

Anton Nguyen

MERITUULIVOIMAN JA ARKTISEN TUULIVOIMAN POTENTIAALI JA HAASTEET

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Risto Mikkonen
Lokakuu 2023

TIIVISTELMÄ

Anton Nguyen: Merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman potentiaali ja haasteet
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Lokakuu 2023

Ilmastonmuutoksen torjunta ja uusiutuvan energian käyttö ovat keskeisiä tavoitteita maailmanlaajuisesti. Tuulivoima on yksi nopeimmin kasvavia puhtaan sähkön tuotantomuotoja maailmassa, ja erityisesti merellä ja arktisilla alueilla sen hyödyntäminen voi edistää merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä ja kestäväen energiantuotannon edistämistä.

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuuskatsaus merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman potentiaalista ja haasteista. Työssä perehdytään tuulivoiman perusteisiin ja tuuliturbiinin rakenteeseen. Lisäksi käsitellään tuulivoimalahanketta ja arvioidaan arktisen ja merituulivoiman erityispiirteitä ja keskitytään näiden teknologisiin innovaatioihin. Lopuksi arvioidaan merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman nykytilannetta ja tulevaisuuden näkymiä sekä Suomessa että maailmanlaajuisesti.

Merituulivoima tarjoaa houkuttelevan vaihtoehdon perinteisille maalla sijaitseville tuulivoimaloille, sillä merellä tuuliolosuhteet ovat yleensä suotuisammat ja merialueiden käyttörajoitukset ovat vähäisemmät. Kuitenkin merelle rakentaminen tuo mukanaan omat haasteensa ja lisäkustannuksensa, erityisesti sääolosuhteiden, perustusten ja sähkönsiirron osalta. Näiden haasteiden ymmärtäminen on olennaista, jotta voidaan maksimoida merituulivoiman potentiaali ja edistää sen kestävää kehitystä.

Arktisen alueen tuulivoimapotentiaali tarjoaa oman ainutlaatuisen mahdollisuutensa uusiutuvan energian tuotannolle. Arktiset ilmastoalueet ovat usein harvaan asuttuja alueita ja hyvät tuuliolosuhteet sekä tiheämpi ilma tekevät näistä alueista houkuttelevia tuulivoiman tuotannolle. Kuitenkin ankarat sääolosuhteet asettavat haasteita näiden resurssien hyödyntämiselle. Taloudellisesti kannattavien tuulivoimahankkeiden saavuttamiseksi kylmissä ilmasto-olosuhteissa on ratkaistava lukuisia teknisiä haasteita ja turvallisuuskysymyksiä, erityisesti liittyen jäätymiseen. Tuulivoimaloiden jäätyminen vähentää energiantuottoa, lyhentää voimaloiden käyttöikää ja aiheuttaa turvallisuusriskejä, kuten jään heittelyä. Ilman asianmukaista sähköverkon vahvistuksia ja laajennuksia sekä tieverkostoa on vaarana, että suuri osa arktisesta tuulivoimasta kuin myös merituulivoimasta jää käyttämättä, ja laajentumismahdollisuudet voivat jäädä käyttämättä. Vaikka näiden haasteiden ratkaisemisessa on saavutettu edistystä, tarvitaan lisää kehitystä arktisen tuulivoiman kustannusten alentamiseksi.

Avainsanat: tuulivoima, arktinen tuulivoima, merituulivoima, potentiaali, jäätäminen, energia, offshore, arctic, cold climate, potentiaali, haasteet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. TUULIVOIMA	3
2.1 Tuulivoiman toimintaperiaate	3
2.1.1 Tuulen energia ja teho	3
2.1.2 Tuulivoimalan teho	4
2.2 Tuulivoimalavaihtoehdot	5
2.3 Tuulivoimalan rakenne.....	6
2.4 Tuulivoimalahanke.....	8
3. TUULIVOIMAN POTENTIAALI	11
3.1 Merituulivoima	11
3.2 Arktinen tuulivoima	13
4. TUULIVOIMAN HAASTEET	15
4.1 Merituulivoima	15
4.1.1 Tekniset vaatimukset merituulivoimaloissa	16
4.2 Arktinen tuulivoima	18
4.2.1 Tekniset vaatimukset arktisissa olosuhteissa.....	20
5. MERI- JA ARKTISET TUULIPUISTOT	22
5.1 Nykytilanne.....	22
5.2 Tulevaisuuden näkymät.....	25
6. YHTEENVETO	28
LÄHTEET	30

LYHENTEET JA MERKINNÄT

kV	kilovoltti
MW	megawatti
kW	kilowatti
GW	gigawatti
GWh	gigawattitunti
GWEC	Global Wind Energy Council
IEA	International Energy Agency
IRENA	International Renewable Energy Agency
Offshore	merellä sijaitseva
STY	Suomen Tuulivoimayhdistys
A	pinta-ala
A_0	lavoista ja navasta koostuvan roottorin pyyhkäisypinta-ala
m	massa
P_0	ilmavirtauksen teho
$P_{roottori}$	roottorin teho
v_0	ilmavirtauksen nopeus
W_0	ilmavirtauksen liike-energia
ρ	ilmantiheys

1. JOHDANTO

Fossiilisten polttoaineiden poltolla on merkittävä vaikutus maapallon ilmastoon. Ilmastomuutoksen tehokas hillitseminen edellyttää kasvihuonekaasupäästöjen huomattavaa vähentämistä. Ilmaston lämpeneminen on yksi nyky-yhteiskunnan suurimmista kriiseistä. Haasteet ovat ajaneet uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinko- ja tuulivoiman, käyttöönottoa ja lisäksi näitä lähteitä hyödyntämällä on mahdollista tuottaa sähköä ilman merkittävää ympäristökuormitusta. Aurinko- ja tuulivoiman tuotantokustannusten jatkuvan alenemisen myötä näistä teknologioista on tullut yksi tärkeimmistä uusiutuvista energialähteistä sähköntuotannossa.

Tuulivoiman teknologia on kehittynyt nopeasti ja sitä on integroitu sähköjärjestelmiin laajamittaisesti. Viime vuosina tuulivoima on yksi nopeimmin kasvaneista sähköntuotantomuodoista maailmalla, ja sen kehitystä ovat vauhdittaneet kansallisten poliittisten päättäjien huoli ilmastomuutoksesta, energian monimuotoisuudesta ja toimitusvarmuudesta. Arktisella tuulivoimalla ja erityisesti merituulivoimalla on merkittävä rooli tässä kehityksessä, sillä ne avaavat uusia mahdollisuuksia tuulivoiman tuotannolle alueilla, joilla tuuliolosuhteet ovat suotuisimmat.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tehdä kirjallisuusselvitys merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman tarjoamista mahdollisuuksista ja haasteista. Työ käsittelee tuulivoiman peruseräiteitä, kuten tuuliturbiinin rakennetta ja toimintaa. Lisäksi työssä tarkastellaan, miten näitä tuulivoimaloita sijoitetaan, ottaen huomioon erityispiirteet, jotka liittyvät arktisiin ja merellisiin ympäristöihin. Työssä perehdytään teknologisiin innovaatioihin, jotka vaikuttavat merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman kehitykseen. Arvioidaan nykytilanteen ja tulevaisuuden näkymät sekä niiden rooli Suomessa että maailmanlaajuisesti. Tavoitteena on luoda perusteellinen ja ajankohtainen kuvaus näistä tärkeistä energiantuotantomuodoista.

Luvussa 2 luodaan yleiskatsaus tuulivoiman toimintaperiaatteisiin ja rakenteeseen sekä käydään läpi tuulivoimaloiden sijoittamiseen vaikuttavia tekijöitä. Luvussa 3 käsitellään merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman potentiaalia. Neljännessä luvussa perehdytään meri- ja arktisen tuulivoiman haasteisiin ja käsitellään teknisiä vaatimuksia, joita meren vaikutus ja arktiset olosuhteet asettavat tuulivoimaloille. Viidennessä luvussa tarkastel-

laan meri- ja arktisia tuulipuistoja ja käydään läpi nykytilannetta ja tulevaisuuden näkymiä. Viimeisessä luvussa esitellään yhteenveto tässä työssä tehdyistä havainnoista ja tehdään johtopäätökset merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman tulevaisuudesta osana sähköntuotantoa.

2. TUULIVOIMA

Uusiutuvien energialähteiden tehokas käyttö on erittäin tärkeää maailmanlaajuisessa energiamurroksessa, ja tuulivoima on uusiutuvien energialähteiden yksi kehittyneimmistä teknologioista. Seuraavaksi käsitellään tuulivoiman teoriaa. Pehdytään, mitä tuulen liike-energia ja teho tarkoittavat ja määritetään teoreettinen yläraja tuulivoimalan hyötysuhteelle Betzin lain avulla. Tarkastellaan tuulivoiman rakennetta ja rakeenteelliseen suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä.

2.1 Tuulivoiman toimintaperiaate

Tuulivoimalan toiminta perustuu muuttamalla tuulen liike-energia tuulivoimalan roottorin akselin pyörimisenergiaksi eli mekaaniseksi energiaksi. Ilmavirtauksen kohdatessa roottorin lavat, kohdistuu lapoihin nostovoima, joka pyörittää roottoria. Roottoriin kiinnitetyn akselin mekaaninen energia muunnetaan generaattorin avulla sähkömagneettisen induktion kautta. Tuotettu teho siirretään muuntajalle, joka muuntaa generaattorista tulevan noin 700 voltin sähköenergian sähköverkolle sopivaksi jännitteeksi, joka on tyypillisesti Suomessa 110 kV, 220 kV tai 400 kV riippuen tuulipuiston kokonaistehosta. (Anaya-Lara et al. 2009, pp. 2–4; Korpela Aki 2014; Fingrid n.d.)

2.1.1 Tuulen energia ja teho

Tuulen liike-energia on peräisin aurinkoenergiasta. Auringon sähkömagneettinen säteily lämmittää epätasaisesti maan pintaa, vahvemmin päiväntasaajalla ja heikommin korkeilla leveysasteilla. Tämän epätasaisen lämpenemisen seurauksena syntyy ilmanpaineen eroja, joka aiheuttaa maapallon ilmavirtaukset eli tuulet. Ilma virtaa korkeammasta ilmanpaineesta kohti matalampaa painetta. (Letcher & Letcher 2017, p. 17)

Ilmamassan virtauksesta syntyvä energia pyritään muuttamaan tuuliturbiinin roottorin liike-energiaksi. Tuulen eli ilmavirtauksen liike-energia saadaan laskettua kaavalla

$$W_o = \frac{1}{2} m v_o^2, \quad (1)$$

jossa m on ilmavirtauksen massa ja v_o on ilmavirtauksen nopeus. Tuulen teho on ilmavirtauksen energia aikayksikköä kohden ja riippuu ilmavirtauksen kohtisuorasta pinta-alasta (A), ilman nopeudesta (v_o) ja tiheydestä (ρ). Derivoimalla yhtälö (1) saadaan ilmavirtauksen teholle yhtälö

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_0^3. \quad (2)$$

Yhtälöstä (2) huomataan, että teho on verrannollinen roottorin pinta-alaan ja tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin. Teoriassa tuulen nopeuden kaksinkertaistuksessa tuulivoimapotentiaali kasvaa kahdeksankertaiseksi. Täten on tärkeää huomioida tuuliolosuhteet sijoituspaikkaa valittaessa. Pohjimmiltaan kaikkea tätä tehoa ei ole kuitenkaan käytettävissä roottorin tehoksi. (Korpela Aki 2014, s. 29)

2.1.2 Tuulivoimalan teho

Tuulivoimalan aerodynaamisen hyötysuhteen yläraja saadaan Betzin lain avulla. Laki mallintaa teoreettisen ylärajan roottorin ja ilmvirtauksen tehon osamäärälle ideaalisessa tapauksessa. Ensinnäkin ideaalisessa tilanteessa roottorin ajatellaan olevan kitkaton ja massaton ilmaa läpäisevä kiekko, jossa on ääretön määrä lapoja. Toiseksi ideaaliseen roottoriin vaikuttaa pelkkä nostovoima ja vastusvoima oletetaan nolllaksi. Kolmanneksi ilmanpaine on vakio ja oletetaan, että roottorin takana ilmvirtaus on pyörteetöntä. Tuuliturbiinin roottorin teholle saadaan yhtälö

$$P_{roottori} = \frac{1}{2} \rho A_{roottori} v_0^3 \frac{\left(1 + \frac{v_1}{v_0}\right) \left(1 - \left(\frac{v_1}{v_0}\right)^2\right)}{2}, \quad (3)$$

jossa v_1 on ilmvirtauksen nopeus roottorin jälkeen. Roottorin tehon $P_{roottori}$ ja turbiinille tulevan ilmvirtauksen tehon $P_{turbiini}$ osamäärä derivoimalla v_1 suhteen saadaan roottorin jälkeiselle ilmvirtaukselle sen maksimiarvoksi $v_1 = v_0/3$. Tuulivoimalan aerodynaamisen hyötysuhteen ideaalinen yläraja saadaan sijoittamalla v_1 :n optimiarvo yhtälöön 3 ja jakamalla puolittain yhtälöllä 2, saadaan

$$\frac{P_{turbiini}}{P_0} = \frac{\left(1 + \frac{v_0/3}{v_0}\right) \left(1 - \left(\frac{v_0/3}{v_0}\right)^2\right)}{2} = \frac{16}{27}. \quad (4)$$

Betzin lain mukaan suurin mahdollinen hyötysuhde on 16/27 eli 59,3 %, jonka tuuliturbiini voi ideaalitalanteessa ottaa ilmvirtauksen tehosta. Käytännössä tuulivoimalan hyötysuhde jää tätä merkittävästi pienemmäksi (Walker & Swift 2015, p. 83). Varsinaisten tuuliturbiinien roottoreissa on otettava huomioon kitkahäviöt ja aerodynaaminen vastus.

Roottorin liike-energian muuntamiseen sähköenergiaksi tarvitaan generaattori ja mahdollisesti vaihteisto. Voimansiirrossa syntyy mekaanisia häviöitä ja generaattorin tuottama sähköteho on aina pienempi kuin roottorin mekaaninen teho. Myöskään tuulivoimalat eivät pysty hyödyntämään kaikkia tuulennopeuksia. Näistä syistä johtuen käytännön tuulivoimalan hyötysuhde jää yleensä noin 20–40 %:iin. (Korpela Aki 2014, s. 30–32, 70)

Tuulivoimalan kokoa voidaan kuvata sen nimellisteholla, jolla tarkoitetaan tuulivoimalan enimmillään tuottamaa tehoa. Tuulivoimaloiden kapasiteetti on kasvanut ajan ja teknologian kehityksen myötä. Tämän päivän uusien tuulivoimahankkeiden turbiiniteho on tyypillisesti noin 4–6 MW maalla ja merellä noin 8–12 MW. (Motiva n.d.; IRENA n.d.) Kiinassa on liitetty sähköverkkoon jopa 16 MW merituulivoimaloita ja ensimmäiset niistä sijaitsevat Zhangpu Liuaos -merituulipuistossa (Buljan A. 2023). Turbiinien halkaisijan koko on kasvanut kymmenistä metreistä yli 200 metriin. (Korpela Aki 2014)

2.2 Tuulivoimalavaihtoehdot

Tuulivoimala koostuu useasta komponentista, joista tärkeimmät ovat roottorin lavat, generaattori ja vaihteisto. Rakenteeseen palataan tarkemmin luvussa 2.3. Tuulivoimalan generaattorina voidaan käyttää useita erilaisia generaattoreita riippuen halutusta toiminnallisuudesta. Yleisimmät tuuliturbiinien generaattorit ovat epätahtigeneraattori ja tahtigeneraattori. Epätahtigeneraattorissa on useita etuja, kuten kestävyys ja mekaaninen yksinkertaisuus, ja koska sitä valmistetaan suurissa sarjoissa, se on myös edullisempi kuin tahtigeneraattori. Tässä työssä tuulivoimalan toimintaa ja generaattorityyppejä tarkastellaan yleisellä tasolla, joten eri generaattorivaihtoehtoihin ja voimalan toimintaan ei perehdytä yksityiskohtaisemmin.

Tuulivoimalat voidaan jakaa vakionopeuksisiin ja muuttuvanopeuksisiin tuulivoimaloihin. Suurimmat koneet toimivat yleensä muuttuvalla nopeudella, kun taas pienemmät, yksinkertaisemmat turbiinit ovat kiinteänopeuksisia. (Anaya-Lara et al. 2009, p. 7) Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala tarjoaa merkittäviä etuja. Turbiinin roottorin sallitaan pyöriä optimaalisella nopeudella vallitsevien tuuliolosuhteiden mukaan, joka myös vähentää komponenttien rasitusta. Maksimaalinen tehokkuus pystytään saavuttamaan laajalla tuulennopeuksien alueella. Muuttuvanopeuksisen tuuliturbiinin sähköjärjestelmä on monimutkaisempi kuin vakionopeuksisen tuuliturbiinin. Se on tyypillisesti varustettu epätahti- tai tahtigeneraattorilla ja kytketty verkkoon tehomuuntimen kautta, joka ohjaa generaattorin nopeutta (Ackermann 2005, p. 54; Breeze 2015, p. 47)

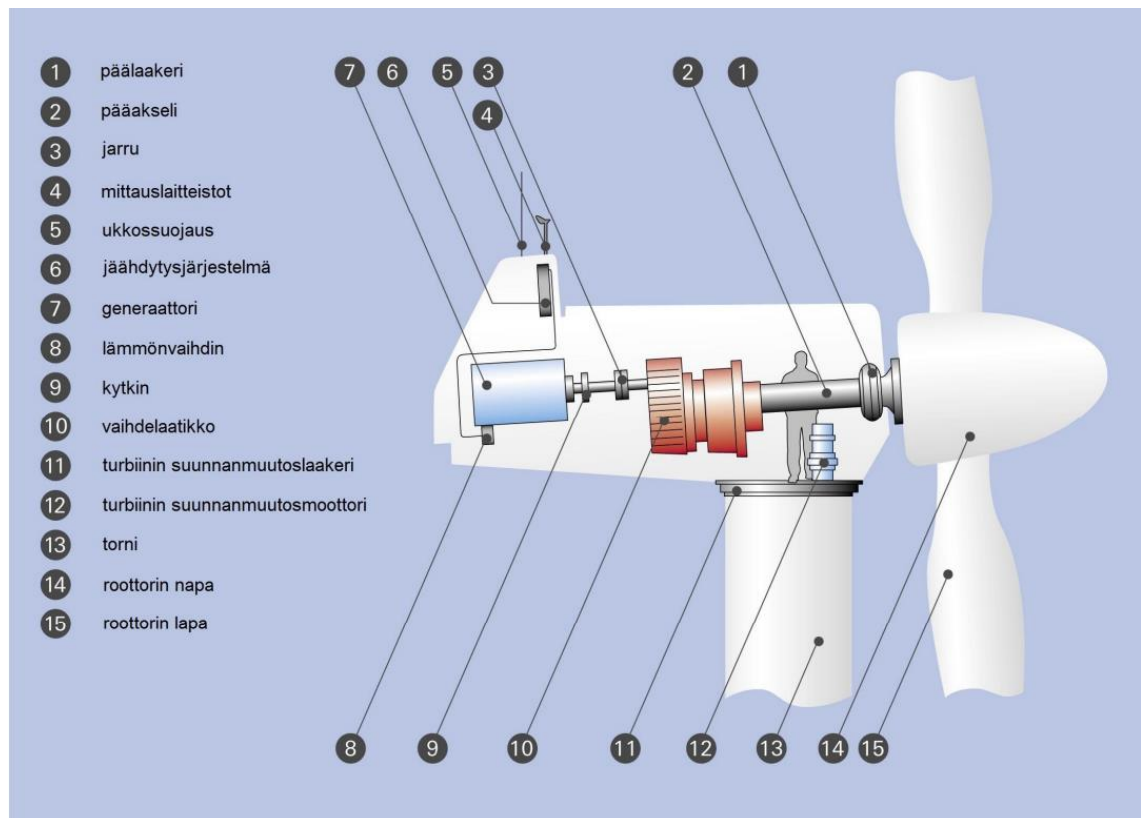
Kiinteänopeuksiset tuuliturbiinit ovat sähkötekniisesti melko yksinkertaisia laitteita, jotka koostuvat aerodynaamisesta roottorista, joka pyörittää hidaskäyntistä akselia, vaihde-laatikosta, nopeasta akselista ja epätahtigeneraattorista. (Anaya-Lara et al. 2009, pp. 7–8) Vakionopeuksiset tuulivoimalat toimivat kiinteällä nopeudella. Tämä tarkoittaa, että tuulen nopeudesta riippumatta tuuliturbiinin roottorin pyörimisnopeus on kiinteä ja määräytyy syöttöverkon taajuuden, vaihteiston välityssuhteen ja generaattorin rakenteen mukaan. Maksimaalisen hyötysuhteen vakionopeuksinen tuulivoimala on suunniteltu saatuttamaan tietyllä tuulen nopeudella. (Ackermann 2005, pp. 53–54)

2.3 Tuulivoimalan rakenne

Nykyaikaiset tuuliturbiinit jaetaan ensisijaisesti vaaka-akselisiin ja pystyakselisiin. Pystyakseliset tuuliturbiinit eivät ole herkkiä tuulen suunnalle, sillä ne pyörivät torninsa ympäri. Pystyakseliset tuulivoimalat toimivat hyvin myös pyörteisissä tuulissa. Pystyakseliset tuuliturbiinit ovat usein vaaka-akselisia tehottomampia, koska niiden siipien pohja on lähellä maata (Breeze 2015, p. 19; Eri tuulivoimalatyyppejä n.d.). Suurin osa nykyaikaisista tuuliturbiineista on kolmilapaisia, vaaka-akselisia ja kääntyvät tuulen suuntaan (Motiva 2022). Tässä työssä käsitellään lähtökohtaisesti kolmilapaisia vaaka-akselisia tuulivoimaloita.

Vaaka-akselinen tuulivoimala koostuu perustuksista, tornista, roottorista ja konehuoneesta eli nasellista, joka on asennettu tornin yläosaan. Tuuliturbiinin roottorilla tarkoitetaan navasta ja lavoista muodostuvaa kokonaisuutta. Naselli sisältää useita komponentteja, jotka edistävät energian muuntamisprosessissa tuulivoimasta sähköenergiaksi. Kuva 1 esittää tuuliturbiinin pääkomponentit, kuten roottori, vaihteisto, generaattori, mitauslaitteistot sekä säätö- ja ohjausjärjestelmät (Korpela Aki 2014). Lisäksi tuuliturbiini pitää sisällään muuntajan ja yhteyden verkkoon. (Letcher & Letcher 2017, pp. 145–147; Tuulivoimaloiden rakenne n.d.)

Tuulivoimalan torni ja roottori vaativat vakaan perustuksen estämään rakenteen kaatumisen tuulen voimasta. Maalla se on tavallisesti maahan haudattu massiivinen teräsvahvisteinen betonirakenne (Breeze 2015, p. 26). Monimutkaisempia perustuksia käytetään usein merituulivoimaloiden rakenteissa, joihin palataan luvussa 2.4.1.

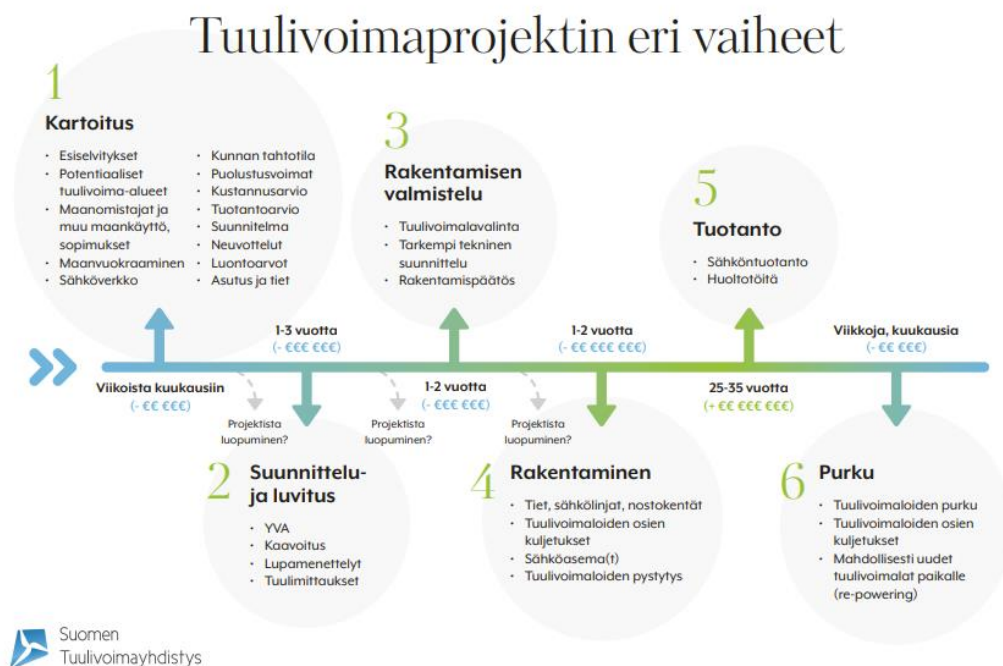


Kuva 1. Esitys tuulivoimalan rakenteesta (Korpela Aki 2014).

Tuuliturbiinissa mekaaninen liike-energia saadaan pyörivästä roottorista. Roottorin liike-energia siirretään suoraan tai vaihteiston kautta sähkögeneraattoriin. Sähkögeneraattori on kone, joka muuttaa mekaanisen liike-energian sähköenergiaksi. Generaattoreina käytetään epätahti- tai tahtigeneraattoreita. Perinteiset sähkögeneraattorit toimivat yleensä suurella nopeudella, kun taas suurten tuuliturbiinien roottorit pyörivät suhteellisen hitaasti. Tämän seurauksena vaihdelaatikko on välttämätön, jotta saadaan roottorin pyörimisnopeus generaattorille sopivaksi ja generaattori toimisi tehokkaasti. Vaihteistoa on usein pidetty voimansiirron vioittumisalttiimpana komponenttina. Vaihteistoja voidaan vahvistaa, mutta vaihtoehtona on luopua vaihteistosta ja kytkeä roottorin akseli suoraan generaattoriin. Tämä suoravetoinen järjestelmä yksinkertaistaa voimansiirtoa, mutta vaatii sitten erityisen, kalliimman generaattorin, joka pyörii samalla roottorin erittäin hitaalla pyörimisnopeudella. Nämä generaattorit ovat paljon raskaampia kuin perinteiset generaattorit, sillä kenttäkäämitys on korvattu kestopagneeteilla. (Breeze 2015, p. 41; Walker & Swift 2015, p. 75)

2.4 Tuulivoimalahanke

Tärkein tuulipuistohankkeen onnistumiseen vaikuttava tekijä on voimalan sijainnin valinta. Sijainnin valinta määrittää tuulipuiston tehokkuuden sekä vaikutukset ympäristöön, hyödyt ja kustannukset. Tuulivoimavarojen tuottaman tehon maksimoimiseksi sekä maan- että merituulivoimaloiden sijainnit on optimoitava erilaisten kriteerien perusteella; ilmasto, maantieteellinen sijainti, ympäristövaikutukset sekä taloudelliset ja poliittiset kriteerit. Vaikka tuulivoimamarkkinoiden nykyinen suuntaus on yhä suotuisampi ja optimisempi, on vielä ratkaistavana merkittäviä esteitä, jotka liittyvät pääasiassa tuulivoimaloiden optimaaliseen maantieteelliseen sijaintiin - sekä maalla että merellä. Epätarkat ennusteet tuulienergian tuotannosta voivat johtaa tuulivoimaloiden tehottomuuteen ja sen seurauksena suuriin taloudellisiin tappioihin. Tuulivoimalahankkeen eri vaiheet esitetään yleispiirteittäin kuvassa 2 (Maa- ja metsätaloustuottajain Keskusliitto MTK ry 2022).



Kuva 2. Tuulivoimahankeen eri vaiheet (Maa- ja metsätaloustuottajain Keskusliitto MTK ry 2022)

Jokainen tuulivoimahanke alkaa optimaalisen sijaintipaikan arvioinnilla ja valinnalla. Ensisijaisesti tuulivoimaloiden sijoittelussa on otettava huomioon keskimääräisen tuulennopeuden ja ilman tiheyden lisäksi tuulen suunta. Tuulen nopeutta pidetään merkityksellisimpänä muuttujana sekä maan- että merituulivoimateknologian kannalta. Luvun 2 kaavasta 2 huomataan tuulen nopeuden suuri vaikutus ja ilman tiheyden vaikuttava merkitys ilmavirtauksen tehoon. Lisäksi huomioitavia ilmastoon liittyviä tuulivoiman tuotantoon

vaikuttavia tekijöitä ovat luonnonkatastrofit, kuten hurrikaanit tai maanjäristykset, jotka voivat vaurioittaa tuulivoimaloita, sekä kylmät sääolosuhteet, jotka voivat aiheuttaa roottorin lapojen jäätymistä. (Gil-García, Socorro García-Cascales, et al. 2019)

Tuulivoimalat tulee sijoittaa niin, että ne eivät varjosta toisiaan. Tuulivoimalat sijoitetaan tiettyyn muotoon tai tiheyteen tuulipuistossa ja ne voivat häiritä toistensa ilmavirtoja ja vähentää siten koko tuulipuiston energiantuotantoa, sillä tuuliturbiini luo takanaan olevaan tuulivoimalaan tai tuulipuiston alueelle hidastuneen ja pyörteenomaisen tuulivirran. Sijoittelussa tulee siis huomioida turbiinien lukumäärä, välimatka ja suunta toisiinsa ja vallitsevaan tuulensuuntaan nähden. Etäisyys yhteisestä kytkentäpisteestä on myös otettava huomioon, sillä tavoitteena on minimoida kustannukset ja tehohäviöt. (Archer et al. 2013; Gil-García, García-Cascales, et al. 2019)

Maantieteellisessä sijainnissa eniten vaikuttavia tekijöitä ovat maan pinnanmuodot, korkeus merenpinnasta ja ilmasto-olosuhteet maatuulivoimaloissa. Kitkan eli pyörreviskositeetin vaikutus tuulen nopeuteen on merkittävä. Pinnanmuodot ja maanpäälliset rakenteet aiheuttavat pyörreviskositeettia ja pyörteisyyttä ilmavirtauksiin, joka vaikuttaa suoraan tuulivoiman tuottamaan tehoon. Pinnanmuodot ja monimutkainen maasto, kuten vuoristoiset alueet, vaikeuttavat myös tuulivoimaloiden asennusta. Tämän takia maatuulivoimalat rakennetaan tasaisille alueille ja lapakorkeudet kasvavat vuosittain. Merituulivoimaloissa vaikuttavin tekijä on vesistön syvyys, joka on keskeinen tekninen tekijä päätettäessä merituulivoimalan perustuksista ja rakenteesta. Aallon korkeuksilla ja vaihtelevuudella on myös keskeinen merkitys merituulivoimalan rakenteeseen. Meriturvallisuus on keskeinen kysymys merituulipuiston kannalta vilkkailla vesiväylillä. Vilkkailla merenkulkuväylillä merituulipuiston rakentaminen vie merenkulkukelpoisia vesiväyliä ja vaikuttaa myös merenkulututkiin ja erittäin korkeisiin taajuuksiin, joita käytetään alusten yhteentörmäysten välttämiseksi. (Gil-García, Socorro García-Cascales, et al. 2019; Wu et al. 2018)

Ympäristövaikutukset ovat yksi kriteeri tuulivoimaloiden rakentamiselle. Kaikkia ympäristövaikutuksia ei voida välttää, mutta niitä voidaan minimoida asianmukaisella suunnittelulla ja sijoittelulla. Suomen Tuulivoimayhdistyksen (STY) (Tuulivoiman ympäristövaikutukset n.d.) mukaan tuulivoimahankkeessa on selvitettävä ja arvioitava tarkasti sen vaikutukset elämistöön ja kasvillisuuteen. Huomioon on myös otettava tuulivoimaloiden meluvaikutukset ja äänen voimakkuuden lähtötason määrittäminen ja vaimeneminen on mitattava. Tuulivoimaloiden vaikutus maisemaan on merkittävä niiden suuren koon vuoksi. Niiden korkeus tekee niistä helposti havaittavia, ja siksi on välttämätöntä kiinnittää erityistä huomiota niiden huolelliseen sijoittamiseen. Tarkkaan harkitun suunnittelun avulla voidaan lieventää ja estää tuulivoimaloiden negatiivisia vaikutuksia maisemaan.

Samalla voidaan löytää ratkaisuja sijoittelulle, mitkä voivat tuoda lisäarvoa ympäröivälle maisemalle tuulivoimaloista huolimatta.

Tuulipuiston optimaalisessa sijoittelussa on huomioitava kokonaiskustannukset, jotka muodostuvat rakentamisesta, tehohäviöstä, kunnossapidosta ja luotettavuudesta aiheutuvien kustannusten summasta. Kokonaiskustannukset pyritään saamaan mahdollisimman pieniksi (Shin & Kim 2017). Kustannusten merkittävää alenemista on tukenut teknologian kehittyminen: asteittaiset teknologiset innovaatiot, toimitusketjun huomattavat parannukset, riskipreemion aleneminen, rakennuttajien ja toimijoiden pätevyyden parantuminen ja markkinoiden suuri volyyymi (Gil-García, García-Cascales, et al. 2019).

Rakentaminen Suomessa on sallittua ainoastaan alueilla, joilla rakennuttajalla on hallintaoikeus. Tämän vuoksi tarvittavat maa-alueiden varaukset tehdään heti tuulivoimahankkeen alkuvaiheessa. Maa-alue on mahdollista joko ostaa tai vuokrata. Tuulivoimapuistolle on myös haettava luvat ennen sen rakentamista. Tuulivoimahankkeen toteutumisen kannalta tuulivoimaosayleiskaava, asemakaava tai suunnittelutarveratkaisu, rakennuslupa, verkkoliityntäsopimus, vesilupa, lentoestelupa, ympäristölupa sekä Puolustusvoimien myönteinen kanta ovat edellytyksiä tuulivoimahankkeelle Suomessa. (Tuulivoimahankkeen vaiheet n.d.)

Maailmanlaajuisesti merituuliprojekteilla kestää yleensä noin vuosikymmenen siirtyäkseen alkuvaiheesta täyteen käyttöönottoon. Suurin osa tästä ajasta kuluu lupa- ja suostumusvaiheessa, ja aikataulut voivat venyä vielä pidemmiksi, jos lupaprosessissa on esteitä tai viivästyksiä. Yleisesti ottaen, kun lupa on saatu, suuret merituuliprojektit voidaan rakentaa hyvin nopeasti - yleensä kahdessa vuodessa, riippuen projektin koosta. Tehokkaasti hoidettu lupaprosessit voivat avata merkittäviä määriä merituulivoimakapasiteettia, mahdollistaen sen osallistumisen talouskasvuun sekä suurimittaiseen, kotimaiseen puhtaanenergian tuotantoon. (GWEC 2023; Merituulivoimahankkeiden vaiheet n.d.)

3. TUULIVOIMAN POTENTIAALI

Uusiutuvan energian kasvu vaatii enemmän tuulivoimaloiden asentamista ja käyttöä vaikeammassa olosuhteissa maalla ja merellä. Tässä luvussa käsitellään merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman keskeisiä piirteitä ja niiden mahdollisuuksia energiantuotannossa. Merituulivoiman osalta tarkastellaan sen historiaa, kehitystä ja etuja, kun taas arktisessa tuulivoimassa otetaan huomioon haastavat sääolosuhteet ja tekniset vaatimukset, joita tarvitaan tällaisten alueiden hyödyntämiseksi tuulienergian tuotannossa.

3.1 Merituulivoima

Merituulivoimalla tarkoitetaan merelle rakennettujen (offshore) tuulivoimaloiden tuottamaa tuulivoimaa. Ensimmäinen merituulivoimala oli 220 kW:n turbiini, joka asennettiin noin 250 metrin päähän rannikosta 6 metrin vesisyvyyteen Nogersundin edustalle Etelä-Ruotsiin vuonna 1990. Seuraavana vuonna 1991 asennettiin ensimmäinen merituulipuisto, Vindeby, johon kuului yksitoista 450 kW:n turbiinia noin 1 km:n etäisyydelle rannikosta 2–4 m:n vesisyvyyteen Lollandin edustalle Tanskaan. (Anaya-Lara et al. 2018, p. 58)

Offshore-tuulivoimaloiden kapasiteetti on parantunut merkittävästi ajan myötä. Maailmanlaajuinen keskimääräinen merituuliturbiinin koko oli 1,5 megawattia (MW) vuonna 2000. Euroopassa vuonna 2009 keskimääräinen merituuliturbiinin teho oli noin 3 MW. Keskimääräinen turbiinin koko oli yli 7,2 MW uusissa asennuksissa Euroopassa vuonna 2019 (Bilgili & Alphan 2022). Vuonna 2022 merituulivoiman kokonaiskapasiteetti nousi yli 64 gigawattiin (GW) maailman laajuisesti, mikä vastaa noin 8 prosenttia koko maailman tuulivoimakapasiteetista (GWEC 2023).

Merituulivoiman kehittäminen edistää pitkän aikavälin toimitusvarmuutta kotimaisena uusiutuvana energialähteenä sen sijaan, että tuotaisiin tai käytettäisiin loppuun rajallisia fossiilisia polttoainevarantoja, ja se voi olla keino lisätä teollisuuden kasvua. Monet suuret kaupungit sijaitsevat lähellä merta, joten merituulipuistoja voidaan rakentaa niiden läheisyyteen. Tämä voi olla houkuttelevampi vaihtoehto pitkille siirtolinjoille tai voimaloiden sijoittamiselle maalle lähelle suuria kaupunkeja, joissa kiinteistöjen arvo on korkea. (Anaya-Lara et al. 2018, pp. 57–69)

Offshore-tuuliturbiinien asennus ja tukirakenne on paljon kalliimpaa kuin maalla sijaitsevien tuulivoimaloiden. Tästä syystä offshore-tuulipuistot käyttävät suuren nimellistehoisuuden (>7 MW) tuuliturbiineja, jotka on suunniteltu erityisesti suurille tuulenopeuksille.

Pienemmästä pinnan karheuden ansiosta tuulen nopeus kasvaa nopeammin korkeuden myötä kuin maalla ja käytettävissä oleva lähes rajoittamaton tila ovat olennaisia kannustimia tuuliturbiinien sijoittamiselle merelle. Tuulen nopeus merellä on potentiaalisesti korkeampi kuin mantereella ja siinä on vähemmän vaihtelua kuin maa-alueilla. Tämä johtaa paljon suurempaan energiantuotantoon, kuten kaavasta 2 voidaan päätellä. Merellä tuuli on tasaisempaa, mikä vähentää turbulenssin vaikutuksia. Tämän ansiosta tuuliturbiinien rasitus on vähäisempää ja pidentää mahdollisesti offshore-tuuliturbiinien elinkaarta. (Ackermann 2005; Bilgili & Alphan 2022)

Merituulivoiman, erityisesti suurempien tuulipuistojen, kehittäminen tapahtuu yleensä yli 5 kilometrin päässä rannikosta ympäristövaikutusten vähentämiseksi (Anaya-Lara et al. 2009, p. 2). Merellä on enemmän vapaata tilaa tuuliturbiinien asentamiseen, mikä mahdollistaa suuremman kapasiteetin asennukset kuin maatuulipuistoissa. Merellä sijaitsevien tuulipuistojen etuihin kuuluvat vähäisempi visuaalinen häirintä ja pienempi meluhaitta, näin ollen ne myös aiheuttavat vähemmän sosiaalista vastustusta. Offshore-tuulivoimaloiden sijainti kaukana asutuskeskuksista vähentää melupäästöjen aiheuttamia ympäristövaikutuksia, jotka liittyvät pääasiassa lapojen pyörimisnopeuden kasvuun. Myös tuulivoimaloiden visuaalinen vaikutus voi olla vähäisempi suurien etäisyyksien myötä. (Esteban et al. 2011)

Aiemmin merituulivoimapuistot sijaitsivat yleensä enintään 10 kilometrin päässä rannikosta, ja veden syvyys oli alle 20 metriä. Kuitenkin, kun tällaisten sijaintien saatavuus on ehtynyt, uudet merituulivoimapuistot ovat siirtyneet kauemmas ja syvempiin sijainteihin. Esimerkiksi Yhdistyneessä kuningaskunnassa kehitteillä oleva "Dogger Bank" -tuulivoimapuisto on yksi maailman suurimmista tuulivoimapuistoista ja sijaitsee yli 100 kilometrin päässä rannikosta, ja sen reunasta reunaan ulottuva etäisyys on tällä hetkellä 260 kilometriä. Yleisesti ottaen suurempien tuulivoimapuistojen kehittäminen kauempana rannikolta voi mahdollistaa suuremman energiansaannin ja siten paremman taloudellisen tuoton. Useimmat toiminnassa olevat tuulipuistot ovat kytkettyinä korkeajännitteisiin vaihtovirtaverkkoihin (HVAC), kuitenkin korkeajännitteinen tasavirta (HVDC) voi olla kustannustehokkaampi ja sen sähköhäviöt ovat pienemmät pidemmillä etäisyyksillä. Siirto-tekniikkaan vaikuttavat keskeisesti etäisyys merituulipuistosta mantereelle ja siirrettävä tehon määrä. Kun merituulivoimahankkeet laajenevat syvemmille vesille, joissa ympäristöolosuhteet vaihtelevat, kehittyneestä kaapelointiteknologiasta tulee olennaisen tärkeää kapasiteetiltaan ja halkaisijaltaan suurempien voimakaapelien kehittämiseksi. (Anaya-Lara et al. 2014, p. 118, 150; Ng & Ran 2016)

Tuulivoimapuistojen koon kasvaminen ja etäisyys rannikosta ovat molemmat vääjäämättömiä tulevaisuuden merituulivoimapuistojen kehityksessä. Riippuvuuden vähentämiseksi matalista vesipaikoista ja tuuliresurssien tutkimiseksi kauempana rannikolta ja syvemmällä vesialueilla on ehdotettu kelluvia tuuliturbiineja, ja niiden kehitys on saavuttanut hyvää edistystä viime vuosina. (Ng & Ran 2016)

3.2 Arktinen tuulivoima

Lukuisat kylmän ilmaston sijainnit ympäri maailmaa tarjoavat suuren tuulivoimapotentiaalin vaativissa talviolosuhteissa. Kylmällä ilmastolla tarkoitetaan tässä yhteydessä jääolosuhteita ja matalia lämpötiloja, arktisen alueen olosuhteita, joka on tuuliturbiinien normaalien käyttörajojen ulkopuolella. Arktinen alue voidaan määritellä useilla eri tavoilla. Tässä työssä alue määritellään lämpötilan mukaan. Tällä tavalla määriteltynä arktisen alueen keskilämpötila pysyy alle $+10^{\circ}\text{C}$ jokaisena kuukautena vuoden ympäri, mukaan lukien kesällä (Arktinen keskus n.d.). Arktiset alueet sijaitsevat pohjoisnavan ympärillä. Niihin kuuluvat Kanadan, Yhdysvaltojen, Venäjän, Suomen, Ruotsin, Norjan, Islannin ja Grönlannin pohjoisosat, jotka voidaan nähdä kuvasta 3 (AMAP n.d.).



Kuva 3. Arktinen alue määritetty lämpötilan mukaan (AMAP n.d.)

Arktisen ilmaston alueet ovat usein harvaan asuttua aluetta. Hyvien tuulivarojen ja alhaisen asukastiheyden yhdistelmä tekee näistä alueista houkuttelevia tuulienergian tuotannolle, mutta sääolosuhteet haittaavat näiden resurssien hyödyntämistä. Monet tekniset

ja turvallisuuteen liittyvät ongelmat on ratkaistava ennen kuin tuulivoimaprojektit voivat olla taloudellisesti kannattavia kylmissä ilmastoissa. Tuulivoimaloiden jäätyminen vähentää energian tuottoa, lyhentää turbiinien mekaanista käyttöikää ja aiheuttaa turvallisuusriskejä muun muassa jään putoamisen muodossa. Näiden haasteiden ratkaisemisessa on edistytty viime vuosina, esimerkiksi jäänpoisto- ja jäänestojärjestelmiä on kehitetty, mutta vielä on tehtävä enemmän tuulivoiman kustannusten alentamiseksi kylmässä ilmastossa. (Wallenius & Lehtomäki 2016) Arktisen tuulivoiman teknisiä vaatimuksia käydään tarkemmin läpi luvussa 4.2.

Lauhkean vyöhykkeen sijaintien rajallisen määrän ja kehittämisen odotettua korkeampien kustannusten vuoksi suuret tuulivoimahankkeet arktisissa olosuhteissa ovat tulleet houkutteleviksi edellä mainittujen hyvien tuuliolosuhteiden ja alhaisen väestötiheyden vuoksi. Kehityksen ja tutkimuksen lisääntyminen yhdistettynä arktisiin olosuhteisiin keskittyviin teknologian parannuksiin on mahdollistanut tällaisten hankkeiden kilpailukyvyn vahvistumisen verrattuna perinteisiin maatuulivoimahankkeisiin, joissa tuulivarat ovat alhaisemmat, ja offshore-hankkeisiin, jotka on rakennettu korkeammilla kustannuksilla. (Erlend Bredesen et al. 2017)

4. TUULIVOIMAN HAASTEET

Tässä luvussa perehdytään merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman haasteisiin ja mahdollisiin teknologisiin ratkaisuihin, joiden avulla voidaan paremmin hyödyntää näiden teknologioiden tuulivoimapotentiaalia.

4.1 Merituulivoima

Merituulipuiston rakentaminen on äärimmäisen vaativa tehtävä, joka johtuu sen sijainnista merellä, haastavista työolosuhteista ja suurista rakenteista. Erityisen kriittisiä vaiheita rakennusprosessissa ovat merellä suoritettavat kuljetus- ja nosto-operaatiot. (Jääskeläinen et al. 2012) Näihin haasteisiin vastaaminen ja merituulivoimaloiden käyttökelpoisuuden ylläpitäminen on yhä tärkeämpää, kun riippuvuus merituulivoimasta kasvaa.

Merellä sijaitsevien tuulipuistojen perustamiseen liittyy merkittäviä teknisiä haasteita, mukaan lukien suunnitteluvaatimukset ankaran meriympäristön kestämiseksi, pitkäkestoiset vaikutukset suurissa aaltokuormituksissa ja tuulipyörteet (Ng & Ran 2016, pp. 589–610). Maalla sijaitseviin tuulivoimaloihin verrattuna offshore-tuulivoimalat asettavat huomattavasti korkeammat vaatimukset tuuliturbiinien teknisille laitteille ja rakenteiden kestävyydelle. Nykyiset tuuliturbiinit on suunniteltu pääosin sijoitettavaksi maalla ja merellä sijaitsevaan tuuliturbiiniin kohdistuu tyypillisesti erilaiset ulkoiset olosuhteet, jotka on otettava huomioon suunnittelussa. Näiden ulkoisten olosuhteiden takia offshore-tuulivoimaloissa on kiinnitettävä etenkin huomiota huollettavuuteen ja luotettavuuteen, sillä voimaloiden luokse pääsy voi olla haastavaa tietyissä sääolosuhteissa. (Hau & Renouard 2013, pp. 634–640; Holtinen et al. 1998)

Investointikustannusten kehitykseen vaikuttaa merituulivoimahankkeiden määrä, joka lisää tarvittavaa teknologian kehitystä. Toistaiseksi kuitenkin kokemus merituulivoimahankkeista on rajallinen, esimerkiksi Suomessa toteutettuja hankkeita on ainoastaan yksi; Porin Tahkoluodon merituulipuisto. Merituulivoimaloiden investointikustannustason muutos johtuu pääasiassa tuulivoimaloiden koon kasvusta, komponenttien hintojen laskusta sekä kokonaishyötysuhteen parantumisesta. (Vakkilainen & Kivistö 2017) Siirtoverkkokustannukset pois lukien maailmanlaajuiset investointikustannukset merituulivoimahankkeille olivat keskimäärin noin 3,3 miljoonaa €/MW vuonna 2018 ja niiden arvioidaan laskevan 1,5 miljoonaan €/MW vuoteen 2030 ja alle 1,0 miljoonaan €/MW vuoteen 2040 mennessä. Kuitenkin hankekohtaiset investointikustannukset vaihtelevat laajasti

johtuen yksityiskohdista ja alueellisista erityispiirteistä kuten sijainnista, etäisyys rannikosta, veden syvyydestä. (IEA 2019)

4.1.1 Tekniset vaatimukset merituulivoimaloissa

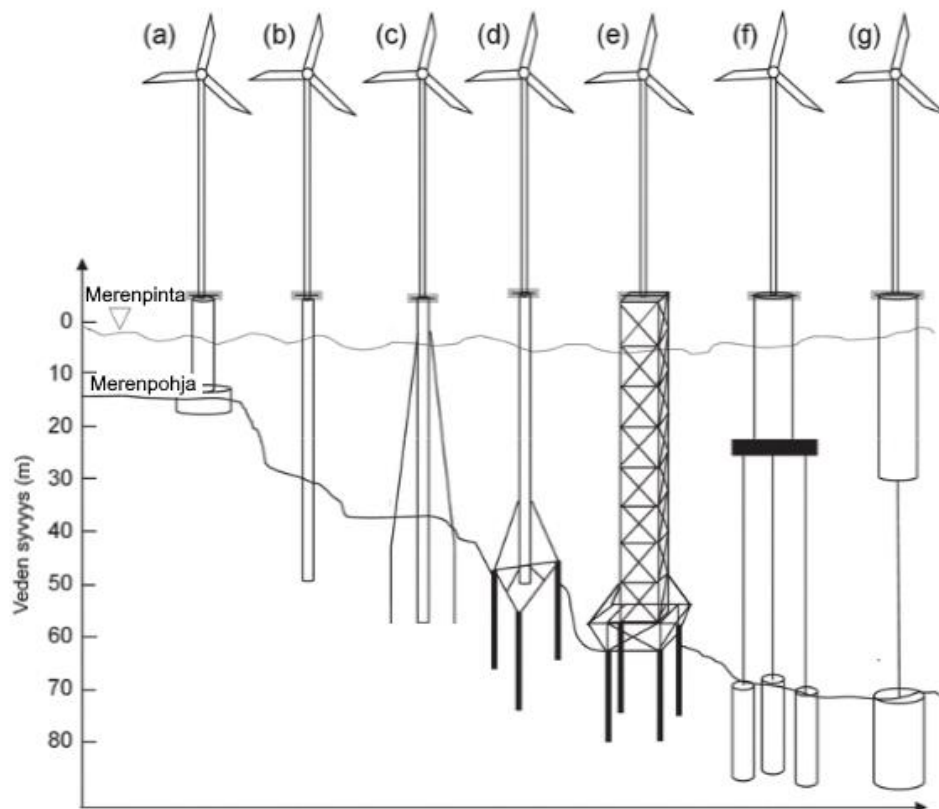
Tuulivoimalan tekniset vaatimukset offshore-tuulivoimaloissa eroavat huomattavasti verrattuna perinteiseen maatuulivoimaan. Tuuli-, aalto- ja jääkuormat vaikuttavat ensisijaisesti tornin rakenteeseen ja perustuksiin. Joillakin merialueilla nousuvedet tai veden virtaukset voivat olla voimakkaasti tuuliturbiinin tornia kuormittavia, mitkä pitää ottaa suunnitellussa huomioon. Aalto- ja jääkuormat vaikuttavat ensisijaisesti tornin ja perustuksien rakenteisiin, kun taas tuulikuormat lähes yksinomaan roottoriin ja mekaaniseen voimansiirtoon. Rakenteet pitää myös suojata asianmukaisin suojatoimenpitein meren aiheuttamalta korroosiolta. Offshore-tuulivoimalat vaativat paljon enemmän korroosiosuojaa lähes kaikissa rakennesuosissa ja rakenteet tulee olla paremmin tiivistettyjä suolaiselta merivedeltä. (Hau & Renouard 2013, pp. 634–640)

Merellä tuuliolosuhteet ovat tasaisemmat ja tuulen keskinopeus on korkeampi kuin sisämaassa. Suurten tuulenopeuksien hyödyntämiseksi merellä sijaitsevien tuuliturbiinien tornien ei tarvitse olla yhtä korkeita kuin sisämaassa. Tornin korkeus suhteessa roottorin halkaisijaan määräytyy myös merentieteellisten olosuhteiden mukaan. Huomioon otettavat tekijät ovat normaali veden syvyys merenpohjan yläpuolella, vuorovesialue, odotettavissa oleva suurin aallonkorkeus ja riittävä etäisyys roottoriin. (Hau & Renouard 2013, pp. 634–640)

Veden syvyys on yksi kriittisimmistä parametreista merituuliturbiinien suunnittelussa ja asentamisessa. Valitettavasti vesisyvyudet vaihtelevat merissä ja valtamerissä merkittävästi. Vaikka merituuliturbiinit sijoitetaan suhteellisen mataliin vesiin, näiden tuuliturbiinien asentaminen syvään veteen on äskettäin alkanut lisääntyä merkittävästi, koska yli 80 % kaikista maailman merituulivoiman lähteistä sijaitsee yli 60 metrin syvyisissä vesissä, joissa pohjaan kiinnitetyt rakenteet eivät ole mahdollisia. Valitettavasti turvallisten ja kestävien tuulipuistojen rakentaminen yli 60 metrin syvyisissä vesissä on erittäin vaikeaa. Kelluvat tuuliturbiinit ovat teknologioita, jotka voivat ratkaista tämän haasteen. (Bilgili & Alphan 2022)

Tuulivoimalan perustuksen on oltava jatkuvasti vakaa ja pysyvä paikallaan. Se toimii ankkurina, joka kiinnittää tuulivoimalan meren pohjaan, tarjoaa tuen turbiinille ja siirtää tuulivoimalan aiheuttamat kuormitukset, kuten painon ja dynaamiset kuormat, meren pohjaan. Perustustyyppin valinta riippuu merenpohjan ominaisuuksista, veden syvyydestä ja muista tekijöistä, kuten aalloista, jäästä ja virtauksista, jotka vaikuttavat perustukseen.

(Jääskeläinen et al. 2012) Kuva 4 esittää erilaisia ratkaisuja offshore-tuuliturbiinin perustuksille (Ng & Ran 2016). Kiinteillä perustuksilla varustetut merituulipuistot ovat yleisin asennustyyppi. Niitä asennetaan säännöllisesti vesisyvyysiksiin, jotka ovat enintään 40 metriä ja jopa 80 kilometrin etäisyydelle rannikolta. Ajan myötä on kehitetty erilaisia kiinteitä merituuliturbiineja, joista yleisimpiä ovat paaluperustukset, painovoimaan perustuvat perustukset, kolmijalkaiset perustukset ja kehikkorakenteiset perustukset. Toisaalta kelluvat tuulivoimalat ovat yksi viimeaikaisista kehityskohteista offshore-tuulivoimateknologioissa, ja ne tarjoavat useita mahdollisuuksia. Kiinteät perustusratkaisut rajoittuvat matalaan vesisyvyyteen, joten on tärkeää kehittää vaihtoehtoisia perustusratkaisuja, jotka pystyvät tukemaan suurempia tuuliturbiineja syvämmässä vedessä ja kestäämään suurempia aaltokuormia. Kelluvan perustuksen tyyppisiä turbiineja käytetään yleensä yli 50–60 metrin syvyyksissä, koska kiinteät perustukset ovat kalliita syvämmillä vesillä. Kelluvien perustusten suunnittelu ja rakentaminen ovat kuitenkin monimutkaisempia, koska ne eivät saa liikkua tuulen ja aallokon vaikutuksesta, sillä se häiritäisi turbiinin toimintaa. (Bilgili & Alphan 2022; Jääskeläinen et al. 2012)



Kuva 4. (a) Betoninen kasuuni. (b) Teräksinen junnitapaalu (c) Junnitapaalu ja harusvaijerit. (d) Kolmijalkainen perustus. (e) Kehikkorakenteiset perustukset. (f) TLS. (g) Ankkuroitu poiju. (Ng & Ran 2016, mukailen)

Merellisten tuulivoimaloiden perustukset edellyttävät huomattavasti monimutkaisempaa suunnittelua kuin maalla sijaitsevien tuulivoimaloiden perustukset. Suunnittelu edellyttää

perusteellista ympäristötekijöiden vaikutuksien huomioimista. Rakennusmateriaaleissa ja pinnankäsittelyissä on otettava huomioon teräksen korroosion estäminen, betonin suojaaminen huokosveden jäätymiseltä ja pohjan eroosio. Tuulivoimaloiden kulkutiet on suunniteltava niin, että niihin on mahdollista päästä sekä kohtuullisessa aallokossa että myös talvella jäiden aikana. Suunnittelussa tulee myös ottaa huomioon huoltoveneiden telakointilaiturit, sääntöjen mukainen valaistus merellä sekä valvonta- ja ohjausjärjestelmät, joita voidaan ohjata etänä maasta käsin. Lisäksi perustusrakenteiden muotoilulla voidaan merkittävästi vähentää jääkuormien vaikutusta. (Hau & Renouard 2013, pp. 634–640; Holttinen et al. 1998, s. 112)

Merenpohjan rakenteella on merkitystä tuulivoimalan perustuksen rakentamisen kannalta. Pohjanmeren ja Itämeren alueella suurin osa merenpohjasta koostuu hienosta hiekasta. Sen seassa on karkeampaa hiekkaa ja suhteellisen suuria kiviaineksen kerääntymiä. Jos käytetään paaluperustuksia, pohjan lujuudella on merkitystä tuulivoimalan tärinäominaisuuksiin. Merenpohjan yhteydessä tulee huomioida virtaukset, jotka voivat aiheuttaa huomattavia maamateriaalin siirtymiä hiekkapohjan tapauksessa ja hankausta esteiden, kuten perustusten tapauksessa. Tällä voi olla huomattava vaikutus perustusten vakauteen. Näistä syistä huolellinen maaperän testaus on ehdoton edellytys offshore-tuulivoimalan suunnittelulle ja sijoittamiselle. (Hau & Renouard 2013, p. 704)

Tärkeimmät komponentit tuulivoimalan sähköverkkoliitäntään ovat merisähköasema, merikaapelit ja maasähköasema. Sähkönsiirtojärjestelmissä käytetään merikaapeleita merituulipuistojen tuottaman sähkönsiirtämiseen maasähköasemalle minimoimalla jännite- ja tehohäviöt. Merenalaisten kaapeleiden valinta riippuu muun muassa seuraavista tekijöistä: etäisyys rannikolle, jännite ja siirrettävä teho. Ennen merikaapeleiden asennusta on tehtävä kattava tutkimus kaapelireittien määrittämiseksi. Merituulivoiman sähköenergian kolme yleisintä siirtotapaa ovat keskijännitteinen vaihtovirta, suurjännitteinen vaihtovirta ja suurjännitteinen tasavirta. Merellä sähkönsiirtämistä nostetaan sähköasemalla, mikä auttaa välttämään jännitehäviöitä siirrettäessä sähkövirtaa mantereelle. Vaihtovirtakaapeleilla on suurempi tehonsiirtokyky kuin tasavirtakaapeleilla, mutta niillä on rajoitetut tehonsiirtopituudet. Vaihtovirtakaapeleiden tehonsiirtokyky laskee yleensä 120–150 kilometrin etäisyyden jälkeen, kun taas tasavirtakaapeleilla ei ole tällaisia rajoituksia. (Jääskeläinen et al. 2012; Ng & Ran 2016, pp. 441–452)

4.2 Arktinen tuulivoima

Tuulivoiman hyödyntäminen kylmissä ilmasto-olosuhteissa tuo mukanaan erityisiä haasteita, jotka johtuvat ankarista sääolosuhteista, jäätymisestä ja alhaisista lämpötiloista. Useissa maissa on toteutettu toimenpiteitä, joiden tarkoituksena on selvittää, millaisia

vaikeuksia ilmakehän jäätyminen ja alhaiset lämpötilat aiheuttavat tuulivoimateknologialle. Jäätyminen vaikuttaa tuuliturbiineihin ilmenevät erityisesti energian tuotannon vähenemisenä, komponenttien lisääntyneenä raskautena sekä riskinä jääkerrostumille. Tarkastellessa arktisen tuulivoiman haasteita ja mahdollisuuksia, näillä alueilla tuulivoiman tuotanto voisi tarjota merkittävän panoksen uusiutuvan energian tuotantoon kuten todettiin luvussa 3.2. Kuitenkin useat tekniset, ympäristölliset ja taloudelliset tekijät vaikuttavat kyseisten hankkeiden toteutettavuuteen ja kannattavuuteen.

Lapojen jäätyminen eli jäätäminen heikentää huomattavasti roottorin aerodynaamisia ominaisuuksia ja vähentää roottorin nostovoiman muodostumista ja lisää vastusta. (Holtinen et al. 1998; Tuulivoima ja jäätäminen n.d.) Jäätämisen vaikutuksia kylmillä ilmastalueilla on arvioitava, jotta epävarmuustekijät ja riskit voidaan minimoida. Tuulienergian muuntojärjestelmiä on mukautettava siten, että ne voivat toimia arktisissa olosuhteissa. Jäätyminen estämiseksi pyritään estämään jään kertyminen lavan pinnalle ja jäänpoistossa poistetaan jääkerros lavan pinnalta. Kaikki jäänpoistotekniikat edellyttävät tarkkoja jään havaitsemisjärjestelmiä, jotka voivat olla hyvin monimutkaisia, sillä tämän tyyppiset jääntunnistuslaitteet ovat luotettavia vain tietyllä jäätymisen määrällä. Jäätunnistuslaitteet eivät havaitse jäätymistapahtuman alkua, vaan vasta kun jää alkaa vaikuttaa rakenteeseen. Tätä kutsutaan instrumentaaliseksi jäätymiseksi. Jäänpoiston etuna on se, että turbiinien ei tarvitse pysähtyä jäätymisen aikana. Joissakin tapauksissa tuulivoimaloiden pysäyttäminen jään poistamiseksi voi kuitenkin olla edullisempaa. Koska kylmän ilmaston vaikutus tuuliturbiiniin on monimutkainen, kaikki jäänsuojajärjestelmät eivät sovellu tiettyyn tuulipuistoon. Jäänpoistotekniikoita on tällä hetkellä käytössä monia ilmailu-, tie- ja sähkönsiirtoteollisuudessa. (Fakorede et al. 2016)

Jäätäminen muuttaa siiven aerodynaamisia ominaisuuksia vaikuttamalla siiven pinnan karheuteen. Erityisesti pieni määrä jäätymistä lavan etupäässä vaikuttaa suuresti lavan suorituskykyyn. Lapojen jäätyminen aiheuttama tehohäviö tuulivoimaloissa on paljon suurempi kuin muiden epäsuotuisien ympäristötekijöiden aiheuttama tehohäviö. Jäätymisestä johtuva tehonmenetys voi olla jopa 50 % vuodessa. (Kexiang et al. 2019)

Jään kertyminen kasvattaa lavan kokonaismassaa ja lisää lapaan kohdistuvaa kuormitusta. Jään kertyminen aiheuttamat epähomogeenisuudet voivat myös aiheuttaa lavan epävakautta ja johtaa siihen, että tuulivoimalan lavat vaurioituvat liiallisesta tärinästä. Alhaiset lämpötilat voivat aiheuttaa öljyvikoja turbiinin osissa, jolloin osien välinen kitka kasvaa, mikä johtaa osien liian korkeisiin lämpötiloihin ja käyttöiän merkittävään lyhenemiseen. (Kexiang et al. 2019)

Yleisesti ottaen arktisten tuulivoimaloiden jäätymiseen vaikuttavat erilaiset ilmakehän jäätymisilmiöt. Ilmakehän jäätymisellä tarkoitetaan ajanjaksoa, jolloin ilmakehän olosuhteet mahdollistavat jään tai lumen kertymisen rakenteisiin, jotka ovat alttiina ilmakehälle. Yleisesti ottaen ilmakehän jäätymisen eri tyypit, jotka vaikuttavat tuuliturbiinien kehittämiseen, ovat pilvijäätymistä, kuten huurre tai jää, ja sateen jäätymistä, kuten jäätävä sade, tihku tai märkä lumi. (Erlend Bredesen et al. 2017a)

Tuulivoimaloiden jäätyminen aiheuttaa turvallisuusriskin erityisesti roottorin lapoihin kertyvän jään vuoksi, mikä voi johtaa jään irtoamiseen ja sen lentämiseen, eli jäänheittoon, ja aiheuttaa vahinkoa ihmisille tai omaisuudelle. Jääkappaleet voivat vaihdella kooltaan huomattavasti; Sveitsissä tehdyssä tutkimuksessa havaittiin, että suurin jääkappale painoi 1,8 kg, mutta suurin osa oli alle 600 g. Jääkappaleet havaittiin pisimmillään 90 metrin päässä turbiinista. Painavimmat, yli 600 grammaa painavat jäänpalaset löydettiin 20 metrin etäisyydeltä turbiinista, roottorin alapuolelta. (Cuttin 2012) Yksi merkittävä haaste on määrittää, milloin roottorin lapojen päällä on jäätä, joka aiheuttaa jään heittoriskin. Tämän tiedon tunteminen voisi minimoida tarpeettomat turvallisuuteen liittyvät energiantuotannon keskeytykset. (Wallenius & Lehtomäki 2016)

4.2.1 Tekniset vaatimukset arktisissa olosuhteissa

Tietyn maantieteellisen sijainnin mitattujen tai mallinnettujen jäätymisolosuhteiden perusteella alue voidaan luokitella jääluokituksen avulla. Sen avulla saadaan ensimmäinen viite siitä, millaisia käytäntöjä ja vastatoimia tarvitaan kyseiselle alueelle jäätämisen estämiseksi. Myöhemmissä arktisen alueen tuulivoimaprojektien vaiheissa on erittäin suositeltavaa suorittaa yksityiskohtaisempia analyysejä aluekohtaisista jäätymisolosuhteista ja mahdollisista seurauksista, joita jäätymisellä voi olla kyseisellä alueella. (Krenn et al. 2022)

Tuulivoimaloiden kannattavuuden parantamiseksi on tarpeen keskittyä tuulivoimaloiden toimintaan ja energiantuotannon menetysten minimoimiseen jäätävissä olosuhteissa. Tällä hetkellä vain muutamat jäänesto- tai jäänpoistojärjestelmät ovat osoittautuneet tehokkaiksi. Nämä järjestelmät perustuvat lapojen aktiiviseen lämmitykseen, jota kutsutaan usein "lapojen lämmitykseksi" ja joka saadaan aikaan onttojen lapojen sisällä olevan kuumen ilman avulla tai käyttämällä ohuita resistiivisiä lämmityselementtejä lapojen ulkopinnalla tai hyvin lähellä pintaa. (Wallenius & Lehtomäki 2016)

Walleniuksen ja Lehtomäen (2016) mukaan tyypillinen lämmitysenergian kulutus on 0,5–3 prosenttia vuotuisesta energiantuotannosta pinalämmityksen ja lämmitetyn ilman

osalta. Kuitenkin Stoyanov et al. (2021) mukaan Suomessa asennettuun 220 kW tuuliturbiiniin asennetun jäänpoistojärjestelmän kerrottiin vaativan 6 % nimellistehosta toimintaan ja samalla alueella sijaitsevalla 600 kW:n tuuliturbiinissa se oli 5 %. Norjassa sijaitseville tuulipuistoille raportoitiin arvoja välillä 3,6–10,4 %.

Passiiviset jäänesto- tai jäänpoistoratkaisut, joissa lavan pintaan levitetään yleensä jäätä hylkiviä pinnoitteita jään adheesion pienentämiseksi, eivät ole vielä osoittautuneet sopiviksi kenttäolosuhteisiin. Tapauksissa, joissa jäätyminen tiedetään olevan pitkäkestoista ja aiheuttavan vakavia jääkerrostumia roottorin lapoihin, voi olla kannattavaa sammuttaa turbiinit ennakoivasti jäätyminen ajaksi. Näin menetellen jään kertymisnopeus pienenee, mikä saattaa vähentää seisokkiaikaa ja lisätä hieman tuotantoa verrattuna turbiiniin, joka jatkaa toimintaansa jäätyksen aikana. (Wallenius & Lehtomäki 2016)

Tekniikka on edistynyt merkittävästi jäätävien sääolosuhteiden havaitsemisessa. Erilaisia mittauslaitteita on kaupallisesti saatavilla, mutta parannuksia tarvitaan edelleen anturien luotettavuuden parantamiseksi raskaissa jäätymisolosuhteissa. Ainakin kaksi yritystä tarjoaa jään havaitsemisjärjestelmiä, joita markkinoidaan niin, että ne havaitsevat pienetkin jäämäärät pyörivissä ja kiinteissä turbiineissa. Nämä järjestelmät eivät kuitenkaan ole vielä saaneet laajaa hyväksyntää, mikä saattaa johtua niiden korkeista kustannuksista hyötyihin nähden. (Wallenius & Lehtomäki 2016)

Tuulivoimakapasiteettia asennettaessa yhä enemmän kylmään ilmastoon, on pyrittävä parantamaan myös terveys- ja turvallisuusriskejä. Walleniuksen et al. (2016) mukaan riskinarviointeja tehdään jäänheiton arvioimiseksi, mutta tällä hetkellä ei ole olemassa vakiomenettelyjä tällaisten arviointien toteuttamiseksi.

5. MERI- JA ARKTISET TUULIPUISTOT

Tässä luvussa tarkastellaan merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman nykytilannetta ja tulevaisuuden näkymiä. Nykyään tuuliturbiinitekniikka on saavuttanut huomattavan edistyneen tason, mikä on mahdollistanut luotettavamman ja tehokkaamman tuulivoiman tuotannon.

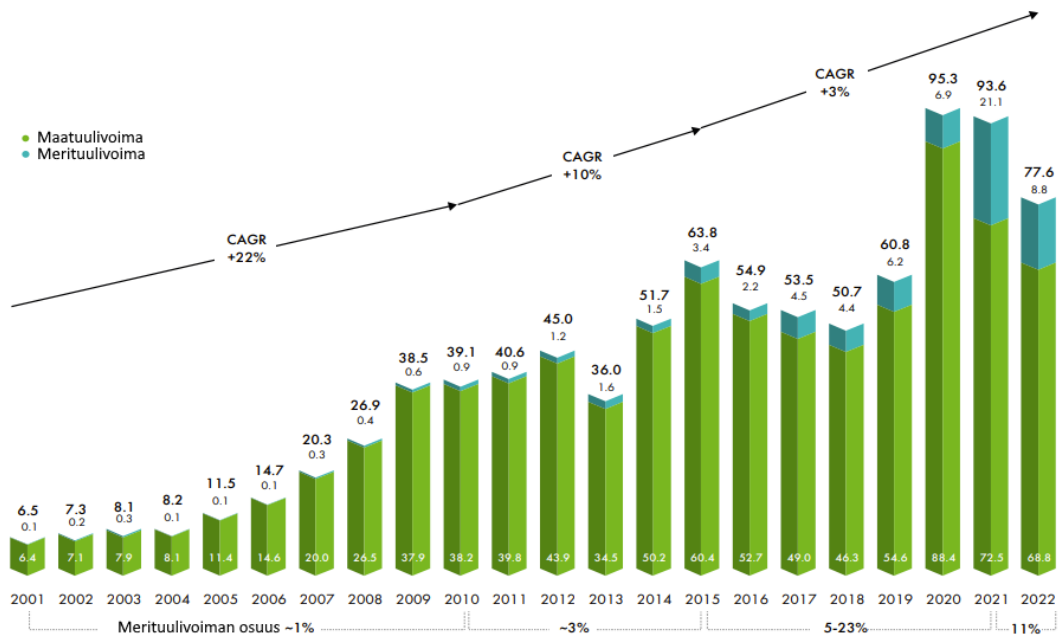
5.1 Nykytilanne

Tuuliturbiinitekniikka on muuttunut ja edennyt vakionopeuksista, sakkaussäätöisistä ja vaihteistolla varustetuista voimansiirroista muuttuvanopeuksiseksi, lapakulmasäädettäväksi joko vaihteistolla tai ilman. Nykyään hallitsevat ja lupaavimmat tuuliturbiinitekniikat perustuvat muuttuvanopeuksiseen tuuliturbiiniin.

Lisääntynyt kiinnostus muuttuvanopeuksisia tuuliturbiineja kohtaan johtuu tehoelektronikasta, joka mahdollistaa monia houkuttelevia ominaisuuksia, kuten mekaanisen rasituksen vähentämisen, lisääntyneen tehon talteenoton sekä niiden kyvyn tukea verkkoa täyttämällä yhä raskaampia verkkovaatimuksia. Tehoelektronikka mahdollistaa sen, että tuuliturbiinit käyttäytyvät samalla tavalla kuin perinteiset voimalaitokset ja tukevat siten aktiivisesti verkkoa. Kuten kaikkien teknologioiden kanssa, tulevaisuutta on vaikea ennustaa. On kuitenkin selvää, että tuuliturbiinitekniikan tuleva kehitys tulee olemaan vahvasti riippuvainen tuulivoimasovellusten tehoelektronikkateknologian jatkokehityksestä. (Letcher & Letcher 2017, p. 159)

Kuva 5 esittää maailmanlaajuisen uusien asennuksien historiallisen kehityksen (GWEC 2023). Global Wind Energy Counciliin (GWEC 2023) mukaan maailmanlaajuisesti vuonna 2022 uutta tuulivoimakapasiteettia liitettiin sähköverkkoihin 77,6 GW, jolloin asennetun tuulivoimakapasiteetin kokonaismäärä nousi 906 GW:iin, mikä merkitsee noin 9 prosentin kasvua vuodesta 2021. Vuonna 2022 verkkoon liitettiin 8,8 GW uutta merituulivoimaa, jolloin merituulivoiman kokonaiskapasiteetti oli 64,3 GW vuoden 2022 loppuun mennessä.

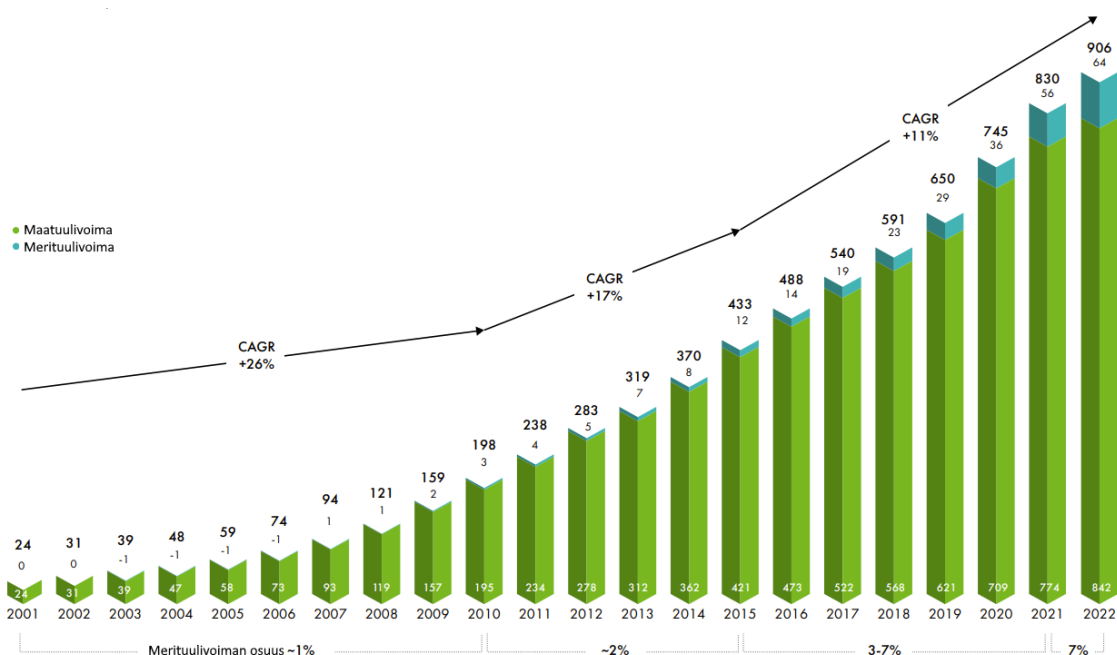
Kylmän ilmaston kohteisiin Skandinaviassa, Pohjois-Amerikassa, Euroopassa ja Aasiassa asennettu kumulatiivinen tuulivoimakapasiteetti oli noin 119 GW vuoden 2020 loppussa (Erlend Bredesen et al. 2017a). Suomen Lapissa oli vuoden 2023 kesäkuussa 188 tuulivoimalaa, jotka vastasivat 13 % Suomen kumulatiivisesta tuotantokapasiteetista eli noin 800 MW (Toiminnassa olevat ja puretut voimalat 2023).



Kuva 5. Uusien asennuksien historiallinen kehitys ja yhdistetty vuotuinen kasvuvauhti (CAGR) (GWEC 2023, mukailen)

Kuva 6 esittää asennetun tuulivoiman kumulatiivisen kasvun maailmanlaajuisesti (GWEC 2023). Kiinan osuus vuoden 2022 lisäyksistä on 87 prosenttia. Kumulatiivisten asennusten osalta, viisi suurinta markkina-aluetta vuoden lopussa 2022 olivat Kiina, Yhdysvallat, Saksa, Intia ja Espanja, joiden osuus oli yhteensä 72 prosenttia maailman asennetusta tuulivoimakapasiteetista. Merituulivoiman uudet sähköverkkoon kytketyt asennukset olivat 58 prosenttia pienemmät kuin 2021, mutta silti vuosi 2022 oli toiseksi suurin vuosi merituulivoiman historiassa. (GWEC 2023)

STY:n (2023) mukaan vuonna 2022 tuulivoimalla katettiin yli 14 % Suomen sähkön kulutuksesta ja kumulatiivinen tuulivoimakapasiteetti oli 5,7 GW. Tällä hetkellä Suomessa on yksi merituulivoimapuisto, Porin Tahkoluodossa, jossa on 11 tuulivoimalaa ja puiston kokonaisteho on 44,3 MW. (Suomen Hyötytuuli Oy n.d.) Tahkoluodon merituulivoimapuiston laajennus lisää sen kapasiteettia nykyisestä 10 tuulivoimalasta 43 tuulivoimalaan ja laajentaa tuulivoimapuiston aluetta noin 14 400 hehtaarilla. (Maa- ja metsätalousministeriö 2022) Lisäksi Kemin Ajoksessa on 13 tuulivoimalaa, joista kahdeksan sijaitsee keinosaarilla ja aallonmurtajalla ja loput viisi maalla. Niiden yhteenlaskettu teho on 26,4 MW. (OX2 n.d.)



Kuva 6. Kokonaisasennusten historiallinen kehitys ja yhdistetty vuotuinen kasvuvauhti (CAGR) (GWEC 2023, mukailen)

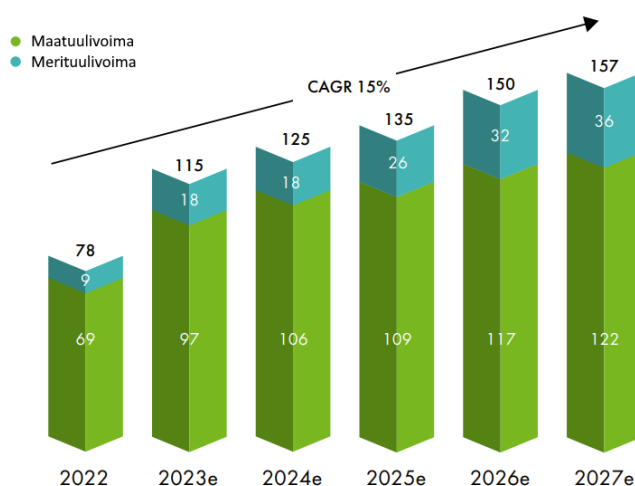
Suomen olosuhteet ovat erittäin suotuisat merituulivoiman tuottamiseen: matala vedensyvyys, Pohjanmerta matalampi suolapitoisuus ja hyvät tuuliolosuhteet (ELY-keskus 2023). Merituulivoimahankkeen tarvitsemat luvat vaihtelevat suuresti hankkeen sijainnin mukaan. Suomessa on useita merituulivoimahankkeita suunnitteilla tai rakenteilla. Näiden hankkeiden yhteenlaskettu teho on useita tuhansia megawatteja. Teknologiakehitys, korkeammat tornit ja pidemmät lavat ovat merkittävästi alentaneet tuulivoiman tuotantokustannuksia viime vuosina ja merituulivoiman tuotantokustannusten laskun myötä kiinnostus merituulivoimaa kohtaan on voimakkaassa kasvussa Suomessa. Kustannuslaskuissa avainroolina ovat valtion tukitoimet ja pitkäaikaiset sähkönmyyntisopimukset, jotka vähentävät hankkeen riskejä ja mahdollistavat edullisen rahoituksen. Vuosina 2010–2017 tuulivoiman tuotantokustannukset ovat laskeneet 63 %. (Tuotantokustannukset n.d.)

Korsnäsin merituulivoimahanke on merkittävä uusiutuvan energian hanke Suomessa. Se on ensimmäinen Suomen aluevesille suunniteltu avomerellä toimiva merituulivoimapuisto, jonka nimellinen energiatuotantoteho lähenee esimerkiksi Loviisan ydinvoimalaitoksen tehoja; suunniteltu kapasiteetti on 1,3 GW. Hankkeen kokonaiskustannusarvio on 2–3 miljardia euroa ja suunniteltu valmistuminen 2030-luvulla. (Korsnäsin merituulivoimahanke n.d.; Maa- ja metsätalousministeriö 2022)

5.2 Tulevaisuuden näkymät

Merituulivoiman tuotantokustannusten vähenemisen myötä kiinnostus merituulivoimaa kohtaan on voimakkaassa kasvussa Suomessa ja maailmalla. International Energy Agency:n (IEA 2019) mukaan tuotantokustannukset, mukaan lukien verkkoliitynnän kustannukset, olivat keskimäärin 100 dollaria/MWh vuonna 2018 (käyttäen 4 % diskonttokorkoa). Maailmanlaajuisen merituulivoiman keskimääräisen tuotantokustannuksen arvioidaan laskevan vuoden 2018 tasolta lähes 40 % vuoteen 2030 mennessä ja lähes 60 % vuoteen 2040 mennessä (IEA 2019).

Maailmanlaajuisen tuulivoimamarkkinan odotetaan kasvavan keskimäärin 15 % vuosittain. Kuva 7 esittää ennusteen uuden tuulivoiman asennuksista vuodelle 2023–2027 (GWEC 2023). Maailmanlaajuisen merituulivoimamarkkinoiden odotetaan kasvavan 8,8 GW:sta vuonna 2022 35,5 GW:iin vuonna 2027, mikä nostaa sen osuuden uusista maailmanlaajuisista asennuksista nykyisestä 11 prosentista 23 prosenttiin vuoteen 2027 mennessä. Kaikkiaan merituulivoimaa odotetaan lisättävän maailmanlaajuisesti 130 GW vuosina 2023–2027, ja keskimääräisten vuotuisten asennusten odotetaan olevan lähes 26 GW. Jotta 1,5 °C:n ilmastonlämpenemisen skenaarion voitaisiin saavuttaa, tarvitaan lähes 500 GW:n merituulikapasiteetti vuoteen 2030 mennessä ja vuoteen 2050 mennessä kapasiteetti nousisi 2 465 GW:iin. (GWEC 2023) Tämä vastaisi noin 7 % maailman energian kokonaistuotannosta 1,5°C:n skenaariossa ja noin 13 % suunnitellussa energiaskenaariossa (IRENA 2023b).



Kuva 1. Ennuste uuden tuulivoiman asennuksista vuodelle 2023–2027 ja yhdistetty vuotuinen kasvuvauhti (CAGR) (GWEC 2023)

Kylmän ilmaston kohteisiin Skandinaviassa, Pohjois-Amerikassa, Euroopassa ja Aasiassa tuulivoimakapasiteetin odotettu kasvuvauhti on noin 9 GW vuodessa vuoteen 2025

mennessä (Erlend Bredesen et al. 2017a; Krenn et al. 2022). Suomen Lapissa suunnitella olevien voimaloiden osuus vuonna 2023 toukokuussa oli 8,7 % eli yhteensä 990 tuulivoimalaa (Toiminnassa olevat ja puretut voimalat 2023). Lapin alueella on tunnistettu 46 seudullisesti merkittävää tuulivoima-alueita, joilla voisi sijaita yhteensä 2861 tuulivoimalaa, joista merialueelle sijoittuisi noin 850 voimalaa. Näistä noin kaksi kolmasosaa voimaloista voitaisiin toteuttaa, eli noin 1900 tuulivoimalaa, joista merialueelle sijoittuisi noin 570 voimalaa. Tämä vastaisi noin 1400–1600 MW edestä uusia tuulivoimala-asennuksia Lapin alueelle. (FCG 2022)

Vuonna 2021 GWEC ja International Renewable Energy Agency (IRENA) allekirjoittivat YK:n energiaohjelman, sitoutuen työskentelemään yhdessä 2 000 gigawatin merituulivoiman käyttöönoton puolesta vuoteen 2050 mennessä, jotta voitaisiin saavuttaa nollapäästötavoite. Tämä edellyttää valtavaa kasvua asennuksissa, sillä seuraavan vuosikymmenen aikana on tarkoitus lisätä vuosittain 35 GW merituulivoimaa. Toistaiseksi vain Kiina on osoittanut kykenevänsä toimittamaan merituulivoimaa tällä mittakaavalla ja nopeudella. (IRENA 2023a; IRENA 2023b)

Ketteränä, edullisena ja kaupallisesti saatavana energiateknologiana, jolla on valtava energiantuotantopotentiaali, merituulivoimalla on mahdollisuus nopeasti korvata fossiiliset polttoaineet, tuoden mukanaan talouskasvua ja vahvistaa energiaturvallisuutta. Ilmastomuutoksen globaali haaste on samalla myös mahdollisuus, tarjoten potentiaalisen lisätä kotimaisia työpaikkoja. Merituulivoima on merkittävä vihreiden työpaikkojen lähde, aina tuuliturbiinikomponenttien valmistuksesta asennukseen ja toimintaan, ja se nähdään yhä enemmän positiivisena talouden veturina. Vaikka maat ja hallitukset asettavatkin kunnianhimoisia tavoitteita, ne kamppailevat yhä muuttamaan ne toiminnaksi tarvittavalla nopeudella, jotta globaali energiamurros saataisiin liikkeelle. Merituulivoima on monimutkainen infrastruktuuri, joka vaatii perusteellista tietämystä ja kokemusta vahvoista merenhallintokehyksistä, sähkömarkkinoiden suunnittelusta sekä toimitusketjun ja teollisuuspolitiikan osaamisesta. (GWEC 2023)

Tulevaisuuden puhtaat energiajärjestelmät edellyttävät tuulivoiman ja uusiutuvien energialähteiden laajamittaista integrointia, jonka mahdollistavat teknologiset ratkaisut joustavuuden, varastoimisen sekä kysynnän ja tarjonnan tasapainon hallinnan osalta. Power-to-X on yksi mahdollisista teknologisista ratkaisuista, jonka avulla voidaan vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Merituulivoima ja tulevaisuudessa arktisen tuulivoiman kehittyessä, ne tarjoavat mahdollisuuden skaalata vihreän vedyn tuotantoa ja Power-to-X-tekniikkaa, auttaen siten energian intensiivisten alojen hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä. (GWEC 2023) Vedyllä olisi keskeinen rooli loppukäytön hiilidioksidin

päästöjen vähentämisessä ja sähköjärjestelmän joustavuuden lisäämisessä. Hajautettuna ja vaihtelevana energialähteenä tuulivoima edellyttäisi paradigman muutosta sähköjärjestelmien toiminnassa ja suunnittelussa. Vihreä vety voisi olla myös avainasemassa lievennettäessä päästöjä vaikeammin hiilidioksidipäästöjä vähentävillä aloilla, kuten ilmailussa, merenkulussa ja raskaassa teollisuudessa, joilla suora sähköistäminen on lähes mahdotonta. Innovatiivisia ratkaisuja ja teknologisia edistysaskeleita tarvitaan myös vedyn tuotannon, varastoinnin ja jakelun tehokkuuden parantamiseksi sekä kustannusten alentamiseksi. Tärkeitä tutkimus- ja kehitysalueita ovat elektrolyysi, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi, edistyneet materiaalit vedyn varastointiin ja polttokennoteknologiat. (IRENA 2023b)

Tuulivoiman kasvu ei ole läheskään tarpeeksi nopeaa tai laajaa, jotta voitaisiin saavuttaa turvallinen ja kestävä maailmanlaajuinen energiamurros. Nykyisellä kasvuvauhdilla GWEC Market Intelligence ennustaa, että vuoteen 2030 mennessä maailmanlaajuisesti on alle kaksi kolmasosaa tarvittavasta tuulivoimakapasiteetista 1,5 °C keskilämpötilan ja nettonollapäästöjen saavuttamiseksi, mikä käytännössä tarkoittaa, ettei ilmastotavoitteita pystytä saavuttamaan. Tarvitsemme nelinkertaistaa vuosittaiset tuulivoiman asennukset tämän vuosikymmenen aikana pysyäksemme 1,5 °C:n maailman tavoitteessa. (GWEC 2022)

Maailmanlaajuisen keskilämpötilan pitäminen 1,5 °C:ssa edellyttää maailman energijärjestelmän nopeaa ja massiivista muutosta, sisältäen uusiutuvan energian tuotannon valtavaa kasvattamista, sähköverkkojen ja muiden energianjakelutapojen parantamista sekä suurten energiavarastojärjestelmien luomista. Investoinnit sähköverkkoihin ja energijärjestelmiin, jotka ovat 1,5 asteen lämpenemisskenaarion mukaisia, voisivat GWEC:n (2023) mukaan luoda kymmeniä miljoonia lisätyöpaikkoja maailmanlaajuisesti.

6. YHTEENVETO

Tuulivoima on yksi tärkeimmistä uusiutuvan energian lähteistä, jotka voivat auttaa torjumaan ilmastonmuutosta ja vähentämään riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Erityisesti merellä ja arktisilla alueilla tuulivoiman hyödyntäminen voi tarjota merkittäviä etuja sekä ympäristölle että taloudelle. Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman potentiaalia ja haasteita. Työssä pyrittiin vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

1. Mitkä ovat tuulivoiman perusteet ja tuuliturbiinin rakenteeseen liittyvät tekijät?
2. Mitkä ovat tuulivoimaloiden sijoittamisen periaatteet ja kriteerit?
3. Mitkä ovat merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman potentiaali ja haasteet eri alueilla?
4. Mitkä ovat näiden teknologisiin innovaatioihin liittyvät nykytilanne ja tulevaisuuden näkymät sekä Suomessa että maailmanlaajuisesti?

Merituulivoima on nopeimmin kasvava puhtaan sähkön tuotantomuoto maailmassa, ja sen osuuden on arvioitu nousevan jopa 13 %:iin maailman sähköntuotannosta vuoteen 2050 mennessä. Merellä vallitsevat suotuisimmat tuuliolosuhteet ja vähäisemmät käyttörajoitukset tekevät merituulivoimasta houkuttelevan vaihtoehdon perinteisille maalla sijaitseville tuulivoimaloille. Kuitenkin merelle rakentaminen tuo mukanaan omat haasteensa ja lisäkustannuksensa, erityisesti sääolosuhteiden, perustusten ja sähkönsiirron osalta. Merituulivoima on edelleen kalliimpaa kuin maatuulivoima useista syistä, kuten vaativista rakenteista ja haastavista olosuhteista merellä. Kuitenkin kehittyvän teknologian ansiosta hintaerojen odotetaan pienenevän tulevaisuudessa.

Arktisen alueen tuulivoimapotentiaali tarjoaa oman ainutlaatuisen mahdollisuutensa uusiutuvan energian tuotannolle. Hyvät tuuliolosuhteet sekä tiheämpi ilma, harvan asutuksen lisäksi, tekevät näistä alueista houkuttelevia tuulivoiman tuotannolle. Kuitenkin ankarat sääolosuhteet, harvat sähköverkot ja tieverkostot asettavat haasteita näiden resurssien hyödyntämiselle. Taloudellisesti kannattavien tuulivoimahankkeiden saavuttamiseksi kylmissä ilmasto-olosuhteissa on ratkaistava lukuisia teknisiä ja turvallisuuskykyisiä, erityisesti liittyen jäätymiseen, energiantuotannon vähentymiseen ja turvallisuusriskeihin.

Työssä korostettiin jatkokehityksen tarvetta arktisen tuulivoiman ja merituulivoiman kustannusten alentamiseksi ja haasteiden ratkaisemiseksi. Vaikka edistystä on tapahtunut, lisää tutkimusta ja innovaatioita tarvitaan varmistamaan, että arktisen ja merituulivoiman potentiaali voidaan maksimoida kestäväällä tavalla. Ymmärryksen lisääminen näistä

haasteista on keskeistä, jotta voidaan suunnitella ja toteuttaa taloudellisesti kannattavia ja tehokkaita ratkaisuja, jotka tukevat uusiutuvan energian käytön laajentumista ja edistävät ilmastonmuutoksen torjuntaa maailmanlaajuisesti.

LÄHTEET

Ackermann, Thomas. 2005. Wind power in power systems. (Thomas. Ackermann, Ed.). Chichester: Wiley.

AMAP. n.d. Arctic boundaries (physical). Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.10.2023): <https://www.amap.no/documents/doc/arctic-boundaries-physical/380>

Anaya-Lara, O., Cartwright, P., Ekanayake, J., Hughes, M., & Jenkins, N. 2009. Wind Energy Generation: Modelling and Control (1. Aufl.). New York: Wiley.

Anaya-Lara, Olimpo. & Anaya-Lara, O. 2014. Offshore wind energy generation : control, protection, and integration to electrical systems. Chichester, England: Wiley. Anaya-Lara, O., Tande, J. O., Uhlen, K., & Merz, K. 2018. Offshore Wind Energy Technology (1st ed.). Newark: John Wiley & Sons, Incorporated. doi:10.1002/9781119097808

Archer, C. L., Mirzaeisefat, S., & Lee, S. 2013. Quantifying the sensitivity of wind farm performance to array layout options using large-eddy simulation. Geophysical Research Letters, 40(18), 4963–4970. article. doi:10.1002/grl.50911

Arktinen keskus. n.d.. Arktinen alue, Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.9.2023): <https://www.arcticcentre.org/FI/arktinenalue>

Bilgili, M., & Alphan, H. 2022. Global growth in offshore wind turbine technology. Clean Technologies and Environmental Policy, 24(7), 2215–2227. article. doi:10.1007/s10098-022-02314-0

Breeze, P. 2015. Wind Power Generation. San Diego: Elsevier Science & Technology.

Buljan, Adrijana. 2023. Mingyang Commissions 16 MW Offshore Wind Turbine with 260-Metre Rotor Diameter in China. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 06.11.2023): <https://www.offshorewind.biz/2023/07/18/mingyang-commissions-16-mw-offshore-wind-turbine-with-260-metre-rotor-diameter-in-china/>

Cuttin René. 2012. Ice throw studies. PDF-tiedosto. Saatavissa (viitattu 21.10.2023): [6b_winterwind_icethrow_cuttin.pdf](#)

ELY-keskus. 2023. Merituulivoima. Verkkosivu. Saatavilla (viitattu 13.11.2023): <https://www.ely-keskus.fi/web/uusiutuvan-energian-lupaneuvonta/merituulivoima>

Eri tuulivoimalatyyppejä. n.d. Suomen Tuulivoimayhdistys. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.11.2022): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/eri-voimalatyyppaja>

Erlend Bredesen, R., Vindteknikk, K., Jan Jordaens, P., Owi-lab, S., Zouhair Khadiri-Yazami, B., Klintström, R., ... Helena Wickman, C. (2017a). IEA Wind TCP Recommended Practice 13 2nd Edition: Wind Energy in Cold Climates. Saatavissa (viitattu 24.1.2023): <https://iea-wind.org/task19/>

Erlend Bredesen, R., Vindteknikk, K., Jan Jordaens, P., Owi-lab, S., Zouhair Khadiri-Yazami, B., Klintström, R., ... Helena Wickman, C. 2017b. Wind energy projects in cold climates. IEA Wind, 49 p. Saatavissa (viitattu 24.10.2023): <https://iea-wind.org/task19/>

Esteban, M. D., Diez, J. J., López, J. S., & Negro, V. 2011. Why offshore wind energy? *Renewable Energy*, 36(2), 444–450. article. doi:10.1016/j.renene.2010.07.009

Fakorede, O., Feger, Z., Ibrahim, H., Ilinca, A., Perron, J., & Masson, C. 2016. Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 662–675. doi:10.1016/J.RSER.2016.06.080

Finnish Consulting Group Oy, FCG. 2022. Lapin tuulivoimaselvitys 2022. Raportti. Saatavilla (viitattu 13.11.2023): https://www.lapinliitto.fi/wp-content/uploads/2022/12/Lapin-tuulivoimaselvitys-2022_raportti_05122022-1.pdf

Fingrid. n.d. Liittyminen kantaverkkoon. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.2.2023): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/#liitettavyys>

GE Renewable Energy. n.d. Offshore Wind Power and Farms. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.11.2022): <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind>

Gil-García, I. C., García-Cascales, M. S., Fernández-Guillamón, A., & Molina-García, A. (2019). Categorization and Analysis of Relevant Factors for Optimal Locations in Onshore and Offshore Wind Power Plants: A Taxonomic Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(11), 391. article. doi:10.3390/jmse7110391

Gil-García, I. C., Socorro García-Cascales, M., Fernández-Guillamón, A., & Molina-García, A. (2019). Marine Science and Engineering Categorization and Analysis of Relevant Factors for Optimal Locations in Onshore and Offshore Wind Power Plants: A Taxonomic Review. doi:10.3390/jmse7110391

Global Wind Energy Council, GWEC. 2022. Global Wind Report 2022. Saatavissa (viitattu 21.10.2023): <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>

Global Wind Energy Council, GWEC. 2023. Global Wind Report 2023. Saatavissa (viitattu 12.4.2023): <https://gwec.net/globalwindreport2023/>

Hau, E., & Renouard, H. von. 2013. *Wind Turbines* (3. Aufl., Vol. 9783642271519). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-642-27151-9

Holttinen, H., Liukkonen, S., Furustam, K.-J., Valmistustekniikka, V., Määttä, M., Haapanen, E., ... Oy, E.-E. 1998. Offshore-tuulivoima Perämeren jääolosuhteissa, 131 s.

International Energy Agency, IEA. 2019. Offshore Wind Outlook 2019, World Energy Outlook Special Report. PDF-tiedosto. Saatavissa (viitattu 6.11.2023): <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>

International Renewable Energy Agency, IRENA. 2023a. Enabling frameworks for offshore wind scale up: Innovations in permitting. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.10.2023): <https://www.irena.org/Publications/2023/Sep/Enabling-frameworks-for-offshore-wind-scale-up>

International Renewable Energy Agency, IRENA. n.d. Wind energy. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.2.2023): <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>

International Renewable Energy Agency, IRENA. 2023b. World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway. PDF-tiedosto. Saatavissa (viitattu 7.11.2023): <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>

Jääskeläinen, M., Rantala, L., & Sundelin, A. 2012. Merituulipuiston rakentaminen. PDF-tiedosto. Saatavissa (viitattu 25.10.2023): <https://www.prizz.fi/media/energiaratkaisut/energiaratkaisut-materiaalit/merituulipuistonrakentaminen2012.pdf>

Kexiang, W. -, Yue, Y., Zuo, H., & Zhong, D. 2019. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine. doi:10.1002/we.2427

Korpela, Aki. 2014. Tuulivoiman perusteet. Luentomoniste, 85 s.

Korsnäsin merituulivoimahanke. n.d. Metsähallitus. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.10.2023): <https://www.metsa.fi/vastuullinen-liiketoiminta/tuulivoima/korsnasin-merituulivoimapuisto/>

Krenn, A., Stökl, A., Rittinghaus, C., Rodriguez, H., Schürmann, G., Weidl, T., ... Lautenschlager, F. 2022. International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments (2nd edition).

Letcher, T., & Letcher, T. M. 2017. Wind Energy Engineering. San Diego: Elsevier Science & Technology.

Maa- ja metsätalousministeriö. 2022. Merituulivoiman tuotanto Suomessa kasvaa merkittävästi. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.10.2023): <https://mmm.fi/-/merituulivoiman-tuotanto-suomessa-kasvaa-merkittavasti>

Maa- ja metsätaloustuottajain Keskusliitto MTK ry. 2022. Tuulivoimaopas maanomistajille. PDF-tiedosto. Saatavissa (viitattu 6.11.2023): https://www.mtk.fi/documents/20143/0/MTK_tuulivoimaopas_0507_LQ+%281%29.pdf/a9ec980c-d86e-2363-5b8e-d525dcd9f126?t=1657013499722

Merituulivoimahankkeiden vaiheet. n.d. Metsähallitus. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.9.2023): <https://www.metsa.fi/vastuullinen-liiketoiminta/tuulivoima/merituulivoimassa-suuret-mahdollisuudet/merituulivoimahankkeiden-vaiheet/>

Motiva. 2022. Tuulivoimateknologia. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.11.2022): https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia

Musial, W., Spitsen, P., Beiter, P., Duffy, P., Marquis, M., Cooperman, A., ... Shields, M. 2015. Offshore Wind Market Report: 2021 Edition.

Ng, C., & Ran, L. 2016. Offshore Wind Farms (Vol. number 92). Cambridge: Elsevier Science & Technology. doi:10.1016/C2014-0-00763-0

OX2. n.d. Ajos. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.10.2023): <https://www.ox2.com/fi/suomi/hankkeet/ajos/>

Shin, J.-S., & Kim, J.-O. 2017. Optimal Design for Offshore Wind Farm considering Inner Grid Layout and Offshore Substation Location. IEEE Transactions on Power Systems, 32(3), 2041–2048. article. doi:10.1109/TPWRS.2016.2593501

Stoyanov, D. B., Nixon, J. D., & Sarlak, H. 2021. Analysis of derating and anti-icing strategies for wind turbines in cold climates. *Applied Energy*, 288, 116610. article. doi:10.1016/j.apenergy.2021.116610

Suomen Hyötytuuli Oy. n.d. Tahkoluodon merituulipuisto. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.10.2023): <https://hyotytuuli.fi/tuulipuistot/tahkoluodon-merituulipuisto/>

Suomen Tuulivoimayhdistys. 2023. Tuulivoimatilastot 2022. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.10.2023): <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tilastot-2/tuulivoimatilastot-2022>

Toiminnassa olevat ja puretut voimalat. 2023. Suomen Tuulivoimayhdistys. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.11.2023): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa/toiminnassa-olevat-puretut>

Tuotantokustannukset. n.d. Suomen Tuulivoimayhdistys. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.11.2023): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/tuotantokustannukset>

Tuulivoima ja jäätäminen. n.d. Suomen Tuulivoimayhdistys. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.11.2022): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/jaaminen>

Tuulivoimahankkeen vaiheet. n.d. Suomen Tuulivoimayhdistys. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.9.2023): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke>

Tuulivoimaloiden rakenne. n.d. Suomen Tuulivoimayhdistys. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.11.2022): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>

Tuulivoiman ympäristövaikutukset. n.d. Suomen Tuulivoimayhdistys. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.8.2023): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoiman-vaikutukset/tuulivoiman-ymparistovaikutukset>

Vakkilainen, E, & Kivistö, A. 2017. Sähkön tuotantokustannusvertailu. LUT Scientific and expertise, Publications 66. Lappeenranta University of technology.

Walker, R. P., & Swift, A. 2015. *Wind Energy Essentials*. Somerset: John Wiley & Sons, Incorporated.

Wallenius, T., & Lehtomäki, V. 2016. Overview of cold climate wind energy: challenges, solutions, and future needs. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Energy and Environment*, 5(2), 128–135. article. doi:10.1002/wene.170

Wu, B., Yip, T. L., Xie, L., & Wang, Y. 2018. A fuzzy-MADM based approach for site selection of offshore wind farm in busy waterways in China. *Ocean Engineering*, 168, 121–132. doi:10.1016/J.OCEANENG.2018.08.065