

# **LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO**

## **Sähkötekniikan osasto**

Sähkömarkkinoiden opintosuunta

<http://www.ee.lut.fi/lab/sahkomarkkina>

## **DIPLOMITYÖ**

### **SÄHKÖN OMATUOTANNON KANNATTAVUUSTARKASTELU**

Diplomityöaihe on hyväksytty sähkötekniikan osaston osastoneuvoston kokouksessa  
13.4.2005

Työn tarkastajat:      Professori Jarmo Partanen

                                 Professori Risto Tarjanne

Työn ohjaaja:          Voima- ja ympäristöpäällikkö Yrjö Lehti

Lappeenrannassa 26.4.2005

Eero Kokkonen

Kaipaalantie 305

52200 PUUMALA

050-5259682

## TIIVISTELMÄ

Tekijä: Kokkonen Eero  
Nimi: Sähkön omatuotannon kannattavuustarkastelu  
Osasto: Sähkötekniikan osasto  
Vuosi: 2005  
Paikka: Lappeenranta

Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto

85 sivua, 9 kuvaa ja 8 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Jarmo Partanen ja professori Risto Tarjanne

Hakusanat: sähkön omatuotanto, kustannusten jakaminen, suhdemenetelmä, päästökustannus, marginaalikustannus, SPOT-hinta

Tässä diplomityössä tutkitaan sähkön omatuotannon kannattavuutta M-realin Simpeleen tehtaiden voimalaitoksella. Erityisesti työssä arvioidaan lauhdesähköntuotannon kannattavuutta polttoaine- ja päästökustannuksista muodostuvien marginaalikustannusten osalta. Koska voimalaitoksen rakennusaste on varsin alhainen, sähköntuotannon kannattavuutta on tarkasteltu arvioimalla sähkön ja lämmön yhteistuotannon kustannuksia ja jakamalla syntyneet kustannukset suhdemenetelmän avulla eri tuotteille.

Diplomityössä etsitään kustannustehokkain seospolttosuhde annettujen reunaehtojen puitteissa muodostamalla polttoaineista aiheutuvista kustannuksista laskentamalli, jota optimoidaan Microsoft Excelin Solver-toiminnolla.

Lauhdesähköntuotannon marginaalikustannuksia verrataan Nord Poolin SPOT-tuntihintaan. Lauhdesähköntuotanto voimalaitoksella on kannattavaa, mikäli SPOT-tuntihinnan vuorokautinen keskiarvo ylittää lauhdesähköntuotannon marginaalikustannukset.

## **ABSTRACT**

Author: Kokkonen Eero  
Title: Feasibility study of self-produced electricity  
Department: Department of electrical engineering  
Year: 2005  
Place: Lappeenranta

Master's thesis. Lappeenranta University of Technology.

85 pages, 9 figures and 8 tables.

Supervisors: professor Jarmo Partanen and professor Risto Tarjanne

Keywords: self-produced electricity, cost allocation, proportional method, discharge cost, incremental cost, SPOT price

This master's thesis evaluates the cost-effectiveness of self-produced electricity in M-Real power plant in Simpele, Finland. Evaluation is especially focused on the cost-effectiveness of condensate electricity production. Evaluation is done by calculating incremental costs which consist of fuel and discharge costs. Due to the low power to heat ratio in the power plant the cost effectiveness is evaluated by dividing the power and heat production costs to products using the proportional method.

The aim of this work is to find the most cost-effective mixed fuel ratio within given edge conditions. This is achieved by forming a calculation model where fuel costs are taken into consideration. The calculation model is optimized with the aid of the solver – function included in Microsoft Excel.

The incremental costs of condensate electricity production are compared to the Nord Pools SPOT price per hour. Self-produced condensate electricity is cost-effective if the daily average of the SPOT price per hour remains greater than the incremental costs.

## **ALKUSANAT**

Tämä diplomityö on tehty M-real Oyj:n Simpeleen tehtaiden voimalaitokselle kevättalven 2005 aikana. Diplomityön ohjaajana toimi voima- ja ympäristöpäällikkö Yrjö Lehti. Haluan kiittää häntä mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta diplomityön aiheesta sekä diplomityön ohjaukseen käytetystä ajasta. Professori Jarmo Partasta kiitän neuvoista diplomityön tekemiseen liittyvissä ongelmissa. Lisäksi haluan kiittää tekn. yo. Aki Rissasta optimointiongelmiä ratkaisemisessa.

Opiskeluvuodet lappeen Rannassa ovat kuluneet yhdessä hujauksessa, siitä suuri kiitos kavereille ja ystäville. Vanhempiani haluan kiittää sekä kannustuksesta että taloudellisesta avusta opiskelujen alkutaipaleella. Kiitän myös kummitätiäni Hilppaa vuosien varrella saaduista neuvoista.

## SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET .....	4
1. JOHDANTO .....	7
1.1 Tausta .....	7
1.2 Tavoite .....	8
1.3 Aiheen rajaus.....	8
1.4 Diplomityön rakenne.....	8
2. SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTO.....	10
2.1 Teollisuuden vastapainevoimalaitos .....	11
2.2 Yhteistuotantoteknologiat .....	14
2.2.1 Höyryturbiinit.....	14
2.2.2 Höyryturbiinijärjestelmän termodynamiikka.....	16
2.2.3 Sähköntuotannon ominaiskulutus .....	16
2.2.4 Vastapaineen säätö .....	21
2.2.5 Leijukerroskattila .....	22
2.2.6 Vaihtovirtageneraattori .....	23
2.3 Energiantuottajalle asetetut ympäristövelvoitteet .....	24
2.4 Päästökauppa.....	24
2.4.1 Hiilidioksidipäästöoikeuksien alkujako .....	25
3. VOIMALAITOKSEN KUSTANNUSTEN MUODOSTUMINEN .....	26
3.1 Kiinteät kustannukset.....	27
3.2 Muuttuvat kustannukset .....	27
3.3 Kustannusten jakaminen sähkön ja lämmön tuotannon kesken.....	28
3.4 Muuttuvien kustannusten jakomenetelmät.....	28
3.4.1 Energiamenetelmä.....	29
3.4.2 Exergiamenetelmä.....	29
3.4.3 Työmenetelmä.....	30
3.4.4 Vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmä .....	30
3.4.5 Suhdemenetelmä .....	31
3.4.6 Sähkönhinnan muodostus .....	32
3.5 Sähkön hankinta sähkömarkkinoilta .....	34

4.	POLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET SEKÄ VEROTUS JA ENERGIATUET .....	36
4.1	Energiaverotus.....	36
4.2	Energiatuet .....	37
4.3	Vihreät sertifikaatit.....	38
4.3.1	RECS-järjestelmä.....	40
4.3.2	RES-E Direktiivin vaikutukset.....	41
4.4	Voimalaitoksen polttoaineet.....	42
4.4.1	Turve .....	43
4.4.2	Puuperäiset polttoaineet .....	44
4.4.3	Raskas polttoöljy.....	45
4.4.4	Liete .....	46
4.4.5	Biokaasu.....	46
4.4.6	Omat poltettavat jätteet .....	47
4.4.7	REF-kierrätyspolttoaineet .....	47
4.4.8	Seospolton kustannustekijät ja niiden vaikutus polttoainekustannuksiin .....	48
4.4.9	Polttoaineiden kilpailukyky ja päästöoikeuksien arvo.....	49
5.	SÄHKÖN HANKINTA .....	50
5.1	Sähkön omatuotanto, laitteet.....	50
5.1.1	Kattila K6.....	50
5.1.2	Turbiinit .....	51
5.2	Sähkön hankinta sähkömarkkinoilta .....	54
5.2.1	Päästökaupan vaikutus sähkön markkinahintaan.....	54
6.	SÄHKÖN OMATUOTANNON KANNATTAVUUS.....	56
6.1	Omatuotannon kannattavuustarkastelun lähtökohdat .....	56
6.2	Kannattavuustarkastelun lähtöoletukset.....	57
6.3	Polttoaineiden kustannustekijät.....	59
6.3.1	Polttoaineen hinta.....	59
6.3.2	Lämmön tuotannon energiaverot .....	60
6.3.3	Päästökustannukset .....	61
6.3.4	Tuet sähkön tuotantoon.....	62
6.3.5	RECS-sertifikaattien myyntitulot.....	63
6.3.6	Yhteenveto kustannustekijöistä.....	63

6.4	Kustannusoptimoinnin toteutus.....	64
6.5	Kustannustehokkain polttoainesuhde.....	66
6.6	Polttoainekustannukset lopputuotteille .....	67
6.6.1	Lämmön tuotannon polttoainekustannukset .....	67
6.6.2	Vastapainesähkön tuotannon polttoainekustannukset.....	68
6.6.3	Lauhesähkön tuotannon polttoainekustannukset .....	68
6.7	Päästökustannukset .....	69
6.7.1	Päästökustannusten jakaminen eri tuotteille .....	70
6.8	Lopputuotteiden marginaalikustannukset polttoaineesta ja päästöistä .....	74
6.9	Milloin sähkön omatuotanto on kannattavaa?.....	76
6.10	Päästökaupan vaikutus tuotantomääriin .....	77
6.11	Kannattavuustarkastelun virhearviointi .....	77
7.	YHTEENVETO .....	79
	LÄHTEET .....	80

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

### lyhenteet

CO2	hiilidioksidi
ELSPOT	Suomen aluehinta
EU	Euroopan Unioni
EY	Euroopan Yhteisö
G	generaattori
K	kattila, kustannus
K6	voimalaitoksen pääkattila
K7	voimalaitoksen varakattila
KTM	Kauppa- ja teollisuusministeriö
LV	lauhde
LV1	lauhdeturbiini
MrE	M-real Energia
OK	omakäyttösähkö
OTC	Over-the-Counter, Kahdenkeskinen sähkökauppa
PE	eräs muovityyppi
RECS	Renewable Energy Sertificate System, Uusiutuviin energialähteisiin perustuvan energian sertifiointijärjestelmä
REF	Recovered fuel, kierrätyspolttoaine
s	isentrooppinen
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
snt	sentti
SPOT-hinta	Nord Poolin ELSPOT-markkinoilla määräytyvä hinta
th	tuorehöyry
UR	reduktio
VP	vastapaine
VP2	vastapaineturbiini

### muuttujat

<i>h</i>	entalpia, hapettumiskerroin
<i>P</i>	teho, päästökerroin
<i>E</i>	energia



<i>e</i>	exergia
<i>f</i>	taajuus
<i>H</i>	hinta, huoltovarmuusmaksu
<i>K</i>	kustannus
<i>M</i>	myyntitulo, määrä
<i>n</i>	pyörimisnopeus
<i>O</i>	osuus, ominaiskulutus
<i>p</i>	napapariluku
<i>q</i>	lämpöarvo
<i>s</i>	entropia
<i>t</i>	aika, tonni
<i>T</i>	lämpötila, tuki
<i>V</i>	vero
<i>Y</i>	ylitys

### **kreikkalaiset**

$\eta$	hyötysuhde
$\phi$	lämpöteho

### **alaindeksit**

CO2h	lämmöntuotannon hiilidioksidipäästö
CO2k	hiilidioksidi päästökiintiö
CO2LV1	lauhesähkötuotannon hiilidioksidipäästö
CO2p	hiilidioksidipäästö
CO2VP2	vastapainesähkötuotannon hiilidioksidipäästö
e	sähkö
EV	energiavero
gen	generaattori
h	lämpö, huippu, hinta, huoltovarmuusmaksu
hm	lämmön marginaalikustannus
i	tehollinen
K	kattila
ki	kiinteä

kok	kokonais
Kp	kierrätyspuu
LV	lauhde
LVm	lauhesähkön marginaalikustannus
mek	mekaaninen
Mh	metsähake
mpa	polttoaineen massavirta
mth	tuorehöyryn massavirta
mu	muuttuva
OK	omakäyttösähkö
P, p	päästö
PA	polttoaine
ph	lämmöntuotannon päästökustannus
pLV	lauhesähkön päästökustannus
Pp	puupolttoaine
pVP	vastapainesähkön päästökustannus
pYT	yhteistuotannon päästökustannus
Pö	polttoöljy
R	RECS-sertifikaatti, sertifikaatin hinta
Re	REF
s	isentrooppinen
tb	turbiini
th	tuorehöyry
Tu	turve
u	ympäristön tilasuure
VP	vastapaine
VPm	vastapainesähkön marginaalikustannus
YT	yhteistuotanto

## **1. JOHDANTO**

Sähkön omatuotannolla tarkoitetaan M-real Oyj:n Simpeleen tehtaiden voimalaitoksella tuotettua sähköä. Sähköä voidaan tuottaa prosessin tarvitseman höyryn sivutuotteena vastapaineturbiinilla sekä lisäämällä kattilan höyryntuotantoa ja muuntamalla se lauhdeturbiinissa sähköenergiaksi. Lisäksi tehdasalueella on pieni vesiturbiini. Diplomityössä tarkastellaan sähkön omatuotannon kannattavuutta päästökaupan näkökulmasta. Vuoden 2005 alusta voimaan tullut päästökauppa ja sen mukanaan tuoma päästökauppi riittää Simpeleellä prosessihöyryn ja vastapainesähkön tuottamiseen käyttämällä polttoaineena n. 50 % turvetta ja n. 50 % puuperäisiä päästökaupan kannalta neutraaleja polttoaineita. Mikäli voimalaitoksella halutaan tuottaa lauhdesähköä, riippuu tuotannon kannattavuus voimakkaasti markkinasähkön hinnasta.

### **1.1 Tausta**

M-real Oyj:n Simpeleen tehtaat koostuvat paperi- ja kartonkitehtaasta. Paperitehdas tuottaa päällystettyä erikoispaperia noin 50 000 tonnia vuodessa. Kartonkitehdas tuottaa taivekartonkia noin 170 000 tonnia vuodessa. Simpeleen tehtailla on oma voimalaitos, jonka tärkein tehtävä on tuottaa prosessin tarvitsema lämpöenergia eli käytännössä höyryä paperi- ja kartonkitehtaan tarpeisiin.

Voimalaitoksella on kaksi kattilaa. Pääkattila on leijukerroskattila, joka soveltuu seospolttoaineiden polttamiseen. Varakattila on raskasta polttoöljyä polttoaineena käyttävä kattila, jota käytetään pääkattilan häiriö- ja seisokkitilanteissa. Voimalaitoksen ensisijaisena tehtävänä on tuottaa paperin- ja kartonginvalmistuksessa tarvittava prosessihöyry. Lisäarvoa tuotetulle energialle saadaan vastapaineturbiinin avulla tuotetun sähkön muodossa. Mikäli markkinasähkön hinta on korkealla tasolla, voidaan voimalaitoksella tuottaa sähköä vastapaineturbiinin lisäksi lauhdeturbiinilla. Voimalaitos tuottaa myös kaukolämpöä Simpeleen kirkonkylän lämmitykseen. Lämpö myydään Simpeleen Lämpö Oy:lle, joka huolehtii kaukolämmön jakelusta. Kaukolämmön maksimiteho on noin 8 MW.

Tehtaan oma sähköenergian tuotantokapasiteetti ei riitä kattamaan kokonaissähkötehon tarvetta, joka on noin 30 MW. Noin kolmannes käytettävästä sähköenergiasta on hankittava sähkömarkkinoilta. Tavallisesti voimalaitoksella tuotetaan sähköä vain

vastapaineturbiinin avulla, prosessihöyryn sivutuotteena. Mikäli markkinasähkö on kallista, on voimalaitoksen höyryntuotantokapasiteettia mahdollisuus kasvattaa ja tuottaa sähköä myös lauhdeturbiinin avulla.

## **1.2 Tavoite**

Diplomityön tavoitteena on määrittää laskentamalli, jota käyttäen voimalaitoksella pystytään laskemaan sähkön tuotannon omakustannushinta ja ominaishiilidioksidipäästöt eri polttoaineilla. Diplomityön avulla on tarkoitus selvittää, milloin sähkön omatuotanto on kannattavampaa kuin sähkön hankinta sähkömarkkinoilta. Päästökaupan alettua tammikuussa 2005 lauhdesähkön tuotannon kannattavuuden arviointiin vaikuttaa lisääntyvien muuttuvien kustannusten lisäksi myös lisääntyvät hiilidioksidipäästöt. Diplomityössä arvioidaan kokonaistaloudellisesti kannattavimman polttoainesuhteen (turve/puu) määrää.

## **1.3 Aiheen rajaus**

Diplomityössä keskitytään sähköntuotannon muuttuviin kustannuksiin päästökaupan näkökulmasta. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon kiinteiden kustannusten jakoperusteet ovat vaikeasti määriteltävissä, koska voimalaitos on tarkoitettu ensisijaisesti tarvittavan lämpöenergian tuotantoon.

## **1.4 Diplomityön rakenne**

Diplomityön alkuosa lukuun 5 asti käsittelee sähkön ja lämmön yhteistuotantoa ja siihen liittyviä tekijöitä kirjallisuuden valossa. Luvusta 5 alkaen keskitytään Simpeleen voimalaitokseen ja sen käyttötalouteen vaikuttaviin tekijöihin

Diplomityön alussa luvussa 1 on esitelty diplomityön tausta, tavoite, aiheen rajaus sekä diplomityön rakenne. Luvussa 2 tarkastellaan sähkön ja lämmön yhteistuotannon tekniikkaa ja sähköntuotannon kannalta tärkeimpien voimalaitosprosessien toimintaa. Lisäksi luvun loppuosassa tarkastellaan energiantuottajalle asetettuja ympäristövelvoitteita. Luku 3 keskittyy voimalaitoksen kustannusten muodostumisen perusteisiin ja kustannusten jakomenetelmiin. Lisäksi kappaleen lopussa käsitellään vaihtoehtoisia tapoja hankkia sähköä sähkömarkkinoilta. Luvussa 4 käsitellään voimalaitoksen polttoaineita sekä taloudellisten vaikutusten että polttoteknisten ominaisuuksien kannalta.

Luvussa 5 perehdytään Simpeleen voimalaitoksen laitteisiin. Luvussa 6 esitetään sähkön omatuotannon kannattavuustarkastelun kulku. Luvuissa 5 ja 6 esitettävien asioiden teoreettinen perusta on esitetty diplomityön alkuosassa. Luvussa 7 kootaan yhteen diplomityön keskeisimmät tulokset.

## 2. SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTO

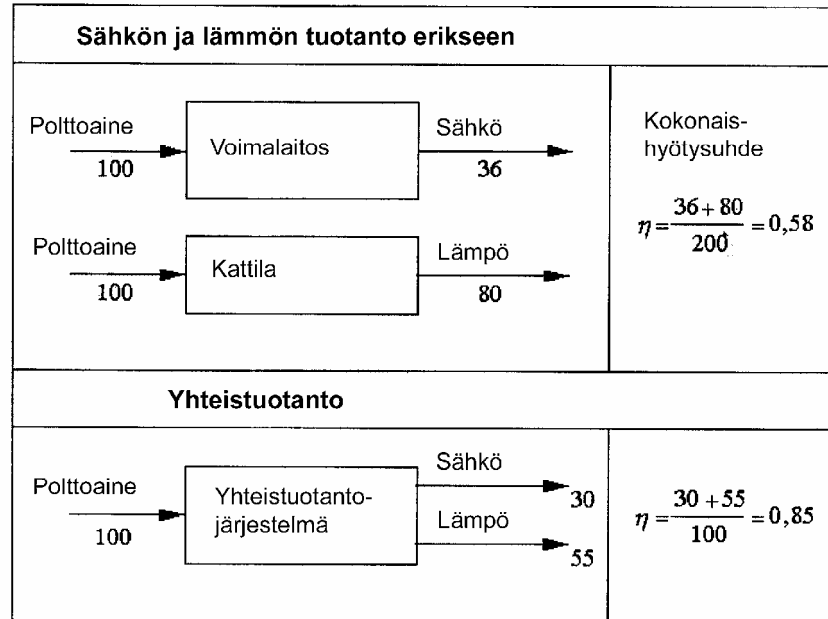
Virallisen määritelmän mukaan yhteistuotannossa yhdestä primäärienergiälähteestä tuotetaan kahta tai useampaa energiamuotoa peräkkäisissä termodynaamisissa prosesseissa. Yleisin yhteistuotannon sovellus on sähköenergian (mekaanisen energian) ja hyödyksi käytettävän lämpöenergian yhdistetty tuotanto samasta primäärienergiälähteestä. (VOP)

Sähkön ja lämmön yhteistuotannolla saavutetaan suuria kustannusetuja verrattuna molempien tuotteiden erillistuotantoon. Tyypillisesti sähkön ja lämmön yhteistuotannolla saadaan noin 30 % säästö polttoaineen kulutuksessa verrattuna tuotteiden erillistuotantoon. Alemmat tuotantokustannukset johtuvat pienemmästä polttoaineen kulutuksesta, näin ollen myös päästöt ilmakehään pienenevät. (Liikanen 1999)

Sähköä ja lämpöä tuottavissa vastapainevoimalaitoksissa jää pois tavalliseen lauhdevoimalaitokseen verrattuna noin 50 % lauhdutinräviö, koska höyry johdetaan turbiinilta hyötykäyttöön, joko kaukolämmöksi tai prosessihöyryksi. Etua ei kuitenkaan saavuteta ilmaiseksi vaan korkean vastapaineen vuoksi paisuntaprosessi eli lämpöenergian muutos mekaaniseksi energiaksi on keskeytettävä paljon aikaisemmin, kuin lauhdutusprosessissa. Tämän seurauksena sähköenergian tuotanto polttoaineikköä kohden vähenee merkittävästi. Mutta vastaavasti prosessihöyrynä saadaan talteen moninkertainen energiamäärä lauhdutinräviöön verrattuna. (Partanen 1997)

Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa kokonaisenergiahyötysuhteeseen lasketaan sekä sähkö- että lämpöenergia. Vastapainelaitoksen nettotuotteiden suhdetta sanotaan rakennusasteeksi, jolla tarkoitetaan voimalasta ulos saatavan sähköenergian suhdetta ulos saatavaan lämpöenergiaan. Tyypillisillä teollisuusvoimalaitoksilla rakennussuhde on luokkaa 0,3-0,4. (Partanen 1997)

Vastapainelaitoksen tärkein karakteristika on kehitetyn sähköenergian ja prosessilämmön suhde, jota sanotaan vastapainevoimalaitoksen rakennusasteeksi. (TK4)

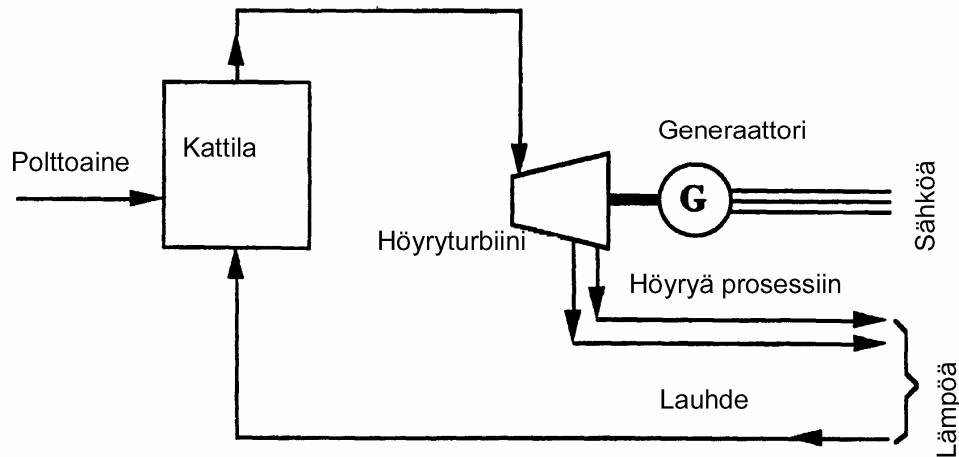


Kuva 2.1. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon tyypillinen hyötysuhde sekä vastaavien erillistuotantolaitosten hyötysuhteet. (VOP)

Kuvassa 2.1 on havainnollistettu sähkön ja lämmön yhteistuotannolla saatavaa hyötyä. Erillistuotannon hyötysuhde jää merkittävästi yhteistuotannon hyötysuhdetta alhaisemmaksi. Yhteistuotantotekniikalla saavutetaan sekä kustannussäästöjä että pienempiä ominaispäästöjä tuotettua energiayksikköä kohden kuin erillistuotannossa.

## 2.1 Teollisuuden vastapainevoimalaitos

Teollisuudessa esiintyy suuria lämpökuormia ja teollisuusprosessien lämmitys toteutetaan yleensä käyttämällä lämmönsiirtoaineena höyryä. Höyryn avulla voidaan siirtää helposti suuriakin lämpötehoja ja lämmittää kohde nopeasti höyryn hyvien lämmönsiirto-ominaisuuksien ansiosta. Teollisuuden vastapainevoimalaitoksen edullisuus perustuu siihen, että höyryä lämmitykseen tuottavan kattilalaitoksen yhteyteen voidaan suhteellisin pienin lisäinvestoinnein rakentaa sähkövoimala. Sähkön tuotantoa varten kattilan painetasoa täytyy nostaa ja lisäksi tarvitaan turbiinilaitos. (Huhtinen 2000)



Kuva 2.2. Periaatekuva vastapainevoimalaitoksesta. (VOP)

Kuvan 2.2 mukaisesti turbiinin läpi virrannut höyry johdetaan kulutuskohteisiinsa ja yleensä vain osa palautetaan lauhteena takaisin voimalaitoksiin. Tavallisesti teollisuusprosesseissa tarvitaan eripaineisia höyryjä ja niitä on mahdollisuus ottaa turbiinin väliotoista. Koska teollisuusprosesseissa tarvitaan huomattavasti kuumempia ja korkeampipaineisia höyryjä kuin kaukolämmön tuotannossa, on turbiinin sähkötehon menetys suurempi kuin kaukolämpövoimalaitoksen. Teollisuuden vastapainevoimalaitoksen kokonaishyötysuhde on kuitenkin samaa tasoa kuin kaukolämmön tuotannossa. (Huhtinen 2000)

Höyryväliotolla varustettu voimalaitos eroaa tavalliseen vastapainevoimalaitokseen verrattuna siinä suhteessa, että kaikkea koko turbiinin läpi kulkenutta höyryä ei johdeta käyttöön prosessihöyrynä tai kaukolämmöksi. Väliottovoimalaitoksessa on lauhdevoimalaitoksen tyyppinen lauhdutin, johon loppuun asti paisunut höyry johdetaan. Normaalissa käyttötilanteessa väliottovoimalaitoksissa merkittävä osa höyryvirrasta otetaan väliotoista prosessihöyryksi tai hyötylämmön tuotantoon lämmönvaihtimissa. Lauhduttimeen johtavaa matalapaineturbiinia ei ole välttämättä mitoitettu toimimaan tehokkaasti koko höyryvirralla. (YET)

Vastapainevoiman tuotantokapasiteetista yli 90 % on metsäteollisuuden yhteydessä. Tuotantokapasiteetti koostuu muihin voimantuotantolajeihin verrattuna suhteellisen pienistä laitoksista ja koneyksiköistä. (Partanen 1997)



Prosessiteollisuudessa vastapainevoimalaitos on peruskuormalaitos, koska prosessit käyvät vuosihuoltoja lukuun ottamatta läpi vuoden. Vastapainelaitoksen kustannussuoraa on vaikea yleistää, koska polttoaineen hinnoittelu erityisesti teollisuudessa on monikäsitteinen. Myös kiinteiden kustannusten jakaminen sähkön ja lämmön tuotannon kesken on monikäsitteistä. (Elovaara 1993)

Teollisuuden vastapainelaitokset mitoitetaan prosessintarpeen mukaan ja polttoaineena käytetään usein teollisuusprosessin sivutuotteena syntyviä jätteitä. Esimerkiksi metsäteollisuudessa voimalaitosten polttoaineena käytetään kuorta, purua ja mustalipeää. (Huhtinen 2004)

Vastapainevoimalaitoksissa sähköteho on useimmiten prosessin sekundäärituote eli voimalaitosta ajetaan ensisijaisesti tarvittavan lämpötehon perusteella. Useimmiten voimalaitoksilla on mahdollista toteuttaa sähköntuotannon tilapäinen lisääminen apulauhduttimen avulla. Apulauhduttimen tarkoituksena on ensisijaisesti priimata vastapaineturbiinista saatava sähköteho eli tehdä se riippumattomaksi teollisuuden höyrynkulutuksesta. (Partanen 1997)

Teollisuuslaitoksen sähköntarve ja erityisesti höyryntarve vaihtelee huomattavasti riippuen ulkolämpötilasta ja raakaveden lämpötilasta sekä erityisesti prosessien osittain jaksottaisesta luonteesta. Vaihtelut eivät kuitenkaan ole samanaikaisia ja toisiaan kompensoivia. Apulauhduttimen avulla saadaan lyhytaikainen sähkötehon lisäkehitys turbiinissa, kun sen avulla lisätään keinotekoisesti höyrynkulutusta. Apulauhduttimen lämpö menee kokonaan hukkaan ja sen avulla tuotetun sähköntuotannon hyötysuhde on noin 20 - 25 %. (Partanen 1997)

Laitos voidaan varustaa lisäksi myös erillisellä matalapaineturbiinilla ja lauhduttimella. Näitä käyttäen sähköntuotannossa saavutetaan keskitasoista lauhdevoimalaitosta vastaava hyötysuhde silloin, kun lämpöä ei tarvita. Mahdollisuus lämmön tuotannosta riippumattomaan sähkön tuotantoon on arvokas lisäominaisuus, jos on odotettavissa, että koko lämpökapasiteettia ei tarvita ajankohtina, joina markkinasähkön hinta on korkea. (YET)

## 2.2 Yhteistuotantoteknologiat

Useimmat yhteistuotantojärjestelmät voidaan luokitella joko korkealämpötila- tai matalalämpötilajärjestelmiksi. Korkealämpötilajärjestelmässä korkeassa lämpötilassa oleva väliaine (savukaasu, höyry) pyörittää sähköä tuottavaa konetta. Matalalämpötilalämpöä käytetään esimerkiksi prosessi- tai kaukolämmöksi. (VOP)

Seuraavassa on kuvattu sähköntuotannon kannalta oleellisimpien voimalaitoskomponenttien rakennetta ja tekniikkaa. Kuvaus ei ole kattava selvitys höyryvoimalan toiminnasta, mutta se kattaa diplomityön aihealueeseen kuuluvat yksityiskohdat.

### 2.2.1 Höyryturbiinit

Höyryturbiiniprosessin tärkeimmät komponentit ovat lämmön lähde, höyryturbiini ja lämpötilan pudotus. Järjestelmä perustuu Rankine-prosessiin, joko sen perusmuotoon tai parannettuun versioon, jossa on välitulistus ja syöttöveden esilämmitys. Lämmönlähteenä on yleisimmin kattila, jossa poltetaan polttoainetta tai polttoaineseosta ja tuotetaan tulistettua höyryä. (VOP)

Turbiinit voidaan jaotella joko painetason mukaan tai sen mukaan, onko niissä välitulistus vai ei. Pienissä voimalaitoksissa, joissa välitulistus ei ole käytössä, höyryturbiini on yksinkertainen yksiosainen turbiini. Höyry menee turbiiniin, paisuu turbiinin läpi ja tulee ulos turbiinista prosessihöyrylinjaan tai lauhduttimeen. Isommissa voimalaitoksissa, joissa ei käytetä välitulistusta, höyry voi mennä ensimmäisen turbiinin läpi ja sitten toiseen turbiiniin. Jälkimmäisestä turbiinista höyry menee joko lauhduttimeen tai höyrylinjaan. Tällaisessa järjestelyssä ensimmäistä turbiinia sanotaan korkeapaineturbiiniksi ja jälkimmäistä matalapaineturbiiniksi. (VOP)

Höyryturbiinissa höyry paisuu turbiinin useiden vyöhykkeiden läpi pyörittäen turbiinin roottorisiivistöä, samalla lämpöenergia muutetaan mekaaniseksi energiaksi. Turbiini puolestaan pyörittää sen kanssa samalle akselille kytketyn generaattorin roottoria. Generaattorin roottori on magnetoitu ja sen pyörittäminen synnyttää sähkövirtaa generaattorin staattorissa. (VOP)

Toiminta-arvot voivat vaihdella laajasti. Yhteistuotantolaitoksissa höyryn paine voi olla muutamasta baarista noin sataan baariin ja lämpötila muutaman asteen tulistuksesta aina tasolle 450 - 540 °C. Turbiinin tuottama sähköteho on tyypillisesti luokkaa 0,5 - 100 MW. Höyryturbiinijärjestelmät ovat varmatoimisia, niiden luotettavuus on jopa 95 %, käytettävyys 90 - 95 % sekä käyttöikä 25 - 35 vuotta. (VOP)

Vastapaineturbiinilaitos on yksinkertaisin konstruktiosta, joita käytetään sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Vastapaineturbiinilaitoksessa höyry tulee ulos turbiinista ilmanpaineessa tai tätä korkeammassa paineessa. Turbiinin ulostulopaine riippuu lämpökuormasta. Lisäksi on mahdollista ottaa väliottohöyryä turbiinin keskipaineosasta lämpökuorman kannalta sopivassa paineessa ja lämpötilassa. Turbiinista ulos johdettu höyry johdetaan lämmittämään lämmitettävää prosessia. Höyry luovuttaa lämpöä ja lauhtuu. Lauhde palautetaan takaisin kattilalle. Lauhteen massavirta voi olla pienempi kuin höyryn, mikäli höyryä käytetään prosessissa tai järjestelmässä on vuotoja. Massavirta säilytetään tasapainossa lisäveden avulla. (VOP)

Vastapaineturbiinin suurimpia etuja ovat yksinkertainen laitteistokokoonpano ja korkea kokonaishyötysuhde, koska lauhduttimen kautta ei poisteta lämpöä ympäristöön. Sähkön tuotannon kannalta haittapuolena on se, että turbiinin läpi kulkevan höyryn massavirta riippuu lämpökuormasta, joten tuotettava sähköteho on verrannollinen lämpökuormaan. Sähkön tuotanto ei voi siis suoraan joustavasti seurata sähkön tarvetta ja sähköverkkoon täytyy olla kaksisuuntainen yhteys, jonka avulla voidaan tarvittaessa ostaa sähköä tai myydä ylimääräinen sähkö. (VOP)

Lauhdutusturbiinista saadaan lämpötehoa ottamalla turbiinin keskipaineosasta yksi tai useampi väliotto sopivassa paineessa ja lämpötilassa. Jäljelle jäävä höyry tulee ulos turbiinista lauhduttimen paineessa, joka voi olla niinkin alhainen kuin 0,05 bar, jota vastaa lauhtumislämpötila noin 33 °C. Näin alhaisessa lämpötilassa olevalla höyrylle on vaikea keksiä käyttösovellutusta ja höyryn sisältämä lämpö poistetaan lauhduttimen avulla ympäristöön. (VOP)

Lauhdutusturbiinin pääomakustannukset ovat vastapaineturbiinin pääomakustannuksia suuremmat turbiinin kalliin matalapaineosan takia. Myös lauhdutusturbiinin kokonaishyötysuhde jää alhaisemmaksi kuin vastapaineturbiinin. Tuotettua sähkötehoa

voidaan säätää tietyssä laajuudessa itsenäisesti riippumatta lämpökuormasta säätämällä sopivasti turbiinin läpi virtaavan höyryn määrää. (VOP)

### *2.2.2 Höyryturbiinijärjestelmän termodynamiikka*

Vastapainevoimalaitoksen kokonaishyötysuhde on suhteellisen korkea, jopa 90 % (Huhtinen 2000). Osakuormalla ajettaessa kokonaishyötysuhde laskee vain vähän. Sähköntuotannon hyötysuhde on kuitenkin alhainen; arvot 15 - 20 % eivät ole harvinaisia, mikä merkitsee alhaista rakennussuhdetta (0,1 - 0,5). Yleisesti pätee, että mitä korkeampi lämpötila prosessiin vaaditaan, sitä alhaisemmaksi sähköntuotannon hyötysuhde jää. Sähköntuotannon hyötysuhdetta voidaan tietyissä rajoissa kasvattaa nostamalla höyryn lämpötilaa ja painetta ennen höyryturbiinia. (VOP)

Kokonaishyötysuhde on sitä parempi, mitä tarkemmin höyryn sisältämä lämpöenergia hyödynnetään. Korkean hyötysuhteen edellytyksenä on, että lauhde palaa prosessista jäädyttämättä eikä lämpöä poisteta ympäristöön. Koska tuotettu sähköteho on verrannollinen prosessiin menevän höyryn massavirtaan, ei rakennussuhde juurikaan muutu kuorman muuttuessa. (VOP)

Lauhdutusturbiinia käytettäessä osa lämmöstä poistetaan lauhduttimen kautta ympäristöön, jolloin kokonaishyötysuhde laskee. Suurin etu tällaisessa järjestelyssä on mahdollisuus säätää sähkö- ja lämpötehoa toisistaan riippumatta tietyissä rajoissa ja siten muuttaa rakennussuhdetta. (VOP)

Höyryturbiini toimii optimaalisesti, kun sitä ajetaan keskimäärin 95 %:lla nimellistehosta. Koska yhteistuotantojärjestelmissä käytettävät höyryturbiinit ovat yleensä monivaiheisia, tiettyyn käyttösovellutukseen suunniteltuja ja varustettu sekä lauhdutus- että väliottotoiminnolla, määräytyy toiminta osakuormalla turbiinikohtaisesti. Turbiinin ominaisuudet määräytyvät siis turbiinikohtaisen karakteristikan mukaan. (VOP)

### *2.2.3 Sähköntuotannon ominaiskulutus*

Vastapainevoiman avulla voidaan tuottaa sähköenergiaa, joka saadaan lähes teoreettisella lämmönkulutuksella johtamalla korkeapaineinen höyry turbiinin läpi lämpöenergiaa käyttävään prosessiin. Vastapainelaitoksen rakentamisen lähtökohtana

on prosessin lämmöntarve. Nämä lämpövirrat ovat aina olemassa, käytettiinpä niitä hyväksi vastapainevoiman kehitykseen tai ei. On tarkoituksenmukaista liittää lämpövirtoihin niin paljon pienen kulutussuhteen omaavan vastapainevoiman kehitystä kuin mahdollista. (TK4)

Höyryturbiinin toiminta perustuu Rankine-prosessiin, jossa korkeassa paineessa olevan kaasun isentrooppinen paisunta tuottaa tehoa. Usein työkaasuna on vesihöyry. Turbiini toimii ideaalisessa tapauksessa isentrooppisesti, jossa höyry aloittaa paisunnan kylläisenä höyrynä ja paisuessaan alempaan paineeseen on lopputilassa sekä höyryä että vettä. Todellisuudessa turbiini ei toimi isentrooppisesti. (VOP)

Höyryn paisuessa turbiinin läpi sen sisältämä lämpöenergia eli entalpia ja paine-energia muuttuvat kineettiseksi energiaksi. Kineettinen energia muutetaan mekaaniseksi energiaksi roottorin siivistössä. Paisumisprosessi voidaan kuvata piirtämällä se Mollierin  $h,s$ -diagrammiin. Turbiinin isentrooppinen hyötysuhde määritellään vertaamalla todellista paisuntaa isentrooppiseen paisuntaan yhtälön 2.1 mukaisesti. (VOP)

$$\eta_s = \frac{\Delta h}{\Delta h_s} \quad (2.1)$$

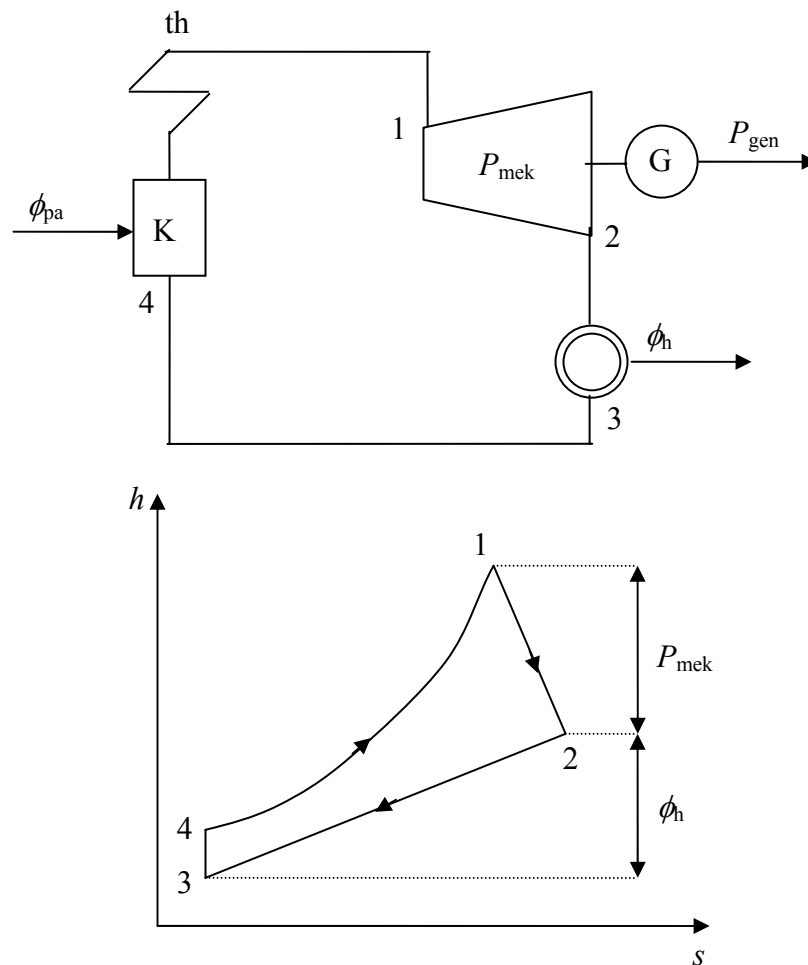
jossa  $\eta_s$  = isentrooppinen hyötysuhde  
 $\Delta h$  = todellinen entalpiamuutos paisunnassa  
 $\Delta h_s$  = isentrooppinen entalpiamuutos paisunnassa

Todellisuudessa paisunta tapahtuu useassa vaiheessa turbiinin eri osissa. Jos yksittäisten osien hyötysuhteita ei tunneta, on yksinkertaisinta yhdistää paisunnan alkupiste ja loppupiste Mollierin  $h,s$ -diagrammissa suoralla ja olettaa, että kaikki välipisteet ovat tällä suoralla. (VOP)

Paisuntahyötysuhde riippuu tilavuusvirrasta, painesuhteesta, tuorehöyryn paineesta ja lämpötilasta sekä säätövyöhykkeen suunnittelusta. Suunnitteluvirtauksesta poikkeavilla kuorimilla on eri vyöhykkeiden hyötysuhteilla samat arvot kuin suunnitteluvirtauksella, paitsi korkeapaineturbiinin ensimmäisellä ja matalapaineturbiinin viimeisellä vyöhykkeellä, koska painesuhteet ja tilavuusvirrat eivät muutu. (VOP)

Prosesseille, joissa ei ole välitulistusta, paisuntakäyrät määritetään samalla tavalla kuin matalapaineturbiinille. Käyrän lähtöpiste määritetään höyryn entalpiasta ja entropiasta ennen kuristusventtiiliä. Loppupiste on paisunnalle laskettu loppupiste. Loppupiste lasketaan seuraavasti: kerrotaan sisäinen hyötysuhde entalpiaerolla ja vähennetään tämä arvo höyryn entalpiasta sisäänmenossa. (VOP)

Toinen vastapainelaitoksen kannattavuustarkastelujen kannalta tärkeä karakteristika on vastapainevoiman lämmönkulutus eli kulutussuhde. Kulutussuhteella tarkoitetaan sähköenergian tuottoon kuluneen polttoaine-energian suhdetta saatuun sähköenergiaan. Turbiinin kulutussuhde on melkein vakio, ja se riippuu vain turbiinin mekaanisista ja vuotohäviöistä sekä generaattorin ja kattilan hyötysuhteista. Turbiinin isentrooppinen hyötysuhde ei vaikuta ominaislämmönkulutukseen. Mikäli hyötysuhde on huono, saadaan vähemmän sähköenergiaa, mutta lisääntynyt häviö tulee talteen prosessilämpönä. (TK4)



Kuva 2.3. Höyryturbiiniprosessi. Kuvassa olevaa numerointia käytetään yhtälöissä kuvaamaan höyryn entalpiaa prosessin eri vaiheissa (LV-koneet).

Vastapainevoiman lämmönkulutus eli kulutussuhde voidaan määrittellä seuraavien yhtälöiden avulla. Yhtälöissä esiintyviä merkintöjä selventää kuva 2.3. (LV-koneet)

Kattilaan tuotu lämpöteho saadaan

$$\phi_{pa} = q_{mpa} q_i \quad (2.2)$$

jossa

$\phi_{pa}$	= kattilaan tuotu lämpöteho [MW]
$q_{mpa}$	= polttoaineen massavirta [kg/s]
$q_i$	= polttoaineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]

Kattilassa talteenotettu lämpöteho saadaan

$$\phi_K = \eta_K \phi_{pa} = q_{mth} (h_{th} - h_4) \quad (2.3)$$

jossa

$\phi_K$	= kattilasta K saatu lämpöteho [MW]
$\eta_K$	= kattilan K hyötysuhde
$q_{mth}$	= tuorehöyryn massavirta
$h_{th}$	= tuorehöyryn entalpia
$h_4$	= syöttöveden entalpia ennen kattilaa

Vastapaineprosessiin tuodaan kattilasta lämpöteho  $\phi_K$ , joka voidaan jakaa turbiinin siivistöön jäävään lämpötehoon  $\phi_{tb}$  ja teollisuusprosessiin menevään lämpötehoon  $\phi_h$  seuraavasti:

$$\phi_{tb} = q_{mth} (h_1 - h_2) \quad (2.4)$$

$$\phi_h = q_{mth} (h_2 - h_3) \quad (2.5)$$

jossa

$q_{mth}$	= tuorehöyryn massavirta
$h_1$	= höyryn entalpia ennen turbiinia

$h_2$  = höyryn entalpia turbiinin jälkeen

$h_3$  = lauhteen entalpia

Turbiinin siivistöön jäävä lämpöteho eli siivistön vastaanottamalle mekaaniselle teholle saadaan.

$$P_{\text{mek}} = q_{\text{mth}}(h_1 - h_2) = \phi_{\text{tb}} \quad (2.6)$$

Laitoksen nettosähköteho voidaan laskea edellä esitetystä yhtälöstä, kun tunnetaan generaattorin hyötysuhde.

$$P_{\text{gen}} = \eta_{\text{gen}} P_{\text{mek}} \quad (2.7)$$

Vastapainevoiman lämmönkulutus eli kulutussuhde voidaan laskea edellä esitettyjen yhtälöiden perusteella seuraavasti, kun otetaan huomioon vain kattilan ja generaattorin häviöt. Todellisuudessa myös muita häviöitä esiintyy.

$$q_{\text{vp}} = \frac{\phi_{\text{pa}}}{P_{\text{gen}}} = \frac{\phi_{\text{tb}}}{\eta_{\text{k}} \eta_{\text{gen}} \phi_{\text{tb}}} = \frac{1}{\eta_{\text{k}} \eta_{\text{gen}}} \quad (2.8)$$

Kulutussuhde on toisin sanoen kehitetyn nettosähkötehon tuottoon kulutettu polttoaine/sähköteho. Koska Simpeleen vastapaineturbiinissa on vastapainelämmönkulutuksen lisäksi höyrynväliottoja, täytyy myös väliotoista otettujen höyryn lämpöteho huomioida laskettaessa vastapainevoiman kulutussuhdetta.

Vastapaineturbiinin ominaiskulutukseksi tehtaalla on määritetty 1,1. Jakamalla turbiinin ominaiskulutus kattilahyötysuhteella saadaan vastapainevoiman lämmönkulutukseksi 1,22. Lauhdeturbiinille vastaavaksi arvoksi saadaan 3,78. Energia-Ekono on käyttänyt Kauppa- ja teollisuusministeriölle vuonna 1997 laatimassaan, sähköntuotantokustannuksia koskevassa raportissa taulukon 2.1 mukaisia kulutussuhteita.



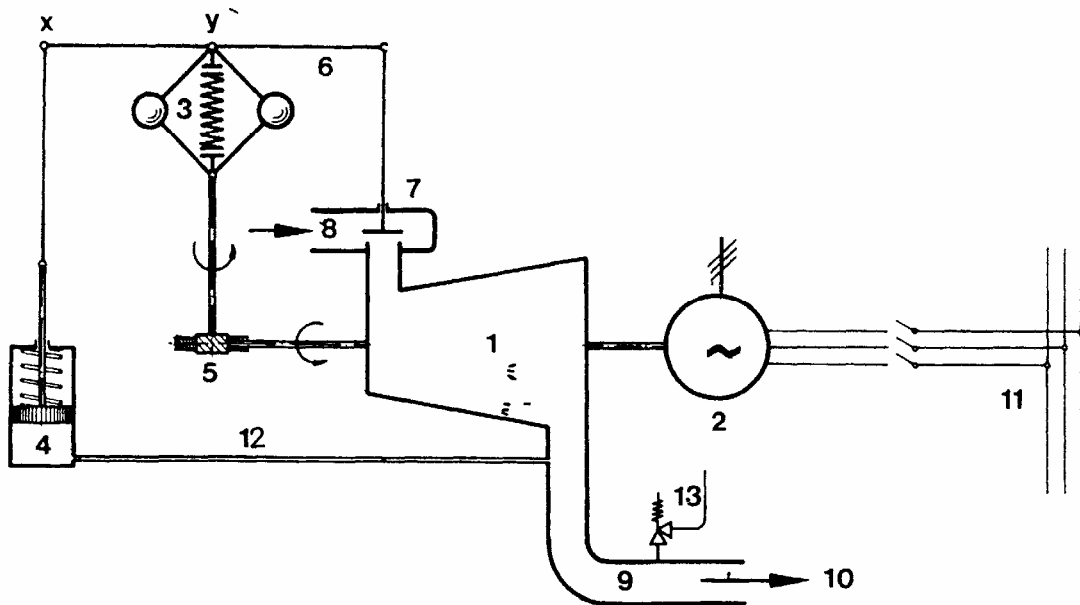
Taulukko 2.1. Voimalaitosten kulutussuhteet (En-Ekono 1997)

Voimalaitostyyppi	Polttoaine	Sähköteho/lämpöteho [MW]	Kulutussuhde
Lämmitysvoimalaitos	turve, puu, kivihiili	60/120	1,26/1,12
IGCC-lämmitysvoimalaitos	turve, puu, kivihiili	65/65	1,26/1,12
Vastapainevoimalaitos	turve, puu, kivihiili	30/97	1,26/1,12
Vastapainevoimalaitos	maakaasu	55/65	1,28/1,10
IGCC-vastapainevoimalaitos	puu	57/70	1,26/1,12

Sähköntuotannon kannattavuustarkastelun kannalta aikaisemmin määriteltyjen kulutussuhteiden käyttö on perusteltua, koska niiden avulla lasketut energiataseet ja todelliset polttoaineen energiamäärät vastaavat riittävällä tarkkuudella toisiaan. Lisäksi kustannustenjako suhdemenetelmällä mahdollistaa myös korjauskertoimien käytön.

#### 2.2.4 Vastapaineen säätö

Tyypillinen teollisuusturbiini on vastapaineturbiini. Siinä tuorehöyry paisutetaan paineeseen, joka on prosessin kannalta toivottava. Höyry poistuu vastapaineturbiinista yleensä kylläisessä tilassa. Höyryn lämpötila pysyy vakiona, koska höyryn painetta säädetään ja kylläisen tilan avulla lämpötila määräytyy yksiselitteisesti.



Kuva 2.4. Vastapaineturbiinin yhdistetyn paineen ja kierrosluvun säädön periaate. 1. höyryturbiini, 2. generaattori, 3. kierrosluvun säädin, 4. painesäädin, 5. säätävä voimansiirto, 6. yhdysvipu, 7. säätöventtiili, 8. tuorehöyry, 9. poistohöyryliitäntä, 10. prosessihöyry, 11. sähköverkko, 12. mittausjohto, 13. varoventtiili, X paineen säätimen ohjauspiste, Y kierrosluvun säätimen ohjauspiste. (VOP)

Kuvassa 2.4 on esitetty vastapaineturbiinin yhdistetyn paineen ja pyörimisnopeuden säädön perusperiaate. Höyryn vastapaine pidetään vakiona turbiinin säädön avulla. Paineensäädin (4) päästää säätöventtiilin läpi virtaamaan sellaisen määrän tuorehöyryä, että venttiilin läpi menevä höyryvirta on sama kuin vastapainehöyryverkon höyryn tarve. Tuotettu sähköteho riippuu siten prosessin höyryn tarpeesta. Generaattori on kytketty sähköverkkoon (11), jolloin turbogeneraattorin pyörimisnopeuden täytyy sopia sähköverkon taajuuteen. Nopeuden säädön periaate etenee seuraavasti. Pyörimisnopeuden säätimen (3) ohjaukspiste (Y) on paikallaan, koska verkon taajuus pysyy vakiona. Kun vastapaine nousee, mikä tarkoittaa höyryn tarpeen pienenemistä, kiertää paineen säädin (4) säätöventtiiliä (7) sulkeutumissuunnassa. Näin höyryn virtaus turbiiniin pienenee, kunnes vastapaine on saavuttanut asetetun arvonsa. (VOP)

### 2.2.5 Leijukerroskattila

Leijukerrospoltto on ryhdytty soveltamaan energiantuotannossa vasta 1970-luvulla. Aikaisemmin sitä oli kuitenkin käytetty monissa teollisuuden sovellutuksissa. Nykyisin leijukerrospoltto on yleistynyt laajasti myös energiantuotantoon, koska polttotapa mahdollistaa eri polttoaineiden polton samassa kattilassa hyvällä palamishyötysuhteella. Myös savukaasupäästöjen kannalta leijukerrospolton alhainen palamislämpötila on edullinen. (Huhtinen 2000)

Leijukerroskattilan arinana toimii hiekkakerros, joka leijutetaan puhaltimien avulla. Hiekkapedin suuren lämpökapasiteetin ansiosta menetelmä soveltuu hyvin kosteiden kiinteiden polttoaineiden polttamiseen, eikä erillistä polttoaineen kuivausta tarvita. Ennen kiinteiden polttoaineiden syöttämistä hiekkakerros esilämmitetään raskaalla polttoöljyllä tai kaasulla toimivien sytytyspolttimien avulla riittävän kuumaksi kiinteiden polttoaineiden polttamista varten. Kun hiekkakerros on saavuttanut lämpötilan 500 - 600 °C, joka mahdollistaa kiinteiden polttoaineiden syttymisen, voidaan polttoaineen syöttö aloittaa. Polttoaineen syöttö hiekkapedille tapahtuu mekaanisesti. Tehokkaan palamisen kannalta on tärkeää, että polttoaine jakaantuu pedin päälle tasaisesti. Tämän vuoksi polttoaine syötetään kattilaan useista pisteistä. Leijupetikattilassa samassa tulipesässä pystytään polttamaan hyvällä hyötysuhteella samanaikaisesti useita polttoaineita, kuten teollisuusjätteitä (myös lietteitä) ja kosteita kotimaisia polttoaineita. (Huhtinen 2000)

### 2.2.6 Vaihtovirtageneraattori

Pyörivät sähkökoneet muuttavat mekaanista energiaa sähköenergiaksi (generaattorit) tai sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi (moottorit). Yleisimmät sähkökoneet ovat tasavirtakone, epätahtikone ja tahtikone. Tasavirtakone toimii nimensä mukaisesti tasavirralla. Epätahti- ja tahtikone toimivat vaihtovirralla. Tahtikoneen nimitys tulee sen pyörimisnopeudesta, joka määräytyy täsmälleen sähköverkon taajuuden perusteella. (Partanen 1997)

Kaikki normaalit sähkökoneet koostuvat seuraavista perusosista: Pyörivä roottori akseleineen, staattori, laakerikilvet tai -pukit ja laakerit. Staattori muodostaa koneen rungon, johon laakerit kiinnittyvät. Roottori on staattorin sisällä laakereiden varassa siten, että niiden väliin jää ilmaväli ja että roottori pääsee pyörimään vapaasti. Staattoriin ja roottoriin on sijoitettu käämitykset, joiden rakenne riippuu koneen laadusta. (Partanen 1997)

Generaattorin toiminta perustuu magneettikentässä liikkuvaan johtimeen syntyvään sähkömotoriseen jännitteeseen (smj). Tahtikoneiden yleisin käyttösovellutus on sähköenergian tuotantoon käytetty generaattori. Höyryvoimalaitoksilla käytetään turbiinin pyörittämiä turbogeneraattoreita, koska turbiinin pyörimisnopeus on suuri eli 3000 r/min. Tahtikoneen pyörimisnopeudella ja verkon taajuudella on kiinteä yhteys yhtälön 2.9 mukaisesti.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.9)$$

jossa  $n$  = pyörimisnopeus [r/min]

$f$  = taajuus

$p$  = napapariluku

Tahtikone koostuu staattorista, jossa on kolmivaiheinen vaihtovirtakäämitys. Erona epätahtikoneeseen on, että roottorissa on aktiivinen magnetointikäämitys, eli magnetointikäämitykseen voidaan johtaa magnetointivirta esimerkiksi liukuharjojen avulla. Magnetointivirta on tasavirtaa, joka voidaan tuottaa esimerkiksi generaattorin kanssa samalle akselille kytketyn tasavirtageneraattorin avulla. (Partanen 1997)

Kun tahtigeneraattori kytketään jäykkään verkkoon (jännite vakio), ei magnetoimisvirran säätö voi muuttaa koneen napajännitettä. Magnetoinnin säädöllä vaikutetaan tällöin koneen loisvirtaan. Kun magnetointivirtaa kasvatetaan, saa kone magnetoimistehoa yli oman tarpeensa, jolloin se antaa ylijäämän verkkoon. Kone syöttää tällöin induktiivista loisvirtaa, jolla voidaan kompensoida kapasitiivisen loisvirran kulutusta. Ylimagnetoimalla tahtigeneraattoria vältetään siirtämästä loistehoa pitkiä matkoja, jolloin verkossa ei esiinny niin suurta jännitteenalenemaa. (Partanen 1997)

### **2.3 Energiantuottajalle asetetut ympäristövelvoitteet**

Ilmansuojelulaki ja -asetus kumoutuivat, kun ympäristönsuojelulaki ja -asetus tulivat voimaan 1.3.2000. Ilmansuojeluvuorokäytön taso säilyy jokseenkin ennallaan ja suurin osa ilmansuojelulain säännöksistä sisältyy uuteen ympäristönsuojelulakiin. Ilmansuojelulain nojalla annetut yleiset määräykset ja ohjeet jäivät voimaan, vaikka ilmansuojelulaki ja -asetus kumottiin. (Ympäristö)

Ilmansuojelulain ja ympäristönsuojelulain nojalla valtioneuvosto on määritellyt voimalaitoksille rikkidioksidi-, typpioksidi- ja hiukkaspäästöjen raja-arvot, joita laitokset eivät saa ylittää. Lisäksi vuoden 2005 alusta alkaen yli 20 MW:n tehoisten laitosten hiilidioksidipäästöt kuuluvat päästökauppalainsäädännön piiriin. (Ympäristö)

### **2.4 Päästökauppa**

Päästökauppalaki (683/2004) tuli voimaan 4.8.2004. Lailla toimeenpannaan EY:n päästökauppadirektiivi (2003/87/EY) ja sen mukainen EU:n sisäinen päästökauppa. Päästökauppalakia sovelletaan 20 MW suurempien polttolaitosten ja niiden kanssa samaan kaukolämpöverkkoon liitettyjen pienempien polttolaitosten, öljynjalostamoiden, koksamoiden sekä eräiden teräs-, mineraali- ja metsäteollisuuslaitosten laitosten ja prosessien hiilidioksidipäästöihin. (EMV)

Päästökaupan piiriin kuuluva laitos tarvitsee vuoden 2005 alusta luvan, jonka nojalla sillä on oikeus päästää hiilidioksidia ilmakehään. Luvat myöntää energiamarkkinavirasto. Luvan haltijalla on velvollisuus päästötietojen seurantaan ja raportointiin. EU:n komissio on antanut päästöjen seurantaan koskevan päätöksen

(2004/156/EY), jossa on määritelty päästötietojen tarkkailuvaatimukset ja tarkkuustasot. Suomessa päästökaupan valvonta kuuluu energiamarkkinavirastolle. (EMV)

Päästökaupan ensimmäinen kausi kattaa vuodet 2005 - 2007. Ensimmäisellä kaudella päästökaupan piirissä on vain hiilidioksidipäästöt. Toisella kaudella, vuosina 2008 - 2012 päästökauppaa saatetaan ryhtyä käymään myös metaanilla, dityppioksidilla sekä nk. fluorikaasuilla. (Ympäristö)

#### *2.4.1 Hiilidioksidipäästöoikeuksien alkujako*

Päästöoikeudet jaetaan toiminnanharjoittajille laitoksittain. Päästöoikeuksien jako ennen vuotta 1997 valmistuneille laitoksille perustuu niin sanottuun perintömenetelmään, jossa kullekin laitokselle aiottu päästöoikeudet lasketaan päästökauppalaissa määritellyillä laskentasäännöillä kyseisen laitoksen vuosina 1998 - 2002 toteutuneista päästöistä. Lauhdevoiman tuotannolle jakso on kuitenkin vuodet 2000 - 2003. Laitoskohtaisten päästöoikeuksien laskennassa ei ole käytetty alaryhmäkohtaisia, toimialakohtaisia eikä laitoskohtaisia tuotannon kasvuennusteita. Alkujaossa laitoksille annetaan päästöoikeudet vuosille 2005 - 2007. Päästöoikeuksien alkujako tapahtuu maksutta. Mahdollisesti käyttämättä jääviä päästöoikeuksia ei voi siirtää toiselle päästökauppakaudelle, vuosille 2008 - 2012. (KTM 1)

### 3. VOIMALAITOKSEN KUSTANNUSTEN MUODOSTUMINEN

Energia-alalle on ominaista investointien suuruus ja niiden pitkävaikutteisuus, joten kustannuslaskennassa pääomakustannusten käsittelyn merkitys korostuu. Kustannusten käsittely edellyttää niiden jakamista eriluonteisiin komponentteihin. Ajoittumisen perusteella kustannukset voidaan jakaa käyttöä edeltäviin investointikustannuksiin ja käytönaikaisiin kustannuksiin. Käytönaikaiset kustannukset koostuvat polttoaine-, käyttö- ja kunnossapitokustannuksista. Käytönaikaiset kustannukset voidaan jakaa kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin, mutta jako ei ole yksikäsitteinen, koska monet kustannukset ovat riippumattomia tuotantomäärien nopeista vaihteluista. (Energia 1999)

Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokset toimivat yleensä joko kaukolämpölaitoksina tuottaen sähköä yleiseen jakeluverkkoon tai tuotetulla energialla katetaan teollisuuslaitoksen sähkön ja lämpöenergian tarve. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon perustana on riittävän suuri ja tasaisena pysyvä lämpökuorma, koska lämmön ja sähköntuotannon välistä suhdetta ei yleensä voida säätää, ja yhteistuotantolaitosta ajetaan lämpökuorman mukaan. (Poikonen 2005)

Voimalaitoksen energiantuotannon kokonaiskustannukset voidaan jakaa kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. Kiinteät kustannukset koostuvat pääosin investoinnin pääomakustannuksista sekä kiinteistä käyttö- ja kunnossapitokustannuksista. Muuttuviksi kustannuksiksi lasketaan polttoainekustannukset sekä muut tuotannon määrästä riippuvat kustannukset. Voimalaitoksen kokonaiskustannusten muodostuminen voidaan esittää yhtälön 3.3 avulla. (Poikonen 2005)

$$K_{\text{kok}} = K_{\text{ki}}P + K_{\text{mu}}E = P(K_{\text{ki}} + K_{\text{mu}}t_h) \quad (3.3)$$

jossa	$K_{\text{kok}}$	= energiantuotannon kokonaiskustannukset [€/a]
	$K_{\text{ki}}$	= tehoon verrannolliset kiinteät kustannukset [€/W, a]
	$K_{\text{mu}}$	= energian tuotannon muuttuvat kustannukset [€/Wh]
	$P$	= laitoksen nimellisteho
	$E$	= laitoksen vuotuinen energiantuotanto
	$t_h$	= $E/P$ on laitoksen huipunkäyttöaika [h/a]

### 3.1 Kiinteät kustannukset

Pääomakustannukset muodostavat suurimman osan energiantuotantolaitosten kiinteistä kustannuksista. Yleisten kustannuslaskenta periaatteiden mukaisesti investointikustannukset kirjataan taseeseen pääomana. Tuotantokustannuksiin sisällytettävät pääomakustannukset aiheutuvat siten tämän pääoman poistoista ja siitä maksettavista koroista. Muut kiinteät kustannukset muodostuvat pääosin kiinteistä käyttökuluista, joihin kuuluvat käyttöhenkilökunnan palkkakustannukset, suunnitellut vuosihuollot, vakuutukset ja polttoaineen varastoinnin aiheuttamat kulut. Kiinteät kustannukset muodostavat energian tuotantomäärästä riippumattoman vuosikustannuksen. Ne eivät kuitenkaan ole täysin kiinteitä, koska pitkäaikainen tuotannon keskeyttäminen tai rajoittaminen vähentää näitä kustannuksia. (Energia 1999)

Kiinteisiin huolto- ja kunnossapitokustannuksiin sisältyvät lähinnä laitoksen perushuolto varaosineen, kattilan ja turbiinin revisiot sekä kaikki kiinteistöjen hoito ja ylläpitokustannukset. (Poikonen 2005)

### 3.2 Muuttuvat kustannukset

Muuttuvat kustannukset syntyvät laitoksen varsinaisesta käytöstä energiantuotannossa. Ne ovat verrannollisia käytön määrään. Polttoainekustannukset ovat yleensä suurin kuluerä. Muita muuttuvia kustannuseriä ovat kaikki tuotantoon verrannolliset kunnossapidon kulut. (Energia 1999)

Polttoainekustannukset muodostavat merkittävimmän osuuden kaikista voimalaitoksen käyttöön liittyvistä kustannuksista, joista ne voivat olla jopa 80 %. Merkittävimmät polttoainekustannusten suuruuteen vaikuttavat tekijät ovat polttoaineen yksikköhinta sekä voimalaitoksen kulutussuhde eli polttoainetehon suhde laitoksen tuottamaan nettotehoon. (Poikonen 2005)

Muuttuviin käyttö- ja kunnossapitokustannuksiin luetaan mm. kemikaali- ja muut ainekustannukset, veden käsittely- ja lisävesikustannukset, savukaasujen puhdistus- ja tuhkan käsittelykustannukset, omakäyttö, käyttöön verrannollinen huolto ja korjaus tarvikkeineen sekä polttoöljyn ja maakaasun varakäyttö. Energiantuotannon määrästä riippuvat savukaasujen puhdistamiskustannukset koostuvat puhaltimien, pumppujen ja

muiden laitteiden käyttökustannuksista sekä muista puhdistukseen tarvittavista raaka-ainekustannuksista. (Poikonen 2005)

### **3.3 Kustannusten jakaminen sähkön ja lämmön tuotannon kesken**

Yleisissä voimalaitoksen kannattavuustarkasteluissa voimalaitoksen kustannusten jakaminen eri energiatuotteille ei ole aina tarpeellista. Usein energiantuotannon kannattavuutta voidaan tarkastella yhtenä kokonaisuutena. Jos tavoitteena on energian sisäinen hinnoittelu, energian säästö tai käytön optimointi, on kustannusten erittely tehtävä. Myös sähkön ja lämmön tuotannon polttoaineiden erilainen verotuskäytäntö puoltaa kustannusten jakamista. (Poikonen 2005)

Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa tuotteet syntyvät saman tuotantoprosessin tuloksena. Molemmilla tuotteilla on yhteinen raaka-aine, tässä tapauksessa tuorehöyry, josta jalostetaan sähköä ja prosessihöyryä. Raaka-aineen eli tuorehöyryn, tuotannosta aiheutuvat muuttuvat kustannukset on pystyttävä jakamaan aiheuttamisperiaatteen mukaisesti molemmille tuotteille erikseen. Yhteistuotannon muuttuvien kustannusten jako voidaan suorittaa joko termodynaamisin perustein, vaihtoehtoisen tuotantotavan tai suhdemenetelmän avulla. Termodynaamisia jakoperusteita ovat energia-, työ- ja exergiamenetelmä.

Kutakin jakomenetelmää tai niiden yhdistelmiä voidaan soveltaa eri laskentatilanteiden, laitoksen omistussuhteiden, laitoksen fyysisen rakenteen tai tuotantojärjestelyjen asettamien rajoitteiden mukaan oikeanlaisen kustannustenjaon saavuttamiseksi, mutta käytettävien menetelmien valinta on hyvin tapauskohtaista. (Poikonen 2005)

### **3.4 Muuttuvien kustannusten jakomenetelmät**

Seuraavissa kappaleissa on lyhyesti kuvattu kutakin kustannusten jakomenetelmää tarkemmin sekä perusteltu, miksi kustannusten jakoperusteena on päädytty käyttämään suhdemenetelmää.

Termodynaamisissa kustannusten jakomenetelmissä muuttuvat kustannukset jaetaan termodynaamisten lakien perusteella. Jakoperusteina voidaan pitää tuotannon energian kulutusta, tuotteiden energiasisältöä tai tuotannon vaikutusta polttoaineen kulutukseen. Muut teoreettiset kustannusten jakomenetelmät on kehitelty edellisten pohjalta.



### 3.4.1 Energiamenetelmä

Energiamenetelmä on kustannusten jakomenetelmistä yksinkertaisin ja selkeimmin ymmärrettävä. Energiamenetelmän avulla polttoainekustannukset sekä päästökustannukset jaetaan tuotettujen energioiden suhteessa, jolloin kaikille tuotteille kohdistuu polttoaineita laitoksen kokonaishyötysuhteen mukaisesti. Laitoksissa, joissa tuotetaan yhteistuotannon lisäksi myös lauhdesähköä, on lauhdetuotannon polttoaineiden erottaminen ennen energiamenetelmän käyttämistä tarpeellista. (Liikanen 1999)

### 3.4.2 Exergiamenetelmä

Energiaa koskevissa taloudellisissa tarkasteluissa unohdetaan usein, että energiaa on monenlaatuista. Mekaaninen energia ja sähkö ovat siinä suhteessa parasta energiaa, että niitä voidaan muuntaa toisikseen tai lämmöksi lähes 100 % hyötysuhteella. Polttoaineenergian muuntaminen sähköksi onnistuu parhaimmillaankin vain noin 60 % hyötysuhteella. Fysiikan termein hyödyksi saatavissa olevaa energiaa kuvaa exergia, ei tavanomainen energia. Sähkön erillistuotannossa energia- ja exergiahyötysuhde on sama, mutta erillisessä lämmön tuotannossa exergiahyötysuhde on alhainen. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto on tehokas tapa parantaa polttoaineiden käytön tehokkuutta eli exergiahyötysuhdetta. Yhteistuotannossa kokonaishyötysuhde eli tuotetun sähkön ja lämmön tuotannon summa on lähes yhtä korkea kuin pelkän lämmön tuotannossa, mutta parhaassa tapauksessa jopa yli puolet energiasta saadaan exergiapitoisena sähköinä. Jos lämpö tarvitaan suhteellisen korkeassa lämpötilassa, kuten teollisuudessa, jää sähkön osuus pienemmäksi tyypillisesti 20 - 30 %:iin tuotetusta energiasta. (Energia 1999)

Exergiametelmässä otetaan huomioon energian laatu. Eri energialajien arvo määräytyy sen mukaan, miten suuri osa siitä voidaan muuttaa mekaaniseksi työksi. Jokainen energialaji voidaan jakaa kahteen osaan, exergiaan ja anenergiaan. Toinen näistä voi olla nolla. Exergia on energiaa, joka voidaan muuttaa toiseksi energiamuodoksi. Loppuosa, jota ei voida muuttaa, on anenergiaa. (Kiviranta 1995)

Ominaisexergioiden laskemiseksi on tarkasteltava tuotantoprosessia sisäisesti. Paineiden ja lämpötilojen avulla voidaan laskea prosessivirtojen ominaisexergiat. Kustannusten jakamiseksi voidaan käyttää yksinkertaistettua menetelmää, jossa

määritellään prosessihöyrylle ja kaukolämmölle niiden tyypilliset tilasuureet. Näiden arvojen avulla lasketaan painokertoimet prosessi- ja kaukolämmölle. Sähkön painokerroin on yksi, koska se on muutettavissa kokonaan työksi. (Liikanen 1999)

Höyryprosessissa massavirran exergia voidaan määrittää prosessin eri pisteissä lämpötilan, entalpian ja paineen avulla. Ominaisexergian lauseke voidaan kirjoittaa muotoon. (Heikkinen 1994)

$$e = h - h_u - T_u \cdot (s - s_u) \quad (3.2)$$

jossa	$e$	= exergia
	$h$	= entalpia [kJ/kg]
	$s$	= entropia [J/kgK]
	$T$	= lämpötila [K]
	$u$	= ympäristön tilasuure

Lisäksi on huomattava, että systeemiin syötettävästä polttoaineiden exergiasisällöstä suuri osa menetetään kattilan exergiahäviöihin. Exergiaperusteinen jakotapa on monimutkainen soveltaa käytännössä. Lisäksi jakotapa itsessään sisältää kattilan exergiahäviöiden kohdennusongelman eri tuotteille. (Heikkinen 1994)

### 3.4.3 Työmenetelmä

Työmenetelmässä yhteistuotannon lämmölle kohdistetaan polttoaineet sen mukaan paljonko sähkötehoa tai sähköntuotantoa menetetään verrattuna tilanteeseen, jossa väliotto- tai vastapainehöyryt saisivat paisua lauhduttimen paineeseen saakka. Menetelmä ei sovellu käytettäväksi Simpeleen tehtaalla, koska prosessin tarvitsema höyry on selkeästi voimalaitoksen primäärituote. (Liikanen 1999)

### 3.4.4 Vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmä

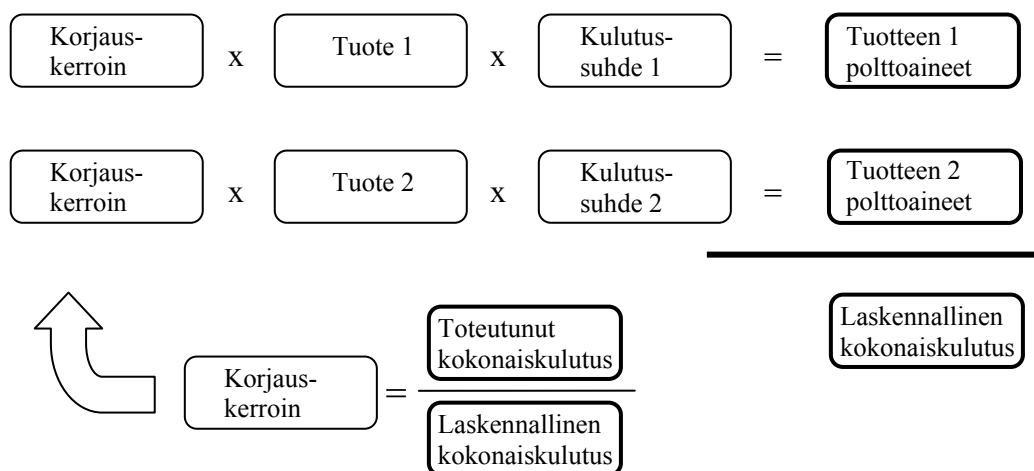
Vaihtoehtoisen hankintatavan menetelmässä valitaan toinen yhteistuotannon tuotteista, sähkö tai lämpö, tuotetuksi sille tyypillisellä erillistuotantomuodolla. Näin saatu vaihtoehtoisen hankinnan polttoainekulutus vähennetään yhteistuotantolaitoksen polttoainekulutuksesta ja jäljelle jäävä osa polttoaineista kohdennetaan toiselle

tuotteelle. Tämän jakotavan seurauksena yhteistuotannon hyöty kohdistuu pelkästään toiselle tuotteelle. (Liikanen 1999)

### 3.4.5 Suhdemenetelmä

Suhdemenetelmässä jokaiselle tuotteelle annetaan kiinteä kulutussuhde. Kulutussuhteiden avulla lasketaan vuosituotannoista laitokselle laskennallinen polttoaineenkulutus. Laskennalliset kulutukset normeerataan vastaamaan toteutunutta kokonaiskulutusta korjauskertoimen avulla. Korjauskertoimen avulla laitoksen kokonaishyötysuhteen paremmuus/huonomuus suhteessa käytettyihin kulutuskertoimiin jakautuu tasaisesti kaikille tuotteille, niin sähkölle kuin lämmöllekin. (Liikanen 1999)

Suhdemenetelmä on kehitetty lämmön vaihtoehtoisen hankinnan menetelmästä ja yhteistuotannon hyöty annetaan siinä sähkölle. Erona näiden menetelmien välillä on sähköntuotannon polttoaineiden jakautuminen lauhde-, prosessi- ja kaukolämpövoiman kulutussuhteiden määräämässä suhteessa. Lämmön vaihtoehtoisen hankinnan menetelmässä sähkön yhteistuotannon polttoaineet jakautuvat tuotantojen suhteessa. Menetelmä on korjauskertoimen ansiosta erityisen hyvä tilastollisessa käytössä. (Liikanen 1999)



Kuva 3.1. Suhdemenetelmän periaate. (Liikanen 1999)

Suhdemenetelmässä kustannusten jako perustuu eri tuotteille annetuille polttoaineen kulutussuhteille. Molemmille tuotteille määritellään oma erillinen kulutussuhde, jonka

perusteella lasketaan voimalaitokselle teoreettinen polttoaineenkulutus ennustetun energiankulutuksen perusteella. Teoreettinen kulutussuhde voidaan normeerata vastaamaan todellista kuvassa 3.1 esitetyllä tavalla. (Liikanen 1999, Gochenour 2003)

Kustannusten jakamiseksi sähkön ja lämmöntuotannon kesken ei ole yhtä oikeaa ratkaisua (Energia 1999). Jakoperusteen tulee olla selkeä ja ymmärrettävä, jotta se olisi sovellettavissa erilaisissa tapauksissa. Lisäksi jakotavan tulisi olla oikeudenmukainen syrjimättä kumpaakaan tuotetta (Heikkinen 1994). Tässä diplomityössä sähkön omatuotannon kannattavuutta arvioidaan suhdemenetelmän avulla. Menetelmää on käytetty Simpeleen voimalaitoksella perinteisesti ja sen avulla voidaan suorittaa energiaverotuksen ja sähköntuotannon tukien vaatima erittely lämmön- ja sähköntuotannon polttoaineista. Lisäksi menetelmä mahdollistaa lauhdesähkön polttoaineiden erottamisen jälkikäteen tuotetun lauhdesähkön määrän perusteella. Menetelmän avulla voidaan jakaa myös voimalaitoksen kiinteät kustannukset, joten sen käyttö on Simpeleen voimalaitoksen tapauksessa kaikin puolin perusteltua.

#### *3.4.6 Sähköhinnan muodostus*

Sähkömarkkinalain mukaan sähkön tuotanto ja kauppa kuuluvat vapaan kilpailun piiriin. Sähkön siirto kuuluu valtakunnalliselle kantaverkkoyhtiölle ja jakelusta huolehtii alueellisessa monopoliasemassa oleva jakeluverkonhaltija. Sähkön tuotannon ja myynnin osalta sähkömarkkinat avattiin vapaalle kilpailulle vuonna 1995. Ensimmäisessä vaiheessa sähkönhankinnan kilpailuttaminen oli mahdollista vain yli 500 kW suurasiakkaille. (Sähkömarkkinat)

Sähkön hinta muodostuu sähköenergian hankinnan kustannuksista, sähkön siirron kustannuksista ja sähköveroista. Siirtohintaa muodostuu sähkön siirrosta kantaverkossa, alueverkossa ja jakeluverkossa. Teollisuusasiakkaalla sähköenergian osuus sähkön toimituksen kokonaiskustannuksista on noin puolet sähkön kokonaishinnasta. Siirron osuus on noin neljännes samoin kuin sähköveron osuus. (Sähkömarkkinat)

Sähkön kysyntä on vakaata, ja sähkömarkkinoiden avautumisen myötä sähköntuotannon toimintaympäristö on muuttunut. Kilpailu on kiristynyt ja Suomi kuuluu entistä selkeämmin pohjoismaisiin ja eurooppalaisiin markkinoihin. Kilpailun myötä toimitussopimukset ovat lyhentyneet ja toiminnan riskit kasvaneet.

Ympäristötekijöiden, kuten ympäristöverojen ja päästörajoitusten, merkitys sähkön tuotannossa on viime vuosina lisääntynyt. (Sähkömarkkinat)

Tehokkaasti toimivilla sähkömarkkinoilla sähköntuottaja joutuu päättämään, millä hinnalla tuotanto on kannattavaa ja milloin tuotanto kannattaa keskeyttää. Vertailu perustuu lyhytaikaisten toimitussopimusten sähkömarkkinoilla sähköntuotannon muuttuviin kustannuksiin, jotka ovat samalla lyhyellä aikavälillä sähköntuotannon marginaalikustannukset. Kysyntää ja tarjontaa vastaava tasapainohinta voidaan määrittää järjestämällä tuotantovaihtoehdot muuttuvien kustannusten mukaiseen edullisuusjärjestykseen ja etsimällä se hinta, jota edullisemmat voimalaitokset riittävät tyydyttämään kysynnän. Tällöin on otettava huomioon myös kysynnän hintariippuvuus. Hintamekanismi merkitsee sitä, että marginaalituottaja eli tuottaja, joka on hintajärjestyksessä viimeisenä kyseisellä tuotantohetkellä, pystyy kattamaan sähköstä saatavalla hinnalla tuotannostaan aiheutuvat muuttuvat kustannukset mutta ei saa juurikaan katetta kiinteiden kustannusten peittämiseen. Sähköntuottaja saa tehokkaan kilpailun vallitessa katetta kiinteiden kustannusten peittämiseen vain siinä määrin kuin tuotannon muuttuvat kustannukset alittavat marginaalituottajan kustannukset. (Energia 1999)

Edellä esitetyt tarkastelut koskevat suoraan vain sellaisia tuottajia, jotka voivat kullakin hetkellä erikseen päättää tuottamisesta ja tuottamatta jättämisestä. Jos tuotannon säätäminen on hidasta, on vertailussa tarkasteltava riittävän pitkän aikavälin keskihintoja. Yhteistuotannon osalta marginaalikustannukset ovat vaikeammin määriteltävissä ja riippuvat aina lämmöntarpeesta ja lämmöntuotannon vaihtoehdoista. (Energia 1999)

Sähköenergian hinnan ennustaminen Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla on vaikeaa johtuen vesivoiman suuresta osuudesta ja kysynnän vaihtelusta. Sähkön tuottamiseen tarvittavaa kapasiteettia on oltava riittävästi myös vähäsateisina vuosina. Tämän vuoksi kapasiteettia ja tarjontaa on normaalivuosina liikaa, jolloin sähkön hinnan voidaan olettaa pysyvän edullisella tasolla. Suomen oloissa tämä tarkoittaa sitä, että vain edullisimmat laitokset toimivat kannattavasti ja tuottavat riittävästi katetta kaikkien kiinteiden kulujen ja poistojen maksamiseen. Hinnat nousevat korkealle tasolle vain harvoina vuosina, jolloin myös kalliimpia tuotantovaihtoehtoja on kannattavaa käyttää. (Energia 1999)

Höyryvoimalaitosten tehonjako voidaan optimoida tuotantokustannusten minimoimiseksi. Optimointi täytyy kuitenkin tehdä lämmön kulutuksen ehdoilla. Voimalaitoksen tuotannon optimoimiseksi on tunnettava laitoksen kulutussuhdekäyrä. Kulutussuhdekäyrän ja polttoaineen hinnan avulla saadaan sähkölle määriteltyä polttoainekustannusten mukainen hinta (Mörsky 1994). Ominaislämmönkulutus kuvaa sitä, kuinka paljon kattilassa tarvitsee siirtää lämpötehoa höyryyn tuotettuun sähkötehoon nähden. Ominaiskulutukseen vaikuttava hyötysuhde on kokonaishyötysuhde, joka sisältää turbiinin isentrooppisen hyötysuhteen, mekaanisen hyötysuhteen ja generaattorin hyötysuhteen. (Dyster 1999)

### **3.5 Sähkön hankinta sähkömarkkinoilta**

Sähkön hankinta sähkömarkkinoilta perustuu luotettavaan kulutusennusteeseen. Sähkön kulutusta ennustettaessa kiinnostavia asioita ovat hetkellinen pätö- ja loisteho, huipputeho, kulutuksen ajallinen vaihtelu, energian tarve ja häviöenergia. (Sähkömarkkinat)

Teollisuuden prosesseja ei voida mallintaa julkisten jakeluverkkojen tyyppikuormituskäyrillä. Teollisuuden kuormitukset ovat hyvin prosessisidonnaisia ja jakeluverkkoihin verrattavaa tyyppikäyttäytymistä on vaikeampi löytää. Yksittäisen teollisen prosessin kuormituskäyttäytymistä ei voida kuvata tyyppikuormituskäyrillä, vaan se riippuu yksilöllisesti prosessista. Esimerkiksi kahdella samanlaisella tuotantoprosessilla, kuten paperikoneella, ei voida varmuudella sanoa olevan samanlainen kuormituskäyttäytyminen. (Kauppinen 2002)

Sähkömarkkinalain uudistamisen myötä vuonna 1995 sähkön loppukäyttäjille avautui mahdollisuus kilpailuttaa sähköntoimittajansa. Markkinauudistuksen myötä myös suurten käyttäjien sähkönhankintamahdollisuudet monipuolistuivat. Aikaisemmin mahdollisia hankintatapoja olivat olleet tuottajien kanssa solmitut pitkät sopimukset sekä oman tuotantokapasiteetin omistaminen. Muuttuneessa markkinatilanteessa kahdenvälisen sopimusten lisäksi sähköä oli mahdollista hankkia myös sähköpörssistä. (Sähkömarkkinat)

Sähköpörssi on avoin, keskitetty ja neutraali markkinapaikka, jossa sähkön markkinahinta määräytyy kysynnän ja tarjonnan perusteella. Pohjoismaisilla

sähkömarkkinoilla sähkökauppa käydään Nord-Poolissa. Nord-Poolin kaupankäyntituotteet jaetaan fyysisiin tuotteisiin ja finanssituotteisiin. Lisäksi sähköpörssin Suomen aluehinta toimii referenssihintana myös Suomessa käytävässä tase- ja säätösähkökaupassa. (Sähkömarkkinat)

Sähköpörssin fyysiset markkinat eli SPOT-markkinat kehitettiin markkinaosapuolten sähkön tilapäiskaupan tarpeeseen ja uskottavaan referenssihintaan. SPOT-markkinoiden fyysisillä tuotteilla käytävä kauppa johtaa aina sähkön toimitukseen. Avoimilla markkinoilla sähkön tuotannon ja hankinnan optimointi on kannattavan toiminnan keskeisiä edellytyksiä. Vaikka sähkön kulutukseen liittyy epävarmuutta, sähköä on kyettävä ostamaan ja myymään kulloisenkin tarpeen mukaan. (Sähkömarkkinat)

Sähköpörssin SPOT-markkinoiden hyötyjä ovat kaikille avoimen referenssihinnan muodostuminen ja markkinaosapuolten tasa-arvoinen kohtelu. SPOT-markkinoiden avulla saadaan sähkölle markkinahinta vuorokauden jokaiselle tunnille. (Sähkömarkkinat)

OTC-markkinoilla tarkoitetaan kaikkea sähköpörssin ulkopuolella käytävää sähkön tukkukauppaa. Perinteinen kahdenkeskisiin sopimuksiin perustuva tukkukauppakin on osa nykyisiä OTC-markkinoita. Pörssikaupasta poiketen OTC-markkinoilla kaupankäynnissä on aina olemassa vastapuoliriski. Sähköpörssi ja OTC-markkinat täydentävät avoimilla sähkömarkkinoilla toisiaan, jolloin sähkön tukkumarkkinoille muodostuu toimiva markkinamekanismi. (Sähkömarkkinat)

#### **4. POLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET SEKÄ VEROTUS JA ENERGIATUET**

Tässä luvussa käsitellään energia- ja sähköveroa sekä niiden vaikutusta sähköntuotannon muuttuvien kustannusten muodostumiseen. Energiaverotusta ja energiatukien vaikutusta käsitellään siinä laajuudessa kuin ne vaikuttavat muuttuvien kustannusten syntyymiseen Simpeleen voimalaitoksella.

Polttoaineiden ominaisuuksia ja kustannusvaikutuksia käsitellään niiden polttoaineiden osalta, joita Simpeleellä on mahdollista ja taloudellisesti kannattavaa polttaa. Polttoaineiden ominaisuuksia ja kustannuksia arvioidaan kokonaistaloudellisesta näkökulmasta.

##### **4.1 Energiaverotus**

Energiaverotus on valtiolle huomattava tulonlähde. Energiaverotuksen avulla valtio kerää veroja lähes 3 miljardia euroa, mikä on noin 9 % kaikista verotuloista. Energiaverot ovat valtiolle keskeinen ohjauskeino energia- ja ympäristöpolitiikassa. Verotuksen avulla pyritään hillitsemään energiankulutuksen kasvua ja ohjaamaan energiantuotantoa sellaisiin vaihtoehtoihin, jotka aiheuttavat vähemmän päästöjä. (KTM 2)

Nykyinen energiaverojärjestelmä on ollut käytössä vuodesta 1997. Energiaverot ovat valmisteveroja ja niitä kannetaan liikenne- ja lämmityspolttoaineista sekä sähköstä. Energiaveron lisäksi energiatuotteista kannetaan huoltovarmuusmaksu. Energiavero jakautuu perusveroon ja lisäveroon. Perusveroa kannetaan ainoastaan öljytuotteista. Lisäveroa peritään öljytuotteista sekä muista fossiilisista polttoaineista ja sähköstä. Polttoturpeen valmistevero koskee laitoksia, jotka käyttävät polttoturvetta lämmöntuotantoon enemmän kuin 25000 MWh kalenterivuodessa. Valmistevero suoritetaan tämän määrän ylittävstä polttoturpeen käytöstä. (KTM 2; Tulli)

Energiaverolainsäädännöstä vastaa valtionvarainministeriö. Kauppa- ja teollisuusministeriö osallistuu energiaverotuksen valmisteluun, jotta verotus tukisi mahdollisimman tehokkaasti energia- ja ympäristöpolitiikan tavoitteita. Kauppa- ja teollisuusministeriö antaa asetuksilla tarkempia määräyksiä verotukien



laskentaperusteista. Veronkanto ja verotukien maksaminen on tullihallituksen ja alueellisten tullipiirien vastuulla. (KTM 2)

## **4.2 Energiatuet**

Energiaverojärjestelmä sisältää verojen lisäksi erilaisia tukia. Niistä energiapoliittisesti tärkeimpiä ovat verotuet, joita uusiutuviin energialähteisiin perustuvalla sähköntuotannolle maksetaan. Sähköntuotannon tuet otettiin käyttöön vuonna 1997, jolloin energiaverotusta uudistettiin. (KTM 2)

Sähköntuotannon tukea saadaan sähköstä, joka on tuotettu tuulivoimalla, vesivoimalaitoksessa, jonka nimellisteho on enintään 1 MVA, puulla, puupohjaisilla polttoaineilla, kierrätyspolttoaineella, biokaasulla, metsähakkeella, polttoturpeella enintään 40 MVA:n lämmitysvoimalaitoksissa, metallurgisten prosessien jätekaasuille tai kemiallisten prosessien reaktiolämmölle. Vuonna 2003 tuen perusmäärä oli 0,42 snt/kWh. (KTM 2)

Lisäksi tuulivoiman ja metsähakkeen kilpailukyvyn turvaamiseksi ja parantamiseksi niillä tuotetulle sähkölle maksetaan korotettua tukea, joka vuonna 2003 oli 0,69 snt/kWh. Kierrätyspolttoaineella tuotetun sähkön tuki on 0,25 snt/kWh. (KTM 2)

Kansallisessa lainsäädännössä kaikki verotuet on säädetty toistaiseksi voimassa oleviksi. Valtion maksamat energiatuet edellyttävät kuitenkin EU:n komission hyväksyntää, jonka voi saada vain määräajaksi. Määräajan päätyttyä tuille on haettava uusi lupa. Komissio on hyväksynyt Suomen sähköntuotannon tukijärjestelyt vuoden 2006 loppuun asti. Energiaintensiivisten yritysten veronpalautusjärjestelmälle on lupa vuoden 2011 loppuun asti. (KTM 2)

Taulukko 4.1. Simpleen voimalaitoksen pääpolttoaineiden tiedot energiaverojen, sähköntuotannon tukien ja päästölaskennan osalta.

Polttoaine	Turve	Raskas polttoöljy	Kierrätys polttoaine	Puu	Metsähake
Energiavero [€/MWh]	1,59	4,728	0	0	0
Huoltovarmuusmaksu [€/MWh]	0	0,245	0	0	0
Verovapaa osuus [MWh]	25000	0	0	0	0
Sähköntuotannon tuki [€/MWh]	0	0	2,5	4,2	6,9
Päästökerroin	0,382	0,279	0,114	0	0
Hapettumiskerroin	0,99	0,995	0,99	0	0

Polttoaineiden energiaverotusta ja sähköntuotannon tukea koskevat tiedot on koottu yllä olevaan taulukkoon. Lisäksi taulukosta käyvät ilmi päästölaskentaa varten tarvittavat päästö- ja hapettumiskertoimet.

### 4.3 Vihreät sertifikaatit

Vihreät sertifikaatit ovat uusi tapa tukea uusiutuvilla energialähteillä tuotettua energiaa. Uusiutuvien energialähteiden merkitys päästöjen vähentämiseksi ja energiahuollon järjestämiseksi on merkittävä. Uusiutuvat energialähteet ovat kuitenkin vielä monesti kilpailukyvyltään heikompia verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Tämän vuoksi tarvitaan erilaisia tukia ja kannustimia uusiutuvien energialähteiden käytön lisäämiseksi. Perinteisesti uusiutuvia energialähteitä on tuettu vero-, investointi- ja erilaisin suorin tuin. (Motiva 1)

Vihreät sertifikaatit ovat markkinalähtöinen tapa edistää uusiutuvien energialähteiden hyödyntämistä sähköntuotannossa. Vihreiden sertifikaattien järjestelmässä sähkö ja tuotannon ympäristö- sekä muu lisäarvo on irrotettu toisistaan ja ne myydään eri markkinoilla. Tuotettu sähkö myydään normaalina sähkönä sähkömarkkinoille ja tuotannon ympäristö- ja muu uusiutuvien energialähteiden käytöstä syntyvä lisäarvo puolestaan myydään vihreinä sertifikaatteina. Vihreiden sertifikaattien kysyntä voi perustua vapaaehtoisuuteen tai jollekin sähkömarkkinoiden osapuolelle asetettuun veloitteeseen hankkia sertifikaatteja. Useimmiten hankintavelvoite perustuu tiettyyn prosenttiosuuteen sähkönkulutuksesta, myynnistä ja tuotannosta. Vapaaehtoista kysyntää voidaan kannustaa lisäksi esimerkiksi verohelpotuksin. (Motiva 1)

Vihreiden sertifikaattien järjestelmän tarkoitus on lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä siellä, missä se on kustannustehokkainta. Vihreät sertifikaatit ovat todistus siitä,

että tietty määrä sähköä on tuotettu uusiutuvilla energialähteillä. Sertifikaattien määrä on yhtä suuri kuin tuotettu määrä sähköä: yhden megawattitunnin tuotannosta saa yhden sertifikaatin. Sertifikaatti myönnetään aina jälkikäteen vastaavan sähköntuotannon jo tapahduttua. Sertifikaatit voidaan myydä eri markkinoilla kuin sähkö. Näin sähköntuottaja voi saada tuloja kahdesta eri lähteestä eli sähköasiakkaalta sekä asiakkaalta, joka ostaa sertifikaatit. (Motiva 1)

Vihreitten sertifikaattien kysyntä voi perustua vapaaehtoisuuteen tai velvoitteeseen. Suomessa vihreiden sertifikaattien ostajakunta muodostuu tällä hetkellä organisaatioista, jotka vapaaehtoisesti haluavat edistää sähköntuotantoa uusiutuvilla energialähteillä tai käyttää uusiutuvaan energiaan liittyviä ympäristö- ja muita arvoja markkinointiinsa. Vihreitä sertifikaatteja ostaessaan sähkönkäyttäjän ei tarvitse tehdä uutta sähkösopimusta. Riittää vain, että käyttäjä ostaa sähkönkulutustaan tai haluamaansa osuutta vastaavan määrän sertifikaatteja. (Motiva 1)

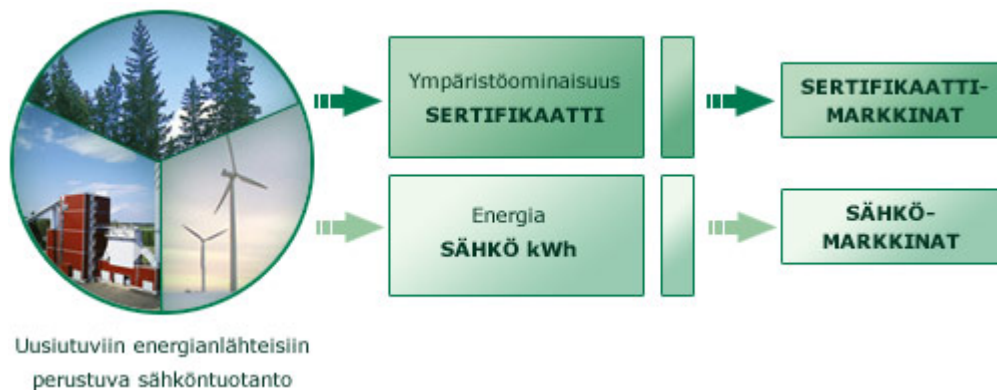
Monissa maissa on lisäksi käytössä järjestelmä, jossa sähkönkäyttäjä tai sähkönmyyjä on veloitettu osoittamaan, että tietty prosenttiosuus sähkönkulutuksesta, tuotannosta tai myydystä sähköstä hyödyntää uusiutuvia energialähteitä. Sen sijaan, että yritys tuottaisi itse osan sähköstään uusiutuvilla energialähteillä tai että kuluttajan täytyisi ostaa osa sähköstään uusiutuvilla energialähteillä tuotettuna, velvoite voidaan täyttää hankkimalla vihreitä sertifikaatteja. (Motiva 1)

Vihreitä sertifikaatteja ostaessaan kuluttaja maksaa sähkön tuottajalle vain sertifikaattiin sisältyvistä ympäristö- ja muista arvoista. Käytännössä kuluttaja ostaa tavallista sähköä ja sen lisäksi vihreän sertifikaatin. Menettelyn etuna on se, ettei kuluttajan tarvitse tehdä uutta sähkösopimusta vaan hän voi ostaa sähkön ja vihreät sertifikaatit erikseen. Järjestely mahdollistaa sähkön ja sertifikaattien erillisen kilpailuttamisen, minkä ansiosta kuluttaja saavuttaa usein kustannussäästöjä. Tuottaja puolestaan saa korvauksen vihreästä sertifikaatista sekä tämän lisäksi sähkömarkkinoille myymästään sähköstä. Erona perinteiseen vihreän sähkön ostoon on myös se, että ostaessaan sertifikaatin kuluttaja voi olla varma, että sertifikaatin verran vihreää sähköä on jo tuotettu. (Motiva 1)

### 4.3.1 RECS-järjestelmä

RECS (Renewable Energy Sertificate System) -järjestelmä on eurooppalainen, vapaaehtoinen ja yrityslähtöinen järjestelmä, joka mahdollistaa sertifikaattien myöntämisen uusiutuviin energialähteisiin perustuvan sähkön tuottajalle, sertifikaattien vaihdannan sekä poistamisen. RECS-järjestelmä ei ole sertifikaattien markkinapaikka eikä sinänsä uusiutuvan energian edistämiskeino, vaan se on väline, jonka avulla on mahdollista osoittaa uusiutuviin energialähteisiin perustuva sähkön tuotanto ja kuluttaminen. (El-Ekono 2002)

Teollisuus on aktiivisesti mukana kansainvälisten vihreiden sertifikaattien markkinoiden kehittämisessä. RECS on seitsemästätoista eri maasta tuleva noin 80 yrityksen muodostama yhdistys. Yhdistyksen tavoitteena on edistää vihreiden sertifikaattien markkinoita. RECS-sertifikaattijärjestelmä mahdollistaa uusiutuviin energialähteisiin perustuvan sähkön ympäristöarvon myynnin irrallaan fyysisestä sähköstä. Järjestelmä perustuu fyysisen sähkön ja sähkön tuotannon energialähteiden sisältämän ympäristöarvon eriyttämiseen toisistaan. Ympäristöarvo sidotaan sertifikaattiin, joka voidaan myydä eri asiakkaalle ja eri aikaan kuin fyysinen sähkö. RECS-järjestelmän periaatetta havainnollistaa kuva 4.1. (Motiva 1; RECS)



Kuva 4.1. RECS-järjestelmä. Kuva havainnollistaa sähkön ja sertifikaattien erottamisen kahdeksi eri tuotteeksi. Molemmilla tuotteilla on erilliset omat markkinat ja RECS-sertifikaattien myynnillä saadaan uusiutuviin energialähteisiin perustuvalla sähkön tuotannolle lisäarvoa. (RECS)

Ennen kuin RECS-sertifikaatteja voidaan myöntää, täytyy tuotantolaitos rekisteröidä ja hyväksyä mukaan RECS-järjestelmään. Rekisteröinnissä tuottaja täyttää hakemuksen, josta käy ilmi laitoksen perustiedot kuten käytetyt polttoaineet, tuotantokapasiteetti ja rakennusvuosi. Hakemus lähetetään paikalliselle sertifikaattien myöntäjälle, joka

Suomessa on Fingrid. Ennen sertifikaattien myöntämistä laitos ja sen toimintaperiaatteet tarkastetaan. (RECS)

Tuotantolaitos raportoi uusiutuvan energiantuotantonsa kuukausittain tai sovitulla aikataululla Fingridille, joka myöntää uusiutuvaa sähköntuotantoa vastaavan määrän RECS-sertifikaatteja. Tuottajalla ei tarvitse välttämättä olla omaa RECS-tiliä, vaan laitokset voivat toimia myös ns. aggregaattorin alaisuudessa. Aggregaattori on RECS:in jäsen, jolla on mahdollisuus pitää omien laitostensa lisäksi muiden tuottajien laitoksia tai ainoastaan muiden laitoksia omalla tilillään. (RECS)

RECS-sertifikaattien kaupankäynti perustuu tileihin, joten sertifikaattien siirto muistuttaa esimerkiksi rahan siirtoa pankkitililtä toiselle. Kun tuottaja myy sertifikaatin toiselle RECS:in jäsenelle, voidaan myydyt sertifikaatit siirtää myyjän tililtä ostajan tilille. Kauppaa voidaan käydä sekä oman alueen sisällä että kansainvälisesti. Viime vuosina sertifikaatti kauppa on Suomessa keskittynyt pitkälti Hollannin markkinoille. Sertifikaattien kysyntä Hollannissa on perustunut verohelpotukseen, joka on poistumassa vuoden 2005 alussa. Tulevaisuudessa valtaosa RECS-sertifikaattien kaupasta tultane käymään vapaaehtoisuuteen perustuvilla markkinoilla yritysten välillä. (RECS)

#### *4.3.2 RES-E Direktiivin vaikutukset*

Euroopan Unioni on antanut 27.9.2001 ns. RES-E-direktiivin (2001/77/EY) ”Sähköntuotannon edistämisestä uusiutuvista energialähteistä tuotetun sähkön sisämarkkinoilla”. Direktiivin tarkoitus on edistää uusiutuvien energialähteiden osuuden lisäämistä sähköntuotannossa sähkön sisämarkkinoilla ja luoda perusta tuleville tätä koskeville yhteisön puitteille. Direktiivi kattaa myös monipolttoainekattilat, jotka käyttävän fossiilisten polttoaineiden ohessa uusiutuvia energialähteitä, uusiutuvan polttoaineen osuutta vastaavalta osin. (RECS; DIR 1)

Direktiivi edellyttää jäsenvaltioilta, että niiden on pystyttävä varmentamaan uusiutuvista energialähteistä tuotetun sähkön alkuperä. Jäsenvaltiot voivat nimetä yhden tai useamman toimivaltaisen, tuotannosta ja jakelusta riippumattoman elimen, jonka tehtävä on valvoa sähkön alkuperää. Suomessa Fingrid hoitaa uusiutuvan energian

alkuperätakuun myöntämisen ja markkinaosapuolten pyynnöstä RECS-järjestelmän hallinnoinnin. (DIR1; Fingrid)

#### **4.4 Voimalaitoksen polttoaineet**

Höyrykattiloissa energia veden höyrystämiseen saadaan polttoaineesta. Polttoaineesta vapautuu energiaa palamisreaktiossa aineen reagoidessa hapen kanssa. Energiantuotannon suunnittelun pitkäjännitteisyys, tuotettavan energiamäärän suuruus ja pyrkimys mahdollisimman edulliseen energian hintaan asettavat polttoaineille seuraavat vaatimukset. Polttoainetta tulee olla saatavissa riittävästi suunniteltuun käyttöön ja polttoaineen hinnan täytyy olla alhainen. Polttoaineet jaotellaan niiden käsittelyominaisuuksien perusteella kiinteisiin, nestemäisiin ja kaasumaisiin polttoaineisiin. (Huhtinen 2000) Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan lähemmin Simpeleellä käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia ja kustannusvaikutuksia leijukerroskattilaa käytettäessä.

Kiinteiden polttoaineiden arvioimisen kannalta on tunnettava niiden käyttötekniiset ominaisuudet. Tekniseen käytettävyyteen vaikuttavia ominaisuuksia ovat kosteus, tuhkapitoisuus, tehollinen ja kalorimetrinen lämpöarvo, haihtuvien aineiden ja kiinteän hiilen pitoisuudet, jauhautuvuus, paisuvuus, leipovuus, rikki- ja klooripitoisuus, tuhkan ominaisuudet, likaantumis- ja kuonaantumisominaisuudet sekä korroosio-ominaisuudet. (Raiko 2002)

Kosteus on tavanomaisin ja merkittävin kiinteille polttoaineille määritelty ominaisuus. Kosteusmäärityksen merkitys johtuu sen suorasta vaikutuksesta polttoaineen teholliseen lämpöarvoon eli poltossa vapautuvaan lämpöenergiaan. (Raiko 2002)

Lämpöarvo on merkitykseltään tärkein polttoaineominaisuus. Se ilmoittaa polttoaineen täydellisessä palamisessa vapautuvan lämpöenergian. Kiinteille polttoaineille lämpöarvo ilmoitetaan tavallisesti energiana massayksikköä kohti eli MJ/kg. Kiinteän polttoaineen sisältämää energiamäärää kuvaa parhaiten käyttökosteudessa olevan näytteen alempi eli tehollinen lämpöarvo. (Raiko 2002)

Polttoaineiden ympäristöteknisinä ominaisuuksina voidaan pitää ominaisuuksia, jotka aiheuttavat ympäristön saastumista. Polttoaineen rikki-, typpi-, kloori- ja hivenalkuainepitoisuudet ovat ympäristövaikutuksiltaan keskeisimpiä. Hivenalkuaineiksi luokitellaan ne alkuaineet, joita polttoaineissa esiintyy pieninä määrinä (alle 1000 ppm). (Raiko 2002)

#### 4.4.1 Turve

Turve on suokasvien hitaan maatumisen seurauksena syntynyttä, epätäydellisesti hajonnutta eloperäistä orgaanista ainesta, joka on varastoitunut kasvupaikalleen erittäin märissä olosuhteissa. Hapen puutteen ja runsaan veden takia kasvien jäänteet eivät hajoa kunnolla, ja näin syntyy jatkuvasti kasvava turvekerrostuma. Turvebiomassan synty on perusteiltaan samanlaista kuin muidenkin kasviperäisten biomassojen, kuten puun, mutta kerrostumien syntyamiseen tarvittava aika on pitempi. (BIO)

Turpeen on todettu soveltuvan hyvin leijukerrospolttoon. Turve soveltuu erinomaisesti käytettäväksi seospolttoaineena muiden paikallisten biopolttoaineiden ja kierrätyspolttoaineiden kanssa. Turve on muiden kotimaisten polttoaineiden kannalta tärkeä tukipolttoaine, koska se tasaa muiden polttoaineiden laatuvaihteluja. Turpeen seospoltoa suositaan kattilateknisistä syistä. (Vapo 1)

Jyrsinturve toimitetaan Simpeleen tehtaalle pääasiassa Etelä-Karjalan suoalueilta ja turvetoimituksista vastaa pääosin Vapo. Turvetta on saatavissa varmasti ja riippumatta säästä tai turpeen vuosittaisista tuotantomääristä. Vapon toimittaman jyrsinturpeen kosteus on keskimäärin 46 - 47 % ja se sisältää energiaa keskimäärin 2,8 MWh/t eli noin 9,9 MJ/kg. Kesä 2004 oli kuitenkin poikkeuksellisen sateinen, ja turpeen tuotanto jäi normaalia pienemmäksi. Turvevarastot tyhjentyvät poikkeuksellisesti toukokuussa 2005, joten myöskään turpeen saatavuus ei ole täysin varmaa. (Vapo 1)

Turve on muiden kotimaisten polttoaineiden tapaan biopolttoainetta, mutta päästökaupan kannalta sitä tarkastellaan fossiilisena polttoaineena. Turve sisältää rikkiä ja sen poltosta aiheutuu rikkidioksidia. Kaakkois-Suomen turvealueet ovat poikkeuksellisen rikkipitoisia. Esimerkiksi Konnunsuon turpeen rikkipitoisuus on 0,3 % kuiva-aineesta. Käytettäessä turvetta seospolttoaineena puun kanssa puupolttoaineen tuhka sitoo turpeessa olevaa rikkiä. Tämä mahdollistaa kalkin käytön vähentämisen voimalaitoksissa. Turpeen toimittajan kanssa on sovittu, että mikäli ympäristöluvan

rikkidioksidipäästö määrä on vaarassa ylittyä, toimitetaan voimalaitokselle vähärikkisempää turvetta. (M-real)

#### 4.4.2 Puuperäiset polttoaineet

Simpeleen voimalaitoksella käytetään polttoaineena metsähaketta, puutähdettä (esim. puru), kuorta sekä jätepuuta (rakennusjäte). Käytettäessä puuta energialähteenä on tärkeää tietää puun fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. Keskeisimmät ominaisuudet ovat lämpöarvo ja kosteus sekä polttoaineen käsittelyyn vaikuttavat ominaisuudet, kuten tiheys ja palakoko. Puu koostuu pääasiassa hiilestä (48 - 52 %), vedystä (6 - 6,5 %) ja hapestä (38 - 42 %). Mitä kosteampaa puupolttoaine on, sitä vähemmän siitä saadaan poltettaessa energiaa. Puun kuivan aineen tehollinen lämpöarvo on yleensä 18 - 19,5 MJ/kg eli 5 - 5,4 kWh/kg. Energiantuotannon hiilidioksidipäästöjen kannalta puuta pidetään ympäristöystävällisenä, eli se luokitellaan hiilidioksidipäästöttömäksi. (Lindholm 2002)

Leijukerroskattila soveltuu hyvin puuperäisten polttoaineiden polttamiseen. Puun ravinneaineiden kloori voi kuitenkin aiheuttaa kuumakorroosiota höyrykattiloiden tulistimissa, kun höyryn lämpötila on yli 480 °C. Polton kannalta olisi edullista, jos metsähakkeen neulas- ja lehtiaines irtoaisi tai hake olisi kuivaa, jolloin kloori- ja kaliumpitoisuudet alenevat huomattavasti. Viherainetta sisältävä märkä hake voi lisätä likaantumista suurempien alkalipitoisuuksien takia. Ongelmaan voidaan puuttua seospolton avulla, jolloin kattilaan syötetään hakkeen lisäksi jotain muuta polttoainetta. Seospoltossa olisi suotavaa käyttää rikkipitoista polttoainetta, jolloin alkalit sulfatoituvat ja kloori vapautuu kloorivedyksi ja kulkee savukaasun mukana pois systeemistä. (Lindholm 2002)

Kirjallisuus painottaa, että puupohjaiset polttoaineet tarvitsevat rinnalleen toisen polttoaineen suurissa voimalaitoksissa. Syitä tähän ovat sekä kuumakorroosio että epäilykset hakkeen saatavuudesta. Seospolttoaineena turpeen maineella on merkitystä myös hakkeen tulevaisuudennäkymiin, hakkeen käytön näkökulmasta. Puupolttoaineilla voidaan tuottaa energiaa vastapainelaitoksissa kilpailukykyisesti ja tehokkaasti. Puupolttoaine sopii hyvin pääpolttoaineeksi pieniin ja keskisuuriin voimalaitoksiin. (Lindholm 2002)



Uusiutuvien energialähteiden käyttöä pyritään lisäämään vuoteen 2010 mennessä 30 %. Puupolttoaineilla on keskeinen rooli uusiutuvien polttoaineiden lisäämisessä. Uusiutuvien energialähteiden kannalta keskeisiä toimenpiteitä ovat uuden teknologian kehittäminen ja kaupallistaminen sekä taloudelliset ohjaukset, kuten energiaverotus, investointituet ja metsähakkeen tuotantoketjun tuet. (KTM 2)

#### 4.4.3 Raskas polttoöljy

Öljynjalostamoilla raakaöljystä valmistetaan eri tuotteita tislaamalla. Suomalaisilla öljynjalostamoilla raskas polttoöljy valmistetaan lämpökrakkausyksikön pohjatuotteesta ohentamalla sitä tisleellä haluttuun viskositeettiin. Raskaasta öljystä ei voida poistaa jalostusprosessin aikana rikkiä, koska öljyn raskasmetallit tuhoavat rikinpoistokatalyytin. Näin ollen vähärikkisen raskaan öljyn tuotanto perustuu vähärikkiseen raskasöljyyn. (Huhtinen 2000)

Polttoöljyt jaetaan käyttöominaisuuksien perusteella kevyisiin ja raskaisiin laatuihin. Raskaat öljyt ovat huoneenlämpötilassa liian jäykkiä käsiteltäviksi, joten niiden juoksevuus on varmistettava lämmityksellä. Raskaat öljyt ovat kevytöljyjä halvempia. Koska jäykkyys on raskaiden polttoöljyjen tärkein käyttöominaisuus, öljyjen luokittelu perustuu viskositeettiin. Kemiallisesti raskas polttoöljy koostuu suuresta määrästä hiilivetyjä. Viskositeetin lisäksi raskaita öljyalaatuja määritellään rikkipitoisuuden perusteella. Saatavana on rikkipitoisuudeltaan kahta eri laatua, runsasrikkistä (rikkipitoisuus 2,3 %) ja vähärikkistä (rikkipitoisuus alle 1 %). Runsasrikkisen öljyn käyttö on Suomessa sallittu vain, jos kattilalaitos on varustettu savukaasujen rikinpuhdistusjärjestelmällä. (Huhtinen 2000, Raiko 2002)

Leijukerroskattila tarvitsee kiinteiden polttoaineiden lisäksi tukipolttoaineen, jonka avulla leijupeti voidaan lämmittää riittävän kuumaksi kiinteiden polttoaineiden polttamista varten. Tarvittaessa raskaalla polttoöljyllä voidaan tasata kiinteän polttoaineen laatuvaihteluja, mikäli kattilan teho ei riitä huonolaatuisella kiinteällä polttoaineella. Simpeleellä raskasta polttoöljyä käytetään kattilan käynnistämisen yhteydessä. Varakattila K7, jota käytetään leijukerroskattilan häiriötilanteissa, käyttää polttoaineena vain raskasta polttoöljyä.

#### 4.4.4 *Liete*

Metsäteollisuuden jätevesien biologisessa puhdistuksesta syntyy biolietettä, joka viedään joko kaatopaikalle tai hävitetään polttamalla. Lietteen alhaisesta kuiva-ainepitoisuudesta johtuen polttamisesta on vain vähän hyötyä tai jopa haittaa energian tuotantoa ajatellen. Vaikka lietteen polttoaineominaisuudet ovat huonot, pystytään polton avulla pienentämään kaatopaikalle kuljetettavan lietteen kokonaismäärää. Kriittisimpiä lietteen poltossa tapahtuvia teknisiä ongelmia ovat lietteen kosteudesta aiheutuva (adiabaattisen) palamislämpötilan laskeminen ja savukaasumäärän kasvaminen vesihöyryn lisäyksestä johtuen. Lisäksi lietteen sisältämä kloori ja alkaaliset aineet saattavat tietyissä olosuhteissa aiheuttaa vaaran lämpöpintojen korroosioon. (Venäläinen 2000)

Lietteenkäsittelyn avulla sen kuiva-ainepitoisuus nostetaan ennen polttoa mahdollisimman korkeaksi. Liete poltetaan muun polttoaineen seassa. Lietteen lämpöarvo riippuu voimakkaasti lietteen kosteudesta. Simpeleellä liete puristetaan suotonauhapuristimella kuiva-ainepitoisuuteen 30 %. Lietteen sisältämä energia kuluu poltossa lietteen sisältämän veden haihduttamiseen. Lietteen vaikutus lämpötaseeseen katsotaan nolllaksi. (M-real)

Biolietteen poltosta aiheutuvat savukaasupäästöt voivat joissain tapauksissa aiheuttaa ongelmia, jonka johdosta päästömääriä joudutaan säännöstelemään tarkoin polttotekniikan avulla. Lietteen polton aiheuttamat päästömäärät selviävät parhaiten koeajojen avulla. Poltettaessa lietettä seospolton yhteydessä pieniä määriä lietteestä peräisin olevien päästöjen hallinta helpottuu. Liete kuuluu biopolttoaineisiin ja sillä ei näin ollen ole vaikutusta hiilidioksidipäästöihin. (Venäläinen 2000)

#### 4.4.5 *Biokaasu*

Biokaasua syntyy kaatopaikoilla jätteen hajotessa anaerobisesti. Se on pääasiassa hiilidioksidin ja metaanin seos, jonka lämpöarvo on noin  $21 \text{ MJ/m}^3$  (n.  $6 \text{ kWh/m}^3$ ). Biokaasun tyypillinen koostumus on noin 50 % metaania, 35 % hiilidioksidia ja 10 % tyyppiä sekä lukuisia muita aineita. Biokaasu voidaan käyttää polttoaineena lämpökattilassa ja hyödyntää siitä saatava lämpö. (Venäläinen 2000)

Biokaasu on peräisin biomassasta, jonka hajotessa hiilidioksidi vapautuu ilmakehään riippumatta siitä poltetaanko se vai ei. Biokaasun energiakäyttö ei siten lisää ilmakehän hiilidioksidin määrää, joten se on puuenergian tavoin ympäristöystävällinen energiamuoto. Metaani on lisäksi hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu, joten sen talteenotto kaatopaikoilta on ilmaston kannalta hyvin perusteltua. (Motiva 2)

#### *4.4.6 Omat poltettavat jätteet*

Omilla poltettavilla jätteillä tarkoitetaan Simpeleen voimalaitoksen tapauksessa erilaisia tehtaalla syntyviä polttokelpoisia jätteitä, jotka sisältävät PE-muoveja, kartonkijätettä sekä murskattua puujätettä. Omat poltettavat jätteet vastaavat standardin SFS-5875 (Jätteen jalostaminen polttoaineeksi, laatuohje) mukaisia vaatimuksia. Hiilidioksidipäästöt lasketaan kansallisten määrittelykertoimien perusteella. (M-real)

#### *4.4.7 REF-kierrätyspolttoaineet*

Voimalaitoksella voidaan polttaa muun polttoaineen seassa pieniä määriä REF-kierrätyspolttoaineita. Kierrätyspolttoaineella tarkoitetaan yhdyskuntien ja yritysten polttokelpoisista, kuivista, kiinteistä ja syntypaikoilla lajitelluista jätteistä valmistettua polttoainetta. (Vapo 2)

Kierrätyspolttoaine saadaan polttokelpoiseksi lajittelun ja murskauksen avulla. Lajittelussa jätteestä erotetaan metallit. Polttoaineen laatu varmistetaan näytteiden avulla. Lajittelun perusteella polttoaine jaetaan laatuluokkiin (YTL). Simpeleellä poltetaan standardin SFS-5875 mukaista kierrätyspolttoainetta, jonka laadusta vastaa polttoaineen myyjä. REF-polttoaineen polttamisesta syntyy hiilidioksidipäästöjä ja ne määritellään poltetun määrän ja kansallisen päästökertoimen avulla. (M-real)

Suomessa on vain yksi yhdyskuntajätteen polttolaitos, muuten yhdyskuntajätettä poltetaan seospolttolaitoksissa. Seospolttolaitoksissa kierrätyspolttoaineen osuus on noin 5 - 10 %. Kierrätyspolttoainetta hyödynnetään lisäpolttoaineena esimerkiksi puun rinnalla. Suomessa jätteenpolton perusratkaisuna on ollut sen polttaminen metsäteollisuuden ja yhdyskuntien leijukerroskattiloissa. (YTL)

#### 4.4.8 *Seospolton kustannustekijät ja niiden vaikutus polttoainekustannuksiin*

Polttoainekustannukset eivät muodostu pelkästään polttoaineen hinnasta vaan eri polttoaineiden aiheuttamista kokonaiskustannuksista. Seospoltoa ja sen kustannusvaikutuksia erilaisilla polttoaineilla on tutkittu paljon. Tärkeimpiä kustannuskomponentteja polttoainekustannusten muodostumisessa ovat polttoaineen hinta, kunnossapito ja nuohouskustannukset sekä tuhkasta aiheutuvat kustannukset. Lisäksi päästökaupan myötä hiilidioksidipäästöistä aiheutuu kustannuksia päästökiintiön ylittävältä osalta.

Polttoainekustannuksina pidetään usein polttoaineen hintaa laitokselle toimitettuna, minkä perusteella vertailuja eri polttoaineiden välillä tehdään. Asiaa tulisi tarkastella kokonaisuutena laitoksen käyttötalouden kannalta, jolloin vaihtoehtoisia polttoaineita vertailtaessa on otettava huomioon myös niiden aiheuttamat käyttö- ja kunnossapitokustannusten muutokset. (Suomalainen 2001)

Leijukerroskattilassa eri polttoaineet palavat hyvällä hyötysuhteella ja hyötysuhteen muutokset eri polttoaineilla ovat hyvin pieniä. Käyttökustannuksiin eri polttoaineet vaikuttavat seuraavien tekijöiden välityksellä: petihiekan vaihtotarve, kattilan puhdistustarve, tuhkan koostumuksen muutokset, omakäyttötehon muutokset, polttoaineen varastointi ja savukaasun loppulämpötila. (Suomalainen 2001)

Puun tuhkan sisältämät alkadit ja kloori voivat aiheuttaa kerrostumia ja korroosiota lämpöpinnoille. Tämän vuoksi kattilaa on nuohottava useammin kuin pelkkää turvetta poltettaessa. Nuohouksesta huolimatta kerrostumia ei välttämättä saada kokonaan puhdistettua ja vaarana on lämpöpintojen korroosio sekä kattilan tukkeutuminen. (Suomalainen 2001)

Petihiekan vaihtotarve lisääntyy poltettaessa puupolttoaineita, koska alkadit aiheuttavat pedin agglomeroitumisen ja petipartikkelien tarttumista toisiinsa. Petimateriaalia on vaihdettava useammin seospoltolla kuin pelkän turpeen poltolla. (Suomalainen 2001)

Vaikka nuohousta lisätään, likaantuvat kattilan lämpöpinnat seospoltolla enemmän kuin turpeen poltolla. Lisääntyvä puhdistustarve aiheuttaa enemmän työtä seisokkien aikana.

Mikäli likaantuminen on voimakasta ja lämmönsiirto heikkenee liikaa, kattila voidaan joutua puhdistamaan myös suunniteltujen seisokkien välillä. Puupolttoaineiden tuhkapitoisuus on huomattavasti pienempi kuin turpeen, jolloin tuhkan käsittelykustannukset seospoltolla ovat pienemmät kuin turpeen poltolla. (Suomalainen 2001)

Voimalaitoksen omakäyttöteho kasvaa puun ja turpeen poltossa, koska polttoaineseoksen kosteus on suurempi ja lämpöarvo pienempi kuin turpeella. Jotta seospoltossa saavutetaan sama teho kuin turpeen poltossa, tarvitaan polttoainetta enemmän. Suuremman polttoainevirran ja kosteuspitoisuuden takia palamisilman määrä on suurempi ja savukaasuja syntyy enemmän seospoltolla. Suuremmat tilavuusvirrat ja niiden aiheuttamat lisääntyvät painehäviöt johtavat puhaltimien tehontarpeen kasvuun. (Suomalainen 2001)

#### 4.4.9 Polttoaineiden kilpailukyky ja päästöoikeuksien arvo

Päästöoikeuden arvoa on hyvin vaikea ennustaa, koska se muodostuu markkina- eikä kustannusperusteisesti. Päästöoikeuden hinnan vaikutusta polttoaineiden kilpailukykyyn voidaan selventää taulukon 4.2 avulla

Taulukko 4.2. Päästöoikeuden hinnan vaikutus polttoaineiden kilpailukykyyn. (Leskelä 2003)

Polttoaine	CO <sub>2</sub> - päästö [t / MWh]	Nykyinen veroton [€/ MWh]	Lisäkustannus eri päästöoikeuden arvolla		
			10 €/ t [€/ MWh]	20 €/ t [€/ MWh]	30 €/ t [€/ MWh]
Kivihiili	0,334	6-7	3,3	6,7	10,0
Turve	0,378	7-8	3,8	7,6	11,3
Puu	0	9-10	0,0	0,0	0,0
Maakaasu	0,201	13-14	2,0	4,0	6,0
Raskas PÖ	0,276	14-16	2,8	5,5	8,3
Kevyt PÖ	0,261	n. 25	2,6	5,2	7,8

Taulukosta 4.2 voidaan havaita, että varsinkin turpeen ja kivihiilen kilpailukykyyn päästöoikeuden hinnalla on varsin suuri merkitys. Kalliimpien polttoaineiden kilpailukykyyn päästöoikeuden hinta ei vaikuta prosentuaalisesti niin paljon. Puupolttoaineiden kilpailukyky paranee entisestään päästökaupan myötä, mikä taas johtaa kasvaneeseen kysyntään, josta voi seurata hinnankorotuspaineita.

## 5. SÄHKÖN HANKINTA

M-realin Simpeleen tehtaat koostuvat paperi- ja kartonkitehtaasta. Näiden lisäksi energiankulutuksen kannalta erillisinä yksiköinä voidaan pitää kuorimoa ja hiomoa, hajottamoja, jätevedenpuhdistamoja ja voimalaitosta. Metsäteollisuus on hyvin energiantensiivistä. Simpeleellä suurimmat lämpömäärät kuluvat kartonkitehtaalla ja voimalaitoksella. Hiomo ja kuorimo on suurin yksittäinen sähkönkäyttäjä. Sähkön hankinta tapahtuu oman tuotannon lisäksi M-real Energian toimesta.

### 5.1 Sähkön omatuotanto, laitteet

Simpeleen tehtaiden voimalaitos on rakennettu nykyiseen muotoonsa 1970-luvun puolivälissä. Simpeleellä on höyryn tuotantoa varten kaksi kattilaa ja sähkön tuotanto tapahtuu kahden höyryturbiinin avulla. Lisäksi tehdasalueella on yksi vesiturbiini.

#### 5.1.1 Kattila K6

Voimalaitoksen pääkattila (K6) on monipolttoaineinen leijupetikattila. Alun perin kattila on ollut turpeen pölypolttokattila, joka on muutettu leijupetikattilaksi Foster Wheelerin toimesta vuonna 1997. Kattila toimii kuplivan leijukerroksen alueella ja polttoaine syötetään leijukerroksen yläpuolelta. Leijukerroksen lämpötila on täydellä kuormalla vähän yli 800 °C riippuen polttoaineesta. Leijukerroksen lämpötila säädetään kiertokaasupuhaltimien avulla. Leijukerros muodostuu hiekasta ja polttoaineen tuhkasta. Polttoaineena käytetään turvetta, erilaisia puupolttoaineita ja REF-polttoaineita. Tukipolttoaineena käytetään tarvittaessa öljyä. Palamistapahtuman tehokkuutta valvotaan ja säädetään tarpeen mukaan siten, että kattila toimii parhaalla mahdollisella hyötysuhteella.

Kattila on tarkoitettu seospolttoaineelle ja normaalisti polttoaineseoksesta noin 50 % on turvetta. Puupolttoaineita käytetään noin 45 % ja öljyä noin 5 % polttoaine-energiasta. Viime vuosina myös jätteen polttoa on lisätty. Lisäksi kattilassa poltetaan jäteveden puhdistuksen sivutuotteena tuleva bioliete. Lietteen kuiva-ainepitoisuus nostetaan ennen polttoa 30 %:iin. Biolietteen vaikutus lämpötaseeseen ja hiilidioksidipäästöihin katsotaan nolllaksi.

Kattilan hyötysuhde on määritelty kattilan käyttöönoton yhteydessä ja se on riittävällä tarkkuudella 90 % kaikilla polttoaineilla ja polttoaineseoksilla. Kattilaa on ajettu myös pelkällä puupolttoaineella tai turpeella, mikäli toisen polttoaineen syöttöjärjestelmä on ollut tilapäisesti pois käytöstä. Pelkkää puupolttoainetta käytettäessä kattila likaantuu, mutta nuohouskertoja ei ole tarvinnut lisätä lyhyiden, pelkästään puupolttoainetta sisältäneiden ajojaksojen aikana.

Normaalisti polttoaineesta noin 50 % on turvetta. Puupolttoaineen osuus on suhteellisen korkea, eikä sillä ole havaittu olleen haittavaikutuksia kattilan toimintaan. Kustannusoptimoinnin avulla etsitään polttoaine- ja päästökustannuksiltaan edullisin seospolton suhde. On perusteltua jättää huomioimatta puupolttoaineen osuuden lisäämisestä aiheutuvat kustannukset huomioimatta polttoaineseosta optimoitaessa, koska jo nykyisellään puun osuus on hyvin suuri. Turpeen minimiosuutena voidaan pitää noin 50 % kokonaispolttoaine-energiasta.

Päästökaupan alkujakomallia ajatellen kattilan K6 muuttaminen leijukerroskattilaksi on tehty muutamia vuosia liian aikaisin. Perintömenettelyn avulla jaetut päästökiintiöt eivät huomioi ennen vuotta 1998 olleita hiilidioksidipäästöjä. Simpeleellä hiilidioksidipäästöt alenivat kattilan muutoksen jälkeen noin puoleen aikaisemmasta tasosta. Näin ollen investointien avulla hiilidioksidipäästöjen alentaminen ei juurikaan ole mahdollista. Ainut mahdollisuus lisätä voimalaitoksen tuotantoa ilman hiilidioksidipäästökiintiön ylittämistä on lisätä puupolttoaineiden osuutta kokonaisenergiasta. Kattilan toiminnan kannalta puun osuus voidaan turvallisesti nostaa 50 %:iin polttoaine-energiasta. Suurempi puupolttoaineen osuus edellyttää lisäselvityksiä puupolttoaineen vaikutuksesta kattilan toimintaan ja voimalaitoksen käyttötalouteen.

### *5.1.2 Turbiinit*

Voimalaitoksen höyrynjakelujärjestelmä on esitetty kuvassa 5.1. Normaalisissa käyttötilanteissa höyry johdetaan kattilasta vastapaineturbiinille (VP2). Vastapainesähköä saadaan, kun korkeapaineinen höyry johdetaan turbiinin läpi prosessihöyryksi. Simpeleen vastapaineturbiini on varustettu kahdella väliotolla ja sen teho on 18,3 MW.

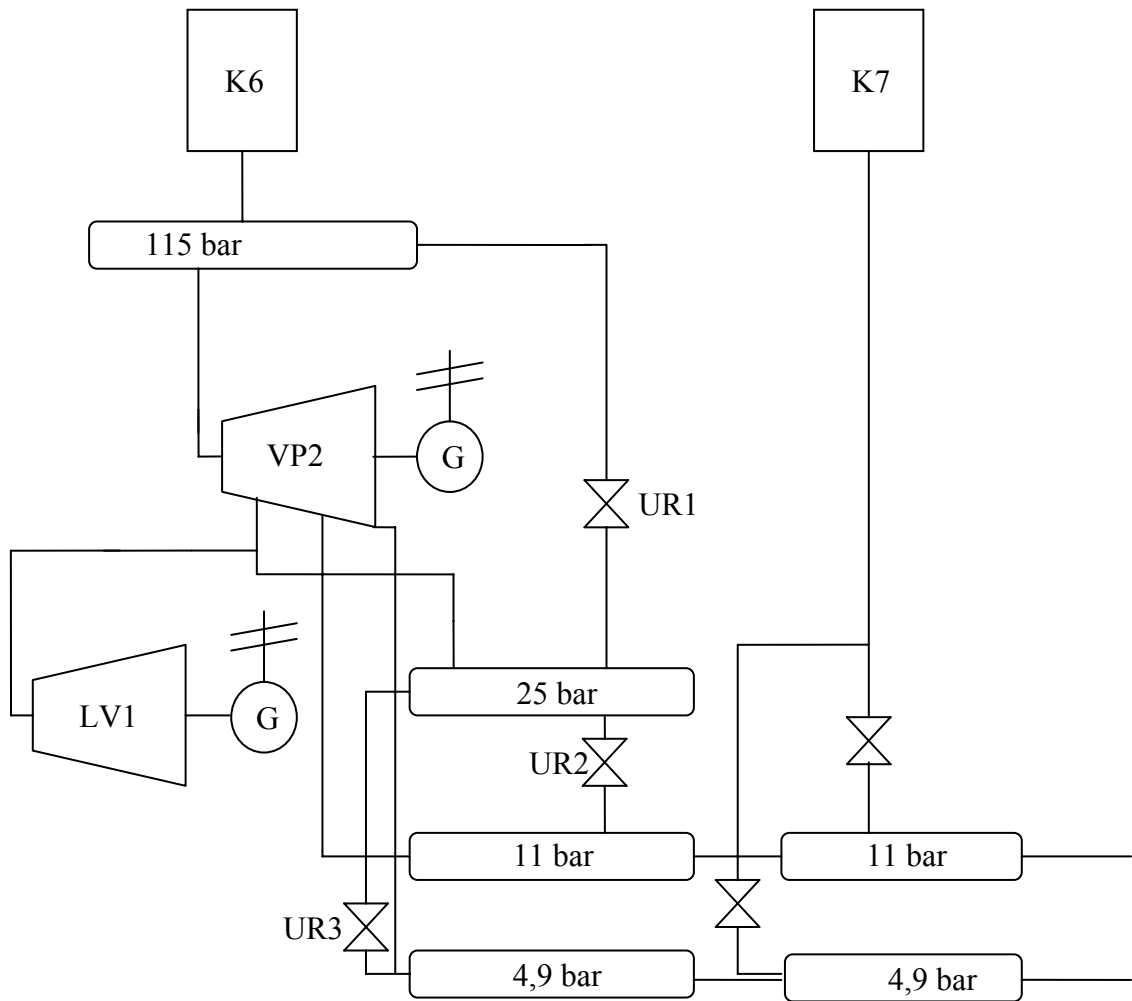
Lauhdesähköä voidaan tuottaa lauhdeturbiinin (LV1) avulla lisäämällä kattilan (K6) höyryntuotantoa ja johtamalla höyry vastapaineturbiinin (VP2) väliotosta lauhdeturbiinille. Koska vastapaineturbiinin läpi virtaa enemmän höyryä, kasvaa myös vastapaineturbiinin sähköteho lauhdeturbiinia käytettäessä. Lauhdeturbiinia voidaan ajaa myös johtamalla höyry suoraan lauhdeturbiinille reduktion avulla. Lauhdeturbiinin teho on 13,5 MW. Turbiinien tiedot on esitetty alla olevassa taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1 Turbiinitiedot (Hasu 1997)

	Vastapaineturbiini	Lauhdeturbiini
Turbiinityyppi	Stal	Stal
Teho (MW)	18,3	13,5
Tulohöyryn		
-määrä (kg/s)	35,2	14,2
-paine (bar)	108	23,5 (max 60 bar)
-lämpötila (°C)	520	325 (max 450)
1. Väliotto; höyryn		
-määrä (kg/s)	14,2	
-paine (bar)	23,5	
-lämpötila (°C)	325	
2. Väliotto; höyryn		
-määrä (kg/s)	2,2	
-paine (bar)	9,7	
-lämpötila (°C)	305	
Vastapainehöyryn		
-määrä (kg/s)	18,8	
-paine (bar)	4,9	
-lämpötila (°C)	150	
Generaattori	27,5	15,6

Taulukon arvojen selventämiseksi voimalaitoksen höyrynjakelujärjestelmä on kuvattu seuraavalla sivulla olevassa kuvassa 5.1.





Kuva 5.1. Voimalaitoksen höyrynjakelujärjestelmä. Normaalissa käyttötilanteessa tuorehöyry johdetaan kattilasta K6 vastapaineturbiinille ja siitä edelleen 11 ja 4,9 barin kulutuskohteisiin. Mikäli sähköä tuotetaan myös lauhdeturbiinilla, otetaan höyry vastapaineturbiinin väliotosta. Varakattilaa K7 käytetään vain pääkattilan häiriötilanteissa. Sillä voidaan tuottaa 11 ja 4,9 barin kulutuskohteiden vaatima prosessihöyry.

Sähkön tuotannon ominaiskulutus voidaan määrittellä kappaleessa 2.2.3 esitettyjen yhtälöiden avulla. Nykyisellä vastapaineella turbiinin ominaiskulutusta ei ole määritetty karakteristikan avulla. Turbiinin karakteristika on vanhentunut ja sen uudelleen määrittäminen edellyttäisi suuritöisiä mittauksia. Turbiinikarakteristikan uudelleen määrittelyä ei diplomityön yhteydessä kuitenkaan tehdä, koska kesällä 2005 vastapaineturbiinille suoritetaan revisio, jonka jälkeiset toiminta-arvot eivät vastaa nykyisiä arvoja.

Diplomityön kustannusoptimointi ja sähkön omatuotannon kannattavuustarkastelu tehdään aikaisemmin määritettyjen ominaiskulutusten perusteella, koska ne ovat osoittautuneet energiataaseselvitysten perusteella riittävän luotettaviksi. Lisäksi kirjallisuudessa esitetyt sähköntuotannon kulutussuhteet ovat suuruusluokaltaan hyvin lähellä nyt käytettyjä arvoja. Suhdemenetelmä mahdollistaa myös korjauskertoimien käytön.

## **5.2 Sähkön hankinta sähkömarkkinoilta**

M-real Simpele hankkii sähkönsä omatuotannon lisäksi M-real Energian kautta. M-real Energia (MrE) myy sähkön yksiköille vallitsevalla markkinahinnalla. Sähkön yhteishankinnan tuoma hyöty siirretään yksiköille fyysisestä kulutuksesta riippumattomalla hinnantaselementillä. Hinnoittelujärjestelmän tavoitteena on ohjata M-realin sähkökäyttöä kokonaisuutena optimaalisesti. Järjestelmä siirtää oikea-aikaisesta kulutuksen ajoittamisesta ja omasta lisäsähkön tuotannosta syntyvää hyötyä yksiköille. Samanaikaisesti M-realin sähkönhankintakustannukset pienenevät kokonaisuutena. Hinnoittelu palkitsee myös yksikön tarkan sähköntarpeen ennustamisen. (M-real)

Yksiköt tilaavat tarpeensa mukaisen sähkötehon M-real Energialta. M-real Energian myymä fyysinen sähkö koostuu perussähköstä ja tasesähköstä. Energiakauppaa käydään tunneittain. Ennakkoon tilatusta tehosta muodostetaan kauppa yksikön ja M-real Energian välille. Vastaava energia on yksikölle perussähköä. Jos todellinen käytetty teho poikkeaa tilatusta, syntyy yksikön ja MrE:n välille tasesähkökauppa. M-real Energian yksiköille myymä tai niiltä ostama perussähkön hinta on ELSPOT-markkinan Suomen aluehinta. Tasesähkön hinta on marginaalin verran perussähkön hintaa korkeampi (yksikön ostaessa) tai alempi (yksikön myydessä). (M-real)

### *5.2.1 Päästökaupan vaikutus sähkön markkinahintaan*

Päästökaupasta voi muodostua merkittävin energia-alan yritysten toimintaympäristöön vaikuttavista tekijöistä. Päästökaupan vaikutukset energiamarkkinoihin ovat kahdenlaisia, suoria ja välillisiä. Suorat vaikutukset ovat seurausta päästöoikeuksien ostosta ja myynnistä eli päästöjen vähentämisestä aiheutuvista kustannuksista. Välilliset päästökaupan vaikutukset muodostuvat hiilidioksidin hinnan kautta. (Leskelä 2003)

Päästökaupan myötä sähkön hintaan muodostuu nousupaineita sekä vaihtoehtokustannuksen, erityisesti pörssisähkön, kautta, että tuotantokustannusten kautta. Polttoaineiden keskinäinen kilpailuasetelma voi muuttua. Päästökaupan todelliset vaikutukset sähkömarkkinoihin ovat vaikeasti ennustettavissa, koska päästökauppa on erittäin suuri muutos aikaisempaan tilanteeseen verrattuna. Todellista päästökaupan vaikutusta sähkön hintakehitykseen ei tunneta. (Leskelä 2003)

## 6. SÄHKÖN OMATUOTANNON KANNATTAVUUS

Sähkön omatuotannon kannattavuus Simpeleen voimalaitoksella on riippuvainen sähkön tuotantotavasta ja sähkömarkkinoiden sähköhinnasta. Myös päästökauppa asettaa omat rajoituksensa tuotannon kannattavuudelle. Sähkön ja lämmön tuotantokustannusten osalta muuttuvat kustannukset jaetaan tuotteiden välille suhdemenetelmän avulla, kappaleessa 3.4.5 esitetyn suhdemenetelmän mukaan. Kulutussuhteina käytetään lämmön osalta kattilahöytysuhteen käänteisarvoa. Vastapainesähkölle kulutussuhteena käytetään arvoa 1,22 ja lauhdesähkön osalta arvoa 3,78. Sähköntuotannon kannattavuuden vertailukohtana pidetään sähkömarkkinoiden SPOT-hintaa. Sähkön omatuotantoa lauhdeturbiinilla pidetään kannattavana, kun lauhdesähkön aiheuttama polttoainekustannus jää riittävällä marginaalilla pienemmäksi kuin sähkömarkkinoiden SPOT-hinta.

Voimalaitoksen rakennusaste 0,15 vastapainesähköä tuottaessa on varsin alhainen. Lauhdeturbiinin avulla voimalaitoksella voidaan tuottaa lisäsähkötehoa. Vastapaine- ja lauhdeturbiinin yhteenlasketulla sähköntuotantokapasiteetilla voimalaitoksen rakennusaste nousee 0,3:een. Koska rakennusaste normaalissa käyttötilanteessa on varsin alhainen, keskitytään diplomityössä muuttuvien kustannusten osalta kokonaistaloudellisesti edullisimman ratkaisun etsimiseen. Pelkästään sähkön tuotannon kannalta kustannuksia tarkasteltaessa ei päästäisi yhtä kattavaan lopputulokseen. Kiinteiden kustannusten jakamisperusteita eri tuotteiden kesken arvioidaan, mutta todellisia arvoja kustannuksista ei diplomityössä esitetä julkisuuden säilyttämiseksi.

### 6.1 Omatuotannon kannattavuustarkastelun lähtökohdat

Päästökaupan vaikutuksesta polttoainekustannusten ohella hiilidioksidipäästökustannukset nousevat entistä merkittävämpään asemaan tarkasteltaessa sähkön ja lämmön tuotannon kannattavuutta. Erityisesti lauhdesähköntuotannon kannattavuutta on tarkasteltava entistä kriittisemmin, koska sähkön ja lämmön yhteistuotannon kustannusten jakoperusteet eivät ole yksiselitteisesti määriteltävissä. Paperi- ja kartonkitehtaan nykyisellä lämmönkulutuksella prosessihöyry ja vastapainesähkö voidaan tuottaa päästökaupan puitteissa. Mikäli lauhdesähköä tuotetaan, päästökaupan ylittyminen riippuu hiilidioksidipäästöjen kannalta neutraalien

puupolttoaineiden osuudesta kokonaispolttoainemäärästä. Kesällä 2006 valmistuvan kartonkitehtaan modernisoinnin myötä tuotantokapasiteetti nousee 170 000 tonnista 215 000 tonniin, samalla myös tehtaan lämmönkulutus kasvaa jonkun verran.

Kattilan K6 ja polton kannalta optimaalisin polttoainesuhde sisältää vähintään 50 % turvetta. Normaalisissa käyttötilanteissa loppuosa polttoaineesta muodostuu puupolttoaineesta ja pienestä määrästä kierrätyspolttoainetta. Mikäli turpeen osuus ei nouse merkittävästi yli 50 %:iin, voidaan lauhdesähköä tuottaa noin 20 000 MWh päästökiintiötä ylittämättä.

## **6.2 Kannattavuustarkastelun lähtöoletukset**

Polttoaine- ja päästökustannusten jako ei myöskään kirjallisuuden perusteella ole yksikäsitteinen ongelma. Tässä diplomityössä muuttuvien kustannusten jakoperusteena on käytetty suhdemenetelmää, jonka avulla muuttuvat kustannukset jaetaan todellisten kulutussuhteiden perusteella kummallekin tuotteelle. Menetelmän eduksi voidaan lukea myös se, että lauhdesähkön tuotannon polttoaineita ei tarvitse erotella etukäteen. Koska energiaverotus edellyttää sähkön ja lämmöntuotannon polttoaineiden erottamista kulutuksen perusteella, suhdemenetelmä mahdollistaa polttoaine-energioiden jakamisen jälkikäteen esimerkiksi kuukausittaisen energiakäyttöraportin perusteella.

Erityisesti vastapainesähkön tuotannolla saadaan lisäarvoa lämpöenergian tuotannolle lähes teoreettisella hyötysuhteella. Voimalaitoksen kokonaistalouden kannalta kustannusten jakaminen eri tuotteille ei ole keskeisin ongelma, vaan tärkeintä on löytää kokonaistaloudellisesti edullisin ratkaisu. Erityisesti teollisuuden voimalaitoksilla prosessin lämmöntarve on tärkein tuotantoa ohjaava tekijä. Näin ollen vastapainesähkön tuotantoa voidaan pitää käytännössä aina taloudellisesti kannattavana, kun lämpökuorma on riittävä sähköntuotantoa ajatellen.

Vaikka sähköntuotannon ominaiskulutuksen määrittäminen vastapaineturbiinin osalta onkin tehty nykyistä vastapainetta alhaisemmalla paineella (4,3 -> 4,9 bar), voidaan sitä pitää riittävän luotettavana. Kulutussuhde 1,22 vastaa melko tarkasti kirjallisuudessa esitettyjä suuruudeltaan noin 1,26 arvoja. Lämmöntuotannon osalta kulutussuhteen 1,11 määrittäminen perustuu kattilan K6 mitattuihin hyötysuhteisiin käyttöönoton yhteydessä.

Prosessihöyryn tasalaatuisuuden takaamiseksi vastapaineturbiinin vastapaine pidetään vakiona säätämällä turbiinin tehoa. Kuvassa 2.4 on esitetty vastapaineturbiinin säädön periaate. Käytännössä turbiinin tehoa säädetään paineensäätimen avulla, joka päästää säätöventtiilin läpi vastapainehöyryverkon höyrynkulutusta vastaavan höyrymäärän. Koska turbiinin sähköteho ei vastapainesäädöllä pysy vakiona, vaan se elää riippuen vastapaineverkon höyrynkulutuksesta, ei turbiinin sähkötehoa voida määrittää jokaiselle hetkelle erikseen. Sähköntuotannon ominaiskulutus on sähkön tuotannon kannattavuustarkastelun kannalta tärkeämpi suure.

Lauhesähkön tuotannon kannattavuutta tarkasteltaessa tuotannon ominaiskulutuksena pidetään aikaisemmin määriteltyä ominaiskulutusta. Ominaiskulutuksen määrittelyä voidaan pitää riittävän luotettavana, koska lauhdeturbiinille ei ole tehty määrityksen jälkeen muutoksia.

Polttoaineseoksen optimointia varten kattilan K6 hyötysuhdetta pidetään vakiona 0,90 kaikilla polttoaineseoksilla. Myöskään kattilan käyttökustannusten ei oleteta lisääntyvän erilaisilla polttoainesuhteilla. Käytännön ongelmia saattaa esiintyä esimerkiksi kierrätyspolttoaineen sisältämän metallin takia. Myös puupolttoaineiden suhteellisen osuuden kasvattaminen voi lisätä pitkällä aikavälillä kattilan korjaus- ja kunnossapitokuluja. Kattilaa on kuitenkin ajettu lyhyitä jaksoja pelkällä puupolttoaineella turpeen syöttöjärjestelmän ollessa rikki. Kattilan nokeentumista ja likaantumista voidaan tarkkailla seuraamalla savukaasun loppulämpötilaa. Mikäli loppulämpötila alkaa merkittävästi nousta, on se merkki kattilan likaantumisesta. Kattilan nuohousta voidaan tällöin lisätä. Nuohous- ja muiden kunnossapitokustannusten mahdollista nousua ei oteta polttoaineen optimoinnissa huomioon. Käytännön ongelmia voi ilmetä, mikäli puupolttoaineen kosteuspitoisuus on hyvin korkea. Kattilan petilämpötila saattaa laskea liian alas ja joudutaan käyttämään öljyä tukipolttoaineena. Tukipolttoaineen käytön lisääntymistä ei ole huomioitu polttoainekustannusten optimoinnissa, koska turpeen minimiosuutena on optimoinnissa pidetty 50 %.

### 6.3 Polttoaineiden kustannustekijät

Polttoainekustannukset muodostavat noin 80 % voimalaitoksen muuttuvista kustannuksista. Lisäksi päästökaupan myötä myös päästökustannusten voidaan katsoa olevan yksi polttoainekustannusten kustannustekijä. Muita kustannustekijöitä ovat polttoaineen hinta sekä huoltovarmuusmaksu ja lämmöntuotannon energiaverot. Kokonaiskustannuksia pienentävä vaikutus on biopolttoaineilla tuotetulle sähkölle maksettava tuotantotuki. Myös biopolttoaineilla tuotetun sähkön vihreiden sertifikaattien myyntitulot pienentävät voimalaitoksen kokonaiskustannuksia.

Polttoaineista aiheutuva kokonaiskustannus  $K_{PA}$  voidaan esittää yhtälön 6.1. avulla.

$$K_{PA} = K_H + K_{EV} + K_P - T_e - M_R \quad (6.1)$$

jossa	$K_{PA}$	= polttoaineista aiheutuva kokonaiskustannus [€]
	$K_H$	= hinta ja huoltovarmuusmaksu
	$K_{EV}$	= lämmöntuotannon energiaverot
	$K_P$	= päästökaupan ylittämistä aiheutuvat kustannukset
	$T_e$	= tuet sähköntuotannolle
	$M_R$	= myyntitulot RECS-sertifikaateista

Kustannusmalli on epälineaarinen, koska sillä on kaksi epäjatkuvuuskohtaa. Epäjatkuvuuskohdat ovat seurausta lämmöntuotannon energiaveroista ja päästökustannusten aiheutumisperusteista.

Yhtälön 6.1 mukaista kustannusmallia on optimoitu etsimällä annettujen reunaehtojen (minimi- tai maksimiosuuksien) puitteissa kuudelle eri polttoaineella (turve, puupolttoaine, metsähake, kierrätyspuupolttoaine, REF-polttoaine ja raskas polttoöljy) kokonaiskustannuksiltaan edullisin ratkaisu eli polttoainesuhde, jolla yhtälö 6.1 saa minimiarvonsa. Seuraavissa kappaleissa esitetään tarkemmin kustannusmallin osatekijät ja niiden muuttujat.

#### 6.3.1 Polttoaineen hinta

Kiinteiden polttoaineiden hinta perustuu niiden energiasisältöön. Sekä polttoaineen toimittaja että polttoaineen käyttäjä suorittavat polttoaineen lämpöarvon ja kosteuden

määrityksen, jonka perusteella kiinteille polttoaineille voidaan muodostaa hinta yksikössä €/MWh. Osalle polttoaineista täytyy maksaa lisäksi huoltovarmuusmaksua. Simpeleen tapauksessa vain raskaasta polttoöljystä peritään huoltovarmuusmaksua. Polttoaineen hinnasta aiheutuva kustannus  $K_H$  voidaan esittää yhtälön 6.2. avulla.

$$K_H = \sum_{PA=1}^n O_{PA} \cdot E_{PA} \cdot H_{PA} \quad (6.2)$$

jossa	$K_H$	= polttoainekustannukset [€]
	$O_{PA}$	= polttoaineen osuus - % kokonaismäärästä
	$E_{PA}$	= polttoaineen kokonaismäärä [MWh]
	$H_{PA}$	= polttoaineen hinta + huoltovarmuusmaksu [€/MWh]

Muuttujana yhtälössä on  $O_{PA}$  ja polttoaineina turve, puupolttoaine, metsähake, kierrätyspuupolttoaine, REF-polttoaine ja raskas polttoöljy.

### 6.3.2 Lämmön tuotannon energiaverot

Lämpöenergian tuotantoon käytettävästä polttoaineesta on maksettava energiaveroa. Simpeleen voimalaitoksella käytettävistä polttoaineista energiaveroa kannetaan turpeesta ja raskaasta polttoöljystä, muut voimalaitoksella käytettävistä polttoaineista ovat lämmön tuotannossa verovapaita. Energiaveron määrän laskemiseksi lämpöenergian kulutus on kyettävä ennustamaan riittävällä tarkkuudella. Kulutusennusteena käytetään energiataseselvityksen mukaista kulutusta. Lisäksi turpeen energiavero kannetaan vain 25 000 MWh ylittävältä osalta, mikä aiheuttaa yhtälön 6.1 toisen epäjatkuvuuskohdan. Energiaverot  $K_{EV}$  lämmöntuotannossa saadaan yhtälöllä 6.3.

$$K_{EV} = \sum_{PA=1}^n E_h \cdot O_{PA} \cdot V_{PA} \quad (6.3)$$

jossa	$K_{EV}$	= lämmöntuotannon energiaverot [€]
	$E_h$	= tuotettu lämpöenergia [MWh]
	$O_{PA}$	= polttoaineen osuus - % kokonaismäärästä
	$V_{PA}$	= lämmöntuotannon haittaverot [€/MWh]

Muuttujana yhtälössä on  $O_{PA}$ . Polttoaineina ovat turve ja raskas polttoöljy.



### 6.3.3 Päästökustannukset

Päästökaupan alkamisen myötä jokainen nimellisteholtaan yli 20 MW voimalaitos kuuluu vuoden 2005 alusta päästökaupan piiriin. Päästökaupan osapuolille on kansallisen alkujaon perusteella hakemuksesta myönnetty päästokiintiö. Päästokiintiön puitteissa tapahtuvat hiilidioksidipäästöt eivät aiheuta kustannuksia. Päästokiintiön ylittämistä on määrätty sakkomaksu, joka on 40 €/CO<sub>2</sub> tonnilta. Sakkomaksua ei kuitenkaan peritä, mikäli päästökaupan osapuoli on hankkinut lisäpäästöoikeuksia ylityksensä verran ennakolta. Mikäli päästokiintiö on ylittynyt ja lisäkiintiöitä ei ole ajoissa hankittu, on seuraamuksena edellä mainittu sakkomaksu ja lisäpäästöoikeuden hankkimisesta aiheutuva kustannus.

Hiilidioksidipäästö määrän laskeminen edellyttää sähkö- ja lämpöenergian kulutukseen perustuvaa vuosittaisen tuotantomäärän ennustamista. Energiämäärinä käytetään energiataaselvityksestä saatavia arvoja lämmön ja vastapainesähkön osalta. Lauhesähkön tuotanto on lisäksi mukana, mutta määrää ei voida etukäteen ennustaa, koska tuotantopäätös tehdään sähkön markkinahinnan perusteella. Kustannuslaskentamallin keskeisin tavoite on, että sen avulla voidaan määrittellä lauhdesähkön tuotannosta aiheutuvat polttoaine- ja päästökustannukset.

Tuotettu hiilidioksidimäärä  $M_{CO_2p}$  voidaan laskea yhtälön 6.4 avulla käyttämällä kansallisia päästökertoimia ja hapettumiskertoimia, kun poltettu energiamäärä tunnetaan tai ennustetaan.

$$M_{CO_2p} = \sum_{PA=1}^n O_{PA} \cdot E_{PA} \cdot P_{PA} \cdot h_{PA} \quad (6.4)$$

jossa	$M_{CO_2p}$	= energiantuotannosta aiheutunut hiilidioksidipäästö [t]
	$O_{PA}$	= polttoaineen osuus - % kokonaismäärästä
	$E_{PA}$	= polttoaineen kokonaismäärä [MWh]
	$P_{PA}$	= kansallinen päästökerroin polttoaineelle [t/MWh]
	$h_{PA}$	= hapettumiskerroin polttoaineelle

Muuttujana yhtälössä on  $O_{PA}$ . Polttoaineet, joista aiheutuu hiilidioksidipäästöjä, ovat turve, raskas polttoöljy ja REF-kierrätyspolttoaine.

Mahdollinen päästökaupan ylitys  $Y_{CO_2}$  voidaan laskea yhtälön 6.5 avulla.

$$Y_{CO_2} = M_{CO_2p} - M_{CO_2k} \quad (6.5)$$

jossa	$Y_{CO_2}$	= päästökaupan ylitys [t]
	$M_{CO_2k}$	= päästökauppiö [t]
	$M_{CO_2p}$	= energiantuotannosta aiheutunut hiilidioksidipäästö [t]

Yhtälön 6.1 toinen epäjatkuvuuskohta aiheutuu päästökaupan ylittämistä, koska kiintiön puitteissa hiilidioksidipäästöistä ei aiheudu kustannuksia.

Päästökaupan ylittämistä aiheutuvat päästökustannukset  $K_p$  voidaan laskea yhtälön 6.6 avulla

$$K_p = Y_{CO_2} H_p \quad (6.6)$$

jossa	$K_p$	= päästökustannus
	$Y_{CO_2}$	= päästökaupan ylitys [t]
	$H_p$	= hinta ylitykselle [€/t]

Lisäpäästöoikeuden hintana on kustannusmallissa pidetty 10 €/t. Kuitenkaan vielä ei ole tiedossa, mille tasolle päästöoikeuden hinta asettuu.

#### 6.3.4 Tuet sähkön tuotantoon

Puu- ja kierrätyspolttoaineen kilpailukyvyn parantamiseksi niillä tuotetulle sähköenergialle maksetaan sähköntuotannon tukea. Tuen suuruus riippuu polttoaineen tyypistä. Kierrätyspuupolttaineella ja REF-kierrätyspolttaineella tuotetulle sähkölle maksetaan 2,5 €/MWh, puupolttaineilla tuotetulle sähkölle maksetaan 4,4 €/MWh ja metsähakkeella tuotetulle sähkölle maksetaan 6,9 €/MWh. Sähköntuotannon tukea ei kuitenkaan makseta voimalaitoksen omakäyttösähkölle. Tuen määrän laskemiseksi vastapainesähkön tuotantomäärää ennustetaan energiataseselvityksen perusteella. Lauhesähkön tuotantoa suunnitellaan mallin avulla ja sen määrä voidaan syöttää lasketatamalliin käsin. Tuet  $T_e$  sähköntuotantoon voidaan laskea yhtälöllä 6.7.

$$T_e = \sum_{PA=1}^n E_e \cdot O_{PA} \cdot T_{PA} \quad (6.7)$$

jossa	$T_e$	= sähköntuotannolle maksettava tuki [€]
	$O_{PA}$	= polttoaineen osuus kokonaispolttoainemäärästä
	$E_e$	= tuotettu sähkömäärä (ei sis. omakäyttöä) [MWh]
	$T_{PA}$	= polttoainekohtainen tuki [€/MWh]

Muuttujana yhtälössä on  $O_{PA}$ . Polttoaineet, joille maksetaan sähköntuotantotuki, ovat puupolttoaine, metsähake, kierrätyspuupolttoaine ja REF-kierrätyspolttoaine.

### 6.3.5 RECS-sertifikaattien myyntitulot

Biopolttoaineella tuotetulle sähkölle saadaan lisäarvoa myymällä RECS-sertifikaatteja. Sertifikaattien kysyntä vaihtelee riippuen eri maiden sähkökäyttäjille ja -myyjille asetetuista, vihreään sähköön liittyvistä velvoitteista. RECS-sertifikaatteihin oikeuttavia polttoaineita ovat puupolttoaineet ja metsähake. Sertifikaattien myynnistä saadaan tuloja  $M_R$  yhtälön 6.8 mukaisesti.

$$M_R = \sum_{PA=1}^n E_e \cdot O_{PA} \cdot R \quad (6.8)$$

jossa	$M_R$	= myyntitulo RECS-sertifikaateista [€]
	$E_e$	= tuotettu sähkömäärä (ei sis. omakäyttöä) [MWh]
	$O_{PA}$	= polttoaineen osuus kokonaispolttoainemäärästä
	$R$	= RECS-sertifikaatin hinta [€/MWh]

Muuttujana yhtälössä on  $O_{PA}$ . Polttoaineet, jotka ovat sertifiointiehtojen mukaisia, ovat puupolttoaineet sekä metsähake.

### 6.3.6 Yhteenveto kustannustekijöistä

Hinta on polttoaineen kilpailukyvyyn tärkein tekijä. Toinen, jopa tärkeämpi kilpailutekijä on polttoaineen käytettävyys. Seospolton kannalta turpeen osuus on pidettävä riittävän suurena sekä poltto- että kattilateknisten syiden takia. Raskaan polttoöljyn määrä voidaan normaalissa käyttötilanteessa pitää käytännössä nollassa. Turpeen ja öljyn kilpailukykyä heikentävät sekä niille asetettu energiantuotannon haittavero että niiden

polttamisen hiilidioksidipäästöt. Puupolttoaineiden kilpailukykyä parantavat sekä niiden vapautus energiaverosta että niille maksettavat sähköntuotannon tuet. Lisäksi RECS-sertifikaattien myynnillä voidaan saada lisäarvoa puupolttoaineilla tuotetulle sähköenergialle. Kierrätyspolttoaineiden tärkein kilpailutekijä on niiden hinta, joka on alhaisempi kuin muiden polttoaineiden hinta. Niiden heikkoutena on kuitenkin käytettävyys ja epätasalaatuisuus.

#### 6.4 Kustannusoptimoinnin toteutus

Kustannusoptimointi tehdään yhtälössä 6.1 esiintyvien kustannustekijöiden summana. Mallista muodostettiin Microsoft Excel - taulukkoon tarvittavat lähtötiedot ja funktiot sisältävä malli. Mallin rakennetta havainnollistetaan seuraavien taulukoiden avulla.

Taulukko 6.1. Eri tuotteiden ennustetun kulutuksen perusteella voidaan laskea voimalaitoksen käyttämä kokonaispolttoaine energia  $E_{PA}$ , kun lämmön, vastapaine- ja lauhdesähkön tuotannon kulutussuhteet tunnetaan. Tuotantotiedot ovat esimerkinomaisesti esitettyjä, eivät todellisia lukuja.

	MWh	Kulutussuhde	PA MWh
Lämpö	200 000	1,11	222000
VP-sähkö	50 000	1,22	61000
LV-sähkö	10 000	3,78	37800
		yht.	320800

Taulukko 6.2. Tuotetusta sähkömäärästä on vähennettävä voimalaitoksen omakäytön osuus. Omakäyttösähkölle ei voida laskea sähköntuotannon tukea eikä RECS-sertifikaattien myynnistä saatavaa lisäarvoa. Voimalaitoksen omakäyttö on esitetty esimerkinomaisesti, ei todelliseen omakäyttöön perustuen.

Sähkön tuotanto		
VP-sähkö	50 000	MWh
LV-sähkö	10 000	MWh
Voimalaitoksen omakäyttö	12 000	MWh
Sähkö myyntiin	48 000	MWh

Taulukko 6.3. Polttoaineiden tiedot. Hinnat ovat esimerkkilukuja, eivät todellisia.

Polttoaine	Turve	REF-	Kierrätys puu	Öljy	Puu polttoaine	Metsähake
Osuus polttoaine seoksessa	$O_{Tu}$	$O_{Re}$	$O_{Kp}$	$O_{Pö}$	$O_{Pp}$	$O_{Mh}$
Reunaehto	50% >	< 2,5%	< 2,5%	5 %		
Hinta €/MWh (veroton)	7	4	4,5	20	8	9
Huoltovarmuusmaksu €/MWh	0	0	0	0,245	0	0
Päästökerroin t/MWh	0,382	0,114	0	0,279	0	0
Hapettumiskerroin	0,99	0,99	0	0,995	0	0
Energiavero €/MWh	1,59	0	0	4,728	0	0
Verovapaa osuus MWh	25 000					
Tuki sähköntuot €/MWh		2,5	2,5		4,2	6,9

Taulukoissa 6.1, 6.2 ja 6.3 on esitetty kustannuslaskennan kannalta kaikki tarpeellinen tieto. Päästölaskentaa varten tarvitaan vielä taulukko 6.4, josta käyvät ilmi päästokiintiö ja päästetty hiilidioksidimäärä sekä lisäpäästöoikeuksien hinnat.

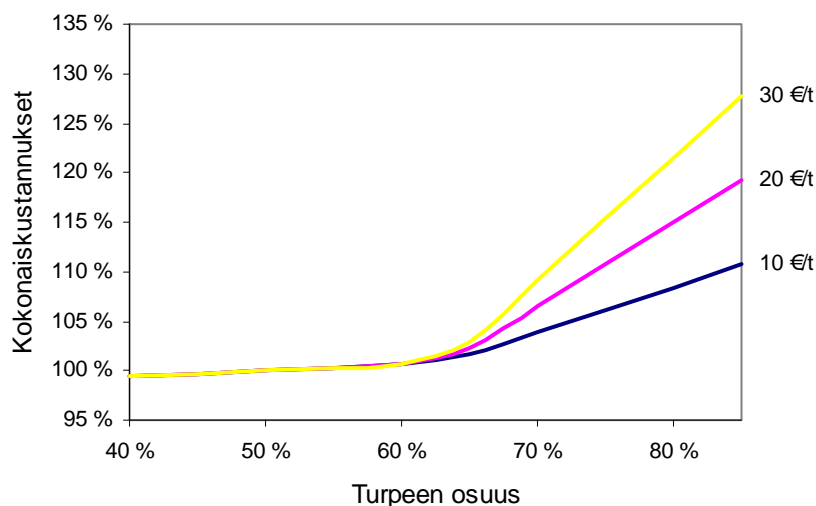
Taulukko 6.4. Päästölaskennan tiedot. Päästokiintiön ylittämisestä aiheutuvat kustannukset muodostuvat lisäpäästöoikeuden hinnasta ja mahdollisesta sakkorangaistuksesta, mikäli lisäpäästöoikeuksia ei ole hankittu riittävän aikaisessa vaiheessa.

Kiintiö	134 000	t
Päästöt		t
Ylitys		t
Sakko	40	€/t
Oikeus	10	€/t
Yhteensä	50	€/t
Päästökustannukset		€

Excelin Solver-toiminnolla optimoidaan edellä esitettyjen yhtälöiden 6.2 - 6.8 muodostamaa summafunktiota 6.1. Yhtälö 6.1 on epälineaarinen kahden epäjatkuvuuskohdan takia. Epäjatkuvuus on seurausta turpeen energiaverosta vapaasta osuudesta sekä päästökustannusten muodostumisesta vain päästokiintiön ylittävien päästöjen osalta. Yhtälön 6.1 muuttujina on kunkin polttoaineen osuus kokonaispolttoaine-energiamäärästä, muut termit ovat vakioita. Muuttujille voidaan asettaa reunaehtoja, joiden avulla saadaan palamisen kannalta vähimmäismäärä jotakin polttoainetta. Esimerkiksi öljyn osuudeksi valitaan kiinteät 5 %, koska kattila K6 tarvitsee tukipolttoainetta tietyn määrän vuodessa. Aikaisempien vuosien perusteella kattilan K6 ja varakattilan K7 käyttämä öljyn määrä on noin 5 % kokonaispolttoaine-energiasta. Kattilan K7 osuus öljyn kulutuksesta on huomioitu hiilidioksidipäästöjen eli mahdollisten päästökustannusten takia polttoainesuhteen kokonaisuoptimoinnissa.

## 6.5 Kustannustehokkain polttoainesuhde

Optimointi osoittaa, että turve on kokonaiskustannusten kannalta kaikkein kriittisin polttoaine. Yhtälöä 6.1 tarkasteltaessa havaitaan, että turpeen osuuden kasvaessa kokonaiskustannukset kasvavat varsin hitaasti kunnes päästökauppa ylittyy. Päästökaupan ylittyessä kokonaiskustannusten nousunopeus riippuu lisäpäästöoikeuden hinnasta. Kokonaiskustannusten muodostumista eri lisäpäästöoikeuden hinnalla on havainnollistettu alla olevassa kuvassa 6.1. Turpeen osuuden kasvaessa 5 %:lla kokonaiskustannukset nousevat noin 0,3 %, kunnes päästökauppa ylittyy. Päästökaupan ylittyessä, lisäpäästöoikeuden hinnan ollessa 10 €/t hiilidioksidia turpeen osuuden lisääminen 5 %:lla nostaa kokonaiskustannuksia noin 2 %. Turpeen osuuden vaikutusta kokonaiskustannusten muodostumiseen lämpöä ja vastapainesähköä tuottaessa on havainnollistettu kuvassa 6.1.



Kuva 6.1 Kokonaiskustannukset lämpöä ja vastapainesähköä tuottaessa turpeen osuuden funktiona eri lisäpäästöoikeuden hinnalla. Turpeella on korvattu puupolttoaineen osuus. Kuvaajia piirrettäessä öljyn osuus on ollut 5 %, kierrätyspolttoaineiden ja metsähakkeen osuudet 0 %. RECS-sertifikaattien myyntituloa ei myöskään ole huomioitu. Kokonaiskustannukset ovat 100 %, kun turpeen osuus on 50 % ja lisäpäästökaupan hinta 10 €/t.

Mikäli lauhdesähköä tuotetaan, käyttäytyy kokonaiskustannussuora samalla tavoin, mutta päästökauppa ylittyy pienemmällä turpeen osuudella. RECS-sertifikaattien myyntitulon vaikutus kokonaiskustannusten muodostumiseen on vähäistä, mutta ei täysin merkityksetöntä.

Kustannusoptimoinnissa havaittiin, että kokonaiskustannukset yhtälöä 6.1 optimoitaessa tulevat pienemmiksi, jos turpeen minimiosuutta laskettiin 50 %:sta. Mikäli palaminen ja

kattilan K6 likaantuminen eivät nouse ongelmaksi turpeen osuutta pienennettäessä, kannattaisi puupolttoaineiden osuuden lisäämismahdollisuuksia tutkia tarkemmin. Jos puupolttoaineiden osuutta voidaan lisätä nykyisestä tasosta, myös hiilidioksidipäästöt pienenisivät. Näin myös kartonkitehtaan laajennuksen jälkeen, nykyisen päästokiintiön puitteissa, voitaisiin tuottaa jonkin verran lauhdesähköä.

## 6.6 Polttoainekustannukset lopputuotteille

Marginaalikustannusten selvittämiseksi tarvitaan vähintään seuraavat tiedot: tuotantoennusteet eri tuotteiden tuotantomääristä ja käytettävä polttoainesuhde. Tietojen perusteella voidaan laskea voimalaitoksen vuotuinen hiilidioksidipäästö määrä, energian tuotannon haittaverot, sähköntuotannon tuet sekä vihreiden sertifikaattien myynnistä saatavat tulot.

Päästökustannukset kohdistetaan niiden aiheutumisperusteen mukaisesti kullekin lopputuotteelle. Vastapainesähkölle ja lämpöenergialle kohdistetaan niiden tuotannosta aiheutuvat päästökustannukset käytettyjen polttoaine-energioiden suhteessa. Lauhdesähkölle kohdistetaan sen tuotannosta aiheutuvat päästökustannukset. Päästökustannusten jako on esitetty myöhemmin tarkemmin.

### 6.6.1 Lämmön tuotannon polttoainekustannukset

Lämpöenergialle polttoaineesta ja energiaveroista aiheutuvat kustannukset voidaan laskea yhtälön 6.9 mukaisesti, jolloin saadaan lämpöenergialle marginaalihinta  $H_h$ .

$$H_h = \frac{\sum O_{PA} \cdot H_{PA}}{\eta_{K6}} + \sum O_{PA} \cdot V_{PA} \quad (6.9)$$

jossa	$H_h$	= lämpöenergialla polttoaineesta aiheutuva hinta [€/MWh]
	$O_{PA}$	= polttoaineen %-osuus kokonaispolttoaine-energiasta
	$H_{PA}$	= polttoaineen hinta [€/MWh]
	$\eta_{K6}$	= kattilan K6 hyötysuhde
	$V_{PA}$	= lämmöntuotannon haittaverot [€/MWh]

### 6.6.2 Vastapainesähkön tuotannon polttoainekustannukset

Vastapainesähkölle saadaan vastaavasti polttoaineesta aiheutuvat kustannukset ottamalla lisäksi huomioon sähköntuotannon tuet ja vihreiden sertifikaattien myynnistä saatavat tulot yhtälön 6.10 mukaisesti, jolloin saadaan vastapainesähköenergialle marginaalihinta  $H_{VP2}$ .

$$H_{VP2} = O_{VP2} \cdot \frac{\sum O_{PA} \cdot H_{PA}}{\eta_{K6}} - \sum O_{PA} \cdot T_e - \sum O_{PA} \cdot R + V_e \quad (6.10)$$

jossa	$H_{VP2}$	= vastapainesähkölle polttoaineesta aiheutuva hinta [€/MWh]
	$O_{VP2}$	= vastapainesähkön tuotannon ominaiskulutus
	$O_{PA}$	= polttoaineen %-osuus kokonaispolttoaine-energiasta
	$H_{PA}$	= polttoaineen hinta [€/MWh]
	$\eta_{K6}$	= kattilan K6 hyötysuhde
	$T_e$	= polttoaineelle maksettava sähköntuotannon tuki [€/MWh]
	$R$	= RECS-sertifikaatin hinta [€/MWh]
	$V_e$	= sähkövero [€/MWh]

### 6.6.3 Lauhdesähkön tuotannon polttoainekustannukset

Vastapainesähkölle saadaan vastaavasti polttoaineesta aiheutuvat kustannukset ottamalla lisäksi huomioon sähköntuotannon tuet ja vihreiden sertifikaattien myynnistä saatavat tulot yhtälön 6.11 mukaisesti, jolloin saadaan vastapainesähköenergialle marginaalihinta  $H_{LV1}$ .

$$H_{LV1} = O_{LV1} \cdot \frac{\sum O_{PA} \cdot H_{PA}}{\eta_{K6}} - \sum O_{PA} \cdot T_e - \sum O_{PA} \cdot R + V_e \quad (6.11)$$

jossa	$H_{LV1}$	= vastapainesähkölle polttoaineesta aiheutuva hinta [€/MWh]
	$O_{LV1}$	= lauhdesähkön tuotannon ominaiskulutus
	$O_{PA}$	= polttoaineen %-osuus kokonaispolttoaine-energiasta
	$H_{PA}$	= polttoaineen hinta [€/MWh]



$\eta_{K6}$	= kattilan K6 hyötysuhde
$T_e$	= polttoaineelle maksettava sähköntuotannon tuki [€/MWh]
$R$	= RECS-sertifikaatin hinta [€/MWh]
$V_e$	= sähkövero [€/MWh]

## 6.7 Päästökustannukset

Päästökustannusten jakaminen tehdään päästöjen aiheutumisperusteen mukaisesti. Vastapainesähkön ja lämmön tuotannosta aiheutuneita päästöjä pidetään yhdessä aiheutettuina. Lauhdesähkön tuotannosta aiheutuvat päästökustannukset kohdennetaan kokonaan lauhdesähkölle.

Päästökustannusten jakamiseksi on ensiksi laskettava kunkin tuotteen tuotannosta syntyvät hiilioksidipäästöt, jotka voidaan laskea tuotantoennusteen, kulutussuhteen ja käytettävän polttoainesuhteen perusteella seuraavien yhtälöiden mukaisesti.

Lämpöenergiantuotannosta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt saadaan yhtälöstä 6.12.

$$M_{CO_2h} = \frac{\sum_{PA=1}^n O_{PA} \cdot E_h \cdot P_{PA} \cdot h_{PA}}{\eta_{K6}} \quad (6.12)$$

jossa	$M_{CO_2h}$	= lämpöenergian tuotannon hiilidioksidipäästö [t]
	$O_{PA}$	= polttoaineen osuus - % kokonaismäärästä
	$E_h$	= lämpöenergian kokonaismäärä [MWh]
	$P_{PA}$	= kansallinen päästökerroin polttoaineelle [t/MWh]
	$h_{PA}$	= hapettumiskerroin polttoaineelle
	$\eta_{K6}$	= kattilan K6 hyötysuhde

Polttoaineet, joista hiilidioksidipäästöjen lasketaan aiheutuvan, ovat turve, REF-polttaine ja öljy.

Vastapainesähkön tuotannon aiheuttamat hiilidioksidipäästöt voidaan laskea yhtälöstä 6.13.

$$M_{\text{CO}_2\text{VP2}} = O_{\text{VP2}} \frac{\sum_{PA=1}^n O_{\text{PA}} \cdot E_{\text{VP2}} \cdot P_{\text{PA}} \cdot h_{\text{PA}}}{\eta_{\text{K6}}} \quad (6.13)$$

jossa	$M_{\text{CO}_2\text{VP2}}$	= vastapainesähkön tuotannon hiilidioksidipäästö [t]
	$O_{\text{VP2}}$	= vastapainesähkön tuotannon ominaiskulutus
	$O_{\text{PA}}$	= polttoaineen osuus - % kokonaismäärästä
	$E_{\text{VP2}}$	= vastapainesähkön kokonaismäärä [MWh]
	$P_{\text{PA}}$	= kansallinen päästökerroin polttoaineelle [t/MWh]
	$h_{\text{PA}}$	= hapettumiskerroin polttoaineelle
	$\eta_{\text{K6}}$	= kattilan K6 hyötysuhde

Lauhesähkön tuotannon aiheuttamat hiilidioksidipäästöt voidaan laskea yhtälöstä 6.13 korvaamalla vastapainesähköä kuvaavat suuret lauhdesähkön vastaavilla suureilla.

#### 6.7.1 Päästökustannusten jakaminen eri tuotteille

Kun eri tuotteiden hiilidioksidipäästöt on laskettu edellä esitetyllä tavalla, voidaan mahdolliset päästökustannukset jakaa niiden aiheutumisperusteen mukaisesti seuraavasti.

Mikäli yhteistuotannon päästöt  $M_{\text{YT}}$  ovat suuremmat kuin päästokiintiö, vastapainesähkön ja lämmön yhteistuotannosta aiheutuneet päästöt voidaan laskea seuraavasti.

$$M_{\text{YT}} = M_{\text{CO}_2\text{h}} + M_{\text{CO}_2\text{VP}} \quad (6.14)$$

jossa	$M_{\text{YT}}$	= yhteistuotannon hiilidioksidipäästö [t]
	$M_{\text{CO}_2\text{VP}}$	= vastapainesähkön tuotannon hiilidioksidipäästö [t]
	$M_{\text{CO}_2\text{h}}$	= lämpöenergian tuotannon hiilidioksidipäästö [t]

Yhteistuotannon päästökustannukset voidaan laskea yhtälön 6.15 mukaan, jos  $M_{YT} > M_{CO_2k}$ .

$$K_{pYT} = (M_{YT} - M_{CO_2k}) \cdot H_p \quad (6.15)$$

jossa	$K_{pYT}$	= yhteistuotannon hiilidioksidipäästökustannukset [€]
	$M_{YT}$	= yhteistuotannon hiilidioksidipäästö [t]
	$M_{CO_2k}$	= päästokiintiö [t]
	$H_p$	= hinta ylitykselle [€/t]

Päästökustannukset tuotettua myytävää energiayksikköä [MWh] kohti voidaan laskea, kun tunnetaan kattilahiötysuhde, vastapainesähkön ominaiskulutus, voimalaitoksen omakäyttösähkö ja tuotetut energiamäärät.

Lämpöenergian päästökustannukset myytävää energiayksikköä [MWh] kohti saadaan yhtälöstä 6.15.

$$K_{ph} = \frac{1}{\eta_{K6}} \cdot \frac{E_h}{E_{PA}} \cdot \frac{K_{pYT}}{E_h} \quad (6.15)$$

jossa	$K_{ph}$	= lämmöntuotannon päästökustannus [€/MWh]
	$\eta_{K6}$	= kattilan K6 hyötysuhde
	$E_h$	= lämpöenergian kokonaismäärä [MWh]
	$E_{PA}$	= polttoaineen kokonaismäärä [MWh]
	$K_{pYT}$	= yhteistuotannon hiilidioksidipäästökustannukset [€]

Vastapainesähkölle saadaan päästökustannukset vastaavasti yhtälöstä 6.16.

$$K_{pVP} = \frac{O_{VP}}{\eta_{K6}} \cdot \frac{E_{VP}}{E_{PA}} \cdot \frac{K_{pYT}}{E_{VP} - E_{OK}} \quad (6.16)$$

jossa	$K_{pVP}$	= vastapainesähkön päästökustannus [€/MWh]
-------	-----------	--------------------------------------------

$O_{VP}$	= vastapainesähkön tuotannon ominaiskulutus
$\eta_{K6}$	= kattilan K6 hyötysuhde
$E_{VP}$	= vastapainesähkön kokonaismäärä [MWh]
$K_{pYT}$	= yhteistuotannon hiilidioksidipäästökustannukset [€]
$E_{PA}$	= polttoaineen kokonaismäärä [MWh]
$E_{OK}$	= voimalaitoksen omakäyttösähkö [MWh]

Lauhdesähköntuotannolle kohdistetaan päästökustannuksia sen tuotannosta aiheutuvien päästöjen perusteella seuraavan periaatteen mukaisesti. Yhteistuotannon aiheuttamilla päästöillä katsotaan olevan etuoikeus päästökauppaan. Mikäli yhteistuotannon päästöt jäävät kiintiötä pienemmiksi, lauhdesähkön päästökustannukset lasketaan vain kiintiön ylittävältä osalta. Jos yhteistuotannon päästöt ovat suuremmat kuin päästökauppa, lauhdesähkön tuotannon päästöt saadaan suoraan tuotantoon käytetyn polttoaineenergian perusteella. Seuraavassa on esitetty lauhdesähkön tuotannon päästökustannusten laskentaan käytetyt yhtälöt.

Lauhdetuotannon hiilidioksidipäästöt voidaan laskea yhtälön 6.17 avulla.

$$M_{CO_2LV1} = O_{LV} \frac{\sum_{PA=1}^n O_{PA} \cdot E_{VP2} \cdot P_{PA} \cdot h_{PA}}{\eta_{K6}} \quad (6.17)$$

jossa	$M_{CO_2LV1}$	= lauhdesähkön tuotannon hiilidioksidipäästö [t]
	$O_{LV}$	= lauhdesähkön tuotannon ominaiskulutus
	$O_{PA}$	= polttoaineen osuus - % kokonaismäärästä
	$E_{VP2}$	= vastapainesähkön kokonaismäärä [MWh]
	$P_{PA}$	= kansallinen päästökerroin polttoaineelle [t/MWh]
	$h_{PA}$	= hapettumiskerroin polttoaineelle
	$\eta_{K6}$	= kattilan K6 hyötysuhde

Jos yhteistuotannon hiilidioksidipäästöt  $M_{YT}$  ovat pienemmät kuin päästökiiintiö  $M_{CO_2k}$ , voidaan lauhdesähkön tuotannon aiheuttama hiilidioksidipäästökiiintiön mahdollinen ylitys  $Y_{LV}$  laskea seuraavasti.

$$Y_{LV} = M_{CO_2LV1} - (M_{CO_2k} - M_{YT}) \quad (6.18)$$

jossa	$Y_{LV}$	= päästökiiintiön LV-tuotannon aiheuttama ylitys [t]
	$M_{CO_2LV1}$	= lauhdesähkön tuotannon hiilidioksidipäästö [t]
	$M_{CO_2k}$	= päästökiiintiö [t]
	$M_{YT}$	= yhteistuotannon hiilidioksidipäästö [t]

Mikäli tulos on suurempi kuin nolla, on päästökiiintiö ylittynyt. Päästökustannukset tuotettua lauhdesähkösikköä (MWh) kohti saadaan yhtälön 6.19 mukaan.

$$K_{pLV} = \frac{Y_{LV} \cdot H_p}{E_{LV}} \quad (6.19)$$

jossa	$K_{pLV}$	= lauhdesähkön päästökustannus [€/MWh]
	$Y_{LV}$	= päästökiiintiön LV-tuotannon aiheuttama ylitys [t]
	$H_p$	= hinta ylitykselle [€/t]
	$E_{LV}$	= lauhdesähkön kokonaismäärä [MWh]

Mikäli päästökiiintiö on ylittynyt sähkön ja lämmön yhteistuotannon hiilidioksidipäästöjen seurauksena, saadaan päästökustannukset lauhdesähkösikköä [€/MWh] kohti suoraan yhtälön 6.20 mukaan.

$$K_{pLV} = \frac{M_{CO_2LV1} \cdot H_p}{E_{LV}} \quad (6.20)$$

jossa	$K_{pLV}$	= lauhdesähkön päästökustannus [€/MWh]
	$M_{CO_2LV1}$	= lauhdesähkön tuotannon hiilidioksidipäästö [t]
	$H_p$	= hinta ylitykselle [€/t]
	$E_{LV}$	= lauhdesähkön kokonaismäärä [MWh]

Kun päästökustannukset jaetaan edellä esitettyjen periaatteiden mukaan lauhdesähkön tuotannolle, kohdistuvat kaikki sen tuotannosta aiheutuneet päästökustannukset lauhdesähkölle. Vastapainesähkölle ja lämpöenergialle kohdistuu päästökustannuksia niiden kulutussuhteiden suhteessa. Näin toteutettuna päästökustannukset saadaan jaettua tasapuolisesti ilman, että jotakin tuotetta suosittaisiin.

### 6.8 Lopputuotteiden marginaalikustannukset polttoaineesta ja päästöistä

Voimalaitoksen lopputuotteet täytyy hinnoitella siten, että niistä saatavalla myyntitulolla voidaan kattaa voimalaitokseen sitoutuneesta pääomasta, kiinteistä käyttö- ja kunnossapitokuluista sekä muuttuvista kustannuksista aiheutuneet menot. Kun voimalaitoksen lopputuotteiden polttoaine- ja päästökustannukset tuotettua energiayksikköä kohti tunnetaan, voidaan niitä pitää myös tuotteiden marginaalikustannuksina. Mikäli tuotteista saadaan vain marginaalikustannuksien mukainen hinta, ei tuotteita ole mahdollista tuottaa pitkällä aikavälillä. Marginaalikustannukset saadaan laskemalla polttoainekustannukset ja päästökustannukset yhteen.

Lopputuotteiden marginaalikustannukset voidaan esittää edellä esitetyn perusteella lämpöenergialle, vastapaine- ja lauhdesähkölle seuraavasti.

Lämpöenergian marginaalikustannus (yhtälö 6.21)

$$K_{hm} = H_h + K_{ph} \quad (6.21)$$

jossa  $K_{hm}$  = lämmöntuotannon marginaalikustannus [€/MWh]  
 $H_h$  = lämpöenergian polttoaineesta aiheutuva hinta [€/MWh]  
 $K_{ph}$  = lämmöntuotannon päästökustannus [€/MWh]

Vastapainesähkön marginaalikustannus (yhtälö 6.22)

$$K_{VPm} = H_{VP} + K_{pVP} \quad (6.22)$$

jossa  $K_{VPm}$  = vastapainesähkön marginaalikustannus [€/MWh]  
 $H_{VP}$  = VP-sähkön polttoaineesta aiheutuva hinta [€/MWh]

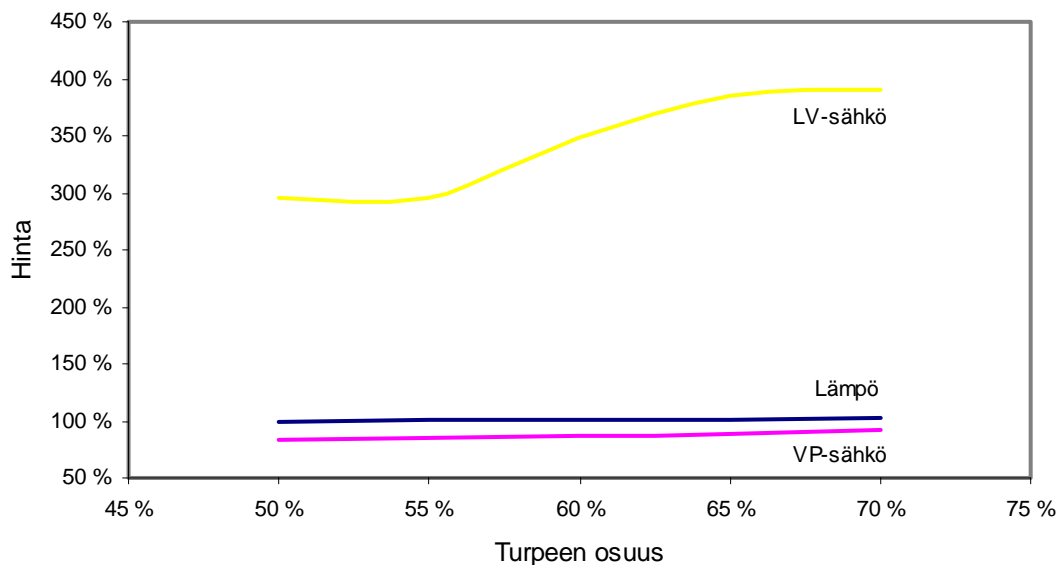
$$K_{pVP} = \text{VP-sähkön päästökustannus [€/MWh]}$$

Lauhdesähkön marginaalikustannus (yhtälö 6.23)

$$K_{LVm} = H_{LV} + K_{pLV} \quad (6.23)$$

jossa  $K_{LVm}$  = lauhdesähkön marginaalikustannus [€/MWh]  
 $H_{LV}$  = lauhdesähkölle polttoaineesta aiheutuva hinta [€/MWh]  
 $K_{pLV}$  = lauhdesähkön päästökustannus [€/MWh]

Tuntemalla tuotteiden marginaalikustannukset pystytään selvittämään tuotteiden aiheuttamat kustannukset. Tuotteiden myyntihinta perustuu niiden markkina-arvoon. Markkina-arvon tulisi olla niin suuri, että myös kaikki muut kustannukset voidaan kattaa tuotteiden myynnistä saatavilla myyntituloilla.



Kuva 6.2. Tuotteiden yksikköhinnat turpeen osuuden funktiona. Öljyn osuus 5 %, loppuosa polttoaineesta puupolttoainetta. RECS-sertifikaattien myyntitulo ei ole huomioitu. Päästökustannukset huomioitu aiheutumisperiaatteen mukaan, lisäpäästöoikeuden hinta 10 €/t. Vertailuhintana 100 % on lämmön yksikköhinta turpeen osuuden ollessa 50 %. Lauhdesähkön tuotantomäärä on 20 000 MWh, joka on mahdollista tuottaa päästökiintiötä ylittämättä optimaalisella polttoainesuhteella.

Kuvasta 6.2 havaitaan, että päästökustannukset vaikuttavat huomattavasti lauhdesähkön yksikköhintaan. Lämmön ja vastapainesähkön yksikköhintaan päästökustannukset eivät vaikuta niin suuresti.

## 6.9 Milloin sähkön omatuotanto on kannattavaa?

Sähkön omatuotannon kannattavuutta voidaan tarkastella edellisessä kappaleessa esitettyjen marginaalikustannusten avulla. Vastapainesähkön tuotanto perustuu lähes teoreettiseen lämmönkulutukseen. Kattilassa tuotettu höyry on liian kuumaa ja korkeapaineista tuotantoprosessien tarpeeseen, joten sen lämpötilaa ja painetta täytyisi alentaa joka tapauksessa reduktion avulla. Näin lämpöenergiaa hukkaantuisi tarpeettomasti. Vastapaineturbiinin avulla höyryn lämpötila ja paine voidaan laskea ottamalla höyryn sisältämä lämpöenergia talteen sähköenergiana.

Vastapainesähkön tuotantoa voidaan pitää taloudellisesti kannattavana aina, kun lämpöenergialle on tarvetta. Käytännössä paperi- ja kartonkitehdas tarvitsevat lämpöenergiaa jatkuvasti, vain jouluna ja juhannuksena tehtailla on pidemmät seisokit. Vastapainesähkölle saadaan todellisia tuotantokustannuksia vastaava hinta ottamalla huomioon myös voimalaitoksen kiinteät kustannukset. Kiinteät kustannukset jaetaan sähkö- ja lämpöenergialle niiden tuottamiseen käytettyjen polttoaineiden energioiden suhteessa. Myös näin tarkasteltuna vastapainesähkön marginaalikustannukset jäävät sähkömarkkinoiden hintatasoa alemmaksi. Vastapainesähkön tuotanto on siis aina kannattavaa.

Lauhdesähkön marginaalihintaa verrataan Nord-Poolin SPOT-sähkömarkkinan tuntihintaan. Mikäli marginaalikustannukset ovat tuntihintojen vuorokautista keskiarvoa alhaisemmat, on lauhdesähkön tuotanto kannattavaa. Lauhdesähkölle ei kohdenneta polttoaine- ja päästökustannusten lisäksi muita kustannuksia kannattavuustarkastelussa, koska lauhdesähkön tuottamiseksi vain kattilan K6 tehoa nostetaan, jotta höyryä voidaan johtaa myös lauhdeturbiinille. Kattilan K6 tehoa nostetaan lisäämällä polttoaineen syöttöä kattilaan, näin ollen siitä ei juuri aiheudu muita lisäkuluja, jotka pitäisi kannattavuustarkastelussa huomioida.

Lauhdeturbiinin järkevä käyttöaika on vähintään muutama vuorokausi kerrallaan, sitä ei voida käynnistää tunniksi tai pariksi kerrallaan, koska turbiini ei kestä jatkuvaa pysäyttämistä ja käynnistämistä. Myöskään tyhjäkäyntiteholla ajaminen ei ole järkevää, joten tuotantoa ei voida säätää SPOT-tuntihinnan mukaan. Käytännössä sähkön SPOT-tuntihinnan keskiarvon täytyy olla lauhdesähköntuotannon marginaalikustannuksia



korkeammalla tasolla vähintään muutama päivä, ennen kuin lauhdesähköä on taloudellisesti kannattava tuottaa.

### **6.10 Päästökaupan vaikutus tuotantomääriin**

Päästökaupan myötä voimalaitoksella on alettava seurata entistä tarkemmin polttoainesuhdetta. Palamisen ja kattilan käytön kannalta turpeen osuuden tulee olla noin 50 % polttoaineesta. Nykyisillä lämmön ja vastapainesähkön tuotantomäärillä ja turpeen osuuden ollessa noin 50 % polttoaineesta päästokiintiö ei ylity ja sen puitteissa pystytään tuottamaan myös noin 20 000 MWh lauhdesähköä.

Kartonkitehtaan laajennus, joka valmistuu kesällä 2006, tulee lisäämään kartonkitehtaan lämmön tarvetta. Mikäli päästokiintiö ei kasva laajennusta vastaavalla tavalla, lauhdesähkön tuotantomäärää on laskettava, jos päästokiintiötä ei haluta ylittää. Valtaosa hiilidioksidipäästöistä on turpeen aiheuttamia, öljyn ja REF-polttoaineen hiilidioksidipäästö on turpeen osuuteen verrattuna pieni. Lisäpäästöoikeuksien hinnaksi on arvioitu 10 €/t. Turpeen osuuden ollessa 50 % polttoaineesta voidaan karkeasti sanoa, että päästokiintiön ylittymisestä aiheutuu noin 3 €/MWh lisäkustannus poltettua turvemegawattituntia kohden. Varsinkin lauhdesähkön päästökustannukset nousevat todella suuriksi, eli yli 10 €/MWh lauhdesähköä. Muiden tuotteiden päästökustannukset pysyvät tasolla 3-4 €/MWh tasolla alhaisemmasta kulutus-suhteesta johtuen.

### **6.11 Kannattavuustarkastelun virhearviointi**

Kannattavuustarkastelu on tehty puhtaasti taloudellisin perustein. Kattilan K6 toiminnalla ja käyttövarmuudella on suurimmat vaikutukset voimalaitoksen käyttötalouteen. Kustannusoptimointi tehtiin Microsoft Excel-ohjelmalla, koska mallin reunaehdot sekä lähtötietoja on helppo muuttaa. Nyt kustannusoptimoinnin reunaehtoina pidettiin kattilan käytön kannalta optimaalisia polttoainesuhteita ja polttoainesuhteen muutoksien vaikutus voimalaitoksen korjaus- ja kunnossapitokuluihin jää pieneksi. Mikäli reunaehdot ei aseteta kattilan ominaisuuksien kannalta oikealle tasolle, saadaan laskennalliset kustannukset pienemmiksi, mutta todellinen vaikutus voimalaitoksen kustannuksiin näkyy vasta pidemmän ajan päästä.

Myös käytetyt kulutus-suhteet vakioitiin. Niiden määrittämiseen liittyy epävarmuustekijöitä, kuten vastapaineen kasvattaminen. Käytetyt kulutus-suhteet

vastaavat kuitenkin varsin hyvin kirjallisuudessa esitettyjen vastaavan tyyppisten voimalaitosten kulutussuhteita. Käytetyistä kulutussuhteista ei näin ollen pitäisi aiheutua merkittäviä epätarkkuustekijöitä.

Kannattavuustarkastelu antaa selkeän kuvan kustannuksiltaan tehokkaimmasta polttoainesuhteesta. Tämä polttoainesuhde ei kuitenkaan välttämättä ole palamisen kannalta kaikista tehokkain. Kustannusmallin avulla voidaan tarkastella polttoaineiden hintojen muuttuessa niiden vaikutusta sekä voimalaitoksen kokonaiskustannuksiin että polttoaineiden väliseen kilpailukykyyn. Nykyisellä polttoaineiden hintatasolla ja sähköntuotannon tuilla puupolttoaineet ovat taloudellisessa mielessä kaikista kilpailukykyisimpiä.

## 7. YHTEENVETO

Diplomityön tavoitteena oli selvittää sähköntuotannon omakustannushinta sekä vastapaine- että lauhdesähkölle mahdolliset päästökustannukset huomioituina. Voimalaitoksen alhaisesta rakennusasteesta johtuen kannattavuustarkastelu tehtiin ottamalla huomioon myös lämmöntuotannon kustannustekijät. Sähkön ja lämmöntuotannon kustannustekijöistä laadittiin malli, jonka avulla voimalaitoksen polttoaineista aiheutuvat kustannukset voidaan optimoida. Diplomityössä keskityttiin pelkästään polttoainekustannusten optimointiin, koska ne muodostavat voimalaitoksen muuttuvista kustannuksista noin 80 % ja päästökustannuksiin voidaan vaikuttaa suoraan eri polttoaineiden käyttömäärillä.

Kannattavuustarkastelun avulla saatiin selvitettyä sähkön- ja lämmöntuotannon polttoaineista ja päästöistä aiheutuvat kustannukset. Kustannukset jaettiin eri tuotteille suhdemenetelmän avulla kiinteitä kulutussuhteita käyttämällä. Suhdemenetelmä mahdollistaa sähkön- ja lämmöntuotannon polttoaineiden erottamisen toisistaan jälkikäteen energiataseselvityksen perusteella. Myös lauhdesähkön tuotantoon käytetyt polttoaineet voidaan erotella suhdemenetelmää käytettäessä jälkikäteen tuotetun määrän ja kulutussuhteen perusteella.

Sähkön omatuotannon kannattavuutta arvioitiin vertaamalla vastapaine- ja lauhdesähkön marginaalikustannuksia sähkömarkkinoiden SPOT-hintaan. Vastapainesähkön tuotannolla saadaan lisäarvoa tuotetulle lämmölle, ja sen tuottaminen on kannattavaa aina, kun riittävä lämpökuorma on olemassa. Lauhdesähkön tuotannon kannattavuus on voimakkaasti riippuvainen sähkön SPOT-hinnasta. Vertaamalla lauhdesähkön marginaalikustannuksia SPOT-hintaan saadaan selkeä kuva siitä, onko lauhdesähkön tuotanto kannattavaa.

Päästökaupan seurauksena hiilidioksidipäästöjä on seurattava tarkasti vähintään kuukausittaisella seurannalla ympäri vuoden. Seurannan avulla pystytään ennustamaan riittääkö vuosittainen päästökiintiö vai ei. Mikäli havaitaan, että hiilidioksidipäästöt tulevat ylittymään, voidaan lisäpäästöoikeuksia hankkia riittävän ajoissa. Näin vältetään viranomaisten määräämältä, päästökiintiön ylittämisestä aiheutuvalta sakkorangaistukselta.

**LÄHTEET**

- (BIO) Bioenergia Suomessa, www-sivut [viitattu tammikuu 2005]  
<http://www.finbioenergy.fi/index.asp>
- (DIR 1) EU-direktiivi 2001/77/EY, [viitattu helmikuu 2005]  
[http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga\\_doc?smartapi!celexdoc!prod!CELEXnumdoc&lg=FI&numdoc=32001L0077&model=lex](http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexdoc!prod!CELEXnumdoc&lg=FI&numdoc=32001L0077&model=lex)
- (Dyster 1999) Dyster Hanna 1999, diplomityö Höyryturbiinilaitosten suorituskyvyn ja kunnan seuranta ennakoivan kunnossapidon työvälineenä, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu
- (El-Ekono 2002) Elecrowatt-Ekono, Jaakko Pöyry Group 2002: Suomen RECS-ryhmä; RECS-hankkeen arviointi [viitattu helmikuu 2005]  
<http://www.vtt.fi/pro/climtech/material/recsarv.pdf>
- (Elovaara 1993) Elovaara Jarmo, Laiho Yrjö 1993: Sähkölaitostekniikan perusteet, Otakustantamo, 460 s., ISBN 951-672-083-8
- (EMV) Energiamarkkinaviraston www-sivut, Päästökauppa [viitattu tammikuu 2005]  
<http://www.energiamarkkinavirasto.fi/select.asp?gid=165&languageid=172>
- (En-Ekono 1997) Energia-Ekono, Kauppa- ja teollisuusministeriö, Sähköntuotantokustannukset 1997, 60K00790-Q090-007
- (Energia 1999) Energia Suomessa 1999, Oy Edita Ab, 368s., ISBN 951-37-2745-9
- (Fingrid) Fingrid Oy, www-sivut [viitattu helmikuu 2005]  
[http://www.fingrid.fi/portal/suomeksi/palvelut/uusiutuvan\\_energian\\_palvelut/](http://www.fingrid.fi/portal/suomeksi/palvelut/uusiutuvan_energian_palvelut/)

- (Gochenour 2003) Gochenour Carolyn 2003. Regulation of Heat and Electricity Produced in Combined-heat-and-power Plants. Washington D.C., World Bank. [viitattu maaliskuu 2005]  
[http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/2003/11/10/000012009\\_20031110103433/Rendered/PDF/272010paper.pdf](http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/2003/11/10/000012009_20031110103433/Rendered/PDF/272010paper.pdf)
- (Hasu 1997) Hasu Kirsi 1997, diplomityö, Energianhallinnan ja päästöseurannan kehittäminen paperitehtaalla, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu
- (Heikkinen 1994) Heikkinen Arto, Järvinen Pekka. 1994: Elinkaariarviointi ja sähköntuotanto, Imatran Voima OY, 61 s. , ISBN 951-591-022-6
- (Huhtinen 2000) Huhtinen et al. 2000: Höyrykattilatekniikka, Oy Edita Ab, 379 s. ISBN 951-37-3360-2
- (Kauppinen 2002) Kauppinen et al. 2002: Tesla raportti 76/2002: Paperikoneen sähkönjakeluverkon kuormitukset ja niiden mallintaminen käytöntuen sovelluksia varten, Tampereen teknillinen korkeakoulu 2002, 81s., ISBN 952-15-0949-X
- (Kiviranta 1995) Kiviranta Janne 1995, diplomityö, Lämmitysvoimalaitoksen kustannusten jako sähkön ja lämmön kesken. Tampereen teknillinen korkeakoulu
- (KTM 1) Suomen esitys päästöoikeuksien kansalliseksi jakosuunnitelmaksi vuosille 2005 - 2007, Helsinki 2004. [Viitattu tammikuu 2005]  
[http://www.ktm.fi/chapter\\_files/Jakosuunnitelmaesitys\\_120804ab.pdf](http://www.ktm.fi/chapter_files/Jakosuunnitelmaesitys_120804ab.pdf)

- (KTM 2) Kauppa- ja teollisuusministeriö, www-sivut, Energiaverotus  
[viitattu tammikuu 2005]  
[http://www.ktm.fi/index.phtml?menu\\_id=193&lang=1](http://www.ktm.fi/index.phtml?menu_id=193&lang=1)  
[http://www.ktm.fi/index.phtml?menu\\_id=193&lang=1&chapter\\_id=8709](http://www.ktm.fi/index.phtml?menu_id=193&lang=1&chapter_id=8709)
- (Leskelä 2003) Leskelä Jukka, Päästökaupan merkitys energiayritykselle, Energia-  
alan keskusliitto ry Finenergy, Ilmastomarkkinat yritystasolla  
powerpoint-kalvot 21.10.2003. [Viitattu maaliskuu 2005]  
<http://www.energia.fi/attachment.asp?Section=1352&Item=6894/>
- (Liikanen 1999) Liikanen Juha 1999: Yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon  
päästöjen jakaminen, Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia  
ja raportteja 19/1999, Energiaosasto, Oy Edita Ab 76 s., ISBN 951-  
739-513-2
- (Lindholm 2002) Lindholm Pirita 2002: Tampereen yliopisto, Aluetieteen ja  
ympäristöpolitiikan laitoksen verkkojulkaisu 2000: Selvitys  
puupolttoaineista [viitattu tammikuu 2005]  
[http://www.uta.fi/laitokset/yhdt/artikkelit/2000\\_puupoltto.pdf](http://www.uta.fi/laitokset/yhdt/artikkelit/2000_puupoltto.pdf)
- (LV-koneet) LTY: Energia- ja ympäristötekniikan osasto, Kurssi 040500000  
Virtaus ja lämpövoimakoneet, luentomoniste (kevät 2005)  
Höyryvoimalaitosprosessi
- (Motiva 1) Motiva Oy, www-sivut, Vihreät sertifikaatit [viitattu helmikuu  
2005]  
<http://www.motiva.fi/fi/kirjasto/uusiutuvatenergiالاhteetsuomessa/vihreatsertifikaatit/>,  
<http://www.motiva.fi/fi/kirjasto/uusiutuvatenergiالاhteetsuomessa/vihreatsertifikaatit/mitaovatvihreatsertifikaatit.html>,  
<http://www.motiva.fi/fi/kirjasto/uusiutuvatenergiالاhteetsuomessa/vihreatsertifikaatit/vihreidensertifikaattienkysynta.html>

- (Motiva 2) Motiva Oy, www-sivut, biokaasu [viitattu tammikuu 2005]  
<http://www.motiva.fi/fi/kirjasto/uusiutuvatenergialahteetsuomessa/muutbiomassaenergianlahteet/biokaasu>
- (M-real) M-real Simpele, materiaali, ei julkinen
- (Mörsky 1994) Mörsky Jorma & Janne 1994, Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka, Otatieto, 300 s., ISBN 951-672-184-2
- (Partanen 1997) Partanen Jarmo 1997: Sähköenergiatekniikan perusteet, Opetusmoniste EN C-98, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu 1997, ISBN 951-764-021-8
- (Poikonen 2005) Poikonen et al. 2005: Hajautetun sähköntuotannon teknologian ja tekniikoiden nykytila sekä tulevaisuuden kehitysnäkymät, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkövoimatekniikan laitos. ISBN 952-15-1306-3
- (Raiko 2002) Raiko et al. 2002: Poltto ja palaminen, Gummerus Kirjapaino OY, 750 s., ISBN 951-666-604-3
- RECS Suomen RECS-ryhmän www-sivut, [viitattu helmikuu 2005]  
<http://www.recs.fi/recs/mikaonrecs.htm>,  
<http://www.recs.fi/recs/mitentoimii.htm>
- (Suomalainen 2001) Suomalainen Anne 2001, Puupolttoaineiden vaikutus voimalaitoksen käyttötalouteen, Tutkimusselostus ENE3/T0078/2001, VTT Energia, 21 s.
- (Sähkömarkkinat) LTY: Sähkötökniiikan osasto, Kurssi 080421101 Sähkömarkkinat, opetusmoniste [viitattu tammikuu 2005]  
[http://www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/080421101/Opetusmoniste\\_smar\\_kkinat.pdf](http://www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/080421101/Opetusmoniste_smar_kkinat.pdf)

- (TK4) Tekniikan käsikirja 4. Sähkötekniikka 1975. Voimalaitos- ja lämpötekniikka. Gummerus Oy, 711 s., ISBN 951-20-1077-1
- (Tulli) Tulli, www-sivut, Tullin asiakastiedotteet [viitattu helmikuu 2005]  
[http://www.tulli.fi/fi/04\\_Julkaisut/02\\_Asiakastiedotteet/021\\_2003.pdf](http://www.tulli.fi/fi/04_Julkaisut/02_Asiakastiedotteet/021_2003.pdf)
- (Vapo 1) Vapo Oy, www-sivut (sekä polttoaineen toimitussopimus, ei julkinen)  
[viitattu tammikuu 2005]  
[http://www.vapo.fi/fin/kunta\\_ja\\_yritysassiakkaat/biopolttoaineet/](http://www.vapo.fi/fin/kunta_ja_yritysassiakkaat/biopolttoaineet/)
- (Vapo 2) Vapo Oy, www-sivut, biopolttoainetermejä [viitattu tammikuu 2005]  
[http://www.vapo.fi/fin/palvelut/viestinta\\_ja\\_lehdistopalvelu/biopolttoainetermeja/?id=572](http://www.vapo.fi/fin/palvelut/viestinta_ja_lehdistopalvelu/biopolttoainetermeja/?id=572)
- (Venäläinen 2000) Venäläinen et al. 2000: Metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamojen lietteiden ulkoistaminen, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Ente Tutkimusraportti B 137, 141 s., ISBN 951-764-461-2
- (VOP) LTY: Energia- ja ympäristötekniikan osasto, Kurssi 040102000  
Voimalaitosoppi, materiaali
- (YET) TKK: Yleinen energiatalous (Ene-59.003), luentomoniste. [viitattu tammikuu 2005]  
[http://www.tkk.fi/Yksikot/Energiatalous/kurssit/Ene59003/YET\\_4.pdf](http://www.tkk.fi/Yksikot/Energiatalous/kurssit/Ene59003/YET_4.pdf)
- (Ympäristö) Valtion ympäristöhallinnon verkkopalvelin [Viitattu tammikuu 2005]  
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=1164&lan=FI>,  
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=81079&lan=fi>



(YTL) Ympäristöyritysten liitto, www-sivut, kierrätyspolttoaine, [viitattu helmikuu 2005]  
[http://www.ytl.fi/kie\\_hyot.htm](http://www.ytl.fi/kie_hyot.htm)