

Fredrik Kuokkanen

TUULI- JA AURINKOVOIMAN ROOLI SUOMEN TULEVAISUUDEN SÄHKÖ- ENERGIAN TUOTANNOSSA

TIIVISTELMÄ

Fredrik Kuokkanen: Tuuli- ja aurinkovoiman rooli Suomen tulevaisuuden sähköenergian tuotannossa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan tutkinto-ohjelma
5/2019

Energiantuotannon murros on keskeisessä roolissa ilmastonmuutoksen hillitsemisessä. Fossiilisiin energialähteisiin perustuvia tuotantomenetelmiä korvataan uusiutuvilla ja hiilineutraaleilla tuotantomuodoilla ja näin pienennetään energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä.

Kandidaatintyössä lähdettiin tarkastelemaan Suomen energiajärjestelmää ja työ rajattiin koskemaan sähköntuotantoa, jonka osuus Suomen koko energiantuotannosta on reilu viidennes. Suomen sähköntuotantomenetelmien, sekä koko sähköenergiajärjestelmän tarkastelu on ajankohtaista, sillä energiamurros on ollut viime vuosina ja tulee tulevaisuudessakin olemaan nopeaa. Uusiutuvat tuotantomenetelmät, tuuli- ja aurinkoenergia, ovat yleistyneet 2010-luvulla runsaasti. Ne ovat saavuttaneet tekniikaltaan tason, jolla ne pystyvät markkinaehtoisesti kilpailemaan muiden tuotantomenetelmien kanssa. Tuuli- ja aurinkovoima tulevat tulevaisuudessakin yleistymään Suomessa ja ne nähdään eri skenaarioissa keskeisinä ratkaisukeinoina fossiilisten tuotantomenetelmien korvaajina.

Sääriippuvaisten tuotantomuotojen yleistyminen asettaa kuitenkin koko sähköenergiajärjestelmälle niin teknisiä, kuin poliittisiakin haasteita. Tuuli- ja aurinkovoiman yleistymisen myötä tuotannon vaihtelevuus lisääntyy ja säädettävyyks heikkenee. Tämä edellyttää kysyntäjoustoon, energian varastointiin, sekä etenkin säätövoimaan liittyvien teknisten haasteiden ratkaisua, jotta uusiutuvien potentiaalia on mahdollista hyödyntää suuressa mittakaavassa.

Työssä lähdettiin määrittämään tuuli- ja aurinkovoiman tuotantopotentiaalia Suomen olosuhteissa, sekä selvittämään mitä teknisiä ja poliittisia haasteita liittyy uusiutuvien, ja heikosti säädettävien tuotantomuotojen yleistymiseen. Lisäksi työssä pyrittiin esittämään ratkaisuja lisääntyvästä tuotannon vaihtelevuudesta aiheutuvan säätövoiman tarpeen täyttämiseksi.

Tulokseksi saatiin vastaukset tutkimuskysymyksiin, jotka perustuvat eri tutkimuksissa esitettyihin tulevaisuuden skenaarioihin. Tuloksiin liittyy epävarmuutta, ottaen huomioon niiden perustamisen toisistaan eroaviin tutkimustuloksiin ja tulevaisuuden skenaarioihin. Nämä tekijät on huomioitu työn tuloskappaleessa, jossa on pyritty luomaan realistiset arviot tulevaisuuden tuotantopotentiaaleille ja teknologian kehittymiselle, huomioiden tulevaisuuden energiajärjestelmään vaikuttavat poliittiset ja teknologiset tekijät.

Avainsanat: tuulivoima, aurinkovoima, tuulienergia, aurinkoenergia, energiajärjestelmä, sähköenergiajärjestelmä, säätövoima, kysyntäjousto, energianvarastointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUULI- JA AURINKOVOIMAN TUOTANTOMENETELMÄT SUOMESSA.....	3
2.1 Tuulivoiman tuotanto.....	3
2.2 Aurinkovoiman tuotanto	6
2.3 Tuuli- ja aurinkovoiman tuotantomenetelmien erityispiirteet	8
3. TUULI- JA AURINKOVOIMAN NYKYTILANNE JA TULEVAISUUDEN SKENAARIOT SUOMESSA	10
3.1 Tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon nykytila Suomessa	11
3.1.1 Närpiön tuulipuistohanke 2019 ja Helsingin kaukolämpö -visio ...	14
3.1.2 Lempäälän aurinkosähkön tuotanto	15
3.2 Tuuli- ja aurinkovoiman tulevaisuuden potentiaali Suomessa.....	15
4. TUOTANNON KASVUN EDELLYTYKSET SUOMEN OLOSUHTEISSA.....	18
4.1 Poliittiset toimenpiteet ja niiden merkitys	18
4.2 Tekniset vaatimukset tuuli- ja aurinkovoiman lisäämiselle	19
5. TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI.....	21
6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	26
LÄHTEET	28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

GWh	Gigawattitunti
Wp	Sähköntuotannon nimellisteho
MW	Megawatti
TWh	Terawattitunti

A	pinta-ala	m^2
e	liike-energia	J
ρ	tiheys	$\frac{kg}{m^3}$
V	virtausnopeus	$\frac{m}{s}$
P	teho	W

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi valtioiden poliittista toimintaa ohjallaan kansainvälisillä sopimuksilla. Pariisin ilmastopuolitus vuodelta 2016, sekä Euroopan unionin vuoden 2030 ulottuvat ilmasto- ja energiapolitiikan linjaukset pyrkivät leikkaamaan kasvihuonekaasupäästöjä 40 % vuoden 1990 tasosta, ja näin rajoittamaan maapallon keskilämpötilan nousun alle 1,5 asteeseen esiteolliseen aikaan nähden. [1] Nämä linjaukset asettavat tavoitteet myös Suomen ilmasto- ja energiapolitiittisille toimille. Pääministeri Juha Sipilän hallituksen tavoitteet on kirjattu vuonna 2016 päivitettyyn energia- ja ilmastostrategiaan, jonka toimet tähtäävät uusiutuvan energian osuuden kasvattamiseen yli 50 %:iin loppukulutuksesta, sekä energiaomavaraisuuden kasvattaminen 55 %:iin vuoden 2030 mennessä. Strategian pidemmän aikavälin tavoitteena on saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2050 mennessä. [1] Tilastokeskuksen energian hankinta ja kulutus-tilastojen mukaan uusiutuvien osuus Suomen kokonaisenergiankulutuksesta vuonna 2018 oli 37 % [2].

Suomessa noin kolme neljännestä kasvihuonepäästöistä aiheutuu energian tuotannosta ja kulutuksesta, kun huomioidaan myös liikenteen käyttämä energia [1]. Suomen suurin energian loppukäyttäjä on teollisuus, toiseksi suurimpana loppukäyttäjänä on rakennusten lämmitys ja kolmantena liikenne [2]. Sähkönkulutuksen osuus Suomen kokonaisenergiankulutuksesta oli vuonna 2017 reilu viidennes. Yli puolet Suomen sähkönkulutuksesta kuluttaa energiantensiivi teollisuus, kuten metsä- ja metalliteollisuus, loppu jakautuu koti- ja maatalouksien, sekä julkisten palveluiden kulutukseen. [3]

Vuonna 2018 noin puolet Suomen sähköntuotannosta tuotettiin uusiutuvilla energianlähteillä, ja noin puolet lähteistä oli kotimaisia, hiilidioksidineutraaleja oli noin 80 % lähteistä [4]. Kuitenkin myös sähköntuotantoon kohdistuu muutospainetta ympäristöystävällisempään suuntaan, sillä koko Suomen energiantuotannon on uudistuttava, jotta ilmasto- ja energiapolitiittisten tavoitteiden toteutuminen mahdollistuu.

Tässä työssä käsitellään tuuli- ja aurinkovoiman roolia Suomen tulevaisuuden sähköenergian tuotannossa. Sähköntuotanto on Suomessa murroksessa uusiutuvien tuotantomenetelmien kasvattaessa osuuksiaan suhteessa muihin tuotantomenetelmiin [4]. Nämä tuotantomenetelmät, mukaan lukien tuuli- ja aurinkovoima, mahdollistavat Suomen sähköntuotannon kehittymisen ja fossiilisten tuotantomenetelmien korvaamisen tulevaisuudessa. Uusien teknologioiden käyttöönotto aiheuttaa teknisiä, sekä poliittisia haasteita ratkaistavaksi, jotta Suomen tulevaisuuden sähköenergiajärjestelmä olisi tehokas, toimintavarma ja ekologinen. Ajankohtaisuutensa vuoksi työ on rajattu käsittelemään juuri Suomea ja sähköenergiantuotantoa. Työssä pyritään selvittämään tuuli- ja aurinkovoiman roolia tulevaisuuden sähköntuotannossa vastaamalla seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Minkä suuruinen potentiaali tuuli- ja aurinkovoimalla on Suomen olosuhteissa?
- Mitä aurinko- ja tuulivoimatuotannon kasvattaminen Suomen olosuhteissa vaatisi poliittisessa ja teknisessä mielessä?
- Mikäli aurinko- ja tuulisähkön osuutta lisätään, mistä saadaan tarvittava säätöenergia?

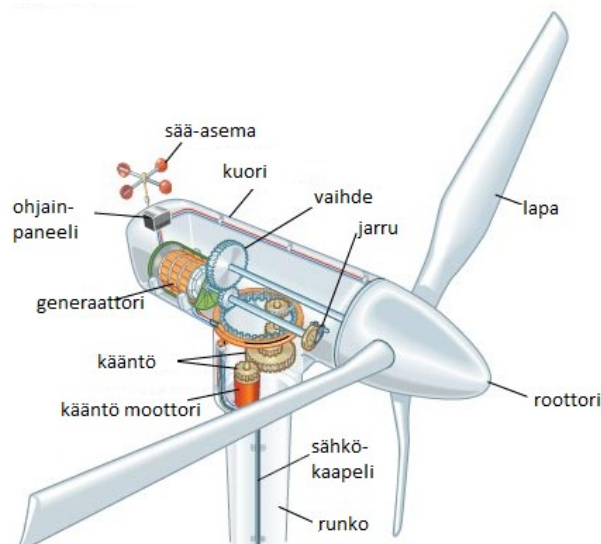
Ensimmäisen johdantoluvun jälkeen, työn toisessa luvussa, Tuuli- ja aurinkovoiman tuotantomenetelmät Suomessa, keskitytään tuotantotekniikoiden yleiskuvan havainnollistamiseen, ja Suomessa vallalla olevien tekniikoiden esittelyyn. Kolmannessa luvussa, Tuuli- ja aurinkovoiman nykytilanne ja tulevaisuuden skenaariot Suomessa, käsitellään tuuli- ja aurinkovoimaa Suomen sähköntuotantokentässä, sekä näiden tuotantomuotojen tulevaisuuden ennusteita tutkimusten valossa. Tässä luvussa pyritään avaamaan tutkimustietoa ensimmäisen tutkimuskysymyksen taustalta, *minkä suuruinen potentiaali tuuli- ja aurinkovoimalla on Suomen olosuhteissa*. Neljännessä luvussa, Tuotannon kasvun edellytykset Suomessa, käsitellään, *mitä poliittisia ja teknisiä toimia potentiaalın maksimointi Suomessa vaatii*, ja *mistä saadaan tarvittava säätöenergia, mikäli näiden osuutta kasvatetaan*. Neljäs luku käsittelee siis toisen ja kolmannen tutkimuskysymyksen aiheita. Viidennessä luvussa käsitellään tulokset ja analysoidaan niitä. Tulosten avulla pyritään vastaamaan edellä esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Kuudes luku kokoaa keskeisimmät johtopäätökset ja tiivistää työn sisällön yhteenvetoon.

2. TUULI- JA AURINKOVOIMAN TUOTANTOMENETELMÄT SUOMESSA

Tässä luvussa käsitellään tuuli- ja aurinkovoimatuotannon pääperiaatteet, sekä Suomessa yleisimmin käytössä olevat tuotantotekniikat. Tuuli- ja aurinkovoima ovat uusiutuvia energianlähteitä, ja niiden sääriippuvaisiin tuotantomenetelmiin liittyy ominaispiirteitä, jotka on huomioitava koko energijärjestelmän suunnittelussa.

2.1 Tuulivoiman tuotanto

Tuulienergian tuotannossa tuulen eli ilmapirtauksen liike-energia muutetaan tuulivoimalan turbiinissa sähköenergiaksi. Suomessa ja yleisestikin maailmalla teollisen mittakaavan, eli megawatti (MW) -kokoluokan, tuuliturbiineihin on vakiintunut vaaka-akseloitu kolmilapainen rakenne, eli HAWT-rakenne. Vaaka-akseloidussa tuulivoimalassa siivet pyörivät kohtisuorassa tuulen suuntaa vastaan. [5] On olemassa myös muita rakenteita, kuten pysty-akseloitu WAWT-rakenne, jossa siipien liike on tuulen liikesuunnan mukainen. Näistä esimerkkinä Savonius-voimalat, joita sovelletaan Suomessa yleisesti vain pienvoimaloina esimerkiksi kerrostalojen katoilla ja sääasemilla. [6] Alla esitetty tarkemmin Suomessakin yleisintä HAWT-rakennetta.



Kuva 1. Vaaka-akseloidun, HAWT-tuulivoimalan pääkomponentit. [5]

Nykyisissä kolmilapaisissa tuulivoimaloissa roottoria liikuttava voima on ilmapirtauksen siipiin aiheuttama nostevoima. Siivet ovat aerodynaamisesti muotoiltuja, ja muistuttavat

toimintaperiaatteeltaan lentokoneen siipeä. Moderneissa tuulivoimaloissa roottorin pyörimisnopeutta, sekä siipien lapakulmaa, eli siiven kulmaa suhteessa tuuleen, muutetaan olosuhteiden mukaan mahdollisimman taloudelliseksi. [6]

Tuulen liike-energia (e) saadaan yhtälöstä,

$$e = \frac{1}{2} \rho V^2, \quad (1)$$

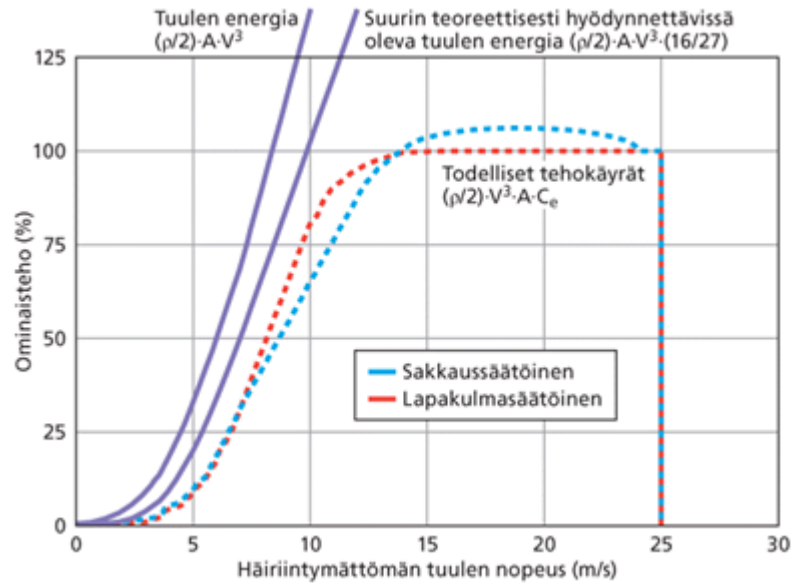
ilman tiheyden (ρ) ja sen virtausnopeuden (V) avulla. Kun tuulivoimalan tapauksessa käsitellään tuulen pinta-alaan kohdistamaa voimaa, on pinta-ala (A) voimalan lapojen pyörimisliikkeen kattava ala. Näin ollen tuulen nopeuden teho (P), pinta-ala kohti, saadaan yhtälöstä,

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 A, \quad (2)$$

. [6] Yhtälön 2 perusteella voimalan tuotto on suoraan verrannollinen siipien pyyhkäisy-pinta-alaan, sekä ilman tiheyteen. Ilman tiheys kasvaa lämpötilan laskiessa, mikä on sähköntuotannon kannalta hyvä asia, sillä kylmänä vuodenaikana, jolloin sähkön kysyntä on suurta, myös voimalan tuotto on tehokkaampaa. Voimalan tehon riippuvuus tuulen nopeuden kolmannesta potenssista aiheuttaa sen, että pienikin muutos tuulen nopeudessa aikaansaa suuren muutoksen tehossa. Tämän vuoksi voimaloita sijoitetaan mahdollisimman tuulisille alueille, joita Suomessa ovat lähinnä rannikkoseudut. Tuulivoimalan roottorit muuttavat ilman virtausta, ja aiheuttavat turbulentin virtauksen siipien taakse. Näin virtaavaan ilmaan syntyy paine-ero siiven etu- ja takapuolelle. Tämän painehäviön vuoksi voimalan ei ole teoriassakaan mahdollista hyödyntää koko ilmavirtauksen energiaa. Tuulivoimalan tehon maksimi arvon on määrittänyt Betz (1926) seuraavasti,

$$P_{max} = \frac{16}{27} \frac{\rho}{2} V^3 A, \quad (3)$$

. [6] Tämän yhtälön perusteella ideaalinen turbiini pystyy hyödyntämään 16/27 eli vajaa 60 % tuulen kineettisestä energiasta. Tätä ilmiötä havainnollistetaan tuulivoimalan tehokäyrillä, eli tehon ja tuulen riippuvuutta kuvaavilla käyrillä, alla olevassa kuvassa.



Kuva 2. Nykyaikaisen tuulivoimalan tehokäyrä [6]

Kuvassa vaaka-akselilla on tuulen nopeus ($\frac{m}{s}$) ja pystyakselilla voimalan ominaisteho (%), eli hetkellinen tuotettu teho suhteessa voimalan maksimitehoon. Kuvassa 2 vasemmanpuoleisimpana käyränä on kaavan 2 mukainen tuulen teho, sen oikealla puolella kaavan 3 mukainen teoreettinen maksimiteho, sekä näiden oikealla puolella kahden eri tyyppisen tuulivoimalan tehokäyrät. Kuvasta nähdään, että nykyinen tuulivoima tekniikka mahdollistaa melko tehokkaan liike-energian hyödyntämisen, sillä tehokäyrät ovat lähellä teoreettisen maksimin käyrää. Nykyisten tuulivoimaloiden roottorihyötysuhteet ovat maksimissaan noin 50 %. Eli tuulen liike-energiasta saadaan hyödynnettyä parhaimmillaan noin puolet. Virtauksen turbulentsisuuden lisäksi tehohäviöitä syntyy esimerkiksi voimansiirrossa. [7]

Tuulivoimala käynnistyy tuulen nopeuden ollessa noin $3 \frac{m}{s}$ ja saavuttaa maksimitehonsa noin $12 \frac{m}{s}$ tuulessa. Kovalla tuulella noin $25 \frac{m}{s}$ tuulivoimala pysähtyy laiterikkojen välttämiseksi. Arvot on luettu kuvan tehokäyristä, ja ne ovat vain esimerkkiarvoja, sillä eri voimalatekniikoiden välillä on eroavaisuuksia. Ilman tiheyden vaikuttaessa tuotettuun tehoon, myös virtaavan ilman lämpötilalla on merkitystä tehokäyrään. Yleisesti tehoa määritettäessä käytetään standardiarvoja tiheydelle 15 asteen lämpötilassa, mutta esimerkiksi kuukausittaisen tehoa ennustettaessa voidaan teho arvioida käyttäen ilman tiheydelle kuukausittaisen keskilämpötilan mukaista arvoa. Myös voimalan lapoihin pakkasäällä kertyvä jää vaikuttaa voimalan hyötysuhteeseen heikentävästi. [6]

Tuulivoimatekniikka on kehittynyt vauhdilla tuulivoiman yleistyessä tällä vuosituuhannella. Voimaloiden tehot ovat kasvaneet napakorkeuksien ja pyyhkäisyypinta-alojen kasvaessa. Tekniikan kehittyminen on edesauttanut myös hyötysuhteiden parantumista. [5] Nykyisin Suomen suurimmat voimalat ovat jo 5 MW suuruisia, ja tulevaisuudessa tehoa pystytään todennäköisesti vielä kasvattamaan tekniikoiden muuttuessa taloudellisimmiksi. Yleisesti tuulivoimalat sijoitetaan useamman voimalan ”tuulipuistoihin”, ympäristöltään suotuisille alueille. Sijoituspaikkansa perusteella voimalat voidaan jakaa meri- ja maatuulivoimaloihin. Merituulivoima on Suomessa vielä harvinaista sen rakentamiseen liittyvien teknisten haasteiden ja kustannusten takia. Siihen liittyy kuitenkin etuja, kuten merialueen tuulusuus ja käytettävissä oleva tila. Tästä huolimatta maatuulivoima on Suomessa toistaiseksi yleisempi ratkaisu vakiintuneen tekniikkansa, ja sitä kautta alhaisempien hankekustannusten ansiosta. [7]

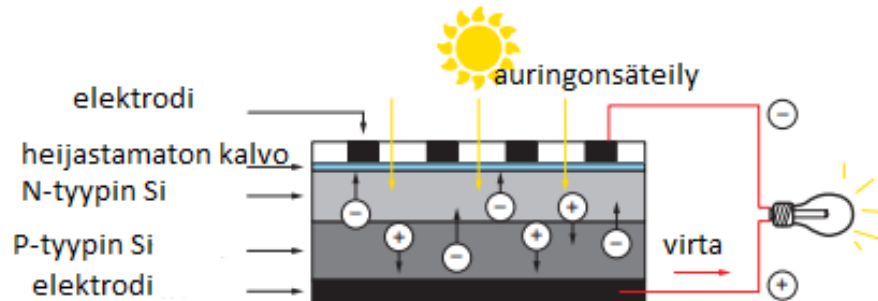
2.2 Aurinkovoiman tuotanto

Aurinko tuottaa fuusioreaktiossaan energiaa, jota säteilee maapallolle 14,5 sekunnissa koko ihmiskunnan vuorokaudessa kuluttaman energian verran. Aurinkoenergian tuotannossa hyödynnetään auringonsäteilyn fotonien kuljettamaan energiaa muuttamalla se sähköksi tai lämmöksi. Auringonsäteily jaetaan suoraan auringosta tulevaan säteilyyn, sekä hajasäteilyyn, joka heijastuu esimerkiksi pilvistä tai maasta. [8]

Suomessa sijainti pohjoisilla leveysasteilla aiheuttaa sen, että auringon säteily osuu maan pinnalle viistommassa kulmassa, kuin lähempänä päiväntasaajaa. Tämä johtaa siihen, että hajasäteilyn eli esimerkiksi maasta tai lumesta heijastuvan säteilyn osuus on suhteellisesti pienempiä leveysasteita suurempi. Etelä Suomessa hajasäteilyn osuus kokonaissäteilystä on noin puolet. Tämä osaltaan vaikuttaa siihen, että Suomessa yleisin aurinkovoiman tuotantotekniikka sähköntuotannossa on aurinkopaneeliasennus esimerkiksi keskittävien voimaloiden sijaan. Niiden toiminta perustuu enemmän auringon suoraan säteilyyn, minkä osuus Suomessa on pienempi. Myöskään aurinkoa seuraavat järjestelmät eivät ole toistaiseksi taloudellisesti kannattavia Suomessa. [8]

Aurinkopaneelit muodostuvat toisiinsa kytketyistä aurinkokennoista. Nykyään käytettävien aurinkopaneelien toiminta perustuu puolijohdemateriaaleihin, jotka sijoittuvat ominaisuuksiltaan sähkövirtaa kuljettavien metallien ja virran kulkua eristävien epämetallien

välimaastoon. Puolijohdemateriaalit mahdollistavat valosähköisen ilmiön, mikä aikaansaa sähkövirran tuotannon aurinkopaneeleissa. Vielä nykyään yleisimmissä, ensimmäisen sukupolven piikide-kennoissa, puolijohdemateriaalina on pii (Si). [9]



Kuva 3. Piikide-kennon toimintaperiaate [9].

Kuvassa 3 havainnollistetaan valosähköisen ilmiön tapahtumista piikide-kennossa. Sama toimintaperiaate pätee muistakin puolijohdemateriaaleista koostuville kennoille. Kennot rakentuvat N- ja P-tyypin puolijohdekerroksista. Näihin puolijohdekerroksiin on saostettu eri alkuaineita siten, että kerrokset sisältävät eri määrät elektroneja. N-tyypissä enemmän kuin P:ssä. Auringonsäteilyn osuessa kennoon tapahtuu valosähköinen ilmiö, jossa säteilyn fotonien energia irrottaa elektroneja N-kerroksesta, josta ne kulkeutuvat P-kerrokseen. Näin ollen N-puolijohdekerrokseen syntyy positiivinen varaus, ja P varautuu negatiivisesti. Elektronien liikkeestä syntyvät aukot puolestaan toimivat positiivisen varauksen kuljettajina. Nyt syntyneessä sähkökentässä elektronit kulkevat N-puolelta P-puolelle, myös ulkoista virtapiiriä pitkin, jolloin johtimeen siirtyy sähkövirta. Viime vuosina nopeasti kehittyneitä ohutkalvokennoja, joiden toiminta perustuu ohuiden valoherkkien ainekerrosten asettamiseen pohjamateriaalille, kuten lasille tai teräkselle, kutsutaan toisen sukupolven puolijohdekennoiksi. Uusia tekniikoita on runsaasti kehitteillä, ja tulevaisuudessa kolmannen polven kennoissa valosähköinen ilmiö perustuu puolijohdemateriaalien sijaan, esimerkiksi kemiallisiin reaktioihin. [9]

Aurinkopaneelien hyötysuhde lasketaan yksinkertaisesti paneelin tuottaman sähkötehon, ja paneeliin osuneen säteilytehon suhteena. Hyötysuhde nykyisillä puolijohdekennoilla on yleisesti 10-15 % luokkaa. Paneelit tuottavat tasasähköä, jota sähkölaitteet voivat käyttää sellaisenaan. Niiden tuottama tasasähkö voidaan myös vaihtosuunnata vaihtosuuntaajalla, eli invertterillä. Invertteri kytketään paneelien muodostaman sähköverkon, ja valtakunnan verkon välille. Tasajännitteinen paneelien tuottama virta vaihtosuunnataan, ja muutetaan muotoon, jossa se voidaan syöttää takaisin sähköverkkoon. [9]

Invertterin käyttö mahdollistaa ylijäämäsihkon myymisen takaisin sähkön tuottajille. Tulevaisuudessa kuluttaja tulee todennäköisesti olemaan entistä aktiivisempi toimija niin sähkön ostajana, kuin tuottajana. Kolmas yleinen paneelien tuottaman sähkön käyttötapa on varastoida se akkuihin myöhempää käyttöä varten.

2.3 Tuuli- ja aurinkovoiman tuotantomenetelmien erityispiirteet

Nopeasti Suomessa yleistyneet uusiutuvat energiantuotantomenetelmät, tuuli- ja aurinkovoima, poikkeavat monelta osin muista energiantuotantomenetelmistä. Tuuli- ja aurinkovoima ovat sääriippuvaisia. Näin ollen niillä tuotetun energian määrään ei pystytä vaikuttamaan vastaavasti, kuin perinteisempiin tuotantomenetelmiin voimalaitoksen säädöllä. Sääriippuvaisten tuotantomenetelmien tuotantoa pyritään ennakoimaan laatimalla sääennusteiden pohjalta tuuli- ja aurinkovoimaennusteita [8]. Sääriippuvaisten ja heikosti säädettävien tuotantomenetelmien osuuden kasvattaminen on otettava huomioon koko Suomen sähköenergiajärjestelmän kehittämisessä. Tästä tarkemmin työn luvussa 4.

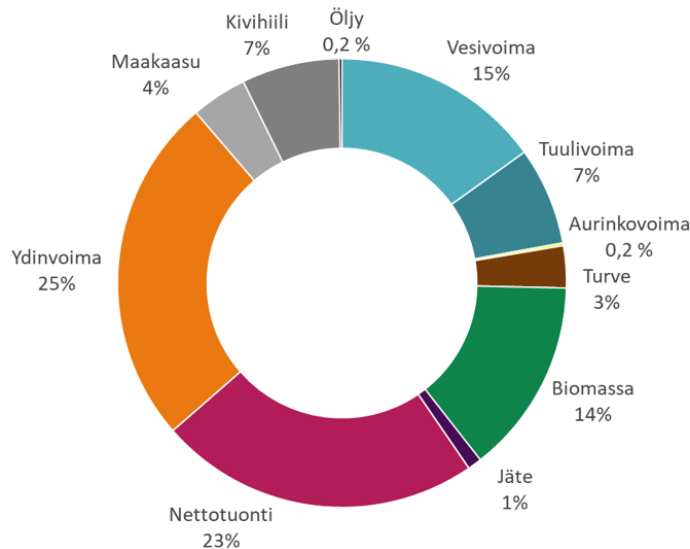
Tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto on jaksollista ja vaihtelevaa. Eroja tuotannossa on niin vuorokaudenaikojen, kuin vuodenaikojen välillä. Suomessa tuulisuus jakautuu melko tasaisesti eri kuukausille, painottuen kuitenkin siten, että talvikuukausina on keskimäärin tuulisempaa kuin kesällä [10]. Tämä on energiantuotannon kannalta hyvä asia, sillä kylmempänä vuodenaikana sähkönkin kysyntä kasvaa. Aurinkoenergian suhteen tilanne on päinvastainen. Aurinkoisuus jakautuu tuulta voimakkaammin eri vuodenaikojen välille, ja talvikuukausina auringonsäteilyn määrä vähenee murto osaan kesän säteilymäärästä [8]. Aurinkovoiman tuotannossa myös vuorokauden sisäinen vaihtelu on tuulivoimaa huomattavasti suurempaa, sillä pimeään yöaikaan aurinkoenergian tuotto laskee käytännössä nolnaan.

Tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto poikkeavat muista Suomen energiantuotantomenetelmistä myös kulurakenteeltaan, ja päästöjen muodostumisen osalta. Tuuli- ja aurinkovoimajärjestelmät ovat suhteellisen suuria investointeja rakentamisen tai hankinnan osalta. Kun tekniikka on valmiina laskevat tuotantokustannukset pieniksi muihin tuotantomenetelmiin verrattuna. [6] Käytännössä ainoat kustannukset ovat laitteistojen huollosta ja ylläpidosta aiheutuvia, sillä esimerkiksi energiantuotannon raaka-ainekustannuksia ei ole. Tämä osaltaan vaikuttaa siihen, että tuuli- ja aurinkovoimaa tuotetaan pääsääntöisesti

aina olosuhteiden salliessa maksimikapasiteetilla, eikä tuotannon säätäminen ole aina-kaan toistaiseksi järkevää [1]. Vastaava ilmiö pätee myös syntyviin päästöihin. Syntyvät päästöt aiheutuvat pääosin tekniikan valmistamisessa ja rakennusvaiheessa. Itse energiantuotanto on päästötöntä ja syntyvä energia puhdasta uusiutuvaa energiaa.

3. TUULI- JA AURINKOVOIMAN NYKYTILANNE JA TULEVAISUUDEN SKENAARIOT SUOMESSA

Suomen sähköenergiajärjestelmälle on ominaista tuotannon monipuolisuus ja useat merkittävät tuotantomuodot. Suurimpana sähköntuottajana Suomessa on ydinvoima, jolla tuotetaan noin neljännes koko sähkön hankinnasta. Toiseksi suurimmat osuudet hankinnasta, noin viidenneksen osuuksillaan kattavat teollisuuden- ja kaukolämmön sähkön- ja lämmön yhteistuotanto, sekä nettotuonti ulkomailta [3]. Alla oleva kuva havainnollistaa Suomen sähkön hankintaa, eli tuotantoa ja tuontia.



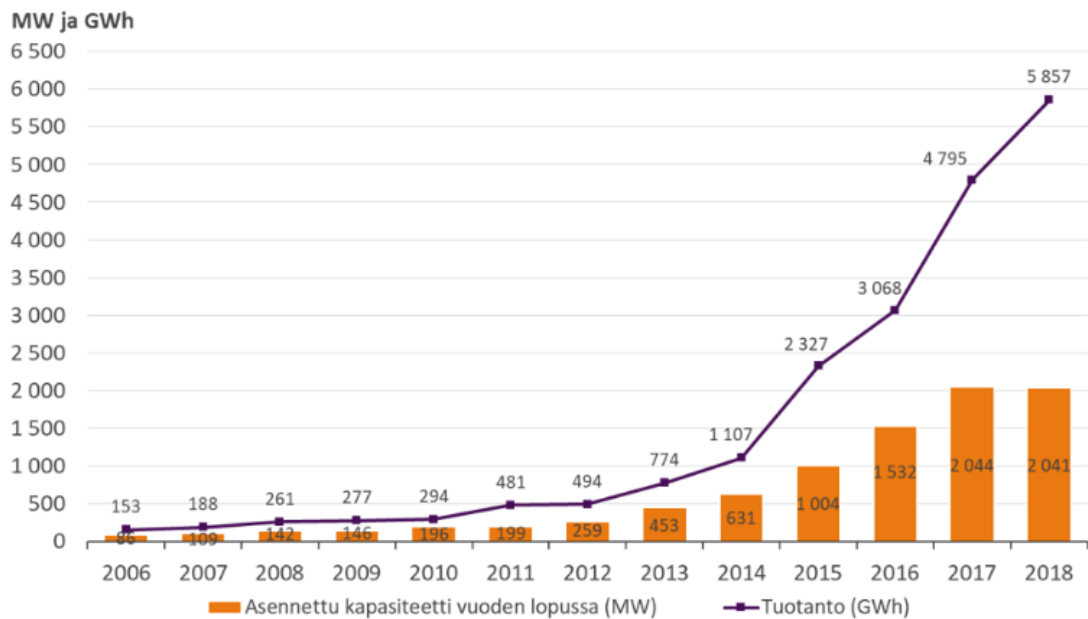
Kuva 4. Suomen sähköntuotanto energialähteittäin, vuonna 2018 [3].

Suomen sähköntuotanto on osa Norjan, Ruotsin ja Tanskan muodostamaa Pohjoismaista sähkömarkkinaa. Sähkön tuottajat ja suurkuluttajat käyvät kauppaa sähköstä, jolloin hinta määräytyy kysynnän ja tarjonnan mukaan, ikään kuin pörssissä. Näin muodostuu ajojärjestys eri tuotantomuotojen välille. Esimerkiksi tilanteessa, jossa sähkön kysyntä on vähäistä ja hinta alhaalla, vain tuotantokustannuksiltaan edullisimmilla tuotantomuodoilla, kuten vesivoimalla, tai vaikeasti säädettävillä, kuten ydinvoimalla ja tuulivoimalla, tuotetaan sähköä. Sähkön kysynnän ja hinnan kasvaessa myös muilla tuotantomuodoilla on kannattavaa tuottaa sähköä. Suomessa sähköntuotantoa Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla hallinnoi Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid, joka ylläpitää tarvittavaa tehoreservijärjestelmää, ja huolehtii siitä, että kysyntäpiikeissäkin riittävä energiantuotanto on turvattu. [11] Tuuli- ja aurinkovoiman yleistyminen vaikuttavat tuotantomuotojen markkinaehtoiseen ajojärjestykseen Suomen sähköenergiatuotannossa.

3.1 Tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon nykytila Suomessa

Tuuli- ja aurinkovoima ovat yleistyneet Suomessa 2010-luvulla vauhdilla. Tuulivoiman kapasiteetin kasvu on ollut viime vuosina kaikista sähköntuotantomuodoista voimakkainta. [4] Tuulivoima on jo nykyisellään varteenotettava sähköntuotantomuoto, ja uusia hankkeita on rakenteilla sekä suunnitteilla [12]. Niin ikään aurinkovoima on yleistynyt voimakkaasti viime vuosina. Sen osuus Suomen sähköntuotannosta on kuitenkin edelleen marginaalinen, ja se toimii lähinnä yksittäisten talouksien energiaratkaisuna, joitakin teollisen mittakaavan pilottihankkeita on Suomessa aurinkovoiman tuotannosta jo toteutettu [4].

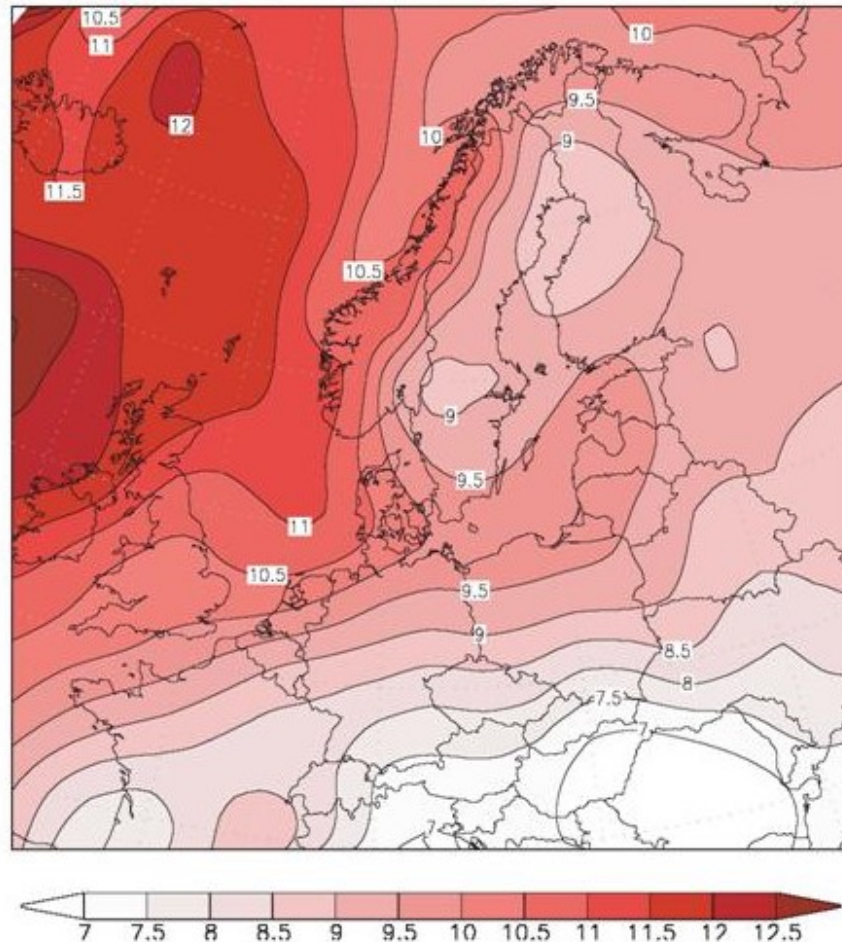
Vuoden 2018 lopussa asennettua tuulivoimakapasiteettia oli 2041 MW ja vuotuinen sähköntuotanto oli 5857 Gigawattituntia (GWh) eli vajaa 6 Terawattituntia (TWh). Tämä on reilu kolmannes Olkiluoto 2 ydinvoimayksikön vuosituotosta. Vuonna 2018 tuulivoimalla tuotettiin 6,7 % Suomen vuotuisesta sähkönkulutuksesta. [12] Tuulivoimatuotannon kehittymistä Suomessa 2000-luvulla havainnollistetaan alla olevassa kuvassa.



Kuva 5. Suomen tuulivoimakapasiteetin ja tuotannon kehitys 2000-luvulla [3].

Energiateollisuuden julkaisema tuulivoimatuotannon ja -kapasiteetin kuvaaja havainnollistaa tuulivoiman runsasta yleistymistä Suomessa viime vuosina. Toistaiseksi eniten tuulivoimaa Suomeen rakennettiin vuonna 2016, jolloin kapasiteetti kasvoi 570 MW 182:n uuden voimalan myötä. [13] Vuoden 2017 lopulla Suomessa oli 700 tuulivoimalaa [12]. Rakentaminen pysähtyi kuitenkin vuodeksi 2018 tukijärjestelmän uudistuessa kohti markkinaehtoisempaa energiantuotannon rakentamista [13]. Nyt näyttäisi kuitenkin siltä,

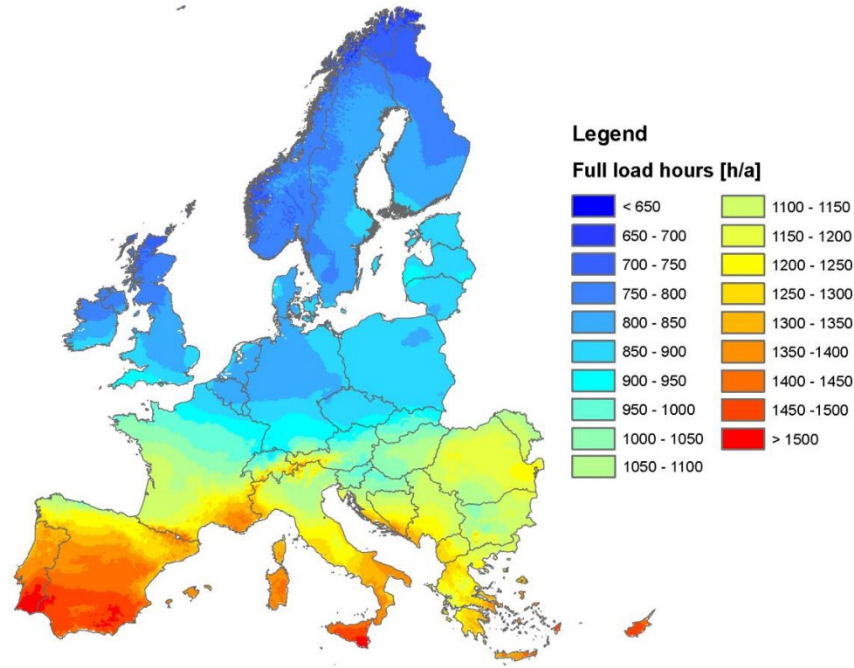
että tuulivoimakapasiteetti jatkaa lähivuosina kasvuaan käynnissä olevien hankkeiden myötä. Suomen tuulivoimayhdistyksen tietojen mukaan Suomessa oli vuoden 2019 alussa suunnitteilla olevia tuulivoima hankkeita 16 500 MW verran. Samaan aikaan rakenteilla olevia tuulivoimainvestointeja oli 10 kappaletta, yhteensä noin 450 MW:n tehon verran. [12]



Kuva 6. Keskimääräisen Geostrofisen tuulen, jakauma Euroopassa [10].

Kuva 6 havainnollistaa tuulisuuden jakautumista Euroopassa noin kilometrin korkeudesta mitatun geostrofisen tuulen perusteella. Tuulisuus Euroopassa on voimakkainta Atlantin ja Pohjanmeren rannikkoseuduilla, ja vähäisintä Keski- ja Etelä- Euroopassa. Suomessa keskimääräinen geostrofisen tuuli on 9-9,5 $\frac{m}{s}$, kun taas Etelä- Euroopassa se jää alle 8:aan $\frac{m}{s}$. [10] Suomessa otollisimmat olosuhteet tuulivoiman tuotannolle sijaitsevat rannikkoseuduilla, jonka vuoksi suurin osa Suomen tuulivoimasta painottuu länsirannikolle, etenkin Pohjois-Pohjanmaalle. Siellä sijaitsee myös Suomen suurin tuulipuisto, 34 voimalan Metsälän tuulipuisto Kristiinankaupungissa. [13] Voimalatekniikan

kehittyminen ja tuotannon kustannustehokkuuden parantumisen myötä uusia hankkeita on suunnitteilla laajemmin koko maahan. Suunnitteilla olevista hankkeista noin viidenes, 3500 MW, on suunnitteilla merelle. [12] Suomen tuulivoimahankkeet ovat pääosin suomalaisomistuksessa. Vuonna 2017 hankkeiden kotimaisuusaste omistuksen osalta oli 70 %. Niin ikään käytettävä tekniikka on eurooppalaista. [13]



Kuva 7. Aurinkoenergian maksimituoton vuotuiset tunnit Euroopassa [14].

Aurinkoenergian tuotannon kannalta oleellista auringonsäteilyn määrää havainnollistetaan kuvassa 7. Säteily jakautuu Euroopassa siten, että etelä Euroopassa vuotuiset maksimituoton tunnit optimaalisestien suunnatuille aurinkopaneeleille ovat lähellä 1500:aa tuntia, kun taas Pohjoisempana Skandinaviassa vuotuiset maksimituoton tunnit jäävät lähes puolet pienemmiksi. [14] Karttaa tarkastellessa havaitaan kuitenkin, että maksimituottotuntien määrä on Suomessa suunnilleen samalla tasolla, kuin Saksassa tai Iso-Britanniassa huolimatta huomattavasti Pohjoisemmasta sijainnista. Auringonsäteilyn vuotuinen jakauma vuodenaikojen välillä puolestaan on suurempaa, mitä Pohjoisemmaksi mennään.

Sähköverkkoyhtiöiden mukaan sähköverkkoon kytketyn aurinkoenergian määrä vuoden 2017 lopussa oli 80,4 MW, ja kasvua edelliseen vuoteen 2016 oli 43 MW. Vuonna 2018 kasvun oletettiin jatkuvan samanlaisena [15]. Aurinkoenergia yleistyy Suomessa vauhdilla, ja se on kaksinkertaistanut kapasiteettinsa viime vuosina. Sen osuus koko Suomen

sähköntuotannosta on kuitenkin edelleen prosentin kymmenesosien luokkaa. Aurinkoenergian tuotannon arviointiin lisää epävarmuutta se, että osaa aurinkovoimasta ei ole kytketty sähköverkkoon. Suomessa aurinkoenergiaa rakentavat niin yksityiset-, teolliset-, kuin kaupalliset tahotkin. Suomen suurin aurinkovoimala vuonna 2017 oli 3,6 MW:n voimala teollisuusalueella Nurmossa. Suuri osa suuremman mittakaavan voimaloista tuottaa energiaa omistajien omaan käyttöön, sillä kaupallinen sähköntuotanto aurinkovoimalla on vielä haastavaa. [15] Lähivuosina aurinkovoiman yleistymistä saattaa Suomessa edistää suurten liikeketjujen ja julkisten tahojen kiinnostus aurinkovoiman asennukseen. Uusiutuva aurinkoenergiantuotanto tulee tulevaisuudessa osaksi yhtiöiden ekologisemman imagon luontia.

3.1.1 Närpiön tuulipuistohanke 2019 ja Helsingin kaukolämpö -visio

Vuonna 2019 tuulivoiman rakentaminen käynnistyi uuden tukijärjestelmän alaisuudessa. Tarkastellaan yhtä tänä vuonna käynnistynyttä hanketta hieman tarkemmin. Kyseessä on vuonna 2019 alkavista 10:stä rakennushankkeesta suurin, Haapajärvelle rakentuva 24:n voimalan ja noin 100 MW:n tuulipuisto [12]. Tuulipuistohankkeen tilaajana on saksalaisomisteinen globaalisti toimiva Luxcara-sijoitusyhtiö, joka investoi uusiutuvan energian saralla [16]. Hankkeen toimittaa niin ikään saksalainen maailmanlaajuisesti uusiutuvan energian hankkeita toteuttava ABO Wind -yhtiö. Yhtiö on toteuttanut Haapajärven kuntaan jo aiemmin vuosina 2015 ja 2017 30 MW:n edestä tuulivoimaa. Nyt käynnistyneen 24 voimalan hankkeen on määrä valmistua ja kytkeytyä verkkoon kesällä 2020. ABO Windin mukaan uuden tukijärjestelmän alainen hanke on osoitus tuulivoiman mahdollisuudesta menestyä markkinaehtoisesti energiantuotannossa. [17] Haapajärven hanke on vain yksi esimerkkitapaus. Käynnissä ja suunnitteilla olevia hankkeita tarkasteltaessa Suomenkin sähkömarkkinoiden globalisoituminen näkyy ulkomaisina hankkeiden tilaajina ja toimittajina kotimaisten toimijoiden lisäksi [12].

Toinen esimerkki tuulivoiman roolista Suomen tulevaisuuden energiaratkaisuissa on Wärtsilän visio Helsingin kaukolämmöntuotannon toteuttamisesta. Suuri osa Helsingin kaukolämmöstä tuotetaan toistaiseksi fossiilisesti hiilellä, ja järjestelmää ollaan uusi-
massa lähivuosina ympäristöystävällisemmäksi. Wärtsilän visiossa on kyse yhtiön omasta näkemyksestä, miten kaukolämpöjärjestelmän energiantuotanto olisi toteutettavissa taloudellisesti ja ympäristöystävällisesti. Wärtsilän energiajärjestelmämallissa kivi-

hiilituotanto korvattaisiin tuulisähköllä ja lämpöpumpuilla. Näin kaukolämmön hiilidioksidipäästöt vähenisivät 90 %. Lämpöpumput saisivat sähkönsä tuulivoimasta ja lämmönlähteensä datakeskusten hukkalämmöstä sekä merivedestä. Tuulisähkön saatavuuden vaihtelevuus ratkaistaisiin lämpövarastoilla sekä Wärtsilän kaasumootorikäyttöisillä voimalaitoksilla. [18] Visio hyödyntää heidän omia teknologioitaan, eikä suinkaan ole ainoa vaihtoehto Helsingin tulevaisuuden kaukolämmön tuotantoon, mutta se toimii esimerkiksi tuulivoiman vartenotettavuudesta tulevaisuuden energiaratkaisuissa.

3.1.2 Lempäälän aurinkosähkön tuotanto

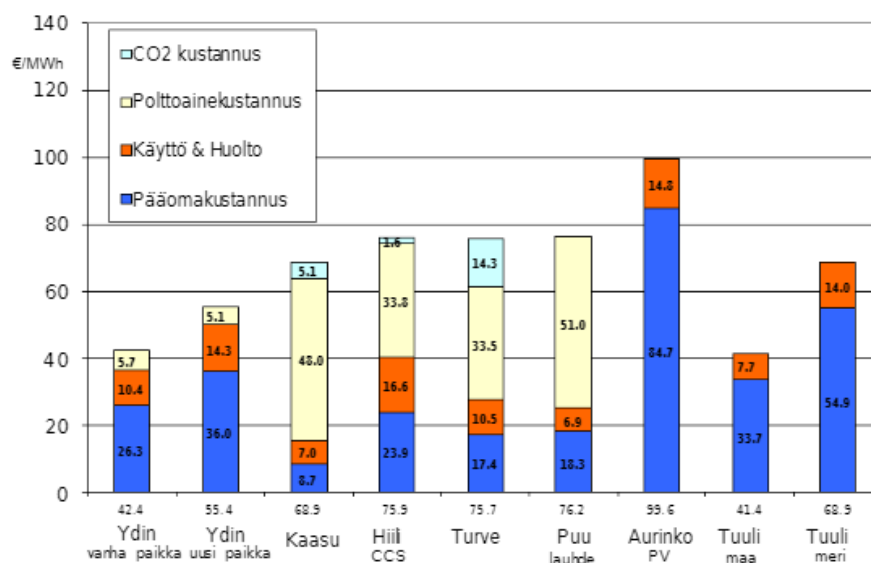
Viime vuosina teollisen mittakaavan aurinkoenergiaratkaisut ovat yleistyneet Suomessa [15]. Eräs esimerkki suuren mittakaavan aurinkoenergiaratkaisusta on Pirkanmaalle Lempäälään valmistuva nimellisteholtaan 2000 Kilowatin (kWp:n) Lemene-hanke. Hankkeen tilaajan on Lempäälän Energia ja toteuttajana Solarigo Systems Oy. Hankkeen tavoitteena on toteuttaa kauppakeskus Ideaparkin ja sen ympärillä olevien liikekiinteistöjen energiatarpeisiin energiaomavarainen mikroverkko. Verkon energiantuotanto toteutetaan kaasumootoreilla, aurinkovoimalla, polttokennoilla ja akustoilla. Maa-asenteinen aurinkovoimala koostuu noin 6000 paneelista, ja niiden vuotuisen energiantuoton arvioidaan olevan noin 1800 MWh, mikä vastaa noin neljännessä modernin tuulivoimalan vuosituotosta. Näiden aurinkovoimaloiden on määrä valmistua vuonna 2019 ja ne kattavat puolet Lemene-hankkeen 4000 kWp:n aurinkoenergiasta. [19]

3.2 Tuuli- ja aurinkovoiman tulevaisuuden potentiaali Suomessa

Potentiaalia eli tulevaisuuden tuotantomahdollisuuksia ja tuotannon suuruutta arvioitaessa on huomioitava monia tekijöitä. Tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto on sääriippuvaista, joten on aiheellista tarkastella Suomen tuotanto-olosuhteiden vaikutusta potentiaaliin. Edellä esitetyn tuulisuuskartan perusteella Suomessa keskimääräinen tuuli noin kilometrin korkeudessa on suurempi kuin Keski- ja Etelä-Euroopassa, mutta pienempi kuin Atlantin ja Pohjanmeren rannikoilla, esimerkiksi Tanskassa. [10] Auringonsäteilyä tarkasteltaessa Suomen vuotuinen auringonsäteilyn määrä on Etelä-Suomessa Iso-Britannian tai Pohjois-Saksan tasolla [14]. Vaakasuoralle pinnalle osuvan säteilyn määrä Etelä-Suomessa on noin 1000 kWh/m² ja Pohjois-Suomessa noin 800 kWh/m². Paneelien optimaalinen suuntaaminen 45 asteen kulmassa etelään kasvattaa säteilyn määrää noin 20-30 %. [8] Näiden tietojen valossa niin tuuli- kuin aurinkovoimankin tuotanto-olosuhteet

Suomessa eivät ole merkittävästi heikommat kuin esimerkiksi Pohjois-Saksassa tai Tanskassa. Tuotanto-olosuhteet mahdollistavat siis Suomen tuotantopotentiaalin ja kapasiteetin kasvun tulevaisuudessa.

Eräs merkittävä potentiaaliin vaikuttava tekijä on tuotantokustannusten kilpailukykyisyys muihin tuotantomuotoihin nähden. Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston tutkimusryhmä selvitti vuonna 2017 sähköntuotannon perusvoimalaitosten sähköntuotantokustannuksia [20]. Alla oleva kuvaaja esittää eri tuotantotyyppien sähköntuotantokustannuksia päästökaupan huomioiden.



Kuva 8. Sähköntuotantokustannukset päästöoikeuden hinnalla 15€/tCO₂. [20]

Kuvan 8 kuvaaja havainnollistaa eri tuotantomuotojen kulurakennetta, ja kunkin menetelmän sähköntuotantokustannusta (€/MWh). Aurinko- ja tuulivoimassa suurin osa kustannuksista koostuu pääomakustannuksista, kun taas muissa tuotantomenetelmissä on polttoainekustannuksia, jotka yleisesti muodostavat suurimman osan sähköntuotannon kustannuksista. [20] Tutkimuksen mukaan maatuulivoima on halvin sähköntuotantomuoto yhdessä ydinvoiman kanssa. Aurinkoenergia sen sijaan on edelleen hintavin sähköntuotantomuoto laitoksen tehoon nähden suurten pääomakustannusten takia. Tulevaisuudessa päästöoikeuksien ennustetaan kasvavan, jolloin päästöttömät tuotantomuodot, tuuli-, aurinko-, sekä ydinvoima halpenevat suhteessa muihin menetelmiin [20]. Näin ollen tuulivoima on jo nykyisellään kustannuksiltaan kilpailukykyinen tuotantovaihtoehto, mikä osaltaan lisää tuulivoiman tulevaisuuden tuotantopotentiaalia Suomessa. Aurinkovoiman kustannukset ovat myös lähentyneet muita tuotantomenetelmiä, ja tekniikan yleistyessä hankintakustannusten odotetaan tulevaisuudessakin laskevan [15].

Vuonna 2016 laaditun Suomen energia- ja ilmastostrategian tavoitteena on kasvattaa tuuli- ja aurinkovoiman osuus 7-9:ään TWh, skenaariosta riippuen vuoteen 2030 mennessä. Perusskenaariossa tuulivoiman tuotanto vuonna 2030 on 6 TWh ja aurinkovoiman 0,7 TWh. [1] Aurinkovoiman osuus perusskenaariossa olisi alle 1 TWh vuosituoton verran, eli suunnilleen prosentti koko Suomen sähköntuotannosta. Tämä tarkoittaisi nykykapasiteetin moninkertaistumista, mikä on hyvinkin mahdollista, sillä aurinkoenergialla nähdään olevan merkittävä lisäyspotentiaali eri kiinteistöissä. [1] Toistaiseksi se on kuitenkin kannattavinta lähinnä verkosta ostettavan sähkön korvaajana teollisen mittakaavan tuotannon sijaan. Energiastrategian tavoitteita voidaan pitää melko maltillisina varsinkin tuulivoiman osalta, kun otetaan huomioon nykyinen kapasiteetti ja suunnitteilla olevat hankkeet [12].

VTT:n vuonna 2012 teettämän raportin mukaan tuuli- ja aurinkovoiman osuus Suomen sähköntuotannosta voi ylittää 20:een % vuoteen 2050 mennessä [21]. Sähköntuotannon ollessa nopeassa murroksessa näkemykset tulevaisuuden potentiaalista muuttuvat nopeasti, ja eri skenaariot poikkeavat toisistaan. Tuoreimmat skenaariot arvioivat tuuli- ja aurinkovoiman potentiaalin keskimäärin suuremmaksi kuin vielä muutama vuosi sitten, tuuli- ja aurinkovoima teknologioiden sekä tuotantomäärien viime vuosien nopean kehityksen johdosta.

Työ- ja elinkeinoministeriön vuonna 2016 teettämän selvityksen ”100-prosenttisesti uusiutuviin energialähteisiin perustuva energijärjestelmä” NETP- skenaarion perusteella vuonna 2050 Suomen sähköntuotannosta tuotettaisiin 60 % uusiutuvilla ja 30 % tuotannosta olisi tuuli- ja aurinkovoimaa [22]. Lappeenrannan Teknillisen yliopiston tutkimusryhmä tutki vuonna 2017 julkaistussa tutkimuksessa Suomen mahdollisuuksia saavuttaa täysin uusiutuva energijärjestelmä vuonna 2050. Täysin uusiutuviin energianlähteisiin perustuvassa järjestelmässä tuulivoimalla tuotettaisiin 35 % ja aurinkovoimalla 10 % koko Suomen energiankulutuksesta. Tällöin tuulisähköä tuotettaisiin noin 100 TWh 35 GW:n tuotantokapasiteetilla ja aurinkosähköä noin 30 TWh 30 GW kapasiteetilla. [23] 100-prosenttisesti uusiutuviin perustuva järjestelmä edellyttäisi suuria muutoksia Suomen energijärjestelmään. Vaikka tuuli- ja aurinkovoiman potentiaali olisi edellä esitetyn skenaarion verran, tai jopa enemmän, siihen mihin kunkin tuotantomuodon määrät hiili-dioksidineutraalissa Suomessa asettuvat vaikuttaa moni asia. Tuuli- ja aurinkovoima tulevat yleistymään, mutta kapasiteetin asettumiseen vaikuttavat koko energijärjestelmää koskevat poliittiset- ja taloudelliset päätökset, sekä tekniset ratkaisut, kuten säätövoiman tuotanto ja energianvarastointi [22].

4. TUOTANNON KASVUN EDELLYTYKSET SUOMEN OLOSUHTEISSA

Kansainvälinen ja kansallinen lainsäädäntö ohjaavat energiantuotantoa ympäristöystävällisempään suuntaan [1]. Poliittiset linjaukset ja lainsäädäntö vaikuttavat Suomen energiantuotantojärjestelmän kehitykseen tulevaisuudessa. Esimerkiksi voimalaitosten päästöjen rajoittaminen, ja hiilidioksidipäästöjen verotuksen kehittyminen vaikuttavat osaltaan siihen millä tuotantomuodoilla sähköntuotanto on tulevaisuudessa kannattavaa. [20] Tuotantotekniikoiden kehittyminen vaikuttaa laitosten hyötysuhteisiin ja käyttövarmuuteen. Uudet tekniikat saattavat myös vaikuttaa investointikustannuksiin, ja siten koko tuotantojärjestelmän kilpailukykyisyyteen. Tässä luvussa käsitellään, mitä poliittisia ja teknisiä toimia tuuli- ja aurinkovoiman potentiaalin maksimointi Suomessa vaatii.

4.1 Poliittiset toimenpiteet ja niiden merkitys

Uusiutuvan energiantuotannon kehittymistä ja yleistymistä on vauhditettu 2010-luvulla Suomessa niin sanotun syöttötariffi -järjestelmän avulla, jossa sähköntuottajille on luvattu takuuhintaa heidän tuottamastaan sähköstä [1]. Tämä on vähentänyt investointiriskejä, ja vaikuttanut erityisesti tuulivoiman voimakkaaseen yleistymiseen. Vuonna 2018 uusiutuvan energiantuotannon tukijärjestelmää uudistettiin markkinaehtoisempaan suuntaan. Siirtymäkaudella 2018-2020 kilpailutetaan yhteensä 2 TWh edestä uusiutuvia tuotantoinvestointeja, joille myönnetään sähköntuotannon tuotantotukea. Näin tekniikkaltaan kilpailukykyisimmät tuotantomuodot jatkavat yleistymistään. Lisäksi jatkossakin valtio tulee myöntämään investointitukea uusiutuviin ja innovatiivisiin energiantuotantohankkeisiin. [1] Näistä esimerkkinä Lempäälän aurinkosähkön tuotanto. Investointituen avulla pyritään edistämään uusiutuvaa energiantuotantoa ja kasvattamaan kotimaista osaamista potentiaalisten tuotantomuotojen parissa. Hallituksen energiastrategian perusskenaariossa vuodelta 2016 ennakoitiin tuulivoiman lisäyksen hidastuvan merkittävästi syöttötariffijärjestelmän alasajon myötä [1]. Näin tapahtuikin hetkellisesti 2018, mutta vuosi 2019 on osoittanut, että rakentaminen jatkuu markkinaehtoisesti ilman valtion tukeakin [12]. Kehitys uusiutuvampaan sähkön- ja energiantuotantoon tapahtuu tulevaisuudessa markkinaehtoisesti.

Pienempien alle MW-kokoluokan uusiutuvan energian hankkeiden, kuten aurinkosähkön tai puupohjaisten energiaratkaisujen osallistuminen tuotantoinvestointien kilpailutukseen olisi liian kankeaa, joten uusiutuvan pientuotannon yleistymistä kannustetaan verovapautuksin, kotitalousvähennyksin, sekä investointituilla [1]. Tämä madaltaa yksittäisten kotitalouksien ja yritysten kynnystä investoida uusiutuviin tuotantomenetelmiin ja edistää osaltaan myös teollisen mittakaavan hankkeiden yleistymistä. Energiantuotannon verotus vaikuttaa yleisesti tulevaisuudessa kannattaviin menetelmiin. Wärtsilän visiossa Helsingin kaukolämmöntuotanto toteutettiin tuulisähköllä, jota lämpöpumput hyödynsivät kaukolämmön tuotannossa [18]. Tällaisten ratkaisujen yleistyminen tulevaisuudessa edellyttäisi, että esimerkiksi tuulisähköllä tuotetun lämmön verotusta helpotettaisiin. Verotushelpotukset tulevat tulevaisuudessa ajankohtaiseksi myös energianvarastoinnin suhteen uuden teknologian yleistyessä [1].

Hankelupien myöntäminen vaikuttaa osaltaan tuuli- ja aurinkovoiman yleistymiseen. Lupaprosessi ei ainakaan lähitulevaisuudessa tule olemaan este tekniikoiden yleistymiselle, sillä suunnitteilla olevasta tuulivoimakapasiteetin lisäyksestä valmiiksi luvitettuja hankkeita oli yhteensä 6 TWh vuosituoton verran vuonna 2016, jonka jälkeen luvitettujen hankkeiden määrä on edelleen kasvanut [12]. Tuulivoimarakentaminen on huomioitu myös kaavoittamisessa, ja tuulivoiman haitalliset vaikutukset pyritään pienentämään sijoittamalla tuotanto isompiin yksiköihin kauemmas asutuksesta. Nykyisellään luvitetut hankkeet mahdollistaisivat nykykapasiteetin kaksinkertaistamisen. Aurinkopaneelien rakentamisen lupaprosessia on yhtenäistetty, ja yleisesti kotitalouksien hankkeet ovat toteutettavissa ilmoituksella rakennuslupaviranomaisille. Merkittävästi ympäristöön vaikuttavat hankkeet edellyttävät lupaprosessia. [1]

4.2 Tekniset vaatimukset tuuli- ja aurinkovoiman lisäämiselle

Kuten tuuli- ja aurinkovoimatuotannon erityispiirteet luvussa käsiteltiin, molemmat tuotantomenetelmät ovat sääriippuvaisia, ja niiden yleistyminen pakottaa koko Suomen sähköenergiajärjestelmän uudistumaan. Keskeisimpiä teknisiä ratkaisuja energijärjestelmän tehokkuuden ja luotettavuuden kannalta ovat säätövoima, kysyntäjousto ja energianvarastointi. Uusiutuvien tuotantomenetelmien lisääntyminen kasvattaa sähköntuotannon vaihtelevuutta niin vuorokauden sisällä, kuin vuodenaikojenkin välillä [8]. Ääri-esimerkkinä kylmä ja tuuleton talvisää, jolloin sähkönkysyntä on Suomen olosuhteissa

lämmitystarpeen vuoksi korkea, eikä tuuli- tai aurinkoenergiaa ole saatavilla. Näissä tilanteissa tarvitaan säätövoimaa, jolla sähköntuotannon tehotasapaino sähköverkossa turvataan joka tilanteessa.

Aurinko- ja tuulivoiman yleistyessä vanhojen lauhdevoimaloiden kapasiteetti hiljalleen vähenee. Tämä tarkoittaa kotimaisen säätökykyisen tuotantokapasiteetin vähentymistä, mikä on ristiriidassa hallituksen energiaomavaraisuustavoitteen kanssa. Tämän vuoksi hallitus on määritellyt energiastrategiaansa nykyisen tehoreservijärjestelmän ylläpitämisen ja kehittämisen [1]. Nykyinen kotimainen tehoreservijärjestelmä koostuu yleisesti käyttöikänsä loppupäässä olevasta lauhdevoimasta, tai fossiilisista tuotantomenetelmistä, kuten kaasuturbiineista. Tulevaisuudessa kotimaista säätövoimaa voitaisiin tuottaa myös esimerkiksi kotimaisilla biopolttoaineilla, kuten puuhakkeella. [1] Toistaiseksi yleisin säätöenergiamuoto Suomessa on pohjoismaisen sähköverkon mahdollistama nettotuonti, jonka osuus koko Suomen sähkönkulutuksesta on yli 20 % [3]. Tämä tarkoittaa käytännössä Norjalaista ja Ruotsalaista vesivoimaa, joka on hiilineutraalia, mutta toisaalta pienentää Suomen energiaomavaraisuutta.

Eräs keino vähentää säätövoiman tarvetta on kysynnän vaihteluiden tasapainottaminen, ja varsinkin kysyntähuippujen madaltaminen eli kysyntäjousto. Suuret teollisuuden energiankuluttajat, kuten metalli- tai paperiteollisuus osallistuvat jo laajalti kysyntäjoustoon ajoittamalla paljon energiaa vaativat toimet kulutushuippujen ulkopuolelle. Tulevaisuudessa tiedonkeruu ja älykkäät sähköverkot mahdollistavat yksittäisen asiakkaan osallistumisen verkon tasapainottamiseen. Esimerkiksi asiakkaan omat aurinkopaneelit tai sähköauto voivat tulevaisuudessa olla osa älykästä sähköverkkoa, ja osallistua sen tasapainottamiseen. [21] Älyverkot mahdollistavat uusia palvelukonsepteja, mutta tuovat mukanaan verkkoon lisää tekniikkaa, ja teknisiä haasteita. Toinen keskeinen säätövoiman tarpeeseen vaikuttava tulevaisuuden tekijä on energianvarastointi. Suomessa ei ole vielä teollisen mittakaavan sovelluksia varastoinnin suhteen, mutta esimerkiksi energianvarastointia eri energiamuotoina, kuten lämpönä tai veden potentiaalienergiana on suunniteltu [22]. Toistaiseksi lähimpänä teollisen mittakaavan varastointia on sähköenergian varastointi akkuihin, kuten Lempäälän aurinkosähkön tuotannossa [19].

Akut, sekä aurinkopaneelit vaativat harvinaisia materiaaleja, joiden kysynnän kasvu pakottaa avaamaan uusia kaivoksia kehittyvissä maissa [1]. Tähän liittyen akku- ja paneeliteknologian haaste on korvata harvinaiset materiaalit yleisemmillä, ja kestävämmiin saatavilla materiaaleilla, jottei materiaalien saanti aiheuta esteitä tekniikan yleistymiselle. Myös toimivan kierrätysjärjestelmän toteuttaminen harvinaisille materiaaleille on välttämätöntä tekniikan kestäväen kehittymisen kannalta.

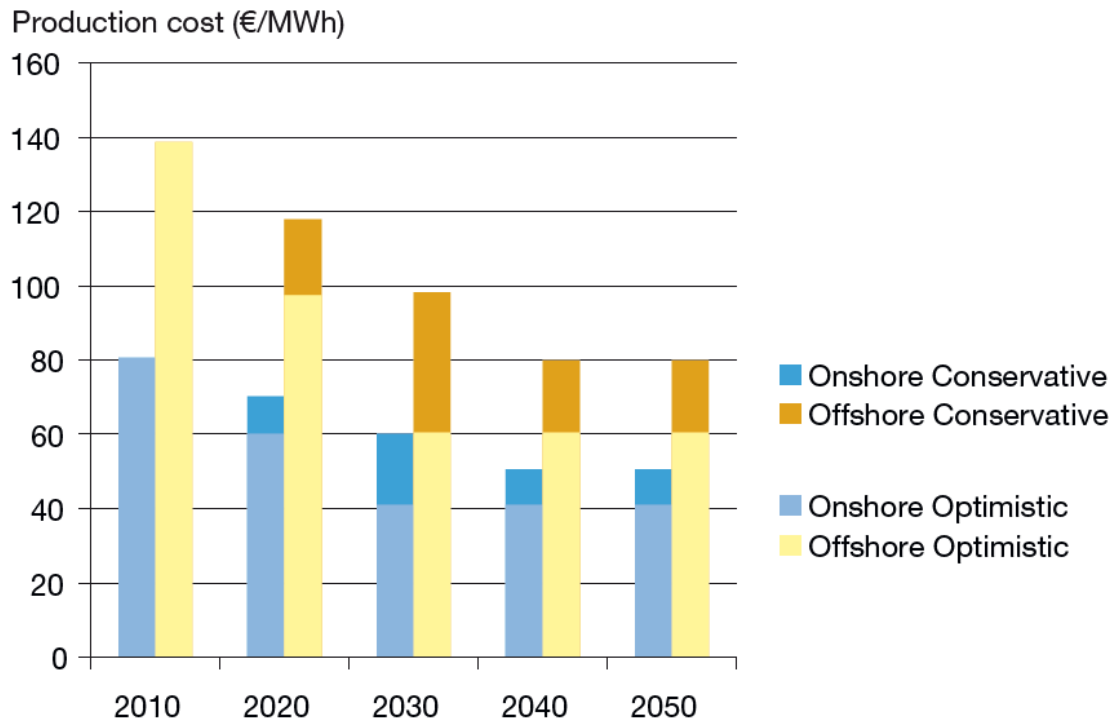
5. TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Uusiutuvien tuuli- ja aurinkovoiman potentiaalin kehitystä ja sen aikajännettä on vaikea ennustaa tarkasti. Suomen sähköenergiajärjestelmä on osa globaalia energiajärjestelmää, jonka kehitystä ohjailevat kansallisen lainsäädännön lisäksi kansainvälinen lainsäädäntö ja energiapoliittiset linjaukset. Uusien teknologioiden hintakehitys, sekä teknisten ongelmien ratkaisu esimerkiksi säätöenergian ja energianvarastoinnin suhteen vaikuttavat myös tuuli- ja aurinkoenergian potentiaalin kehitykseen. Potentiaali tulee kasvamaan tulevaisuudessakin, ja sen kehitystä voidaan ennustaa eri tutkimuksissa tehtyjen skenaariomallien avulla.

Tuuli- ja aurinkovoiman tulevaisuuden potentiaalia arvioitaessa tuulivoiman kehityksen voidaan olettaa jatkuvan samansuuntaisena, kuin 2010-luvulla, vaikka hallituksen strategiassa energiajärjestelmän tukiuudistuksen ennustettiin hidastavan tuulivoiman markkinaehtoista yleistymistä [1]. Maatuulivoimasta on kuitenkin nopeasti tullut ydinvoiman rinnalle edullisin sähköntuotantomuoto, joten sähköntuottajien keskuudessa tuulivoiman rakentaminen näyttäytyy kannattavana vaihtoehtona [20]. Lyhyellä aikavälillä hallituksen tavoite tuuli- ja aurinkovoimantuotannolle vuodelle 2030 on 7-9 TWh, ja perusskenaariossa tuulivoiman osuus olisi 6 TWh ja aurinkovoiman 0,7 TWh [1].

On hyvin todennäköistä, että hallituksen tavoite tulee ylittymään vuoteen 2030, jo pelkän tuulivoiman lisäyksen myötä. Vuonna 2018 tuulivoimatuotanto oli vajaa 6 TWh, eli noin 7 % Suomen sähkön kulutuksesta. Vuonna 2019 uuden tukijärjestelmän alaisuudessa kapasiteettia valmistuu lisää noin 1 TWh vuosituoton verran, kokonaisuudessaan suunnitteilla olevia hankkeita on 8 kertainen määrä nykyiseen kapasiteettiin nähden [12]. Valmiiksi luvitetut hankkeet mahdollistavat nopeastikin esimerkiksi nykyisen tuotannon kaksinkertaistamisen vuoteen 2030 mennessä [1]. Tällöin tuulivoiman tuotanto olisi noin 15 % Suomen sähkönkulutuksesta, olettaen että sähkön kokonaiskulutuksessa ei tapahdu suuria muutoksia.

Hallituksen perusskenaariossa aurinkovoiman osuus vuonna 2030 olisi alle 1 TWh, eli noin 1 % Suomen sähkönkulutuksesta [1]. Vuonna 2017 aurinkoenergian arvioitu osuus Suomen sähkönkulutuksesta oli prosentin kymmenesosien luokkaa, mutta kehityksen arvioitiin jatkuvan edellisvuosien mukaisena, jolloin vuosituotto kasvoi keskimäärin puolella edellisvuoteen nähden [15]. Tämän perusteella hallituksen perusskenaarion tavoite on hyvinkin saavutettavissa.



Kuva 9. Maa- ja merituulivoiman arvioitu hintakehitys eri skenaarioiden mukaan [21].

Kun verrataan vuonna 2012 VTT:n raportin teettämää arviota voimakkaasti yleistyvän tuulivoiman tuotantokustannuksista vuonna 2017 Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston tekemään tuotantokustannusvertailuun alaluvussa 3.2, havaitaan että tuulivoiman hintakehitys noudattaa hyvinkin VTT:n raportin optimistista skenaariota [21]. Teknologian kehittymiselle on ominaista, että sen yleistyessä tuotantokustannukset pienenevät. Tähän vaikuttavat osaltaan teknologian vakiintuminen ja investointiriskien pieneneminen, sekä hyötysuhteiden kasvu. Näin on käynyt myös aurinkoenergian tuotantokustannusten kohdalla. Aurinkoenergian tuotantokustannukset Suomessa ovat vielä nopeammassa muutoksessa, kuin tuulivoiman, sillä aurinkoenergia Suomen olosuhteissa on teknologisen kehityksensä suhteen varhaisemmassa kehityksen vaiheessa kuin tuulivoima. VTT:n raportti ennustaa aurinkoenergian investointikustannusten kehittyvän vuoteen 2050 mennessä tasolle 0,25 – 0,5 e/W, tämä tarkoittaisi hinnan kehittymistä alle 10:s osaan vuoden 2010 5 e/W tasosta. [21] Uuden teknologian kehittymistä on vaikea ennustaa, mutta on todennäköistä, etteivät perinteiset tuotantomenetelmät pysty vastaamaan uusiutuvien tuuli- ja aurinkovoiman hintakehitykseen.

Tarkasteltaessa pidemmällä aikavälillä vuoteen 2050 ennustettavuus heikkenee ja eri skenaarioiden tulokset poikkeavat huomattavasti toisistaan. Eroavaisuuksia skenaarioihin teettää erityisesti se, mikä on otettu energiapolitiikan lähtökohdaksi Suomen energiapolitiikassa. VTT:n vuonna 2012 teettämän raportin mukaan tuuli- ja aurinkovoiman

osuus Suomen sähköntuotannosta voi ylittää 20:een % vuoteen 2050 mennessä. Raportin lähtökohtana oli vähentää Suomen päästöjä 80 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050. Keskeisimpinä ratkaisuinä hiilivapaan energiantuotantoon esitettiin ydinvoimaa, tuulivoimaa, bioenergiaa, sekä aurinkovoimaa. [21] Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston selvityksen mukaan Suomen energijärjestelmässä tuulivoimalla tuotettaisiin 35 % ja aurinkovoimalla 10 % koko Suomen energiankulutuksesta [23]. Tämä tarkoittaa noin kymmenkertaista tuuli- ja aurinkosähkökapasiteettia VTT:n malliin nähden. Tutkimuksen lähtökohtana olikin täysin uusiutuviin lähteisiin perustuvan järjestelmän toteuttaminen Suomessa 2050. Tämä edellyttäisi muun muassa ydinvoimasta luopumista, mikä ei Suomessa todennäköisesti ole vielä tuolloin ajankohtaista Olkiluoto 3 ydinvoimahankkeen käyttöiänkin huomioiden.

Tulevaisuuden sähköntuotannosta suurin osa on mahdollista tuottaa uusiutuvilla lähteillä. Ydinvoimaa tuotetaan kuitenkin todennäköisesti ainakin vuoteen 2050 asti uusien hankkeiden myötä. Skenaarioiden perusteella tuulienergialla on potentiaalia kasvaa yhtä merkittäväksi teollisen mittakaavan sähköntuotantomuodoksi, kuin ydinvoima ja pidemmällä aikavälillä mielenkiintoista on myös, onko aurinkoenergian tuotannon hintakehitys skenaarioiden mukaista. Tällöin aurinkovoima voisi mahdollisesti kasvattaa potentiaaliaan jopa tuulivoimaa suuremmaksi. Mikäli aurinkovoimasta tulee yksi halvimmista energiantuotantomuodoista, on hyvin todennäköistä, että siitä kehittyä olennainen osa yksittäisten kiinteistöjen energiaratkaisuja, ja pidemmällä aikavälillä teknologian kehittyessä myös teollisen mittakaavan tuotanto saattaa yleistyä.

Pitkällä aikavälillä poliittiset- ja teknologiset tekijät vaikuttavat merkittävästi kehitykseen. Pariisin ilmastopöytäkirja määritteli suuntaviivat Suomen energiapolitiikalle vuonna 2016, lisäksi kansainvälinen lainsäädäntö pyrkii vaikuttamaan energiantuotantoon määrittelemällä päästöoikeuksien hintoja, sekä päästörajoja. Nämä toimet vaikuttavat eri tuotantomenetelmien kustannustehokkuuteen [21]. Mikäli kansainväliset sopimukset tiukentavat tavoitteitaan päästöjen rajoittamiseksi, ja nostavat esimerkiksi päästöoikeuksien hintoja, vaikuttaa se tuuli- ja aurinkovoiman tuotantopotentiaalin kasvattavasti. Suomen valtio ohjaa energiantuotannon kehittymistä tukijärjestelmin, sekä verotuksen ja lainsäädännön avulla [1]. Viime vuosina on havaittu, että nykyiset toimet ilmastomuutoksen hillitsemiseksi saattavat olla riittämättömiä. Tämä asettaa Suomen lainsäädännölle muutospainetta kannustaa energiantuotantoa uusiutuvammaksi, esimerkiksi verotuskäytäntöjen muuttaminen mahdollistaisi Helsingin kaukolämpövision kaltaisten uusiutuviin tuotantomenetelmiin perustuvien energiaratkaisujen yleistymisen.

Teknisesti suurimpana haasteena potentiaalın lisäykselle eivät niinkään ole tuuli- ja aurinkovoiman tuotantotekniikat, vaan pikemminkin säätövoiman tuottaminen. Mikäli potentiaali kasvaisi lähelle täysin uusiutuvan energijärjestelmän skenaariota, jossa noin puolet Suomen koko energiantuotannosta olisi sääriippuvaista tuuli- tai aurinkovoimaa, säätövoiman lisäksi tarvittaisiin myös kysyntäjoustoa, sekä energian varastointia. Potentiaalın kasvattaminen VTT:n skenaarion suhteellisen maltilliselle tasolle kasvattaisi sekin säätövoiman tarvetta. VTT:n energijärjestelmä malleissa koko Suomen energijärjestelmää kehitettäisiin joustavampaan ja omavaraisempaan suuntaan. [21] Tulevaisuudessa kotitaloudet ja kaupungit osallistuvat tuotannon säätelyyn ja esimerkiksi sähköauto on latauspisteessään osa kysyntäjoustavaa energijärjestelmää toimiessaan eräänlaisena energiavarastona.

Tietotekniikan lisääminen järjestelmiin tuo haasteita toimintavarmuuteen liittyen, mutta toisaalta tarjoaa suomalaisille yhtiöille kaupallisia mahdollisuuksia globaaleilla uusiutuvan energian markkinoilla. Suomen valtion energiastategiassa uusiutuvaan energiantuotantoon liittyvät teknologiat ja niihin liittyvät palvelut nähdään merkittävänä tulevaisuuden osaamisalana ja työllistäjänä [1]. VTT:n skenaarioissa tuuli- ja aurinkovoiman tekniisinä kehitysaskelina esitettiin merituulivoima, ja aurinkoenergiantuotantoon tarvittavien materiaalien saatavuus sekä -kierrätettävyyys [21]. Mikäli merituulivoiman investointikustannukset kehittyisivät kilpailukykyisiksi, voisi merituulivoima lisätä Suomen tuulivoimakapasiteettia huomattavasti tuotantoon hyvin soveltuvilla rannikkoalueilla. Aurinkoenergiantuotantoon liittyvänä haasteena on tekniikassa käytettävät harvinaiset materiaalit, joiden riittävyden turvaamiseksi on kehitettävä asianmukainen kierrätysjärjestelmä, sekä pyrittävä tulevaisuudessa hyödyntämään yleisemmin saatavilla olevia tuotantomateriaaleja. Tekniikan kehittyessä tulevaisuuden aurinkoenergiantuotanto saattaa yleistyä perinteisten paneeliasennusten lisäksi myös julkisivumateriaaleihin. Suomessa julkisivumateriaalien hyödyntämisen etuna olisi Pohjoisesta sijainnista johtuvan merkittävän hajasäteilyn talteenottokyky, sekä toiminta talviaikaan, jolloin kattoasennus saattaa olla lumen peitossa [21].

Säätöenergiantuotantoa tarkasteltaessa Suomen nykyinen sähköenergijärjestelmän säätö tapahtuu suomalaisilla Fingridin tehoreservijärjestelmään kuuluvilla tuotantolaitoksilla, sekä sähköntuonnilla Pohjoismaista, jonka osuus Suomen sähkökulutuksesta oli vuonna 2018 reilu viidennes [3]. Pohjoismaiseen sähköverkkoon kuuluminen, ja sen kehittäminen luovat turvaa Suomen sähköenergijärjestelmälle ja Pohjoismainen vesivoimalla tuotettu sähkö, joka muodostaa suurimman osan Suomeen tuodusta sähköenergiasta on ympäristöystävällinen ja toimiva säätöenergiamuoto. Pohjoismaiseen sähköverkkoon kuuluminen mahdollistaa kaupankäynnin molempiin suuntiin. Ydinvoiman sekä

tuuli- ja aurinkovoiman lisäys aiheuttavat sen, että vaikeasti säädettävien tuotantomenetelmien tuotantohuippujen ajoittuessa kysynnältään hiljaisiin ajankohtiin sähköenergiajärjestelmän tuotanto ylittää kysynnän ja ylimääräinen tuotanto on pystyttävä siirtämään ulkomaille, esimerkiksi Pohjoismaiseen sähköverkkoon. Toinen vaihtoehto on varastoida tuotannon ylijäämä energiavarastoihin. Energian varastointi on potentiaalinen tulevaisuuden säätömuoto, ja sen tekniikoiden kehittäminen on keskeisessä roolissa mahdollistamassa uusiutuviin perustuvaa energiajärjestelmää [1].

Tulevaisuudessa säätöenergian tarve tulee varmuudella lisääntymään sääriippuvaisen tuotannon yleistyessä. Hallituksen energiaomavaraisuuden, sekä sähköverkon luotettavuuden tavoitteiden myötä Suomen sähköenergiajärjestelmän säätövoiman tuotanto ei voi perustua tulevaisuudessa vain Pohjoismaisen sähköverkon vesivoimaan, vaan esimerkiksi kotimaisia biopolttoaineita tulee harkita säätövoiman tuottajiksi [1]. Selvää on, että teknisten ja poliittisten ongelmien ratkaiseminen koskien säätövoimaa, kysyntäjousta, sekä energianvarastointia on edellytys tuuli- ja aurinkovoiman potentiaalinen mittavalle lisäämiselle [21].

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena oli aiheeseen liittyvän kirjallisuuden, ja tutkimustulosten avulla vastata kolmeen johdantokappaleessa esitettyyn tutkimuskysymykseen. Työn alussa luvussa kaksi käytiin läpi Suomessa yleisimmin käytössä olevat tuotantotekniikat, jotka ovat tuulivoiman tuotannossa kolmilapainen Hawt-rakenne ja aurinkovoiman tuotannossa aurinkokennojen paneeliasennus. Tekniikoiden yleiskuvan lisäksi käsiteltiin näiden tuotantomuotojen ominaispiirteitä, kuten tuotannon sääriippuvuudesta aiheutuvaa vaihtelevuutta, sekä Suomen olosuhteiden soveltumista uusiutuvien tuuli- ja aurinkovoiman tuotantoon.

Tämän jälkeen luvussa kolme tarkasteltiin tuuli- ja aurinkovoiman nykytilannetta, sekä nykytilaan johtanutta kehitystä, niin tuuli- kuin aurinkovoimankin osalta. Tulevaisuuden potentiaalia arvioitiin Suomen tuotanto-olosuhteiden, sekä eri tutkimusten tulevaisuuden skenaarioiden avulla. Tutkimustulosten perusteella lähtökohdaksi otettiin tuuli- ja aurinkovoiman tulevaisuuden potentiaalin merkittävä lisäys, ja luvussa neljä tarkasteltiin sen mahdollistumiseen vaikuttavia poliittisia ja teknisiä toimia. Näitä olivat kansalliset- ja kansainväliset politiikkatoimet, jonka keinoina ovat erilaiset kannustinjärjestelmät, verotus, ja lainsäädäntö. Teknisistä toimista esiin nousi teknisten haasteiden, kuten kysyntäjouston, energian varastoinnin, sekä keskeisimpänä säätövoiman tuotannon ratkaisu. Tässä luvussa havaittiin, kuinka moniulotteinen asia sähköenergian tuotanto Suomessa on. Sähköenergiajärjestelmän kehittämisessä on otettava huomioon pääperiaatteet eli järjestelmän luotettavuus ja toimintavarmuus. Uusiutuvan energian kapasiteetin kasvattaminen lisää tarvetta ratkaista edellä esitettyjä teknisiä- ja poliittisia ongelmia.

Globalisaation myötä Suomen sähköenergiajärjestelmä on myös osa Pohjoismaista sähköverkkoa ja siten Suomen toimintaan vaikuttaa monen muunkin maan toiminta. Tämän vuoksi energiaomavaraisuus on tärkeä tavoite tulevaisuuden energiajärjestelmää kehitettäessä. Tuuli- ja aurinkovoimalla on sekä omavaraisuutta kasvattavia, että heikentäviä ominaisuuksia. Lisääntyvä säätöenergian tarvetta on mahdollista ratkaista tulevaisuudessa kotimaisella uusiutuvalla bioenergialla, sekä energianvarastoinnin teknologioilla ja kysyntäjoustolla tuontienergian lisäksi.

Tuloskappaleessa viisi pyrittiin luomaan realistisen kuva Suomen sähköenergiajärjestelmän kehittymisestä eri tutkimustulosten ja skenaarioiden avulla. Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että niissä esitetään tulevaisuuden mahdollisia kehityssuuntia, joihin liit-

tyy epävarmuutta johtuen energia-alan nopeasta murroksesta ja siihen vaikuttavista monista tekijöistä. Varmuudella voidaan kuitenkin todeta, että uusiutuvat tuotantomenetelmät, tuuli- ja aurinkovoima, tulevat muuttamaan Suomen sähköenergiajärjestelmää, ja mahdollistamaan koko energiajärjestelmän kehittymisen ympäristöystävällisemmäksi. Kehityksen nopeus, sekä potentiaalin lopullinen taso riippuvat tulevaisuuden poliittisista toimista, sekä teknologian kehityksestä.

LÄHTEET

- [1] Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. 2017, s.13-35, 43-46,70-117.
- [2] Suomen virallinen tilasto. Energian hankinta ja kulutus. 2019; Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehk/2018/04/ehk_2018_04_2019-03-28_tie_001_fi.html. Viitattu 4.4., 2019.
- [3] Energiateollisuus. Energiavuosi 2018 - sähkö. 2019; Saatavissa: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi_2018_-_sahko.html#material-view. Viitattu 4.4., 2019.
- [4] Suomen virallinen tilasto. Sähkön ja lämmön tuotanto. 2019; Saatavissa: http://www.stat.fi/til/salatuo/2017/salatuo_2017_2018-11-01_tie_001_fi.html. Viitattu 4.4., 2019.
- [5] Selin NE. wind power. Encyclopædia Britannica Online 2018.
- [6] Suomen tuuliatlas. Tuulivoima. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/tuulivoima/index.html>. Viitattu 5.4., 2019.
- [7] Suomen tuulivoimayhdistys. Tuulivoimaloiden rakenne. Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>. Viitattu 5.4., 2019.
- [8] Motiva. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. 2018; Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa. Viitattu 9.4., 2019.
- [9] Oku T. Solar cells and energy materials. Berlin; Boston: Walter de Gruyter, GmbH; 2017.s.1-12, 43-45, 69-72.
- [10] Suomen Tuuliatlas. Tuulisuus Suomessa. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/index.html>. Viitattu 15.4., 2019.
- [11] Fingrid. Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/>. Viitattu 21.4., 2019.
- [12] Suomen tuulivoimayhdistys. Tuulivoimahankkeet Suomessa. Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/hankelista>. Viitattu 16.4., 2019.
- [13] Suomen tuulivoimayhdistys. Tuulivoima Suomessa. Saatavissa: <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa>. Viitattu 16.4., 2019.
- [14] Graabak I, Korpås M. Variability Characteristics of European Wind and Solar Power Resources – A Review. Energies 2016;9(6):449.

- [15] J.Ahola, National Survey Report of Photovoltaic Applications in Finland, 2017, s. 4-7, 20-24.
- [16] Luxcara. Investment Strategy. Saatavissa: <http://luxcara.com/investment-strategy/>. Viitattu 16.4., 2019.
- [17] ABO Wind. 100 megawatts wind farm to be built in Finland without subsidies. Saatavissa: <https://www.abo-wind.com/en/media-center/press/2019-02-21.html>. Viitattu 17.4., 2019.
- [18] Wärtsilä Oyj Abp. Lehdistötiedote 18.3.2019. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/fin/paikallisuutinen/18-03-2019-wartsilan-energiajarjestelmamalli-osoittaa-tuulivoima-ja-lampopumput-paras-ratkaisu-hiilivoimasta-luopumiseen-helsingissa>. Viitattu 17.4., 2019.
- [19] Lempäälän Energia Oy. Lehdistötiedote 7.9.2018. Saatavissa: <http://www.lempaalanenergia.fi/content/fi/36/20502/Solarigo%20toteut-taa%202%20000%20kWp%20aurinkos%C3%A4hk%C3%B6voimalan%20LE-MENE-hankkeeseen.html>. Viitattu 17.4., 2019.
- [20] E.Vakkilainen, A.Kivistö, Sähkön tuotantokustannusvertailu, LUT Scientific and Expertise Publications, 2017, s.10-18.
- [21] Koljonen T, Similä L, Lehtilä A, Grandell L, Airaksinen M, Tuominen P, et al. Low Carbon Finland 2050 -platform: vähähiilipolkujen kiintopisteet ja virstanpylväät. Yhteenveto hankkeen tuloksista ja johtopäätöksistä. VTT Technology 167 2014, s.18-47.
- [22] Työ- ja elinkeinoministeriö. 100-prosenttisesti uusiutuviin energialähteisiin perustuva energiajärjestelmä. 2016, s.4-9.
- [23] Child M, Breyer C. Vision and initial feasibility analysis of a recarbonised Finnish energy system for 2050. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016, s.517-536.