdytys. Perinteisesti magneetit kiinnitetään roottorin pintaan liimaamalla, ja magneettien päälle kiinnitetään mekaanisesti luja hiilikuitupanta. Hiilikuidun lämmönjohtavuus on kuitenkin erittäin alhainen ($\lambda = 0.5 \text{ W/mK}$), joten magneettien lämpötila saattaa roottorin rautahäviöiden johdosta nousta niiden demagnetointilämpötilan yli, jolloin magneetit menetetään (Pyrhönen et al, 2002). Termisen luotettavuuden kannalta massiiviroottorinen induktiokone tuntuu kiinnostavimmalta vaihtoehdolta PAKU-laitoksen tarpeisiin.

Suurnopeusgeneraattoreiden hyötysuhteet ovat erittäin hyvät. Kuvassa 5-5 on esitettyä 15000 rpm pyörivän suurnopeusinduktiogeneraattorin hyötysuhde taajuusmuuttajakäytössä kuormituksen funktiona.



KUVA 5-5. SUURNOPEUSINDUKTIOGENERAATTORIN HYÖTYSUHDE KUORMITUKSEN FUNKTIONA. ($n = 15000 \text{ rpm}$) taajuusmuuttajakäytössä.

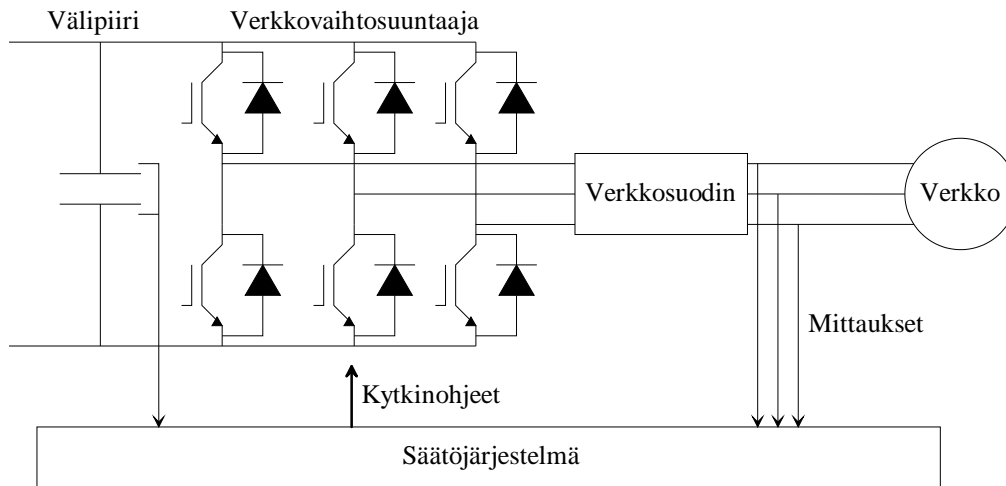
Vaikka suurnopeustekniikkaa hyödyntämällä vältetään vaihdelaatikon käytöltä, tarvitaan suurnopeuskäytöissä generaattorin ja verkon välille verkkovaihtosuuntaaja. Verkkovaihtosuuntaaja koostuu generaattorisuuntaajasta, verkkosuuntaajasta sekä suodattimista. Generaattorisuuntaajan, kuva 5-6, avulla säädetään generaattorin pyörimisnopeutta sekä siirretään generaattorin tuottama teho taajuusmuuttajan jännitevälipiiriin. Pyörimisnopeussäätö on generaattorisuuntaajan ensisijainen tehtävä eikä suuntaaja siten osallistu aktiivisesti välipiirin jännitteen säätöön. Generaattorisuuntaaja ei kuitenkaan nosta välipiirin jännitettä ennalta aseteltua ylärajaa suuremmaksi. Mikäli välipiirin jännite nousee ylärajalle pienentää generaattorisuuntaaja jarruttavaa vääntömomenttia ja siten välipiiriin syötettävää tehoa. Jarruttavan vääntömomentin pienentäminen johtaa generaattorin nopeuden kasvamiseen, mikäli samalla ei voida pienentää generaattoria pyörittävää mekaanista vääntömomenttia. Välipiirin jännite voi nousta generaattorisuuntaajan kannalta ylärajalle silloin, kun tehon siirtyminen välipiiristä edelleen verkkoon on estynyt. Tehon siirtymisen estyminen voi aiheutua esimerkiksi verkkovaihtosuuntaajan toimintahäiriöstä. Induktiogeneraattorilla pyörimisnopeuden kasvaminen ei kuitenkaan yleensä aiheuta ongelmia, koska koneen napajännite voidaan pitää ennaltaan generaattorisuuntaajan avulla.



KUVA 5-6. TYYPILLINEN SUURNOPEUSINDUKTIOGENERAATTORIKÄYTTÖ. Massiiviroottorigeneraattorikäytöissä tyypillisesti käytetään suodinta parantamaan koneen hyötysuhdetta ja kompensoimaan generaattorin tarvitsemaa loistehoa.

Verkkovaihtosuuntaajan, kuva 5-7, avulla generaattorin tuottama sähköteho siirretään verkkoon. Verkkovaihtosuuntaajan ensisijainen tehtävä on pyrkiä pitämään välipiirin jännite vakiona. Välipiirin jännitteen suuruuteen vaikuttavat välipiiriä syöttävän järjestelmän tehomuutokset. Välipiiriin tehoa syöttävän askelmainen tehomuutos aiheuttaa joko välipiirin jännitteen nousun tai laskun. Muostilanteessa välipiirin jännitteen huippuarvo, johon jännite nousee (laskee) riippuu verkkovaihtosuuntaajan kyvystä reagoida muutoksiin. Tästä johtuen täytyy verkkovaihtosuuntaajan pystyä vähintään yhtä nopeisiin kuormitusmuutoksiin kuin välipiiriä syöttävän generaattorisuuntaajan. Mikäli verkkovaihtosuuntaaja ei pysty vastaamaan askelmaiseen muutokseen nousee (laskee) välipiirin jännite yli (alle) sallitun arvon, jonka seurauksena ylijännitesuojauksen (alijännitesuojauksen) toiminnan johdosta verkkovaihtosuuntaaja lopettaa moduloinnin. Tyypillisesti verkko-vaihtosuuntaajan alijännitesuojaukselle on käyttöä vain, jos liittyvän verkon jännite on liian alhainen.

Vaikka vaihtosuuntaajien kytkentätaajuutta nostamalla on parannettu mahdollisuutta saavuttaa yhä puhtaampaa sähköä, on standardien vaatimusten saavuttamiseksi vaihtosuuntaajan lähtöjännitettä ja –virtaa suodatettava. Suodatuksen tarkoituksena on vaimentaa vaihtosuuntaajan moduloinnista aiheutuvat kytkentätaajuiset ja sen monikerran virtaharmoniset. Nykyaikainen verkkovaihtosuuntaaja ei ainoastaan mahdollista lähes sinimuotoista virtaa, vaan sillä voidaan tiettyjen algoritmien avulla poistaa verkossa jo olevia häiriöitä ja tarvittaessa kompensoida loistehoa. Verkkovaihtosuuntaaja toimii ns. step-up -periaatteella, joten siihen liittyy aina jonkinlainen magneettinen energiavarasto verkkorajapinnassa. Yksinkertaisimmillaan tämän varaston muodostaa verkkosuotimen kuristin.

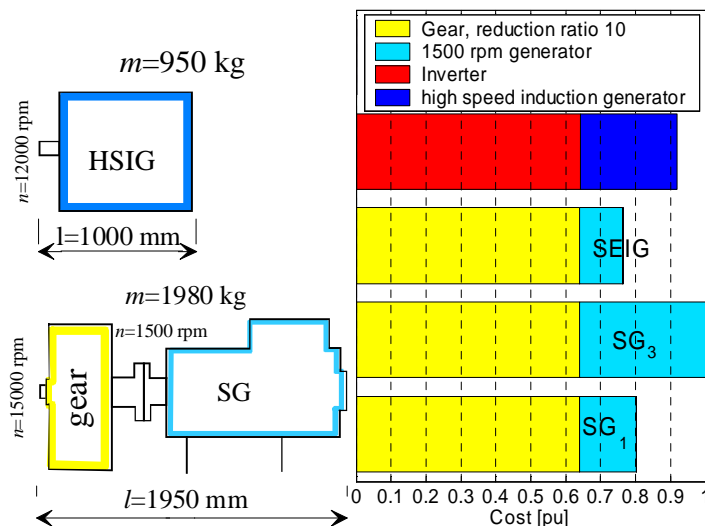


KUVA 5-7. TYYPILLINEN JÄNNITEVÄLIPIIRIVERKKOVAIHTOSUUNTAAJAJÄRJESTELMÄ.

Verkkovaihtosuuntaajia on kaupallisesti saatavissa jo n. 6 MW teholuokkaan asti ja niiden hyötysuhteet ovat erittäin hyvät, n. 97 - 98 %.

5.3 Vaihteellisen ja vaihteettoman turbogeneraattorikonstruktion vertailu

Vaihteellisen ja vaihteettoman turbogeneraattorikonstruktion välinen vertailu tehtiin sekä fyysisten mittojen että hankintakustannusten avulla. Kummankin turbogeneraattorikonstruktion antotehona on vertailussa käytetty arvoa 400 kW. Vertailun tulokset ovat esitettynä kuvassa 5-8.



KUVA 5-8. VAIHTEELLISEN JA VAIHTEETTOMAN TURBOGENERAATTORIKONSTRUKTION VERTAILU.

Kuten kuvasta 5-8 havaitaan, on suurnopeusgeneraattorilla varustettu turbogeneraattorikonstruktio fyysisiltä dimensioiltaan puolet vaihteiston ja väliakselin omaavaa konstruktiota pienempi.

Hankintakustannusten suhteen havaitaan, että välityssuhteeltaan 10 olevan mekaanisen vaihteen hinta on lähestulkoon identtinen tarvittavan verkkovaihtosuuntaajan hinnan kanssa. Suurnopeus-

generaattorin hankintahinta on hieman verkkomagnetoitua induktiogeneraattoria kalliimpi. Kokonaishankintakustannusten suhteen ei eri turbogeneraattorikonstruktioiden välillä ole suurta eroa.

5.4 Johtopäätökset

Jotta pienitehoinen PAKU-laitos olisi houkutteleva investointikohde, on sähköntuotannon hyötysuhde saatava korkeaksi. Tämä on mahdollista toteuttamalla turbogeneraattori suurnopeustekniikan avulla siten, että turbiini, generaattori ja kiertovesipumppu ovat integroituna samalla akselilla, jolloin mekaaninen alennusvaihte voidaan jättää pois. Generaattorin lisäksi on valmistauduttava suunnittelemaan ja toteuttamaan myös kaupallisia vaihtoehtoja paremman hyötysuhteen omaava turbiini.

Sähkökoneen ja turbiinin energiatehokas ja teknistaloudellisesti optimaalinen yhteensovittaminen edellyttää taitavaa kompromissien tekoa erityisesti optimaalisen pyörimisnopeuden löytämiseksi. Turbiinin hyötysuhde nousee pyörimisnopeuden kasvaessa, mutta esim. 500 kW:n sähkökoneen ominaisuudet tulevat kyseenalaisiksi ja erityisesti mekaniikan kannalta erittäin haasteellisiksi pyörimisnopeuden noustessa merkittävästi yli 20000 min⁻¹ pyörimisnopeuksien.

Lähteet

- Dixon, S. L.: 'Fluid mechanics, Thermodynamics of turbomachinery' (Pergamon Press, 1978, 3rd edn. 1989), pp. 12-14.
- Kinnunen, J., Pyrhönen, J., Liukkonen, O., Kurronen, P.:
'Analysis of directly network connected non-salient pole permanent magnet synchronous machines'. Int. Symp. on Industrial Electronics, Conference CDROM, Montreal, Canada, July 2006
- Pyrhönen, J., Huppunen, J., Nerg, J. Niemelä, M. Kurronen, P.: 'Medium-speed induction machine permanent-magnet machine comparison'. Int. Conf. on Electrical Machines, Conference CDROM, Belgium, 2002

6 PAKU-CHP-LAITOKSEN VERKKOONLIITYNTÄ JA VERKKOONLIITYNNÄN AUTOMAATIO

6.1 Johdanto

LTY:ssä on useiden DENSY -tutkimusohjelmassa toteutettujen hankkeiden tuloksena muodostunut vahva osaaminen liittyen tehoelektroniikalla toteutettuun verkkorajapintaan. Eri tutkimusten pilottihankkeissa on yhdistetty laitosautomaatio, verkkorajapinnan taajuudenmuuttaja, verkon suojausfunktio ja laitoksen etävalvonta taloudellisesti tehokkaasti.

Pienten laitosten, varsinkin voimantuotantolaitosten, täytyy noudattaa ja toteuttaa monia vaatimuksia, jotka ovat yhteisiä suurten laitosten kanssa. Kuitenkin esimerkiksi käyttökustannukset ovat korostuneesti esillä, koska voimantuotannon arvo on vähäinen (tuotantoyksikköä kohti), mutta toimintavarmuudelle ei aseteta suurten laitosten vaatimustasoa, koska seisonta-ajan tuotannonmenetykset ovat usein pienemmät kuin ennakoivan kunnossapidon kustannukset. Toteutettavan kokonaisuuden on täytettävä mm. seuraavia vaatimuksia: toimintavarmuus, pienet käyttökustannukset, pienet investointikustannukset, edullinen laitoksen (etä)valvonta, sähköverkon ja laitoksen sähköturvallisuuteen liittyvä suojaus sekä energian mittaus.

Tutkimuksessa kehitettiin verkkoonliityntäautomaatio pienelle, 400kW sähkötehoiselle turbo-generaattorille. Lisäksi suunniteltavalle laitteistolle määriteltiin säätöstrategia yleisellä tasolla. Säätöstrategian toimivuus tarkistettiin simuloinein. Kehitettävän prosessisäädön sekä verkkoliitynnän ohjauksen automaatiokonsepti rakennettiin yhteen. Automaattisesti ja itsenäisesti toimivan laitteiston toiminta häiriö- ja vikatilanteissa selvitettiin miehittämättömän toiminnan mahdollistamiseksi.

6.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on pienitehoisen CHP-laitoksen verkkoonliitynnän suunnittelu. Tutkimuksessa koottiin yhteen hajautetun tuotannon pienvoimalalaitoksen verkkoonliitynnän suojausvaatimuksia ja -suosituksia. Niiden mukaisesti suunniteltiin verkkoonliitynnät kahdelle eri generaattorilaitteistovaihtoehdoille: suoraan verkkoon kytkettynä ja taajuusmuuttajalla verkkoon kytkettynä. Tutkittiin generaattorilaitteistojen verkkoonliitynnän kannalta tärkeitä ominaisuuksia ja generaattorien ohjaukseen tarvittavaa automaatiota. Määriteltiin automaation toimilaitteet ja verrattiin eri laitteiden ominaisuuksia. Suunnitelluille automaatiokokoonpanoille lasketettiin hankintakustannukset ja vaihtoehdoista pyrittiin löytämään teknisesti ja taloudellisesti toimivin. Tutkimuksen päätuloksia ovat suunnitellut sähköliitymät sekä suojaus- ja ohjauspiirit, ensiö- ja toisiosuojaukset, toteutustason piirustukset ja automaation toimintaselostus.

6.3 PAKU-CHP -laitoksen verkkoonliityntä ja verkkoonliitynnän automaatio

Tutkimuksessa esitettiin suoraan verkkoon kytkettynä epätahtigeneraattorin ja tahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaatio, sekä taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketyn kestopagneettitahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaatio ja selostettiin automaation toiminta. Lisäksi käsiteltiin

erilaisia mahdollisia tahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaation toteutusvaihtoehtoja ja esitettiin mahdollisia automaation kokoonpanoja.

PAKU-CHP-laitoksen generaattoriliityntävaihtoehtoja on esitetty seuraavassa listassa:

- vierasmagnetoitu tahtigeneraattori suoralla verkkoliitynnällä,
- verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori suoralla verkkoliitynnällä,
- kestopagneettitahtigeneraattori suoralla verkkoliitynnällä,
- vierasmagnetoitu tahtigeneraattori tehoelektronisella verkkoliitynnällä,
- kestopagneettitahtigeneraattori tehoelektronisella verkkoliitynnällä,
- epätahtigeneraattori tehoelektronisella verkkoliitynnällä.

Verkkoonliityntäautomaation hankintakustannukset laskettiin ja eri vaihtoehdoista valittiin PAKU-CHP-laitokseen parhaiten sopiva verkkoonliittymän ratkaisu. Taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketty suoravetoturbogeneraattori todettiin teknisesti ja taloudellisesti toimivaksi.

6.4 Verkkoonliittymän standardit.

Sitovia kansvälisiä standardeja verkkoon liittämistä ei ole olemassa. Eri Euroopan maissa vaaditaan yleiseen jakeluverkkoon liitettyä pienvoimalta pääperiaatteessa hyvin samanlaista suojausta ja toimintaa verkon vikatilanteissa. Vaatimukset ja suositukset verkkoon liittämistä ovat usein yrityskohtaisia. Mutta tekniset vaatimukset ovat hyvin yhdenmukaisia. Vaatimusten toteuttamistavat ja toteutumisen toteennäyttämiskaavat vaihtelevat sen sijaan maittain (Lindh, 2005). Eri maiden standardeja ja vaatimuksia on käsitelty viitteissä (Lindh 2005), (Lindh 2008) ja (Kumpulainen 2006).

Suomessa hajautetun tuotannon verkkoon liittämistä käytetään yhtiöiden omia ohjeita, esim. Helsingin Energian laatimia ohjeita ”Ohjeet sähköä tuottavan laitteiston liittämiseksi Helsingin Energian sähköjakeluverkkoon” (Helsingin Energia 2006). Käytettävissä on myös yleinen Senerin ohje ”Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon” (Sener 2001).

6.5 Hajautetun tuotannon suojaus

Toimiva suojaus turvaa sen, että voimalan käyttö jakeluverkossa ei aiheuta häiriötä/vaaraa verkolle, kuluttajille tai verkolla työskenteleville henkilöille. Myös toimiva suojaus suojaa itse voimalaa verkon vikoja vastaan. Voimalan generaattorilla ja generaattoria pyörittävällä turbiinilla on omat suojauksensa. Pienvoimalan suojaukselle on esitetty tiettyjä perusvaatimuksia, joiden on aina täyttyvä. Sähköenergialiiton suosituksen (Sener 2001) ja tutkimuksien (Lindh 2005) ja (Kumpulainen 2006) mukaisesti voidaan esittää joitakin tärkeimpiä ehtoja:

- Suojauksen on erotettava voimala verkosta, jos verkkoa ei syötetä muualta tai jännite liittymispisteessä katoaa kokonaan tai osittain.
- Suojauksen on erotettava voimala verkosta, jos verkon jännite tai taajuus liittymispisteessä poikkeavat normaaliarvoista.

- Uudelleen syöttämisen aloittamisen on oltava mahdollista ilman voimalaitokseen kohdistuvia toimenpiteitä.
- Pienvoimala ei saa kytkeytyä uudelleen verkkoon, elleivät kaikki verkon vaiheet ole jännitteisiä.
- Turhia verkosta erottamisia on vältettävä.
- Verkon, jossa tuotantoyksikkö on kiinni, vikaantuessa tuotantoyksikön on lopetettava tehonsyöttö.
- Vikatilanteen jälkeinen takaisinkytkentä on sallittavissa vasta, kun verkon taajuus ja jännite ovat olleet tiettyjen rajojen sisällä tietyn aikaa.
- Takaisin verkkoon kytkeytyminen pitää tehdä tahdistetusti.

Perusvaatimuksena suojaukselle verkon kannalta ehtojen täyttämiseksi voimala on varustettava seuraavalla suojilla:

Pienvoimala on varustettava yli- ja alijännitesuojilla, joiden on toimittava niin, että jännite pysyy aina sallittavissa rajoissa. Releiden tulee olla 3-vaiheisia, jotta vältetään epäsymmetrisiä syöttötilanteita.

Pienvoimala on varustettava yli- ja alitaajuussuojilla, joiden on laukaistava, jos taajuus ei pysy sallituissa rajoissa. Alitaajuus aiheutuu verkon ja generaattorin ylikuormituksesta. Alitaajuusrele erottaa voimalan verkosta taajuuden laskiessa alle määritellyn raja-arvon. Ylitaajuustilanne on seurausta kuorman nopeasta katoamisesta. Taajuussuojauksen lisäksi on tällöin otettava huomioon että liian nopeaksi kiihtyvä pyörimisnopeus voi aiheuttaa vaurioita generaattorissa. Voimalan nopeuden säädin tai turbiinin pikasulku estävät liian suuret pyörimisnopeudet, mutta ylitaajuusrelettä käytetään varasuojana.

Pienvoimala on varustettava ylivirtasuojalla, jotta oikosulkutilanteessa voimala voidaan erottaa verkosta. Näin vältetään voimalan generaattorin vauriot ja sen vikaantuneelle verkolle aiheuttamat lisäongelmat.

Turvallisuuden kannalta päävaatimuksena on yksinsyötön esto. Pienitehoisen voimalan tapauksessa yksinsyöttö estetään käyttäen vähintään jännite- ja taajuusrelettä. Jänniterele havahtuu loistehon muutoksen seurauksena ja taajuusrele pätötehon muutoksen seurauksena. Lisäksi voidaan käyttää ROCO- taajuuden muutokseen perustuvaa suojausta ja vector shift - vaiheen siirtymään perustuvaa suojausta. Sähköenergialiiton suosituksen mukaan yksinään syötön estämiseksi tarvitaan seuraavat suojaavat laitteet: jänniterele, joka laukaisee jos jännite alle 85 % tai yli 115 % nimellisarvosta tai taajuusrele, joka laukaisee 3 Hz:n poikkeamalla nimellisestä. Maasulkutilanteessa voimala erotetaan verkosta yksinsyötön estosuojauksen perusteella. (Sener 2001)

Voimalaitoksen koneita on myös suojattava seuraavilla suojilla. Turbiini varustetaan nopeudensäätimellä, joka turvaa turbiinin suojaukset mm. ylinopeussuojaus. Generaattorilaitteiston suojaus riippuu generaattorin tyypistä. Tahtigeneraattorin tapauksessa perussuojauksena on aina ylivirta- ja maasulkusuoja sekä tarvittaessa epäsymmetria-, jännitteenousu-, takateho-, magnetointisuojaus. Epätahtigeneraattorissa tarvittavien suojien määrä on pienempi. Tarkemmat suojat ovat oikosulku-, ylikuormitus- ja alijännitesuojat. (Kumpulainen, 2006)

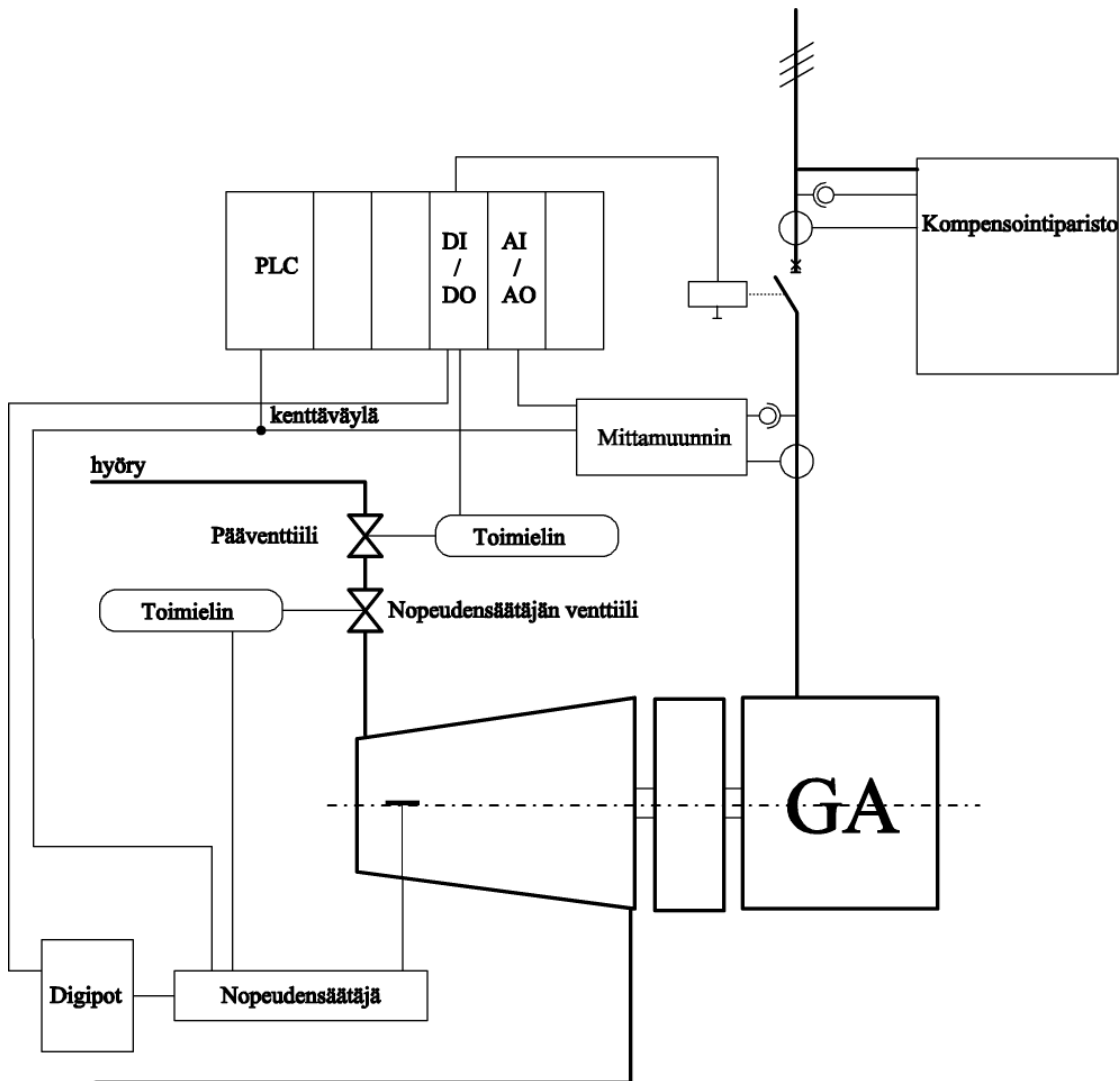
6.6 Verkkoonliittymän automaatio.

6.6.1 Suoraan verkkoon kytketyn epätahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaatio.

Tärkeimmät epätahtigeneraattorin toimintaperiaatteet PAKU-CHP-laitoksen verkkoonliittymän kannalta ovat:

- suoraan verkkoon kytketyn epätahtigeneraattorin jännitteen ja taajuuden määrää verkko
- generaattori ottaa magnetointinsa verkosta
- laitoksen tehokerroin kompensoidaan kompensointiparistolla
- epätahtigeneraattoria ei tarvitse tahdistaa verkkoon
- generaattori kytketään verkkoon mahdollisimman lähellä tahtinopeutta käynnistysvirran kestoajan minimoimiseksi

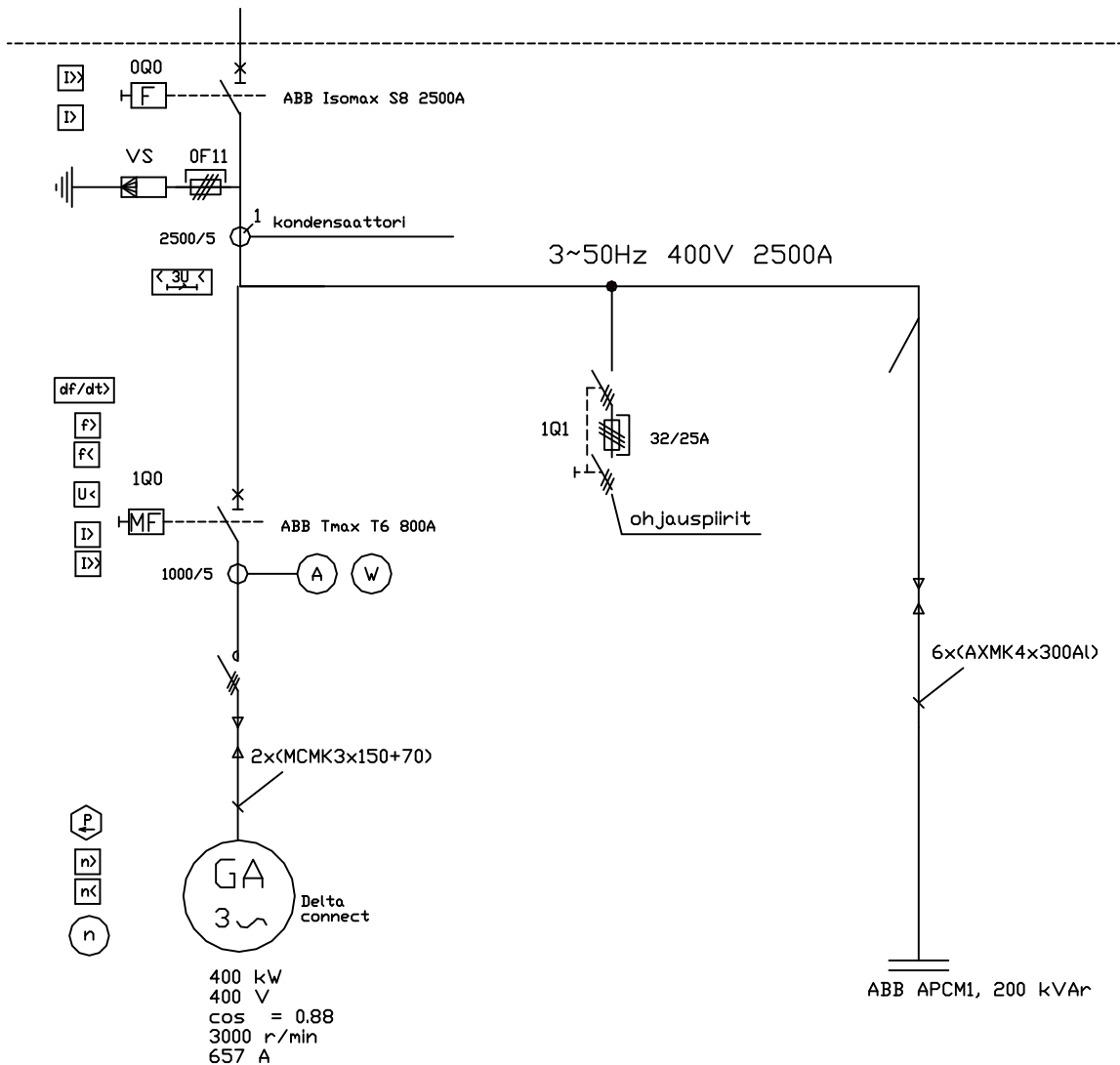
Epätahtigeneraattori suoraan verkkoon kytkettynä on vaihtoehtoista yksikertaisin. Kuitenkin epätahtigeneraattorin verkkoonliittymässä tehokertoimen nostamista varten on käytettävä kompensointiparistoa. Kuvassa 6-1 on esitetty suoraan verkkoon kytketyn epätahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaatio.



KUVA 6-1. EPÄTAHTIGENERAATTORIN VERKKOONLIITYNNÄN AUTOMAATION LOHKOKAAVIO.

Avataan pähöryventtiili. Käynnistetään turbiini antamalla käynnistyskäsky ja nopeusohje (synkroninopeus) nopeudensäätimelle. Mitataan taajuus mittamuuntimen avulla ja logiikka (PLC) kytkee generaattorin verkkoon sulkemalla generaattorikatkaisijan synkroninopeudella. Epätahtigeneraattorin tehokerroin säädetään arvoon 0,95 – 1 (ind. tai kap.) kompensointiparistolla. Turbiinin tehoa säädetään nopeussäätimellä.

Kuvassa 6-2 on esitetty suoraan verkkoon epätahtigeneraattorin suojauskaavio.



KUVA 6-2. EPÄTAHTIGENERAATTORI SUORALLA VERKKOLIITYNNÄLLÄ, SUOJAUSKAAVIO.

Generaattorikatkaisija 1Q0 kytkee generaattorin verkkoon mahdollisimman lähellä tahtinopeutta. Verkkomagnetoidun epätahtigeneraattorin tehokerrointa nostetaan käyttäen kompensointikondensaattorilaitteistoa. Suojauskaavion selostus on esitetty kappaleessa 6.7.

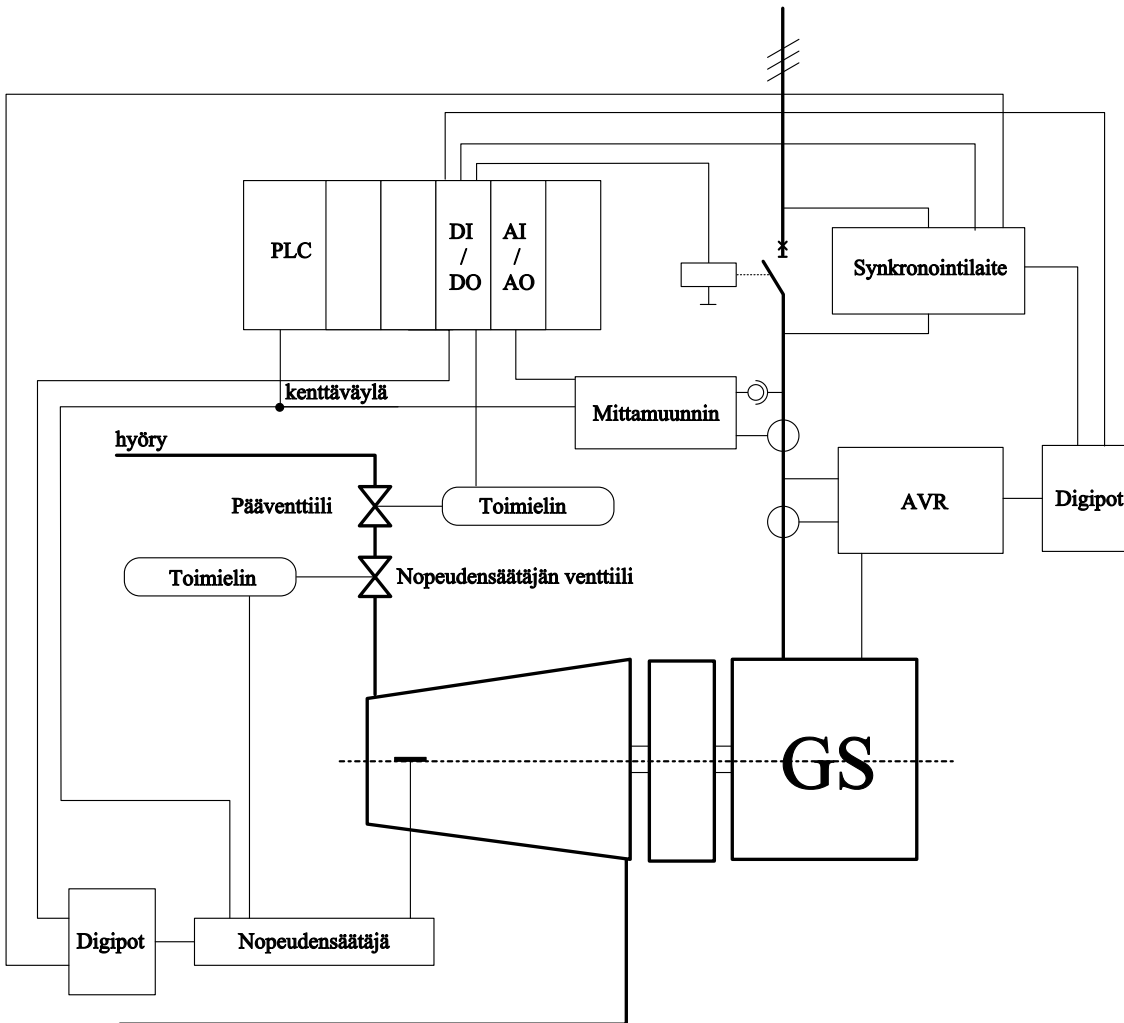
6.6.2 Suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaatio.

Tarkemmat tahtigeneraattorin toimintaperiaatteet PAKU-CHP-laitoksen verkkoonliitynnän kannalta ovat:

- tahtigeneraattori on tahdistettava kytkettäessä suoraan verkkoon.
- tahtigeneraattori on magnetoitava, ja magnetoinnin tavoitteena ennen kytkemistä verkkoon on jännitteensäätö ja tahdistuksen jälkeen on loistehon säätö.
- suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin jännitteen ja taajuuden määrää jäykkä verkko

Tahtigeneraattori tahdistetaan verkkoon automaattisella synkronointilaiteella. Jännitteensäädin sää-
 tää tahtigeneraattorin magnetointia. Tahtigeneraattorin pätötehoa säädetään nopeudensäätimellä.

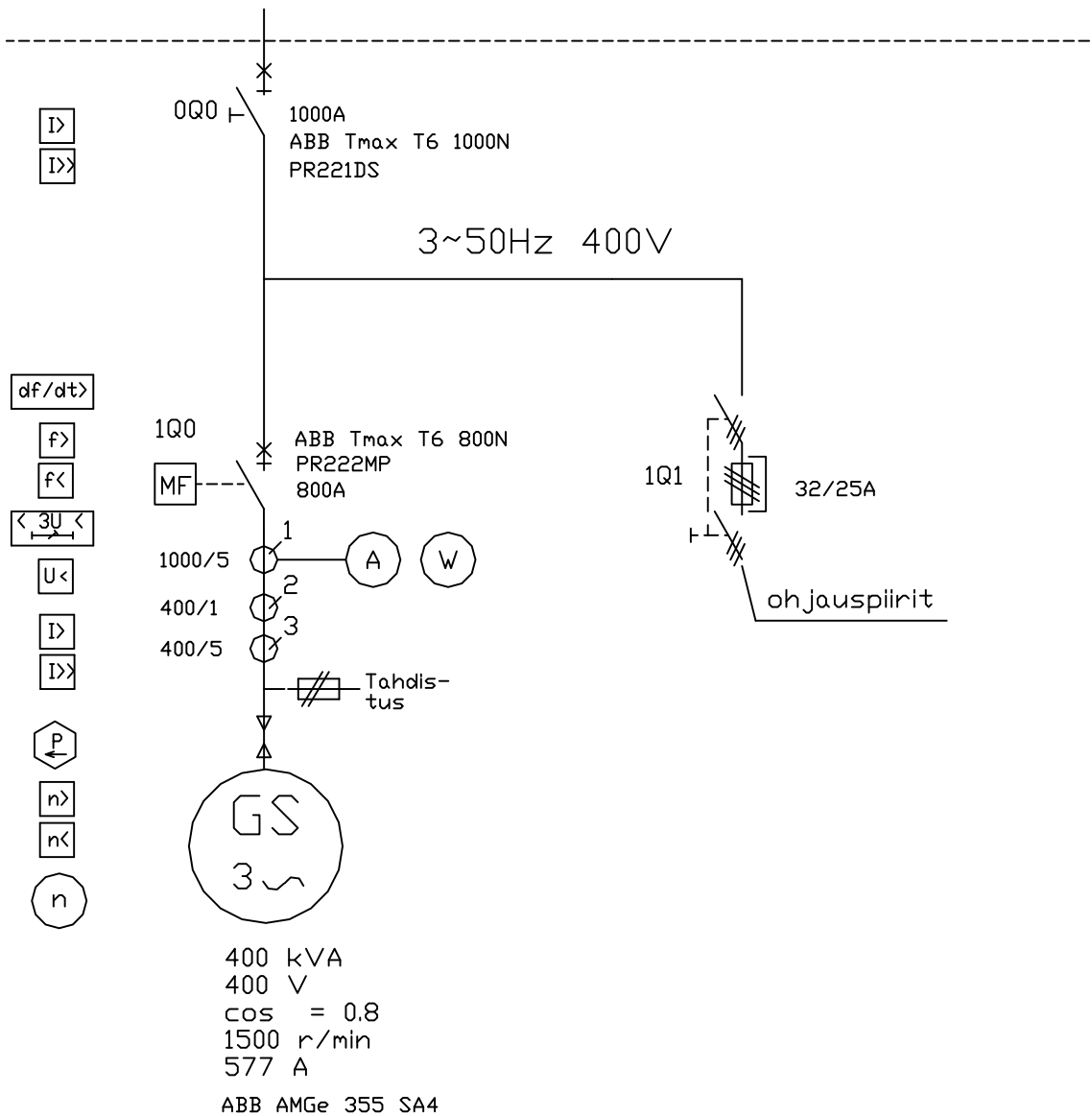
Kuvassa 6-3 on esitetty suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaa-
 tio.



KUVA 6-3. TAHTIGENERAATTORIN VERKKOONLIITTYYNNÄN AUTOMAATION LOHKOKAAVIO.

Logiikka avaa pähöryventtiilin. Käynnistetään turbiini antamalla käynnistyskäsky ja nopeusohje nopeudensäätimelle. Synkronointilaite pystyy ohjaamaan nopeussäädintä ja jännitteensäädintä tahdistukseen generaattorin verkkoon. Tahdistuessa synkronointilaite antaa logiikalle synkronointisignaalin, jolloin logiikka (PLC) sulkee katkaisijan. PLC ohjaa jännitteensäädintä generaattorikatkaisijan sulkeutumisen jälkeen toteuttaen tehokerroin- tai loistehosäädön.

Kuvassa 6-4 on esitetty suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin suojauskaavio.



KUVA 6-4. SUORAAN VERKKOON KYTKETYN TAHTIGENERAATTORIN SUOJAUSKAAVIO.

Generaattorikatkaisija 1Q0 kytkee generaattorin verkkoon, kun tahdistusehdot on täytetty. Suojauskaavion selostus on esitetty kappaleessa 6.7.

6.6.3 Suoraan verkkoon kytketyn kestopagneettitahtigeneraattorin verkkoonliittymän automaatio.

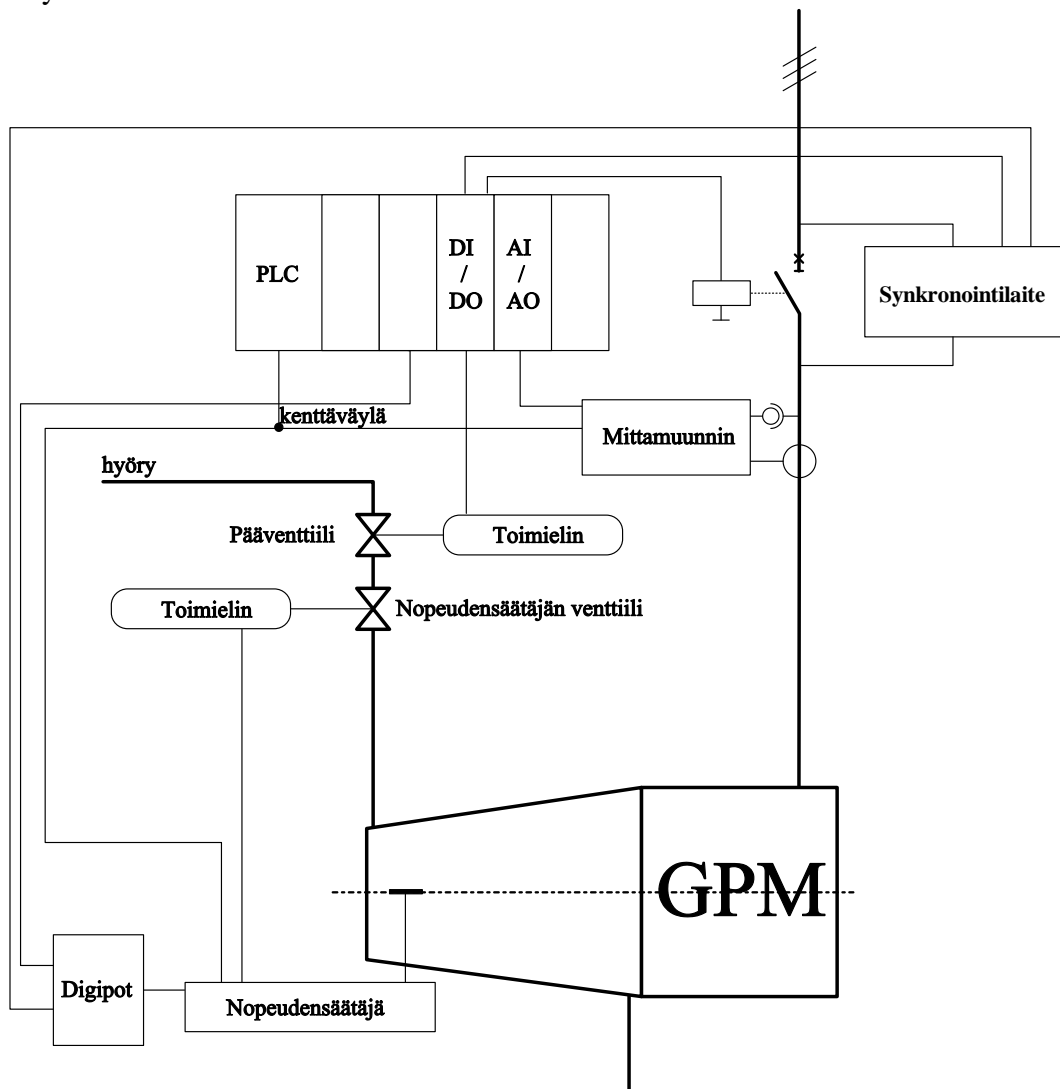
Tarkemmat toimintaperiaatteet suoran verkkoon kytketyn kestopagneettitahtigeneraattorin PAKU-CHP-laitoksen verkkoonliittymän kannalta ovat:

- tahtigeneraattori on tahdistettava kytkettäessä se suoraan verkkoon.
- suoraan verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin jännitteen ja taajuuden määrää jäykkä verkko
- kestopagneettigeneraattori ei tarvita erillistä magnetoimisvirtaa

- kestomagneettigeneraattorin vuota ei ole mahdollista säätää
- kestomagneettigeneraattori on oltava suunniteltu suoraan verkkoon kytkettäväksi. Viitteessä (Lindh, 2007) löytyy ohjeita ja vaatimuksia suoraan verkkoon kytkettävän kestomagneettigeneraattori suunnitteluun.

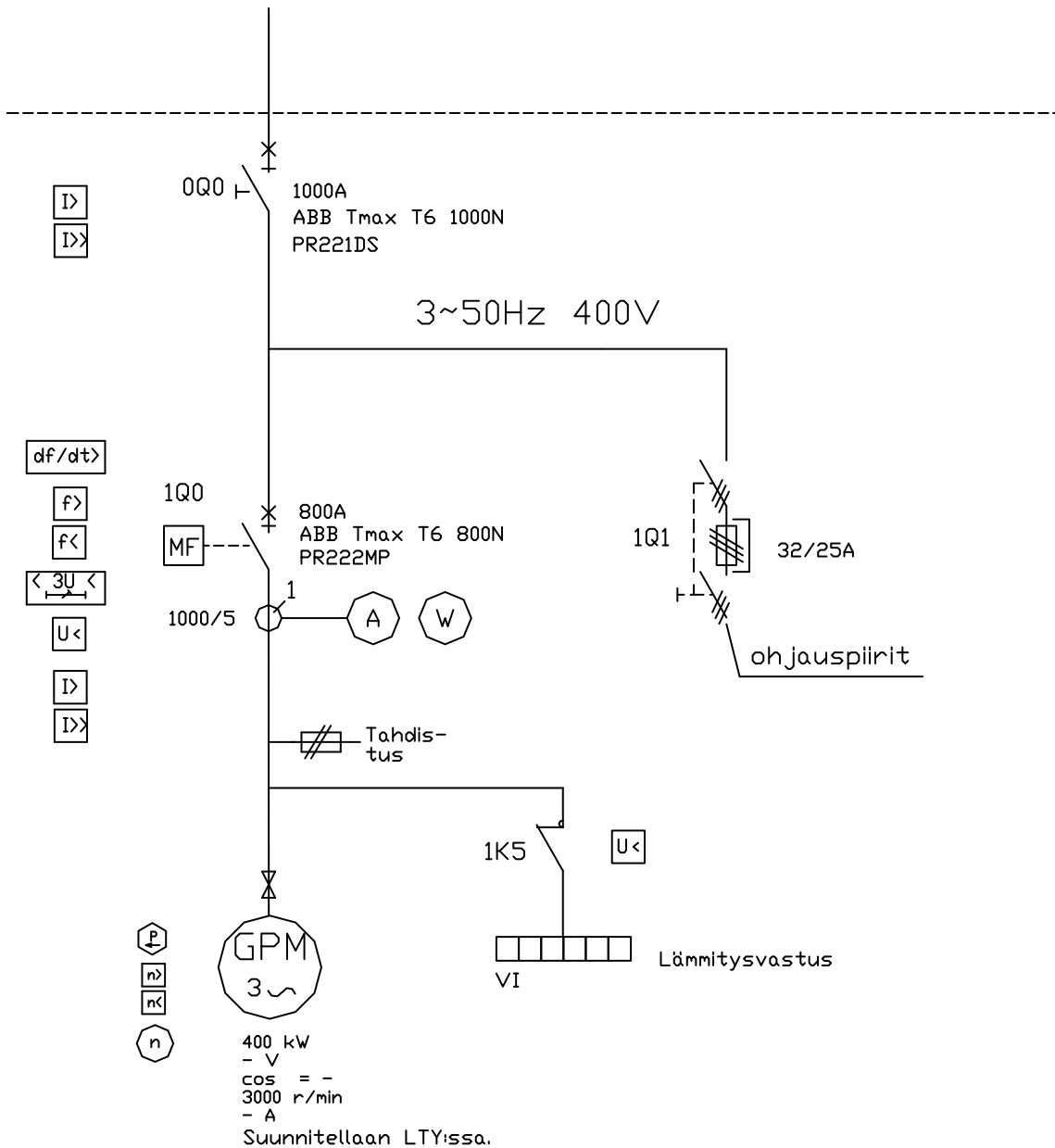
Tahtigeneraattori tahdistetaan verkkoon automaattisella synkronointilaitteella. Tahtigeneraattorin pätötehoa säädetään nopeudensäätimellä.

Kestomagneettitahtigeneraattorin verkkoonliityntä vaatii tahdistuksen, mutta jännitteensäätö ei ole mahdollista. Kestomagneettitahtigeneraattorin on oltava suunniteltu suoraan verkkoon kytkettäväksi. Kuvassa 6-5 on esitetty suoraan verkkoon kytketyn kestomagneettitahtigeneraattorin verkkoonliitynnän automaatio.



KUVA 6-5. KESTOMAGNEETTITAHTIGENERAATTORIN VERKKOONLIITYNNÄN AUTOMAATION LOHKOKAAVIO.

Logiikka avaa päähöyryventtiilin. Käynnistetään turbiini antamalla käynnistyskäsky ja nopeusohje nopeudensäätimelle. Synkronointilaite pystyy ohjaamaan nopeussäädintä tahdistukseen generaattorin verkkoon ja antaa logiikalle synkronointisignaalin, jolloin logiikka (PLC) sulkee katkaisijan. Generaattorin jännitteen ja taajuuden määrää verkko, turbiinin tehoa säädetään nopeudensäätimellä. Kuvassa 6-6 on esitetty suoraan verkkoon kytketyn kestomagneettitahtigeneraattorin suojauskaavio.

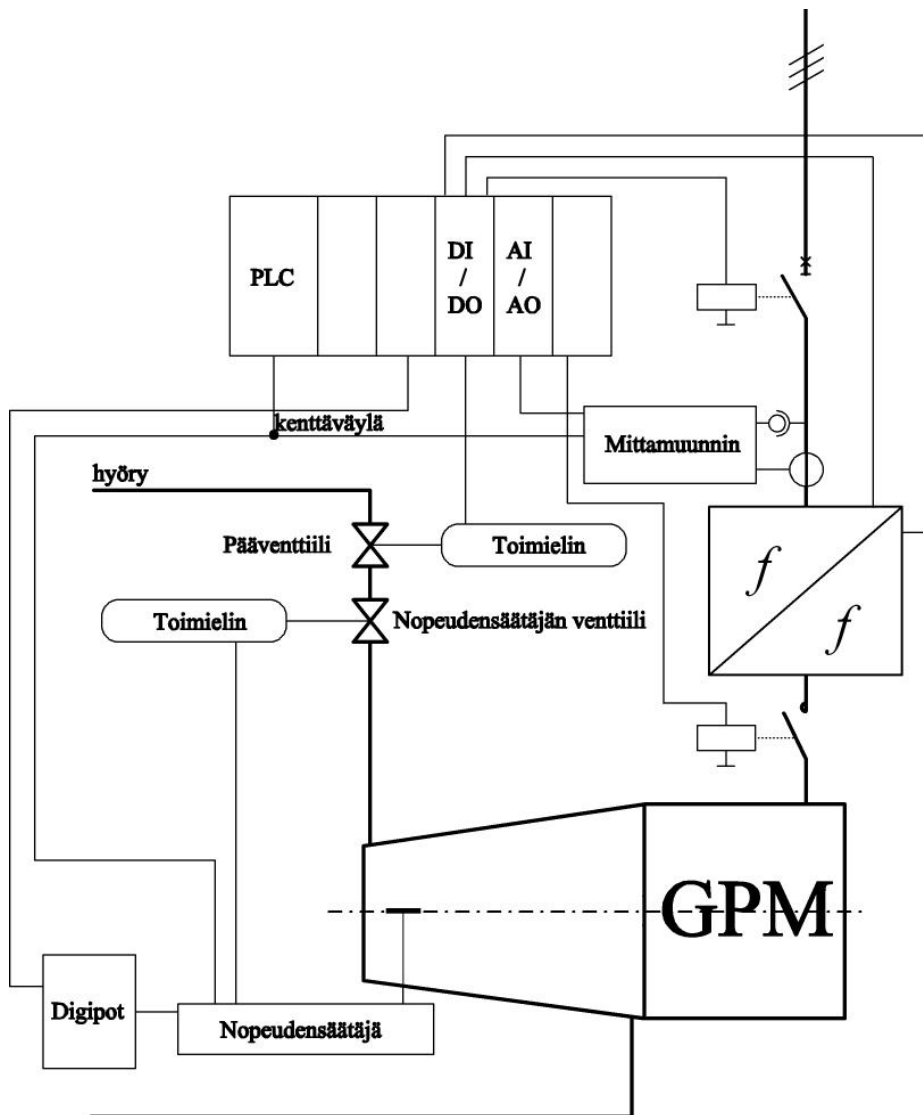


KUVA 6-6. SUORAAN VERKKOON KYTKETYN KESTOMAGNETTITAHTIGENERAATTORIN SUOJAUSKAAVIO.

Generaattorikatkaisija 1Q0 kytkee generaattorin verkkoon, kun tahdistusehdot on täytetty. Jännitteenoususuoja (ryntäyssuoja) on kontaktorin 1K5 kautta kytketty lämmitysvastus, kontaktori 1K5 on auki kun jännite on saalituissa rajoissa. Tarkempi suojauskaavion selostus on esitetty kappaleessa 6.7.

6.6.4 Taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketyn kestopagneettitahtigeneraattorin verkkoonliittynän automaatio.

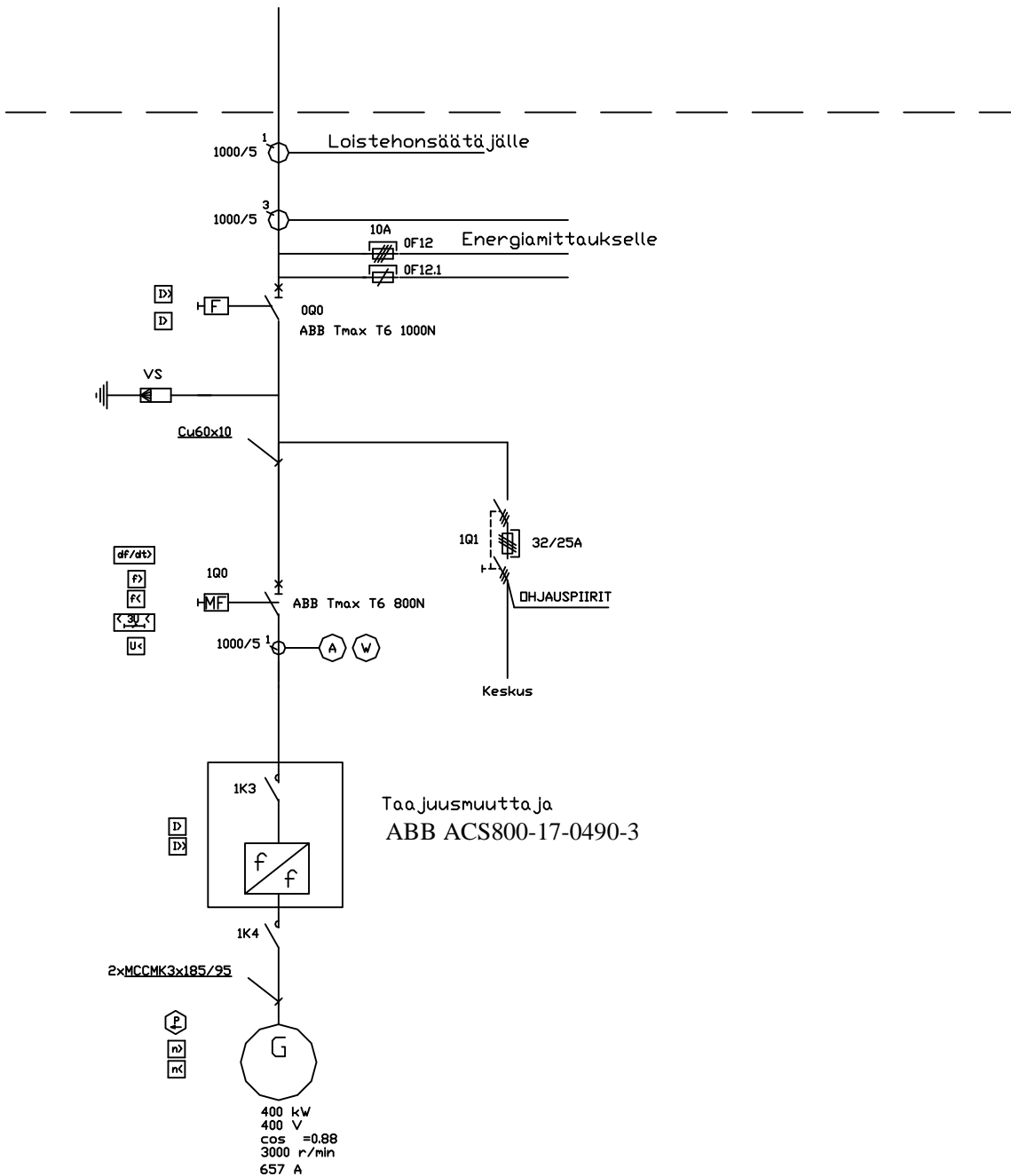
Taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytkettyä kestopagneettitahtigeneraattoria ajetaan nopeus- tai vääntömomenttisäädön avulla. Kuvassa 6-7 on esitetty taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytketyn kestopagneettitahtigeneraattorin verkkoonliittynän automaatio.



KUVA 6-7. VERKKOONLIITYNTÄ TAAJUUSMUUTTAJALLA, AUTOMAATION LOHKOKAAVIO.

Logiikka (PLC) sulkee verkkopuolen katkaisijan kytkettäessä taajuusmuuttaja verkkoon. Logiikka (PLC) käynnistää verkkovaihtosuuntaajan moduloinnin. Logiikka (PLC) sulkee generaattori - puolen kontaktorin kytkettäessä taajuusmuuttaja generaattorin. Avataan pähöryventtiili. Käynnistetään turbiini antamalla käynnistyskäsky nopeudensäätimelle. Annetaan nopeus- tai vääntömomenttiohje generaattorisuuntaajalle. Käynnistetään generaattorisuuntaajan modulointi. Turbiinin tehoa säädetään nopeudensäätimellä.

Käsitellään tässä kaikki PAKU-CHP-laitoksen mahdolliset taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytke- tetyt generaattorit yhdessä. Suojauserot huomataan suojauskaavion selostuksessa. Kuvassa 6-8 on esitetty taajuusmuuttajakäyttöisen generaattorin suojauskaavio.



KUVA 6-8. TAAJUUSMUUTTAJAN AVULLA VERKKOON KYTKETYN GENERAATTORIN SUOJAUSKAAVIO.

Ylivirtasuojaus toteutetaan taajuudenmuuttajan sisäisellä ylivirtasuojauksella. Takatehosuojaus toteutetaan taajuudenmuuttajan teho- tai vääntömomenttioshoon avulla. Suojauskaavion selostus on esitetty kappaleessa 6.7.

Taajuusmuuttajana on esimerkissä ABB:n ACS800-17-0490-3 verkkoonjarruttava taajuusmuuttaja. Taajuudenmuuttaja ja siihen liittyvä automaatio diagnosoivat vikatilanteet ja hallitsemattomassa tilanteessa kytkevät suuntaajan irti verkosta tai generaattorista. Generaattorin puolella olevaa kontaktoria 1K4 tarvitaan vain kestopagneettigeneraattorin verkkoonliittymän tapauksessa. Silloin vikatilanteessa voidaan erottaa taajuusmuuttaja generaattorista ja estää taajuusmuuttajan välipiriä tuhoutumista, jos generaattorisuuntaaja ei toimi. Samalla on huolehdittava turbiini pikasulkuun sekä kytkeä keinokuorma generaattoriin napoihin (kuva 6-6), jotta kestopagneetikone ei ylinopeudelle joutuessaan tuhoa itseään mekaanisesti.

6.7 Suojaus

Turbiinin ohjauskeskus on suojattu ylivirtaa vastaan pääkatkaisijalla 0Q0. Pääkatkaisijalla kytketään ja erotetaan voimalaitos verkosta. Pääkatkaisijan relesuojausyksiköt toteuttavat oikosulkusuojauksen ja ylikuormitussuojauksen. Pääkatkaisijan työvirtalaukaisin toimii generaattorikatkaisijan pettäessä, eli se takaa erottamiseen silloin, kun generaattorikatkaisija ei avaudu. Pääkatkaisijan on oltava erottamiseen hyväksytty ja oltava lukittavissa auki asentoon.

Kaikki ohjaus- ja säätöpiirit on suojattu ylivirtaa vastaan kytkinvarokkeilla (1Q1) ja johdonsuojautomaateilla.

Generaattorikatkaisija (1Q0) on varustettu generaattori/moottorisuojareleellä, joka takaa generaattorin ylivirta-, ylikuormitus-, oikosulku- ja maasulkusuojauksen. Generaattorikatkaisijalla on auki asennon ilmaisu ja lukitus.

Generaattorikatkaisijan alijännitelaukaisinta kytketään jännite-taajuusreleiden laukaisupiirissä. Verkkokatkokoreleellä on tehty yli- ja alitaajuussuojaus. Jännitereleellä on tehty yli- ja alijännitesuojaus. Verkkokatko (yksinsyöttöesto suojaus) havaitaan jännitereleellä ja verkkokatkokoreleellä (Mains-loss). Jännitereleen ja verkkokatkokoreleen laukaisupiirit on kytketty sarjaan. Jos yksikin rele havahtuu ja katkaisee, jää generaattorikatkaisijan alijänniterele jännitteettömäksi ja katkaisee pääpiirin. Alijännitelaukaisimen käyttö työvirtalaukaisimen sijaan varmistaa, että aina apujänniteteiden hävittäessä tai suojauspiirin katketessa riippumatta suojareleistä tai ohjausohjelmasta generaattorikatkaisija aukeaa.

6.8 Verkkoonliityntäautomaation hankintakustannukset

Tarvittava verkkoonliityntälaitteisto kullekin generaattorilaitteistolle oli määritelty ja valittu eri vaihtoehtoista. Yksittäisien laitteiden hintojen, suunnittelun ja asennuksen tarvittavan ajan ja tuntipalkan perusteella verkkoonliityntän kustannusarviot on laskettu ja koottu taulukkoon 6-1.

Taulukko 6-1. Verkkoonliityntäautomaation hankintakustannusarvot (Lana 2008)

Vaihtoehto	1	2	3	4	5
Liityntätapa	suoraan verkkoon		verkkovaihto-suuntaajaliityntä	verkkovaihto-suuntaajaliityntä	suoraan verkkoon
Generaattorityyppi	epätahtikone	tahtikone*	epätahtikone/PM	suurnopeus-epätahtikone	tahtikone
Generaattori	15 000 €	20 000 €	15 000 €	20 000 €	450 000 €**
Vaihdelaatikko	70 000 €	70 000 €	70 000 €	-	
Turbiini	150 000 €	150 000 €	150 000 €	150 000 €	
Verkkoonliityntälaitteiston hinta	35 000 €	30 000 €	90 000 €	90 000 €	25 000 €
Mekaaniset rakenteet	35 000 €	35 000 €	35 000 €	35 000 €	-
Suunnittelu	5 000 €	7 000 €	5 000 €	5 000 €	3 000 €
Asennus	15 000 €	17 000 €	15 000 €	15 000 €	5 000 €
YHTEENSÄ	325 000 €	329 000 €	380 000 €	315 000 €	483 000 €
* harjaton itsemagnetoitu tahtigeneraattori jännitteensäätimellä. ** turbiini-generaattori yksikkö, jossa on tahtigeneraattori, vaihdelaatikko, turpiini ja ohjausautomaatio (myyntihinta).					

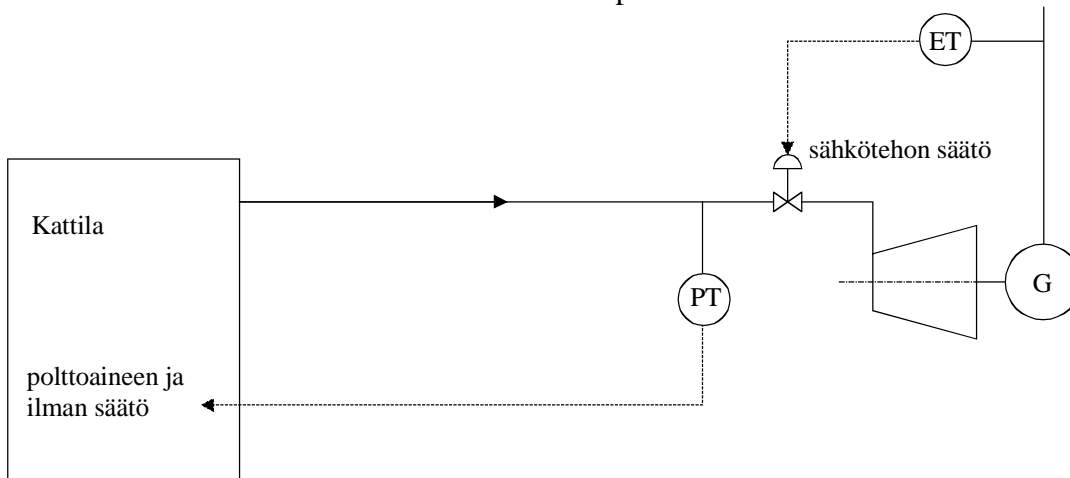
Kaupallisen turbiinigeneraattorisetin käyttö pienentää suunnittelun tarvetta ja asennuksen kustannuksia, mutta on omaa kokonaisratkaisua selvästi kalliimpi vaihtoehto. Taajuusmuuttajan tekniikka antaa mahdollisuudet käyttää turbiinia muuttuvalla nopeudella eli voimalaitoksen polttoprosessin mukaisesti (liukusäätö). Vaihtoehdon 3 verkkoonliityntäautomaation kustannus on korkea, koska käytetään taajuusmuuttajan lisäksi vaihdelaatikkoa. Mutta jos käytössä on suoravetoturbogeneraattori, niin kuin vaihtoehdossa 4, päästään kohtuullisiin kustannuksiin. Tämä liityntätapa antaa mahdollisuudet liukusäätöön ja samalla päästään eroon vaihdelaatikossa tapahtuvista häviöistä.

Jos PAKU-CHP-laitoksen generaattori kytketään suoraan verkkoon, silloin vaihtoehto 2 on ensisijaisesti toteutettava, koska käyttäen tahtigeneraattoria pystytään saamaan hyvä tehokerroin. Verkkovaihtosuuntaaja käytettäessä kannattanee käyttää vaihteistoa ja PM-generaattoria tai vaihteetonta suurnopeusgeneraattoria.

6.9 PAKU-CHP -laitoksen säätö ja ohjaus

Ajotavan valinnassa oletetaan että PAKU-CHP-laitosta käytetään kokonaan sähkön tuotantoon eli sähkökuorma määrä sen toiminnan. Silloin voidaan PAKU-CHP-laitoksen ajotavaksi valita perinteistä ratkaisua: kiinteän paineen ajotapa, jolloin laitoksen tehoa ohjataan sähköteho referenssillä ja paine turbiiniin edessä pidetään vakiona polttoainesyöttöä ohjaamalla.

Jos lämpökuorma määrää PAKU-CHP- laitoksen toiminnan, ei laitosten tehoa voida ohjata sähköteho referenssillä. Tällöin tehokkaan toiminnan savuttamiseksi on otettava huomioon, sekä sähköteho että lämmön tarve. Tätä ei käsitellä tässä raportissa.



KUVA 6-9. PAKU-CHP-LAITOKSEN OHJAAMISEN PERIAATE

Kiinteän paineen ajotavalla turbiini pyrkii pitämään laitoksen sähkötehon halutussa arvossa, kun kattila säätää höyrytakin painetta. Tällä ajotavalla saadaan nopean säätötulos, koska tehopoikkeama ohjaa suoraan turbiinin säätöventtiilejä (Riala 1977).

Laitosta ajetaan turbiinin höyryventtiilin olevan osittain suljettuna. Venttiiliä ohjataan sähkötehon asetusarvon perustella. Kuorman kasvamisesta seuraa venttiilin avautuminen ja sillä vapautetaan osan kattilassa säilytettyä energiaa. Jos kuorma pienenee kasvatetaan kattilan säilytettyä energiaa sulkemalla venttiiliä. Tässä turbiini reagoi ensimmäisenä kuormanmuutokseen. Turbiinisäädön tehtäessä muutosta kattilan säätöjärjestelmää reagoi kasvamalla tai pienintämaalla painetta asetusarvon mukaisesti. (Lindsley 1999)

6.9.1 Prosessit ja säädöt

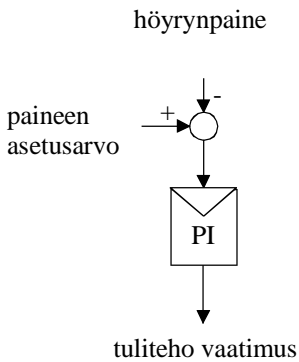
Kattila tuottaa halutun paineista ja lämpötilasta höyryä. Höyrykattila prosessin säätöihin kuuluvat (Huhtunen 1994)

- kattilan tehon (paineen) säätö,
- höyryn paineen säätö
- polttoaineen säätö,
- primääri-ilman määrän säätö
- sekundääri-ilman määrän säätö
- tuorehöyryn lämpötilan säätö
- syöttöveden virtaussäätö ja kattilan lieriön pinnansäätö
- palamisilman, savukaasujen ja tulipesän paineen säädöt

Laitoksen pääsäädöt pitävät tehontuotannon (eli kuorman) yhtä suurena kuin hetkellinen kulutus. Voimalaitoksen pääsäätöjä ovat kattilan höyrynpainesäätö ja tuotantoteho (sähköteho) säätö. Höyryn painetta säädetään höyryn tuotannon puolelta polttoaineteholla.

6.9.2 Polttoaineen ja ilman säätö

Höyryn paineen säädin antaa polttoainetehon asetusarvon.



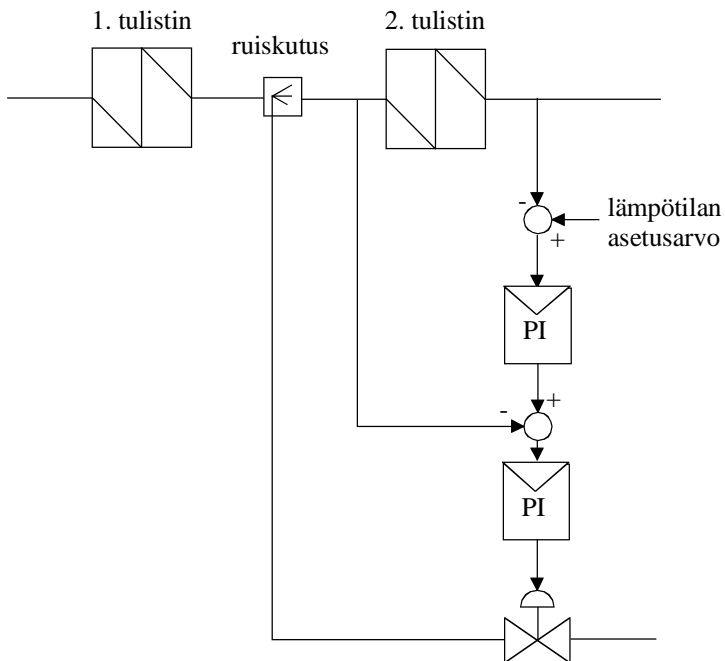
KUVA 6-10. PÄÄSÄÄDINKYTKENTÄ (MYÖTÄKYTKENTÄ) (Miettinen 1999)

Polttoainetehon asetusarvosta muodostetaan myös kokonaisilmavirran asetusarvo. Kokonaisilmavirran ohjearvo jaetaan primääri-ilmaan ja sekundääri-ilmaan.

Stabiloivat säädöt pitävät prosessisuureet ohjearvoissaan. Ne kompensoivat häiriöiden ja kuormanmuutosten vaikutukset. Tärkeitä säädettäviä suureita ovat:

Höyryn lämpötilat

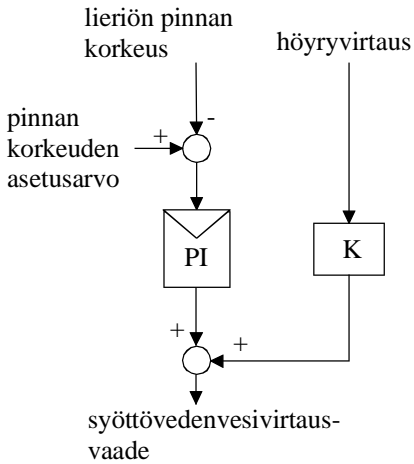
Jotta voimalaitoksen hyötysuhde olisi hyvä, höyryn lämpötila pidetään lähellä suurinta sallittua arvoa. Tulistimen jälkeistä höyryn lämpötilaa säädetään vesiruiskutuksella, joka on ennen tulistinta. Säätökytkentänä on kaskadi, jossa alasäätitimen säätösuureena on ruiskutuksen jälkeinen lämpötila.



KUVA 6-11. HÖYRYN LÄMPÖTILASÄÄTÖ (Miettinen 1999)

Syöttöveden ja lieriökattilan lieriön pinnansäätö

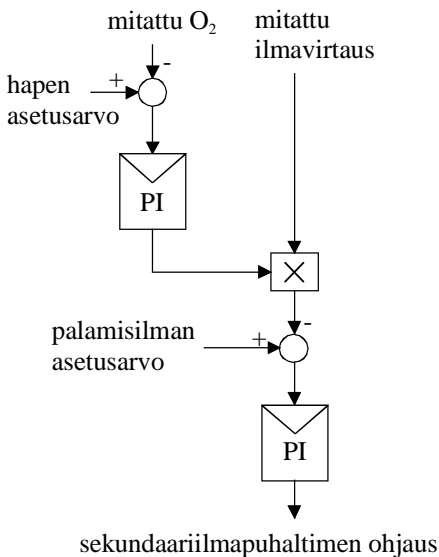
Syöttövedensäädöllä varmistetaan, että kattilassa on aina vettä ja että sitä syötetään sinne höyrynkulutuksen perustella. Syöttövedensäätöön käytetään kytkentää, joka perustuu sekä höyryvirtauksen että lieriöpinnankorkeuden mittaamiseen. Toimilaitteena on nopeusohjattu syöttövesipumppu.



KUVA 6-12. SYÖTTÖVEDEN JA LIERIÖKATTILAN LIERIÖN PINNANSÄÄTÖ (Miettinen 1999)

Savukaasujen happipitoisuus

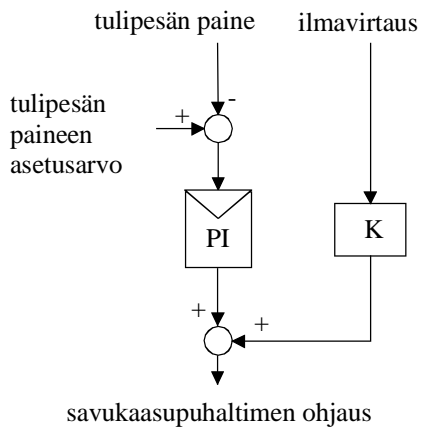
Syötetyn ilmamäärän oikeellisuus voidaan todeta savukaasun happipitoisuusmittauksesta, jonka tuloksen perustella ohjataan sekundaariilmapuhaltimen käyttöä (korjataan polttoaine-ilmasuhdetta).



KUVA 6-13. PALAMISILMAN KORJAUSSÄÄTÖ SAVUKAASUN O₂-PITOISUUDEN PERUSTELLA (Miettinen 1999)

Tulipesän paineen säätö

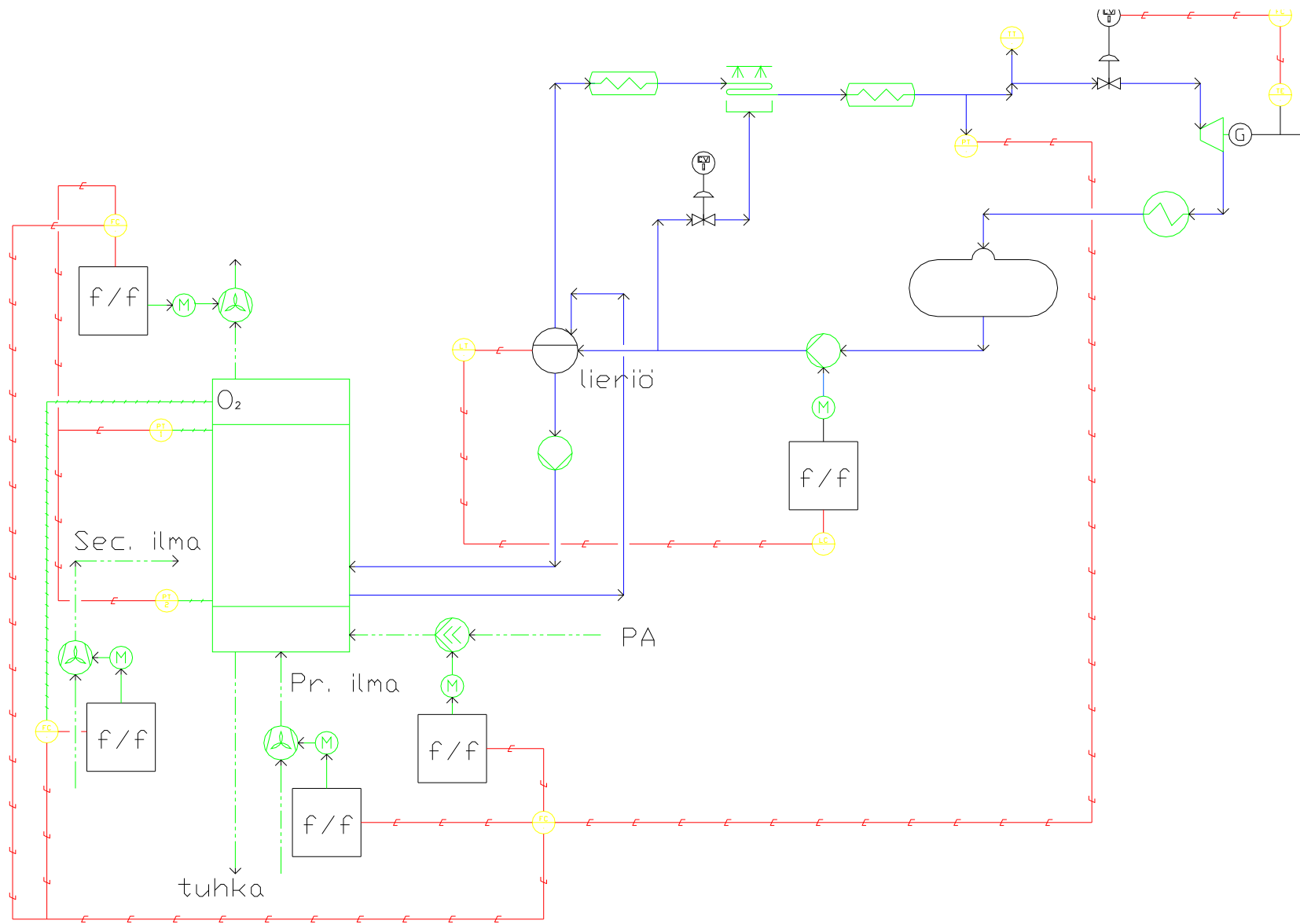
Tulipesän paineella ohjataan savukaasupuhaltimen käyttöä. Tehtävänä on huolehtia kattilaan muodostuvien savukaasujen poistamisesta.



KUVA 6-14. TULIPESÄN PAINEEN SÄÄTÖ (Miettinen 1999)

6.9.3 Pääkaavio

Käyttäen selvitettyä höyrykattilaprosessin säätöjä on piirretty mahdollinen PAKU-CHP- laitoksen säätökaavio, joka esitetään kuvassa 6 – 15



KUVA 6-15. PAKU-CHP-LAITOKSEN PÄÄSÄÄTÖKAAVIO

6.10 Johtopäätökset

Mahdollisille PAKU-CHP-laitoksen 400 kW generaattorilaitteistoille suoraan ja taajuusmuuttajan avulla verkkoon kytkettynä on suunniteltu verkkoonliityntä.

Verkkoonliityntälaitteiston toimi- ja suojauslaitteet on määritelty, niiden erilaisia vaihtoehtoja on vertailtu ja erilaisista vaihtoehdoista on valittu sopivimmat suunniteltavana olevalle verkkoonliityntälle. On suunniteltu sähköliittymät sekä suojaus- ja ohjauspiirit. Ensiö- ja toisiosuojaukset on suunniteltu. Lisäksi on määritetty automaation toiminta vikatilanteissa. Verkkoonliityntän kaaviot on piirretty toteutustasolle ja verkkoonliityntän automaatiolle on laadittu toimintaselostus. PAKU-laitoksen yleissäädön periaatteet on hahmotettu. Tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää PAKU-CHP-pilottilaitoksen liittämässä jakeluverkkoon.

Lähteet

- Helsingin Energia, 2006, Ohjeet sähköä tuottavan laitteiston liittämiseksi HELEN Sähköverkko Oy:n sähkönjakeluverkkoon. Helsingin Energia.
[Viitattu 27.4.2007] Saatavissa:
<http://www.helsinginenergia.fi/verkko/urakointiohjeet/SU6082006.pdf>.
- Huhtunen, Markku. Kettunen, Arto, 1994, Höyrykattilatekniikka, Opetushallitus.
- Kumpulainen, Lauri. Ristolainen, Ilari, 2006, Sähkönjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon sähköteknisen suojauksen kehittäminen. Tutkimusraportti. VTT.
- Lana, Andrey, 2008, Diplomityö, Pienitehoisen CHP-laitoksen verkkoonliityntä, LTY.
- Lindh, Tuomo. Niemelä, Markku. 2005, Hajautetun voimantuotannon verkkoliityntä ja koneet. VELKO 1, säte tutkimusraportti 19. LTY, 61 s. ISBN 952-214-073-2.
- Lindh, Tuomo, 2007, Permanent magnet generator designing guidelines. LTY.
- Lindh, Tuomo, 2008, Kestomagneetikoneet ja verkkoonliityntä voimalaitoskäyttöön, DENSY EL-DIG, VELKO 2, Säte tutkimusraportti 26, LTY, ISBN 978-952-214-559-8.
- Lindsley, David, 1999, Power-Plant Control and Instrumentation: The Control of Boilers and Hrsg Systems (IEE Control Engineering Series), The Institution of Electrical Engineers.
- Miettinen, Jouni, 1999, Diplomityö, Kiinteän polttoaineen kattilan virtaustekninen dynamiikka ja säätö, LUT.
- Riala, Pekka, 1977, Voimalaitosprosessin dynaamisista ominaisuuksista. INSKO:n julkaisu 23-77, Luku VII.
- Sener, 2001 Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon. Sähköenergialiitto ry SENER.

7. Talousmallinnus

7.1 Tavoite

Tässä osatehtävässä määritetään luvussa 3 esitetyille laitosvaihtoehdoille investointikustannukset sekä laaditaan laitoksille talousmalli. Näiden avulla selvitetään PAKU-investoinnin kannattavuus, siihen olennaisimmin vaikuttavat tekijät ja tutkitaan investoinnin kannattavuuden edellytyksiä. PAKU-laitoksen sijoittumista Kymenlaaksoon ja Etelä-Karjalaan tarkastellaan esimerkkitapausten avulla.

7.2 Laitoksen kustannusarvio

PAKU-laitosvaihtoehtojen sekä lämpölaitosvaihtoehdon investointikustannukset on määritetty kandidaatintyönä (Anttila 2008). Voimalaitoksen investointikustannukset koostuvat seuraavista kustannusryhmistä:

- koneet ja laitteet asennuksineen
- rakennustekniset työt
- suunnittelu ja valvonta
- kustannusvaraus
- rakennusaikaiset korot

Koneet ja laitteet muodostavat investointikustannuksista suurimman osan ja kandidaatintyön painopisteenä onkin ollut tämän ryhmän kustannusten selvittäminen. Määrittäminen on perustunut yrityksiltä saatuihin tarjouksiin, kun kyseessä on yksittäisen laitteen toimitus. Taulukossa 7-1 on esitetty kustannustarkasteluun mukaan otetut, kustannusvaikutuksiltaan merkittävimmät komponentit sekä tahot, joilta hintatiedot on saatu. Turbogeneraattorin ja vaihteiston sekä automaation, instrumentoinnin ja sähköistyksen osalta kustannukset on määritetty LTY:n Sähkötekniikan osastolla osana PAKU-tutkimushanketta.

Taulukko 7-1. Koneiden ja laitteiden kustannusryhmän komponentit sekä hintatietojen lähde.

Lietteen kuivuri Einco	Syöttövesisäiliö Högfors	Syöttöveden käsittely Hyxo
Reaktori Einco	Lieriö Högfors	Lietteen ja polttoaineen käsittely Laitex
Savukaasukanavan lämmönsiir- timet Einco	Paineenalennusventtiilit Konwell	Tuhkan käsittely Laitex
Turbogeneraattori ja vaihteisto Siemens Turbomachinery Equipment, Savonia Power	Puhaltimet Dust Control Systems	Savukaasun puhdistus Ekomans
Kaukolämmönvaihdin Vahterus	Savupiippu Seipin	Päästöjen mittaus Gasmet
Pelletin raaka-aineen kuivuri Einco	Automaatio ja instrumentointi LTY	
Pumput Sulzer Pumps Finland	Sähköistys LTY	

Muiden kustannusryhmien osalta kustannukset on määritetty kirjallisuustietojen sekä aiemmin toteutettujen vastaavan kaltaisten hankkeiden perusteella. Näiden ryhmien kustannukset riippuvat suurelta osin koneiden ja laitteiden kustannuksista. Kustannusten määrittäminen käyvätkä ilmi taulukosta 7-2.

Taulukko 7-2. Investointikustannuksen muodostuminen.

A	Koneet ja laitteet	
B	Asennus	= 0.1 · A
C	Rakennustekniset työt	
D	Suunnittelu ja valvonta	= 0.1 · (A+B+C)
E	Kustannusvaraus	= 0.1 · (A+B+C+D)
F	Rakennusaikaiset korot	= 0.03 · (A+B+C+D)
	Investointikustannus	= A+B+C+D+E+F

Työn tuloksena laitosvaihtoehdoille saadut investointikustannukset on esitetty taulukossa 7-3. Euroääräisen arvon lisäksi kustannukset on esitetty tuotettua sähkötehoa kohti sekä vuodessa käsiteltäessä kostea lietteä kohti (kuiva-ainepitoisuus 14.2 m-%).

Taulukko 7-3. Laitosvaihtoehdojen investointikustannukset.

		1	2A	2B	3
Investointikustannus	[M€]	5.7	7.9	9.3	6.2
Investointikustannus sähkötehoa kohti	[€/kWe]	24800	10900	15300	-
Investointikustannus kostea lietteä kohti	[€/t]	148	208	244	164

Pelkkää lietteä polttoaineena käyttävä PAKU-laitos (tapaus 1) on kooltaan pienempi kuin muut vaihtoehdot, jotka käyttävät lietteen lisäksi haketta. Tämän vuoksi laitoksen investointikustannus jää jopa pienemmäksi kuin rakenteeltaan yksinkertaisemmalla lämpölaivosvaihtoehdolla (tapaus 3).

7.3 Taloudellinen mallinnus

Taloudellisessa mallinnuksessa määritetään laitosvaihtoehtojen takaisinmaksuaika. PAKU-laitosta ja sen kannattavuutta tarkastellaan yksittäisenä investointina, jolloin eri laitosvaihtoehdoille saadut tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia. Työssä ei sen sijaan oteta kantaa esimerkiksi PAKU-laitoksen ja nykyisen lietteen käsittelyketjun loppuosan keskinäiseen paremmuuteen.

Mallinnuksen lähtökohtana on, että laitosta käytetään nimellisteholla. PAKU-laitokset (tapaukset 1, 2A ja 2B) tuottavat nettosähkötehoa, lämpölaitosvaihtoehto (tapaus 3) sen sijaan tarvitsee ulkopuolista sähkötehoa toimiakseen. Se osa lämpötehosta, jota ei tarvita lietteen kuivaamiseen, käytetään joko kaukolämmön tuotantoon tai pelletin raaka-aineen kuivaamiseen. Tästä lämpötehosta käytetään nimitystä ylimääräinen lämpöteho.

Tarkastelussa otetaan huomioon investointikustannuksen lisäksi seuraavat kustannustekijät:

- sähkötehoon liittyvät tuotot tai kustannukset
- ylimääräiseen lämpötehoon liittyvät tuotot
- lietteen vastaanotosta saatavat tuotot
- tuhkan käsittelykustannukset
- laitoksen käyttökustannukset
- rinnakkaispolttoaineen hankintakustannukset

Mahdolliset investointi- ja verotuet on jätetty tarkastelun ulkopuolelle.

PAKU-laitoksen tuottaman nettosähkötehon ja ylimääräisen lämpötehon arvo määritetään energiahintojen perusteella. Energiahinnat puolestaan määräytyvät tapauskohtaisesti.

Mikäli laitoksen tuottamalla nettosähköteholla korvataan ostosähköä, sähkön arvo määritetään sähkön ostohinnan perusteella. Vastaavasti myytäessä sähköteho verkkoon arvo määritetään sähkön myyntihinnan perusteella. Lämpölaitosvaihtoehdon tarvitseman sähkön hankintakustannus määritetään sähkön ostohinnan perusteella.

Mikäli ylimääräinen lämpöteho käytetään kaukolämmitykseen, laskennassa käytettävä lämmön arvo määräytyy samalla tavalla kuin sähkön kyseessä ollen: Korvattaessa ostolämpöä tai vaihtoehtoisella tavalla tuotettua lämpöä arvo määritetään lämmön ostohinnan tai vaihtoehtoisen lämmönhankintatavan perusteella. Myytäessä ylimääräinen lämpöteho arvo määritetään lämmön myyntihinnan perusteella. Jos ylimääräisellä lämmöllä kuivataan pelletin raaka-ainetta, lämmön arvo voidaan määrittää vaihtoehtoisen lämmönhankintatavan tai kuivattavan raaka-aineen arvonnousun perusteella. Jälkimmäisen selvittämiseksi on tunnettava esimerkiksi raaka-aineen massavirta, kuivan osan tehollinen lämpöarvo, kuiva-ainepitoisuudet ennen kuivausta ja sen jälkeen sekä vastaavat energiahinnat.

Lietettä vastaanotettaessa siitä saadaan vastaanottomaksu, joka määritetään saapumistilassa olevaa (kosteaa) liettonnia kohti. Maksun määrittämisessä periaatteena on, että mitä kosteampi liete, sitä kalliimpaa on sen vieminen kompostoitavaksi (Kakko 2007). Tässä tarkastelussa lietteen kuiva-ainepitoisuus poikkeaa yhdyskuntalietteen tyypillisestä arvosta. Poikkeaman vaikutus lietteen vastaanottomaksuun otetaan huomioon käyttämällä vastaanottomaksun referenssi-kuiva-ainepitoisuutena tyypillistä arvoa 20 m-%. Kuiva-ainepitoisuuden pienentyessä 10 m-%:iin vastaanottomaksun oletetaan kasvavan referenssiarvoon verrattuna puolitoistakertaiseksi. Kuiva-ainepitoisuuden ollessa tällä välillä vastaanottomaksu saadaan lineaarisella interpolaatiolla.

Rinnakkaispolttoaineen hankintakustannukset voidaan määrittää, kun tunnetaan polttoainevirran massavirta sekä tehollinen lämpöarvo ja energiahinta saapumistilassa.

Tuhkan käsittelymaksu määritetään tuhkatonna kohti, joten käsittelyn aiheuttamat kustannukset saadaan tuhkan massavirran avulla. Rinnakkaispoltossa tässä massavirrassa on mukana lietteen tuhkan lisäksi rinnakkaispolttoaineen tuhka. Laskennassa oletetaan, että kaikki lietteen ja rinnakkaispolttoaineen sisältämä tuhka menee käsiteltäväksi.

Laitoksen vuotuiset käyttökustannukset sisältävät mm. huollot, korjaukset, vakuutukset ja mahdollisen käyttöhenkilökunnan palkat. Ne määritetään osuutena investointikustannuksesta.

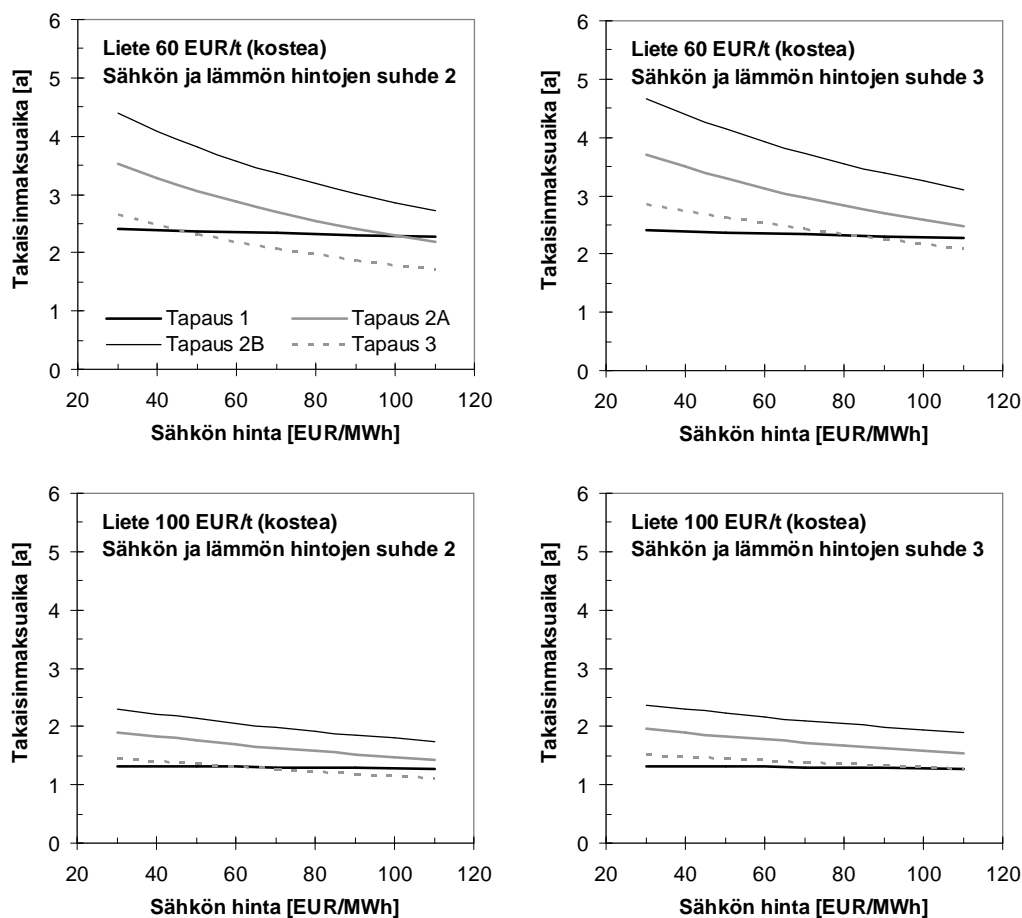
Jos laitoksen investointikustannus tunnetaan, investoinnin kannattavuutta voidaan tarkastella esimerkiksi takaisinmaksuajan, investoinnin nykyarvon tai sisäisen korkokannan avulla. Tässä tarkastelussa käytetään takaisinmaksuaikaa. Se määritetään edellä mainittujen vuotuisten kustannustekijöiden, nykyhetkellä tapahtuvan investoinnin sekä korkokannan perusteella.

Mikäli laitoksen investointikustannusta ei tunneta, talousmallinnuksesta voidaan silti saada merkittävää tietoa, kun määritetään suurin sallittu investointikustannus, jolloin investointi on vielä kannattava. Tämä saadaan edellä mainittujen kustannustekijöiden avulla asettamalla investoinnin nykyarvo nolllaksi. Laskennassa käytetään jaksollisten suoritusten nykyarvotekijää, joka riippuu korkokannasta ja takaisinmaksuajasta (pitoajasta).

Taloudellinen mallinnus sisältää tekijöitä, joiden käyttäytymistä ajan suhteen on mahdoton ennustaa, esimerkkinä lietteen vastaanottomaksu ja sähkön hinta. Lisäksi joidenkin tekijöiden arvo riippuu valitusta sovelluskohteesta ja arvostusperusteista. Sen sijaan, että tarkasteltaisiin laitosvaihtoehtojen kannattavuutta kiinteästi valituilla lähtöarvoilla, tarkastelussa käytetään yleispätevämpää parametrisoitua esitystapaa: tutkitaan sähkön hinnan vaikutusta takaisinmaksu aikaan käyttäen kahta lietteen vastaanottomaksua sekä kahta sähkön ja lämmön hintojen suhdetta. Taulukossa 7-4 on esitetty talousmallinnuksessa käytetyt lähtöarvot ja kuvassa 7-1 mallinnustulokset.

Taulukko 7-4. Talousmallinnuksen lähtöarvot.

Sähkön ja lämmön hintojen suhde	-	2 ja 3
Lietteen vastaanottomaksu, kun kuiva-ainepitoisuus on 20 m-%	[€t (kostea)]	60 ja 100
Tuhkan käsittelymaksu	[€t]	100
Metsätähdehakkeen hinta	[€MWh]	11.1
Vuotuisten käyttö- ja kunnossapitokustannusten osuus investoinnista	[%]	6
Korkokanta	[%]	5

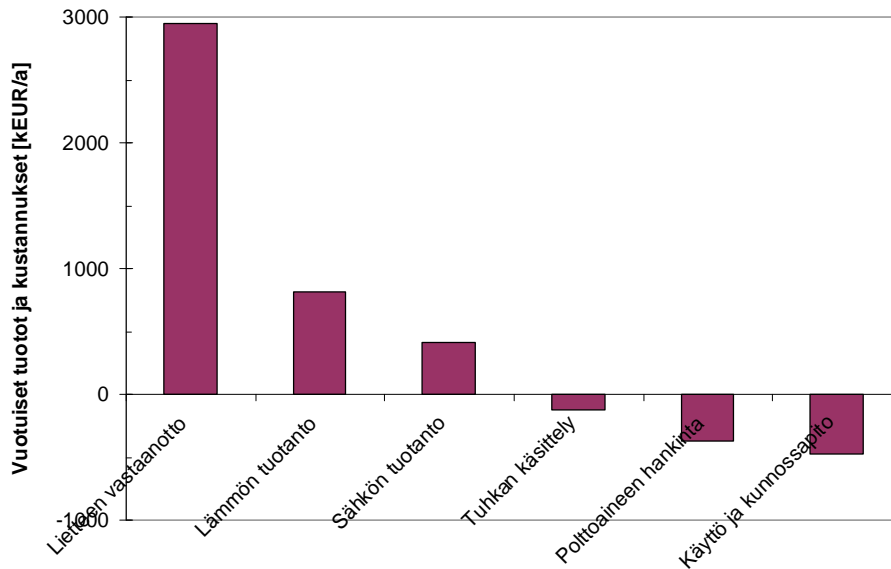


KUVA 7-1. LAITOSVAIHTOEHTOJEN TAKAISINMAKSUAJAN RIIPPUVUUS SÄHKÖN HINNASTA, LIETTEEN VASTAANOTTO-MAKSUSTA SEKÄ SÄHKÖN JA LÄMMÖN HINTOJEN SUHTEESTA. LIETTEEN VASTAANOTTOMAKSU ON ILMOITETTU REFERENSSIKUIVA-AINEPITOISUUDELLE 20 M-%.

Sähkön ja lämmön hintojen nousu parantaa kaikkien tarkasteltujen vaihtoehtojen kannattavuutta, mikä ilmenee takaisinmaksuajan lyhentymisenä. Pelkkää sähköä tuottavan PAKU-laitoksen (1) tapauksessa vaikutus on muita huomattavasti vähäisempi. Lietteen vastaanottomaksun nousu parantaa myös kannattavuutta. Samalla sähkön ja lämmön hinnan vaikutus kannattavuuteen vähenee.

Tarkastellussa lähtöarvojen vaihtelualueessa lämpölaitosvaihtoehto (3) on aina muita rinnakkaispolttovaihtoehtoja (2A ja 2B) kannattavampi. Kaukolämpöä tuottavan PAKU-laitoksen (2A) kannattavuus on pelletin raaka-ainetta kuivaavaa vaihtoehtoa (2B) parempi, jos kummallakin tavalla tuotettu lämpö on keskenään samanarvoista. Tämä johtuu kaukolämpölaitoksen pienemmästä investointikustannuksesta. Käytetyistä lähtöarvoista riippuen lyhin takaisinmaksuaika on pelkkää sähköä tuottavalla PAKU-laitoksella tai lämpölaitoksella.

Käytetyillä lähtöarvoilla PAKU-laitoksen suurimmat tuotot saadaan lietteen vastaanotosta. Tätä on havainnollistettu kuvassa 7-2, jossa on esitetty vaihtoehdon 2A vuotuiset tuotot ja kustannukset. Esimerkissä lietteen vastaanottomaksuna on käytetty arvoa 60 €/t (kostea liete) sekä sähkön ja lämmön hintoina 70 ja 35 €/MWh. Lietteen vastaanottoon verrattuna sähköstä ja lämmöstä saatavat tuotot jäävät huomattavasti pienemmiksi. Eniten kustannuksia aiheutuu käytöstä ja kunnossapidosta sekä rinnakkaispolttoaineen hankinnasta. Edellä mainittuihin tekijöihin verrattuna tuhkan käsittely aiheuttaa vain hyvin vähäiset kustannukset.



KUVA 7-2. LIETETTÄ JA BIOPOLTTOAINETTA POLTTAVAN JA SÄHKÖÄ SEKÄ KAUKOLÄMPÖÄ TUOTTAVAN PAKU-LAITOKSEN (TAPAUS 2A) VUOTUISET TUOTOT JA KUSTANNUKSET.

7.4 Laitosesimerkit

PAKU-laitoksen sijoittumista Kymenlaaksoon ja Etelä-Karjalaan tarkastellaan esimerkkitapausten avulla (Manninen 2007). Kummassakin kohteessa tutkitaan kahta käsiteltävää lietemäärää ja kahta laitosvaihtoehtoa, jossa ylimääräinen lämpö käytetään joko kaukolämmitykseen (tapaus 2A) tai pelletin raaka-aineen kuivaamiseen (2B). Lietteen lisäksi käytetään paikallisesti saatavilla olevia rinnakkaispolttoaineita.

Kymenlaakson tapauksessa PAKU-laitoksen aiottu sijaintipaikka on Anjalankosken Ekopark. Ensimmäisessä vaihtoehdossa laitoksessa poltetaan pohjoisen Kymenlaakson alueelta (Kouvola, Elimäki, Iitti ja osa Valkealaa) kertyvä yhdyskuntaliete, jonka määrä on 6000 t/a. Toisessa vaihtoehdossa poltetaan koko Kymenlaakson alueelta (edellisten lisäksi Kotka, Hamina ja Anjalankoski) kertyvä määrä 28000 t/a.

Etelä-Karjalan tapauksessa sijaintipaikkana on ensimmäisessä vaihtoehdossa Lappeenrannan Toikansuon puhdistamo, jolloin laitoksessa poltetaan puhdistamolla syntyvä liete 10000 t/a. Toisessa vaihtoehdossa laitos sijaitsee Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy:n alueella Joutsenossa, ja laitoksessa poltetaan kaikki E-KJH:lle tuotava, Etelä-Karjalan alueelta (Lappeenranta, Imatra ja Joutseno) kertyvä yhdyskuntaliete. Tämän määrä on 14700 t/h. Kaikissa vaihtoehdoissa laskennan perustana on laitoksen vuotuinen käyttöaika 8000 h.

Laitosten kokoluokka (tässä tapauksessa turbogeneraattorista saatava sähköteho) on valittu samaksi kuin luvun 3 vaihtoehdoissa 2A ja 2B. Luvusta 3 poiketen lietteen kuiva-ainepitoisuudeksi on valittu yhdyskuntalietteen keskimääräinen arvo 20 m-%. Myös lietteen ominaisuudet poikkeavat luvussa 3 esitetystä, käytetty koostumus ja lämpöarvo on esitetty taulukossa 7-4 (Alakangas 2000).

Rinnakkaispolttoaineina käytetään halvimpia mahdollisia polttoaineita ottaen huomioon niiden alueellinen saatavuus. Kymenlaaksossa rinnakkaispolttoaineena käytetään ensisijaisesti yrityksistä erilliskerättyä ja Ekoparkissa valmistettua kierrätyspolttoainetta (REF), jonka maksimimäärä on 5700 t/a ja hinta 4.0 €/MWh. Tämän lisäksi käytetään tarvittaessa ruokohelpeä (hinta 8.5 €/MWh), jota voidaan tuottaa Kymenlaakson alueella nykyisellä viljelypinta-alalla enimmillään 5200 t/a. PAKU-laitoksessa käytettäväksi maksimimääräksi on valittu tämän perusteella 3500 t/a. Kolmantena rinnakkaispolttoaineena käytetään tarvittaessa metsätähdehakea (hinta 11.1 €/MWh), jolla ei ole saatavuusrajoituksia tarkastellussa kokoluokassa.

Etelä-Karjalassa ensisijaisena rinnakkaispolttoaineena käytetään Kymenlaakson tavoin yrityksistä erilliskerättyä kierrätyspolttoainetta. Alueella tuotettu kokonaismäärä on 14000 t/a, josta PAKU-laitoksessa käytettäväksi maksimimääräksi on valittu 10000 t/a. Kierrätyspolttoaineen lisäksi käytetään tarvittaessa jyrshinturvetta (hinta 8.3 €/MWh), jonka saatavuudessa ei ole rajoituksia PAKU-laitoksen kokoluokassa. Rinnakkaispolttoaineiden ominaisuudet on esitetty lietteen ohella taulukossa 7-5 (Alakangas 2000).

Taulukko 7-5. Laitosesimerkkien laskennassa käytetyt lietteen ja rinnakkaispolttoaineiden ominaisuudet.

		Liete	Metsätähdehake	REF	Ruokohelpi	Jyrshinturve
Kosteus	[m-%]	80.0	50.0	28.5	20.0	50.0
Kuiva-aineen alkuainekoostumus						
C	[m-%]	33.6	51.3	52.9	46.0	54.5
H	[m-%]	5.0	6.1	7.3	5.5	5.58
N	[m-%]	4.9	0.4	0.71	0.9	2.01
O	[m-%]	30.3	40.68	29.46	41.3	32.6
S	[m-%]	1.2	0.02	0.13	0.1	0.19
Tuhka	[m-%]	25.0	1.5	9.5	6.2	5.12
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]	17.3	19.25	20.95	17.3	20.9

Prosessimallinnuksen lähtöarvot ovat taulukossa 3-2 esitettyjen vaihtoehtojen 2A ja 2B mukaiset, poikkeuksena edellä mainittu kuivuriin saapuvan lietteen kuiva-ainepitoisuus (20 m-%) sekä laitosten omakäyttötehot. Lietteiden ja rinnakkaispolttoaineiden määristä ja ominaisuuksista johtuen lämpötehon jakautuminen lietteen kuivaukseen ja muuhun käyttöön (kaukolämmitys / pelletin raaka-aineen kuivaaminen) poikkeaa luvun 3 tapauksiin verrattuna, samoin polttoaineiden käsittelylaitteiden tehontarpeet. Tämän seurauksena omakäyttötehot muuttuvat. Taulukossa 7-6 on esitetty laskennassa käytetyt liete- ja polttoainemäärät, omakäyttötehot sekä tuloksena saadut suoritusarvot.

Taulukko 7-6. Laitosesimerkkien liete- ja polttoainemäärät, omakäyttötehot sekä suoritusarvot.

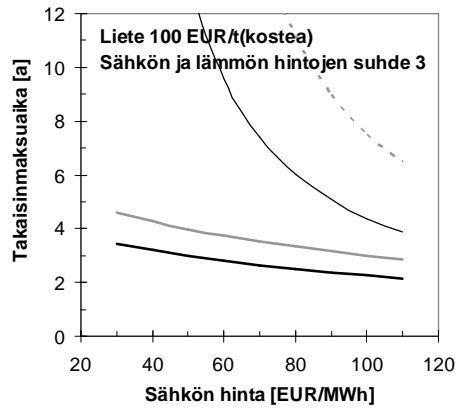
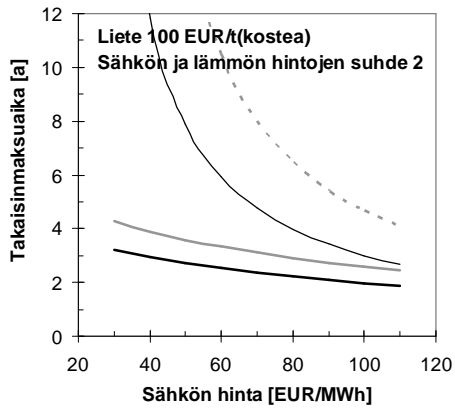
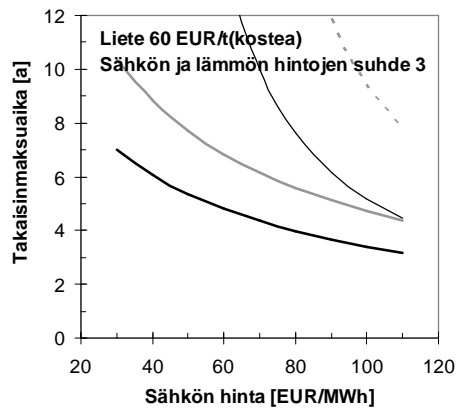
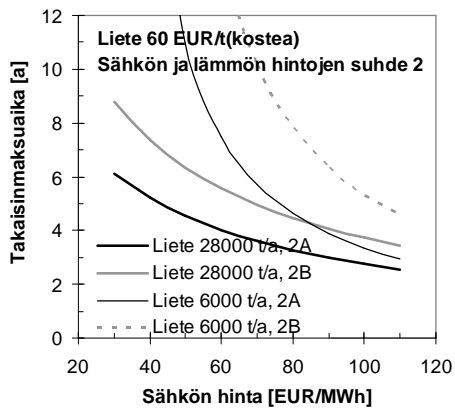
		Kymenlaakso				Etelä-Karjala			
		Liete 6000 t/a		Liete 28000 t/a		Liete 10000 t/a		Liete 14700 t/a	
		2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
Liete- ja polttoainemassavirrat									
Liete	[kg/s]	0.21		0.97		0.35		0.51	
REF	[kg/s]	0.20		0.20		0.35		0.35	
Ruokohelpi	[kg/s]	0.12		0.12		-		-	
Metsätähdehake	[kg/s]	0.37		0.06		-		-	
Jyrsinturve	[kg/s]	-		-		0.23		0.17	
Omakäyttötehot	[kW]	205	432	262	423	215	430	227	428
Suorituskyky									
Nettosähköteho	[kW]	826	599	769	608	816	601	804	603
Kaukolämpöteho	[kW]	5472	-	3870	-	5181	-	4839	-
Kuivatun pellettiraaka- aineen määrä	[t/a]	-	62160	-	43960	-	58850	-	54960
Sähköntuottohyötysuhde	[%]	10.5	7.6	12.1	9.5	10.8	7.9	11.1	8.3

Muutokset tehojen jakautumisessa vaikuttavat myös vastaavien laitteiden kokoon ja siten investointikustannuksiin. Tämä on otettu huomioon ns. kapasiteettiekspONENTTIMENETELMÄN (Kymäläinen 2001) avulla olettamalla laitteiden hinnat verrannollisiksi niiden kapasiteettiin korotettuna potenssiin 0.7. Tuloksena saadut investointikustannukset on esitetty taulukossa 7-7.

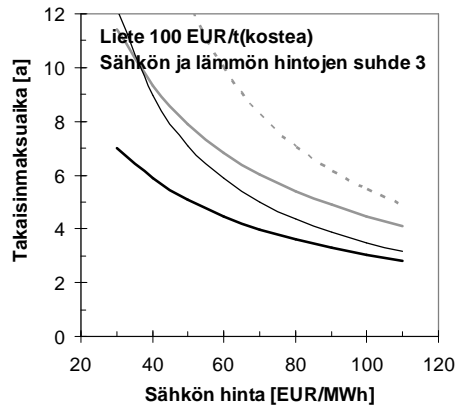
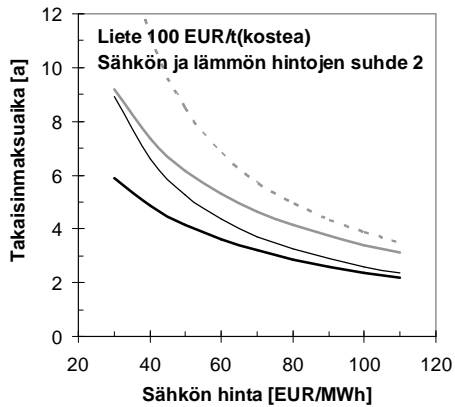
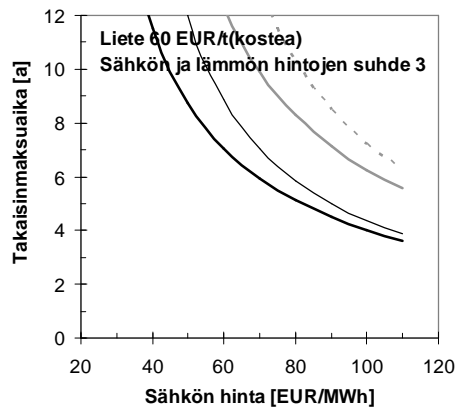
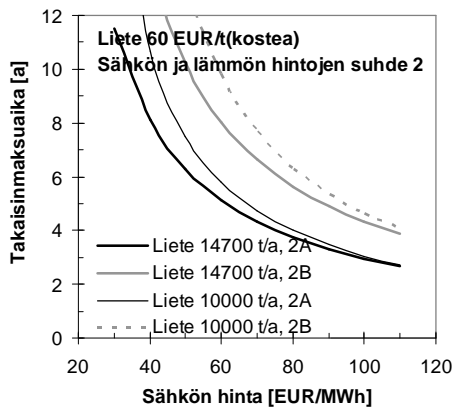
Taulukko 7-7. Laitosesimerkkien investointikustannukset.

		Kymenlaakso				Etelä-Karjala			
		Liete 6000 t/a		Liete 28000 t/a		Liete 10000 t/a		Liete 14700 t/a	
		2A	2B	2A	2B	2A	2B	2A	2B
Investointikustannus	[M€]	6.7	8.8	7.4	9.1	6.9	8.9	7.0	9.0

Talouksmallinnuksen muut lähtöarvot ovat samat kuin taulukossa 7-3. Laskennan tulokset on esitetty Kymenlaakson osalta kuvassa 7-3 ja Etelä-Karjalan osalta kuvassa 7-4.



KUVA 7-3. KYMENLAAKSON LAITOSSESIMERKKIEN TAKAISINMAKSUAJAN RIIPPUVUUS SÄHKÖN HINNASTA, LIETTEEN VASTAANOTTOMAKSUSTA SEKÄ SÄHKÖN JA LÄMMÖN HINTOJEN SUHTEESTA.



KUVA 7-4. ETELÄ-KARJALAN LAITOSSESIMERKKIEN TAKAISINMAKSUAJAN RIIPPUVUUS SÄHKÖN HINNASTA, LIETTEEN VASTAANOTTOMAKSUSTA SEKÄ SÄHKÖN JA LÄMMÖN HINTOJEN SUHTEESTA.

Käytetyllä lietemäärällä on suuri vaikutus laitoksen kannattavuuteen, sillä määrän pienentyessä lietteen vastaanotosta saatavat tuotot vähenevät samalla kun rinnakkaispolttoaineiden tarve ja hankintakustannukset kasvavat. Vaikutus on korostunut Kymenlaakson tapauksessa, jossa tarkasteltujen lietemäärien ero on suuri. Sähkön ja lämmön hintojen nousu pienentää lietemäärän vaikutusta kannattavuuteen. Kuvan 7-1 tavoin sähkön ja lämmön hintojen sekä lietteen vastaanottomaksun nousu parantavat kaikkien laitosesimerkkien kannattavuutta.

7.5 Johtopäätökset

Tässä osatehtävässä on määritetty tutkittujen PAKU-laitosvaihtoehtojen ja lämpölaitosvaihtoehdon investointikustannukset. Lisäksi on tarkasteltu taloudellisten tekijöiden vaikutusta laitosten kannattavuuteen, kun kriteerinä on investoinnin takaisinmaksuaika. Työssä on vertailtu eri sähkö- ja lämpötehoja omaavien laitosten kannattavuuksia toisiinsa. Käytännössä valintaa laitosvaihtoehtojen välillä ei tavallisesti voida kuitenkaan tehdä takaisinmaksuajan perusteella, vaan valinta riippuu sijoituspaikan lähellä käytettävissä olevasta jäähdytystavasta.

Tulokset osoittavat tutkittujen rinnakkaispolttotapausten osalta, että on kannattavampaa polttaa liete ja rinnakkaispolttoaine lämpöä tuottavassa lämpölaitoksessa kuin sähköä ja lämpöä tuottavassa PAKU-laitoksessa. Tämä johtuu sähköntuotantoon tarvittavan höyryprosessin kalleudesta. On kuitenkin huomattava, että käytetty mallinustapa ei ota huomioon PAKU-konseptin mukanaan tuomaan pienen kokoluokan sähkön- ja lämmön yhteistuotannon tai pelkän sähkön tuotannon liiketoimintapotentiaalia. Pelkkää lietettä polttava ja sähköä tuottava PAKU-laitos on pääsääntöisesti kannattavampi kuin sähköä ja lämpöä tuottavat PAKU-vaihtoehdot, ja jopa kannattavampi kuin lämpölaitosvaihtoehto, kun sähkön ja lämmön arvo on riittävän pieni.

Käytetyillä hinnoilla ja rinnakkaispolttoainemäärillä suurin osa PAKU-laitoksen vuotuisista tuotoista saadaan lietteen vastaanotosta ja vähäisempi määrä sähkön ja lämmön tuotannosta. Eniten kustannuksia aiheutuu käytöstä ja kunnossapidosta sekä rinnakkaispolttoaineen hankinnasta. Näihin verrattuna tuhkan käsittelyn kustannukset ovat hyvin pienet.

Sähköä ja lämpöä tuottavan PAKU-laitoksen kannattavuutta on tutkittu kahden esimerkkitapauksen avulla, joista toinen sijaitsee Kymenlaaksossa ja toinen Etelä-Karjalassa. Kummassakin kohteessa tarkastelussa on käytetty kahta vaihtoehtoista lietemäärää ja loppuosa tarvittavasta polttoainetehosta on tuotettu rinnakkaispolttoaineilla. Lietemäärä vaikuttaa merkittävästi laitosten kannattavuuteen, samoin lietteen vastaanottomaksu. Kun kummassakin kohteessa lietemääränä käytetään suurempaa vaihtoehtoa, vastaanottomaksun ollessa 60 €/t (kosteaa) PAKU-laitoksella tuotetun sähkön ja lämmön arvo on oltava melko suuri, jotta laitoksen takaisinmaksuaika ei muodostu liian pitkäksi varsinkin pelletin raaka-ainetta kuivaavan vaihtoehdon tapauksessa. Toisaalta vastaanottomaksun ollessa 100 €/t (kosteaa) voidaan päästä alle viiden vuoden takaisinmaksuajoihin sovelluskohteesta riippuen jo varsin alhaisilla energiahinnoilla.

Määritettäessä laitosvaihtoehdoille investointikustannuksia mukana ei ole ollut aivan kaikkia todellisissa laitoksissa tarvittavia komponentteja. Toisaalta yrityksiltä saadut tarjoukset eivät todennäköisesti ole olleet kaikkein edullisimpia. Nämä seikat kompensoivat ainakin osittain toisiaan. Kaikissa laitoksissa on käytetty kiertoileijutekniikkaa sekä lietteen kuivaamiseen että polttoon. Rinnakkaispolttotapauksissa voitaisiin soveltaa esimerkiksi arinapolttoa omakäyttötehon ja investointikustannusten pienentämiseksi. Lämpölaitosvaihtoehdossa voitaisiin käyttää lisäksi mahdollisuuksien

mukaan valmista kuumavesikattilaa, mikä todennäköisesti pienentäisi laitosvaihtoehdon kustannuksia edelleen. Kaikki määritetyt hinnat koskevat yksittäistä laitosta, pienimuotoisessa sarjatuotannossa laitosten hintojen voi olettaa alenevan merkittävästi.

Osatehtävän tuloksena on saatu tietoa PAKU-laitoksen toteutettavuudesta ja kilpailukykyyn vaikuttavista tekijöistä valitussa liiketoimintaympäristössä. Tarkastelun lähtökohtana on ollut laitokselle valittu tekninen toteutustapa ja tälle määritetty kustannus. Mahdollisten jatkotarkastelujen yhteydessä on pyrittävä edelleen täsmentämään laitoksen kustannuksia. Samalla laitoksen hintatasoa on pyrittävä saamaan alhaisemmaksi esimerkiksi vaihtoehtoisten laiteratkaisujen ja kilpailutuksen avulla. Osatehtävän tulokset luovat perustan jatkotarkasteluille, joissa sekä laitoksen teknistä toteutusta että liiketoiminnan reunaehdoja voidaan muuttaa. Yksi tällainen potentiaalinen tutkimusaihe on lietteenkäsittelyn yhdistäminen tavanomaisiin biopolttoainelaitoksiin.

Lähteet

- Anttila Juho 2008. Lietettä polttoaineenaan käyttävän pienen kokoluokan lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksen investointikustannus. Kandidaatintyö. LTY, energiatekniikan koulutusohjelma. 37 s.
- Kakko Katja 2007. Yhdyskuntalietteen käsittely ennen termistä kuivausta ja polttoa. Diplomityö. LTY, ympäristötekniikan koulutusohjelma. 122 s.
- Manninen Hanna-Mari 2007. Yhdyskuntalietteen ja biopolttoaineiden käsittelyketjujen ja polton teknis-taloudellinen tarkastelu. Diplomityö. LTY, ympäristötekniikan koulutusohjelma. 134 s.
- Alakangas Eija 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT tiedotteita 2045. ISBN 951-38-5699-2. 172 s.
- Kymäläinen Jari 2001. Voimalaitosten investointi- ja energiantuotantokustannusten arviointi. Diplomityö. LTKK, energiatekniikan osasto. 95 s.

8 LIKETOIMINTAKONSEPTIN KEHITTÄMINEN

8.1 Johdanto

Teknologian kehittäminen ja uusien ideoiden synnyttäminen ovat alkusysäyksiä uusille innovaatioille. Innovaation syntyyn tarvitaan kuitenkin muutakin kuin teknisten ratkaisujen keksiminen ja toteuttaminen: teknologia on kaupallistettava, sille on löydettävä markkinat. Liiketoiminnan perustana ovat asiakkaat ja asiakkaiden tarpeiden tyydyttäminen. Liiketoiminnan olemassaolon ydin on kannattavuudessa ja kassavirrassa, jota puolestaan ei ole ilman asiakasta. Tämä yksinkertainen logiikka kertoo asiakkaiden tarpeiden huomioimisen tärkeydestä. Asiakkaat liittyvät oleellisesti yrityksen arvoketjuun ja arvонуontiin. Samalla arvонуontiin liittyy myös mahdollisuus ansaintaan. Näiden kahden samanaikaisesta toteutumisesta muodostuvat liiketoimintakonseptin kulmakivet.

8.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän PAKU- projektiin liittyvän liiketoiminnallisen tutkimuksen tavoitteena on ollut liiketoimintakonseptin laatiminen hajautetun energiantuotannon modulaariselle yhdyskunnan sivuainevirtoja hyödyntävälle CHP- laitokselle. Liiketoiminnan kehittämisen lähtökohtana ovat olleet projektin kuluessa tehdyt muut aiheeseen liittyvät tutkimukset. Uuden liiketoiminnan edellytyksiä arvioitaessa ja suunniteltaessa on tarkasteltava laajemmin ympäröivää markkinatilannetta ja ympäröivää yhteiskuntaan sekä siihen liittyviä ilmiöitä.

Liiketoimintakonseptin laatiminen edellyttää laajempaa taustatietojen ja vaikuttimien löytämistä. Tavoitteisiin pääsemiseksi on ollut aiheellista määritellä pienempiä osatavoitteita, joiden avulla voidaan kuvailla tutkimusongelmaa ja kokonaistavoitetta. Tutkimuksessa pyrittiin löytämään vastauksia seuraaviin kysymyksiin.

- Millaisia ovat tulevaisuuden trendit? Mitkä seikat vaikuttavat tulevaisuuden energiamarkkinoihin ja jäteveden ja yhdyskuntalietteen käsittelyyn?
- Millaisia resursseja ja kyvykkyyksiä tarvitaan PAKU- liiketoimintaan liittyen? Onko tarvittavia resursseja olemassa?
- Millainen on PAKU- laitoksen liittyvä arvoketju? Mitä asiakkaille voidaan tarjota, millainen on tarjooma?
- Millainen on yrityksen ansaintalogiikka? Miten liiketoiminnasta saadaan kannattavaa?

8.3 Tutkimusmenetelmät ja käytetyt aineistot

Liiketoimintatutkimus kuuluu oleellisena osana PAKU- projektin etenemiseen. Tämän tutkimusosuuden alkaessa projektissa oli tehty jo runsaasti tutkimusta liittyen sähkötekniisiin, tuhkan käsitteilyyn ja hyödyntämiseen ja erilaisten polttoainevalintojen käyttämiseen sekä lietteen käsittelyyn ennen termistä kuivausta. Tässä tutkimusosuudessa on siten otettu annettuina laitokseen liittyvät tekniset ratkaisut ja vielä avoinna olevat erilaiset vaihtoehdot laitoskokonaisuuden toteuttamisesta. Eri vaihtoehdoilla tarkoitetaan lähinnä laitoksen polttoainevalintaa: liete vai rinnakkaispoltto muun biopolttoaineen kanssa, lämmön- tai sähköntuotanto tai yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto.

Tutkimus pohjautuu erilaisten liiketoimintamallien- ja konseptien teoreettiseen tarkasteluun. Työssä on käytetty lähteenä aiheeseen liittyviä kansainvälisiä artikkeleja sekä PAKU- hankkeessa mukana olleiden yritysten edustajien haastatteluja. Artikkelit käsittelevät suurelta osalta liiketoimintamalleja teoreettisesta näkökulmasta tai niiden sovellukset liittyvät johonkin toiseen toimialaan, usein tietotekniikkaan ja ohjelmistotuotantoon. Suoranaisesti PAKU- hankkeen toimialaan liittyvää liiketoimintamallia ei ole ollut käytettävissä, vaikka muuten erilaisia hajautettuun energiantuotantoon liittyviä tutkimushankkeita onkin runsaasti meneillään.

8.4 Tutkimuksen rajaukset

Liiketoimintatutkimuksen tässä vaiheessa markkinatilanteen tarkastelu on rajattu yleiselle tasolle. Markkinoiden kehittymisen taustalla olevia tekijöitä on tarkasteltu liiketoimintaympäristöön liittyvistä näkökohdista käsin, mutta tarkempaa esimerkiksi maakohtaista segmentointia ei ole liitetty tutkimukseen. Potentiaalisista tulevaisuuden markkinoista liittyen hajautettuun energiantuotantoon on tehty tutkimusta sekä DENSY:n esiselvitysraportissa (Frost & Sullivan 2002) että Lappeenrannan teknisen yliopiston TBRC- yksikön kokoamassa raportissa. Näiden raporttien näkemyksiä on käytetty hyväksi tässä tutkimuksessa, vaikka maakohtainen segmentointi on jätetty tutkimuksen seuraavaan vaiheeseen.

Vaikka liiketoimintamallin ja liiketoimintakonseptin teoreettista määritelmää ja sisältöä on tarkemmin selitetty seuraavassa kappaleessa, on tässä kohdassa hyvä esittää sen sisältö ja rajaukset. Liiketoimintatutkimuksen kohteena on siis malli tai konsepti, ei suunnitelma. Liiketoimintasuunnitelma kuvaisi tarkemmin liiketoiminnan operatiivista puolta vastaten muun muassa markkinoita, kilpailua ja markkinoinnin kilpailukeinoja koskeviin kysymyksiin. Konsepti puolestaan kuvaa valintoja, joiden avulla luodaan arvoa asiakkaille ja määrittellään yrityksen ansaintalogiikka.

8.5 Teoreettinen viitekehys

Liiketoimintatutkimuksen teoreettisena viitekehysenä on liiketoimintamallien sisältö, kehittyminen ja käyttötarkoitus yrityksen liiketoiminnan määrittelyssä. Liiketoimintamalleja ja – konsepteja käsittelevä tutkimus on yleistynyt vasta 1990- luvulla, vaikka termi onkin ollut käytössä jo paljon aikaisemmin (Osterwalder et al. 2005). Liiketoimintakonseptin sisällöstä esitetään monia erilaisia näkemyksiä, mutta poikkeavuuksista huolimatta yhteisenä piirteenä on ajatus, että liiketoimintakonsepti kuvaa liiketoiminnan ydintä (Sainio 2005).

8.6 Liiketoimintakonsepti ja -malli: käsitteiden määrittelyä

Liiketoimintakonseptilla tai – mallilla on kirjallisuudessa useita määritelmiä ja hieman toisistaan poikkeavia sisältöjä. Ensinnäkin on huomioitava, miten käsitteet konsepti ja malli eroavat toisistaan vai eroavatko? Hamelin (2001) mukaan käsitteiden ero on lähinnä niiden toteutumisessa, ei niinkään sisällössä. Konseptilla tarkoitetaan suunnitelmaa, jota ei vielä ole kokeiltu käytännössä, kun taas mallia on jo sovellettu ja kokeiltu todellisissa olosuhteissa. Tämän ajatuksen pohjalta voidaan siis sanoa, että kaikki liiketoimintamallit ovat konsepteja ennen kuin niitä on sovellettu käytäntöön.

Kirjallisuudessa termien esiintyminen liittyy ehkä enemmän kunkin tutkijan käsitykseen asiasta ja termejä käytetään rinnakkain. Myös tässä työssä termejä liiketoimintakonsepti ja liiketoimintamalli käytetään tarkoittamaan samaa liiketoiminnallista asiakokonaisuutta.

Mallin ja konseptin ero eivät vielä kuvasta terminologian vaikeutta. Sen sijaan käsitykset sisällöstä, mitä liiketoimintamallilla tarkoitetaan, mitä siihen kuuluu, mihin sitä käytetään, tuovat asiaan huomattavasti enemmän haastavuutta. Osterwalder, Pigneur ja Tucci (2005) ovat tutkineet liiketoimintamallien alkuperää ja kehitystä sekä eri mallien välillä löydettäviä yhtäläisyyksiä. Heidän mukaansa eri tutkijoiden näkemykset poikkeavat toisistaan ja muiden tutkijoiden tulosten hyödyntäminen on vaillinaista, vaikka tiettyä yhdensuuntaisuutta tuloksissa ja mallien kehittämisessä voidaankin havaita.

Käsitykset liiketoimintamallin ja strategian yhteydestä ja suhteesta poikkeavat selvästi eri kirjoittajien teksteissä. Liiketoimintamallin liittäminen termiin ”mallintaminen” viittaa sen yhteyteen liiketoimintaprosessien mallintamiseen (Osterwalder et al. 2005, Sainio 2005). Magretta (2002) esittää, että liiketoimintamallit kuvaavat yrityksen toimintaa, eri osien toimintoja ja yhteyttä toisiinsa. Hänen mukaansa malleista kuitenkin puuttuu yksi ulottuvuus eli kilpailu, joka kuuluu strategiaan. Liiketoimintamallien liittäminen tiiviisti strategiaan on tapahtunut viimeisten vuosien aikana. Uusimmissa malleissa strategia on osana liiketoimintamallia tai -konseptia (Hamel 2001) tai liiketoimintakonsepti nähdään yhdeksi strategian elementiksi (MET 2003). Liiketoimintamallia voidaan myös määritellä ajatuksella, ”miten yritys tekee rahaa” eli millainen on yrityksen ansaintalogiikka (Sainion 2005 mukaan Rappa 2000).

8.7 Liiketoimintamallit yrityksen innovatiivisuuden perustana

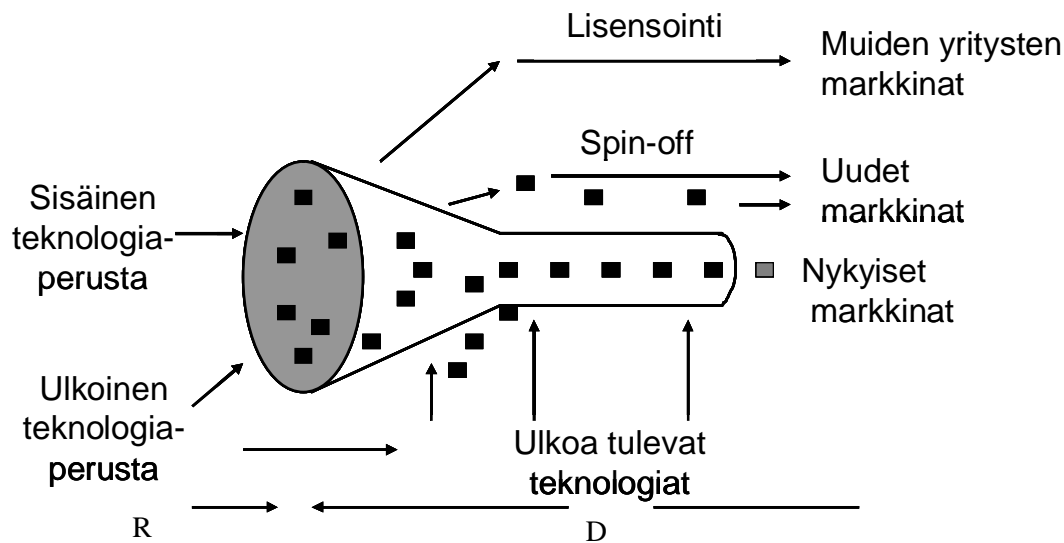
Liiketoimintamalleille on ominaista niiden muutostarve. Liiketoimintaympäristön yhä nopeutuva muuttuminen asettaa yrityksille kasvavia paineita muutokseen ja kehittymiseen. Tässä kehityspaineessa myös liiketoimintamalleja on kehitettävä. Ne eivät ole staattisia, ikuisesti samanlaisina pysyviä malleja. Yritykset voivat toisaalta pitää tiukastikin kiinni malleistaan, mutta niiden toimivuus ja kannattavuus yleensä heikkenevät ajan kuluessa.

8.7.1 Liiketoimintamallin ajatuksena avoin innovaatio

Chesbrough (2007) tuo esiin liiketoimintaympäristössä tapahtuneet muutokset ja sen myötä liiketoimintamallien kasvaneen merkityksen. Yritysten tuotekehityskustannukset ovat kasvaneet voimakkaasti ja toisaalta tuotteiden elinkaaret ovat lyhentyneet. Nämä seikat asettavat suuria haasteita kannattavuudelle ja erityisesti kannattavuuden ylläpitämiselle. Tuotteiden, ideoiden ja teknologian kehittäminen eivät siis enää yksinään riitä liiketoiminnan kannattavuuden takaamiseksi vaan apua on haettava liiketoimintamallien uudistamisesta.

Liiketoiminnan kehittäminen pelkästään yksittäisen yrityksen omien voimavarojen perusteella ei enää välttämättä anna sille tarvittavaa strategista toimintakykyä. Avoimen innovaation ajatuksena onkin katsoa yrityksen rajojen ulkopuolelle ja luoda avoimia liiketoimintamalleja, joissa useiden toimijoiden osaamista voidaan hyödyntää. Kuvassa 8-1 on kuvattu, miten osaaminen ja ideat voivat tulla joko sisäisistä tai ulkoisista lähteistä ja prosessin eri vaiheissa. Innovaatiomalli ei ole enää suoraviivainen omaan tutkimukseen perustuva ja yrityksen olemassa oleville markkinoille päätyvä jatkumo. Avoimen innovaatio ajatuksena on paitsi hyödyntää useista eri lähteistä tulevaa osaamista

myös löytää uusia markkinoita. Avoimen strategian tavoitteena on tasapainottaa arvonluontia ja ansaintalogiikkaa. (Chesbrough et al. 2006, Chesbrough & Appleyard 2007)



KUVA 8-1. AVOIMEN INNOVAATION PARADIGMA (Chesbrough et al. 2006, 3)

Avoimen innovaation ajatukseen pohjautuvan liiketoimintamallin perustana ovat yleiset liiketoimintamallin peruselementit eli arvonluonti ja ansaintalogiikka. Mallin tehtävät voidaan liittää ajatukseen, että hyvä liiketoimintamalli usein voittaa hyvän idean tai teknologian. Mallin osatekijät voidaan jakaa seuraavasti:

- Arvon luonti asiakkaalle: tarjooma
- Kohdemarkkinat
- Arvoketju: tarvittava rakenne, jotta tarjooma voidaan luoda ja toteuttaa, tarvittavat resurssit
- Tuottomekanismi: kustannusrakenteen ja voittopotentialin arviointi tarjooman ja arvoketjun pohjalta
- Arververkosto (tai ekosysteemi)
- Kilpailustrategia (Chesbrough 2007)

Edellä esitetyt liiketoimintamallin osakomponentit ovat apuvälineitä ja niiden avulla on mahdollista ohjata liiketoimintasuunnitelman kehittymistä kohti avoimuutta. Yritysten malleissa on usein kuitenkin muitakin parannettavaa, sillä eri yritysten mallit samalla toimialalla ovat usein hyvin samankaltaisia eikä differoitumista mallin avulla esiinny. Liiketoimintamallin kehittäminen yrityksessä voisikin tapahtua erilaistuneeseen ja useisiin segmentteihin keskittyneeseen suuntaan. Chesbrough (2007) esittää kuusi erilaista kehitystapaa yrityksen kyvystä hyödyntää liiketoimintamalleja. Parhaimmillaan yrityksen liiketoimintamalli olisi avoin ja sopeutuva sisältäen erilaisia mallivariaatioita esimerkiksi yhteisyhtyrityksiä (join venture) ja oheisyhtyrityksiä (spin-off).

Avoimen innovaation hengenmukaisessa liiketoimintamallissa toimittajat ja asiakkaat nähdään partnereina, liiketoimintakumppaneina. Liiketoimintasuhte sisältää sekä liiketoimintariskien että teknisten riskien jakamista. Arvoketjussa olevien eri toimijoiden liiketoimintamallit ovat yhteensopivia. Tällaista liiketoimintamallia on yleensä kilpailijoiden vaikea imitoida ja mallin avulla on siten mahdollista saavuttaa kilpailuetua. On kuitenkin huomioitava, että paraskaan malli ei kestä ikuisesti vaan vaatii yritykseltä jatkuvaa parantamista. (Chesbrough 2007).

8.7.2 Vallankumouksellisen uudistumisen edellytykset

Toimialojen kehittyessä yrityksiltä vaaditaan uudistumiskykyä. Asioiden näkeminen ja tekeminen uudella tavalla edellyttävät kykyä päästä eroon vanhasta, mikä saattaa aiheuttaa yrityksissä suuria vaikeuksia. Vanhoista liiketoimintakonsepteista ei osata luopua, vaikka niiden toimivuus olisi selvästi heikentynyt. Uuden näkeminen, visionäärisyysskään ei ole pysyvä olotila: harvat visionääriyritykset itse asiassa selviytyvät ensimmäistä strategiaansa pidemmälle.

Hamelin (2001) mukaan käsitys innovoinnista on usein hyvin tyypistynyt. Puhutaan innovaatioista, vaikka käytännössä keksinnöt, muutokset ja uudistukset ovat vain pieniä tuoteparannuksia. Erilaiset hankkeet, joiden tavoitteena on toimitusketjun yhdentäminen, toiminnanohjauksen parantaminen ja asiakassuhdehallinnan kehittäminen ovat laajentaneet näkemyksiä yli organisaatorajojen ja murta- neet funktiokeskeistä ajattelua. Tällaiset hankkeet eivät kuitenkaan yleensä ole kovin mullistavia. Vaikka liiketoimintaprosessien parantaminen koskettaisi koko järjestelmää, ovat muutokset yleensä kuitenkin melko maltillisia. Uuden aikakauden muutokset haastavat kuitenkin yritykset radikaalimpaan kehittymiseen: muutos on kohdistuttava liiketoimintakonsepteihin. Näitä erilaisia parannusvaihtoja on kuvattu kuvassa 8-2.

Radikaali	Epälineaariset innovaatiot	Innovatiiviset liiketoimintakonseptit
	Jatkuva parantaminen	Liiketoimintaprosessien parantaminen
Pienet askeleet		
	Osatekijä	Järjestelmä

KUVA 8-2. JATKUVAA PARANTAMISTA PIDEMMÄLLE (Hamel 2001)

Hamelin liiketoimintakonseptissa tai – mallissa on neljä peruselementtiä: ydinstrategia, strategiset resurssit, asiakaspinta ja arvoverkosto. Näitä elementtejä yhdistämässä on kolme ”siltaa”, jotka ovat hyöty asiakkaalle, sisäinen koostumus ja yrityksen rajat. Liiketoimintakonseptin kivijalka muodostuu yrityksen ansaintakyvystä, joka puolestaan koostuu tehokkuudesta, ainutlaatuisuudesta, yhteensopivuudesta ja tuloksenteon vauhdittajista. Hamelin esittämä malli tarkastelee liiketoimintaa hyvin laajasti sisältäen strategian määrittelyn tärkeänä komponenttina liiketoimintakonseptissa

8.7.3 Liiketoimintamallien vertailua

Hamelin ja Chesbroughn malleissa voidaan nähdä runsaasti yhtäläisyyksiä. Molempien kantavana ajatuksena on liiketoiminnan kokonaisvaltainen kehittäminen liiketoimintamallien avulla. Pelkät yksittäiset tuoteparannukset, tuoteideat tai teknologiat eivät kehitä yrityksen toimintaa eivätkä takaa kilpailukykyä. Liiketoimintamalleissa tulevat esille hyvin samantapaisesti sellaiset elementit kuin arvoverkostot, strategia, strategiset resurssit ja ansaintalogiikka.

Malleissa voidaan nähdä avoimuuden ja verkostojen merkityksen kasvaminen ja korostuminen nykyaikaisessa liiketoimintaosaamisessa. Tämä perustuu liiketoimintaympäristöjen nopeaan muutokseen ja kilpailun kiristymiseen. Yritykset tarvitsevat toisiaan, toimittajista ja asiakkaista on tullut kumppaneita ja paikka arvoketjussa on enemmän yhteistyötä kuin oman aseman turvaamista.

8.8 Ympäristötekijät liiketoiminnan kannalta

Liiketoimintaympäristön mikrotasolla tarkoitetaan tavallisesti sitä ympäristöä ja toimialaa, jolla yritys toimii ja vaikuttaa. Tällöin yrityksen välitöntä ympäristöä ovat asiakkaat, toimittajat, kilpailijat sekä erilaiset sidosryhmät, kuten rahoittajat, jotka ovat suorassa kosketuksessa yritykseen. Toisaalta liiketoiminta on aina riippuvaista myös laajemmasta vaikuttajakentästä ja erilaisista yhteiskunnan osista ja ilmiöistä. Tällaista laajempaa ympäristöä kutsutaan makrotasoksi.

Erityisesti uutta liiketoimintaa synnyttäessä tarvitaan laajempaa ympäristötekijöiden huomioon ottamista ja arviointia. Yhteiskunnan asenteet, lainsäädäntö, poliittinen ilmapiiri ja päätöksenteko voivat oleellisesti vaikuttaa uusien yritysten ja erityisesti uusien toimialojen syntyyn ja kehitykseen. Ympäristössä olevia liiketoimintaan joko välillisesti tai välittömästi vaikuttavia tekijöitä voidaan tarkastella erilaisten ympäristöanalyysien avulla. Yksi tällainen analyysityökalu on PESTEL-analyysi, joka muodostuu poliittisten, taloudellisten (economic), sosiaalisten, teknologisten, ekologisten ja lainsäädännöllisten tekijöiden vaikutuksista. Tässä yhteydessä on tuotu esiin vain ne seikat, joiden voidaan katsoa lähes suoraan vaikuttavan liiketoiminnan kehittymiseen, kysyntään ja kannattavuuteen tarkasteltaessa ympäristötekijöitä energian tarpeen ja käytön näkökulmasta sekä yhdyskuntalietteen näkökulmasta.

8.8.1 Poliittiset ja taloudelliset tekijät

Tavoitteet uusiutuvien energialähteiden käytön huomattavalle lisäämiselle tukevat hajautetun energiantuotannon mahdollisuuksia. Energiantuotannossa on perinteisesti keskitytty huomattavasti suuremman mittaluokan laitoksiin, mutta uusiutuvien energialähteiden käyttö on tuomassa lähellä tuotetun ja jalostetun energian merkittäväksi vaihtoehdoksi.

EU on esittänyt tavoitteeksi, että vuonna 2020 uusiutuvan energian osuus kokonaisenergian kuluksista olisi 20 % koko unionin alueelle laskettuna. Uusiutuvan energian prosentuaaliset tavoiteosuudet vaihtelevat maittain riippuen eri maiden nykyisestä uusiutuvien energialähteiden käytöstä ja arvioituista edellytyksistä lisätä uusiutuvien osuutta. Suomen osalle tavoite on tämän hetkisen esityksen perusteella 38 %, mikä on selvästi korkeampi kuin nykyinen uusiutuvien polttoaineiden osuus. (Ympäristöministeriö 2008)

Uusiutuvien polttoaineiden lisäystavoitteet ovat tulleet esille myös tutkimuksissa, joissa on muodostettu tulevaisuusskenaarioita energian käyttöön ja tarpeeseen liittyen. Skenaarioiden valossa uusiutuvien energioiden merkitys kokonaisenergian kulutuksessa tulee kasvamaan selkeästi fossiilisten polttoaineiden merkityksen vähentyessä. Tuulivoimalla katsotaan olevan merkittävä osa tässä kehityksessä, mutta myös biopolttoaineiden ja kierrätyspolttoaineiden merkitys kasvaa vuoteen 2030 mentäessä (Asplund et al.2005).

Perinteisesti talouskasvun ja energiankulutuksen on katsottu kulkevan yhdessä, mutta riippuvuuden voimakkuus vaihtelee alueittain. OECD:n ulkopuolisissa maissa talouskasvu ja energiankulutus

ovat olleet vahvimmin yhdessä, mutta viimevuosina talouskasvu on selkeästi ollut voimakkaampaa kuin energiankulutuksen kasvuvauhti. Näissä maissa toisaalta myös väkiluku on jatkuvasti kasvamassa ja sen myötä myös energiankulutus lisääntyy. (Energy Information Administration 2007) Maailman väkirikkailla alueilla Intiassa ja Kiinassa eletään voimakasta talouskasvua ja maiden osuus maailman kokonaisenergian kulutuksesta kasvaa jatkuvasti. Samanaikaisesti siirtymätalouksissa on vanhentuneen teknologian vuoksi suuri tarve uudistuksiin. Investoinnit ovat yleensä suuria ja rahoittajista pulaa, joten onkin todennäköistä, että erilaisilla joustomekanismeilla, päästökaupalla ja yhteishankkeilla on tulevaisuudessa merkittävä asema energiaratkaisuja suunniteltaessa ja toteutettaessa. Nämä seikat vaikuttavat uuden energiateknologian ja toisaalta myös uusien energialähteiden tarpeeseen ja markkinamahdollisuuksiin. (Koljonen et al. 2006)

8.8.2 Sosiaaliset ja yhteiskunnalliset tekijät

Uusiutuvien energialähteiden käyttöön liitetään usein yhteiskunnallisia vaikuttimia, kuten paikallisen elinkeinoelämän kehittyminen ja työllisyyden paraneminen. Puupolttoaineen käytön lisäämisellä voidaan nähdä olevan positiivisia vaikutuksia metsänhoitoon ja peltobiomassojen viljelyllä saadaan peltoala tehokkaasti hyödynnettyä. Vastaavasti jätteiden hyödyntäminen energiana vähentää niiden päättymistä kaatopaikoille. (Asplund et al. 2005)

Sosiaalisiin tekijöihin kuuluvat erilaiset demografiset tekijät, kuten väestön koulutustaso, taloudellinen tilanne, asumismuoto, ikärakenne. Erityisesti kansainvälisesti tarkasteltuna kaupungistumisen lisääntyminen asettaa kaupunkisuunnittelulle uusia vaatimuksia ja yksi merkittävä tekijä koskee ensinnäkin jätevesijärjestelmien tilaa ja sen jälkeen jätevesiliikkeen käsittelyä. Väestön koulutustason parantuminen lisää tietoisuutta esimerkiksi ympäristöasioista ja toisaalta elintason nousu lisää kulutusta ja samalla jätemääriä.

8.8.3 Ekologiset tekijät

Energiasektorin muutostarpeen takana on ympäristön kannalta hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ja siten ilmastonmuutoksen hillitseminen. Tilanne on vaativa, sillä CO₂ päästöjä tulisi vähentää puoleen nykyisestä tasosta, jotta toivottuun tavoitetasoon päästäisiin, mutta samanaikaisesti energiankulutus maailmassa kasvaa. Tulevaisuusskenaarioissa ilmastonmuutosta hillitsevien teknologioiden ja polttoainevalintojen merkityksen nähdään voimistuvan. (Koljonen et al. 2006).

Monissa tiheään asutuissa maissa vesistöjen saastuminen on vaikea ongelma ja yhtenä merkittävänä syynä tähän ovat, teollisuuden rinnalla, yhdyskuntien kehittymättömät jätevesijärjestelmät. Kaupunkien väkimäärän kasvaessa sekä jäteveden että yleisestikin jätteen käsittely tulevat nousemaan merkittäviksi kysymyksiksi.

Maissa, joissa jätevesiasiat periaatteessa ovat hallinnassa, ollaan kuitenkin myös uusien kysymysten edessä. Lietteitä käsitellään mädättämällä ja kompostoimalla ja valmista kompostia voidaan käyttää esimerkiksi maanrakennuksessa ja maisemoinneissa. Käyttökohteet ovat kuitenkin vähentyneet ja käsiteltyä kompostia kerääntyikin varastoihin. Mädättämällä tai kompostoimalla ei lisäksi pystytä vähentämään lopputuotteen määrää läheskään yhtä tehokkaasti kuin polttamalla. Poltossa myös taudinaiheuttajien tuhoaminen tapahtuu varmasti ja hajukaasujen käsittely on tehokasta. Toisaalta lietteen sisältämät ravinteet jäävät usein käyttämättä.

8.8.4 Lainsäädännölliset tekijät

Lainsäädännölliset tekijät vaikuttavat energiakysymyksiin, polttolaitoksiin, jätteen käsittelyyn ja hyödyntämiseen eri tavoin maasta riippuen. EU:n alueella lainsäädäntö on melko yhtenäistä, sillä direktiivien avulla säädellään alueen lainsäädännön yhtenäisyyttä. Maakohtaisesti määräyksiä voidaan kuitenkin tiukentaa. Lisäksi eri maissa saattaa olla alueellisia rajoituksia ja määräyksiä esimerkiksi jätteen tai lietteen polttamiselle tai yhdyskuntalietteen käyttämiselle.

PAKU- laitokseen liittyvä lainsäädäntö koskee jätteenpolttoa ja sitä koskevaa lupamenettelyä sekä yhdyskuntalietteen käyttöä. Lietteiden polttamiseen vaaditaan ympäristölupa, mutta lain mukaan vaarattomaksi käsiteltyä lietettä ja tuhkaa voidaan hyödyntää maanparannusaineena eikä tällainen toiminta ole ympäristöluvan alaista toimintaa. (YSL 86/2000.)

8.9 Markkinoiden kehittyminen

Katsottaessa yhteiskunnallisia olemassa olevia piirteitä ja odotettavissa olevaa kehitystä, voidaan havaita, että monet seikat puoltavat uusien energia-alan innovaatioiden kehittymistä. Väestönkasvu, kaupungistuminen, fossiilisten energiavarojen väheneminen ja samanaikaisesti ilmaston muutoksen vaikutukset ja sen etenemisen ehkäisy asettavat energiakysymykset entistäkin tärkeämpään asemaan.

Edellisen luvun makroympäristön tarkastelusta voidaan johtaa ainakin seuraavia trendejä, jotka puoltavat hajautetun energiantuotannon lisäämistä ja lietteiden polttamista ja siten lietettä polttavan CHP- laitoksen kaupallistumista:

- Kaupungistuminen lisääntyy
 - Jätevesijärjestelmien kehittämistarve kasvaa
 - Puhdistamolietteiden käsittelytarve kasvaa
 - Hajuhaittojen välttäminen
 - Loppusijoituspaikkojen puute
- Uusiutuvien energialähteiden käyttö lisääntyy
 - Sekä polttoaineiden että lietteiden kuljetustarpeen minimointi
 - EU:n tavoitetason saavuttamisessa kaikki vaihtoehdot hyödynnettävä
- Energian kulutus kasvaa
- Energian hinta nousee
- Ympäristöarvojen merkitys kasvaa
 - Lietteiden polttaminen vähentää lopputuotteen määrää oleellisesti
 - Lietteiden polttaminen ei ole ristiriidassa jätehierarkian kanssa
- Ympäristölainsäädäntö ja ympäristösopimukset tiukkenevat
 - Kansainvälisesti kattaviksi

Kuten raportin liiketoimintamallia käsitelleessä teoriaosuudessa tuli ilmi, uuden laitoksen kaupallistuminen vaatii paitsi hyvän idean, toimivan teknologian myös liiketoimintamallin. Kaupallistuminen ja erityisesti markkinoille meno vaatii lisäksi oikean ajoituksen: asiakkaiden täytyy olla valmiita ottamaan vastaan uusia tuotteita ja palveluita.

8.10 PAKU- laitoksen liiketoimintakonsepti

Globalisoituneet ja nopeasti muuttuvat markkinat ovat avanneet yrityksille suuria mahdollisuuksia. Suuremmat mahdollisuudet ovat toisaalta myös lisänneet liiketoiminnan moninaisuutta ja sitä kautta vaikeuttaneet tilanteen hallintakykyä. Aikaisemmin suljettuina pidettyjä järjestelmiä, kuten tuotekehitystä, voidaan katsoa uusista näkökohdista.

Hajautetun energiantuotannon ja jätteenkäsittelyn välimaastoon syntyvä liiketoiminta edustaa tulevaisuuden suuntausta: uudet innovaatiot syntyvät välimaastoon, olemassa olevien toimialojen risteysiin (Johansson 2005). Uudet välimaastoideat ja erityisesti ideoiden toteuttaminen innovaatioiksi vaativat kuitenkin kykyä nähdä uusia mahdollisuuksia ja irrottautua olemassa olevasta ajatusmallista. PAKU- laitos edustaa ajatusta välimaastoideasta. Laitoksessa yhdistyvät kaksi toimialaa: jätteenkäsittely ja energiantuotanto.

PAKU- laitoksen liiketoimintakonsepti perustuu pitkälti avoimen innovaation henkeen. Siinä korostuvat yhteistyö eri yritysten ja yliopiston kesken. Laitos muodostuu erilaisista osakokonaisuuksista, joten laitospäämäärä on mahdollista muuntaa, esimerkiksi eri polttoaineita käytettäessä kuljettimien valinnassa on eroja. Voidaankin siis sanoa, että kysymyksessä on modulaarinen laitos.

Laitospäämäärien toimittaminen on projektituonteista toimintaa ja sen hallinnasta vastaa projektijohtamiseen erikoistunut suunnittelu-yritys. Projektiperusteisessa yhteistyössä on usein ongelmana, ettei oppimista pystytä hyödyntämään, koska projektit ovat erilaisia ja yhteistyökumppanit vaihtuvat. Tässä tapauksessa on kuitenkin mahdollista oppimiseen, sillä yhteistyön, sitoutumisen ja luottamuksen avulla voidaan rakentaa mallia, jonka avulla liiketoiminta etenee.

8.10.1 Arvonluonti

Arvonluonnilla tarkoitetaan asiakkaille tarjoaman muodossa tuotettua arvoa. Tarjoama muodostuu tuotteista ja palveluista. Vaikka palveluntuottaja pyrkiikin usein ensisijaisesti vastaamaan asiakkaiden tarpeeseen, voidaan joissain tapauksissa myös olla tilanteessa, että asiakas ei tiedä, mitä hän voi saada. Mahdollisimman hyvän tarjoaman aikaansaamisessa arvoketjun jäsenien yhteistyöllä on suuri merkitys, josta kaikkien osapuolien on mahdollista hyötyä.

Lietteen polttamisella voidaan ehkäistä hajuhaittojen syntyminen. Lietteen kuljetusketjun aikaisia hajuhaittoja voidaan myös ehkäistä erityisesti kuljetusmatkoja säilytysaikoja lyhentämällä. Parhaiten tämä onnistuu, mikäli polttolaitos sijoitetaan jätevedenpuhdistamon välittömään läheisyyteen.

Asiakkaalle voidaan tarjota:

- Lietteen käsittelyyn kokonaisratkaisu
 - Laitospäämäärän toimitus
 - Palvelut (huolto, käyttötuki)
 - Hajuhaittojen ehkäisy
 - Materiaalin väheneminen
 - Tuhkan käyttö tai loppusijoitus
 - Riskinhallinta

- Energiatarpeeseen
 - Sähkön- ja/tai lämmöntuotantoa
 - Lietteen lisäksi voidaan polttaa muita bioperäisiä polttoaineita, jolloin lopputuotteen saantia voidaan lisätä (lämpö ja/tai sähkö)

8.10.2 Markkinasegmentin tunnistaminen

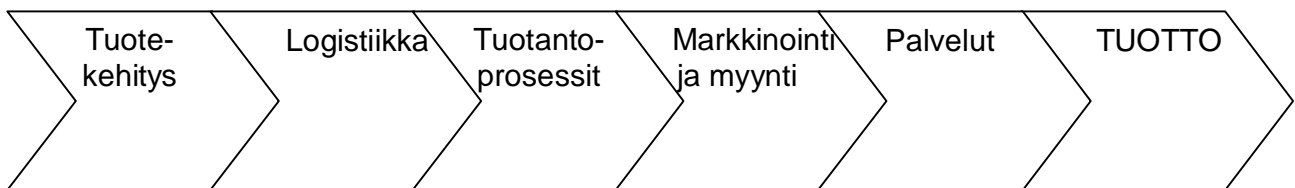
PAKU- liiketoiminnan tavoitteena on vastata asiakastarpeeseen, joka ensisijaisesti liittyy yhdyskuntalietteen käsittelyyn. Tästä näkökohdasta lähtien jätevedenpuhdistamot ja niiden ylläpitäjät, yleensä kunnat ja kaupungit, voisivat olla ensisijainen markkinasegmentti. Kunnissa suuntauksena on ollut palveluiden ulkoistaminen ja jätevesijärjestelmien monimutkaistuminen saattaa johtaa ulkoistamistarpeen lisäämiseen myös tällä saralla. Mikäli ulkoistamista tapahtuu, uudelle yrittäjälle olisi tilaisuus ottaa hallintaansa jätevedenpuhdistus ja lietteen käsittely, mikä muodostaisi toimivan kokonaisuuden ja kattavan arvoketjun.

Koska laitoksessa voidaan hyödyntää myös muita polttoaineita, tarjoaa se mahdollisuuden myös pienempien lietevirtojen polttamiseen. Erityisesti alueilla, joilla muiden lähellä tuotettujen uusiutuvien polttoaineiden saatavuus on hyvä ja hinta kilpailukykyinen, voi rinnakkaispoltto tarjota hyvän vaihtoehdon pienen mittakaavan sähköntuotannolle.

8.10.3 Arvoketju

Arvoketjun rakenne

PAKU- laitoksen arvoketju muodostuu niistä toimijoista, joiden panosta tarvitaan tarjoaman toteuttamiseksi. Arvoketju muodostuu siten toiminnoista kuten tuotekehitys, logistiikka, tuotantoprosessit, markkinointi ja myynti sekä laitospalveluiden liittyvät palvelut sekä ennen kaikkea kyseisten toimintojen toteuttajista.



KUVA 8-3. PAKU:N ARVOKETJU

Arvoketjun eri osien sisältö pääpiirteittäin:

Tuotekehityksen tavoitteet

- Lietteen käsittelyketjun suunnittelu: kuljettimet, varastointi, syöttölaitteet, kuivaus, poltto
- Prosessien suunnittelu
- Prosessien yhteensovittaminen

Logistiikan tavoitteet ja tehtävät

- Hajuhaittojen välttäminen kuljetuksen aikana
- Hajuhaittojen välttäminen varastoinnin aikana
- Rinnakkaispolttoaineiden kuljetus ja varastointi
- Lietteen ja rinnakkaispolttoaineen kuljettimet
- Tuhkan kuljetus

Tuotantoprosessit

- Lietteen kuivaus
- Lietteen polttaminen
- Lämmön- ja sähköntuotanto
- Projektien toimittaminen

Markkinoinnin ja myynnin tehtävät

- Laitosprojektien markkinointi
- Palveluiden markkinointi

Palvelutarjonta

- Huolto (miehittämätön laitos)
- Lietteen koko ketjun hallinta
- Riskinhallinta
- Koko jäteveden puhdistusketjun hallinta
- Lämmön- ja sähköntuotanto esimerkiksi paikalliselle teollisuudelle

8.10.4 Tarvittavat resurssit

Arvonluonti asiakkaalle, tarjoaman toteutuminen edellyttää, että yrityksellä tai tarjoaman tuottajilla on arvoketjuun tarvittavat resurssit. Resurssit sisältävät sekä aineellisia että aineettomia osia, joilla on merkitystä arvoketjun osien toteutumiseen.

Liiketoiminnan kannalta oleellisina resursseina voidaan pitää ydinosaamisalueita. Tällaisen osaamisen avulla yrityksen on yleensä mahdollista erottua muista alalla toimijoista ja luoda täten kilpailuetua. Ydinosaamisen suhteen on myös huomioitava, että ydinosaaminen on yrityksestä riippuvaista: toisen yrityksen ydinosaamisalue voi olla toisen yrityksen toiminnassa täysin sivuosassa. Strategiset omaisuuserät kuten immateriaalioikeudet voivat myös tuoda yritykselle kilpailuetua.

PAKU- laitoskokonaisuudesta voidaan erottaa useita ydinosaamisalueita, joita ovat:

- Poltto- ja prosessitekniikka
- Sähkötekniikka
- Syöttölaitteet
- Laitosautomaatio
- Tuhkan hyötykäyttö
- Projektinhallinta

Ydinprosessien suhteen laitoskokonaisuus vaatii vielä kehittämistä. Toimintatavat ovat kehitysvaiheessa, joten prosessien yhteen sovittaminenkin vaatii edelleen lisäselvennystä.

8.10.5 Tuottomekanismi

Tuottomekanismilla tarkoitetaan ansaintalogiikkaa eli sitä, mistä liiketoiminnan tuotto saadaan. Yksinkertaisesti kysymys on siitä, mistä raha tulee. Liiketoimintakonseptilla on kaksi perustehtävää, joista ensimmäinen on määritellä arvonluonti ja toinen on ansaintalogiikan määrittäminen. Seuraavassa on esitetty PAKU- laitoksen toimintamalleja ja tuottoon vaikuttavia tekijöitä:

- Perusmallissa yhdyskuntalietteen vastaanottomaksu on suurin tulonlähde
- Projektiperusteisessa mallissa tuotto pohjautuu tuotteiden ja palveluiden tarjontaan
- Lämmön ja sähkön myynnistä saatava tulo
- Vaihtoehtoisesti muita polttoaineita käytettäessä suuremmat tulot sähkön myynnistä ja palveluista, mutta tulosta heikentää polttoaineesta maksettava hinta
- Energian hinnannousu tulee vaikuttamaan myös tällä hetkellä edullisiin polttoaineisiin
 - Huomioitava poliittiset päätökset ja verotus
 - Päästökauppa
 - Tuet, jotka vaikuttavat energiamarkkinoihin ja hintakehitykseen

Laitoksen sijaintipaikalla voidaan myös vaikuttaa tuottoihin. Mikäli PAKU- laitos sijoitetaan jätevedenpuhdistamon välittömään läheisyyteen, on mahdollista säästää lietteen kuljetuskustannuksissa ja toisaalta myös laitoksesta saatavalle lämmölle tai/ja sähkölle saadaan paras tuotto, kun se käytetään korvaamaan ostosähköä vedenpuhdistamolla.

Tuottomekanismia arvioitaessa on huomioitava, että laitoksen tuottoon vaikuttavat yhteiskunnalliset olosuhteet. Mikäli maassa ei ole säädetty lakia (tai sitä ei valvota) lietteen käsittelystä tai sijoittamisesta, on lietteen vastaanottomaksusta saatava tuotto mitä todennäköisimmin oleellisesti pienempi. Toisaalta taas tiheästi asutuilla seuduilla syntyvät lietemäärät ovat suuria, mikä osaltaan voi parantaa tulosta, vaikka lietteestä saatava yksikköhinta olisikin alhaisempi.

8.10.6 Arvoverkosto

Liiketoiminta, joka syntyy erilaisen osaamisen yhteen liittämisestä, vaatii vahvaa yhteistyötä. Liiketoimintaan vaikuttava arvoverkosto muodostuu koko arvoketjusta toimittajista asiakkaisiin, ja näille suhteille kuvaavampi nimitys onkin kumppanuus. Arvoverkostoon voivat myös kuulua mahdolliset kilpailijat tai korvaavien tuotteiden valmistajat. Kilpailijoiden tai korvaavien tuotteiden valmistajien kanssa tehtävä yhteistyö voi edistää kokonaisuudessaan lietteen käsittelyn kehittymistä ja avata esimerkiksi kansainvälisiä markkinoita. Samanlaista verkostoitumista voi myös tapahtua yritysten kanssa, jotka toimivat enemmän energiantuotannossa. Esimerkiksi tuulivoimaloiden valmistajien kanssa tehtävällä yhteistyöllä voi olla ainakin referenssin omainen hyöty: uusiutuvat energiamuodot mielletään yhteen, vaikka eri laitosten teknologioilla ei olisikaan merkittäviä yhtymäkohtia.

Arvoverkoston rakentamisen tavoitteena ja tarkoituksena on:

- Omien voimavarojen laajentaminen
- Yhteistyön lujittaminen
- Yhteisiin tavoitteisiin sitoutuminen
- Teknisen ja liiketoiminnallisen riskin jakaminen
- Luottamuksen rakentaminen

8.10.7 Kilpailustrategia

Kilpailuedun löytämisessä yrityksen ja arvoverkon ydinosaamisella ja kyvykkyyksillä on merkittävä asema. Ydinosaamiseen pohjautuvalla tarjoomalla: tuotteilla ja palveluilla ja niiden muodostamalla kokonaisuudella on mahdollisuus tarjota asiakkaalle arvoa. Arvotarjooma voi olla mahdollisuus erottua muista alalla toimijoista. PAKU- laitoksen kilpailuedun löytäminen perustuu asiakastarpeen tunnistamiseen ja tarpeeseen vastaamiseen.

- Tehtävänä tarjota kokonaisvaltainen, ympäristöystävällinen ratkaisu yhdyskuntalietteen käsittelyyn siten, että
 - Lietteen sisältämä energia saadaan talteen
 - Materiaalimäärä pienenee oleellisesti
 - Tuhka voidaan hyödyntää
 - Kuljetuskustannukset voidaan optimoida
- Differointiperusta:
 - Voidaan vastata tarpeeseen heikosti hyötykäyttöön menevän tai loppusijoitettavan materiaalin vähentämiseksi
 - Sähköntuotanto pienen kokoluokan CHP- laitoksessa
 - Pieni laitos toimii paikallisesti: kuljetusten ja kuljetuskustannusten vähentyminen
 - Hajuhaittojen välttäminen

8.11 Johtopäätökset

PAKU- laitoksessa yhdistyvät kaksi toimialaa: jätehuolto ja hajautettu energiantuotanto. Molemmat toimialat ovat viime aikoina olleet kiinnostuksen kohteena sekä tutkimuksellisesti että yhteiskunnallisesti ja erilaisille toimintavaihtoehdoille voidaan katsoa olevan tarvetta. Yhdyskuntalietteet käsitellään Suomessa pääsääntöisesti kompostoimalla, mutta lopputuotteen vähäisen kysynnän vuoksi polttaminen tarjoaa hyvän vaihtoehdon lietteen käsittelylle.

PAKU- laitoksen kiinnostavuuteen ja myös kannattavuuteen vaikuttavat useat makrotason tekijät, kuten ympäristölainsäädäntö, energian hintakehitys, uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntyminen, energiankulutuksen lisääntyminen maailmanlaajuisesti, kaupungistuminen ja ympäristöarvojen korostuminen. Eri tekijöiden vaikutukset voivat olla joko suoria tai välillisiä.

Yhdyskuntalietteen ja jätevesijärjestelmien kehittyminen ja monimutkaistuminen saattavat tulevaisuudessa lisätä erityisesti pienten kuntien kiinnostusta palveluiden ulkoistamiseen. Tarkasteltaessa kotimaan markkinoita kuntien yhdistyminen ja palveluiden uudelleen järjesteleminen voivat lisätä kysyntää PAKU- laitoksen tyyppisiin kokonaisuuksiin. Kansainvälisesti tarkasteltuna kaupungistu-

minen on yksi merkittävimmistä haasteista niin jätevesijärjestelmien kuin lietteen käsittelynkkin näkökulmasta katsottuna.

Pienen kokoluokan modulaariselle laitokselle voidaan katsoa löytyvän kysyntää sekä kotimaasta että kansainvälisiltä markkinoilta. PAKU- laitos tarjoaa mahdollisuuden paikallisten lietevirtojen käsittelyyn ja vaihtoehtoisesti myös paikallisten biopolttoaineiden hyödyntämiseen, jolloin voidaan välttää pitkiä kuljetusmatkoja ja matkojen aiheuttamia haittoja, kuten hajujen leviämistä ja kuljetuksesta syntyvää ympäristökuormitusta.

Liiketoimintakonseptin peruskysymykset ovat arvonluonti ja ansaintalogiikka. PAKU- laitokselle voidaan nähdä erilaisia toteutusvaihtoehtoja ja sitä kautta myös hieman toisistaan poikkeavia tuotomekanismeja. Arvonluonti ja ansainta pohjautuvat yritysten ja arvoverkoston kyvykkyyksiin ja ydinosaamiseen, ja toisaalta kykyyn tarjota asiakkaalle jotakin, jota asiakas arvostaa. Koska laitospakonaisuus koostuu useista ydinosaamisalueista, avoimen innovaation mukainen arvoverkostoa hyödyntävä liiketoimintamalli muodostaa lupaavan perustan liiketoiminnalle. Useiden toimijoiden yhteistyö vaatii paitsi verkostonäkökulman ymmärtämistä ja siihen sitoutumista myös vankkaa projektiosaamista.

Lähteet

- Asplund, D. Korppi-Tommola, J. Helynen, S. 2005 Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet vuoteen 2015 [verkkodokumentti]. [Viitattu 19.2. 2008] Saatavissa: [http://ktm.elinar.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/E5063805F1B754D5C22570190028414D/\\$file/34642005.pdf](http://ktm.elinar.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/E5063805F1B754D5C22570190028414D/$file/34642005.pdf)
- Chesbrough, H., Vanhaverbeke, W. & West, J. 2006. Open Innovation, Researching a New Paradigm. Oxford University Press. New York, USA.
- Chesbrough, H. 2007. Business model innovation: it's not just about technology anymore. Strategy & leadership. Vol. 35 no. 6 2007, ss.12-17.
- Chesbrough, H. W. Appleyard, M. M. 2007. Open Innovation and Strategy. California Management Review, University of California, Berkeley, vol. 50, NO. 1, Fall 2007. ss. 57 – 76.
- Energy Information Administration. International Energy Outlook 2007 [verkkodokumentti] [Viitattu 12.11 2007] Saatavissa: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/world.html>
- Hamel, G. 2001. Vallankumouksen kärjessä. WS Bookwell Oy, Porvoo. 327 p.ISBN 951-0-25646-3.
- Frost & Sullivan, Electrowatt-Ekono Oy. 2002. Market Opportunities for Distributed Generation Applications.
- Koljonen, T. Lehtilä, A. Savolainen, I. 2006. Global demand of the clean energy technology under developing climate policy. Konferenssiesitys , International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Kesäkuu 2006. Trondheim, Norja
- Magretta, J. 2002. Why Business Models Matter. Harvard Business Review. Harvard Business School Publishing Corporation. May 2002. Reprint R0205F.
- MET, Liiketoiminnan ja teknologia työryhmä. 2003. Liiketoiminnan ja teknologian linjaus 2010. Tulevaisuuden voittajat. Teknologiateollisuus. Esitys 2.5.2003
- Ostenwalder, A. Pigneur, Y. Tucci, C.L. 2005. Clarifying Business Models: Origins, Present, and Future of the Concept. Communications of the Association for Information Systems. Vol.15, May 2005.
- Sainio, L-M. 2005. The Effect of Potentially Disruptive Technology on Business Model- A Case Study of New Technologies in ICT Industry. Lappeenranta teknillinen yliopisto, Digipaino.
- Ympäristöministeriö. 2008. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.2. 2008] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=264826&lan=fi&clan=fi>
- YSL. Ympäristönsuojelulaki 86/2000

9 Johtopäätökset

Laitoskonseptitutkimuksen tulosten perusteella voidaan sanoa, että PAKU-konsepti on toimiva kokonaisuus, jonka avulla pystytään tietyissä olosuhteissa tuottamaan paikallisesti sähköä ja lämpöä ja joka mahdollistaa edullisen jätteenpolttomenetelmän, kuten yhdyskuntalietteen polton. Sähköä ja lämpöä voidaan tuottaa joko myyntiin tai se voidaan hyödyntää laitokselle tuotavan polttoaineen kuivausprosessissa, jolloin säästetään laitoksen omissa tuotantomenoissa. Toisena järkevänä laitoksen tuottaman sähkön hyötykäyttökohteena nähdään laitoksen läheisyydessä sijaitsevat yritykset. Tehokas energian hyödyntäminen ja polttoaineiden kuljetuskustannusten minimointi saadaan aikaan rakentamalla laitos lähelle polttoaineen tuottajaa ja sähkökäyttäjää, kuten esimerkiksi rakentamalla se lähelle jätevedenkäsittelylaitosta tai integroimalla se yrityspuiston kaltaiseen jätteitä käsittelevään yrityskeskittymään.

Laitoksen oman energiantuotannon kannalta polttoaineen kuiva-ainepitoisuus ei ole merkitsevä tekijä. Kuiva-ainepitoisuutta tärkeämmäksi nousee laitokselle tuotavan polttoaineen määrä. Määrän on yhdyskuntalietteiden kohdalla oltava huomattavan suuri kannattavuuden takaamiseksi, jos polttoaineena ei käytetä muita rinnakkaispolttoaineita.

Liiketoiminnan kannalta tarkasteltuna laitos auttaa ratkaisemaan sähköntuotannollisesti pitkälle kehittyneiden maiden jätteiden hyötykäyttöön ja erityisesti yhdyskuntalietteiden hyötykäyttöön liittyvän ympäristöongelman eli jätteiden hävityksen tuottamalla sähköä ja lämpöä paikallisesti. Sähköntuotannollisesti pitkälle kehittyneiden maiden lisäksi laitoksen avulla on mahdollista tuottaa sähköä ja lämpöä alueella, jossa infrastruktuuri ei ole kehittynyt tarpeeksi pitkälle tyydyttääkseen esimerkiksi nopeasti kasvaneen teollisuuden energiatarpeen. Lisäksi laitoskonseptin liiketoimintapotentiaalia kasvattaa sen modulaarinen rakenne eli laitos voidaan koota halutuista moduuleista asiakkaan tarpeiden mukaan. Laitoskonseptiin perustuvan liiketoiminnan olennaisena osana nähdään myös laitoksen ympärille kehittyvä palvelutoiminta. Palvelutoiminnan toteuttaminen kansallisilla ja erityisesti kansainvälisillä markkinoilla vaatii huomattavia investointeja ja kontakteja kohdealueen väestöön. Tämän vuoksi liiketoiminnan kehittäminen ainoastaan yksittäisen yrityksen voimavaroilla ei välttämättä anna yritystoiminnalle tarvittavaa strategista toimintakykyä. PAKU -laitoskonseptin kehityksen kannalta merkitsevä nähdään avoimeen innovaatioon perustuvat liiketoimintamallit, joissa avainyritys katsoo omien rajojensa ulkopuolelle ja aktiivisesti hyödyntää useiden eri toimijoiden osaamista laitoskonseptin ja liiketoiminnan kehittämisessä. Usein puhutaankin kumppanuudesta tai arvoverkostosta, johon voivat perinteisemmän tuottaja-tilaaja mallin lisäksi kuulua mahdolliset kilpailijat tai korvaavien tuotteiden valmistajat.

Arvoverkoston avulla:

- laajennetaan yrityksen omia rajallisia voimavaroja
- lujitetaan kansainvälisillä markkinoilla tarvittavia kontakteja ja eri toimijoiden välistä yhteistyötä
- sitoudutaan yhteisiin tavoitteisiin
- Jaetaan tekninen ja liiketoiminnallinen riski
- rakennetaan luottamusta liiketoiminnan ja tuotekehityksen perustaksi

Vaikka laitos on toimiva sähköä ja lämpöä tuottava modulaarinen kokonaisuus, sen mahdollisuudet kansallisilla ja kansainvälisillä markkinoilla ovat voimakkaasti yhteiskuntasidonnaisia. Laitoksen kannattavuus on riippuvainen useista ulkoisista makrotason tekijöistä, kuten ympäristölainsäädännöstä, energian hintakehityksestä, uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntymisestä, energiankulutuksen lisääntymisestä maailmanlaajuisesti, kaupungistumisesta ja ympäristöarvojen korostumi-

sesta. Jätteen polttaminen ja yhdyskuntalietteiden hyödyntäminen ovat PAKU –laitoskonseptin osatekijöitä, joihin liittyy vahvoja yhteisöllisiä arvoja ja toimintatapoja. Tämän vuoksi on uusille markkinoille mentäessä oltava selvillä uuden teknologian sosiaalisesta hyväksyttävyydestä erilaisissa kulttuureissa. Edellä mainitut välittömästi ja välillisesti laitoksen myyntiin ja käyttöönottoon liittyvät seikat tulisi huomioida jo liiketoiminnan ja teknologian kehitysvaiheessa.

10 Jatkotutkimustarpeet

Hajautettu energiantuotanto on kasvava markkina-alue, joka mahdollistaa PAKU –laitoskonseptin kaltaisille uusille innovaatioille laajan liiketoimintakentän. Laitoskonseptin etuna on ympäristöongelman vähentämisen lisäksi sähkön- ja lämmöntuotantopotentiaali pienessä kokoluokassa. Tutkimusta tällä saralla tarvitaan etenkin sähköntuotannon kehittämiseen ja testaukseen pilot-kohteessa.

PAKU-laitoskonsepti on tässä projektissa tutkituissa muodoissaan varsinkin talouden kannalta ensisijaisesti jätteenkäsittely- ja –hyötykäyttölaitos. Laitoskonseptin eri vaihtoehtoja tutkittiin etupäässä energian tuotannon kannalta ja suomalaisesta näkökulmasta. Jatkotutkimuksessa olisi tarpeellista paneutua käsiteltävien jättemateriaalien ravinteiden kierrätykseen, joka yleensä jää toteutumatta jätteiden poltossa kokonaan. Jätteenkäsittelytarpeet ja –olosuhteet vaihtelevat eri maissa hyvin paljon mm. erilaisen jätehuollon infrastruktuurin, asumistiheyden ja elinkeinonjakauman vuoksi. PAKU-konseptille voi löytyä mahdollisista vientimaista tutkittuihin tapauksiin verrattuna huomattavan erilaisia soveltamiskohteita joko käsiteltävien jättemateriaalien, tuotettavien energiatuotteiden tai taloudellisten reunaehtoien kannalta. On mahdollista löytää sellaisia vientimaita tai soveltamiskohteita, joissa teknologia on suorituskyvyiltään tai taloudellisilta tunnusluvuiltaan ylivoimaisen kilpailukykyinen verrattuna muihin tekniikoihin.

Yritysten liiketoiminnan kehittämiseen liittyvässä jatkotutkimuksessa kannattaisi keskittyä avoimen innovaation kaltaisen yritys yhteistyön syventämiseen. Tämä voisi tapahtua esimerkiksi tarkemman toimialakohtaisen liiketoimintamallin kehittämisellä tiiviissä yhteistyössä yritysten ja tutkijatahojen kesken. Uudenlaisten tekniikoiden, kuten aurinkokennojen lupaavien tulevaisuudennäkymien rinnalla myös perinteisempien tekniikoiden avulla on mahdollista kehittää innovatiivisia energiantuotantomuotoja. Perinteisempien tekniikoiden asemaa tulevaisuuden markkinoilla voidaan vahvistaa yhdistämällä näitä keskenään ja luomalla esimerkiksi laaja-alainen jätteenkäsittely- ja energiantuotantoketjumalli, jossa palvelutoiminta sisältäisi koko ketjun jätteen keräyksestä sähkön ja lämmön jakeluun. Tutkimuksessa tulisi tällöin edetä tarkan toimialakohtaisen liiketoimintamallin kehittämiseen, joka kattaisi energiantuotannon lisäksi ympäristöön ja jätteiden hyödyntämiseen liittyvät suunnitelmat.

Jotta uuden teknologian kaupallistaminen tukee kestävästä yhdyskuntakehitystä ja on liiketoiminnallisesti kestävällä pohjalla, on teknologian ja liiketoiminnan kehittämisessä huomioitava millaisia ehtoja potentiaaliset yhdyskuntalietteiden ja muun laitoksessa poltettavan materiaalin hyödyntäjät, tuottajat ja muut uuden teknologian kaupallistamiseen vaikuttavat toimijat asettavat lietteiden hyötykäytölle ja jätteenpoltoille, ja millä reunaehdoilla uusi teknologia ylittäisi sosiaalisen hyväksyttävyyden rajan.

Teoreettisen ja kokeellisen tutkimuksen kautta kannattaisi kehittää erityisesti seuraavia osa-alueita:

- tehokkaampaa turbogeneraattoriyksikköä pienen kokoluokan voimalaitokseen
- kaasuturbiinin sähköntuotantomahdollisuuksia pienen kokoluokan hajautetussa energiantuotannossa
- lietteiden sisältämien ravinteiden ja voimalaprosessin yhdistämistä keskenään siten, että lietteen hyötykäyttösuhdetta saataisiin nykyistä korkeammalle tasolle ja monipuolisemmaksi
- tuhkien jalostusprosessia
- verkottunutta liiketoimintamallia
- työkaluja uuden innovaation sosiaalisen hyväksyttävyyden ja käyttöönoton edistämiseksi