

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Energia- ja ympäristötekniikan osasto
BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

**LIETETTÄ POLTTOAINEENAAN KÄYTTÄVÄN
PIENEN KOKOLUOKAN LÄMMÖN JA SÄHKÖN
YHTEISTUOTANTOLAITOKSEN INVESTOINTIKUSTANNUS**

Tarkastaja: Dosentti, TkT Juha Kaikko

Ohjaaja: Dosentti, TkT Juha Kaikko

Lappeenrannassa 18.2.2008

Juho Anttila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Juho Anttila

Lietettä polttoaineenaan käyttävän pienen kokoluokan lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksen investointikustannus

Kandidaatintyö

2008

37 sivua, 10 kuvaa ja 17 taulukkoa

Tarkastaja: Dosentti Juha Kaikko

Hakusanat: Liettepolttu, lämmön ja sähkön yhteistuotanto, investointikustannus

Keywords: Sewage sludge burning, combined heat and power production, investment cost

Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa on käynnissä hanke, jossa kehitetään lietettä polttoaineenaan käyttävä höyryvoimalaitosprosessiin perustuva pienen kokoluokan lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitos.

Kehitteillä olevan pienen kokoluokan lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksen erikoisuutena on laitoksen polttoaineeksi valittu yhdyskuntaliete. Valitussa ratkaisussa jätevedenpuhdistamolla esikäsitelty liete tuodaan voimalaitokselle, jossa liete kuivataan epäsuorassa kiertomassakuivurissa ja kuivauksen jälkeen poltetaan kiertoleijutekniikkaan perustuvassa reaktorissa. Palamistuotteena syntyvän tuhkan määrä on vain murto-osa laitoksella käsitellystä lietemäärästä. Laitoksessa on mahdollista käyttää lietteen lisäksi biopolttoaineita sekä kierrätyspolttoaineita.

Tämän työn tavoitteena on määrittää laitoksen investointikustannus. Määrittäminen perustuu koneiden ja laitteiden osalta yrityksiltä saatuihin tarjouksiin ja muilta osin kirjallisuustietoihin sekä toteutettuihin vastaavan kaltaisiin hankkeisiin. Tässä työssä määritetyn investointikustannuksen perusteella voidaan tehdä jatkotarkasteluja laitoksen toteutettavuudesta valitussa liiketoimintaympäristössä.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
1.1. Taustaa.....	1
1.2. Työn tavoite.....	2
1.3. Työn suoritus.....	2
2. VOIMALAITOKSEN KUSTANNUKSET.....	3
3. LAITOSVAIHTOEHDOT.....	4
3.1. Tapaus 1.....	5
3.2. Tapaus 2.....	7
3.3. Tapaus 3.....	8
3.4. Polttoaineet.....	10
4. KONEET JA LAITTEET.....	11
4.1. Lietteen kuivuri.....	12
4.2. Reaktori.....	13
4.3. Polttoaineen käsittely.....	16
4.3.1. Lietteenpoltto.....	16
4.3.2. Rinnakkaispoltto.....	17
4.4. Savukaasujen puhdistus.....	18
4.5. Tuhkan käsittely.....	19
4.6. Savukaasukanavan lämmönsiirtimet.....	20
4.6.1. Ekonomaiseri.....	21
4.6.2. Höyrystin.....	22
4.6.3. Tulistin.....	23
4.6.4. Lämmönsiirrin tapauksessa 3.....	24
4.7. Turbogeneraattori ja vaihteisto.....	25
4.8. Automaatio ja instrumentointi sekä sähköistys.....	25
4.9. Syöttöveden käsittely.....	25
4.10. Kaukolämmönvaihdin.....	25
4.11. Päästöjen mittaus.....	26
4.12. Pelletin kuivuri.....	26
4.13. Muut komponentit.....	27
4.13.1. Syöttövesisäiliö.....	27
4.13.2. Lieriö.....	27
4.13.3. Pumput.....	28
4.13.4. Puhaltimet.....	28
4.13.5. Savupiippu.....	29
4.13.6. Paineenalennusventtiili.....	29
4.14. Koneiden ja laitteiden asennukset.....	30
4.15. Muut investointikustannukseen vaikuttavat tekijät.....	30
5. LAITOSVAIHTOEHTOJEN KOKONAISHINNAT.....	32
6. YHTEENVETO.....	33
LÄHTEET.....	35

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

C	Hiili
H	Vety
N	Typpi
O	Happi
S	Rikki

Lyhenteet

BAT	Best Available Technique, paras käytettävissä oleva tekniikka
CFB	Circulating Fluidized Bed, kiertopetiteknikka
CHP	Combined Heat and Power, lämmön ja sähkön yhteistuotanto
CTC	Constant Temperature Combustion, lämpötilahallittu poltto
ka	Kuiva-aine
PAKU	Hajautetun energiantuotannon modulaarinen yhdyskunnan sivuainevirtoja hyödyntävä CHP-laitos
TEKES	Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus

1. JOHDANTO

Suomessa yhdyskuntien liete on viemäriverkoston olemassaolon ajan perinteisesti kompostoitu ja käytetty edelleen eri tarkoituksiin. Viime vuosina tälle valtavalle vuosittain syntyvälle lietemäärälle on alettu pohtimaan uusia käyttötarkoituksia. Varsin potentiaalinen keino lietteestä eroon pääsemiseksi on lietteen polttaminen. Polttamisen lopputuotteena syntyvän tuhkan määrä on vain murto-osa poltetusta lietemäärästä. Lietteen termisen käsittelyn muita etuja ovat mm. prosessointiajan lyheneminen lähes olemattomaksi sekä patogeenien täydellinen tuhoutuminen. (Horttanainen et al. 2007, s. 21) Termisen käsittelyn suurimpana haasteena on lietteen kosteus. Lieite on kuivattava, jotta se soveltuisi poltettavaksi. Kuivauslaitteistot ovat investoinniltaan melko hinnakkaita. Lietteen polttoa tutkitaan myös Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa Energia- ja ympäristötekniikan sekä Sähkötekniikan osastojen yhteisessä tutkimushankkeessa PAKU – Hajautetun energiantuotannon modulaarinen yhdyskunnan sivuainevirtoja hyödyntävä CHP-laitos.

1.1. Taustaa

PAKU-hankkeessa on tähän mennessä määritetty laitoksen peruskokoonpano ja suorituskyky. Laitoksessa on mahdollista tuottaa sekä sähköä että lämpöä. Erikoisuutena perinteisiin laitoksiin verrattuna on uuden polttoaineen, lietteen, käyttö. Lietteen kosteuspitoisuus aiheuttaa lietteelle kuivaustarpeen. Kuivaus tehdään epäsuorassa kiertomassakuivurissa. Hankkeessa on tehty myös paljon muuta tutkimusta teknisen tutkimuksen ohessa. On tutkittu muun muassa kehitettävän laitoksen liiketoiminnallisia edellytyksiä sekä jätteen polton kulttuurillista hyväksyttävyyttä. PAKU-hanke on pääosin TEKES-rahoitteinen, mukana on myös yrityskumppaneita. Yhteistyöyritykset ovat Biolan Oy, Einco Oy, Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy, Enmac Oy, Lappeenrannan Energia Oy, Lappeenranta Innovation Oy, Laitex Oy sekä The Switch.

PAKU-laitoksen prosessimallinnuksen on laatinut dosentti Juha Kaikko. Mallinnus on suoritettu IPSEpro-ohjelmalla, joka on monipuolinen ja kattava voimalaitosmallinnukseen soveltuva simulointiohjelma. IPSEpro perustuu voimalaitosmallinnukseen IPSE, joka on ollut saatavissa vuodesta 1992. (IPSEpro)

1.2. Työn tavoite

Tämän työn tavoite on kehitteillä olevan voimalaitoksen investointikustannuksen määrittäminen. Hankkeen tulevaisuuden kannalta laitoksen mahdollisimman totuudenmukaisen hinnan tietäminen olisi varsin tärkeää. Hinta on tarkoitus selvittää muutamalle vaihtoehdoiselle laitoskokoonpanolle, tällä saadaan mahdolliset jatkotutkimukset keskitettyä teknistaloudellisesti järkevimpään laitosvaihtoehtoon. Työn tavoitteena on selvittää investointikustannus myös pelkälle kaukolämpölaitokselle, jossa lietemäärä olisi tarkoitus polttaa mahdollisimman edullisesti.

1.3. Työn suoritus

Laitoksen sisältämien koneiden ja laitteiden hinnat on määritetty yrityksiltä saatujen tarjousten perusteella. Hintatietoina on käytetty mahdollisesti vain yhdeltä yritykseltä saatua tarjousta. Joistain komponenteista hintatietoja on saatu useammilta valmistajilta, näissä tapauksissa hintatietona on käytetty halvinta vaatimukset täyttävää tarjousta.

Yhteydenpito yritysten edustajiin on käyty sähköpostin ja puhelimen välityksellä. Joidenkin komponenttien osalta on käytetty Internetistä yritysten kotisivuilta löytyviä tarjouspyyntölomakkeita. Niiden voi todeta olevan varsin helppo ja käytännöllinen tapa tarjouspyynnön lähettämistä varten. Yritys esittää lomakkeessa tarjouksen laskemista varten tarvitsemansa tekniset tiedot. Tällä keinolla yritys saa heti kerralla riittävät tiedot laitteesta ja välttyy lisätietojen pyytämiseltä. Näin ollen tarjousten saaminenkin on nopeampaa. Tarjouspyyntöjen laatimisessa lähtökohtana oli mahdollisimman selkeän ja yksityiskohtaisen tarjouspyynnön tekeminen. Tarjousten saapuminen vaihteli melkoisesti yrityksittäin. Joiltain yrityksiltä tarjouksen sai heti seuraavana päivänä, joillain tarjouksen laadintaan taas meni toista kuukautta. Lisäksi lukemattomat yritykset jättivät täysin reagoimatta heille lähetettyihin tarjouspyyntöihin. Yleistystä yritysten nihkeästä suhtautumisesta yliopistotutkimusta kohtaan ei silti voi tehdä, mukana oli myös yrityksiä, jotka ystävällisesti ilmoittivat olevansa kykenemättömiä kyseisten laitteiden valmistamiseen. Laitoksen kokonaishinta olisi mahdollisesti saatavissa alaspäin järjestämällä jokaisen komponentin osalta kunnollinen tarjouskilpailu. Sen tekeminen tulee ajankohtaiseksi siinä vaiheessa, kun ensimmäisen PAKU-laitoksen investointipäätös tehdään.

Tutkimuksen luonteesta johtuen kandidaatintyössä selvitettyjä yksittäisten koneiden ja laitteiden hintoja ei julkaista, vaan ne pysyvät ainoastaan tutkimusryhmän käytössä. Laitosvaihtoehtojen investointikustannukset julkaistaan tässä kandidaatintyössä.

2. VOIMALAITOKSEN KUSTANNUKSET

Voimalaitoksen elinkaaren aikaiset kustannukset jakaantuvat investointi-, käyttö- ja kunnossapito- sekä polttoainekustannuksiin. (Kymäläinen. 2001, s. 31) Tässä kandidaatintyössä on keskitytty ainoastaan investointikustannukseen. Polttoainekustannuksista PAKU-laitoksen osalta mainittakoon muutama oleellinen tekijä. Laitoksella poltettavasta lietteestä ei synny perinteisiä polttoainekustannuksia, vaan lietteen tuomisesta laitokselle käsiteltäväksi otetaan maksu. Lietteiden vastaanottomaksuista tulevat tulot ovat oleellinen osa PAKU-laitoksen kannattavuutta. Rinnakkaispolton tapauksessa lietteen rinnalla käytetään esimerkiksi biopolttoaineita tai kierrätyspolttoaineita. Lisäpolttoaine ostetaan toimittajilta, siitä siis syntyy perinteisen tulkinnan mukaisia polttoainekustannuksia.

Voimalaitoksen investointikustannukset on tapana jakaa viiteen kustannusryhmään: koneet ja laitteet, rakennustekniset työt, suunnittelu ja valvonta, kustannusvaraus sekä rakennusaikaiset korot. (Kymäläinen. 2001, s. 31) Koneet ja laitteet muodostavat investointikustannuksesta suurimman osan. Erityisesti tätä osa-aluetta on tutkittu tässä kandidaatintyössä. Tutkimus on tehty pyytämällä laitteiden valmistajilta tarjouksia kyseisistä komponenteista. Myös muut kustannusryhmät on otettu huomioon laitoksen investointikustannuksessa. Niiden kustannuksia on arvioitu toteutettujen vastaavankaltaisten hankkeiden sekä aihepiiristä laadittujen tutkimusten perusteella.

Investointikustannukseen vaikuttaa monet hankalasti määritettävät tekijät. Näiden hankalasti määritettävien tekijöiden osalta tässä työssä on käytetty periaatetta, jonka mukaan kustannuksia pyritään arvioimaan mieluummin hieman liian suuriksi kuin liian pieniksi.

3. LAITOSVAIHTOEHDOT

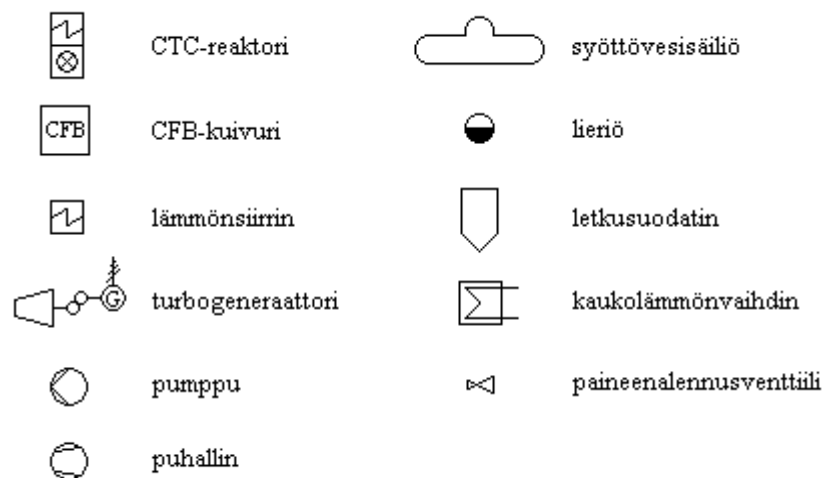
Työssä on käsitelty kolmea erilaista laitoskokoontia. Kaikissa vaihtoehdoissa poltetaan sama lietemäärä, 38 000 tonnia kosteaa lietettä vuodessa. Lietteen kuiva-ainepitoisuutena on laskelmissa käytetty arvoa 14,2 m-%. Kuiva-ainepitoisuus on valittu siten, että jäljempänä esitettävä laitosvaihtoehto 1 tuottaa vain sähkötehoa. Normaalisti yhdyskuntalietteen kuiva-ainepitoisuus on keskimäärin 20 m-%. Myös lietteen kuivaus toteutetaan kaikissa esitellyissä laitoskokoontiossa samalla tavalla, epäsuoran kiertomassakuivurin avulla. Liete kuivataan kuiva-ainepitoisuuteen 90 m-%. Muilta osin laitosvaihtoehdoissa on eroavaisuuksia. Merkittävimmät eroavaisuudet ilmenevät rinnakkaispolttoaineen käytössä sekä mahdollisen lämpötehon hyödyntämisessä. Kaikkien laitosvaihtoehtojen vuotuinen käyttöaika on 8000 h.

Laitosvaihtoehdot 1 ja 2 ovat rakenteeltaan lieriökattilalla varustettuja vastapainevoimalaitoksia, joiden toiminta perustuu veden ja vesihöyryn kiertoprosessiin. Laitoksissa käytettävä liete kuivataan termisesti epäsuorassa kiertomassakuivurissa (CFB-kuivuri) ja poltetaan lämpötilahallittuun polttotekniikkaan perustuvassa reaktorissa (CTC-reaktori). Syöttövesisäiliöstä otettava syöttövesi pumpataan syöttövesipumpulla syöttöveden esilämmittimen kautta lieriöön. Lieriöstä kylläinen vesi johdetaan kaksivaiheisen höyrystämisen jälkeen takaisin lieriöön. Höyrystämisen ensimmäinen vaihe tapahtuu CTC-reaktorissa olevassa höyrystimessä ja toinen vaihe savukaasukanavassa sijaitsevassa höyrystimessä. Kylläinen höyry tulistetaan yksivaiheisessa tulistimessa. Tulistettu höyry johdetaan turbiiniin, jonka läpi virranneen höyryn energiasta osa saadaan muutetuksi turbiinia pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi. Turbiini pyörittää generaattoria, jossa mekaaninen energia muunnetaan sähköenergiaksi. (Huhtinen et al. 2000. s. 11) Laitoksessa on yksi sekoitusesilämmitin (syöttövesisäiliö), jonka lämmitys on toteutettu lieriöstä otettavalla kylläisellä vedellä. Turbiinista poistuva höyryvirtaus ohjataan CFB-kuivurille. Virtauksen sisältämä lämpö höyrystää vettä kuivurille saapuvasta lietteestä. Kuivurissa vedeksi lauhtunut höyry pumpataan lauhdepumpulla syöttövesisäiliöön. Syöttövesisäiliöstä syöttövesi pumpataan jälleen syöttövesipumpulla suorittamaan uudelleen edellä esitetty työkierto.

Kolmas laitosvaihtoehto on pelkkä kaukolämpölaitos. Siinä ei ole lainkaan turbiinia ja näin ollen se ei tuota lainkaan sähköä. Lietteen poltto toteutetaan täysin samoin kuin laitos-

vaihtoehtoissa 1 ja 2. Kaukolämpöverkosta palaavaa jäähtynyttä kaukolämpövedtä lämmitetään ensin savukaasukanavassa sijaitsevassa lämmönsiirtimessä. Kaukolämpövesi johdetaan tämän jälkeen reaktorissa olevaan lämmönsiirtimeen, jossa kaukolämpövesi yhä lämpenee. Lämmitetty kaukolämpövesi ohjataan kuivuriin, jossa osalla kaukolämpöveden sisältämästä lämmöstä höyrystetään lietteen sisältämää vettä. Kuivurista kaukolämpövesi johdetaan kaukolämpöverkkoon. Kaukolämpöverkossa kaukolämpöveden sisältämä lämpöenergia siirtyy käyttökohteisiin ja kaukolämpövesi palaa jäähtyneenä takaisin laitokselle.

Laitosvaihtoehtojen sisältämien komponenttien toiminta-arvot on valittu siten, että ne vastaavat kullekin komponentille tyypillisiä arvoja. Joidenkin laitteiden osalta arvoja on tarkennettu valmistajilta saatujen tietojen perusteella. Seuraavissa kappaleissa on esitelty laitoskoonpanot prosessikaavioineen ja tärkeimpine toiminta-arvoineen. Kuvaan 1 on koottu laitosten prosessikaavioissa käytettyjen piirrosmerkkien selitykset.



Kuva1. Prosessikaavioissa esiintyvien symbolien selitykset.

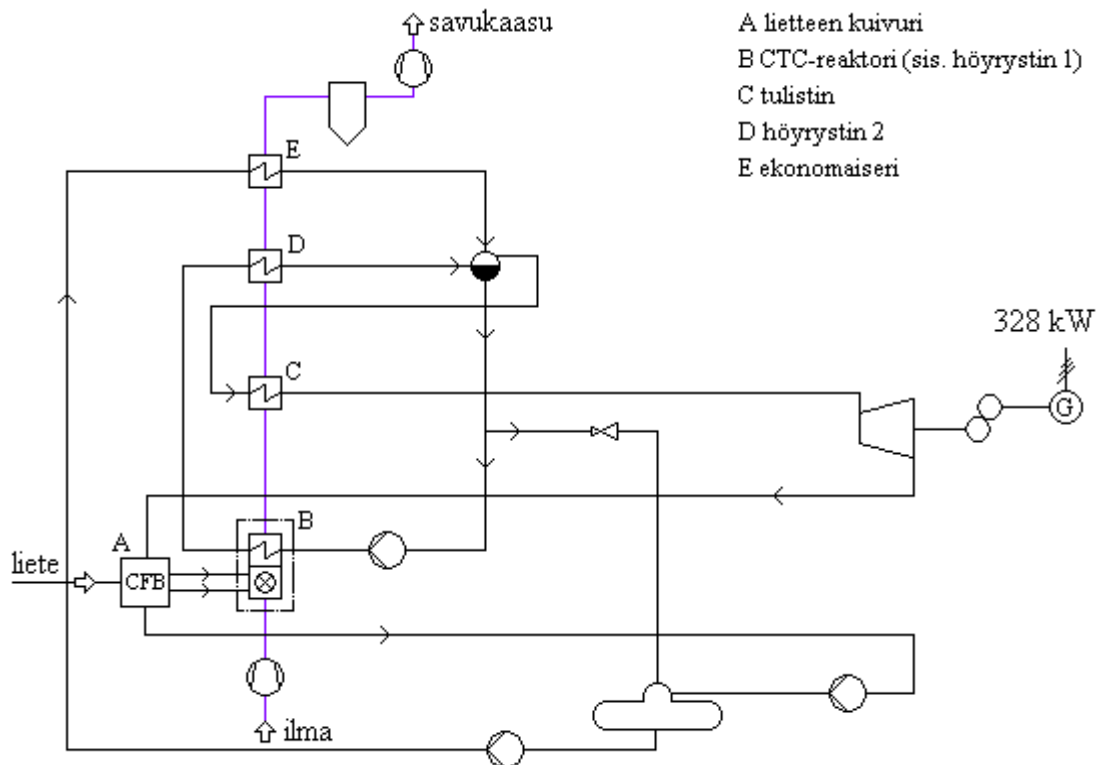
3.1. Tapaus 1

Ensimmäinen laitosvaihtoehto käyttää polttoaineenaan ainoastaan lietettä. Se tuottaa sähkötehon 328 kW, mutta ei lainkaan kaukolämpötehoa, sillä kaikki turbiinin jälkeen saatava lämpö käytetään lietteen kuivaamiseen. Taulukkoon 1 on koottu tapauksen 1 tärkeimmät prosessiarvot.

Taulukko1. Ensimmäisen laitosvaihtoehdon tärkeimmät prosessiarvot.

Lietteen ka-pitoisuus ennen kuivuria	14,2	m-%
Lietteen ka-pitoisuus kuivurin jälkeen	90,0	m-%
Ilmakerroin	1,4	-
Savukaasun lämpötila CTC-reaktorin jälkeen	850	°C
Savukaasun lämpötila savukaasukanavan lämmönsiirrinten jälkeen	229	°C
Palamisessa vapautuva teho	4304	kW
Tuorehöyryn paine	40	bar
Tuorehöyryn lämpötila	470	°C
Tuorehöyryn massavirta	1,25	kg/s
Vastapaine	4	bar
Omakäyttöteho	104	kW
Nettosähköteho	328	kW
Sähköntuottohyötysuhde	21,4	%

Laitoksen suhteellisen hyvä sähköntuottohyötysuhde johtuu siitä, että turbiinin jälkeistä matalan lämpötilatason höyryä käytetään höyrystämään kuivuriin saapuvan lietteen sisältämää vettä. Tähän höyrystämiseen tarvittaisiin muuten lietteen palamisessa vapautuvaa energiaa. Käytetty ratkaisu kasvattaa laitoksesta saatavan sähkön määrää ja siten sähköntuottohyötysuhdetta. Kuvassa 2 on esitetty tapauksen 1 prosessikaavio.

**Kuva2.** Tapauksen 1 prosessikaavio.

3.2. Tapaus 2

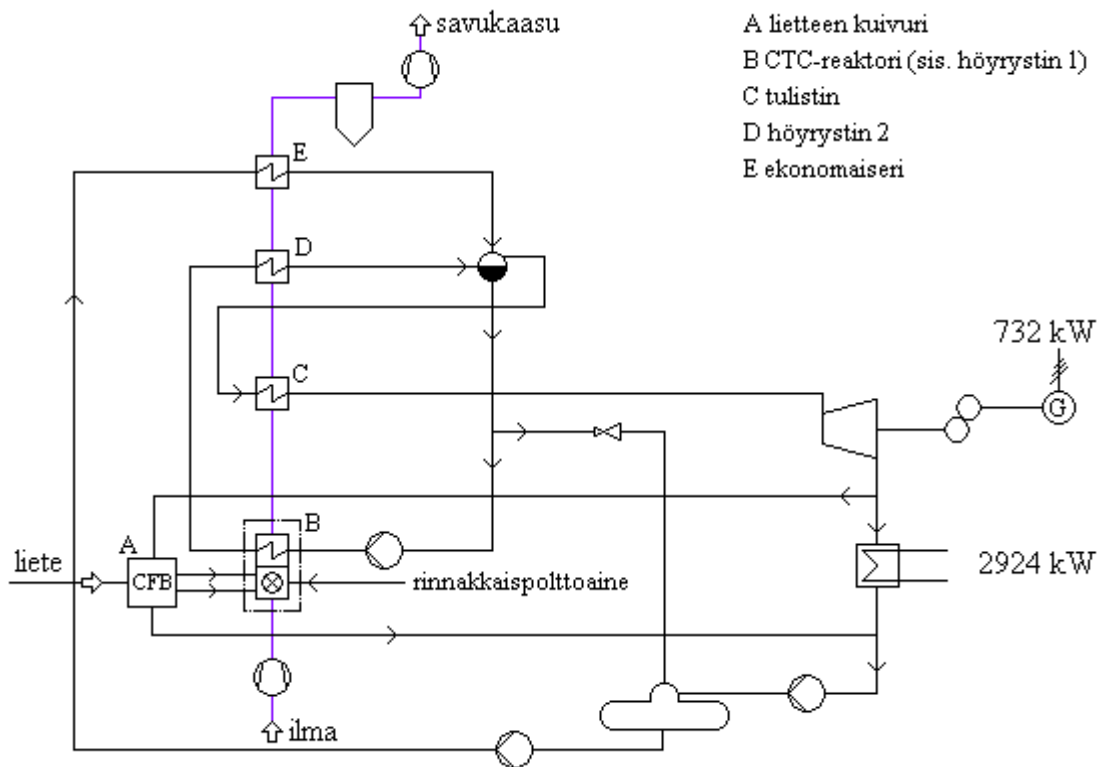
Toinen laitosvaihtoehto tuottaa kuivurille menevän lämmön ohella lämpötehon 2924 kW. Tässä tapauksessa poltetaan sama lietemäärä kuin tapauksessa 1 ja lisäksi biopolttoainetta tai kierrätyspolttoainetta. Se voi olla mitä tahansa kategoriaan kuuluvaa polttoainetta, esimerkiksi on käytetty metsätähdehaketta. Laitosvaihtoehto 2 jakautuu kahteen tutkimuslinjaan. Tapauksessa 2A lämpöteho hyödynnetään kaukolämmöksi kaukolämmönvaihtimen avulla, kun taas tapauksessa 2B kaukolämmönvaihtimen tilalla on pelletin raaka-aineen kuivuri. Tämä kuivuri on samanlainen kuin lietteen kuivuri, tarkemmat esittelyt näistä komponenteista löytyvät luvusta neljä. Nettosähköteho on tapauksessa 2A 732 kW ja tapauksessa 2B 608 kW. Laitoksen kokonaishinnan määrittämisessä taseraja on kaukolämmönvaihtimen osalta vedetty siten, että kaukolämpöpumput sekä kaukolämpöverkosto eivät sisälly hintakartoitukseen. Tapauksen 2 tärkeimpiä prosessiarvoja on koottu taulukkoon 2.

Taulukko2. Toisen laitosvaihtoehdon tärkeimmät prosessiarvot.

Lietteen ka-pitoisuus ennen kuivuria	14,2	m-%
Lietteen ka-pitoisuus kuivurin jälkeen	90,0	m-%
Ilmakerroin	1,4	-
Savukaasun lämpötila CTC-reaktorin jälkeen	850	°C
Savukaasun lämpötila savukaasukanavan lämmönsiirrinten jälkeen	229	°C
Palamisessa vapautuva teho	8469	kW
Tuorehöyryn paine	40	bar
Tuorehöyryn lämpötila	470	°C
Tuorehöyryn massavirta	2,53	kg/s
Vastapaine	4	bar
Omakäyttöteho (tapaus 2A)	299	kW
Nettosähköteho (tapaus 2A)	732	kW
Sähköntuottohyötysuhde (tapaus 2A)	12,9	%
Omakäyttöteho (tapaus 2B)	423	kW
Nettosähköteho (tapaus 2B)	608	kW
Sähköntuottohyötysuhde (tapaus 2B)	10,7	%
Lämpöteho	2924	kW
Kaukolämpöveden massavirta	14,0	kg/s
Kaukolämpöveden menolämpötila	95	°C
Kaukolämpöveden paluulämpötila	45	°C
Pellettiraaka-aineen kuiva-ainepitoisuus ennen kuivausta	45	m-%
Pellettiraaka-aineen kuiva-ainepitoisuus kuivauksen jälkeen	85	m-%
Kuivatun pellettiraaka-aineen määrä	33200	t/a

Kiertoleijutekniikan vuoksi laitosten omakäyttötehot ovat varsin suuria. Omakäyttöteho pienentää sähköä tuottavien laitosvaihtoehtojen nettosähkötehoa. Lisäksi se aiheuttaa lämpölaitosvaihtoehdossa sähkötehon tarpeen.

Kuvassa 3 on esitetty laitoksen prosessikaavio tapauksessa 2A. Tapauksen 2B prosessikaavio eroaa tästä kuvasta ainoastaan yhden komponentin osalta. Kuvan oikeaan laitaan merkitty kaukolämmönvaihdin korvataan CFB-kuivurilla. Lisäksi laitoksen tuottama nettosähköteho pienenee arvoon 608 kW.



Kuva3. Tapauksen 2A prosessikaavio.

3.3. Tapaus 3

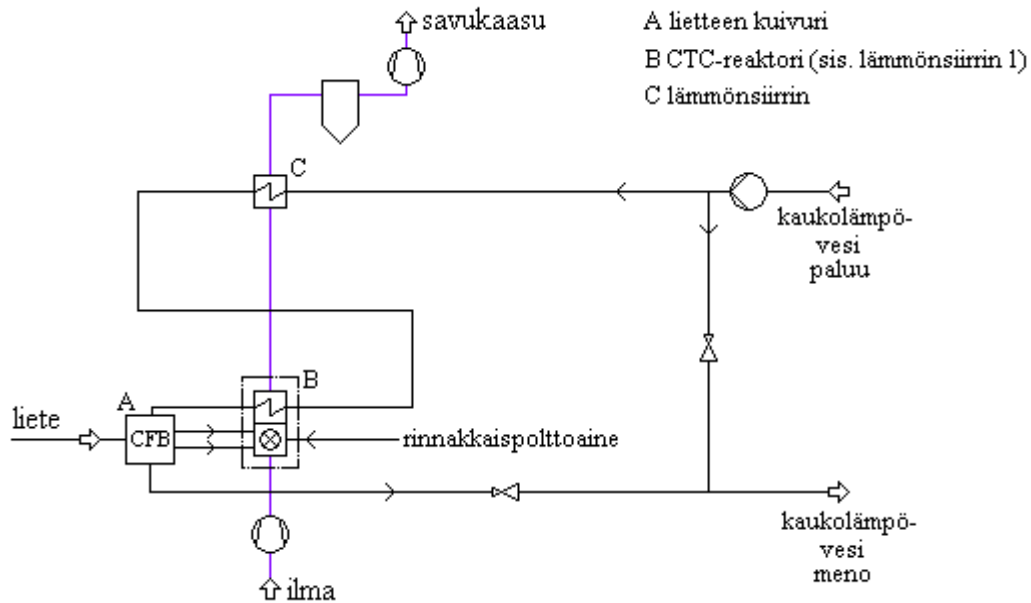
Kolmas mahdollinen laitosvaihtoehto poikkeaa selkeästi edellä esitetyistä. Tässä vaihtoehdossa ei tuoteta lainkaan sähköä, vaan kyseessä on pelkkä kaukolämpölaitos, joka tuottaa lämpötehon 4664 kW. Kuumavesikattilassa kaukolämpövesi lämpenee haluttuun lämpötilaan. Kattilasta kaukolämpövesi johdetaan lietteen kuivuriin ja sieltä osan

lämmöstään luovuttaneena kaukolämpöverkkoon. Kaukolämpölaitoksen suunnittelussa kaukolämpöveden lämpötiloina on käytetty yleisesti käytössä olevia lämpötila-arvoja. Taulukossa 3 on esitetty tapauksen 3 oleelliset prosessiarvot.

Taulukko3. Prosessiarvoja tapauksessa 3.

Lietteen ka-pitoisuus ennen kuivuria	14,2	m-%
Lietteen ka-pitoisuus kuivurin jälkeen	90	m-%
Ilmakerroin	1,4	-
Savukaasun lämpötila CTC-reaktorin jälkeen	850	°C
Prosessista poistuvan savukaasun lämpötila	150	°C
Palamisessa vapautuva teho	8469	kW
Lämpöteho	4664	kW
Omakäyttöteho	286	kW
Kattilahyötysuhde	82,0	%
Kaukolämpöveden lämpötila kattilan ulostulossa	175	°C
Kaukolämpöveden paine kattilan ulostulossa	10	bar
Kaukolämpöveden massavirta	22,3	kg/s
Kaukolämpöveden menolämpötila	95	°C
Kaukolämpöveden paluulämpötila	45	°C

Tapauksen 3 ottaminen mukaan tarkasteluun perustuu ajatukseen lietemäärän polttamisesta mahdollisimman edullisesti. Siitä huolimatta kaukolämpölaitoksessa poltetaan lietteen ohella rinnakkaispolttoainetta. Rinnakkaispolttoaineen käyttöön myös tässä laitospvaihtoehdossa on mitoitustekninen peruste. Jos laitoksessa poltettaisiin vain lietettä, kaukolämpöveden lämpötilaksi kuivurin jälkeen jäisi alle 95 °C. Tämän vuoksi lietteen rinnalla poltetaan biopolttoainetta. Polttoaineen määrä on valittu samaksi kuin tapauksessa 2. Tällöin kaukolämpöveden lämpötila kuivurin jälkeen on 125 °C ja haluttu menolämpötila saadaan sekoittamalla lähtevän kaukolämpöveden joukkoon palaavaa kaukolämpövedettä. Tällä tavoin toteutettuna kattilalla pystytään kattamaan myös ajanjakso, jolloin kaukolämpöveden menolämpötilan on oltava yli 95 °C. Kuvassa 4 on kaukolämpölaitoksen prosessikaavio.



Kuva4. Tapauksen 3 prosessikaavio.

3.4. Polttoaineet

PAKU-laitoksella poltettava yhdyskuntaliete esikäsitellään jätevedenpuhdistamolla. Esi-käsittelymenetelmästä riippuen jäteveden kuiva-ainepitoisuus nostetaan alle viidestä prosentista jopa kolmeenkymmeneen prosenttiin. (Kakko. 2007, s. 42-49) PAKU-laitoksen suunnittelussa kuiva-ainepitoisuudelle on käytetty arvoa 14,2 m-%.

CFB-kuivurille tuodaan kuivattavaksi 38 000 tonnia märkää lietettä vuodessa. Kuivurissa liete kuivataan kuiva-ainepitoisuuteen 90 m-%. Kuivatun lietteen määrä on 6 000 tonnia vuodessa ja hönkähöyryn määrä on 32 000 tonnia vuodessa.

Tapauksissa 2 ja 3 käytetään lietteen rinnalla biopolttoainetta tai rinnakkaispolttoainetta. Esimerkkilaskelmissa on käytetty metsätähdehaketta. Polttoon syötettävän metsätähdehakkeen kosteuspuiteisuutena on laskelmissa käytetty arvoa 40 m-%. Haketta poltetaan vuoden aikana 11 400 tonnia. Lietteen ja hakkeen kuiva-aineiden koostumukset sekä alemmat lämpöarvot löytyvät taulukosta 4.

Taulukko4. Polttoaineiden kuiva-aineen koostumukset.

ainesosa	Liete massaosuus [m-%]	Hake massaosuus [m-%]
C	50	50,6
H	7	6,2
N	4,8	0,5
O	15,2	42,3
S	0,9	0
Tuhka	22,1	0,4
Yht.	100	100
Alempi lämpöarvo [MJ/kg]	23,0	19,1

4. KONEET JA LAITTEET

Laitokseen sisältyviä koneita sekä laitteita on esitelty seuraavissa kappaleissa. Tekstissä on myös kerrottu laitevalmistajilta saatuja tietoja komponenttien ominaisuuksista. Tarkastelun kohteeksi on otettu seuraavat koneet ja laitteet:

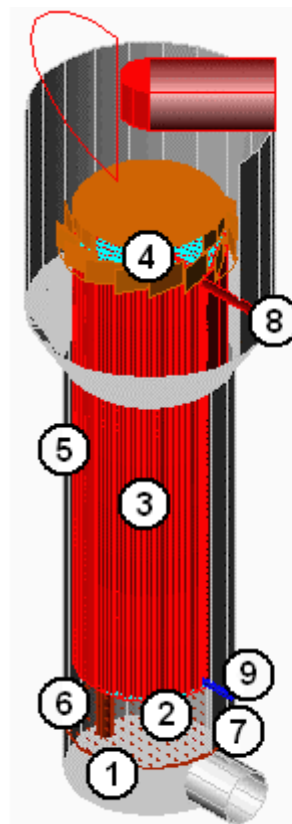
- ◆ Lietteen kuivuri
- ◆ Reaktori
- ◆ Polttoaineen käsittely
- ◆ Savukaasujen puhdistus
- ◆ Tuhkan käsittely
- ◆ Savukaasukanavan lämmönsiirtimet
- ◆ Turbogeneraattori ja vaihteisto
- ◆ Automaatio ja instrumentointi
- ◆ Sähköistys
- ◆ Päästöjen mittaus
- ◆ Kaukolämmönvaihdin
- ◆ Pelletin kuivuri
- ◆ Syöttöveden käsittely
- ◆ Syöttövesisäiliö
- ◆ Lieriö
- ◆ Pumput
- ◆ Puhaltimet
- ◆ Savupiippu
- ◆ Paineenalennusventtiili

Komponentit, joita ei esiinny edellä esitetyllä listalla, on otettu huomioon laitoksen kokonaishinnan määrittämistä varten osana kustannusvarausta. Merkittävin järjestelmä, jolle ei onnistuttu saamaan hintatietoa, on putkisto. Putkistovalmistajat tarvitsevat tarjouksen laatimiseksi tiedon putkien pituudesta ja halkaisijasta. Näiden tietojen määrittäminen PAKU-laitoksen osalta osoittautui käytössä olleesta informaatiosta huolimatta liian haasteelliseksi.

Laitokseen liittyvien sähkötekniisten komponenttien ja järjestelmien, turbogeneraattori ja vaihteisto, automaatio ja instrumentointi sekä sähköistys, osalta kustannukset on selvitetty Sähkötekniikan osastolla tehdyissä tutkimuksissa.

4.1. Lietteen kuivuri

PAKU-laitoksessa poltettavan lietteen kuivaus hoidetaan epäsuoralla kiertomassakuivurilla (CFB-kuivuri). Epäsuoran kiertomassakuivurin suurimpana etuna on se, etteivät kuivattava materiaali ja kuivaushöyry ole kosketuksissa toistensa kanssa. Tällä vältetään suorien kuivureiden perusongelma, likaisten lauhdeiden syntyminen. Lämmönsiirto epäsuorassa kuivurissa tapahtuu siis johtumalla. Muita epäsuoran kuivausprosessin etuja ovat mm. materiaalin tehokas kierto kuivurissa, hyvä lämpötilan hallinta sekä prosessin alipaineisuuden ansiosta hajuhaittojen välttäminen. (Einco Oy) Kuvassa 5 on esitetty epäsuora kiertomassakuivuri pääosineen.



- 1 Arina
- 2 Leijukammio
- 3 Lämmönsiirrin
- 4 Sisäänrakennettu sykloni
- 5 Kierron paluukanava
- 6,7 Syöttö ja ulosotto
- 8 Höyryn tuonti
- 9 Lauhteen poisto

Kuva5. Epäsuoran kiertomassakuivurin pääosat. (Einco Oy)

CFB-kuivurille tulevan märän lietteen kuiva-ainepitoisuutena on laskelmissa käytetty arvoa 14,2 m-%. Kuivurissa liete kuivataan kuiva-ainepitoisuuteen 90 m-%, jolloin turbii- nissa paisunut höyry luovuttaa lämpötehon 2985 kW CFB-kuivurille. Kuivurin kapasiteetti vuotuisella käyttöajalla 8000 h/a on 38 000 tonnia märkää lietettä vuodessa. Taulukkoon 5 on koottu kuivurin toimintaan vaikuttavia tekijöitä.

Taulukko5. Kuivurin toimintaan vaikuttavien virtausten prosessiarvot.

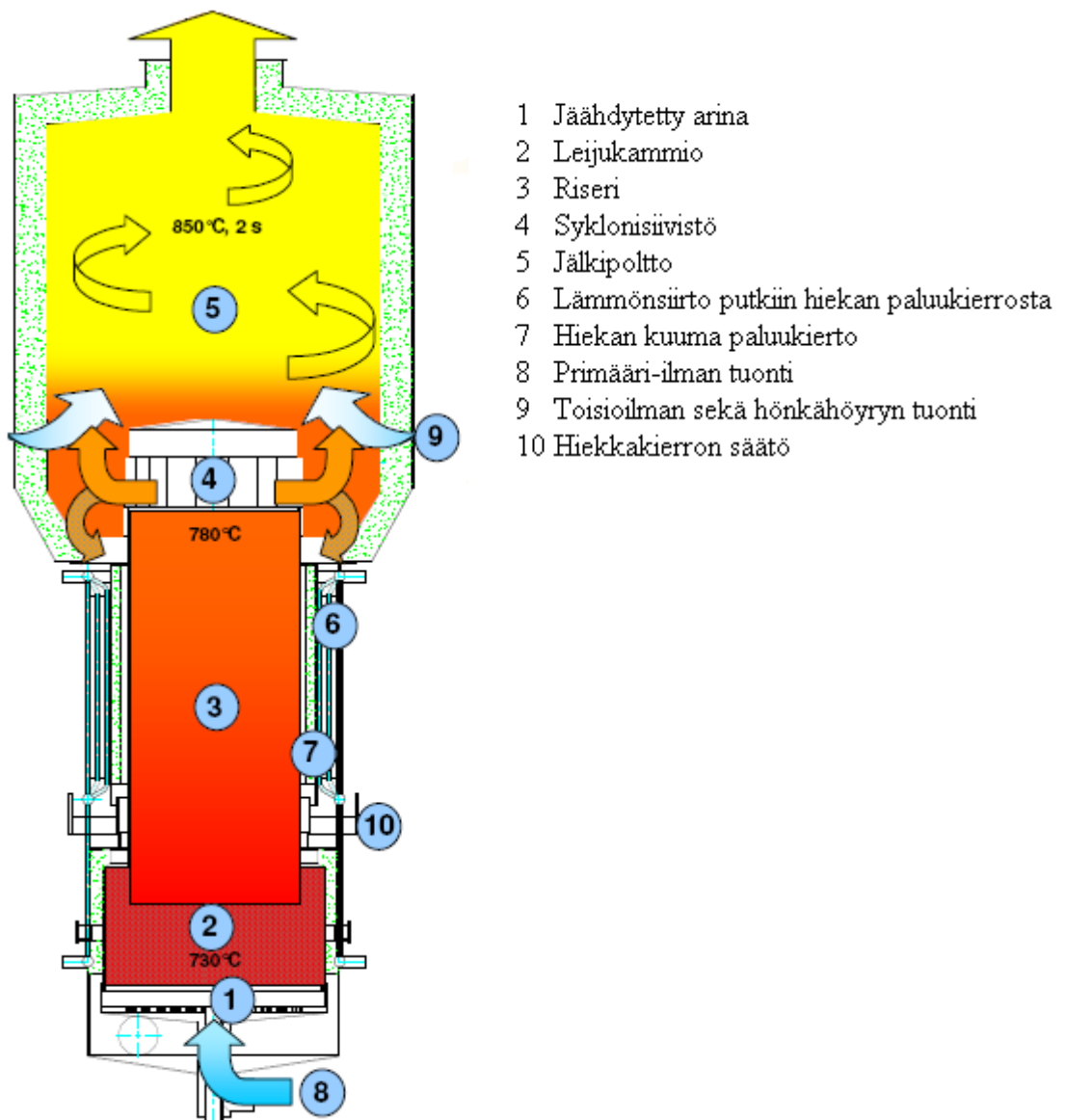
	massavirta [kg/s]	lämpötila [°C]
kuivaava höyry	1,25	254
lauhde	1,25	138
kuivuriin tuleva liete	1,32	15
kuivattu liete	0,21	100
hönkähöyry	1,12	100

Kuvissa 2-4 CFB-kuivurilta menee kaksi nuolta reaktoriin. Nämä nuolet kuvaavat kuivat- tua lietettä sekä hönkähöyryä, joka on höyrystyneen veden ja hajukaasujen seos. Reakto- rissa kuivattu liete ja hajukaasut palavat ja höyrystynyt vesi sekoittuu savukaasuihin.

Edellä esitelty epäsuora kiertomassakuivuri on erittäin keskeinen PAKU-laitoksen kompo- nentti. Se onkin investoinniltaan laitoksen kalleimpia yksittäisiä laitteita. CFB-kuivurin toi- mitus pitää sisällään kuivurin lisäksi kiertokaasupuhaltimen ja kanavan sekä lietteen syöttö- ja ulosottolaitteet. (Halme 2008a)

4.2. Reaktori

Lietteen poltto PAKU-laitoksessa tapahtuu CTC-reaktorissa. CTC-reaktori edustaa kierto- leijutekniikkaan perustuvaa polttoteknologiaa, jossa poltto tapahtuu hyvin hallituissa olo- suhteissa. CTC-reaktorissa on jälkipolttotila, jolloin ei tarvita erillistä jälkipolttokammiota. Lisäksi reaktorin putkirakenteet ovat suojassa eroosiolta ja korroosiolta sekä sen ainoa ku- luva osa on halpa, helposti vaihdettava syklonisiivistö. (Einco Oy) Kiertoleijutekniikkaa sovelluksineen voidaan pitää parhaana käytettävissä olevana tekniikkana, BAT:na yhdys- kuntalietteen polttoon tarkoitetuissa laitoksissa. (Vesanto. 2006, s. 80) Kuvassa 6 on esi- tetty CTC-reaktori pääosineen.



Kuva6. CTC-reaktorin pääosat. (Einco Oy)

Tapauksessa 1 CTC-reaktorissa poltetaan ainoastaan lietettä. Palamisen ilmakertoimena on laskennassa käytetty arvoa 1,4. Palamisessa vapautuu teho 4304 kW. CTC-reaktorissa on sisäänrakennettu lämmönsiirrin. Taulukkoon 6 on koottu reaktorissa virtaavien aineiden prosessi-arvot tapauksessa 1.

Taulukko6. Reaktorin toimintaan vaikuttavat tekijät tapauksessa 1.

	massavirta [kg/s]	lämpötila [°C]
polttoon tuleva kuivattu liete	0,21	100
polttoon tuleva hönkähöyry	1,12	100
palamisilma	1,99	17
savukaasu reaktorin jälkeen	3,27	850
kiertoaine reaktorin höyrystimelle	6,79	257
kiertoaine reaktorin höyrystimeltä	6,79	258

Tapauksissa 2 ja 3 CTC-reaktorissa poltetaan sama lietemäärä kuin tapauksessa 1 ja lisäksi metsätähdehaketta. Palamisessa vapautuva teho on 8469 kW. Palamisen ilmakertoimenä on laskennassa käytetty tapauksen 1 tavoin arvoa 1,4. Taulukosta 7 löytyy reaktorin toimintaan liittyviä prosessiarvoja tapauksissa 2 ja 3.

Taulukko7. Reaktorin toimintaan vaikuttavat tekijät tapauksissa 2 ja 3.

	massavirta [kg/s]	lämpötila [°C]
polttoon tuleva kuivattu liete	0,21	100
polttoon tuleva hönkähöyry	1,12	100
rinnakkaispolttoaine	0,40	15
palamisilma	4,05	17
savukaasu reaktorin jälkeen	5,72	850
kiertoaine reaktorin höyrystimelle	13,75	257
kiertoaine reaktorin höyrystimeltä	13,75	258

Tapauksen 3 osalta kattilaratkaisuksi voisi harkita yksinkertaista kuumavesikattilaa CTC-reaktorin sijasta. Perinteisellä tulitorvi-tuliputkikattilalla tapauksessa 3 tarvittavan veden (10 bar, 175 °C) tuottaminen onnistuu ongelmitta. Tämä vaihtoehtoinen kattilaratkaisu saattaisi tehdä kattilainvestoinnista edullisemmän ja näin ollen parantaa laitosvaihtoehdon kannattavuutta.

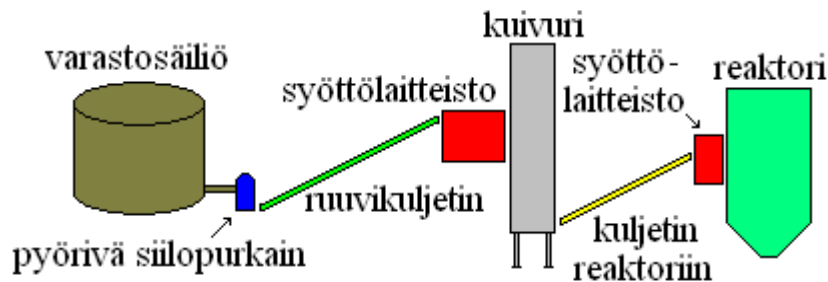
CTC-reaktoritoimitus pitää sisällään reaktorin, savukaasukanavan lämmönsiirtimet, käynnistyspolttimen sekä leijuhiekan syöttölaitteet ja pohjatuhkan ulosottolaitteet. Savukaasukanavan lämmönsiirtimiä on käsitelty tarkemmin luvussa 4.6.

4.3. Polttoaineen käsittely

Polttoaineen käsittelylaitteisto pitää sisällään useita komponentteja. Laitosvaihtoehdossa 1 poltetaan vain lietettä ja muissa laitosvaihtoehdoissa poltetaan lietteen lisäksi metsätähdehaketta. Polttoaineiden käsittelylaitteistot esitellään seuraavissa kappaleissa tapauksittain.

4.3.1. Lietteenpoltto

Kuiva-ainepitoisuus 14,2 m-%, jota on käytetty laskelmissa määrän lietteen kuiva-ainepitoisuutena, tarkoittaa lietteen olevan käytännössä nestemäistä. Tämä asettaa omat vaatimuksensa lietteenkäsittelylaitteistolle. Määrän lietteen määrä on vuodessa 38 000 tonnia, vuotuisella käyttöajalla 8 000 h/a keskimääräiseksi massavirraksi saadaan 1,323 kg/s. Kuvassa 7 on esitetty lietteen käsittelyyn tarvittavan laitteiston kokoonpano.



Kuva7. Polttoaineen käsittelylaitteisto tapauksessa 1.

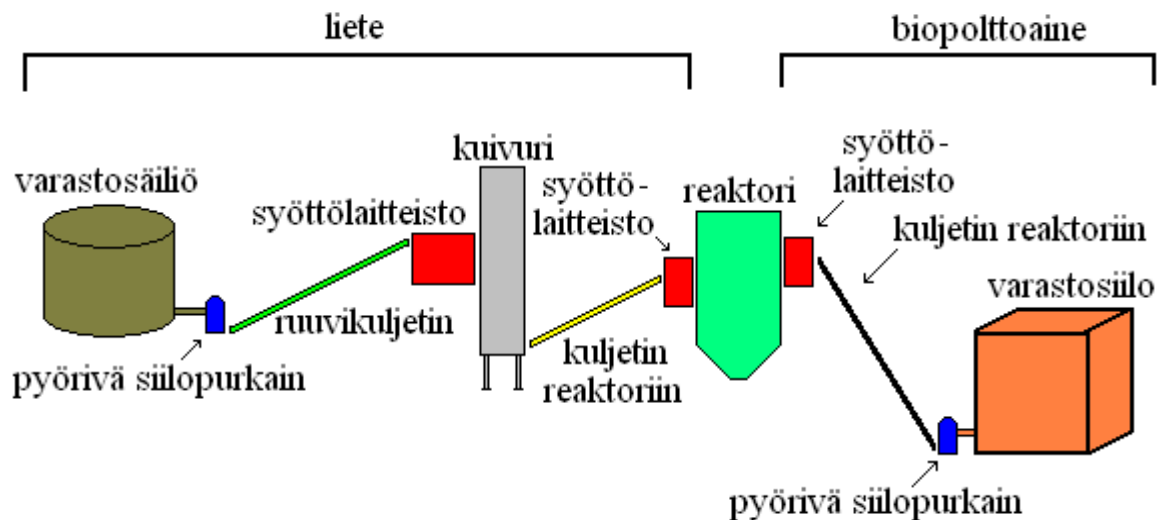
Ensinnäkin lietteen käsittelyä varten tarvitaan varastosäiliö. Säiliön on oltava riittävän suuri, jotta polttoprosessi ei keskeydy, vaikka lietteen toimitukseen tulisikin tilapäinen häiriö. Varastosäiliöön tulee mahtua kahden vuorokauden tarve. Näin ollen säiliön tilavuudeksi saadaan 230 m³, kun määrän lietteen tiheytenä käytetään veden tiheyttä. Haluttu tilavuus saadaan toteutettua säiliöllä, jonka halkaisija on 6 metriä ja korkeus 8 metriä. (Tuukkanen 2007) Säiliön paikka tulee valita siten, että autokuljetuksin tuotava liete on mahdollista helposti purkaa säiliöön. Säiliöstä liete poistetaan pyörivän siilopurkaimen avulla. Pyörivä siilopurkain on varmatoiminen ja vaatii vain vähän huoltoa. (Laitex Oy)

Ruuvikuljetin soveltuu nestemäisten aineiden siirtoon. Sellainen kuljettaa määrän lietteen CFB-kuivurin syöttölaitteistolle. Ruuvikuljettimen pituus on 10 m. Syöttölaitteiston avulla liete ohjataan kuivuriin. Syöttölaitteisto sisältyy kuivuritoimitukseen.

CFB-kuivurissa liete kuivataan kuiva-ainepitoisuuteen 90 m-%. Kuivattu liete poistetaan kuivurista kuivuritoimitukseen kuuluvan ulosottolaitteiston avulla. (Halme 2008a) Kuivurilta reaktorille lietteen siirron hoitaa 10 metrin pituinen ruuvikuljetin. Syöttölaitteisto tarvitaan myös syöttämään liete reaktoriin poltettavaksi.

4.3.2. Rinnakkaispoltto

Rinnakkaispoltossa, siis tapauksissa 2 ja 3, lietepuolen polttoaineen käsittelylaitteisto pysyy aivan samanlaisena kuin pelkässä lietteenpoltossa. Lisäksi tarvitaan biopolttoainepuolelle laitteisto polttoaineen käsittelyyn. Rinnakkaispoltossa tarvittava laitteisto näkyy kuvassa 8.

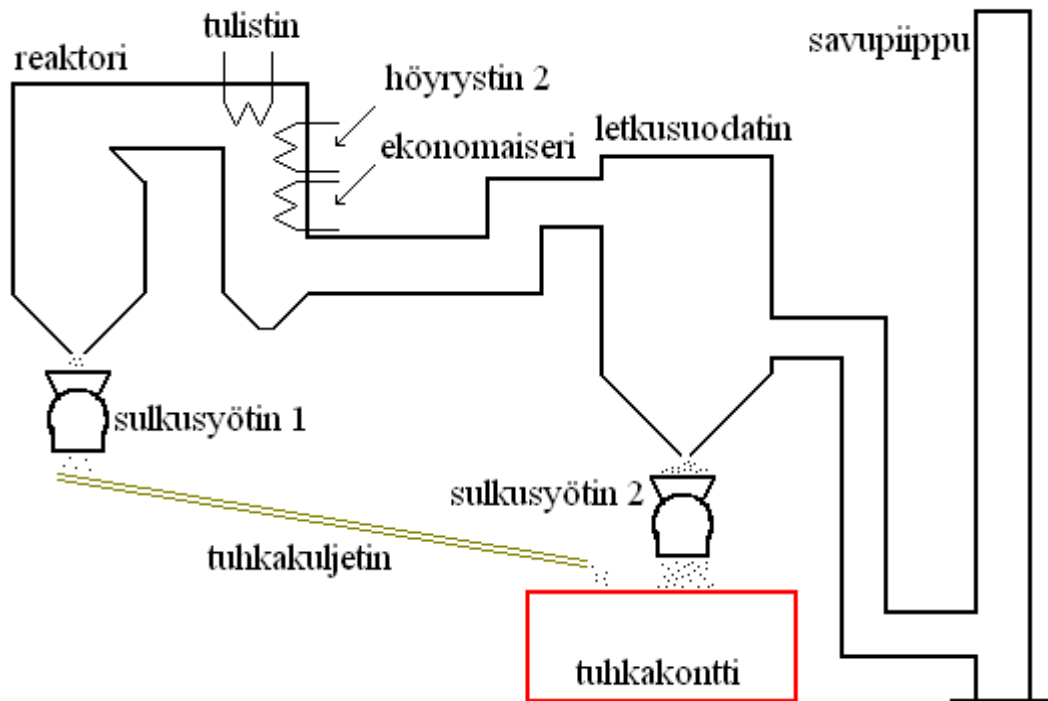


Kuva8. Polttoaineen käsittelylaitteisto rinnakkaispoltossa.

Haketta käytetään 11 400 tonnia vuodessa. Vuotuisella käyttöajalla 8 000 h/a tämä tarkoittaa keskimääräisen massavirran olevan 0,397 kg/s. Hakkeen kosteuspuiteisuus on 40 m-%. Hakkeen tiheydeksi on arvioitu 330 kg/m³. Tällöin käyttäen varastointimääränä myös hakkeelle kahden vuorokauden tarvetta saadaan varastosäilon kooksi 210 m³. Myös hake poistetaan silosta pyörivällä ruuvipurkaimella ja kuljetetaan reaktorille ruuvikuljettimella. Ruuvikuljettimen arvioitu pituus on 10 m. Hakkeen syöttämiseksi polttoon tarvitaan oma syöttölaitteisto. Se on samanlainen kuin lietepuolella.

4.4. Savukaasujen puhdistus

Savukaasu poistuu reaktorista lämpötilassa 850 °C ja johdetaan savukaasukanavaan. Savukaasukanavassa savukaasusta otetaan energiaa talteen lämmönsiirtimillä. Näistä lämmönsiirtimistä on kerrottu tarkemmin luvussa 4.6. Savukaasukanavan lämmönsiirtimien jälkeen savukaasun lämpötila on tapauksissa 1 ja 2 229 °C ja tapauksessa 3 150 °C. Tämän jälkeen savukaasu johdetaan savukaasusuodattimeen, josta se puhdistettuna ohjataan savupiipun kautta taivaalle. PAKU-laitoksessa syntyvän savukaasun puhdistamiseen riittää letkusuodatin. (Ruottu 2007) Kuvassa 9 on selvennetty savukaasun kulkua reaktorista taivaalle.



Kuva9. Savukaasun kulku prosessissa.

Letkusuodattimen toiminta perustuu siihen, että savukaasu johdetaan kankaan läpi. Kankaaseen jäävät savukaasun mukana kulkeutuvat suuret partikkelit. Letkusuodattimissa yleisesti käytetty suodatinmateriaali on lasikuitukangas. Letkusuodattimella savukaasusta erotellaan luonnollisesti myös savukaasun mukana tuleva lentotuhka. Tuhka ohjataan sulkyöttimeen kautta tuhkakonttiin.

Tapauksessa 1 savukaasun tilavuusvirta on 5,65 m³/s, tapauksessa 2 9,25 m³/s sekä tapauksessa 3 tilavuusvirta on 7,77 m³/s. Tapauksessa 1 letkusuodatin pitää sisällään 240 kpl suodatinletkua joiden yhteinen suodattava pinta-ala on 470 m². Tapauksen 2 vastaavat arvot ovat 360 kpl ja 703 m². (Kuhalainen 2008) Tapauksen 3 letkusuodattimelle ei ole pyydetty omaa tarjousta. Sen kustannus on arvioitu tapauksen 1 ja 2 letkusuodattimien tarjousten perusteella. Tämä on mahdollista, koska tapauksen 3 tilavuusvirta ja näin ollen myös letkusuodattimen koko on tapauksen 1 ja 2 välissä. Letkusuodatintoimittaja lupaa savukaasun hiukkaspitoisuuksien alittavan kirkkaasti vaaditut päästörajat. Taulukossa 8 on esitetty letkusuodattimelle saapuvien savukaasujen koostumus pelkässä lietteenpoltossa sekä rinnakkaispoltossa.

Taulukko8. Savukaasun koostumus ennen letkusuodatinta.

ainesosa	Pelkkä lietteenpoltto massaosuus [m-%]	Rinnakkaispoltto massaosuus [m-%]
Ar	0,8	0,9
CO ₂	10,5	13,7
H ₂ O	38,7	27,4
N ₂	45,9	53,2
O ₂	4,0	4,7
SO ₂	0,1	0,1
Yht.	100,0	100,0

4.5. Tuhkan käsittely

Prosessissa syntyvä tuhka poistetaan kahdessa tuhkanpoistopisteessä, reaktorin pohjatuhkana sekä lentotuhkana letkusuodattimella. Tämä selviää myös edellä esitetystä kuvasta 9. Lisäksi prosessissa on kolmas tuhkanpoistopiste, mutta sitä käytetään vain manuaaliseen tuhkan poistoon huoltojen yhteydessä. Tämä poistopiste sijaitsee lämmönsiirinyksikön pohjalla. Siihen kertyvä tuhkamäärä on käytännössä merkityksettömän pieni verrattuna kahteen muuhun tuhkanpoistopisteeseen.

Valtaosa tuhkasta poistetaan lentotuhkana letkusuodattimella. Tämä osuus on 85 %. Loppu 15 % poistetaan kattilan pohjatuhkana. (Ruottu 2007) Lietteen poltosta kertyy vuodessa tuhkaa 1200 tonnia. Laitoksen käyttövuorokautta kohti tämä tarkoittaa noin kolmea ja

puolta tonnia. Tapauksissa 2 ja 3 mukana oleva biopolttoaineen poltto ei juurikaan lisää kertyvää tuhkamäärää. Näissä tapauksissa tuhkaa syntyy vuodessa 1230 tonnia. Tähän vähäiseen tuhkamäärän lisääntymiseen löytyy syy taulukosta 4. Lietteen kuiva-aineesta peräti 22,1 % on tuhkaa, kun taas kuivassa biopolttoaineessa tuhkaa on vain 0,4 %.

Tuhkan käsittelyyn tarvitaan sulkusyöttimet molempiin jatkuvatoimisiin tuhkanpoistopisteisiin. Tuhka kerätään tuhkakonttiin, joka sijoitetaan suoraan letkusuodattimen alle. Näin ollen letkusuodatin pystyy purkamaan oman tuhakuormansa suoraan sulkusyöttimen kautta tuhkakonttiin. Pohjatuhkan siirtämiseen reaktorilta tuhkakonttiin tarvitaan kolakuljetin. Tämän kolakuljettimen pituus on 10 m. Tuhkalla ei ole jäähdystarvetta. Mahdollinen tuhkan jäähdytys tulisi kyseeseen ainoastaan pohjatuhkan osalta, mutta pohjatuhkan massavirran ollessa näin pieni, jäähdytystä ei tarvita. (Ruottu 2007)

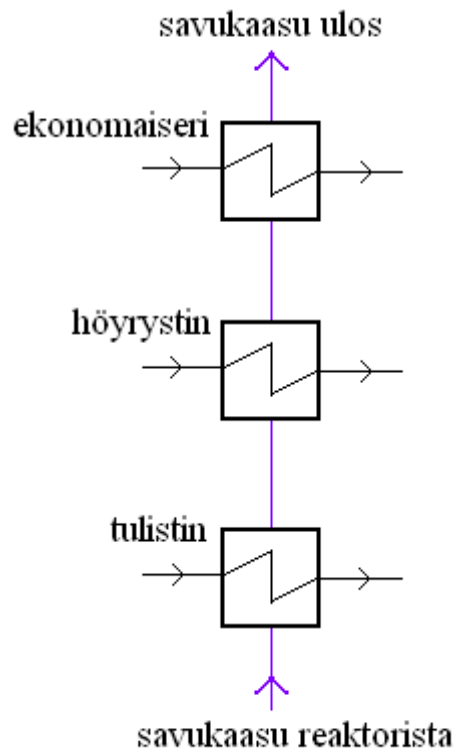
Tuhkakontti on varustettu tasausruuvilla, joka sekoittaa kontissa olevaa tuhkaa. (Tuukkanen 2007) Tuhkakontin tilavuudeksi on oletettu 10 m^3 , tällöin sen tyhjentämisväli on lähes kolme päivää, kun tuhkan tiheytenä käytetään arvoa 1000 kg/m^3 . Tuhkakontti ei ole ainoa mahdollinen tuhkaneräyskeino. Esimerkiksi traktorin tai kuorma-auton peräkärri voisi tulla kyseeseen tuhkakontin vaihtoehtoja pohdittaessa. Tähän valintaan vaikuttaa oleellisesti laitoksen sekä tuhkan loppusijoituspaikan välinen etäisyys.

4.6. Savukaasukanavan lämmönsiirtimet

Savukaasu poistuu reaktorista lämpötilassa $850 \text{ }^\circ\text{C}$. Se pitää sisällään suuren määrän lämpöenergiaa, joka kannattaa ottaa talteen. Talteenotto tapahtuu savukaasukanavan lämmönsiirtimien, tulistimen, höyrystimen ja ekonomaiserin, avulla. Näiden lämmönsiirrinten avulla savukaasun lämpö siirretään prosessissa kiertävään veteen. Lämmön talteenotto savukaasuista parantaa sähköntuottohyötysuhdetta.

Tapauksissa 1 ja 2 savukaasukanavassa on kolme edellä mainittua lämmönsiirrintä. Tapauksessa 3 lämmönsiirtimiä on vain yksi. Tämän selittää laitoksen käyttötarkoitus. Kyseessä on kaukolämpölaitos, joka toimittaa veden kaukolämpöverkkoon lämpötilassa $95 \text{ }^\circ\text{C}$. Kaukolämpövedellä ei ole höyrystys eikä tulistustarvetta. Kaikkien tapausten osalta savukaasukanavan lämmönsiirtimet kuuluvat reaktoritoimitukseen. (Halme 2008b)

Kuvassa 10 on lämmönsiirrinten järjestys savukaasukanavassa tapauksissa 1 ja 2. Tämä asia ilmenee myös kuvista 2 ja 3. Savukaasukanavan lämmönsiirtimet on esitelty seuraavissa kappaleissa siinä järjestyksessä, missä prosessin kiertoaine niiden läpi kulkee.



Kuva10. Lämmönsiirtimet savukaasukanavassa.

4.6.1. Ekonomaiseri

Syöttöveden esilämmitin, ekonomaiseri, lämmittää syöttövettä. (Huhtinen et al. 2000, s. 194) Syöttövesipumppu pumppaa prosessissa kiertävän veden syöttövesisäiliöstä ekonomaiserin kautta lieriöön. Ekonomaiseri on viimeinen lämmönsiirrin savukaasukanavassa, savukaasun lämpötila on siksi laskenut jo merkittävästi savukaasun saapuessa ekonomaiseriin.

PAKU-laitoksen ekonomaiserit tapauksissa 1 ja 2 ovat helposti toteutettavissa. Tulevien savukaasujen lämpötila on molemmissa tapauksissa alle 400 °C, näissä lämpötiloissa materiaalien kestävyys ei normaalisti aiheuta ongelmia. Savukaasupuolella virtaavan kaasun lämmönsiirto-ominaisuuksien ollessa kertaluokkaa huonommat kuin ekonomaiserin toisella puolella virtaavan veden, kaasupuolen lämmönsiirtopinta-alan kasvattamista rivoituk-

sella on syytä pohtia ekonomaiseria valmistettaessa. (Huhtinen et al. 2000, s. 195) Tapauksessa 1 ekonomaiserin teho on 596 kW ja tapauksessa 2 teho on 1207 kW. Taulukkoon 9 on koottu ekonomaisereihin tulevien sekä niistä poistuvien virtausten prosessiarvoja.

Taulukko9. Ekonomaisereiden virtaukset tapauksissa 1 ja 2.

Tapaus 1			
	massavirta [kg/s]	lämpötila [°C]	paine [bar]
Kiertoaine sisään	1,39	151	46,8
Kiertoaine ulos	1,39	247	44,4
Savukaasu sisään	3,27	358	1,0
Savukaasu ulos	3,27	229	1,0
Tapaus 2			
	massavirta [kg/s]	lämpötila [°C]	paine [bar]
Kiertoaine sisään	2,81	151	46,8
Kiertoaine ulos	2,81	247	44,4
Savukaasu sisään	5,72	389	1,0
Savukaasu ulos	5,72	229	1,0

4.6.2. Höyrystin

Keskimmäinen savukaasukanavan lämmönsiirtimistä on höyrystin. Höyrystimessä kiertoaineen olomuoto muutetaan vedestä höyryksi. Höyrystimien virtausten prosessiarvot tapauksissa 1 ja 2 löytyvät taulukosta 10.

Taulukko10. Höyrystimien virtaukset tapauksissa 1 ja 2.

Tapaus 1			
	massavirta [kg/s]	lämpötila [°C]	paine [bar]
Kiertoaine sisään	6,79	257	46,8
Kiertoaine ulos	6,79	258	45,6
Savukaasu sisään	3,27	714	1,0
Savukaasu ulos	3,27	358	1,0
Tapaus 2			
	massavirta [kg/s]	lämpötila [°C]	paine [bar]
Kiertoaine sisään	13,75	258	45,6
Kiertoaine ulos	13,75	257	44,4
Savukaasu sisään	5,72	678	1,0
Savukaasu ulos	5,72	389	1,0

Höyrystimen teho tapauksessa 1 on 1772 kW ja tapauksessa 2 teho on 2323 kW. Kuvissa 2 ja 3 CTC-reaktorin yhteyteen on piirretty lämmönsiirrin. Tämä lämmönsiirrin on myös höyrystin. Tapauksessa 1 sen teho on 388 kW ja tapauksessa 2 teho on 2052 kW. Tämä lämmönsiirrin on olennainen osa CTC-reaktoria.

4.6.3. Tulistin

Reaktorista poistuttuaan savukaasu menee ensin tulistimeen. Tulistin on kiertoaineelle viimeinen lämmönsiirrin ennen paisumista turbiinissa. Tulistimeen saapuvaa höyryä tulistetaan 213 °C. Tällöin turbiinille menevän höyryn lämpötila on 470 °C. Tämä lämpötila ei tuota ongelmia tulistinmateriaalien kestävyyteen. Nykyisin tulistimissa käytettävät materiaalit soveltuvat jopa yli 550 °C lämpötiloihin.

Tapauksessa 1 tulistimen teho on 722 kW ja vastaavasti tapauksessa 2 teho on 1461 kW. Taulukkoon 11 on koottu tulistimiin tulevien sekä niistä poistuvien virtausten prosessi-arvot. Molemmassa tapauksissa höyryn sisältämä tulistus on samansuuruinen.

Taulukko11. Virtaukset tulistimissa tapauksissa 1 ja 2.

Tapaus 1			
	massavirta [kg/s]	lämpötila [°C]	paine [bar]
Kiertoaine sisään	1,25	257	44,4
Kiertoaine ulos	1,25	470	40,0
Savukaasu sisään	3,27	850	1,0
Savukaasu ulos	3,27	714	1,0
Tapaus 2			
	massavirta [kg/s]	lämpötila [°C]	paine [bar]
Kiertoaine sisään	2,53	257	44,4
Kiertoaine ulos	2,53	470	40,0
Savukaasu sisään	5,72	850	1,0
Savukaasu ulos	5,72	678	1,0

4.6.4. Lämmönsiirrin tapauksessa 3

Tapauksessa 3 on savukaasukanavassa siis vain yksi lämmönsiirrin. Tämän lämmönsiirtimen tarkoituksena on nostaa palaavan kaukolämpöveden lämpötila yhdessä reaktorin sisältämän lämmönsiirtimen kanssa riittävän korkeaksi, jotta sitä voidaan käyttää CFB-kuivurin kuivaavana väliaineena. Tämän lämmönsiirtimen teho on melko suuri, 5573 kW. Taulukossa 12 on esitetty virtausten prosessiarvot lämmönsiirtimessä.

Taulukko12. Virtaukset tapauksen 3 lämmönsiirtimessä.

	massavirta [kg/s]	lämpötila [°C]	paine [bar]
Kiertoaine sisään	13,83	45	12,3
Kiertoaine ulos	13,83	141	11,2
Savukaasu sisään	5,72	850	1,0
Savukaasu ulos	5,72	150	1,0

Myös tapauksessa 3 CTC-reaktorissa on lämmönsiirrin. Se vastaa teholtaan tapauksen 2 CTC-reaktorissa olevaa höyrystintä.

4.7. Turbogeneraattori ja vaihteisto

Laitosvaihtoehtoihin 1 ja 2 tarvitaan turbogeneraattori ja vaihteisto, jotta laitos tuottaisi sähköenergiaa. Tulistettu höyry ohjataan turbiiniin, jonka läpi virranneen höyryn energiasta osa saadaan muutetuksi turbiinia pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi. Turbiini pyörittää vaihteiston välityksellä generaattoria, jossa mekaaninen energia muunnetaan sähköenergiaksi. Turbogeneraattorin ja vaihteiston osalta hintatiedot on saatu Lappeenrannan teknillisen yliopiston Sähkötekniikan osastolla tehdyistä tutkimuksista.

4.8. Automaatio ja instrumentointi sekä sähköistys

Myös laitoksen automaation ja instrumentoinnin sekä sähköistyksen kustannukset on arvioitu Sähkötekniikan osastolla aiemmin toteutettujen vastaavan kokoluokan hankkeiden perusteella. Kustannuksissa ei ole suurta eroa laitosvaihtoehtojen välillä. Tapauksen 2 sähköistys on arvioitu hieman tapauksen 1 ja 3 sähköistystä kalliimmaksi. Tämä perustuu erityisesti tapauksen 2 isompiin koneisiin ja laitteisiin.

4.9. Syöttöveden käsittely

Syöttöveden käsittelyyn PAKU-laitokselle tarvitaan laitteisto tapauksiin 1 ja 2. Verkostovesi on suolapitoista ja sitä ei voida käsittelemättä käyttää voimalaitoksen lisävetenä. (Koskelainen) PAKU-laitokseen tarvittava laitteisto sisältää käänteisosmoosilaitteen, vedenpehmentimen sekä sekaioninvaihtimena toimivan vaihtosuodatinpatruunan. (Nieminen 2008) Vesihöyryprosessiin tuotavan lisäveden määrää voidaan säätää jatkuvan ulospuhalluksen avulla. Käytetyssä prosessimallissa ei ole huomioitu ulospuhallusta.

4.10. Kaukolämmönvaihdin

Kaukolämmönvaihdin tarvitaan tapaukseen 2A. Se on teholtaan 2924 kW ja tyypiltään hitsattu levylämmönsiirrin. (Mäntynen 2007) Turbiinilta lämmönsiirtimeen tulevan höyryn paine on 4 bar. Lämmönsiirtimen tärkeimpiä lämpötekniisiä mitoitusarvoja on koottu taulukkoon 13.

Taulukko13. Kaukolämmönvaihtimen lämpöteknisiä mitoitusarvoja.

	Kylmäpuoli	Kuumapuoli
Sisääntulolämpötila [°C]	45,0	228,3
Ulostulolämpötila [°C]	95,0	137,8
Massavirta [kg/s]	14,0	1,3
Painehäviö [kPa]	17,5	18,2

Kuumalla puolella kiertoaine tulee lämmönsiirtimeen höyrynä, lauhtuu kylmäiseksi vedeksi ja alijäähtyy 4 °C. Kylmän puolen kiertoaine on kaukolämpövedettä. Palaavan kaukolämpöveden paine on 3,5 bar. Lämmönsiirtimessä kaukolämpöveden lämpötilaa nostetaan 50 °C. Kaukolämmönvaihtimen hintaa tiedusteltiin vain yhdeltä valmistajalta, Vahterus Oy:ltä. Siltä saatiin tarjous ja siinä mainittua hintaa on käytetty osana laitoksen kokonaishintaa.

4.11. Päästöjen mittaus

Laitoksen käyttämistä polttoaineista johtuen laitokseen tarvitaan myös jatkuvatoiminen päästömittauslaitteisto. Sen tehtävänä on analysoida savukaasun koostumusta. Laitteiston tulee tallentaa kaikki keräämänsä informaatio muistiin. Päästömittauslaitteiston toimintaa on tarkkailtava ja määräajoin puolueettoman tahon on suoritettava laitteiston tarkistusmittaus ja mahdollinen kalibrointi.

4.12. Pelletin kuivuri

Tässä työssä pelletin kuivurilla tarkoitetaan kuivuria, jolla kuivataan pelletin raaka-ainetta kosteaa sahanpurua. Investointikustannuksena pelletin kuivurille on käytetty samaa euro-määrää kuin lietteen kuivurille. Lietteen kuivurin teho on 2985 kW ja pelletin kuivurin teho vain 2 % pienempi, 2924 kW. Pelletin kuivurin investointikustannus lienee todellisuudessa varsin lähellä lietteen kuivurin investointikustannusta. Sahanpurun kuivaaminen onnistuu CFB-kuivurilla vähintään yhtä helposti kuin lietteen kuivaaminen. Pellettiraaka-aineen kuiva-ainepitoisuus ennen kuivuria on 45 m-% ja kuivurin jälkeen 85 m-%. Vuodessa kuivattavan pellettiraaka-aineen määrä on 33 200 t.

4.13. Muut komponentit

Edellä esiteltyjen isojen ja kalliiden järjestelmien ja komponenttien ohella voimalaitokseen kuuluu myös muita komponentteja. Näiden yksittäisten komponenttien investointikustannus ei ole merkittävä, mutta ne on siitä huolimatta syytä ottaa mukaan kokonaiskustannustarkasteluun.

4.13.1. Syöttövesisäiliö

Höyryvoimalaitoksen toiminnan kannalta tärkeä komponentti on syöttövesisäiliö. Syöttövesisäiliön tehtävänä on toimia vesivarastona ja siten varmistaa veden riittäminen kiertoon. (Koskelainen) Lisäksi syöttövesisäiliö toimii sekoitusilämmittimenä. Lämmitys tapahtuu lieriöstä otettavalla kylläisellä vedellä. PAKU-laitokseen syöttövesisäiliö tarvitaan tapauksiin 1 ja 2. Syöttövesisäiliön paine on 4,8 bar ja lämpötila 150 °C. Tapauksessa 1 syöttövesisäiliön tilavuus on 2,4 m³. Tapauksessa 2 tarvitaan suurempi syöttövesisäiliö, sen tilavuuden tulee olla 5,0 m³. Seinämän paksuudeksi riittää molemmissa syöttövesisäiliöissä 8 mm. (Liikola 2008)

Syöttövesisäiliö on varustettu kaasunpoistimella. Kaasunpoistimen tehtävänä on poistaa syöttövedeen liuenneet lauhtumattomat kaasut. Kaasunpoistin on tarkoitettu ennen kaikkea hapenpoistoon, mutta se poistaa myös muut kaasut (Kymäläinen. 2001, s. 43) Kaasunpoistolla pyritään estämään korroosiota.

Syöttövesisäiliöistä tarjouksia kysyttiin kolmelta yritykseltä. Kahdelta saatiin tarjoukset ja näistä kahdesta Högfors Oy:n tarjous oli kattavampi. Siinä mainittuja hintoja on käytetty laitoksen kokonaishinnan määrittämiseen.

4.13.2. Lieriö

PAKU-laitoksessa käytetystä kattilaratkaisusta johtuen laitoksen kustannustarkasteluun on otettava huomioon myös lieriö. Lieriö erottaa kattilan höyrystinputkissa höyrystyneen kylmäisen höyryn kylläisestä vedestä. Veden ja höyryn erottuminen lieriössä perustuu niiden väliseen tiheyseroon. Höyry-vesi seos on pyrittävä tuomaan lieriöön mahdollisimman ta-

saisena virtana, jotta erottuminen tapahtuisi mahdollisimman täydellisesti. (Huhtinen et al. 2000, s. 117)

Lieriö on rakenteeltaan yksinkertainen komponentti, neljällä virtausyhteellä varustettu umpinainen säiliö. Tärkeimmän valmistusteknisen vaatimuksen aiheuttaa lieriön korkea paine, 44,5 bar. Tämä asettaa erityisesti vaatimuksia käytettäville materiaaleille sekä seinämien paksuuksille. Tapauksessa 1 lieriön tilavuus on 1,6 m³ ja tapauksessa 2 tilavuudeksi tarvitaan 3,3 m³. Tapauksessa 1 seinämien paksuudeksi riittää 20 mm, kun tapauksen 2 seinämillä vaaditaan paksuus 25 mm. (Liikola 2008) Myös PAKU-laitoksen lieriöistä tarjoukset laati Högfors Oy.

4.13.3. Pumput

Höyryvoimalaitosprosessissa on perinteisesti ainakin kaksi pumppua, lauhdepumppu ja syöttövesipumppu sekä pakkokiertokattilan kyseessä ollen kolmas, pakkokiertopumppu. Sillä varmistetaan veden kiertäminen lieriöstä reaktorin höyrystimen kautta takaisin lieriöön. PAKU-laitoksessa on pakkokiertokattila, joten pumppuja on kolme. Valmistusteknisesti haastavin pumppu on pakkokiertopumppu. Korkea lämpötila yhdistettynä hyvin pieneen paineen nousuun aiheuttaa pumppuissa käytettäville materiaaleille kovat vaatimukset. (Heikkilä 2008) Lauhde- ja syöttövesipumppuista saatiin tarjoukset Sulzer Pumps Finland Oy:ltä. Pakkokiertopumppuista pyydettiin tarjouksia kahdelta valmistajalta, mutta kumpikaan ei pystynyt takaamaan pumpun kestävyyttä toimintapisteessään. Pakkokiertopumpulle ei ole arvioitu hintaa, eikä sitä siksi ole otettu mukaan koneiden ja laitteiden kokonaishintaan. Tapaukseen 3 tarvitaan pumppu, joka nostaa palaavan kaukolämpöveden paineen kattilapaineeseen. Tätä pumppua ei ole otettu mukaan laitoksen kustannus rakenteen tarkasteluun.

4.13.4. Puhaltimet

Laitokseen tarvitaan myös kaksi puhallinta. Ilmapuhaltimen tehtävänä on puhaltaa palamisilmaa reaktoriin. Savukaasupuhallin taas puhaltaa savukaasut savupiipun kautta taivaalle. Puhaltimet ovat tyypiltään keskipakoispuhaltimia. (Järvenpää 2008) Kiertoleijutekniikan vuoksi kattilan painehäviö on melko suuri, jopa yli 10 kPa, mutta

savukaasupuhaltimien kustannukset on määritetty jonkin verran pienemmän painehäviön perusteella. Tarve suuremmalle paineenousulle ei kuitenkaan aiheuta merkittäviä muutoksia savukaasupuhaltimien hintoihin. Kuivuritoimitus pitää sisällään kuivurissa tarvittavan kiertokaasupuhaltimen. Taulukossa 14 on ilma- ja savukaasupuhaltimien tärkeimpiä toiminta-arvoja. Tapauksen 3 puhaltimille ei ole pyydetty erillistä tarjouspyyntöä, kustannusarvioina on käytetty tapauksen 2 puhaltimien hintoja.

Taulukko14. Puhaltimien oleelliset toiminta-arvot tapauksissa 1 ja 2.

	Tapaus 1		Tapaus 2	
	ilmapuhallin	savukaasupuhallin	ilmapuhallin	savukaasupuhallin
tilavuusvirta [m ³ /s]	1,63	5,65	3,32	9,25
lämpötila [°C]	15	229	15	229
tulopaine [bar]	1,013	1,009	1,013	1,009
paineenousu [bar]	0,020	0,004	0,020	0,004
pyörimisnopeus [1/min]	2140	1090	1530	730
moottorin teho [kW]	7,5	7,5	11,0	11,0

4.13.5. Savupiippu

Laitokseen tarvittavan savupiipun korkeudeksi on arvioitu 40 metriä. Korkeuden arvioimisessa on käytetty apuna Suomeen rakennetun osittain lietettä polttavan biolämpövoimalaitoksen ympäristölupaa. (Itä-Suomen ympäristölupavirasto 2006 s. 17) Savupiipun ulkohalkaisija on 1300 mm ja hormin halkaisija on 758 mm. (Autio 2008b) Savupiippuun tulevan savukaasun tilavuusvirta on 5,65 m³/s tapauksessa 1, 9,25 m³/s tapauksessa 2 sekä 7,77 m³/s tapauksessa 3. Savukaasun nopeus savupiipussa ei saa juurikaan ylittää arvoa 20 m/s, liian nopeasti savupiipussa virtaava savukaasu aiheuttaa häiritsevän kovaäänistä vinkumista. (Autio 2008a)

4.13.6. Paineenalennusventtiili

Kuvissa 1 ja 2 lieriöstä reaktorin höyrystimelle menevästä putkilinjasta erkanee putki, joka menee syöttövesisäiliöön. Tämän ratkaisun tarkoituksena on syöttövesisäiliössä olevan veden lämmittäminen. Kaksi prosenttia lieriöltä reaktorille menevästä kylläisestä vedestä ohjataan syöttövesisäiliön lämmitykseen.

Kylläinen vesi kulkee painetta alentavan paisuntaventtiilin läpi. Siinä veden tila muuttuu kylläisestä vedestä kosteaksi höyryksi. Höyryn annetaan paisua venttiilissä syöttövesisäiliössä olevaan 4,8 bar paineeseen. Venttiilin säätäminen toteutetaan venttiilin mukana toimitettavan moottorin avulla. (Heijala 2008)

Myös tapauksessa 3 on käyttöä paineenalennusventtiilille. Itse asiassa niitä tarvitaan tähän laitosvaihtoehtoon kaksi kappaletta. Erona edellä esitettyyn tapauksissa 1 ja 2 tarvittavaan paineenalennusventtiiliin on se, että tapauksen 3 paineenalennusventtiilissä ei tapahdu veden olomuodon muutosta. Tämä tekee venttiilin rakenteesta yksinkertaisemman ja näin ollen myös investoinniltaan halvemman. Ensimmäinen venttiili sijaitsee kaukolämpöveden meno- ja paluupuolet yhdistävässä linjassa. Tämän putkilinjan tarkoituksena on kaukolämpöverkkoon menevän kaukolämpöveden jäähdyttäminen. Paisuntaventtiilissä on säätömahdollisuus. Kesällä verkostoon menevän veden jäähdytystarve on suurempi ja talvella vastaavasti pienempi. Toinen paineenalennusventtiili sijaitsee CFB-kuivurin jälkeen. Se alentaa kuivurilta tulevan kaukolämpöveden paineen kaukolämpöverkon vaatimusten mukaiseksi.

4.14. Koneiden ja laitteiden asennukset

Koneiden ja laitteiden asennukset eivät sisälly yrityksiltä saatuihin tarjouksiin. Eri koneiden ja laitteiden asentamisen kustannus saattaa vaihdella huomattavasti. Jollain komponentilla asennukseksi riittää pelkkä komponentin asettaminen oikeaan paikkaan, kun taas jonkin toisen komponentin asentamiseen joutuu tekemään merkittävän lisätyön. Keskimääräisenä asennuskustannuksena on tässä työssä käytetty arvoa 10 % koneiden ja laitteiden hankintahinnasta.

4.15. Muut investointikustannukseen vaikuttavat tekijät

Luvussa 2 esitetyn mukaisesti investointikustannus koostuu viidestä kustannusryhmästä. Investointikustannus pitää sisällään koneet ja laitteet asennettuina, rakennustekniset työt, suunnittelun ja valvonnan, kustannusvarauksen sekä rakennusaikaiset korot. Koneisiin ja laitteisiin sisältyviä komponentteja on esitelty edellisissä kappaleissa.

Rakennusteknisiin töihin kuuluu rakennuksen tekeminen sekä tontti. Rakennusteknisten töiden kustannusta on arvioitu kirjallisuuden sekä toteutettujen hankkeiden perusteella. Tapauksille 1 ja 3 rakennusteknisten töiden kustannukseksi on arvioitu 200 000 euroa ja tapaukselle 2 arvio on 300 000 euroa. Tapauksen 2 korkeampaa hintaa selittää laitoksen suurempi koko. Laitokselta vaaditaan mm. suurempaa tilavuutta sekä kestävämpiä valuratkaisuja.

Suunnittelu ja valvonta arvioidaan asennettujen koneiden ja laitteiden sekä rakennusteknisten töiden kustannusten perusteella. Tässä työssä suunnittelun ja valvonnan kustannusarviona on käytetty yleisesti käytettyä arvoa 10 % asennettujen koneiden ja laitteiden sekä rakennusteknisten töiden muodostamasta kokonaissummasta.

Kustannusvarauksella tarkoitetaan prosentuaalista lisäystä investointikustannukseen, joka kattaa ennakoimattomat kustannuskomponentit. (Kymäläinen. 2001, s. 59) Kokonaisvaraus pystytään määrittämään käyttäen jokaiselle kustannusryhmälle omaa kustannusvarausta. Tässä työssä kokonaisvaraus on määritetty käyttäen kaikille kustannusryhmille samaa kustannusvarausta. Kustannusvarauksena on käytetty arvoa 10 %. Kustannusvaraus lasketaan asennettujen koneiden ja laitteiden, rakennusteknisten töiden sekä suunnittelun ja valvonnan kokonaissummasta. Kirjallisuudessa kustannusvarauksena näkee usein käytettävän pienempää arvoa kuin 10 %, mutta PAKU-laitoksen osalta 10 %:n käyttäminen on perusteltua. Koneiden ja laitteiden hintaselvityksessä putkistolle ei onnistuttu saamaan kustannusarviota. Oletettavasti se on muutaman prosentin luokkaa koneiden ja laitteiden kokonaiskustannuksesta. Putkisto omalta osaltaan syö kustannusvarausta, siksi tässä työssä kustannusvaraukseksi on valittu arvo 10 %.

PAKU-laitoksen rakentaminen on tarkoitus tehdä nopeassa aikataulussa. Siitä syystä rakennusaikaisiksi korkoiksi on arvioitu 3 %. Kustannusten on tässä tarkastelussa oletettu jakautuvan tasaisesti koko rakennusajalle. Etupainotteinen maksuohjelma saattaa hieman korottaa rakennusaikaisia korkoja.

5. LAITOSVAIHTOEHTOJEN KOKONAISHINNAT

Laitosvaihtoehtojen investointikustannusten määrittäminen osoittautui varsin haasteelliseksi tehtäväksi. Koneiden ja laitteiden hintoja tiedusteltiin lähes neljäntäkymmeneltä yritykseltä, joista alle 30 % antoi tarjouksen kysytystä komponentista. Kaikki saadut tarjoukset olivat budjettihintoja, joissa arvonlisävero on 0 %. Tästä syystä myös alla olevissa taulukoissa esiintyvät hinnat ovat arvonlisäverottomia hintoja. Koneiden ja laitteiden hinnat summattiin ja muut investointikustannukseen vaikuttavat tekijät otettiin huomioon luvun 4.15 mukaisesti. Määritetyt laitosvaihtoehtojen investointikustannukset löytyvät taulukosta 15.

Taulukko15. Laitosvaihtoehtojen investointikustannukset.

	Tapaus 1	Tapaus 2A	Tapaus 2B	Tapaus 3
Investointikustannus [milj. €]	5,7	7,9	9,3	6,2

Laitosvaihtoehto 1 on hieman yllättäen kokonaisinvestoinniltaan halvin. Tapaus 3 on 500000 € kalliimpi, vaikka siinä tarkoituksena on mahdollisimman edullisen kaukolämpölaitoksen tekeminen. Korkeahkoa hintaa selittää osittain kaukolämpölaitoksessa käytetty kattilaratkaisu. Arinapoltoilla varustettu kuumavesikattila olisi todennäköisesti halvempi vaihtoehto. Tapausten 2A ja 2B välinen hintaero selittyy tapauksessa 2B mukana olevalla pelletin kuivurilla.

Voimalaitosten kustannusvertailussa käytetään usein käsitettä ominaisinvestointi. Sillä tarkoitetaan laitoksen investointikustannusta esimerkiksi laitoksen tuottamaa nettosähkötehoa kohti. Vertailua suoritetaan yleensä erilaisten sähköntuotantotapojen kesken. Tässä työssä on myös vertailtu laitosvaihtoehtojen ominaishintoja. Laitosvaihtoehtojen investointikustannukset laitoksen tuottamaa sähkökilowattia kohti on esitetty taulukossa 16. Tapausta 3 ei ole otettu mukaan tähän tarkasteluun, koska siinä ei tuoteta lainkaan sähköä.

Taulukko16. Laitosvaihtoehtojen investointikustannukset nettosähkötehoa kohti.

	Tapaus 1	Tapaus 2A	Tapaus 2B
Investointikustannus/kWe [€/kWe]	17232	10833	15276

Nettosähkötehoa kohti lasketuissa ominaishinnoissa ensimmäisestä laitosvaihtoehdosta tulee kallein. Sen tuottama nettosähköteho on vain 45 % tapauksessa 2A tuotetusta nettosähkötehosta ja laitosvaihtoehtojen investointikustannusten suhteellinen ero on selvästi pienempi. Tämä ei silti automaattisesti tarkoita sitä, että laitosvaihtoehto 1 olisi investointina huonompi. Kannattavuustarkasteluun vaikuttaa suuri määrä eri tekijöitä.

Tässä työssä on laskettu ominaishinnat myös laitoksessa vuoden aikana käsiteltyä kosteaa lietemäärä kohti. Ne löytyvät taulukosta 17. Tässä vertailussa tapaus 1 nousee potentiaalisimmaksi vaihtoehdoksi pienimmän investointikustannuksensa ansiosta.

Taulukko17. Laitosvaihtoehtojen investointikustannukset vuodessa poltettua märkää liettonnia kohti.

	Tapaus 1	Tapaus 2A	Tapaus 2B	Tapaus 3
Investointikustannus/liettonni [€/t]	149	209	244	163

6. YHTEENVETO

Tämä kandidaatintyö on tehty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa osana tutkimushanketta PAKU - Hajautetun energiantuotannon modulaarinen yhdyskunnan sivuainevirtoja hyödyntävä CHP-laitos. Tässä kandidaatintyössä on määritetty laitoksen investointikustannus muutamalle laitosvaihtoehdolle.

Investointikustannukseen vaikuttavista kustannusryhmistä ryhmän koneet ja laitteet kustannuksia on selvitetty pyytämällä yrityksiltä tarjouksia laitoksen kustannuksiltaan merkittävimmistä komponenteista ja järjestelmistä. Muiden kustannusryhmien, rakennustekniset työt, suunnittelu ja valvonta, kustannusvaraus sekä rakennusaikaiset korot, osalta kustannuksia on selvitetty kirjallisuuden sekä aiemmin toteutettujen vastaavan kokoluokan hankkeiden perusteella.

Koneet ja laitteet -kustannusryhmässä ei ole mukana aivan kaikkia voimalaitoksessa tarvittavia komponentteja. Toisaalta yrityksiltä tähän tutkimustarkoitukseen saadut tarjoukset eivät välttämättä ole kaikkein edullisimpia. Nämä seikat ainakin osittain kompensoivat toi-

siaan. Lisäksi kunnollisella tarjouskilpailulla jokaisen koneen ja laitteen osalta hintoja olisi mahdollista saada vielä alemmas.

Selvitetyistä laitosvaihtoehdoista kaukolämpölaitoksen osalta investointikustannuksessa lienee suhteellisesti eniten ylimääräistä. Arinapoltoilla varustetun kuumavesikattilan käyttäminen tässä laitosvaihtoehdossa mahdollisesti pienentäisi laitoksen investointikustannusta. Yksi PAKU-laitoksen konseptisuunnittelun keskeisistä lähtökohdista on ollut pieni-
muotoinen sarjatuotanto. Tässä tapauksessa yksittäisen laitoksen hinta putoaisi mahdollisesti vielä nyt selvitettyjä investointikustannuksiakin alhaisemmaksi.

Tämän työn tulosten perusteella voidaan tehdä jatkotarkasteluja laitoksen toteutettavuudesta valitussa liiketoimintaympäristössä ja analysoida sen kilpailukykyyn vaikuttavia tekijöitä. Ennen varsinaisen investointipäätöksen tekemistä on pyrittävä yhä täsmentämään laitoksen investointikustannuksia. Samassa yhteydessä laitoksen hintatasoa on pyrittävä saamaan alhaisemmaksi esimerkiksi vaihtoehtoisten laiteratkaisuiden ja laitteiden kilpailutuksen avulla.

PAKU-hanke jatkaa hyvävoimaisena taivaltaan myös tämän kandidaatintyön valmistumisen jälkeen. Kannattavuustarkastelu laitosvaihtoehtojen välillä on tämän kandidaatintyön valmistuttua selkeästi vakaammalla pohjalla. Tässä työssä määritetyt investointikustannukset eivät ainakaan vähennä tutkimusryhmän keskuudessa vallitsevaa optimismia PAKU-laitoksen valoisasta tulevaisuudesta.

LÄHTEET

Einco Oy. Epäsuora kiertomassakuivuri. 4 s. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 10.12.2007].

Saatavissa: <http://www.einco.fi/Epasuora%20kuivuri%20-%20esite.pdf>

Einco Oy. CTC-reaktori. 4 s. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.12.2007]. Saatavissa:

<http://www.einco.fi/CTC-reaktori%20-%20esite%202.pdf>

Horttanainen Mika, Kaikko Juha, Bergman Riikka, Kakko Katja, Manninen Hanna-Mari ja Marttila Esa. 2007. Advanced process for thermal treatment of wastewater sludge. s. 21-30. 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.

Huhtinen Markku, Kettunen Arto, Nurminen Pasi, Pakkanen Heikki. 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Oy Edita Ab. 379 s. ISBN 951-37-3360-2

IPSEpro. Brief description. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 16.1.2008]. Saatavissa:

http://www.technology.novem.nl/en/processtools/tools/general_info/ipsepro.html

Itä-Suomen ympäristölupavirasto. 2006. Lapinlahden Ekolämpö Oy:n ympäristölupapäätös. 26 s. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 27.12.2007]. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=50835&lan=fi>

Kakko Katja. 2007. Yhdyskuntalietteen käsittely ennen termistä kuivausta ja polttoa. Diplomityö. LTY, ympäristötekniikan koulutusohjelma. 122 s.

Koskelainen Lasse. Vedenkäsittely. [Blackboard-materiaali]. [Viitattu 25.1.2008].

Saatavissa LTY:n energia- ja ympäristötekniikan osaston opintojakso BH50A0400 vedenkäsittely, Blackboard-materiaali, vaatii salasanan.

Kymäläinen Jari. 2001. Voimalaitosten investointi- ja energiantuotantokustannusten arviointi. Diplomityö. LTKK, energiatekniikan osasto. 95 s.

Laitex Oy. LPR pyörivät siilopurkaimet. 2 s. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 7.12.2007]. Saatavissa: <http://www.laitex.fi/pdf/pyorivatsiilopurkaimet.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 925-11-2308-7. Saatavissa myös verkkajulkaisuna: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=54918&lan=FI>

Sähköpostiviestit ja puhelinhaastattelut

Autio, Juhani. 2008a. Seipin Oy. Puhelinhaastattelu 18.12.2007.

Autio, Juhani. 2008b. Seipin Oy. Sähköpostiviesti 16.1.2008.

Halme, Ari. 2008a. Einco Oy. Sähköpostiviesti 3.1.2008.

Halme, Ari. 2008b. Einco Oy. Sähköpostiviesti 8.1.2008.

Heijala, Jari. 2008. Konwell Oy. Sähköpostiviesti 17.1.2008.

Heikkilä, Toni. 2008. Sulzer Pumps Finland Oy. Sähköpostiviesti 16.1.2008.

Järvenpää, Harri. 2008. Dust Control Systems Oy. Sähköpostiviesti 24.1.2008.

Kuhalainen, Oiva. 2008. Ekomans Oy. Sähköpostiviesti 10.1.2008.

Liikola, Panu. 2008. Högfors Oy. Sähköpostiviesti 23.1.2008.

Mäntynen, Juha. 2007. Vahterus Oy. Sähköpostiviesti 8.11.2007.

Nieminen, Markku. 2008. Kaiko Oy. Sähköpostiviesti 28.1.2008.

Ruottu, Ari. 2007. Einco Oy. Sähköpostiviesti 21.11.2007.

Tuukkanen, Jani. 2007. Laitex Oy. Sähköpostiviesti 5.12.2007.