

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

SÄHKÖN TUOTANTO JA SEN KUSTANNUKSET SUOMESSA

ELECTRICITY PRODUCTION AND ITS COST IN FINLAND

Työn tarkastaja: Aija Kivistö

Työn ohjaaja: Aija Kivistö

Lappeenranta 16.04.2015

Sami Partanen

TIIVISTELMÄ

Sami Partanen

Sähkön tuotanto ja sen kustannukset Suomessa

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2015

39 sivua, 17 kuvaa, ja 1 liite

Hakusanat: sähköntuotanto, kustannukset

Työssä perehdytään sähkön tuotantoon Suomessa. Tarkastelun kohteena on Suomen sähköntuotanto vuonna 2013. Sähköä tuotetaan Suomessa monipuolisesti eri energianlähteillä. Tärkeimmät energianlähteet sähköntuotannon kannalta ovat uusiutuvista energianlähteistä vesi- ja tuulivoima. Lisäksi sähköä tuotetaan bioperäisillä polttoaineilla sekä turpeella. Fossiilisista polttoaineista käytetyimmät on kivihili ja maakaasu. Suomen suurin yksittäinen sähköntuotantomuoto on ydinvoima.

Työn laskennallisessa osassa selvitetään sähkön tuotantokustannukset eri tuotantomuodoille. Merkittävimmät kustannukset sähkön tuotannossa syntyvät voimalaitoksen investointi- ja polttoainekustannuksista. Muita kustannuksia ovat muun muassa kiinteät- sekä muuttuvat käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Tarkasteltavat tuotantomuodot ovat ydinvoimalaitos, tuulivoimalapuisto, kivihilivoimala, kaasukombivoimalaitos, biomassavoimala ja turvevoimalaitos. Polttoainekustannuksien laskennassa käytetään vuoden 2014 hintatasoa.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|-----------|
| Tiivistelmä | 2 |
| Sisällysluettelo | 3 |
| Symboli- ja lyhenneluettelo | 4 |
| 1 Johdanto | 5 |
| 2 Sähkön tuotanto | 6 |
| 3 Tuotannon energianlähteet | 8 |
| 3.1 Uusiutuvat | 8 |
| 3.1.1 Aurinkoenergia..... | 8 |
| 3.1.2 Bioenergia | 9 |
| 3.1.3 Tuulivoima | 9 |
| 3.1.4 Vesivoima | 10 |
| 3.2 Fossiiliset polttoaineet | 10 |
| 3.2.1 Kivihiili | 10 |
| 3.2.2 Maakaasu | 11 |
| 3.2.3 Öljy..... | 12 |
| 3.3 Turve | 14 |
| 3.4 Polttoaineiden hinnat | 15 |
| 4 Kustannusten laskentamenetelmä | 16 |
| 4.1 Kustannuskarakteristikat | 16 |
| 4.1.1 Kiinteät kustannukset | 16 |
| 4.1.2 Muuttuvat kustannukset | 17 |
| 4.1.3 Kustannussuorat | 18 |
| 4.2 Omakustannushinta ja kustannusten jakaantuminen | 18 |
| 5 Sähkön tuotannon kustannukset | 19 |
| 5.1 Vesivoimala..... | 19 |
| 5.2 Ydinvoimalaitos | 20 |
| 5.3 Tuulivoimalapuisto..... | 22 |
| 5.4 Kaasukombilaitos | 24 |
| 5.5 Hiilivoimalaitos | 25 |
| 5.6 Biomassa CHP-voimala | 27 |
| 5.7 Turvevoimala..... | 28 |
| 6 Tulosten tarkastelu | 31 |
| 7 Yhteenveto | 33 |
| Lähdeluettelo | 35 |

LIITTEET

Liite 1: Sähköenergian tuotantokustannus kuvaajat

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | | |
|------------|---|------------------------|
| c_{ni} | annuiteetti | |
| h_{muut} | muut muuttuvat kustannukset | [€/MWh] |
| h_{pa} | polttoaineen hinta | [€/MWh _{pa}] |
| i | laskentakorko | [%] |
| I | investointi | [€] |
| k | kustannukset | [€/kW,a] |
| KK | kiinteät käyttö ja kunnossapitokustannukset | [€/kW] |
| n | vuosien lukumäärä | |
| P | laitosteho | [kW] |
| t_h | huipunkäyttöaika | [h/a] |

Kreikkalaiset

| | | |
|--------|------------|-----|
| η | hyötysuhde | [%] |
|--------|------------|-----|

Alaindeksit

| | | |
|--------|----------------|----------|
| k | kiinteät | [€/kW,a] |
| m | muuttuvat | [€/kWh] |
| pa | polttoaine | |
| $muut$ | muut muuttuvat | |

Lyhenteet

CHP Combined Heat and Power, Sähkön ja lämmön yhteistuotanto

ETSAP Energy Technology Systems Analysis Programme

IEA Energy Information Administration

1 JOHDANTO

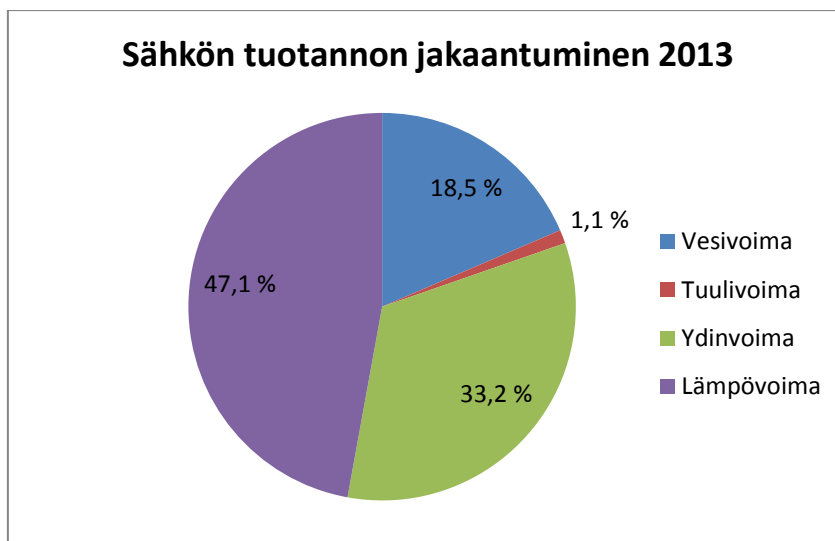
Suomen sähköntuotanto koostuu pääasiassa ydin-, lämpö-, vesi-, ja tuulivoimalla tuotetusta sähköstä. Lämpövoimatuotanto koostuu sähkön ja lämmön yhteistuotannosta ja sähkön erillistuotannosta. Tuulivoiman osuus Suomen sähköntuotannosta on vielä vähäistä, mutta osuus kasvaa vuosi vuodelta. Sähköä tuotetaan Suomen noin 400 voimalaitoksessa, jotka käyttävät energianlähteenään erityyppisiä polttoaineita (Energiateollisuus 2015). Työssä käsitellään uusiutuvista energianlähteistä aurinko- ja bioenergiaa sekä tuuli- ja vesivoimaa. Fossiilisista energianlähteistä sähköntuotannossa tärkeimmät ovat kivihiihi ja maakaasu. Myös turvetta käytetään sähköntuotannon polttoaineena yhdessä biomassan kanssa. Sähkön tuotanto jakaantuu eri tuotantomuotoihin, joissa tuotetaan sähköä perustuotantona ja säätövoimana.

EU:n asettamat tavoitteet uusiutuvan energian käytön lisäämiseksi sähköntuotannossa vaikuttavat fossiililla polttoaineilla tuotetun sähkön markkina-asemaan. Sähkön alhainen markkinahinta yhdessä uusiutuvien energiamuotojen tukitoimien kanssa vaikeuttavat sähkön tuotannon kannattavuutta. Sähköntuotannon kustannukset vaikuttavat tuotannon ja investoinnin kannattavuuteen. Tuotantokustannuksien vertailulla selvitetään edullisimmat sähköntuotantomuodot. Lisäksi saadaan käsitys eri energianlähteitä käyttävien sähköntuotantomuotojen kustannusrakenteesta.

Työn tavoitteena on kartoittaa vuoden 2013 sähkön tuotannon jakautumista Suomessa eri tuotantomuotojen välillä. Lisäksi tässä työssä tarkastellaan uusiutuvista energiantuotantomuodoista vesi- ja tuulivoimalla sekä CHP-laitoksessa biomassalla ja turpeella tuotetun sähkön kustannuksia. Vastaavasti fossiilisia polttoaineita käyttävät maakaasu- ja kivihiihivoimalaitos ovat tutkimustyön kohteena. Tavoitteena on selvittää eri voimalaitoksien sähköntuotannon kustannukset sekä kustannusrakenne ja tutkia huipunkäyttäjän vaikutusta sähköntuotannon kustannuksiin vuoden 2014 polttoaineiden hintatasolla.

2 SÄHKÖN TUOTANTO

Sähkön kokonaistuotanto Suomessa vuonna 2013 oli 71,2 TWh, josta noin 4 % kului voimalaitoksien omakäyttöön. (Energieollisuus 2015). Suomessa sähkön tuotanto jakaantuu noin 120 yritykselle, joiden yhteenlaskettu voimalakapasiteetti on 400 voimalaitosta. Tästä vesivoimalaitoksia on yli puolet. Sähkötuoantolaitoksien yhteenlasketuksi vuosituotannoksi saadaan 68,3 TWh (Suomen virallinen tilasto 2013). Sähkön tuotanto Suomessa jakaantuu monipuolisesti eri energianlähteiden ja tuotantomuotojen välille. Energianlähteistä tärkeimpiä ovat ydin- ja vesivoima, kivihiihi ja maakaasu, sekä bioperäiset polttoaineet kuten puu ja turve. Tuulivoiman osuus sähköntuotannossa lisääntyy vuosi vuodelta. Suomi kuuluu pohjoismaisiin sähkömarkkinoihin, ja sähkön vuosituotanto vaihtelee pohjoismaista saatavilla olevan sähkön mukaan. Erityisesti fossiilisilla polttoaineilla, kuten kivihieillää tuotettua sähköä pyritään korvaamaan Suomen naapurimaista saatavalla vesivoimalla.



Kuva 1. Sähkön tuotanto vuonna 2013 (Energieollisuus 2015)

Lämpövoimatuotannosta suurin osa on sähkön ja lämmön yhteistuotantoa, joka saadaan kaukolämmöstä ja teollisuudesta. Loput ovat sähkön erillistuotantoa, joka tuotetaan esimerkiksi lauhdevoimalaitoksilla ja huippukaasuturbiineilla (Tilastokeskus 2015). Suurin yksittäinen sähköntuotannon muoto on ydinvoima, jolla tuotettiin noin kolmannes Suomen vuoden 2013 sähköstä.

Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa samasta prosessissa saadaan sähköä sekä lämpöä. Sähkö tuotetaan esimerkiksi kaasu- tai höyryturbiineilla tai moottorikäyttöisillä tuotantokoneistoilla, joista saadaan lämpöä teollisuuden prosesseihin sekä kaukolämpöön. Yhteistuotannossa käytetyt polttoaineet saadaan hyödynnettyä tehokkaammin, jonka vuoksi saavutetaan erillistuotantoa korkeammat hyötysuhteet sähkön ja lämmöntuotannossa. (Tilastokeskus 2015)

Suomessa sähkön ja lämmön yhteistuotannolla on merkittävä osuus energian tuotannossa, sillä lähes 80 % kaukolämmöstä saadaan yhteistuotannon avulla. Samalla saadaan kolmannes Suomen vuotuisesta sähkön tuotannosta. Esimerkkinä EU:n alueella sähkön ja lämmön yhteistuotannon osuus koko sähköntuotannosta on vain reilu kymmenen prosenttia. (Energiateollisuus 2015) Yhteistuotannon uskotaan olevan merkittävässä osassa pyrkimyksissä vähentää tuotannosta aiheutuvia kasvihuonekaasujen syntymistä. Tästä johtuen voidaan olettaa sähkö ja lämmön yhteistuotannon kasvattavan osuuttaan energiantuotannossa tulevaisuudessa.

3 TUOTANNON ENERGIANLÄHTEET

Suomessa on noin 400 voimalaitosta, joissa tuotetaan sähköä. (Energiateollisuus 2015) Voimalaitoksissa polttoaineina käytetään erilaisia energianlähteitä, jotka pyritään hyödyntämään tuotannossa mahdollisimman tehokkaasti. Sähköntuotannossa merkittävimmät energianlähteet ovat ydinvoima, vesivoima, biomassa, kivihiili, maakaasu ja turve.

3.1 Uusiutuvat

Suomi on edelläkävijä uusiutuvien energianlähteiden hyödyntämisessä teollisuuden polttoaineena. Uusiutuvat energiamuodot kattavat neljänneksen Suomen energiankulutuksesta ja yli neljänneksen sähköntuotannosta. Bioenergia ja eritoten puu- ja puupohjaiset polttoaineet ovat tärkeimpiä uusiutuvia energianlähteitä. Suomessa käytetään myös vesi- ja tuulivoimaa, sekä jonkin verran aurinkoenergiaa. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2013)

Uusiutuvien polttoaineiden käyttäminen energiateollisuuden energianlähteinä vaihtelee vuotuisesti. Suurin syy on vesivoiman suuri osuus kokonaistuotannosta, joka on yli puolet uusiutuvien energianlähteiden sähköntuotosta. Vesivoiman osuuteen vaikuttaa merkittävästi pohjoismaiset energiamarkkinat, erityisesti Norjasta ja Ruotsista tuleva tarjonta. (Energiateollisuus 2015) Vuonna 2013 Suomessa tuotetusta sähköstä 36 prosenttia saatiin uusiutuvilla energianlähteillä (Tilastokeskus 2013).

3.1.1 Aurinkoenergia

Suomen sääoloissa on mahdollista hyödyntää auringon energiaa niin että se on taloudellisesti kannattavaa (Sähköala 2015). Auringon energian käyttöä Suomessa rajoittaa kuitenkin pohjoinen maantieteellinen sijainti, jonka vuoksi talvikuukausina auringon energiaa ei saada otettua merkittävästi talteen. Etelä-Suomessa ovat parhaat olosuhteet aurinko energian tuotannon kannalta. (Motiva 2015) Aurinkosähkön tuotanto vuonna 2013 oli niin vähäistä, ettei siitä ole merkintää vielä vuoden 2013 tilastoissa (Tilastokeskus 2013).

Aurinkoenergiaa on Suomessa mahdollista hyödyntää pienimuotoisessa sähköntuotannossa. Sähkö tuotetaan aurinkopaneeleilla, jotka voivat muuttaa auringon

säteilystä 15 prosenttia sähköksi. Aurinkosähkö soveltuu parhaiten osaksi kotitalouksien sähköjärjestelmää, jossa auringosta saatavalla sähköllä voidaan kattaa päivittäinen sähkön tarve, kuten käyttöveden lämmitys (Aurinkovoima 2015). Tuotantoa syntyy kuitenkin vain auringon paistaessa, joten yöllä ja talvella on turvauduttava sähköverkosta saatavaan sähköön (Motiva 2015).

3.1.2 Bioenergia

Bioenergialla on suuri rooli energiantuotannossa Suomessa. Bioenergiaksi lasketaan puuperäiset polttoaineet, peltobiomassa, biokaasu sekä jätteistä saatava biomassa. Bioenergiaa käytetään Suomessa erityisen paljon sähkön- ja lämmöntuotannon polttoaineena. Vuonna 2013 metsäteollisuuden jäteliemillä yhdessä muiden puupolttoaineiden kanssa tuotettiin 16 prosenttia Suomen sähköstä. (Energiateollisuus 2015)

3.1.3 Tuulivoima

Tuulivoima on uusiutuvaa energiaa, joka saadaan kun ilman virtauksen liike-energia muutetaan tuuliturbiineilla sähköksi. Tuotettaessa energiaa tuulivoimalla, ei synny päästöjä ilmaan, maahan eikä veteen. Tuulienergiatuotanto on hyvin riippuvainen sääolosuhteista ja talvet ovat tuulisuutensa vuoksi tehokasta aikaa tuotannon kannalta. Tuulivoimala tarvitsee toimiakseen 3,5 m/s tuulen, mutta nopeus saa enintään olla 25 m/s, jotta laitteet eivät kärsi vaurioita. Tuulen nopeuden kasvaessa myös voimalan teho kasvaa. (Tuulivoimayhdistys 2015)

Suomessa tuulivoimatuotanto on vielä suhteellisen vähäistä ja vuoden 2014 sähköntuotannosta vain 1,3 prosenttia oli tuulivoimalla tuotettua. Tuulivoimaloiden määrä on kuitenkin kasvaa vuosi vuodelta, sillä tuotantoa tuetaan muiden uusiutuvien energiantuotantomuotojen tavoin. Vuonna 2014 Suomessa on 260 tuulivoimalaa, joiden laitoskoko vaihtelee 2 - 5 MW. Voimaloiden yhteenlaskettu kapasiteetti on 627 MW. Teollisen tuulivoimalatuotannon lisäksi Suomessa on jonkin verran myös pientuulivoimala toimintaa. Pientuulivoimaloiksi määritellään voimalat, joiden potkurin pinta-ala on alle 200 m². Tämän tyyppisillä voimaloilla saavutetaan alle 50 kW nimellisteho. (Tuulivoimayhdistys 2015)

3.1.4 Vesivoima

Vesivoima on uusiutuva energiantuotantomuoto ja sillä merkittävä rooli sähkön tuotannossa hyvien säätöominaisuuksien ansiosta. Vettä on helppo varastoida suuriin altaisiin, ja tuotantoa on nopea käynnistää sähkön kulutushuippujen aikaan. Vuotuisesti tuotanto vaihtelee myös riippuen sääoloista, ja vähäsateisina aikoina vesivarastoja on vaikea ylläpitää. Vesivoimalan toiminta ei aiheuta päästöjä ympäristöön, mutta vesialtaiden yhteyteen rakennettavat padot sen sijaan muuttavat alueen ekosysteemiä.

Vesivoimaloiden energiantuotanto perustuu vesimassojen korkeuseroon. Virtaava vesi kuljee turbiinien kautta pyörittäen generaattoria, jonka avulla veden energia saadaan muunnettua sähköksi. Suomessa vesivoiman osuus kokonaistuotannosta vaihtelee vuotuisen energiantuotanto tarpeen mukaan. Vuonna 2013 vesivoimatuotanto kattoi 15,2 prosenttia sähkön kulutuksessa Suomessa. Lähes kaikki taloudellisesti kannattava vesivoimalakapasiteetti on Suomessa jo käytössä. Vesivoimalat voidaan jakaa nimellistehonsa mukaan kolmeen eri luokkaan. Suurvesivoimaloihin kuuluvat yli 10 MW nimellistehon omaavat laitokset. Pienvesivoimalat ovat kooltaan 1 – 10 MW ja minivesivoimalat alle 1 MW tehoisia. Suomen yli 220 vesivoimalaa muodostavat kokonaiskapasiteetiksi noin 3190 MW. (Energiategollisuus 2015)

3.2 Fossiiliset polttoaineet

Fossiileiden polttoaineiden osuus Suomen sähköntuotannon käytettyinä energianlähteinä oli noin 26 prosenttia vuonna 2013. Kivihiili oli käytetyin sähköntuotannon fossiilinen polttoaine yhdessä maakaasun kanssa. (Tilastokeskus 2013) Fossiilisten polttoaineiden haittapuolena ovat niitä poltettaessa syntyvät savukaasut, jotka sisältävät muun muassa hiili- ja rikkidioksidia, typen oksideja sekä hiukkaspäästöjä. NykYTEKNIKAN avulla päästöjä pystytään hallitsemaan ja vähentämään tehokkaasti. (Energiamaailma 2014)

3.2.1 Kivihiili

Kivihiili on maailman käytetyin sähköntuotannon polttoaine ja Suomessakin monien energiantuotantolaitoksien pää- tai lisäpolttoaine. Kivihiiltä käytetään polttoaineena

lauhdevoimalaitoksissa, joissa tuotetaan sähköä. Vuonna 2013 Suomessa tuotetusta sähköstä, kivihiilen osuus käytettynä energianlähteenä oli 15,2 prosenttia. (Tilastokeskus 2013) Myös yhteistuotantolaitoksissa kivihiili on yleinen energianlähde, josta saadaan sähköä ja kaukolämpöä. Lauhdevoimalaitoksissa kivihiilen osuus käytettynä tuotannon polttoaineena on noin 60 - 70 prosenttia ja yhteistuotannossa vastaava osuus 30 prosenttia. (Hiilitieto 2015)

Kivihiilen käyttö energianlähteenä on kausittaista. Tuotannon tarpeeseen vaikuttavat pohjoismaiset sähkömarkkinat ja edullisen sähkön saatavuustilanne. Hyvinä tuuli- ja vesivoima tuotannon vuosina kivihiilen käyttöä voidaan vähentää merkittävästi. Kivihiili on polttoaineena helposti varastoitavaa ja sitä on saatavilla monista eri maista. Tämän vuoksi kivihiili on hyvä energianlähde poikkeustilanteiden varalle ja tärkeä osa Suomen energiahuoltovarmuutta. Suomeen kivihiiltä tuodaan pääasiassa Venäjältä ja Puolasta. (Energiateollisuus 2015)

3.2.2 Maakaasu

Maakaasun käyttö energiantuotannon polttoaineena edellyttää maakaasuverkostoa. Suomessa maakaasun käyttömahdollisuudet rajoittuvat maan kaakkois- ja etelä osiin, joissa on toimiva maakaasuputkiverkosto. Suomessa maakaasuverkosta vastaa Gasum Oy, jolla on suunnitelmia verkoston laajentamiseksi myös Länsi-Suomeen. Kuvassa 2 maakaasun siirtoputkisto vuonna 2013. Maakaasuputkiverkoston kasvattamisella pyritään korvaamaan kivihiilen käyttöä energiantuotannossa, erityisesti kaukolämmityksessä. Maakaasua on mahdollista siirtää myös nestemäisessä olomuodossa laivojen avulla, mutta tätä menetelmää ei ole vielä Suomessa kokeiltu. Maakaasun käyttöalueella sen osuus käytettynä lämmön -ja sähköntuotannon polttoaineena on noin 30 prosenttia. Erityisesti kaukolämmön ja sähkön yhteistuotannossa maakaasun käyttö energianlähteenä on huomattavaa. (Energiateollisuus 2015)

Maakaasun siirtoputkisto 2013



Kuva 2. Suomen kaasuverkosto (Suomen Kaasuyhdistys 2014)

Maakaasun vahvuudet energiantuotannon polttoaineena ovat vähäpäästöisyys, helppo jalosteisuus ja korkea lämpöarvo (50 MJ/kg) verrattuna esimerkiksi kivihiiileen (24 MJ/kg). Maakaasua on monikäyttöinen polttoaine, jota käytetään voimalaitoksien energianlähteenä. Suomella ei ole omia kaasuvaroja ja kaikki kaasu hankitaan Venäjältä, jolla on maailman suurimmat kaasuvarat. (Energiateollisuus 2015)

Suomessa maakaasun käyttö energiantuotannossa jakaantuu teollisuuden ja energialaitosten välille. Teollisuuden osuus on noin 48,1 prosenttia, joista suurimman osan 24,5 prosenttia kuluttaa kemianteollisuus energianlähteenään. Teollisuudenaloista metsäteollisuus on toiseksi suurin maakaasun käyttäjäryhmä 21,0 prosentin osuudellaan. Muiden teollisuusalojen osuudet ovat muutamia prosenteja kokonaiskäytöstä. Energialaitoksien maakaasun käyttö keskittyy yhdistettyyn lämmön- ja sähköntuotantoon (CHP), jonka osuus on 36,8 %. (Suomen kaasuyhdistys 2014) Höyry- sekä kaasuturbiinilla varustetut kombivoimalaitokset pystyvät hyödyntämään maakaasua tehokkaimmin. Tämän tyyppisissä laitoksissa voidaan sähköä tuottaa huomattavasti muita voimalaitostyyppisiä enemmän.

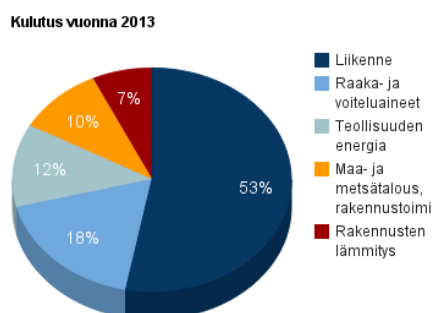
3.2.3 Öljy

Suomessa energiankulutus jakaantuu useiden energianlähteiden välille. Öljyn osuus vuoden 2013 energian kokonaiskulutuksesta Suomessa oli noin neljännes, 23 prosenttia.

Öljy on toiseksi käytetyin energianlähde heti puupolttoaineiden jälkeen. Suomen energiajärjestelmä on hajautettu eri polttoaineiden välille, jonka vuoksi Suomen riippuvuus öljystä energianlähteenä on muihin teollisuusmaihin verrattuna vähäistä. (Öljy ja bio polttoaineala 2015)

Suomella ei ole omia öljyvaroja, joten Suomi on riippuvainen kansainvälisistä öljymarkkinoista hinnan ja toimitusvarmuuden osalta. Suomeen tuodun raakaöljyn alkuperä vaihtelee, mutta suurin osa tuodaan säiliöaluksilla Venäjältä. Raskasta polttoöljyä tuodaan eniten EU:n alueelta. (Energieollisuus 2015) Suomeen tuotava öljy jalostetaan Neste-Oil:n Porvoon ja Naantalin jalostamoissa, joiden tuotannosta kolmannes menee vientiin pääasiassa Itämeren maihin ja Pohjois-Amerikkaan. (Öljy ja bio polttoaineala 2015)

Suomessa öljytuotteiden kulutus jakaantuu eri käyttäjäryhmiin. Vuonna 2013 yli puolet öljyn käytöstä kului liikenteen polttoaineena. Teollisuuden energiantuotantoon öljyä kului 12 prosenttia vuotuisesta öljyn kulutuksesta. Öljyn käyttö sähköntuotannon polttoaineena on vähäistä ja Suomessa öljyn merkitys korostuu osana maan energiahuoltoa. Öljyä käytetään maakaasun varapolttoaineena ja kriisitilanteiden varalta öljytuotteita on varastoitu puolustusvoimien käyttöön. (Energieollisuus 2015) Öljytuotteita kulutetaan myös raaka- ja voiteluaineena, maa- ja metsätaloudessa sekä rakennusten lämmityksessä. Kulutuksen jakautuminen vuonna 2013 on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Öljytuotteiden kulutus käyttäjäryhmien välillä (Öljy ja biopolttoaineala 2015)

3.3 Turve

Suomessa turve luokitellaan hitaasti uusiutuvaksi biomassapolttoaineeksi. Turpeen luokittelu polttoaineena ei ole yksinkertaista. Energiapoliittisesti turve ei ole uusiutuva eikä fossiilinen polttoaine. Ilmastopoliittisesta näkökulmasta turve kuitenkin lasketaan fossiiliseksi polttoaineeksi sen poltosta aiheutuvien päästöjen vuoksi. (Energiateollisuus 2015)

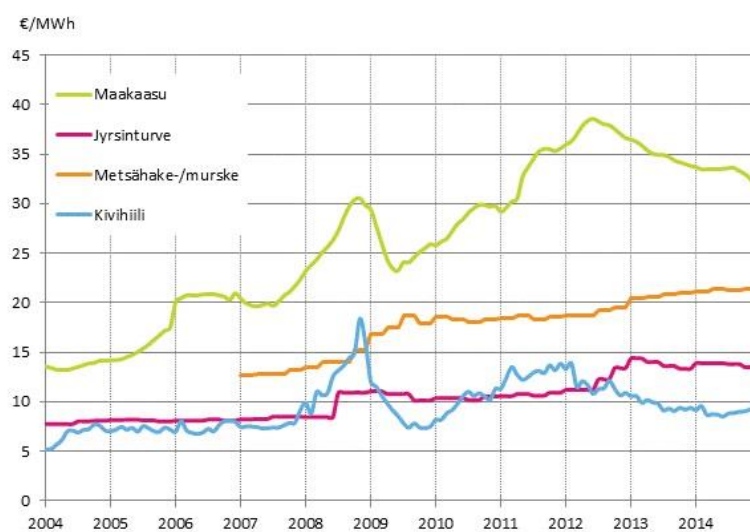
Suomessa turvetta käytetään sähkön- ja lämmöntuotannon polttoaineena monissa sisämaan ja länsirannikon voimalaitoksissa. Turve sopii mainiosti yhteistuotantolaitoksiin. Turpeen käyttö vaihtelee paljolti sähkömarkkinatilanteen mukaan. Myös ilmasto-olosuhteet ja sitä kautta lämmitystarpeen vaihtelut eri ajanjaksoina aiheuttavat muutoksia turpeen käytössä. Turvetta voidaan käyttää esimerkiksi, joko leijukerroskattiloiden pääpolttoaineena tai tuki- ja täydennyspolttoaineena puu polttoaineen rinnalla. (Energiateollisuus 2015) Turpeen mahdollisuudet polttoaineiden yhteiskäytössä on lisännyt uusiutuvien polttoaineiden käyttöönottoa (Leinonen 2010 s.16). Käytetty energiaturve on pitkälle maatumutta jyrsin- tai palaturvetta, jotka omaavat suuren lämpöarvon. Jyrsin- tai palaturve soveltuu hyvin energiantuotantoon korkean hiilipitoisuuden takia. (Turveinfo 2015)

Suomessa on 55 suurta turvevoimalaitosta, joiden teho vaihtelee 20 - 550 MW välillä. Turvepellettejä käytetään pienemmissä pellettilämpökeskuksissa. Vuoden 2013 kaukolämmön ja siihen liittyvän sähköntuotannon polttoaineista turpeen osuus oli käytettynä polttoaineena 20 %. Suomessa turpeen osuus sähköntuotannosta on 4 %. (Tilastokeskus 2013)

Turve on kotimaisuutensa vuoksi tärkeä polttoaine energiantuotannon huoltovarmuuden kannalta. Suomessa on suuret turvevarannot. Kolmannes Suomen maapinta-alasta on turvemaita, joista energiantuotanto hyödyntää vain yhtä prosenttia. Turvetta on mahdollista varastoida suuria määriä kriisitilanteiden varalle. (Energiamailma 2014) Tuontipolttoaineisiin verrattuna turpeella on etu vakaan- ja kilpailukykyisen hintansa vuoksi.

3.4 Polttoaineiden hinnat

Voimalaitokset tarvitsevat sähkön tuottamiseen energianlähteen. Voimalaitokset käyttävät polttoaineenaan eri energianlähteitä voimalaitoksen tyypin ja sijainnin mukaan. Polttoaineiden markkinahinnan kehityksellä on merkitystä sähkön tuotannon kokonaiskustannuksiin tuotantomuodosta riippuen. Sähköntuotantoon käytettyjen polttoaineiden hintojen kehitys viime vuosikymmenen aikana esitetään kuvassa 4.



Kuva 4. Polttoaineiden hinnat sähköntuotannossa. (Tilastokeskus 2014)

Polttoaineiden hinnat ovat pysyneet melko tasaisena muutamaa hintapiikkiä (v.2008) lukuun ottamatta. Maakaasun hinta on kääntynyt vuoden 2012 hinta huipun jälkeen laskuun, joka on parantanut maakaasulla tuotetun sähkön asemaa markkinoilla.

4 KUSTANNUSTEN LASKENTAMENETELMÄ

Tässä työssä tarkastellaan voimalaitoksien kustannusrakennetta ja kokonaiskustannuksien muodostumista kustannuskarakteriskojen avulla. Tässä kappaleessa esitetään menetelmä, jolla lasketaan sähkön tuotantokustannukset. Huipunkäyttöaikojen perusteella muodostetaan tuotantokustannuksista kuvaajat. Tulokset esitetään kustannussuora- kuvaajina eri sähköntuotannon energianlähteille.

4.1 Kustannuskarakteriskat

Tuotantokustannuksien laskeminen voidaan tehdä kustannuskarakteriskan eli kustannussuorien avulla. Kustannussuorien avulla saadaan määritettyä halutun energiamäärän tuottaminen mahdollisimman edullisesti. Kustannuskarakteriska jakaa voimalaitosten energiakustannukset tuotannon kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. Kiinteät kustannukset k_k ilmoitetaan, euroa per kilowattia vuodessa [$\text{€}/\text{kW}_a$] ja muuttuvat k_m yksikössä euroa per megawattitunti [$\text{€}/\text{MWh}$].

4.1.1 Kiinteät kustannukset

Kustannukset koostuvat pääomakustannuksista ja muista kiinteistä kustannuksista, esimerkiksi vakuutuksista ja kiinteistä kunnossapitokustannuksista. Voimalaitoksessa tuotetulla energian tuotantomäärällä ei ole vaikutusta kiinteisiin kustannuksiin. Voimalaitoksen kiinteät kustannukset lasketaan kaavalla

$$k_k = \frac{c_{ni} \cdot I + KK}{P} \quad (1)$$

missä

c_{ni} = annuiteettitekijä

I = investointi [€]

KK = kiinteät käyttö- ja kunnossapitokustannukset

P = laitosteho [kW]

Annuiteettitekijä lasketaan investoinnin pitoajan ja valitun laskentakoron suuruuden perusteella kaavalla.

$$c_{ni} = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (2)$$

missä

i = laskenta korko

n = vuosien lukumäärä

Kiinteitä kustannuksia määrittäessä ei tarvitse suorittaa kustannusten jakamista laitosteholla, jos investointi on ilmoitettu voimalaitoksen ominaisinvestointina [€/kW].

4.1.2 Muuttuvat kustannukset

Muuttuvat kustannukset ovat riippuvaisia voimalaitoksen tuotantomäärästä. Kustannuksiin vaikuttavat käytetty polttoaine sekä voimalaitoksen hyötysuhde. Polttoaine kustannuksien lisäksi muuttuvia kustannuksia ovat vielä voimalaitoksen muut muuttuvat kustannukset, joita ovat esimerkiksi muuttuvat käyttökustannukset. Polttoaineen markkinahinnan vaihteluilla on suuri vaikutus muuttuvien kustannusten suuruuteen. Muuttuvat kustannukset k_m lasketaan kaavalla.

$$k_m = \frac{h_{pa} + h_{muut}}{\eta} \quad (3)$$

missä

h_{pa} = polttoaineen hinta [€/MWh_{pa}]

h_{muut} = muut muuttuvat kustannukset [€/MWh]

η = voimalaitoksen sähköntuottohyötysuhde

4.1.3 Kustannussuorat

Kustannuskarakteristikoiden perusteella muodostetaan kustannussuorat, kun otetaan huomioon voimalaitoksen huipunkäyttöaika. Kustannussuora saadaan sähkön tuotantokustannuksien huipunkäyttöajan funktion kuvaajasta. Tuotantokustannus yksikössä [€/kW,a] saadaan halutulla huipunkäyttöajalla kaavalla 4.

$$k_t = k_k + \frac{k_m}{1000} \cdot t_h \quad (4)$$

missä

k_t = sähköntuotantokustannus [€/kW,a]

t_h = huipunkäyttöaika [h/a]

4.2 Omakustannushinta ja kustannusten jakaantuminen

Sähkön tuotantokustannus [€/MWh] (omakustannushinta) lasketaan eri huipunkäyttöajoilla, joiden perusteella muodostetaan sähköenergian tuotantokustannuksien kuvaaja huipunkäyttöajan funktiona. Omakustannushinta halutulla huipunkäyttöajalla saadaan kaavalla 5.

$$k_t = k_k \cdot \frac{1000}{t_h} + k_m \quad (5)$$

Sähköntuotantokustannukset jaetaan kustannuslajeihin, joita ovat pääoma- ja polttoainekustannukset, sekä kiinteät ja muuttuvat käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Tuotantokustannukset lasketaan jokaiselle kustannuslajille voimalaitoksen tyypillisellä huipunkäyttöajalla. Tulokset esitetään pylväsdiagrammi- kuvaajina, joista nähdään kustannuksien jakaantuminen.

5 SÄHKÖN TUOTANNON KUSTANNUKSET

Tässä luvussa käsitellään sähkön tuotannosta syntyviä kustannuksia sekä tuotannossa käytettävien polttoaineiden merkitystä energian hintaan. Energian tuotannossa suurimmat kustannuserät painottuvat alkuinvestointeihin ja käytettäviin polttoaineisiin. Kustannuksia jaotteleamalla pystytään helpottamaan niiden havainnollistamista. Jako suoritetaan yleensä ajan mukaan; ennen käyttöä tehtäviin investointi kustannuksiin, käytönaikaisiin - ja käytön jälkeisiin kustannuksiin.

Energiantuotantolaitosten rakentaminen muodostaa suurimman pääomakustannuksen. Investointi kustannukset ovat ennen voimalaitoksen käyttöönottoa tapahtuvia kustannuksia. Käytönaikaiset kustannukset muodostuvat tuotantolaitoksissa työskentelevien henkilöiden palkoista, tuotannossa käytettävästä polttoaineesta, ylläpito- ja huoltokustannuksista sekä vakuutuksista. Käytön jälkeisiin kustannuksiin kuuluvat; laitosten alasajo ja jätehuolto. (Kara et al. 2004 s. 180)

5.1 Vesivoimala

Suomessa on käytössä lähes kaikki mahdollinen vesivoimala kapasiteetti ja ympäristösuojelullisista syistä lisärakentaminen on epätodennäköistä. Vesivoima on yksi halvimpia sähkön tuotannon muotoja, sillä tuotantokustannuksia laskee voimaloiden pitkä käyttöikä. Kun alkuinvestoinnit patoihin ja hydrogeologiseen perusrakenteeseen ovat tehtyinä, jää jäljelle vain käyttö- ja huoltokustannukset. Lisäksi pääkoneiston uusiminen muutamien vuosikymmenten käytön jälkeen tuottaa lisäkustannuksia. Pienet voimalaitokset voivat kuitenkin toimia jopa 50 vuotta ilman merkittäviä investointeja laitteistoon. (ETSAP 2010)

Voimalaitosten investointi kustannukset ovat pääosin riippuvaisia sijainnista ja laitoksen suuruudesta. Suurten vesivoimaloiden (>10 MWe) investointi kustannukset ovat keskimäärin 4000 \$/kWe eli noin 3693 €/kWe. Käyttö- ja huoltokustannukset ovat noin 1,5 - 2,5 prosenttia laitoksen investointikustannuksista vuodessa. Vesivoimalaitoksen kokonaiskustannus suurelle laitokselle on tyypillisesti 75 \$/MWh (69€/MWh). (ETSAP 2010) Dollarit on muunnettu euroiksi kurssilla 1 \$ = 1,09 € (Suomenpankki 2015).

5.2 Ydinvoimalaitos

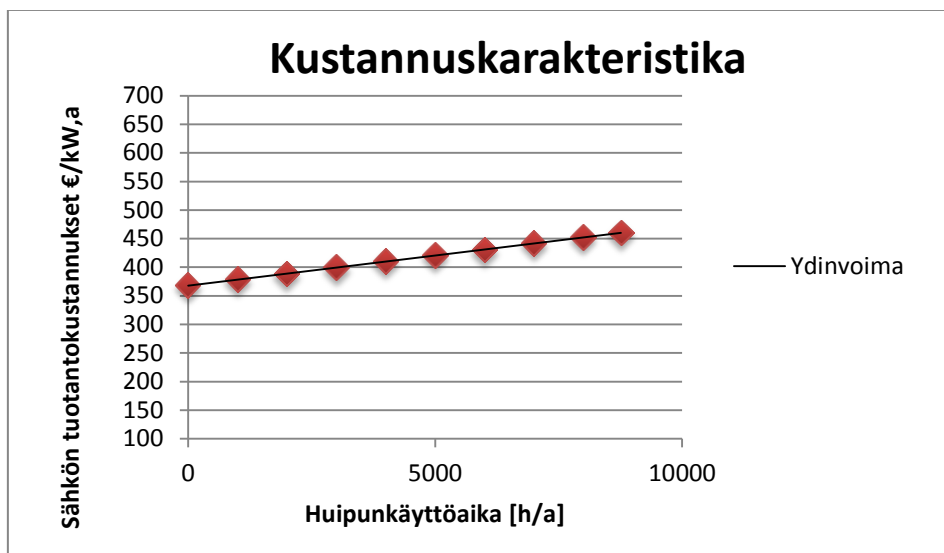
Ydinvoima on alhaisten käyttökustannuksiensa vuoksi erittäin kilpailukykyistä perusvoimatuotantoa. Ydinvoimalla tuotettu energia on hiilidioksidipäästötöntä. Alhaiset kasvihuonekaasupäästöt voimalaitoksen elinkaaren aikana takaavat ydinenergian vahvan aseman energia markkinoilla. (Fortum 2012)

Ydinvoimalaitoksen suurin kustannuserä muodostuu voimalaitoksen rakentamisesta. Hankkeet harvoin pysyvät budjettiin suunnitellussa ajassa. Erilaiset lisensoinnit, rahoitus ja julkinen hyväksyttävyyys asettavat paineita ydinvoiman rakentamiselle. Tämän hetkinen Suomessa rakenteilla olevat Olkiluoto 3:n hinta-arvio on noin 8,5 miljardia euroa (+5300 €/kW). Fossiilisten polttoaineiden ja hiilidioksidipäästöjen hinnan nousu tekevät ydinvoimasta kilpailukykyisen tuotantomuodon hiili- ja kaasuvoiman rinnalle. Ydinvoimalla tuotetun sähkön hinta on vakaampaa ja ennustettavampaa kuin hiilellä tai kaasulla, sillä uraani polttoaineena muodostaa vain pienen osan ydinvoimalan tuotantokustannuksista.

Lasketaan rakenteilla olevan Olkiluoto 3 ydinvoimalan kustannuskarasteristikat. Voimalaitoksen nettosähköteho valmistuessa on noin 1600 MW ja se toimii 37 prosentin hyötysuhteella. (Teollisuudenvoima 2015) Annuiteettitekijä lasketaan kaavalla 2. Reaalikorkona käytetään 5 prosenttia ja voimala voidaan olettaa taloudellisesti tuottavaksi 40 vuoden ajaksi (Vakkilainen et al., 2012). Voimalaitoksen kiintät kustannukset saadaan kaavalla 1.

Ydinvoimalaitoksissa polttoaineena käytettävän uraanin hinta koostuu polttoaine-elementtien väkevöinti- ja valmistuskustannuksista. (Tarjanne, Kivistö 2008 s. 9) Käytetään muuttuvien kustannusten laskemiseen ydinpolttoaineelle hintaa 1,85 €/MWh. Polttoaineen hinta on muihin sähköntuotannon polttoaineisiin verrattuna hyvin pieni, mikä nähdään kuvasta 4, eikä ydinpolttoaineen hinnan muutoksella ole suurta vaikutusta tuotannon kokonaiskustannuksiin. Polttoainekustannukseksi saadaan 5 €/MWh kun voimalaitos toimii 37 prosentin hyötysuhteella. Muuttuvat käyttö ja kunnossapitokustannukset ydinvoimalaitokselle ovat 5,5 €/MWh. Ydinvoimalaitoksen muuttuviksi kustannuksiksi saadaan 10,5 €/MWh. Kustannuskarasteristikaksi saadaan

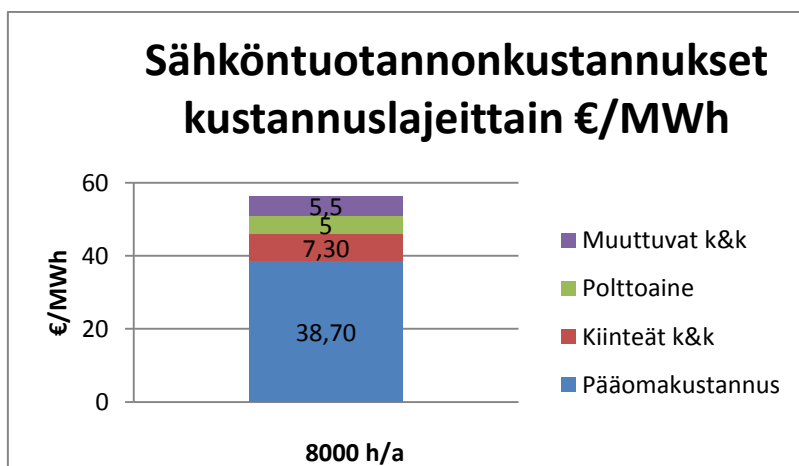
368,04 €/kW,a + 10,5 €/MWh. Kustannuskarakteristika ydinvoimalle esitetään kuvassa 5.



Kuva 5.. Ydinvoiman kustannuskarakteristika huipunkäyttöajan funktiona.

Sähköenergian tuotantokustannukset ydinvoimalle huipunkäyttöajan funktiona esitetään liitteessä.1 Kuvaajasta nähdään tuotantokustannuksien aleneminen huipunkäyttöajan kasvaessa.

Lasketaan kustannuslajien jakaantuminen ydinvoimalalle, jonka huipunkäyttöaika on 8000 tuntia vuodessa. Sähköntuotannon yhteenlaskettu kustannus 8000 tunnin huipunkäyttöajalla on 56,5 €/MWh. Kustannusten jakaantuminen esitetään kuvassa 6.



Kuva 6. Sähköntuotantokustannuksien jakaantuminen ydinvoimalla.

Saatujen tulosten perusteella nähdään ydinvoiman kustannusten painottuvan pääoma- eli investointi kustannuksiin.

5.3 Tuulivoimalapuisto

Tuulivoima on Suomessa nopeasti kasvava energiantuotanto muoto. Uusiutuvana energianmuotona tuuli luo rajattoman kapasiteetin energiantuotannolle. Tuotantoon vaikuttavat voimakkaasti vallitsevat sääolosuhteet, ja tuulivoima tarvitsee rinnalleen jonkin muun tuotantomuodon säätövoimavaraksi.

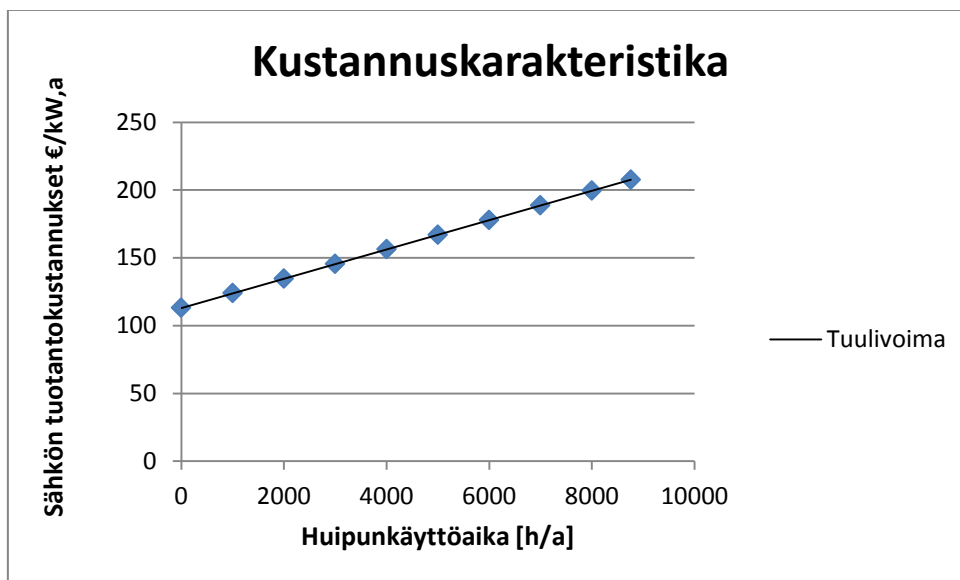
Tuulivoiman kustannuksista pääosa kuluu voimalaitoksen alkuinvestointiin. Investointi kustannukset koostuvat pienistä osakustannuksista, joita ovat muun muassa tuulipuiston kehityskustannukset, turbiinien hankinta ja sähköverkon sekä tarvittavan infrastruktuurin rakentaminen. Tuulivoimalapuiston sijainnilla on suuri merkitys saatavan tuotannon määrään ja tätä kautta voimalan kustannusrakenteeseen. (LUT 2015)

Käytetään laskennan lähtötietoina Tuuliwatti Oy:n Kalajoelle rakenteilla olevaa tuulivoimalapuistoa, jossa 22 tuuliturbiinista saadaan kokonaisteho 73 MW. Investoinnin suuruudeksi on ilmoitettu 110 miljoonaa euroa (Suominen 2014). Oletetaan tuulipuiston pitoajaksi 25 vuotta ja annuiteettitekijän laskemiseksi käytetään reaalikorkona 5 prosenttia.

Tuulivoimalla ei ole polttoaine kustannuksia. Käyttö- ja kunnossapito kustannusten arviointi tuulivoimalalle on haastavaa, sillä kustannukset ovat riippuvaisia vuotuisesta tuulimäärästä. Käyttö- ja ylläpitokustannukset muodostuvat huolto- ja vakuutuskustannuksista sekä tuulivoimalan hallinnollisista menoista. Esimerkiksi vuonna 2009 Suomessa tuulivoimaloiden käyttökulut olivat paikoin jopa 30 €/MWh johtuen vähäisestä tuulisuudesta. (Vaasa Energy Institute 2010)

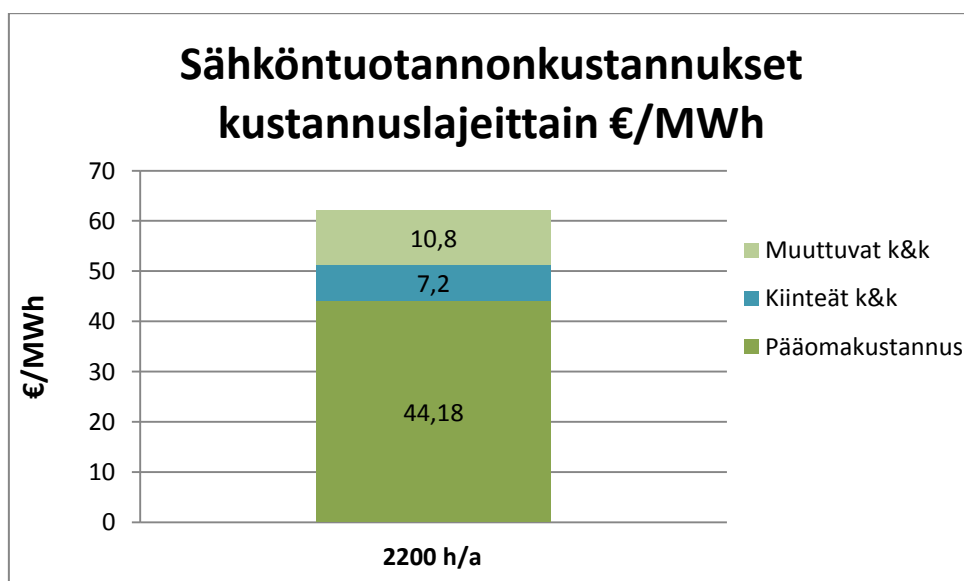
Käytetään laskennassa käyttö- ja kunnossapito kustannuksena 18 €/MWh tuulivoimayhdistyksen ilmoittaman arvion perusteella. Arvio perustuu tuulivoimalan investointikustannukseen, josta käyttö- ja kunnossapidon osuuden arvioidaan olevan 2-3 prosenttia. (Tuulivoimayhdistys 2015) Käyttö- ja kunnossapitokustannuksesta kiinteiden kustannuksien osuus on 40 prosenttia ja loput ovat muuttuvia kustannuksia. Lasketaan tuulivoiman kustannuskarakteristikaksi $113,04 \text{ €/kW}_a + 10,8 \text{ MWh}$ ja esitetään tulokset

huipunkäyttöajan funktiona kuvassa 7. Tuulivoimalla tuotetun sähköenergian tuotantokustannukset huipunkäyttöajan funktiona esitetään liitteessä 1.



Kuva 7.. Tuulivoiman kustannuskarakteristika

Tuulivoimalan huipunkäyttöajan arvioidaan olevan Suomen olosuhteissa 2200 h/a (European Commission 2015), jonka perusteella lasketaan sähköntuotannonkustannukset kustannuslajeittain. Tulokset tuulivoimalan kustannuksien jakautumisesta esitetään kuvassa 8.

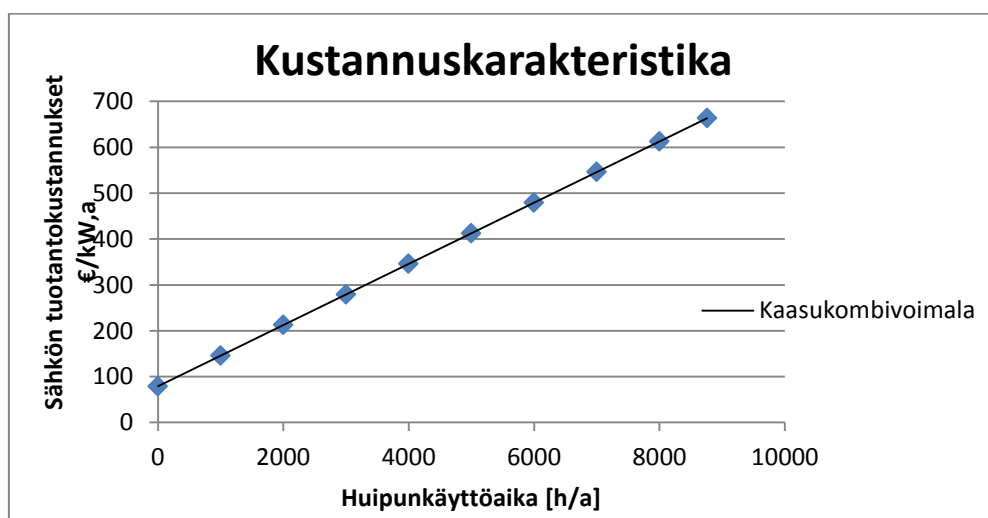


Kuva 8. Tuulivoimalapuiston sähköntuotantokustannuksien jakautuminen

Sähkön kokonaistuotantokustannukseksi tuulivoimalapuistolle, jonka huipunkäyttöaika on 2200 tuntia vuodessa ja teho 70 MW saadaan 62,18 €/MWh. Kuvaajasta nähdään, että tuulivoimalapuiston suurin kustannuserä muodostuu pääomakustannuksesta.

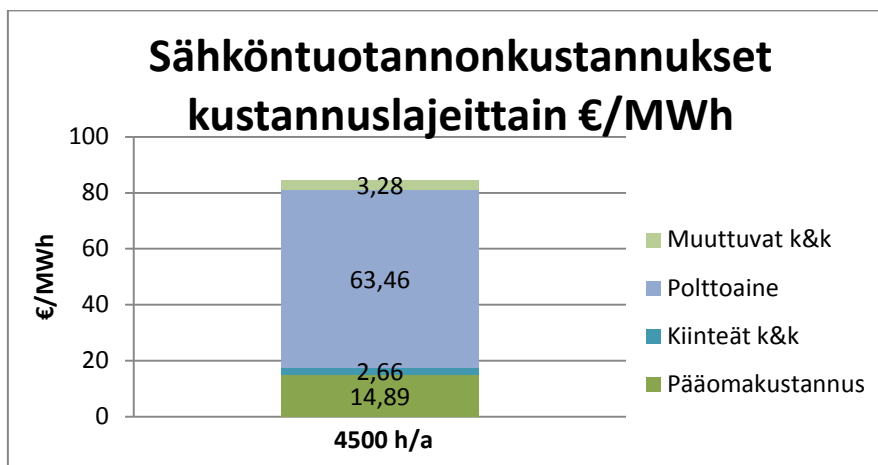
5.4 Kaasukombilaitos

Maakaasuvoimalan kustannukset muokkautuvat maakaasun markkinahinnan mukaan. Polttoainekustannukset ovat voimalan merkittävin kustannuserä. Maakaasun hintana käytetään vuoden 2014 maakaasun hintatasoa Suomen sähköntuotannossa. Kuvasta 4 saadaan maakaasun hinnaksi 33 €/MWh. Tässä työssä tarkastellaan IEA:n (2013) raportin mukaista kaasuvoimalaa, jonka sähköteho on 620 MW. Kehittyneen tekniikan ja kaasu- höyryturbiinin kombikytkennän avulla saavutetaan 52 % sähkötuottohyötysuhde. Kombivoimalan investointikustannus on noin 517 miljoonaa euroa. Voimalan taloudellinen pitoaika on 20 vuotta ja annuiteetin laskennassa käytetään 5 % reaalikorkoa. Voimalaitoksen kiinteät ja muuttuvat kustannukset saadaan IEA:n tutkimuksesta (EIA 2013), josta saadut arvot muunnetaan dollareista euroihin kurssilla: 1 € = 1,09 \$ (Suomenpankki 2015). Laskelmien perusteella muodostetaan kustannuskarasteristikat. Kaasukombivoimalan kustannuskarasteristikaksi saadaan 78,97 €/kW, a + 66,74 €/MWh. Kustannussuorat saadaan, kun yhdistetään laskelmiin huipunkäyttöajan vaikutus. Kombivoimalan sähköntuotantokustannukset huipunkäyttöajan funktiona esitetään kuvassa 9. Voimalaitoksen sähköenergian tuotantokustannukset huipunkäyttöajan funktiona esitetään liitteessä 1.



Kuva 9.. Kaasukombivoimalan kustannuskarasteristika

Kaasukombivoimalaitoksen sähköntuotannon kustannuslajittelun laskennassa on käytetty huipunkäyttöaikana 4500 h/a, joka on tyypillinen huipunkäyttöaika sähköä tuottavalle kaasukombivoimalalle Suomessa (European Commission 2015). Tuotantokustannukset lajeittain esitetään kuvassa 10.



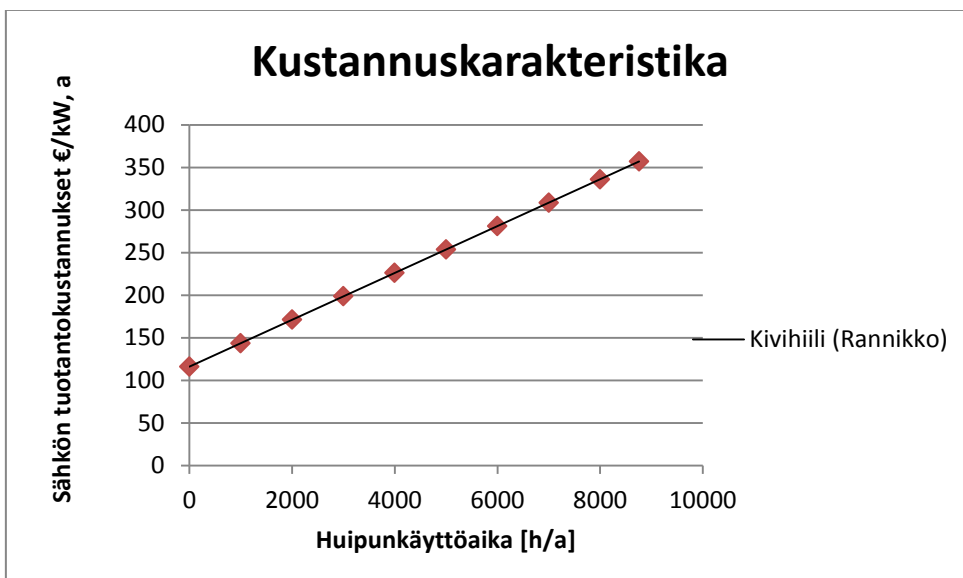
Kuva 10. Sähköntuotannon kustannuksien jakaantuminen kaasukombivoimalalla.

Yhteenlaskettu sähköntuotantokustannus 4500 h/a huipunkäyttöajalla toimivalle kaasukombilaitokselle on 84,29 €/MWh.

5.5 Hiilivoimalaitos

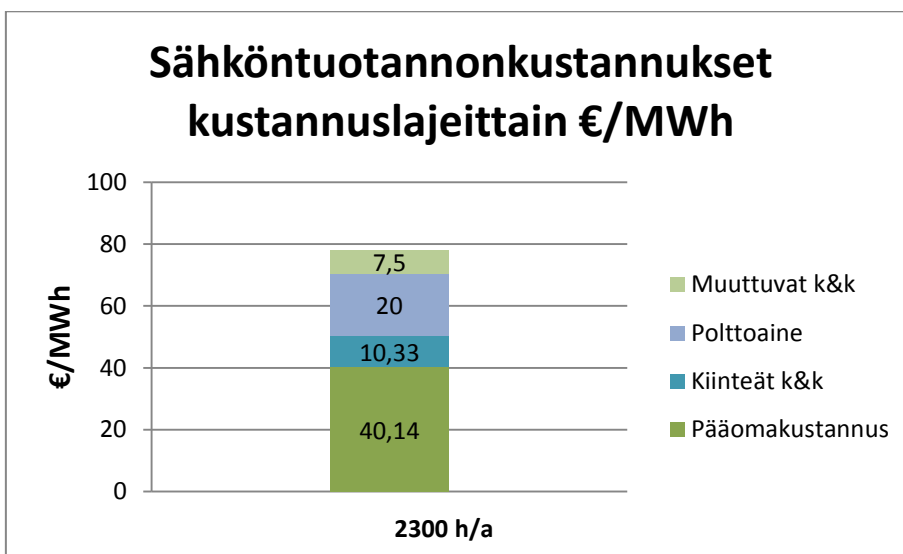
Suunniteltu hiilivoimalaitos on teholtaan 500 MW. Kivihiililaitoksen keskimääräinen investointipääoman tarve EU:n alueella on 1583 988 €/MW, jonka perusteella saadaan 500 MW voimalan investointikustannukseksi noin 792 miljoonaa euroa (European Commission 2015). Ominaisinvestointikustannus voimalaitokselle on 1584 €/kW. Hiilivoimalaitos sijaitsee rannikolla, jonka vuoksi polttoainekustannukset ovat halvemmat kuin CHP-kivihiilivoimalalla. Kuvasta 4. saadaan polttoaineen hinnaksi 9 €/MWh. Voimalaitoksen taloudellinen pitoaika on 40 vuotta ja reaalkorkona käytetään 5 prosenttia. Sähköä voimalaitos tuottaa 45 % hyötysuhteella. Lasketaan hiilivoimalaitoksen kiinteiden- ja muuttuvien kustannusten perusteella voimalaitoksen kustannuskarakteriska. Kaavojen 1 ja 3 avulla saadaan rannikolla sijaitsevan hiilivoimalaitoksen kustannuskarakteristikaksi 116,07 €/kW,a + 27,5 €/MWh. Kustannuskarakteristika huipunkäyttöajan funktiona kivihiilivoimalalle esitetään

kuvassa 11. Sähköenergian tuotantokustannukset rannikolla toimivalle kivihiilivoimalalle huipunkäyttöajan funktiona esitetään liitteessä 1.



Kuva 11. Energianlähteenä kivihiiltä käyttävän voimalaitoksen kustannuskarakteristika.

Suomessa sähköä tuottavan kivihiililaitoksen huipunkäyttöaika on keskimäärin 2300 h/a. Lasketaan kivihiililaitoksen sähköntuotannonkustannukset kustannuslajeittain 2300 h/a huipunkäyttöajalla. Tulokset esitetään kuvassa 12.

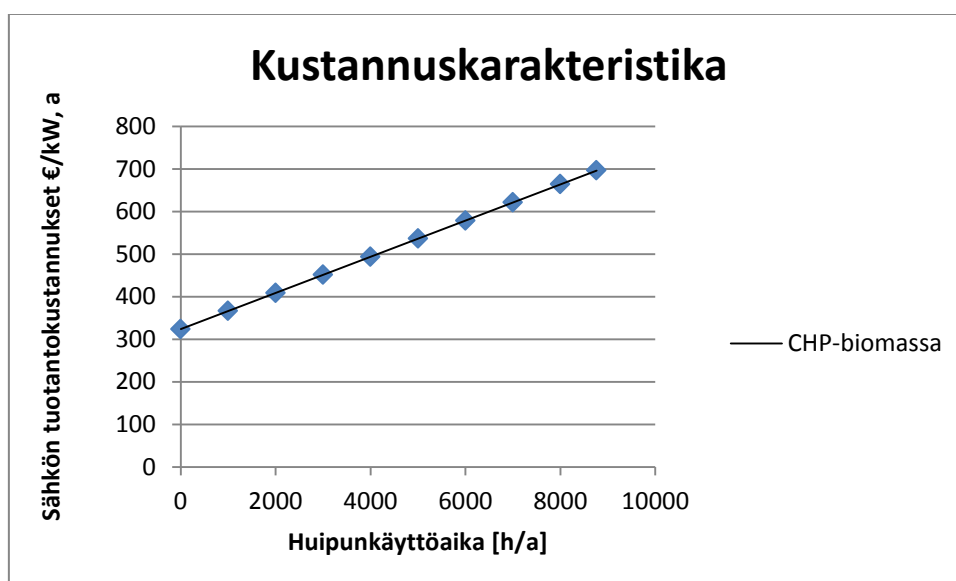


Kuva 12. Sähköntuotantokustannuksien jakaantuminen kivihiilivoimalaitoksella.

Kivihiilen sähkötuotantokustannukset keskittyvät polttoaine- ja pääomakustannuksiin. Tuotannon kokonaiskustannukseksi 2300 h/a huipunkäyttöajalla saadaan 77,97 €/MWh.

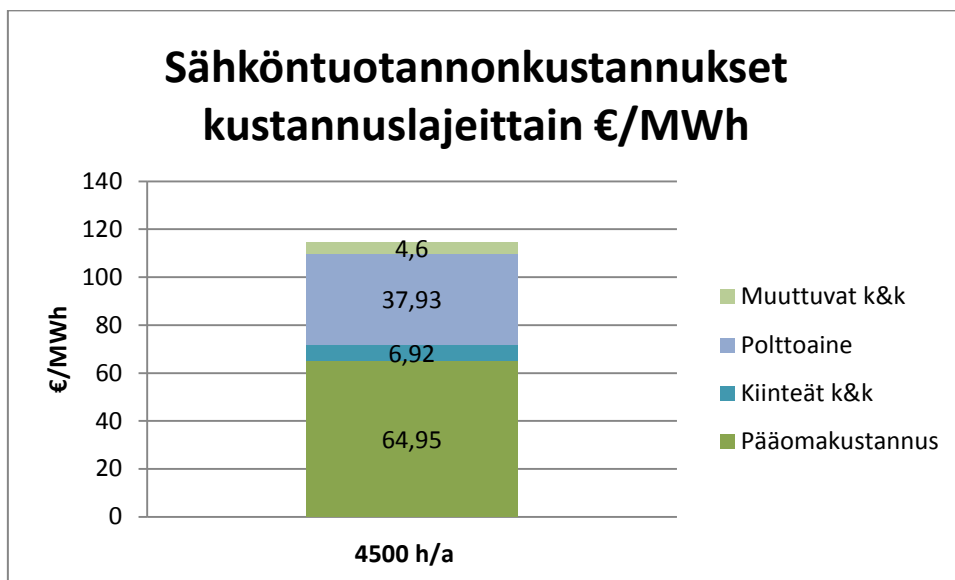
5.6 Biomassa CHP-voimala

Puuperäisiä polttoaineita käytetään pienen kokoluokan CHP-biomassa voimaloissa. Kustannussyistä biomassan käyttö pelkäästään sähköä tuottavissa voimalaitoksissa ei ole Suomessa kannattavaa. Puuperäisistä polttoaineista valitaan polttoaineeksi metsähake ja -murske. Vuoden 2014 hintatasolla metsähakkeen hinta on 22 €/MWh. Biomassaa käyttävän CHP-voimalan investointi kustannukset ovat keskimäärin 3642364 €/MW (European Commission 2015). Voimalaitoksen sähköteho on 125 MW ja sähköä tuotetaan 58 % hyötysuhteella. (Vakkilainen et al., 2012) Investointikustannukseksi voimalaitokselle saadaan noin 455 miljoonaa euroa. Kustannuskarakteristikan laskennassa käytetään 5 % reaalikorkoa ja laitoksen taloudelliseksi pitoajaksi oletetaan 20 vuotta. Kiinteiden- ja muuttuvien kustannusten perusteella saadaan biomassalla toimivan voimalaitoksen kustannuskarakteristikaksi 323,40 €/kW,a + 42,53 €/MWh. Kustannuskarakteristika huipunkäyttöajan funktiona esitetään kuvassa 13. Sähköenergian tuotantokustannukset huipunkäyttöajan funktiona CHP-biomassa voimalaitokselle esitetään liitteessä 1.



Kuva 13. Biomassalla toimivan voimalaitoksen kustannuskarakteristika

Suomessa sähköä tuottavan CHP- biomassa voimalaitoksen keskimääräinen huipunkäyttöaika on 4500 h/a (European Commission 2015). Sähkäteholtaan 125 MW:n biomassa- voimalaitoksen sähköntuotantokustannus 4500 h/a huipunkäyttöajalla on 114,40 €/MWh. Kustannusten jakaantuminen esitetään kuvassa 14.



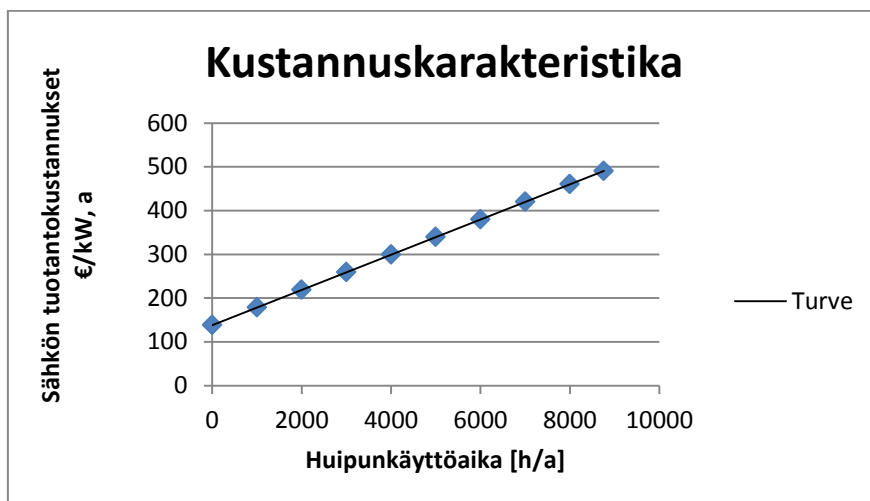
Kuva 14. CHP-biomassa voimalan sähköntuotantokustannuksien jakaantuminen.

CHP- biomassa voimalaitoksen sähköntuotanto kustannukset muodostuvat pääasiassa pääoma- ja polttoainekustannuksista. Sähköntuotannon kokonaiskustannus on suuri verrattuna muihin tuotantomuotoihin.

5.7 Turvevoimala

Turvevoimalaitos on tyypiltään lauhdevoimalaitos. Voimalan investointikustannukset ovat 250 miljoonaa euroa. Sähkätehoa saadaan 130 MW hyötysuhteen ollessa 40 %. Laskennassa käytetään voimalaitokselle 20 vuoden taloudellista pitoaikaa ja reaalikorko on 5 prosenttia (Vakkilainen et al., 2012). Muodostetaan turvevoimalaitoksen kiinteiden- ja muuttuvien kustannusten perusteella kustannuskarakteristika, josta piirretään kuvaaja huipunkäyttöajan funktiona. Turvevoimalaitoksen kustannuskarakteristikaksi saadaan 138,11 €/kW,a + 40,25 €/MWh. Kustannussuora

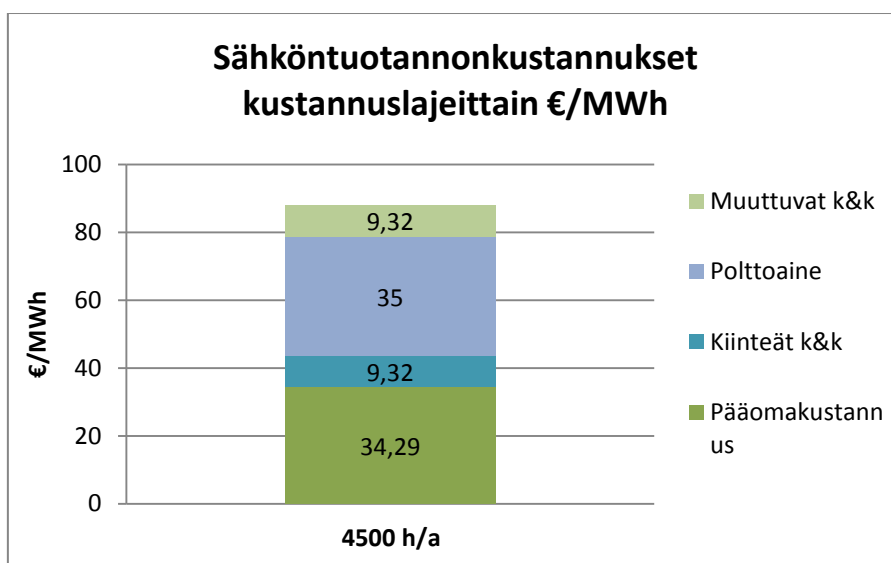
esitetään kuvassa 15. Sähköenergian tuotantokustannukset turvetta energianlähteenä käyttävälle voimalaitokselle esitetään liitteessä 1.



Kuva 15. Turvevoimalan kustannussuora huipunkäyttöajan funktiona.

Suomessa turvevoimalaitoksen keskimääräinen huipunkäyttöaika on noin 4500 h/a.

Lasketaan sähköntuotantokustannusten jakaantuminen kustannuslajeittain turvevoimalaitokselle 4500 h/a huipunkäyttöajalla. Tulokset esitetään kuvassa 16.



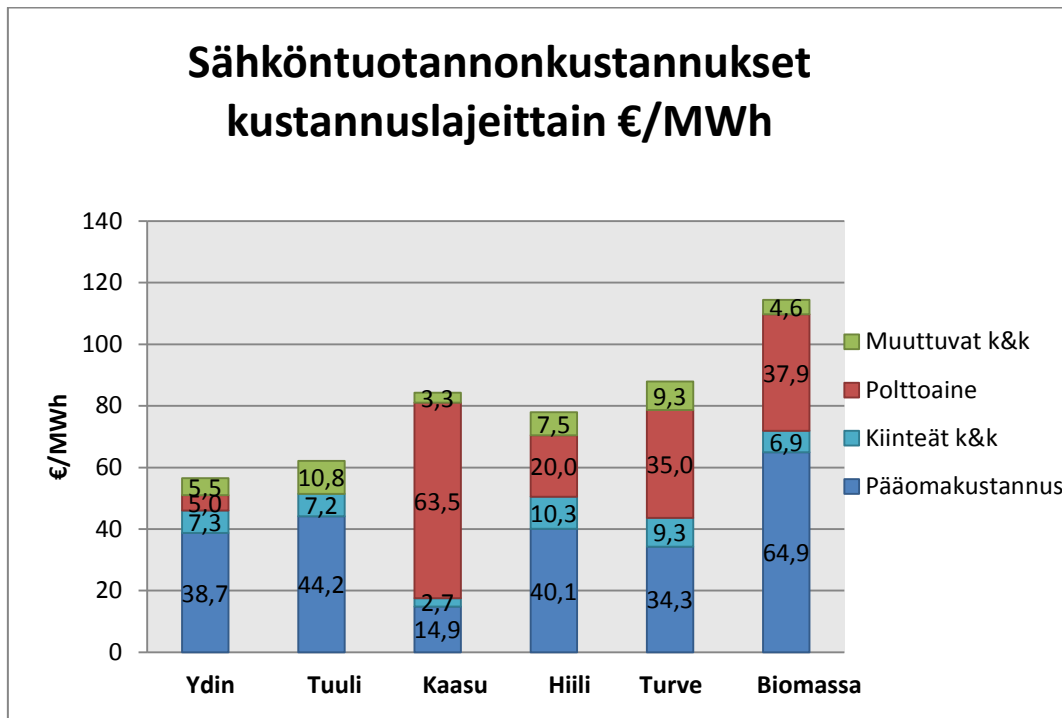
Kuva 16. Turvevoimalan sähköntuotantokustannusten jakaantuminen.

Sähkötuotannon kokonaiskustannukseksi turpeella toimivalle voimalaitokselle saadaan 87,94 €/MWh. Pääoma- ja polttoainekustannukset ovat lähes samansuuriset, kun huipunkäyttöaika on 4500 tuntia vuodessa.

6 TULOSTEN TARKASTELU

Tässä työssä tutkittiin sähkön tuotannosta syntyviä kustannuksia kustannuskarakteristikoiden perusteella. Tarkasteltavat sähköntuotanto muodot olivat ydin- ja tuulivoima, sekä kaasulla, kivihiilellä, biomassalla ja turpeella toimivat voimalaitokset. Jokaiselle voimalaitos tyypille laskettiin kustannuskarakteriska ja piirrettiin kustannussuora huipunkäyttöajan funktiona. Lisäksi laskettiin sähköenergian hinta, josta tulokset esitettiin huipunkäyttöajan funktiona. Kustannukset lajiteltiin kiinteisiin kustannuksiin, joita ovat pääomakustannus ja kiinteät käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Muuttuvia kustannuksia ovat polttoainekustannukset sekä muuttuvat käyttö- ja kunnossapito kustannukset. Työssä ei otettu huomioon päästökaupasta aiheutuvia kustannuksia.

Sähköntuotanto kustannukset laskettiin jokaiselle tuotantomuodolle huipunkäyttöajalla, joka on tyypillinen voimalaitokselle Suomen sähköntuotannossa. Ydinvoiman tuotantokustannukset on laskettu 8000 h/a huipunkäyttöajalla, jolla saatiin sähkön kustannukseksi 56,5 €/MWh. Tuulivoiman tuotantokustannus 2200 h/a huipunkäyttöajalla on 62,2 €/MWh. Rannikolla sijaitsevan hiilivoimalaitoksen sähköntuotanto kustannus on 77,9 €/MWh, kun huipunkäyttöaika on 2300 h/a. Muiden tarkasteltavien voimalaitoksien huipunkäyttöaika Suomessa on 4500 h/a. Kaasulla toimivan voimalaitoksen sähköntuotantokustannus on 84,3 €/MWh, turpeella 87,9 €/MWh ja biomassalla 114,4 €/MWh. Tulokset esitetään kuvassa 17, jossa sähköntuotannonkustannukset on jaoteltu kustannuslajeittain. Matalimmat sähkön tuotantokustannukset ovat ydinvoimalaitoksella ja korkeimmat biomassaa käyttävällä voimalaitoksella.



Kuva 17. Sähkön tuotantokustannuksien jakaantuminen energialähteittäin.

Tuotantomuodoista ydin-, tuuli-, ja biomassavoimalaitoksien suurin kustannuserä muodostuu pääomakustannuksista. Suuri pääomakustannus johtuu tuotantomuotojen suurista investointikustannuksista. Voimalaitokset käyttävät sähkön tuotantoonsa teknologiaa, joka kasvattaa investointikustannuksia. Biomassavoimalaitoksen kustannuksia kasvattaa käytetty tekniikka, jolla saadaan tuotannosta aiheutuvat päästöt rajoitusten mukaiseksi. Polttoaineen markkinahinta vaikuttaa merkittävästi kaasulla, hiilellä, turpeella ja puulla tuotetun sähkön tuotantokustannuksiin.

7 YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin vuoden 2013 sähköntuotantoa Suomessa. Sähköä tuotettiin 68,3 TWh vuonna 2013. Ydinvoimalla tuotettua sähköä oli kolmannes, muita tärkeitä tuotantomuotoja olivat vesivoima ja lämpövoima, joka on pääasiassa lämmön ja sähkön yhteistuotantoa. Uusiutuvat energianlähteet, kuten tuulivoima ja aurinkoenergia kasvattavat osuuttaan sähköntuotannossa tekniikan kehittyessä.

Voimalaitokset tarvitsevat sähkön tuottamiseen erityyppisiä polttoaineita, joiden markkinahinnan kehityksellä on vaikutusta sähkön tuotannon kustannuksiin. Tärkeimpiä sähköntuotannon polttoaineita ovat uusiutuvista energianlähteistä biomassa, eritoten puuperäiset polttoaineet, joita käytetään teollisuuden sähköntuotannossa. Fossiilisten polttoaineiden käyttöä pyritään vähentämään poltettaessa syntyvien päästöjen vuoksi. Kivihiili on fossiilisista polttoaineista käytetyin sähköntuotannon energianlähde. Maakaasun käyttö energianlähteenä vaatii maakaasuverkostoa, joka rajoittaa osin sähköntuotantoa maakaasulla. Turvetta käytetään tavallisesti polttoaineena yhdessä jonkin puuperäisen polttoaineen rinnalla sähköntuotantolaitoksessa. Öljyllä on suuri merkitys Suomen energiahuollon kannalta, mutta sähkön tuotannossa sen käyttö on vähäistä.

Sähköntuotannossa suurimmat kustannuserät syntyvät investointiin tarvittavasta pääomakustannuksesta ja polttoainekustannuksesta. Ydinvoiman ja tuulivoiman kustannusrakenne on pääomakustannus painotteinen ja polttoainekustannus on verrattain pieni. Tuulivoimalla ei ole polttoainekustannuksia. Kaasu, turve- ja biomassavoimalaitoksen sähköntuotantokustannukset ovat riippuvaisia polttoaineen markkinahinnasta. Kaasu- ja turvevoimalan sähköntuotantokustannuksista puolet on polttoainekustannuksia. Biomassan sähköntuotantokustannukset ovat korkeat, sillä sekä polttoaine että vaadittu tekniikka on kallista muihin tuotantomuotoihin verrattuna. Ydinvoiman sähköntuotantokustannukset ovat matalimmat 56,5 €/MWh ja biomassavoimalalla korkeimmat 114,4 €/MWh, kun päästökaupan merkitystä hintoihin ei ole huomioitu.

Vesivoima on tärkeä sähköntuotantomuoto hyvien säätelyominaisuuksiensa takia. Suomen vesivoimalakapasiteetti on pääosin käytössä, eikä lisärakentaminen ole

todennäköistä, joten laskennassa ei ole esimerkkiä vesivoimalaitoksesta. Vesivoima on kuitenkin yksi halvimpia sähkön tuotannon muotoja, sillä tuotantokustannuksia laskee voimaloiden pitkä käyttöikä. Vesivoimalaitoksen kokonaiskustannus suurelle laitokselle on tyypillisesti 69,3 €/MWh (ETSAP 2010).

LÄHDELUETTELO

- Aurinkovoima 2015. Aurinkoenergia [Aurinkovoiman www-sivuilla]. [viitattu 2.4.2015] Saatavissa: <http://www.aurinkovoima.fi/fi/sivut/aurinkoenergia>
- Energiamaailma 2014. Energia-ABC: Turve [Energiamaailman www-sivuilla] [viitattu 2.4.2015] Saatavissa: <http://energiamaailma.fi/energia-abc/turve/>
- Energiateollisuus. 2015. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto. [Viitattu 2.4.2015] Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/sahkon-ja-lammon-yhteistuotanto>
- Energiateollisuus 2015. Sähkön tuotanto, tuonti ja vienti. [verkkojulkaisu] [Viitattu 2.4.2015] Saatavissa: <http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut/sahkotilastot/sahkontuotanto/sahkon-tuotanto-tuonti-ja-vienti>
- Energiateollisuus 2015. Energianlähteet. [Energiateollisuus ry:n www-sivuilla] [viitattu 2.4.2015] Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energiالاhteet/>
- Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP). Tehcnology Brief E12-May 2010. Hydropower. [viitattu 16.4.2015] Saatavissa: <http://www.etsap.org/E-techDS/PDF/E07-hydropower-GS-gct.pdf>
- Fortum. Ydinvoima. [Fortumin www-sivuilla]. Päivitetty 10.12.2012. [viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: <http://www.fortum.com/fi/energiantuotanto/ydinvoima/ydinvoima/pages/default.aspx>
- Hiilitieto. 2015. Hiili Suomessa. [Hiilitieto ry:n www-sivuilla] [viitattu 16.4.2015] Saatavissa: <http://hiilitieto.fi/hiili-suomessa/energiantuotanto/>
- Kara et al. 2004. Energia Suomessa: Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. Helsinki 2004. VTT prosessit. 396s.

Leinonen Arvo (toim.). Turpeen tuotanto ja käyttö. Yhteenvedo selvityksistä. Espoo 2010. VTT Tiedotteita – Research Notes 2550. 104 s [verkkojulkaisu] [viitattu 2.4.2015] Saatavissa: <http://www2.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2550.pdf>

LUT. 2015. [verkkodokumentti]. Tuulipuiston investointi ja rahoitus. LUT:n opintojakson Tuuli- ja aurinkovoimateknologia ja liiketoiminta verkkomateriaali. [viitattu 16.4.2015] Saatavissa: http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/93540/mod_resource/content/1/Lecture7_Inv_ja_rah.pdf

Motiva. 2015 Aurinkoenergia: Auringosta lämpöä ja sähköä. [verkkojulkaisu] [viitattu 2.4.2015] Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/9698/Auringosta_lampoa_ja_sahkoa2014.pdf

Suomen kaasuyhdistys. 2015. Kaasutilastot. [verkkojulkaisu] Päivitetty: Maaliskuu 2014 [viitattu 16.4.2015] Saatavissa: <http://www.kaasuyhdistys.fi/sisalto/kaasutilastot>

Suomenpankki 2015. Valuuttakurssit. [Suomen pankin www-sivuilla] Päivitetty 16.4.2015 [viitattu 25.3.2015] Saatavissa: http://www.suomenpankki.fi/fi/tilastot/valuuttakurssit/Pages/tilastot_valuuttakurssit_valuuttakurssit_today_fi.aspx

Suomen tuulivoimayhdistys (STY). 2015. Käyttö- ja ylläpitokustannukset. [Tuulivoimatietosivuston www-sivuilla] [viitattu 2.4.2015] Saatavissa : <http://www.tuulivoimatieto.fi/kayttokustannus>

Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto [verkkojulkaisu]. ISSN=1798-5072. 2013. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 2.4.2015]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2013/salatuo_2013_2014-10-16_tie_001_fi.html

Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto [verkkojulkaisu].

ISSN=1798-5072. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 2.4.2015].

Saatavissa: <http://tilastokeskus.fi/til/salatuo/kas.html>

Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto [verkkojulkaisu].

ISSN=1798-5072. 2013, Liitekuvio 1. Sähkön tuotanto energialähteittäin 2013 .

Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 2.4.2015]. Saatavissa:

http://www.stat.fi/til/salatuo/2013/salatuo_2013_2014-10-16_kuv_001_fi.html

Suominen Jari. 2014 Kalajoki Mustilankangas. [Tuuliwatti Oy:n verkkosivuilla]

Päivitetty. 19.3.2014 [viitattu 6.5.2015] Saatavissa:

<http://www.tuuliwatti.fi/ci/TuuliWatti%20Oy%20Kalajoki%20Mustilankangas%20esitys%20verkkoon%2019032014.pdf>

Sähköala. 2015 Aurinkosähköön kannattaa jo investoida [Sähköalan www-sivuilla]

Päivitetty 10.3.2015 [viitattu 16.4.2015] Saatavissa:

http://www.sahkoala.fi/koti/aurinkoenergia_ja_tuulivoima/fi_FI/aurinkosahko_on_jo_kannattava_investointi/

European Commission. 2015 Subsidies and cost of EU energy. 2014. Annex 4-5

Päivitetty 6.5.2015 [viitattu 6.5.2015] Saatavissa:

<https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/DESNL14583%20Final%20report%20annexes%204%205%20v3.pdf>

Tarjanne, Risto, Kivistö, Aija, 2008, Comparison of the electricity generation costs.

Lappeenranta University of Technology, Research Report En A-56, 24 p. ISBN 952-214-588-8

Teollisuuden voima (TVO): OL3: Tekniset tiedot. 2015 [TVO:n www-sivuilla] [viitattu

2.4.2015] Saatavissa: <http://www.tvo.fi/page-514>

Tilasto: Energian hinnat [verkkajulkaisu]. ISSN=1799-7984. 4. vuosineljännes 2014, Liitekuvio 4. Voimalaitospolttoaineiden hinnat sähköntuotannossa . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 2.4.2015]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/ehi/2014/04/ehi_2014_04_2015-03-19_kuv_004_fi.html

Tilastokeskus 2015. Käsitteet ja määritelmät: Sähkön ja lämmön yhteistuotanto. [Viitattu 2.4.2015] Saatavissa: http://www.stat.fi/meta/kas/sahko_lampo_tuo.html

Tuulivoimayhdistys 2015. Pientuulivoima. [Tuulivoimayhdistyksen www-sivulla] [viitattu 2.4.2015] Saatavissa: <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/pientuulivoima>

Turveinfo: Turpeen energiakäyttö [verkkajulkaisu] Bioenergia ry 2015. [viitattu 2.4.2015] Saatavissa: <http://www.turveinfo.fi/kayttotavat/energiakaytto>

Työ- ja elinkeinoministeriö 2013. Uusiutuvat energianlähteet. Päivitetty 18.12. 2013 [Viitattu 2.4.2015] Saatavissa: <http://www.tem.fi/index.phtml?s=2481>

Vaasa Energy Institute 2010 Tuulivoiman kustannukset [Medvind tuulivoimaportaalin www-sivuilla] [viitattu 2.4.2015] Saatavissa: http://vindkraft.fi/~medvind/public/index.php?cmd=smarty&id=37_lfi

Vakkilainen et al., 2012, Sähkön tuotantokustannusvertailu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Tutkimusraportti 27, 24 s. ISBN 978-952-265-341-3 [verkkajulkaisu] [viitattu 2.4.2015] Saatavissa : <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/86304/S%C3%A4hk%C3%B6n%20tuotantokustannusvertailu%20,%20tutkimusraportti%2027,%202012.pdf?sequence=1>

U.S. Energy Information Administration (EIA): Capital cost for electricity plants: Table 1. Updated April 12, 2013. [verkkajulkaisu] [viitattu 2.4.2015] Saatavissa: <http://www.eia.gov/forecasts/capitalcost/>

Öljy ja bio polttoaineala. 2015. Öljy Suomen kansantaloudessa [Öljy ja bio polttoainealan www-sivuilla] [viitattu 2.4.2015] Saatavissa: <http://www.oil.fi/fi/tietoa-oljysta/oljy-suomen-kansantaloudessa>

Sähkötuotantokustannuksien kuvaajat huipunkäyttöajan funktiona eri energianlähteillä:

