

# Sähkön tuotantokustannusvertailu

Tuukka Vainio

# Sähkön tuotantokustannusvertailu

Tuukka Vainio

Aalto-yliopisto  
Insinöörیتieteiden korkeakoulu  
Energiatekniikan laitos

© 2011 Aalto-yliopisto, Insinöörityöiden korkeakoulu, energiatekniikan laitos.  
Reprinted with permission.

Aalto Print  
Helsinki 2011

AALTO-YLIOPISTO TEKNILLINEN KORKEAKOULU PL 11000, 00076 AALTO <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>		HARJOITUSTYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Tuukka Vainio			
Työn nimi: Sähkön tuotantokustannusvertailu			
Tutkinto-ohjelma: ENE			
Pääaine: Energiatekniikka		Pääaineen koodi: Ene-59	
Vastuupettaja: prof. Sanna Syri Ohjaaja: prof. Sanna Syri			
<p>Tässä työssä suoritetaan sähkön tuotantokustannusvertailu vuoden 2010 hintatiedoilla. Työssä vertaillaan IEA:n syksyllä 2010 julkaistun raportin tietoja suomalaisiin tietoihin eri laitostyyppien kustannuksista. Työssä arvioidaan myös vuonna 2008 julkaistun Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston (R., Tarjanne, A., Kivistö) sähkön tuotantokustannusvertailun Suomessa tuloksia suhteessa muihin arvioihin. Tässä työssä tarkastellaan polttoaineittain tutkittavien voimalaitosten lisäksi myös suomalaisia CHP-laitoksia ja ulkomaalaisia voimalaitoksia. Kustannusvertailu on jaettu edellä mainittujen voimalaitostyyppien mukaan kolmeen osaan: tuotantokustannukset polttoaineittain Suomessa, CHP-laitokset Suomessa sekä voimalaitokset muissa maissa. Suomalaiset voimalaitokset ovat kolmea kuvitteellista biokaasulaitosta lukuun ottamatta olemassa olevia tai rakenteilla olevia CHP-laitoksia. Voimalaitokset muissa maissa ovat pääosin eurooppalaisia sähköntuotantoon keskittyneitä voimalaitoksia, joiden lisäksi on valittu tarkasteltavaksi kolme CHP-laitosta.</p> <p>Pienimmät sähköntuotantokustannukset Suomessa ovat ydinvoimalla 43,5 €/MWh. Toiseksi edullisinta on tuottaa sähköä tuulivoimalla, jonka sähköntuotantokustannukset ovat 52,9 €/MWh. Hiili-, kaasu- ja turvevoiman sähköntuotantokustannukset ovat välillä 59,3 €/MWh–66,2 €/MWh. Puulauhdelaitoksilla sähköntuotantokustannukset ovat lähes 90 €/MWh, eikä puuta käytetä polttoaineena lauhdesähkön tuotannossa Suomessa. Suomalaisten CHP-laitosten sähköntuotantokustannukset ovat välillä -26,9 €/MWh-41,1 €/MWh, ja niihin vaikuttaa huomattavasti vuosittaisen lämmöntuotannon suuruus. Kuvitteellisilla CHP-biokaasukoelaitoksilla sähköntuotantokustannukset vaihtelevat pienimmästä suurimpaan välillä 24,1–41,1 €/MWh. IEA:n (2010) raportin sähköntuotantokustannukset ovat hiililaitoksilla 52,2–61 €/MWh ja kaasukombilaitoksilla 57,5 €/MWh-65,7 €/MWh, jotka ovat melko lähellä suomalaisia sähköntuotantokustannuksia. IEA:n raportin CHP-laitosten sähköntuotantokustannukset ovat välillä 24,5–176,8 €/MWh. Suomalaisilla CHP-laitoksilla on suuremmat lämpöhyvitykset kuin eurooppalaisilla CHP-laitoksilla mm. suuremman lämmitystarpeen takia. Sveitsiläisellä biokaasulla toimiva CHP-laitos on tuotantokustannuksiltaan tutkimuksen kallein sähköntuottaja.</p>			
Päivämäärä: 15.12.2010		Kieli: Suomi	Sivumäärä: 16
Avainsanat: voimalaitokset, sähkön tuotantokustannus, CHP			



## Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	2
2	Lähtötiedot .....	3
2.1	Voimalaitosvertailu polttoaineittain Suomessa .....	3
2.2	Suomalaiset CHP-laitokset.....	4
2.3	Ulkomaalaiset voimalaitokset .....	6
3	Laskentamenetelmät.....	8
4	Tulokset.....	10
4.1	Tuotantokustannukset polttoaineittain Suomessa .....	10
4.2	Sähköntuotantokustannukset kotimaisille CHP-laitoksille .....	11
4.3	Sähköntuotantokustannukset ulkomaalaisille voimalaitoksille.....	12
4.3.1	Ulkomaiset lauhdevoimalaitokset.....	12
4.3.2	Ulkomaiset CHP-laitokset.....	14
5	Johtopäätökset.....	16

LIITTEET

LÄHTEET

# 1. Johdanto

Tässä työssä suoritetaan sähkön tuotantokustannusvertailu vuoden 2010 hintatiedoilla. Työ on tehty maisterinopintoihin kuuluvana harjoitustyönä Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun energiatekniikan laitoksen energiatalouden ja voimalaitosopin tutkimusryhmässä. Työssä vertaillaan IEA:n syksyllä 2010 julkaistun raportin tietoja suomalaisiin tietoihin eri laitostyyppien kustannuksista. Työssä arvioidaan myös vuonna 2008 julkaistun Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston (R., Tarjanne, A., Kivistö) sähkön tuotantokustannusvertailun Suomessa tuloksia suhteessa muihin arvioihin. Tarjanteen (2008) vertailussa tutkittiin vain sähköntuotantoa polttoaineittain eikä lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksia (CHP) otettu mukaan tarkasteluun. Tässä työssä tarkastellaan polttoaineittain tutkittavien voimalaitosten lisäksi myös suomalaisia CHP-laitoksia ja ulkomaalaisia voimalaitoksia. Kustannusvertailut on jaettu edellä mainittujen voimalaitostyyppien mukaan kolmeen osaan: tuotantokustannukset polttoaineittain Suomessa, CHP-laitokset Suomessa sekä voimalaitokset muissa maissa. Suomalaiset voimalaitokset ovat kolmea kuvitteellista biokaasulaitosta lukuun ottamatta olemassa olevia tai rakenteilla olevia CHP-laitoksia. Voimalaitokset muissa maissa ovat pääosin eurooppalaisia sähköntuotantoon keskittyneitä voimalaitoksia, joiden lisäksi on valittu tarkasteltavaksi kolme CHP-laitosta.

Tutkittavat voimalaitostyyppit vertailussa polttoaineittain ovat: ydinvoimalaitos, maakaasukombilauhdevoimalaitos, kivihiililauhdevoimalaitos, turvelauhdevoimalaitos, puulauhdevoimalaitos ja tuulivoimala. Toisen osion vertailuun valitut suomalaiset CHP-laitokset käyttävät polttoaineinaan pääosin biopolttoaineita tai maakaasua. IEA-voimalaitokset sisältävät kokoluokiltaan ja polttoaineiltaan voimalaitoksia, jotka soveltuvat hyvin vertailuun ensimmäisen ja toisen osan voimalaitosten kanssa. Toisessa kappaleessa esitellään tarkemmin tutkittavia voimalaitoksia ja niiden ominaisuuksia. Voimalaitosten tiedot on esitetty lähtötietotaulukoissa. Kolmannessa kappaleessa esitetään käytetyt laskentakaavat, joita on käytetty lähtötietotaulukon ja sähköntuotantokustannustietojen laskemisessa. Neljännessä kappaleessa esitetään saadut tulokset voimalaitosten sähköntuotantokustannuksille. Ne on jaettu lähtötietojen mukaisesti myös kolmeen osioon. Viimeisessä kappaleessa analysoidaan saatuja tuloksia.

## 2. Lähtötiedot

Laskelmissa on käytetty vuoden 2010 hintatasoa. Raportin lisäksi työhön kuuluu oleellisena osana taulukkolaskentaohjelmaan tehty laskentapohja, jonne voi päivittää tuoreimpia hintatietoja tai lisätä uusia tarkastelukohteita.

### 2.1 Voimalaitosvertailu polttoaineittain Suomessa

Vertailun pohjana toimivaan ensimmäiseen osaan on päivitetty tietoja Tarjanteen vuoden 2008 hintatiedoista niin, että polttoaineiden ja päästöoikeuden hintoja on muutettu vuoden 2010 mukaiseksi. Tarjanne (2008) raportin mukaisesti investointikustannukset ovat arvonlisäverottomia ja ne sisältävät myös rakennusaikaiset korot ja omistajan kaikki kustannukset. Laskelmissa ei ole otettu huomioon puu- ja tuulilaitosten valtiolta saamia tukia [1, s.3].

Ydinvoimalaitoksen polttoainehintana on käytetty IEA (2010) raportin mukaista hintaa 5 €/MWh [2, s.42]. Käytetyn ydinpolttoaineen käsittely- ja loppusijoituskustannus sekä ylläpitoinvestoinnit sisältyvät ydinvoimalaitoksen käyttökustannuksiin. Ydinvoimalaitoksen investointikustannus on 4,125 miljardia euroa ja sähköntuotannon hyötysuhde on 37 %. Laitoksen teho edustaa suurimpien tarjolla olevien ydinvoimalaitosten kokoluokkaa.

Kaasukombilaitoksen oletetaan rakennettavan kaasuverkon läheisyyteen, jolloin liittymismaksu ei vaikuta merkittävästi investointikustannuksiin. Kaasukombilaitos koostuu yhdestä kaasuturbiinista, jätelämpökattilasta ja höyryturbiinista. Kaasukombivoimalaitoksen hyötysuhteena käytetään arvoa 58 % ja investointikustannus on 280 miljoonaa euroa. Voimalaitoksen sähköteho on 400 MW. [1, s.3] Maakaasun hintana on käytetty 167 MW:n kokoisen laityypin polttoainehintaa 29,34 €/MWh [3], joka muistuttaa kuluttajatyypiltään eniten tutkimuksessa käytettyä kombivoimalaitosta. Todellisuudessa 400 MW:n kokoiselle kaasukombilaitokselle polttoainekustannukset olisivat hieman pienemmät.

Tarkasteltu hiilivoimalaitos perustuu pölypolttotekniikkaan ja rannikolle sijoitettava laitos on varustettu tarpeellisilla rikin- ja typenpoistolaitteilla. Kivihiilen polttoainehintana on käytetty 14,67 €/MWh, joka on maaliskuun 2010 hinta kivihiilelle rannikolla [4]. Voimalaitoksen sähköteho on 500 MW, hyötysuhde 42 % ja investointikustannus 650 miljoonaa euroa.

Turvelaitos perustuu leijukerrostekniikkaan ja sen sähköteho on 150 MW, hyötysuhde 40 % ja investointikustannus 225 miljoonaa euroa. [1, s.4] Turpeen hintana on käytetty jyrshinturpeen vuoden 2010 ensimmäisen kvartaalin polttoainehintaa 10,39 €/MWh. [4]

Puuvoimalaitosta on käsitelty ensimmäisessä osiossa vertailun vuoksi myös lauhdevoimalaitoksena, vaikka puuta käytetään Suomessa voimalaitospolttoaineena vain CHP-voimalaitoksissa. Puulaitoksen hyötysuhteena on käytetty 33 % hyötysuhdetta, joka on tyypillinen pienehköille CHP-puuvoimalaitoksille. Investointikustannus on 81 miljoonaa euroa ja sähköteho 30 MW. [1, s.4] Puuvoimalaitoksen polttoainehintana on käytetty vuoden 2010 maaliskuun metsähake/-murskeen hintaa, joka on käyttöpaikalla 18,59 €/MWh [4].



Tuulivoimalle käytetään rannikolle rakennettavan tuulivoimapuiston investointikustannusta 1300 €/kW ja uusien tuulivoimaloiden huipunkäyttöaika 2200 h.

Ydinvoimalaitokselle käytetään 8000 h huipunkäyttöaika, ja yhdenvertaisuuden vuoksi käytetään samaa huipunkäyttöaika myös muille voimalaitoksille, vaikka todellisuudessa huipunkäyttöajat ovatkin pienemmät. [1, s.4] Ydinvoimalaitokselle on käytetty 40 vuoden ja muille kohteille 25 vuoden elinikää. Päästöoikeuden hintana on käytetty maaliskuun 2010 hintatietoa, joka on noin 13 €/tCO<sub>2</sub> [5]. Joulukuussa 2010 on CO<sub>2</sub>-hinta EU:ssa 14,67 €/tCO<sub>2</sub> [7]. Reaalikorkona on käytetty 5 prosenttia, jossa on noin 2–3 prosentin marginaali todelliseen reaalikorkoon verrattuna. Tämä aiheuttaa todellista suuremman pääomakustannuksen [1, s.7].

Taulukko 1. Lähtötietotaulukko: Hintataso 1/2010

POLTTOAINE	YDIN	KAASU	HIILI	TURVE	PUU	TUULI
<b>SÄHKÖTEHO [MW]</b>	<b>1500</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>150</b>	<b>30</b>	<b>3</b>
VUOSIHYÖTYSUHDE	37 %	58 %	42 %	40 %	33 %	-
<b>INVESTOINTIKUSTANNUS [milj. €]</b>	<b>4125</b>	<b>280</b>	<b>650</b>	<b>225</b>	<b>81</b>	<b>3.9</b>
OMINAISINVESTOINTIKUSTANNUS [€/kW]	2750	700	1300	1500	2700	1300
POLTTOAINEEN HINTA [€/MWh]	5	29.34	14.67	10.39	18.59	-
<b>SÄHKÖNTUOTANNON POLTTOAINEKUSTANNUS [€/MWh]</b>	<b>13.51</b>	<b>50.59</b>	<b>34.92</b>	<b>25.98</b>	<b>56.33</b>	<b>-</b>
KÄYTTÖ- JA KUNNOSSAPITOKUSTANNUKSET, KUN 8000 h/a [€/MWh]	10	5	8	8	9	11
TALOUDELLINEN ELINIKÄ [a]	40	25	25	25	25	25
REAALIKORKO [%]	5.00 %	5.00 %	5.00 %	5.00 %	5.00 %	5.00 %
ANNUIEETTITEKIJÄ [%]	5.83 %	7.10 %	7.10 %	7.10 %	7.10 %	7.10 %
PÄÄSTÖOIKEUDEN HINTA [€/t CO <sub>2</sub> ]	-	13	13	13	-	-
<b>PÄÄSTÖOIKEUDEN KUSTANNUKSET [€/MWh]</b>	<b>-</b>	<b>4.44</b>	<b>10.59</b>	<b>12.05</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
HUIPUNKÄYTTÖAIKA [h/a]	8000	8000	8000	8000	8000	2200
KÄYTTÖKERROIN [%]	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.25

## 2.2 Suomalaiset CHP-laitokset

Suomalaisiksi CHP-laitoksiksi on valittu viisi todellista ja kolme kuvitteellista laitosta. Todelliset CHP-laitokset käsitellään yksityisyyssyistä nimettöminä A–D. Laitosten kapasiteetit ovat polttoaineteholtaan 150–500 MW. Laitokset tuottavat sähkön lisäksi kaukolämpöä ja prosessihöyryä. Laitosten polttoaineet ovat puu, biopolttoaineet, turve, kivihiili ja paalattu jäte. Laitosten taloudellisena elinikänä käytettiin 25 vuotta ja korkokantana 5 %. Laitosten sähköntuotannon hyötysuhteet ovat välillä 30–48 %. Polttoaineiden ja päästöoikeuksien hinnat otettiin samoista lähteistä kuin erillissähkön tuotantokustannusvertailussa.

Kuvitteellisiksi biokaasu-koelaitoksiksi valittiin kolme erikokoista CHP-biokaasulaitosta. Voimalaitokset Koe 1–3 ovat PA-tehoiltaan 0,6 MW, 3 MW ja 9 MW. Käytetyt hyötysuhde ja kustannustiedot ovat peräisin Wärtsilän General Manager Jaakko Antilalta. Investointikustannus ilman CHP:ta on biokaasulaitoksille 700–900 €/kW moottorin koosta riippuen. Voimalaitoksen sähköhyötysuhde on 45 %. Biokaasun on oltava tarpeeksi hyvälaatuista. Biokaasun metaaniluvun on oltava vähintään 80 (mieluiten 90) ja polttoaineen lämpöarvon suurempi kuin 17 MJ/Nm<sup>3</sup>. CHP-laitoksilla investointikustannus on 20 % suurempi, eli noin 840–1080 €/kW. Työssä on käytetty polttoaineteholtaan 0,6 MW:n biokaasulaitokselle 1080 €/kW, 3 MW:n laitokselle 960 €/kW ja 9 MW:n 840

€/kW. Yhteistuotannon hyötysuhde on n. 85–90 %. Tässä tutkimuksessa käytetään 85 %:n kokonaishyötysuhdetta. Vuotuiset operointikustannukset ovat n. 2-3 % investointikustannuksista eli n. 21–27 €/kw. [8]

Taulukko 2. CHP-biokaasulaitokset

VOIMALAITOS	Koe 1	Koe 2	Koe 3
POLTTOAINE	BIOKAASU	BIOKAASU	BIOKAASU
POLTTOAINETEHO [MW]	0.6	1	30
SÄHKÖNTUOTANNON VUOSIHYÖTYSUHDE	45 %	45 %	45 %
<b>SÄHKÖTEHO [MW]</b>	<b>0.27</b>	<b>0.45</b>	<b>13.50</b>
LÄMMÖNTUOTANNON VUOSIHYÖTYSUHDE	50 %	50 %	50 %
<b>LÄMPÖTEHO [MW]</b>	<b>0.3</b>	<b>0.5</b>	<b>15.0</b>
<b>INVESTOINTIKUSTANNUS [milj. €]</b>	<b>0.648</b>	<b>2.88</b>	<b>7.56</b>
OMINAISINVESTOINTIKUSTANNUS [€/kW]	5333.33	4740.74	4148.15
POLTTOAINEEN HINTA [€/MWh]	0	0	0
SÄHKÖNTUOTANNON POLTTOAINEKUSTANNUS [€/MWh]	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>KÄYTTÖ- JA KUNNOSSAPITOKUSTANNUKSET, KUN 3000 h/a [€/MWh]</b>	<b>6.67</b>	<b>9.00</b>	<b>7.00</b>
TALOUDELLINEN ELINIKÄ [a]	25	25	25
REAALIKORKO [%]	5.00 %	5.00 %	5.00 %
ANNUITEETTITEKIJÄ [%]	7.10 %	7.10 %	7.10 %
<b>LÄMPÖHYVITYS [€/MWh]</b>	<b>35.63</b>	<b>35.63</b>	<b>35.63</b>
HUIPUNKÄYTTÖAIKA [h/a]	3000	3000	3000
KÄYTTÖKERROIN [%]	0.34	0.34	0.34

### 2.3 Ulkomaalaiset voimalaitokset

Ulkomaalaisiksi voimalaitoksiksi on valittu seitsemän lauhdevoimalaitosta ja kolme CHP-laitosta. Lauhdevoimalaitoksista neljä käyttää polttoaineenaan kivihiiltä ja loput maakaasua. CHP-laitokset toimivat biokaasulla, maakaasulla tai biomassalla. Tutkitut laitokset ovat Saksasta, Hollannista, Belgiasta, Sveitsistä ja yksi laitoksista on The Electric Power Research Institute:n (EPRI) tutkimuslaitos. Tiedot on saatu International Energy Agency: n (IEA) raportista ”Projected Costs of Generating Electricity 2010 Edition” [4]. Ko. Laitokset valittiin vertailuun sen perusteella, että laitostyyppit ja maiden kustannusolosuhteet ovat samantapaiset kuin Suomessa. Lauhdevoimalaitokset ja niiden tiedot on esitetty taulukossa 3. Taulukon alaosassa on esitetty teknologioiden lyhenneselitykset.

Taulukko 3. Työssä tarkastellut ulkomaalaiset lauhdevoimalaitokset [4]

MAA	Belgia	Saksa	Saksa	Hollanti	Belgia	Saksa	Hollanti
TEKNOLOGIA	BIC SC	BIC PCC	BrC PCC	BIC USC PCC	KAASU CCGT	KAASU CCGT	KAASU CCGT
<b>SÄHKÖTEHO [MW]</b>	<b>750</b>	<b>800</b>	<b>1050</b>	<b>780</b>	<b>400</b>	<b>800</b>	<b>870</b>
VUOSIHYÖTYSUHDE	45 %	46 %	45 %	46 %	55 %	60 %	59 %
<b>INVESTOINTIKUSTANNUS [milj. €]</b>	<b>1475</b>	<b>1215</b>	<b>1840</b>	<b>1328</b>	<b>345</b>	<b>654</b>	<b>667</b>
OMINAISINVESTOINTI-KUSTANNUS [€/kW]	1967	1518	1752	1702	861	817	767
POLTTOAINEEN HINTA [€/MWh]	20,52	20,07	8,03	20,48	45,52	41,73	42,44
<b>SÄHKÖNTUOTANNON POLTTOAINEKUSTANNUS [€/MWh]</b>	<b>45,60</b>	<b>43,63</b>	<b>17,84</b>	<b>44,53</b>	<b>82,77</b>	<b>69,55</b>	<b>71,93</b>
<b>KÄYTTÖ- JA KUNNOSSAPITO-KUSTANNUKSET</b>	<b>6,22</b>	<b>9,03</b>	<b>10,00</b>	<b>2,83</b>	<b>4,67</b>	<b>4,80</b>	<b>0,94</b>
REAALIKORKO [%]	5,00 %	5,00 %	5,00 %	5,00 %	5,00 %	5,00 %	5,00 %
ANNUITEETTITEKIJÄ [%]	7,10 %	7,10 %	7,10 %	7,10 %	7,10 %	7,10 %	7,10 %
PÄÄSTÖOIKEUDEN KUSTANNUKSET [€/MWh]	16,81	15,72	18,61	15,84	7,85	7,18	7,32
<b>Lyhenteet:</b>							
PCC= pulverised coal combustion= Hiilen pölypolttolaitokset							
CCGT =Combined Cycle Gas Turbine= Kaasukäyttöiset kombivoimalat							
SC= supercritical							
USC PCC= ultra-supercritical pulverised coal combustion							
BIC= Black Coal= kivihiili							
BrC=Brown Coal= ruskohiili							

Ulkomaalaiset CHP-laitokset on esitetty taulukossa 4. EPRI on sähköntuotannon tutkimuskeskus, joka on yksityinen voittoa tavoittelematon organisaatio. Sen tutkimuskohteet liittyvät sähkön tuotantoon, jakeluun ja käyttöön. [6]

Taulukko 4. Työssä tarkastellut ulkomaalaiset CHP-voimalaitokset [4]

VOIMALAITOS	Hollanti	Sveitsi	Industry Contribution: EPRI
POLTTOAINE	KAASU	BIOKAASU	BIOMASSA
<b>SÄHKÖTEHO [MW]</b>	<b>250</b>	<b>0,2</b>	<b>75</b>
INVESTOINTIKUSTANNUS [milj. €]	250	1,59	174
OMINAISINVESTOINTIKUSTANNUS [€/kW]	999	7955,11	2314
SÄHKÖNTUOTANNON POLTTOAINEKUSTANNUS [€/MWh]	58,23	0,00	11,40
<b>KÄYTTÖ- JA KUNNOSSAPITOKUSTANNUKSET [€/MWh]</b>	<b>6,26</b>	<b>119,12</b>	<b>8,61</b>
REAALIKORKO [%]	5,00 %	5,00 %	5,00 %
ANNUITEETTITEKIJÄ [%]	7,10 %	7,10 %	7,10 %
<b>PÄÄSTÖOIKEUSKUSTANNUKSET [€/MWh]</b>	<b>10,17</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
<b>LÄMPÖHYVITYS [€/MWh]</b>	<b>15,95</b>	<b>12,92</b>	<b>16,03</b>

### 3. Laskentamenetelmät

Investointikustannuksen pohjalta on lähtötietotaulukkoihin laskettu ominaisinvestointikustannus (€/kW), jossa voimalaitoksen investointikustannus (€) on jaettu sähköteholla (kW). Sähköntuotannon polttoainekustannus on laskettu suhteuttamalla polttoaineen hinta (€/MWh) voimalaitoksen sähköntuotannon hyötysuhteeseen (€/MWh).

Annuiteettitekijä on laskettu käyttämällä kaavaa:  $C_{n/1} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$ , jossa

n=vuosien määrä ja i=laskentakorko. Reaalikorkoa 5 % käyttämällä saadaan 40 vuoden eliniällä annuiteettitekijäksi 5,83 % ja 25 vuoden eliniällä 7,10 %.

Lähtötietotaulukon avulla voidaan muodostaa voimalaitosten sähköntuotantokustannustaulukko, jossa voimalaitoksen sähköntuotantokustannukset (€/MWh) ja kustannuskomponentit on laskettu tuotetulle sähkölle. Sähköntuotantokustannukset muodostavat pääomakustannukset, käyttö & kunnossapito, polttoaine ja päästökauppa. Lisäksi CHP-laitoksilla on mukana viidentenä komponenttina lämpöhyvitys, joka on kaukolämmöntuotannosta saatu hyvitys. Lämpöhyvitys vähennetään sähköntuotantokustannuksista.

Pääomakustannusten laskemisessa käytetään annuiteettitekijää, jonka avulla lasketaan vuotuinen tasasuuri erä laitoksen taloudelliselle eliniälle. Ensimmäistä osiota (voimalaitosvertailu polttoaineittain) lukuun ottamatta on pääomakustannuskaavan nimittäjänä käytetty julkaistua vuosittaista sähköntuotantokustannusta laskemisen sijaan.

Pääomakustannukset lasketaan seuraavasti:

$$\text{Pääomakustannukset (€/MWh)} = \frac{\text{annuiteettitekijä (\%)} \times \text{investointi (€)}}{\text{huipunkäyttöaika (h)} \times \text{teho (MW)}}$$

Polttoainekustannukset lasketaan seuraavasti:

$$\text{Polttoainekustannukset (€/MWh)} = \frac{\text{polttoaineen hinta (€/MWh)}}{\text{sähköntuotannon hyötysuhde (\%)}}$$

Päästökaupakustannukset on laskettu käyttämällä taulukon 5. fossiilisten polttoaineiden hiilidioksidipäästöjä ja päästöoikeuden hintaa. IEA:n (2010) raportista päästöoikeuskustannukset on saatu suoraan muodossa (US\$/MWh).

Päästökaupakustannukset lasketaan seuraavasti:

$$\text{Päästökaupakustannukset} = \text{polttoainepäästöt (CO2t/MWh)} \times \text{päästöoikeuden hintaa (€/CO2t)}$$

Suomalaisilla laitoksilla on käytetty lämpöhyvityksen arvona 32 €/MWh<sub>lämpö</sub>. IEA:n (2010) raportista lämpöhyvitys suoraan muodossa €/MWh<sub>e</sub>, joka on laskettu arvolla 45 US\$/MWh<sub>lämpö</sub> eli 32 €/MWh<sub>lämpö</sub>. Kotimaisille CHP-laitoksille on käytetty todellisia sähkön- ja lämmöntuotantoa, ja koebiokaasulaitoksille ne on laskettu huipunkäyttöajan, hyötysuhteen ja tehon avulla.

Lämpöhyvitys lasketaan seuraavasti:

$$\text{Lämpöhyvitys (€/MWh)} = \frac{\text{lämpöhyvitys (€/MWh)} \times \text{lämmöntuotanto (MWh)}}{\text{sähköntuotanto (MWh)}}$$

Taulukko 5. CO<sub>2</sub>-päästöt polttoaineittain

<b>POLTTOAINE:</b>	<b>gCO<sub>2</sub>/MJ</b>	<b>tCO<sub>2</sub>/MWh</b>
TURVE	103	0.3708
KIVIHILI	95	0.342
MAAKAASU	55	0.198
ÖLJY	77	0.2772

## 4. Tulokset

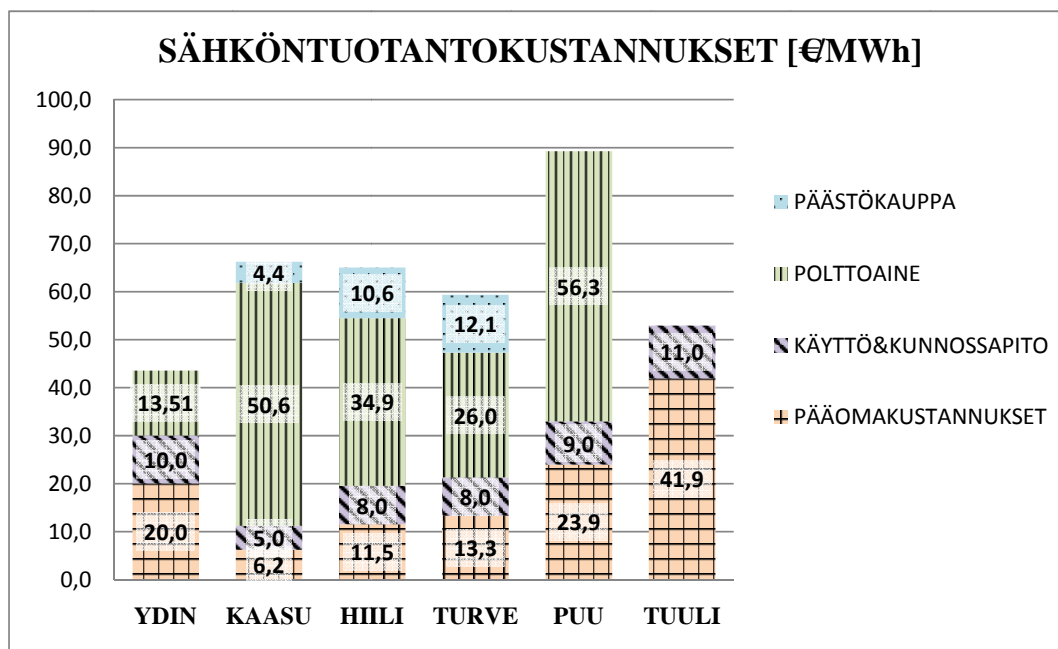
Tässä osiossa muodostetaan kustannuskomponenttitaulukot tuotantokustannuksille kappaleen 3 mukaisilla lasketantavoilla. Tulokset esitetään palkkikaavioissa ja tulokset on jaettu kolmeen osioon: tuotantokustannukset polttoaineittain Suomessa, suomalaiset CHP-voimalaitokset ja ulkomaalaiset lauhde- ja CHP-laitokset.

### 4.1 Tuotantokustannukset polttoaineittain Suomessa

Taulukossa 6. ja kuvassa 1. on esitetty sähköntuotantokustannukset polttoaineittain Suomessa. Edullisin tuotantomuoto on ydinvoima, jonka tuotantokustannukset ovat 43,5 €/MWh. Toiseksi pienimmät tuotantokustannukset ovat tuulisähköllä, 52,9 €/MWh. Hiili-, kaasun- ja turvevoiman sähköntuotantokustannukset ovat välillä 59,3 €/MWh–66,2 €/MWh. Kalleinta on puusähkö, joka on 89,3 €/MWh.

Taulukko 6. Sähköntuotantokustannukset polttoaineittain Suomessa (€/MWh)

KUSTANNUSKOMPONENNTTI	YDIN	KAASU	HIILI	TURVE	PUU	TUULI
PÄÄOMAKUSTANNUKSET	20,0	6,2	11,5	13,3	23,9	41,9
KÄYTTÖ & KUNNOSSAPITO	10,0	5,0	8,0	8,0	9,0	11,0
POLTTOAINE	13,51	50,6	34,9	26,0	56,3	-
PÄÄSTÖKAUPPA	-	4,4	10,6	12,1	-	-
<b>YHTEENSÄ €/MWh</b>	<b>43,5</b>	<b>66,2</b>	<b>65,0</b>	<b>59,3</b>	<b>89,3</b>	<b>52,9</b>



Kuva 1. Eri voimalaitostyyppien sähköntuotantokustannukset vuonna 2010 Suomessa

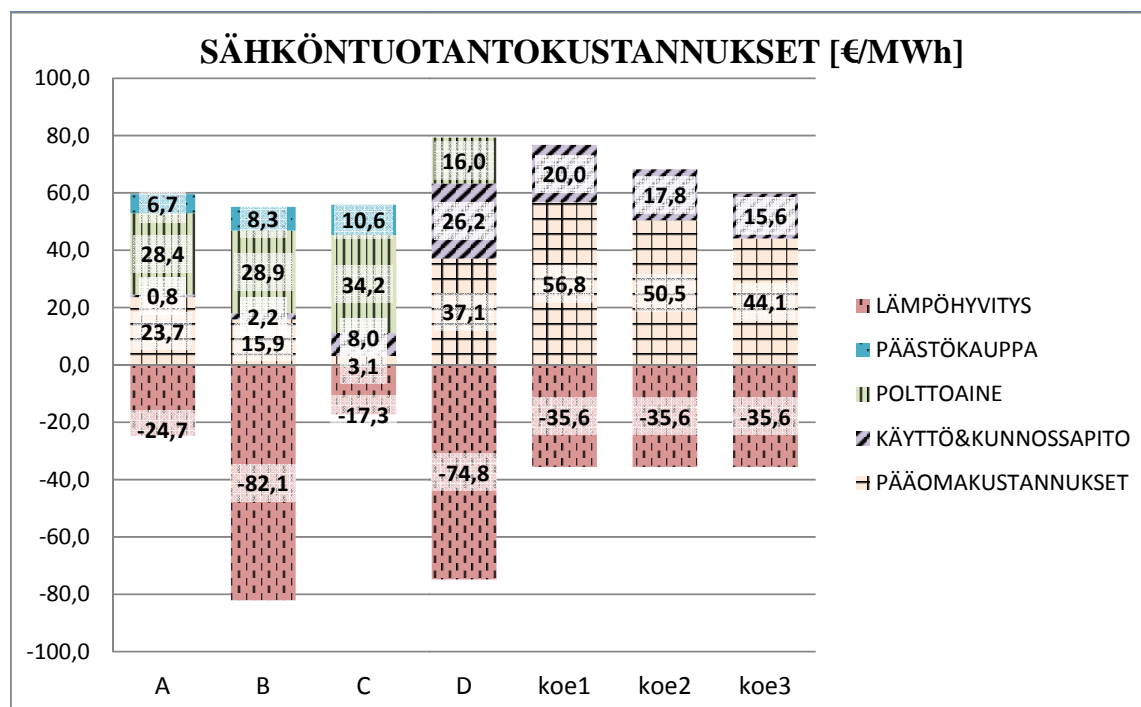
## 4.2 Sähkötuotantokustannukset kotimaisille CHP-laitoksille

Taulukossa 7. on esitetty sähkötuotannon kustannuskomponentit valituille kotimaisille CHP-laitoksille. Voimalaitos B:lla on todellisista CHP-laitoksista pienimmät sähkötuotantokustannukset -26,9 €/MWh suuren lämpöhyvityksen ansiosta. Myös voimalaitos D:llä on suuri lämpöhyvitys ja pieni sähkötuotantokustannus 4,5 €/MWh. Muiden voimalaitoksen tuotantokustannukset ovat välillä 35–38,6 €/MWh. CHP-biokaasulaitoksilla Koe 1–3 ovat tuotantokustannukset polttoaineteholtaan 0,6–0,3 MW:n CHP-biokaasulaitoksilla lähellä voimalaitosten A–C tasoa, mutta 9 MW:n CHP-biokaasulaitoksella ovat sähkötuotantokustannukset jo huomattavasti alemmat 24,1 MW. Sähkötuotantokustannuksiin ei ole kuitenkaan lisätty biokaasun polttoainehintaa, koska biokaasulaitokset on oletettu rakennettavan kaatopaikkojen yhteyteen.

**Taulukko 7. Sähkötuotannon kustannuskomponentit kotimaisille CHP-laitoksille**

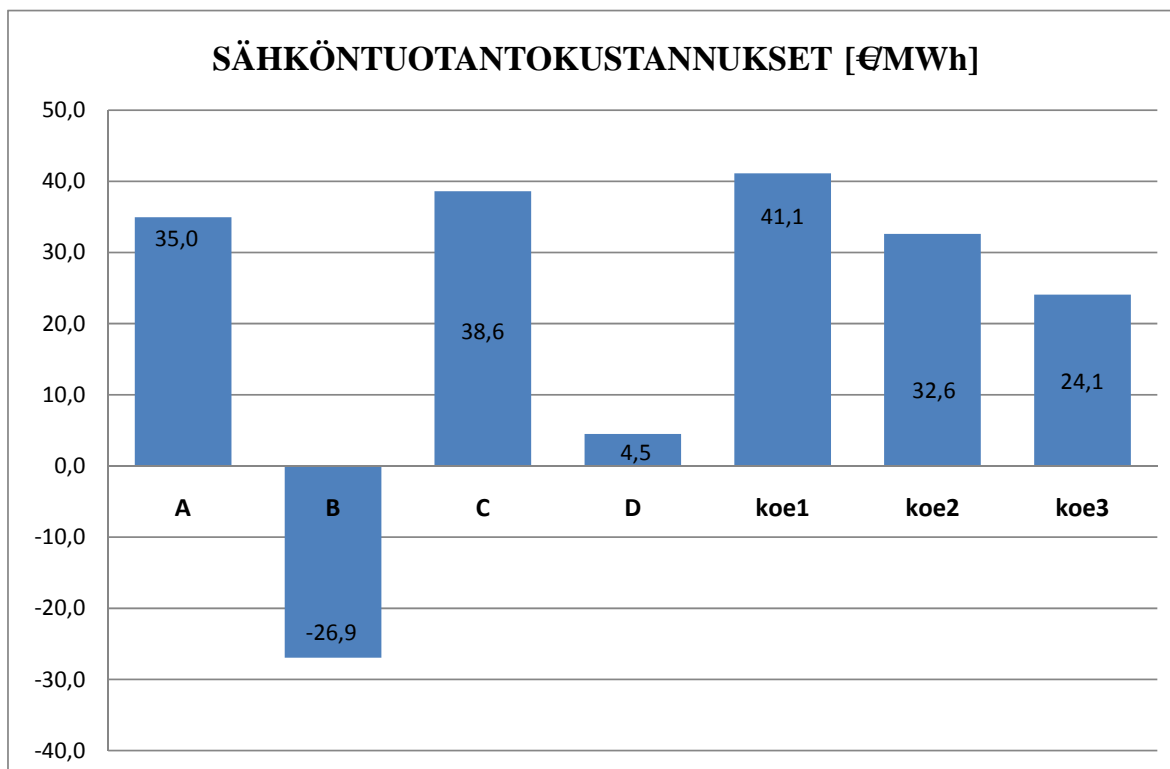
KUSTANNUSKOMPONENTTI	A	B	C	D	Koe 1	Koe 2	Koe 3
PÄÄOMAKUSTANNUKSET	23.7	15.9	3.1	37.1	56.8	50.5	44.1
KÄYTTÖ & KUNNOSSAPITO	0.8	2.2	8.0	26.2	20.0	17.8	15.6
POLTTOAINE	28.4	28.9	34.2	16.0	0.0	0.0	0.0
PÄÄSTÖKAUPPA	6.7	8.3	10.6	-	-	-	-
LÄMPÖHYVITYS	-24.7	-82.1	-17.3	-74.8	-35.6	-35.6	-35.6
<b>YHTEENSÄ €/MWh</b>	<b>35.0</b>	<b>-26.9</b>	<b>38.6</b>	<b>4.5</b>	<b>41.1</b>	<b>32.6</b>	<b>24.1</b>

Kuvassa 2. on esitetty sähkötuotantokustannukset komponenteittain ja kuvassa 3. on esitetty yhteenlaskettu tuotantokustannus.



Kuva 2. Sähkötuotantokustannuskomponentit kotimaisille CHP-laitoksille





**Kuva 3. Sähköntuotantokustannukset kotimaisille voimalaitoksille**

### 4.3 Sähköntuotantokustannukset ulkomaalaisille voimalaitoksille

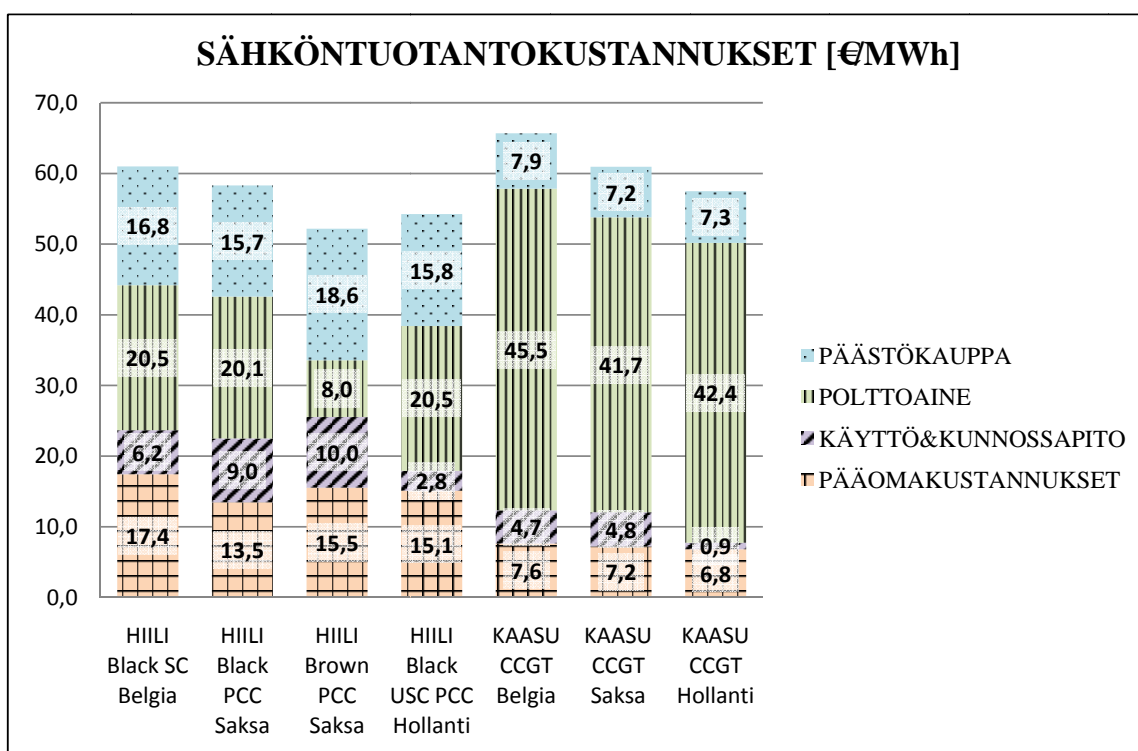
Tässä kappaleessa tarkastellaan ensimmäisessä osiossa sähköntuotantokustannuksia ulkomaisille lauhdevoimalaitoksille ja toisessa osiossa CHP-laitoksille.

#### 4.3.1 Ulkomaiset lauhdevoimalaitokset

Ulkomaisten lauhdevoimalaitosten sähköntuotantokustannukset ovat välillä 52,2–65,7 €/MWh. Pienimmät sähköntuotantokustannukset ovat saksalaisella ruskohiilenpölypolttolaitoksella 52,2 €/MWh, jolla on huomattavasti pienimmät polttoainekustannukset 8 €/MWh. Kalleinta sähköä tuottaa belgialainen maakaasukombilaitos, jonka sähköntuotantokustannukset ovat 65,7 €/MWh ja polttoainekustannukset 45,5 €/MWh. Sähköntuotantokustannukset on esitetty taulukossa 8 ja kuvassa 4 komponenteittain.

Taulukko 8. Sähkötuotantokustannukset eurooppalaisille lauhdevoimalaitoksille

MAA	Belgia	Saksa	Saksa	Hollanti	Belgia	Saksa	Hollanti
TEKNOLOGIA	HIILI Black SC	HIILI Black PCC	HIILI Brown PCC	HIILI Black USC PCC	KAASU CCGT	KAASU CCGT	KAASU CCGT
PÄÄOMA- KUSTANNUKSET	17.4	13.5	15.5	15.1	7.6	7.2	6.8
KÄYTTÖ & KUNNOSSAPITO	6.2	9.0	10.0	2.8	4.7	4.8	0.9
POLTTOAINE	20.5	20.1	8.0	20.5	45.5	41.7	42.4
PÄÄSTÖKAUPPA	16.8	15.7	18.6	15.8	7.9	7.2	7.3
<b>YHTEENSÄ €/MWh</b>	<b>61.0</b>	<b>58.3</b>	<b>52.2</b>	<b>54.2</b>	<b>65.7</b>	<b>61.0</b>	<b>57.5</b>



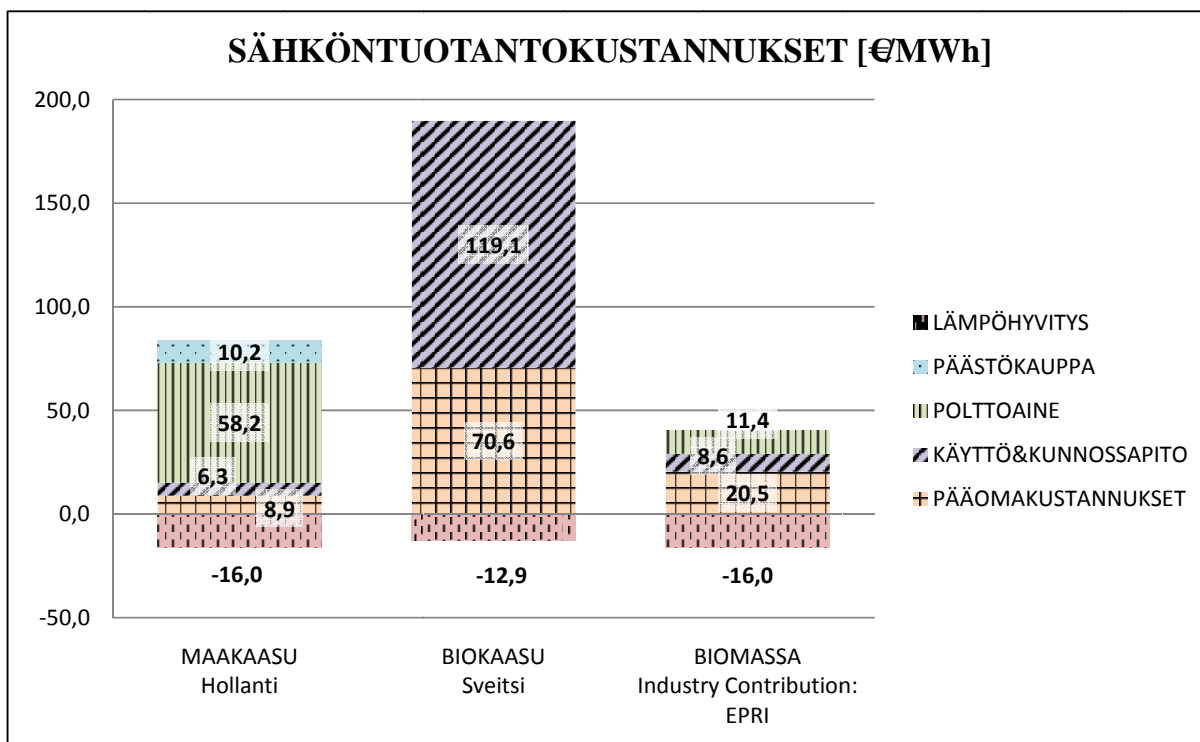
Kuva 4. Sähkötuotantokustannukset (€/MWh) ulkomaalaisille lauhdevoimalaitoksille

#### 4.3.2 Ulkomaiset CHP-laitokset

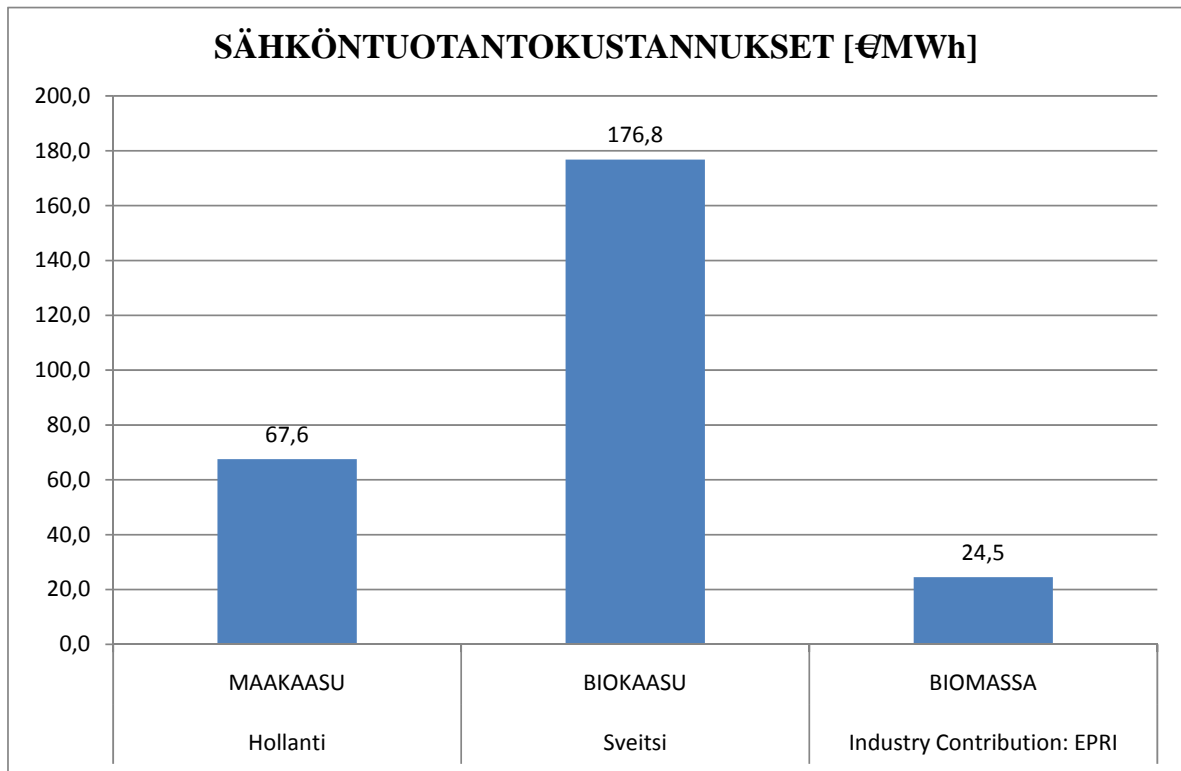
Ulkomaiset sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitosten sähköntuotantokustannukset ovat huomattavasti toisistaan poikkeavia. Suurimmat tuotantokustannukset ovat pienellä sveitsiläisellä sähköteholtaan 0,2 MW:n biokaasulaitoksella. Sen sähköntuotantokustannukset ovat 176,8 €/MWh. Tuotantokustannuksia nostaa suuri käyttö- ja kunnossapitokustannus 119,1 €/MWh ja pääomakustannus 70,6 €/MWh. Pienimmät tuotantokustannukset 24,5 €/MWh on sähköteholtaan 75 MW:n biomassaa käyttävällä CHP-laitoksella. Sähköntuotantokustannukset on esitetty komponenteittain taulukossa 9 ja kuvassa 5 sekä tuotantokustannukset yhteensä kuvassa 6.

Taulukko 9. Sähköntuotannon kustannuskomponentit ulkomaisille CHP-laitoksille

MAA	Hollanti	Sveitsi	Industry Contribution: EPRI
TEKNOLOGIA	MAAKAASU	BIOKAASU	BIOMASSA
PÄÄOMAKUSTANNUKSET	8.9	70.6	20.5
KÄYTTÖ & KUNNOSSAPITO	6.3	119.1	8.6
POLTTOAINE	58.2	0.0	11.4
PÄÄSTÖKAUPPA	10.2	0.0	0.0
LÄMPÖHYVITYS	-16.0	-12.9	-16.0
YHTEENSÄ €/MWh	67.6	176.8	24.5



Kuva 5. Sähköntuotantokustannukset komponenteittain ulkomaisille CHP-laitoksille



**Kuva 6. Sähköntuotantokustannukset ulkomaisille CHP-laitoksille**

## 5. Johtopäätökset

Ydin-, puu- ja tuulivoimalla eniten kustannuksia nostavat pääomakustannukset, jotka ovat pienimmät kaasulaitoksilla. Myös käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat pienimmät kaasulaitoksilla (noin puolet muiden laitosten operointikustannuksista). Kalleimmat polttoainekustannukset ovat kaasulaitoksilla ja pienimmät ydinvoimalla. Päästökaupan osuus hiilivoiman tuotantokustannuksista on noin 20 % ja maakaasulaitoksilla noin 7 % tuotantokustannuksista. Yleisesti sähköntuotantokustannuksiin eniten vaikuttavat kustannuskomponentit kaikilla tuotantomuodoilla ovat pääoma- ja polttoainekustannukset.

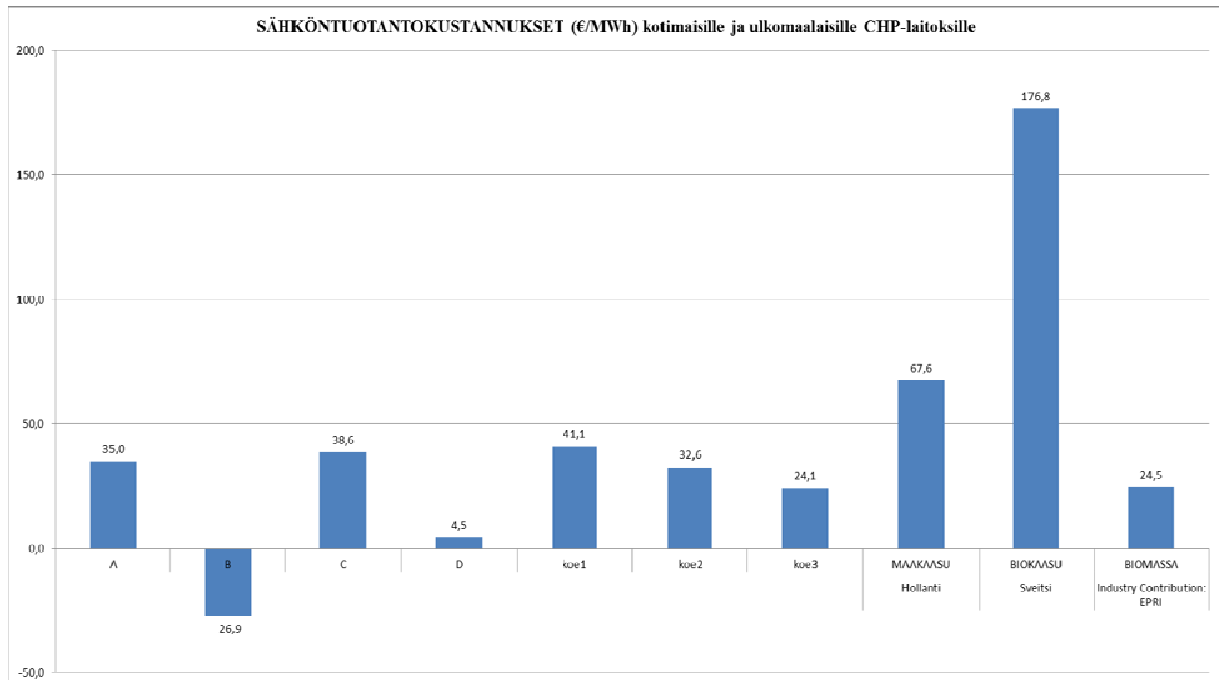
Pienimmät sähköntuotantokustannukset Suomessa ovat ydinvoimalla 43,5 €/MWh. Vuonna 2008 ydinvoiman polttoainekustannukset olivat Tarjanne (2008) raportin mukaan 35 €/MWh [4, s.9]. Vuonna 2010 ydinvoiman kustannukset ovat aikaisempaa korkeammat kalliimman polttoaineen vuoksi. Toiseksi edullisinta on sähköä tuottaa tuulivoimalla, jonka tuotantokustannukset ovat 52,9 €/MWh. Hiili-, kaasu- ja turvevoiman sähköntuotantokustannukset ovat välillä 59,3 €/MWh–66,2 €/MWh. Puulauhdelaiteilla sähköntuotantokustannukset ovat lähes 90 €/MWh, eikä puuta käytetä polttoaineena lauhdesähkön tuotannossa Suomessa. Suomalaisten CHP-laitosten sähköntuotantokustannukset ovat välillä -26,9 €/MWh–41,1 €/MWh, ja niihin vaikuttaa huomattavasti vuosittaisen lämmöntuotannon suuruus. CHP-laitoksia ei voi verrata lauhdelaitosten kannattavuuteen, koska pitäisi ottaa huomioon myös sähkön markkinahinta ja sähkönmyynnistä saatu tuotto. Kotimaisilla CHP-laitoksilla suurimmat kustannuskomponentit ovat pääomakustannukset ja polttoainekustannukset. Poikkeuksena on laitos C, jonka pääomakustannukset 3,1 €/MWh ovat poikkeuksellisen pienet. Lisäksi kiinteää paalattua jätettä käyttävällä voimalaitos D:llä on huomattavan suuret käyttö- ja kunnossapitokustannukset 26,2 €/MWh. Kuvitteellisilla CHP-biokaasukoelaitoksilla sähköntuotantokustannukset vaihtelevat pienimmästä suurimpaan välillä 24,1–41,1 €/MWh. Biokaasulaitosten sähköntuotantokustannuksia nostavat eniten pääomakustannukset, jotka ovat noin 70 % tuotantokustannuksista. Loput tuotantokustannuksista tulevat käyttö- ja kunnossapitokustannuksista.

IEA:n (2010) raportin sähköntuotantokustannukset ovat hiililaitoksilla 52,2–61 €/MWh [4], jotka ovat melko lähellä hiililaitoksen sähköntuotantokustannuksia 65,0 €/MWh. IEA:n raportin kaasukombilaitoksen sähköntuotantokustannukset ovat välillä 57,5 €/MWh–65,7 €/MWh, jotka ovat myös lähellä suomalaisen kaasukombilaitoksen sähköntuotantokustannuksia 66,2 €/MWh. IEA:n raportin laiteilla on suuremmat päästökustannukset ja pääomakustannukset, mutta pienemmät polttoainekustannukset kuin suomalaisella vuoden 2010 hintatiedoilla toteutetulla kuvitteellisella hiililaitoksella. IEA:n raportin CHP-laitosten sähköntuotantokustannukset ovat välillä 24,5–176,8 €/MWh. Niiden lämpöhyvitykset ovat välillä 12,9–16 €/MWh, kun suomalaisilla CHP-laitoksilla ne ovat huomattavasti suuremmat 24,7–82,1 €/MWh. Suomessa lämmitystarve on suurempi kuin esim. Hollannissa tai Sveitsissä ja se nostattaa lämpöhyvityksen määrää huomattavasti. Lisäksi Suomi on huippuosaaja sähkön- ja lämmön yhteistuotannossa, eikä yhteistuotanto ja kaukolämmitys-järjestelmät ole Keski-Euroopassa vielä kovin tunnettuja tapoja tuottaa energia. Sveitsiläisen biokaasulla toimiva CHP-laitos on tuotantokustannuksiltaan tutkimuksen kallein sähkön tuottaja. Se on sähköteholtaan 70 kW koelaitosta 1 pienempi, ja sen pääomakustannukset ovat 14 €/MWh suuremmat sekä käyttö- ja kunnossapitokustannukset 100 €/MWh koelaitoksen 1 operointikustannuksia suuremmat. Sveitsiläisen biokaasulaitoksen operointikustannuksiin ovat vaikuttaneet

todennäköisesti suuret polttoaineen keruun ja kuljetukseen liittyvät kustannukset, jotka on sisälletty käyttö- ja kunnossapitokustannuksiin.

## LIITTEET

### Liite 1 Kotimaiset ja ulkomaalaiset CHP-laitokset (1/1)



## LÄHTEET

1. Tarjanne, R., Kivistö, A. ”Sähkön tuotantokustannusvertailu”  
Lappeenrannan teknillinen yliopisto. ISBN 978-952-214-544-4.  
Lappeenranta 2008.
2. International Energy Agency. “Projected Costs of Generating  
Electricity: 2010 Edition.” ISBN 978-92-64-08430-8. 2010.
3. Tilastokeskus. Maakaasun hinta kuluttajatyypeittäin (Excel). 2010.  
Saatavissa:  
[https://www.tilastokeskus.fi/til/ehkh/2009/04/ehkh\\_2009\\_04\\_2010-03-24\\_tau\\_007.xls](https://www.tilastokeskus.fi/til/ehkh/2009/04/ehkh_2009_04_2010-03-24_tau_007.xls) [Viitattu: 12.11.2010]
4. Tilastokeskus. Kivihiilen, maakaasun ja kotimaisten polttoaineiden  
käyttäjähinnat lämmöntuotannossa (Excel).2010.  
[http://www.stat.fi/til/ehkh/2010/01/ehkh\\_2010\\_01\\_2010-06-23\\_tau\\_006.xls](http://www.stat.fi/til/ehkh/2010/01/ehkh_2010_01_2010-06-23_tau_006.xls) [Viitattu: 12.11.2010]
5. Turku Energia. Energiamarkkinakatsaus syys-lokakuu 2010.  
<http://www.turkuenergia.fi/index.php?page=84eaf25b74e491f9d29b266594943cc> [Viitattu 16.11.2010]
6. EPRI. Electric Power Research Institute. “About EPRI” .  
[http://my.epri.com/portal/server.pt?open=512&objID=200&mode=2&in\\_hi\\_userid=228202&cached=true](http://my.epri.com/portal/server.pt?open=512&objID=200&mode=2&in_hi_userid=228202&cached=true) [Viitattu 2.12.2010]
7. Point Carbon. ”Point Carbons OTC price assessments”  
[www.pointcarbon.com](http://www.pointcarbon.com) [Viitattu 9.12.2010]
8. Jaakko Antila. 27.10.2010, 08:54. Sähköpostiviesti "RE: RE:  
Sähköntuotantokustannus biokaasu-CHP-laitokselle".  
Harjoitustyöntekijän <tuukka.vainio@tkk.fi> hallussa.

ISBN: 978-952-60-4135-3 (pdf)  
ISSN-L: 1799-487X  
ISSN: 1799-4888 (pdf)

**Aalto-yliopisto**  
**Insinöörityöiden korkeakoulu**  
**Energiatekniikan laitos**  
[www.aalto.fi](http://www.aalto.fi)

**KAUPPA +  
TALOUS**

**TAIDE +  
MUOTOILU +  
ARKKITEHTUURI**

**TIEDE +  
TEKNOLOGIA**

**CROSSOVER**

**VÄITÖSKIRJAT**