

Antti Niemi

# MERITUULIVOIMAN JA ARKTISEN TUULI- VOIMAN POTENTIAALI JA HAASTEET

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Kari Lappalainen  
Heinäkuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Antti Niemi: Merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman potentiaali ja haasteet  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Sähkötekniikka  
Heinäkuu 2022

---

Tuulivoimasta on tullut edellisten vuosien aikana yksi maailman merkittävimmistä energiantuotannon muodoista halvan hinnan sekä uusiutuvan energian kasvaneen kysynnän vuoksi. Monessa paikassa ympäri maailmaa asumistiheys on kasvanut niin suureksi, että maa-alueille on haastavaa sijoittaa tuulivoimaloita häiritsemättä alueella asuvia ihmisiä. Tämä ongelma voidaan ratkaista sijoittamalla tuulivoimaloita merelle kauas rannikosta tai harvaan asutulle arktiselle alueelle.

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuuskatsaus merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman potentiaalista ja haasteista. Työssä käsitellään yleisellä tasolla tuulivoiman nykytilannetta, tulevaisuuden näkymiä sekä haasteita Suomessa sekä maailmanlaajuisesti. Tämän lisäksi perehdytään tarkemmin merituulivoimaan sekä arktiseen tuulivoimaan.

Tarkastelusta käy ilmi, että merituulivoimalla on huomattavia hyötyjä maatuulivoimaan nähden. Merellä on huomattavasti paremmat tuuliolosuhteet tuulivoiman tuotannon kannalta kuin maa-alueilla. Tämän lisäksi merelle pystytään rakentamaan suurempia voimaloita kuin maalle. Tämän vuoksi merialueilla on potentiaalia tuottaa huomattavasti enemmän sähköä kuin maalla. Kuitenkin nykypäivänä merituulivoimaloissa käytettävä teknologia tekee siitä kalliimpaa tuottaa kuin maatuulivoima, jonka vuoksi maailman tuulivoiman tuotannosta edelleen melko pieni osa sijaitsee merellä. Hintaero meri- ja maatuulivoiman välillä on vähentymässä teknologian kehityksessä, joten merituulivoiman tuotanto on lisääntymässä merkittävästi lähivuosien aikana.

Arktisen tuulivoiman suurimpana hyötynä on arktisen alueen harva asutus, joten laajojen tuulipuistojen sijoittaminen on helppoa. Tämän lisäksi voimaloiden rakentaminen maalle ei aiheuta erityisiä haasteita. Arktisen alueen kylmyys on puolestaan alueen suurin haaste tuulivoiman kannalta. Kylmä lämpötila aiheuttaa jäätymistä voimalan rakenteissa heikentäen sen ominaisuuksia, mikä johtaa häviöihin tuotetun energian määrässä. Jäätymistä voidaan estää useilla eri tavoilla, mutta toistaiseksi käytössä olevat menetelmät ovat joko liian kalliita, tai ne eivät ole tarpeeksi tehokkaita estämään jäätymistä riittävän kylmissä olosuhteissa. Jäätymisen estoon käytettyä teknologiaa pyritään kehittämään jatkuvasti, joten myös arktista tuulivoimaa tullaan hyödyntämään tulevaisuudessa yhä enemmän.

Avainsanat: Tuulivoima, merituulivoima, arktinen tuulivoima, uusiutuva energia, offshore, arctic

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TUULIVOIMA .....	2
2.1 Tuulivoiman periaate .....	2
2.2 Tuulivoima Suomessa .....	3
2.3 Tuulivoima maailmalla .....	4
2.4 Tuulivoimalan sijoittaminen .....	5
3. TUULIVOIMAN POTENTIAALI .....	7
3.1 Merituulivoima .....	9
3.1.1 Merituulivoimaloiden teknologia .....	10
3.1.2 Merituulivoiman tulevaisuuden näkymät .....	12
3.2 Arktinen tuulivoima .....	14
3.2.1 Arktisen tuulivoiman teknologia .....	15
3.2.2 Arktisen tuulivoiman tulevaisuuden näkymät .....	17
4. TUULIVOIMAN HAASTEET .....	18
4.1 Merituulivoimalle ominaiset haasteet .....	19
4.2 Arktiselle tuulivoimalle ominaiset haasteet .....	21
5. YHTEENVETO .....	24
LÄHTEET .....	26

# 1. JOHDANTO

Maailman sähköenergian tuotannon rakenne on muutosvaiheessa. Uusiutuvan sähköenergian tuotanto on nopeassa kasvussa, kun taas fossiilisiin polttoaineisiin perustuvasta sähköntuotannosta pyritään pääsemään eroon. Uusiutuvan sähköenergian tuotannon kasvun tärkeimpänä osana on tuulivoima, joka on jo nykypäivänä merkittävässä osassa maailman sähköntuotantoa, eikä sen kasvu ei ole hidastumassa tulevina vuosina [1]. Tuulivoiman suuren tilantarpeen vuoksi tulevaisuudessa suuri osa tuulipuistoista tullaan sijoittamaan merelle tai arktiselle alueelle.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaankin merituulivoiman sekä arktisen tuulivoiman nykytilannetta ja potentiaalia sekä niiden haasteita. Merellä sekä arktisilla alueilla on tyypillisesti paremmat tuuliolosuhteet kuin muilla maa-alueilla, joten on järkevää pohtia tuulivoiman mahdollisuuksia näillä alueilla. Molemmilla alueilla on kuitenkin myös omat haasteensa, kuten se, että rakentaminen tapahtuu haastavammissa olosuhteissa, sekä itse tuulivoimaloiden on kestävä meriveden tai kylmyyden aiheuttamaa rasitusta.

Luvussa 2 tarkastellaan tuulivoiman toimintaperiaatetta yleisesti, tuulivoiman tämän hetkistä tilannetta Suomessa ja globaalisti sekä myös käydään läpi tuulivoimaloiden sijoittamiseen vaikuttavia tekijöitä. Luvussa 3 käsitellään tuulivoiman potentiaalia ja tulevaisuuden näkymiä, sekä keskitytään tarkemmin merituulivoiman sekä arktisen tuulivoiman teknologiaan ja tulevaisuuteen. Luvussa 4 käydään läpi tuulivoiman haasteita ja perehdytään enemmän merituulivoimalle sekä arktiselle tuulivoimalle ominaisiin haasteisiin. Tässä luvussa käsitellään myös käytössä olevia sekä mahdollisia ratkaisuja, joilla näistä ongelmista päästään eroon. Viimeisessä luvussa on yhteenveto työssä tehdyistä havainnoista ja siinä tehdään tarvittavat johtopäätökset merituulivoiman ja arktisen tuulivoiman tulevaisuudesta osana sähköntuotantoa.

## 2. TUULIVOIMA

Tuulivoima on maailman toiseksi suurin uusiutuvan energian tuotantomuoto, ja sen tuotanto lisääntyy edelleen nopealla tahdilla [1]. Tässä luvussa käsitellään aluksi tuulivoiman toimintaperiaatetta ja hieman eri voimalatyyppejä sekä käydään läpi, kuinka tuulivoimalan tuottama teho voidaan määrittää laskennallisesti. Tämän lisäksi luvussa käsitellään tuulivoiman tämänhetkistä tuotantoa sekä Suomessa että muualla maailmalla. Lopuksi käydään läpi tuulipuistojen sijoittamiseen vaikuttavia tekijöitä.

### 2.1 Tuulivoiman periaate

Tuulivoiman tuotanto perustuu tuulella olevan liike-energian muuntamiseen sähköenergiaksi tuulivoimalan avulla. Erilaisia tuulivoimalatyyppejä on useita ja niistä yleisin on vaakakselinen, kolmilapainen voimala. Tämän lisäksi on olemassa pystyakselisiä tuulivoimaloita sekä roottorin lapojen määrä voi vaihdella. Tuulivoimala tuottaa sähköä siten, että tuulella oleva liike-energia siirtyy voimalan roottorin pyörimisenergiaksi. Akseli puolestaan pyörittää generaattoria, joka tuottaa täten sähköä. [2]

Määritettäessä tuulivoimalan tuottamaa tehoa on ensin tunnettava tuulella olevan energian määrä, ja sen jälkeen määritettävä, kuinka paljon tästä energiasta on mahdollista muuntaa sähköenergiaksi. Tuulella oleva teho  $P_t$  voidaan laskea kaavalla

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A v^3, \quad (2.1)$$

jossa  $\rho$  on ilman tiheys,  $A$  on ilmavirtausta vastaan kohtisuora roottorin pyyhkäisyypinta-ala ja  $v$  on tuulen nopeus. [3]

Kaikkea ilmavirtauksessa olevaa energiaa ei kuitenkaan pystytä muuntamaan tuulivoimalan roottorin pyörimistehoksi. Betzin lain mukaan, jossa oletetaan roottorin olevan ideaali, pystytään muuntamaan 16/27 tai noin 59 % tuulen liike-energiasta roottorin pyörimisenergiaksi. Teoreettiseen maksimihyötysuhteeseen ei kuitenkaan todellisuudessa aivan päästä esimerkiksi kitkan ja ilmanvastuksen vuoksi. Nykypäivän tuulivoimaloissa roottorihyötysuhteet ovat parhaimmillaan noin 50 %. Tämän lisäksi tuulivoimalan kokonaisyötysuhteeseen vaikuttaa tuulivoimalan generaattorin hyötysuhde, joka on noin 90 %. Tuulivoimalan tuottamalle teholle  $P_k$  voidaan kirjoittaa kaava

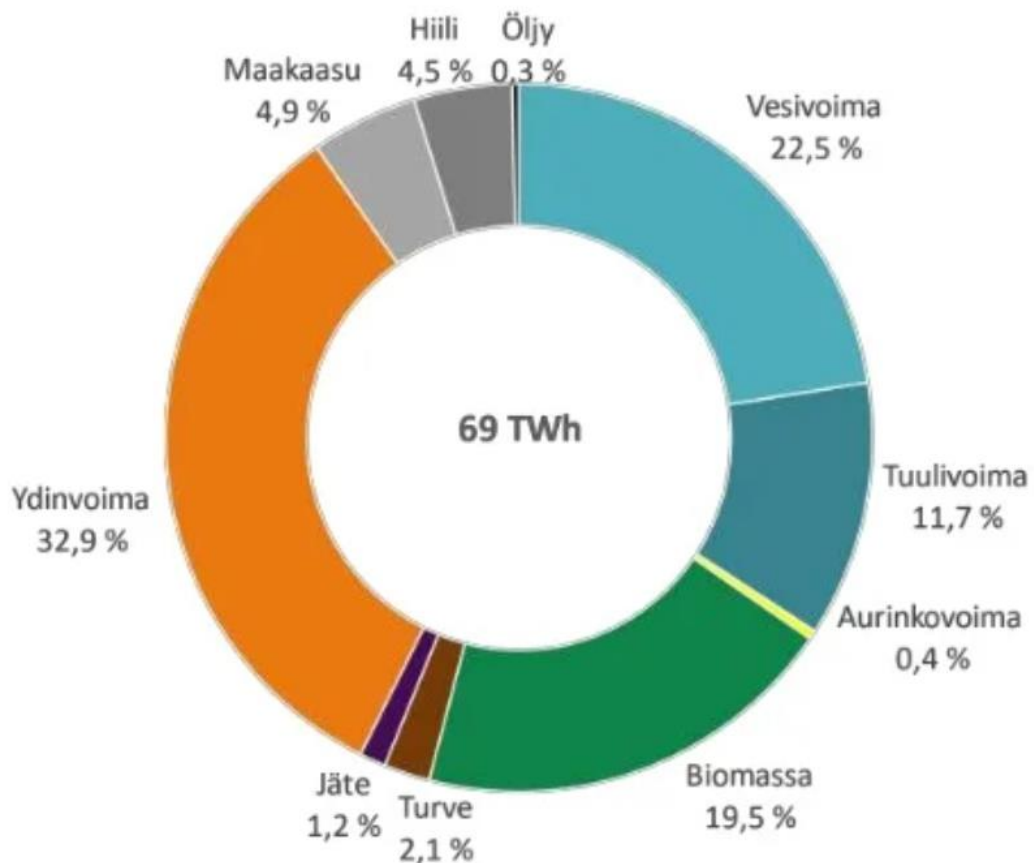
$$P_k = C_p \varepsilon P_t, \quad (2.2)$$

jossa  $C_p$  on voimalan roottorihyötysuhde ja  $\varepsilon$  on generaattorin hyötysuhde. [3]

Kaavasta 2.1 huomataan, että tuulen nopeus  $v$  on korotettu kolmanteen potenssiin, joten se on kaavan merkittävin komponentti. Tuulelle on kuitenkin ominaista, että sen nopeus vaihtelee paljon päivittäin ja eri vuodenaikoina. Tämän takia myös tuulivoimalla tuotetun sähkön määrä vaihtelee tuuliolosuhteiden mukaan. Kapasiteettikerroin kuvaa, kuinka paljon tuulivoimala tuottaa sähköä suhteessa sen nimelliseen maksimitehoon. Suomessa tuulivoimaloiden keskimääräinen kapasiteettikerroin on 33 %. [2]

## 2.2 Tuulivoima Suomessa

Kuvassa 1 esitetään, että vuonna 2021 Suomessa tuotettiin 69 TWh sähköä, josta 11,7 % eli 8061 GWh tuotettiin tuulivoiman avulla [4]. Vuosi 2021 oli ennätysellinen vuosi uuden tuulivoimakapasiteetin rakentamisessa, sillä Suomeen rakennettiin 141 uutta tuulivoimalaa, joiden teho oli yhteensä 671 MW. Nyt tuulivoimaloiden kokonaismäärä Suomessa on 962 ja niiden kokonaiskapasiteetti 3257 MW. [5]



**Kuva 1.** Sähkön tuotanto Suomessa energialähteittäin vuonna 2021 [4].

Tuulipuistoksi kutsutaan sellaista aluetta, jolla sijaitsee useampi tuulivoimala. Suomen suurin tuulipuisto on Piiparinmäen tuulipuisto, joka valmistui vuoden 2021 lopussa Kaajanin ja Pyhännän kuntien rajalle. Se koostuu yhteensä 41 tuulivoimalasta, ja sen teho on 211 MW. Sen arvioidaan tuottavan noin 700 GWh sähköä vuodessa, mikä vastaa melkein 1 %:a Suomessa kulutetusta sähköenergiasta. [6] Suomessa tuulivoiman tuotanto kuitenkin keskittyy suurimmaksi osaksi länsirannikolle. Eniten tuulivoimaa Suomessa tuotetaan Pohjois-Pohjanmaalla, jossa sijaitsee 37 % Suomen tuulivoimakapasiteetista. Seuraavaksi eniten tuulivoimaa tuotetaan Lapissa sekä Pohjanmaalla. [7]

Vuoden 2022 maaliskuussa Suomessa julkaistuja tuulivoimahankkeita on yhteensä 54371 MW verran, josta 44466 MW on maatuulivoimaa, ja 9905 MW merituulivoimaa. Näistä hankkeista on jo rakenteilla 4252 MW:n edestä tuulivoimaa. [8] Voidaan siis tulkitä, että tuulivoiman tuotanto sekä sen osuus sähköntuotannosta Suomessa on tällä hetkellä todella nopeassa kasvussa.

## 2.3 Tuulivoima maailmalla

Vuonna 2020 Euroopassa asennettiin 14,7 GW uutta tuulivoimakapasiteettia, mikä nosti Euroopan kokonaistuulivoimakapasiteetin 220 GW:iin. Eniten uudesta kapasiteetista asennettiin Alankomaissa, jossa tuulivoimakapasiteettia asennettiin 1979 MW. Vuonna 2020 Euroopassa tuotettiin yhteensä 458 TWh sähköä tuulivoimalla, mikä vastaa 16 %:a Euroopan sähköntarpeesta. [9]

Euroopassa kolme eniten tuulivoimaa tuottavaa valtiota vastaa yli puolesta Euroopan tuulivoiman tuotantokapasiteetista. Saksa on Euroopan suurin tuulivoiman tuottaja ja sen tuulivoimakapasiteetti on 63 GW, joka on 29 % koko Euroopan kapasiteetista. Kaksi muuta merkittävää tuulivoiman tuottajamaata Euroopassa ovat Espanja ja Iso-Britannia, joissa asennettua tuulivoimakapasiteettia on 27 GW ja 24 GW. [9]

Maailmanlaajuisesti vuosi 2020 oli ennätysellinen vuosi uuden tuulivoimakapasiteetin asennuksissa. Tuulivoimakapasiteettia asennettiin yhteensä 93 GW, josta 86,9 GW oli maatuulivoimaa ja 6,1 GW merituulivoimaa. Näiden asennuksien jälkeen tuulivoiman globaali kokonaiskapasiteetti oli 743 GW. Vuonna 2020 asennetusta tuulivoimakapasiteetista suurin osa sijoittui Kiinaan, jossa asennettiin 56 % uudesta maatuulivoimasta sekä 50 % merituulivoimasta. Muita merkittäviä valtioita vuoden 2020 tilastoissa olivat Yhdysvallat, joka vastasi 19 %:sta uudesta maatuulivoimasta, sekä Alankomaat, jossa rakennettiin 25 % asennetusta merituulivoimasta. [10]

Kokonaisuudessaan maailmassa oli vuoden 2020 lopussa 707,4 GW asennettua maatuulivoimakapasiteettia. Eniten maatuulivoimakapasiteettia oli Kiinassa ja Yhdysvalloissa, joiden osuudet olivat 39 % ja 17 %. Kolmanneksi eniten maatuulivoimaa tuotettiin Saksassa, jonka osuus tuotannosta oli 8 %. Asennettua merituulivoimakapasiteettia oli maailmanlaajuisesti 35,3 GW, josta suurin osa tuotettiin Isossa-Britanniassa, Kiinassa sekä Saksassa. Ison-Britannian osuus tästä oli 29 %, Kiinan osuus 28 %, sekä Saksan osuus oli 22 %. [10]

## 2.4 Tuulivoimalan sijoittaminen

Tuulivoimaloiden ja -puistojen sijoittamiseen vaikuttavat monet eri asiat, ja lähtökohtana hyvän sijainnin määrittämisessä on löytää paikka, jossa voimalat voivat tuottaa mahdollisimman paljon sähköä ja niiden rakentaminen ja ylläpito on mahdollisimman edullista. Voimaloiden sijoittamiseen vaikuttavat tekijät voidaan jakaa ilmastollisiin ja maantieteellisiin tekijöihin, ympäristövaikutuksiin, sekä yleisesti sijainnin vaikutukseen tuulivoiman tuoton kannalta. [11]

Luvussa 2.1 kerrottiin, että tuulen nopeus vaikuttaa eniten tuulivoimalan tuottamaan tehoon, joten on hyvin tärkeää sijoittaa tuulivoimalat sellaiseen paikkaan, jossa tuulen nopeus on suuri ja tuulen nopeuden vaihtelu mahdollisimman vähäistä. Kaavasta 2.1 huomataan myös ilman tiheyden vaikuttavan tuotetun teho määrään, eli myös ilman tiheyden on oltava mahdollisimman suuri. Muita tuulivoiman tuottamiseen vaikuttavia ilmastotekijöitä ovat luonnonkatastrofit, kuten hirmumyrskyt tai maanjäristykset, jotka voivat vahingoittaa tuulivoimaloita, sekä kylmyys, joka saattaa aiheuttaa jäätymistä roottorin laevoissa. [11]

Maantieteelliset tekijät ovat osittain sidoksissa ilmastollisiin tekijöihin, sillä erilaiset pinnanmuodot, kuten kukkulat, vuoret tai metsät vaikuttavat paikallisesti tuulen nopeuteen ja täten suoraan tuulivoimalan tuottaman sähkömäärään. Nämä pinnanmuodot myös voivat vaikeuttaa voimalan rakennusprosessia. [11] Tämän takia suurin osa maatuulivoimaloista rakennetaan mahdollisimman tasaisille alueille tai merien ja järvien rannoille. Merituulivoimalat puolestaan täytyy sijoittaa sellaiseen paikkaan, jossa meri ei ole liian syvä sekä aaltojen korkeus ei ole liian korkea tai vaihteleva, jotta voimalan rakennus onnistuu helpommin sekä sen elinikä pitenee. [11]

Ympäristöllisillä tekijöillä tarkoitetaan tuulivoimaloista aiheutuvaa vaikutusta alueen ihmisiin, eläimistöön tai luontoon. Tuulivoimaloita suunniteltaessa on pyrittävä minimoimaan voimaloiden haittavaikutukset alueen asukkaille, kuten voimalasta aiheutuva melu

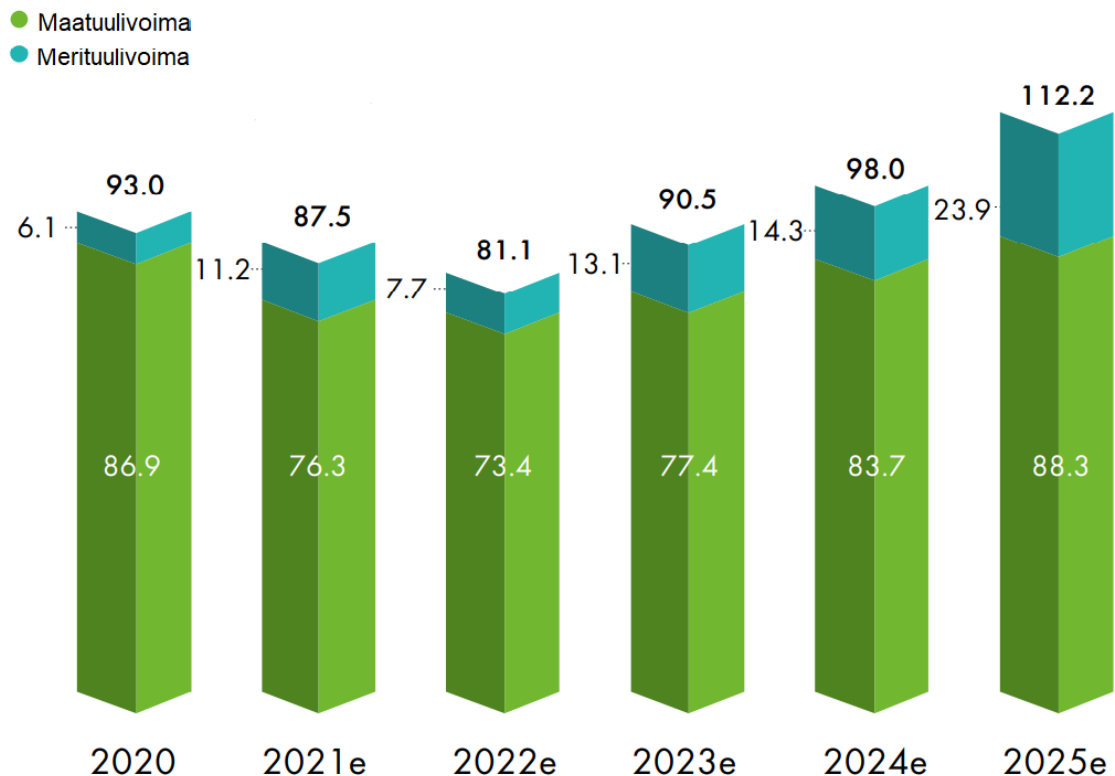


sekä muutos alueen maisemaan, joten voimaloita ei sijoiteta taajama-alueille, vaan hie-  
man loitommalle tiheästä asutuksesta. Merituulivoiman sijoituksessa on puolestaan huo-  
mioitava alueen mahdolliset laivareitit. Tuulivoimalan rakennusvaiheessa voimalan pe-  
rustusten alta poistetaan kasvillisuus, joten rakennuspaikan kasvillisuus on tarkastettava  
ennen rakentamista uhanalaisen kasvillisuuden varalta. Ennen voimalan rakentamista  
tehdään myös ympäristöselvitys, jossa selvitetään, onko voimalan lähistöllä esimerkiksi  
herkkiä lintulajeja tai kalojen kutualueita. [12]

Tuulipuistojen sijoittamisissa on erittäin tärkeää, että kyseinen sijainti on tarpeeksi lähellä  
sähköverkkoa, jolla on riittävästi kapasiteettia siirtämään tarvittavan määrän sähköä  
vaihtelevan tuoton ja kulutuksen kattamiseksi [13]. Myös tuulipuiston sisäisesti voimaloi-  
den sijoituksella on merkittävä rooli, sillä voimalan roottorin lavat aiheuttavat ilmavirtauk-  
seen häiriötä. Jotta tästä ei aiheutuisi haittaa tuulipuiston sähköntuoton kannalta, on voi-  
malat sijoitettava tarpeeksi kauas toisistaan. Yleisenä sääntönä tähän on se, että voima-  
loiden etäisyys toisistaan täytyy olla vähintään 5 kertaa roottorin halkaisijan verran. [14]

### 3. TUULIVOIMAN POTENTIAALI

Vuoden 2000 loppuun mennessä maailmassa oli yhteensä 17,7 GW asennettua tuulivoimakapasiteettia [15]. Tämän jälkeen tuulivoimaa on rakennettu huomattava määrä ympäri maailmaa, ja kuten luvussa 2.3 kerrottiin, niin vuoden 2020 lopussa maailmassa oli yhteensä 743 GW tuulivoimakapasiteettia [10]. Tämä vastaa keskimäärin 20,6 %:n vuotuista kasvua asennetun tuulivoimakapasiteetin määrässä. Tuulivoiman kokonaismäärän kasvaessa ei kuitenkaan ole mahdollista ylläpitää suhteellista kasvua näin korkeana pitkällä aikavälillä [15]. Kuvassa 2 esitetään ennusteet uuden tuulivoimakapasiteetin asennuksille lähitulevaisuudessa. Kuten kuvasta huomataan, niin kuitenkin uuden tuulivoiman absoluuttinen vuotuinen asennusmäärä tulee pysymään kasvusuunnassa myös lähivuosina [10].

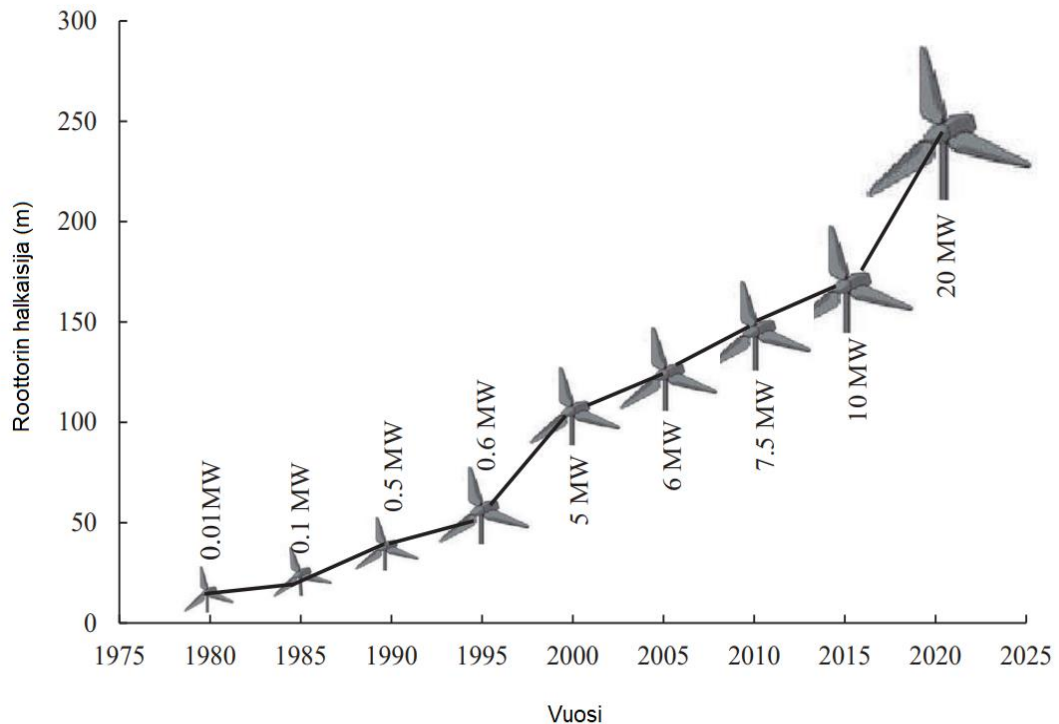


**Kuva 2.** Ennuste uuden tuulivoiman asennuksista vuosille 2020–2025 (GW) [10].

Kuvasta 2 voidaan myös laskea, että ennusteiden mukaan vuoden 2025 loppuun mennessä rakennetaan lisää yhteensä 469 GW tuulivoimakapasiteettia, mikä korottaa maailman kokonaistuulivoimakapasiteetin 1212 GW:iin. Tämä nostaa merkittävästi tuulivoiman osuutta maailman sähköntuotannossa. [10]

Myös Suomessa tuulivoiman tuotantokapasiteetti on kasvamassa vauhdilla. Kuten luvussa 2.2 kerrottiin, niin kymmenen viime vuoden aikana tuulivoiman kapasiteetti Suomessa on kasvanut merkittävästi, ja ennusteiden mukaan tuulivoima voisi kattaa jopa 25 % Suomessa tuotetusta sähköstä jo viiden vuoden kuluttua. [5]

Kuvasta 3 nähdään, että tuulivoimaloiden koot sekä nimellistehot ovat tähän mennessä kasvaneet jatkuvasti niin kauan, kun tuulivoimaloita on ollut olemassa, joten voidaan olettaa, että yksittäisten tuulivoimaloiden koot ja täten tuotantokapasiteetit tulevat vielä kasvamaan nykyisestä. Tuulivoimaloiden koko kuitenkin vaihtelee paljon eri maiden ja maanosien välillä. Nykypäivänä suurimmat tuulivoimalat sijaitsevat merellä ja näin tulee olemaan myös jatkossa. [16]



**Kuva 3.** Tuulivoimaloiden roottorien tehon sekä koon kasvu [16].

Power-to-X viittaa ylimääräisen tuotetun uusiutuvan energian muuttamiseen neste-mäiseksi tai kaasumaiseksi kemikaaliksi elektrolyysin sekä muiden prosessien avulla. Power-to-X on lupaava tulevaisuuden energian varastoimismenetelmä tuulivoimalle, jonka avulla saadaan maksimoitua tehokkuus ja minimoitua haitat. Tällä menetelmällä tuotettuja kemikaaleja voidaan hyödyntää lukemattomilla eri tavoilla. Varastoitu sähkö voidaan muuntaa esimerkiksi eri kemikaaleiksi tai yhdistettynä siepatun hiilidioksidin

kanssa hiilineutraaleiksi polttoaineiksi. Tämän lisäksi varastoitua sähköä voidaan hyödyntää talojen lämmityksessä tai pelkästään energiavarastona, josta energia voidaan syöttää takaisin sähköverkkoon. [17]

Tässä luvussa keskitytään kuitenkin pääosin merituulivoimaan sekä arktiseen tuulivoimaan. Aluksi kerrotaan hieman merituulivoiman nykytilanteesta sekä teknologiasta, minkä jälkeen tarkastellaan merituulivoiman tulevaisuudennäkymiä tuotannon ja teknologian puolesta. Lopuksi tehdään saman tyyppinen tarkastelu arktiselle tuulivoimalle.

### 3.1 Merituulivoima

Tuulipuistojen rakentaminen merialueille aloitettiin 1980-luvun lopussa pienessä eurooppalaisessa projektissa [18], mutta merituulivoimaa on alettu rakentamaan enemmän vasta kymmenen viime vuoden aikana. Vuoden 2020 lopussa maailmanlaajuisesti oli asennettuna 35 GW merituulivoimaa, mikä on peräti 14 kertaa enemmän kuin kymmenen vuotta aiemmin, mutta tämä on silti vielä hyvin pieni osuus maailman sähköntuotannosta. [17]

Tuulivoimatuotannon laajentaminen merialueille on järkevää, sillä merialueilla ei ole juurikaan epätasaisia pinnanmuotoja, minkä vuoksi merialueilla myös tuulen nopeus on keskimäärin suurempi sekä siinä on vähemmän vaihtelua, kuin maa-alueilla, jossa puusto, vuoret sekä epätasaiset pinnanmuodot vaikuttavat tuulen nopeuteen. Suurempi ja tasaisempi tuulen nopeus tekee tuuliolosuhteista huomattavasti paremmat tuulivoiman tuotannon kannalta. [18]

Merituulipuistojen suunnittelu on myös hieman helpompaa, kuin maatuulipuistojen. Alueella ei ole asukkaita, joille aiheutuisi tuulipuistosta haittaa, kuten melua tai maiseman muutosta, kunhan puisto sijoitetaan tarpeeksi kauas rannikosta. Merellä on myös huomattavasti vähemmän fyysisiä esteitä voimaloiden rakentamiselle, kuten rakennuksia tai vuoria. Tämän lisäksi merituulivoimaa pystytään asentamaan esimerkiksi melko lähelle suuria rannikkokaupunkeja, joissa sähköntarve on suuri. Merelle pystytään myös rakentamaan suurempia voimaloita, kuin maalle, sillä valtaviin tuulivoimalan osien kuljettaminen onnistuu helposti meriteitse, mutta maalla kuljetus vaatii suuria valmisteluja ja se voi silti aiheuttaa haittaa asukkaille. [19]

Merituulivoimalla on maailmanlaajuisesti lähes rajaton potentiaali, sillä suuri osa maapallosta on merten peitossa. Maailmanpankin tekemän arvion perusteella maailmassa olisi noin 71000 GW edestä merituulivoimaa hyödynnettävissä, mikä on melkein kymmenen kertaa enemmän, kuin koko maailman tämänhetkinen sähköntuotantokapasiteetti yhteensä. [17]

### 3.1.1 Merituulivoimaloiden teknologia

Merituulivoimaloissa käytetty teknologia on hyvin samanlaista kuin maatuulivoimaloissa. Merituulivoimalat siis tuottavat sähköä luvussa 2.1 esitetyllä periaatteella. Ainoa merkittävä ero meri- ja maatuulivoimaloiden toimintaan liittyen on niiden koko, sillä tyypillisesti merituulivoimalat ovat kooltaan ja täten myös sähköntuotantokapasiteetiltaan suurempia kuin maatuulivoimalat. [18]

Suolainen merivesi aiheuttaa tavallisesti metalleissa korroosiota, jonka myötä rakenteet, joita ei ole suojattu hajoavat merellä huomattavasti nopeammin kuin esimerkiksi maalla. Tämä on otettava huomioon merituulivoimaloiden rakenteessa. Tällä hetkellä on käytössä ratkaisuja korroosion aiheuttamien haittojen estämiseksi. Voimalan rakenteista voidaan tehdä fyysisesti paksumpia, millä kompensoidaan korroosion aiheuttamaa rakenteiden heikkenemistä. Toinen vaihtoehto on käyttää merivettä kestävää pinnoitetta, kuten sinkkipitoista maalia. [19]

Suurin ero maa- ja merituulivoimaloiden rakentamisessa on voimalan perustukset. Maatuulivoimaloissa on tyypillisesti hyvin perinteiset perustukset, kun taas merituulivoimalat vaativat huomattavasti suuremman tukirakenteen. Merituulivoimaloiden perustusten tyyli myös vaihtelee meren syvyyden sekä merenpohjan koostumuksen mukaan. [18] Tyypillisesti perustukset kustantavat 25–34 % koko merituulivoimalan rakennusprojektista. Merituulivoimaloiden perustustyyppit voidaan jakaa kahteen pääryhmään, merenpohjaan kiinnitettyihin sekä kelluviin. [19] Kuvassa 4 esitetään useita eri perustustyyppisiä tuulivoimaloille

Maahan kiinnitetyt perustukset voidaan vielä jakaa kolmeen ryhmään veden syvyyden perusteella. Matalassa vedessä, kun vettä on alle 30 m, voimalan perustukset voidaan rakentaa joko perinteisellä painovoimaan perustuvalla tekniikalla, imukasuunilla (engl. suction caisson) tai teräspaalulla. [19]

Merituulivoimaloissa yleisimmin käytetty perustustyyppi on teräspaalu, sillä sitä on helppo käyttää monenlaisessa ympäristössä. Rakenteeltaan teräspaalu on hyvin yksinkertainen, sillä se on vain jatketta voimalan tornille. Teräspaalu on tyypillisesti paksuudeltaan 3–7 m ja se painetaan merenpohjasta noin 25–40 m:n syvyyteen maan sisään. [19]

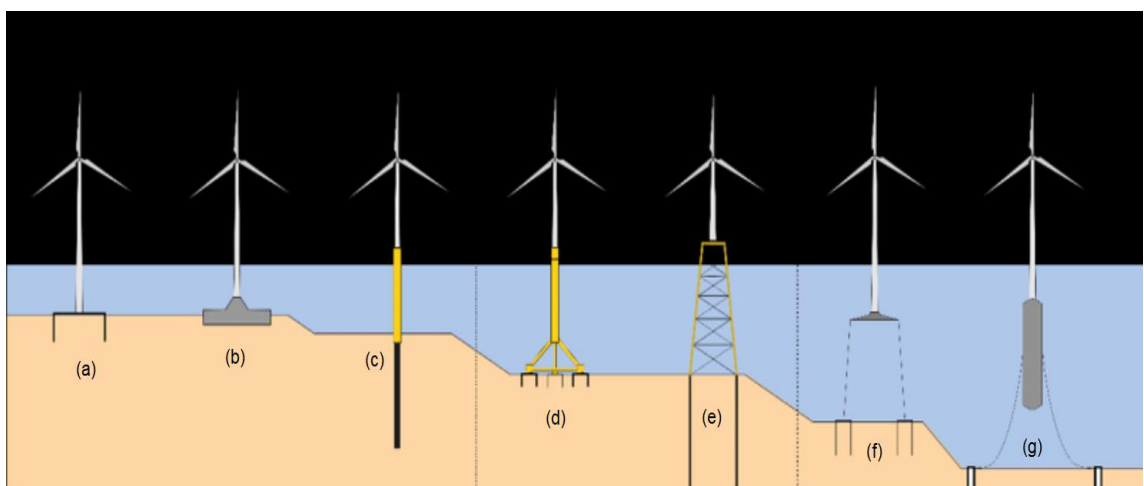
Painovoimaan perustuvat perustukset ovat tyypillisesti betonista valmistettu suurimassainen kappale, jonka pohjan pinta-ala on riittävän suuri pitämään voimalan paikallaan. Tällaisia perustuksia käytetään paikoissa, joissa merenpohja on tarpeeksi kovaa, kuten

kalliota. Merenpohjan on myös oltava tasainen, jotta vältetään voimalan kallistumiselta. [19]

Imukasuuni, joka tunnetaan myös nimellä imuämpäri, on näistä kolmesta uusien perustustyyppi. Nimensä mukaisesti se muistuttaa ylösalaisin olevaa ämpäriä. Kun imukasuuni saadaan merenpohjaa vasten, sen sisältä poistetaan siellä oleva vesi. Tämä aiheuttaa kasuunin kannen ylä- ja alapinnoille suuren paine-eron, joka painaa kasuunin reunat maan sisään. Myös imukasuunia käytettäessä merenpohjan on oltava tasainen, mutta sitä käytetään merenpohjan koostumuksen ollessa pehmeämpi. [19]

Noin 30–60 m:n syvyyteen rakennetaan myös maahan kiinnitettyjä perustuksia, mutta silloin perustusten on oltava tukevammat. Tällöin perustukset ovat suurempi tukirakennelma, joka voi olla esimerkiksi monijalkainen tai ristikkorakenteinen. Tukirakennelman kiinnittämiseksi merenpohjaan voidaan käyttää teräspaaluja tai imukasuuneja merenpohjan koostumuksen mukaan. [19]

Kelluvia voimaloita käytetään tyypillisesti syvemmissä vesissä. Kuvassa 4 esitetään kaksi erilaista kelluvaa voimalatyyppiä. Tension leg platform (TLP) on kelluva taso, joka on tasapainotettu käyttämällä ankkuroinnissa jäykkää materiaalia, minkä avulla taso saadaan erittäin stabiiliksi. TLP-tyyppisiä voimaloita voidaan käyttää joko matalassa vedessä tai jopa 200 m syvyydessä. Toinen kuvassa 4 esitetty kelluvissa voimaloissa käytetty tekniikka on korkea ja kapea poiju, jonka alaosa on painavampi kuin sen yläosa, mikä saa sen pysymään pystyssä. Tällaiset poijut ovat niin korkeita, ettei tällaisia voimaloita voida käyttää matalassa vedessä. [19] Poijut ovat tähän mennessä eniten käytetty teknologia kelluvissa merituulivoimaloissa [17].



**Kuva 4.** Erilaisia perustus tyyppejä sekä kelluvia voimaloita. (a) Imukasuuni. (b) Painovoimaan perustuvat perustukset. (c) Teräspaalu. (d) Kolmijalkainen imukasuuni. (e) Kehikkorakenteiset perustukset. (f) TLP. (g) Ankkuroitu poiju. [20]

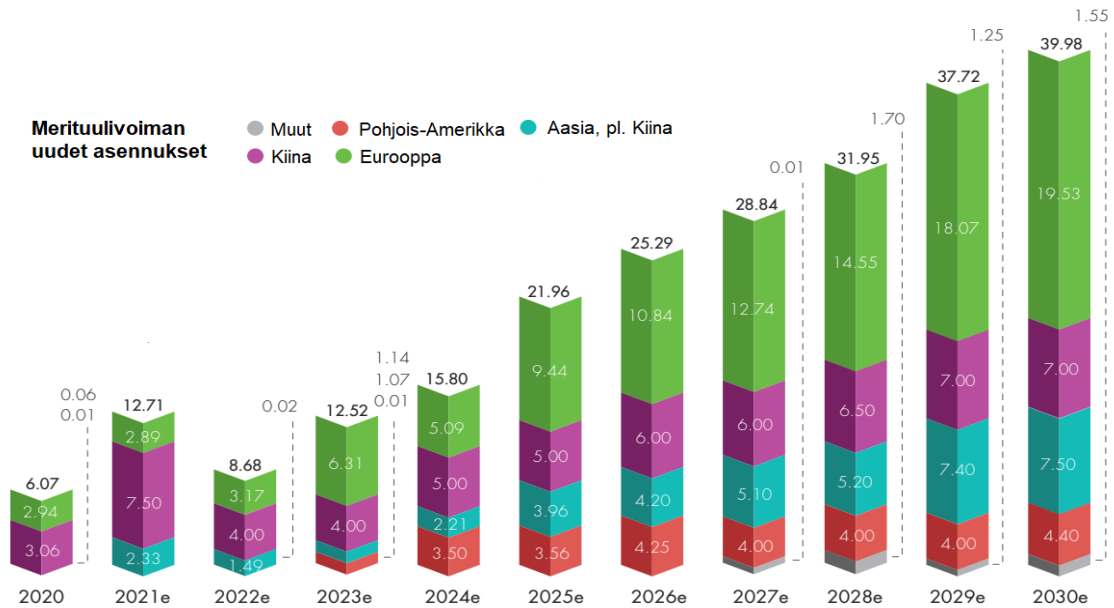
Tämän lisäksi on olemassa kaksi muuta kelluvaa voimalatyyppeä, puoliupotettu sekä proomu. Puoliupotettu kuljetetaan ensin kelluvana haluttuun paikkaan, minkä jälkeen sen ponttoneihin päästetään vettä sisään, mikä upottaa voimalan alustan osittain ja täten pitää voimalan paikallaan yhdessä ankkuroinnin kanssa. Proomu on kuin tasapohjainen laiva, jonka päällä voimala on. Proomun ankkurointi onnistuu sekä matalassa, että syvässä vedessä. [17]

Merituulipuistojen liittäminen sähköverkkoon kuuluu jokaiseen merituulivoimaprojektiin. Sähköverkkoon liittämiseen käytetään kuitenkin useita tekniikoita riippuen voimaloiden etäisyydestä rannikosta sekä voimaloiden rakenteesta. Tyypillisesti merituulipuiston voimalat liitetään verkkoon siten, että ne ensin liitetään toisiinsa merellä tiettyyn pisteeseen niin kutsutulle ala-asemalle, jossa jännitetasoa nostetaan muuntajan avulla häviöiden minimoimiseksi. Ala-asemalta sähkö tuodaan merikaapelilla maalle ja yhdistetään maalla olevaan sähköverkkoon. [18]

Sähkönsiirrossa voimaloilta ala-asemalle käytetään tyypillisesti keskijännitevaihtovirtaa. Ala-asemalta maalle siirtämisessä voidaan puolestaan käyttää joko suurjännitevaihtovirtaa (HVAC) tai suurjännitetasovirtaa (HVDC). HVAC siirtolinjoja käytetään silloin, kun tuulipuisto on alle sadan kilometrin päässä rannikosta, sillä se on halvempi rakentaa ja näin lyhyellä matkalla ei aiheudu paljoa häviöitä. HVDC siirtolinjoja käytetään puolestaan pidempiin siirtoväleihin, sillä häviöitä tapahtuu niin vähän, että kaapelin pituudelle ei ole rajoitetta. HVDC-kaapeleilla on myös enemmän siirtokapasiteettia kuin HVAC-kaapeleilla. Kelluvien tuulivoimaloiden kaapeloinnissa on huomioitava niiden jatkuva liikehdintä. Tavallinen merikaapelointi ei kestä jatkuvaa heilumista, joten kelluvissa tuulivoimaloissa käytetään joustavampaa kaapeliteknologiaa, kuin perustetuissa voimaloissa. [17]

### **3.1.2 Merituulivoiman tulevaisuuden näkymät**

Edellisessä luvussa kerrottiin, että merituulivoiman tuotanto on kasvanut edellisinä vuosina nopealla vauhdilla. Kuvassa 5 esitetään ennustetut uuden merituulivoiman vuotuiset asennusmäärät vuoteen 2030 asti. Siitä huomataan, että merituulivoiman asennus myös pysyy nopeassa kasvussa ja myös sen osuus sähkön kokonaistuotannossa maailmalla kasvaa merkittävästi. Ennustusten mukaan vuoteen 2030 mennessä asennetaan yhteensä yli 235 GW uutta merituulivoimakapasiteettia, mikä nostaa merituulivoiman kokonaiskapasiteetin noin 270 GW:iin. Kuvasta 5 huomataan myös, että Eurooppa ja Kiina pysyvät suurimpina merituulivoiman tuottajina. [17]



**Kuva 5.** Ennuste uuden merituulivoiman asennuksista maanosittain vuosille 2020–2030 (GW). [17]

Merituulivoimalla on merkittävä osuus Euroopan unionin komission julkaisemassa strategiassa ilmastonmuutosta vastaan, jossa tavoitteena on nostaa merituulivoiman kokonaiskapasiteetti EU-maissa 12 GW:sta 300 GW:iin vuoteen 2050 mennessä. Tämä strategia koskee myös Suomea, sillä Itämerellä olosuhteet tuulivoiman tuottamisen kannalta ovat erittäin hyvät matalan syvyyden ja hyvien tuuliolosuhteiden vuoksi. Suomessa on tällä hetkellä useita merituulivoimahankkeita kehitysvaiheessa, mutta vasta yksi merituulipuisto rakennettuna ja toiminnassa Porin Tahkoluodossa. [21]

Kuten edellisessä luvussa mainittiin, niin merituulivoimaloiden perustukset ovat suurin ero maa- ja merituulivoimaloiden välillä, ja ne ovat suurin lisäkustannus rakennettaessa tuulivoimaloita merelle. Tämän takia uusia perustustyyppisiä on jatkuvasti kehityksessä, jotta merituulivoimaloiden hintaa saataisiin alennettua. [20]

Noin 80 % maailman merituulivoimapotentiaalista sijaitsee sellaisissa paikoissa, joissa merensyvyys on yli 60 m, joten niille alueille ei voida rakentaa kiinteitä perustuksia. Tämän vuoksi kelluva merituulivoima tulee olemaan entistä suuremmassa roolissa tulevaisuuden merituulivoimaa, jotta pystytään saavuttamaan asetetut tavoitteet ilmastonmuutosta vastaan. [17]

Merituulipuistojen määrän kasvaessa jokaisen puiston yksikseen kytkeminen maalle sähköverkkoon tulee kalliiksi. Tämän takia tulevaisuudessa rakennetaan suuria uusia sähköverkkoja merelle. Näiden sähköverkkojen tarkoitus on yhdistää kaikki tietyllä alu-



eella olevat merituulipuistot. Tämän tyyppinen sähköverkko on jo suunnitteilla Pohjanmerelle, missä verkko yhdistäisi useita puistoja ja olisi yhteydessä moniin eri valtioihin. Tällaisessa merisähköverkossa käytettäisiin luultavasti HVDC teknologiaa. [17]

Koska parhaat tuuliolosuhteet ovat merellä, niin merituulivoiman ja aiemmin mainitun Power-to-X teknologian yhdistämisessä nähdään suuria mahdollisuuksia. Merellä pystytään tuottamaan suurempia määriä energiaa ja Power-to-X:n avulla siitä pystytään hyödyntämään suurempi osuus myös tuotonhuippuhetkillä. [17]

### 3.2 Arktinen tuulivoima

Toisin kuin merituulivoima, arktinen tuulivoima ei ole yhtä yksiselitteinen käsite. Tämän takia määritellään ensin, mitä arktinen tuulivoima sisältää tässä työssä. Niin kutsuttu arktinen alue on pohjoisnapaa ympäröivä alue, jonka tarkemmille rajoille on olemassa useampi eri määritelmä. Tässä työssä alue määritellään lämpötilan mukaan, joten alueet, joissa kaikkien kuukausien keskilämpötila pysyy alle 10 °C:ssa, sisältyvät arktiseen alueeseen. Arktinen alue on esitetty kuvassa 6. [22] Tämän määritelmän mukaan Suomessa arktista aluetta on Lappi. Tämän lisäksi alueeseen sisältyy esimerkiksi Kanadan pohjoisosa, Alaska sekä Venäjän pohjoisosa. Tässä työssä arktiseksi tuulivoimaksi määritellään siis kaikki tuulivoima tällä alueella.



**Kuva 6.** Arktinen alue. [22]

Tuulivoiman määrä arktisella alueella on ollut kasvusuunnassa kasvavan uusiutuvan energian kysynnän vuoksi. Arktisella alueella tuuliolosuhteet ovat tyypillisesti melko hyvät sekä harvan asutuksen vuoksi alueella on käytettävissä enemmän tilaa kuin muualla maa-alueilla. [23]

Arktinen tuulivoima on jo laajassa käytössä Suomessa. Maakunnista Lapissa tuotetaan toiseksi eniten tuulivoimaa, mikä vastaa 17 %:a Suomessa tuotetusta tuulisähköstä [7]. Myös suunnitteilla olevista hankkeista suuri osa sijoittuu Lapin alueelle [8].

Myös muualla arktisella alueella on jonkin verran tuulivoimaa käytössä. Pohjois-Amerikassa Alaskan länsirannikolla suuri osa energiantuotannosta tapahtuu tuulivoiman avulla. Alaskan keski- ja itäosissa sekä Kanadan arktisella alueella tuulivoimaa on puolestaan käytössä hyvin vähän. Suurin osa Venäjän tuulivoimasta sijaitsee arktisella alueella maan pohjoisosassa, sillä siellä on todettu olevan erittäin hyvät tuuliolosuhteet sähköntuotannon kannalta, mutta tuotetun tuulivoiman absoluuttinen määrä Venäjällä on hyvin vähäinen. Tämän lisäksi Grönlannissa sekä Islannissa suositaan muita energianlähteitä tuulivoimaa enemmän, vaikka myös siellä olisi tarjolla paljon tuulivoimapotentiaalia. [24]

### **3.2.1 Arktisen tuulivoiman teknologia**

Tuulivoimalat arktisella alueella ovat teoriassa hyvin samanlaisia kuin muualla sijaitsevat maa- tai merituulivoimalat. Kuitenkin alueen kylmyys aiheuttaa voimaloille erityisiä haasteita, sillä kylmissä olosuhteissa voimalan lavat saattavat jäättyä [23]. Näistä haasteista kerrotaan lisää luvussa 4.2. Voimalan lapojen jäätymisen ehkäisemiseksi tai jään poistamiseksi on tehtävä voimalan rakenteeseen ratkaisuja, jotka poikkeavat muualla maailmassa sijaitsevista voimaloista [25].

Voimalan lapojen jäätymisen estämiseen käytetyt keinot voidaan jakaa kahteen pääryhmään, passiivisiin ja aktiivisiin. Passiivisissa menetelmissä ei käytetä energiaa, kun taas aktiivisissa menetelmissä käytetään voimalan tuottamaa tai ulkoista energiaa jään poistamiseen tai sen muodostumisen estämiseen. [25]

Passiivisia menetelmiä jäätymisen estämiseksi on kolme. Niistä ensimmäinen on lapojen pintojen pinnoittaminen aineella, joka hylkii jäätä tai vettä. Tällaisia pinnoiteaineita on olemassa useita ja niiden tarkoitus on estää jäätä tarttumasta lapojen pintoihin. Toinen passiivinen käytössä oleva jäänestomenetelmä on maalata voimalan lavat mustiksi. Musta väri absorboi enemmän lämpöä auringon säteilystä kuin valkoinen, joten jäätä

muodostuu vähemmän. Tällä menetelmällä saadaan hieman parannettua voimalan tuottoa. Kolmas passiivinen menetelmä on tehdä suunniteltuja toimintakatkoja heti jäätämisen alettua. Voimalan ollessa pysähdyksissä siihen kertyy vähemmän jäätä, jolloin se on helpompi ja nopeampi poistaa. Tämä menetelmä lyhentää hieman aikaa, jonka voimalan on oltava pysähdyksissä jäänpoistoa varten ja täten kasvattaa tuottoa. Tämän lisäksi tämä menetelmä ei vaadi yhtään lisäkustannuksia. [25]

Aktiivisia menetelmiä jään muodostumisen estämiseen tai sen poistoon on olemassa enemmän kuin passiivisia. Aktiiviset menetelmät voidaan jakaa kahteen pääryhmään, mekaanisiin sekä lämmitykseen perustuviin. Mekaanisia menetelmiä käytetään pääsääntöisesti jään poistamiseen, mutta niitä on myös mahdollista soveltaa jään muodostumisen ehkäisemistä varten. Mekaaniset menetelmät perustuvat jään poistamiseen fyysisesti esimerkiksi värinän tai jäähän kohdistetun voiman avulla. Mekaaniset voimat ovat helppo kohdistaa kokonaan jäähän, mikä tekee näistä menetelmistä hyvin energiatehokkaita. Tämä voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Voimalan lapoihin voidaan asentaa paineilmajärjestelmä jään poistamiseksi. Toinen tapa poistaa jäätä on asentaa lapojen sisään käämejä, joiden avulla voidaan luoda sähkömagneettisia pulsseja, jotka aiheuttavat lavan pinnassa värinää irrottaen samalla jään. Tämän lisäksi jään poistoon voidaan käyttää ultraääntä, jonka värähtelyn avulla jää saadaan irrotettua lavoista. [25]

Testatuin menetelmä jään poistamiseksi tai jäätymisen estämiseksi on lapojen lämmittäminen erilaisilla keinoilla. Näitä keinoja on helppo käyttää jäätymisen ehkäisemiseksi pitämällä lapojen lämpötilan veden jäätymispisteen yläpuolella, sekä jään poistamiseen sulattamalla sen. Näistä keinoista ensimmäinen on kuumen ilman kanavointi onttojen voimalan lapojen sisään ja sen kierrättäminen puhaltimen avulla. Toinen lapoja lämmittävä menetelmä on lämpövastuksilla lämmittäminen. Lämpövastukset voidaan asentaa joko lavan sisälle, jolloin se lämmittää lavan sisällä olevaa ilmaa, tai lavan ulkopinnalle. Tämän lisäksi lapoja voidaan lämmittää sähkömagneettisen säteilyn avulla. Tähän voidaan käyttää joko mikroaaltosäteilyä tai infrapunasäteilyä. [25]

Tämän lisäksi on olemassa aktiivinen menetelmä, joka ei estä jään muodostumista tai poista sitä, vaan keskittyy parantamaan voimalan tuottoa. Tätä menetelmää kutsutaan aktiiviseksi kallistuksen hallinnaksi. Lapojen jäätyessä jää muuttaa lavan aerodynaamisia ominaisuuksia. Tässä menetelmässä muutetaan lapojen kulmaa tuuleen nähden siten, että tuulesta saadaan mahdollisimman paljon energiaa. [25]

### 3.2.2 Arktisen tuulivoiman tulevaisuuden näkymät

Maailman asuinalueiden laajentuessa tuulivoiman sijoittaminen arktiselle alueelle, jossa merialueiden tavoin, on huomattavasti enemmän tilaa tuulivoimalle sekä merkittävä määrä tuulivoimapotentiaalia saatavilla, tulee lisääntymään tulevaisuudessa. Alueen kylmä ilmasto aiheuttaa haasteita, mutta tekniikat, joilla kylmyyden aiheuttamia haittoja minimoidaan, kehittyvät nopeaan tahtiin. [23] Tämän takia tuulivoimaa rakennetaan arktiselle alueelle entistä enemmän tulevaisuudessa.

Suomessa Lappi on ollut jo pitkään yksi eniten tuulivoimaa tuottavista maakunnista ja jo kehityksessä olevia hankkeita on niin paljon, että Lappi tulee pitämään asemansa Suomen tuulivoiman tuotannossa. [8] Suhteellisesti muualla maailmassa arktista tuulivoimaa ei ole vielä hyödynnetty niin paljoa kuin Suomessa, mutta myös maailmanlaajuisesti arktisen tuulivoiman määrä on kasvussa [24].

Arktisen tuulivoiman lähitulevaisuudessa tarvitaan useilla eri osa-alueilla lisätutkimusta sekä kehitystä. Tällä hetkellä jäätämisen aiheuttamien tuotantohäviöiden arviointiin käytetään useita eri keinoja, joten niitä ei voida vertailla keskenään. Tämän takia on määritettävä uusia yleisiä standardeja jäätämisen arviointiin sekä tarvittaviin ratkaisuihin. [23]

## 4. TUULIVOIMAN HAASTEET

Tuulivoimalla on maailmanlaajuisesti näkyvässä suuri tulevaisuus, mutta se ei kuitenkaan tapahdu ilman haasteita. Tässä luvussa käsitellään aluksi sellaisia tuulivoiman haasteita, jotka koskevat kaikkea tuulivoimaa. Luvuissa 4.1 ja 4.2 puolestaan käsitellään tarkemmin merituulivoimalle sekä arktiselle tuulivoimalle ominaisia haasteita.

Suurin haaste tuulivoimalla on se, että tuulen vauhti ja suunta voivat vaihdella nopeasti ja melko arvaamattomasti. Tämä aiheuttaa vaikeuksia tuulivoiman tuoton arvioinnin kannalta, sekä huomattavia haasteita suunnitellessa paljon tuulivoimaa sisältävän sähköverkon siirtokapasiteetin tarvetta. [18]

Sähköverkoissa tuotannon ja kulutuksen on oltava tasapainossa. Sähköenergian kulutus vaihtelee jatkuvasti, joten myös tuotannon määrää on säädeltävä koko ajan. Tätä vaikeuttaa se, että tuulivoimalla tuotetun energian määrä on hyvin epäsäännöllistä sekä sitä on vaikea ennustaa tarkasti. Tämä tuotannon epäsäännöllisyys on huomioitava muun energiantuotannon puolella, jotta sähköä saadaan tuotettua kulutusta vastaava määrä. [18]

Tuulivoiman sääriippuvuudesta aiheutuvia haittoja saataisiin vähennettyä varastoimalla tuotettua energiaa tuoton ollessa korkeaa ja varastoitua energiaa voitaisiin puolestaan hyödyntää, kun tuotto on alhaista. Tulevaisuuden ratkaisuna tähän tulee olemaan edellisessä luvussa esitetty Power-to-X, jonka avulla tuulivoimalan tuottama sähkö saadaan hyödynnettyä monissa eri muodoissa. [10]

Generaattori on tuulivoimaloiden rakentamisessa melko pieni osuus voimalan rakennuskustannuksista, mutta sillä on suuri vaikutus tuotetun energian määrään ja täten tuotetun energian hintaan. Tyypilliset tuulivoimaloissa olevat generaattorit eroavat jonkin verran tavanomaisten polttamiseen perustuvien voimaloiden generaattoreista. Tuulivoimaloissa generaattorin pyörimisnopeutta ei saada yhtä suureksi kuin esimerkiksi hiilivoimalassa, joten tuulivoimaloiden generaattoreilla on oltava suurempi vääntömomentti. Tämä tekee tuulivoimaloiden generaattoreista kalliimpia tuotettua energiamäärää kohden. Hiilivoimaloiden generaattoreita pyöritetään yleensä määrättyllä nopeudella, jotta tuotetun sähkön taajuus pysyy vakiona ja tuotettu sähkö voidaan liittää suoraan sähköverkkoon. Puolestaan tuulen nopeuden vaihdellessa, myös generaattorin pyörimisnopeus vaihtelee. Tämän takia tuulivoimaloissa on käytettävä taajuusmuuttajia, mikä myös nostaa hieman tuulivoimalan kokonaishintaa. [26]

Tuulivoimalla on muitakin haasteita. Parhaat tuulivoiman rakennuspaikat sijaitsevat poissa kaupunkialueilta, jossa energiantarve on kaikkein suurin. Vaikka osa tuotetusta sähköstä voidaan myös kuluttaa lähellä tuotantoa, niin ainakin suurempiin tuulipuistoihin on voimaloiden lisäksi rakennettava oma siirtolinjansa, jotta voimalat saadaan liitettyä sähköverkkoon. Tämän lisäksi myös alueella olemassa olevaa sähköverkkoa voidaan joutua rakentamaan uudelleen, jotta siinä olisi riittävästi sähkönsiirtokapasiteettia. [18] Tuulipuistojen sijoittamiseen liittyy myös ympäristöllisiä haasteita, joita käsiteltiin jo hie-  
man luvussa 2.4.

## 4.1 Merituulivoimalle ominaiset haasteet

Merellä sijaitsevien tuulivoimaloiden suurempi koko aiheuttaa suurien osien siirtämisen lisäksi muitakin haasteita. Voimalan suuremmat lavat aiheuttavat koko voimalalle suu-  
remman mekaanisen kuorman. Painovoiman ja tuulen vuoksi voimalan lapoihin kohdis-  
tuu erisuuruiset voimat pyörähdysliikkeen eri puolilla, mikä aiheuttaa voimalassa epäta-  
sapainoa ja suurta mekaanista rasitusta, jotka heikentävät voimalan rakennetta pitkällä  
aikavälillä. Sama ilmiö tapahtuu myös maatuulivoimaloissa, mutta se korostuu merellä  
voimaloiden ollessa suurempia. [26]

Voimaloiden suuremman koon vuoksi myös lapojen kärkien absoluuttinen nopeus on  
suurempi merituulivoimaloissa. Ilmassa olevat erilaiset partikkelit, kuten hiekka tai vesi-  
pisarat hankaavat lapoja aiheuttaen niissä kulumista. Voimalan lapoja suojataan tällai-  
selta eroosiolta tyypillisesti termoplastisella teipillä, joka liimataan lapojen etureunaan.  
Välillä eroosiota pääsee kuitenkin tapahtumaan lavoissa, jolloin lavan aerodynaamiset  
ominaisuudet heikkenevät, rakenteiden kestävyys heikkenee ja lavan korjaaminen vie  
paljon aikaa sekä rahaa. [26]

Yksi suurimmista haasteista merituulivoimalle on voimaloiden säännölliset tarkastukset  
ja huollot. Automatisoidut tai etäyhteydellä toimivat järjestelmät voimalan kunnan tarkas-  
tamiseen ovat hyvin rajallisia tai niitä ei ole ollenkaan, joten voimaloille on tehtävä sään-  
nöllisesti tarkastuksia, jotta esimerkiksi eroosion tai salaman iskun aiheuttamat vauriot  
voimalan rakenteissa huomataan ajoissa ja voidaan korjata. Säännölliseen huoltoon  
puolestaan sisältyy esimerkiksi puhdistamista, lavan etureunan suojateipin vaihto tai la-  
van aerodynamiikkaa parantavia lisäyksiä. Samoja tarkastuksia sekä huoltoja on myös  
tehtävä maatuulivoimaloille, mutta ne koituvat merituulivoimalle ongelmaksi, sillä työ me-  
rellä kaukana rannikosta vaarallisissa olosuhteissa on merkittävästi kalliimpaa ja haas-  
tavampaa, kuin maalla. [26] Kehittämällä ja ottamalla käyttöön järjestelmä, jolla voima-  
loiden kuntoa voidaan monitoroida etäyhteydellä tai automaattisesti, voitaisiin vähentää

säännöllisten tarkastusten määrää ja hoitaa tarvittavat huollot tarpeen mukaan. Täten huolto- ja tarkastuskustannuksia saataisiin vähennettyä.

Tulevaisuudessa merituulivoimaloiden koko on kasvusuunnassa ja niitä rakennetaan kauemmaksi rannikosta. Voimalan koon myötä myös generaattorien koko on kasvussa, jolloin generaattorin rakentamiseen tarvitaan tietenkin enemmän materiaaleja. Tämä voi koitua ongelmaksi, sillä generaattoreissa käytetään joitakin harvinaisia maametalleja, kuten esimerkiksi dysprosiumia, jota käytetään generaattorin kestopagneeteissa. Harvinaisten materiaalin lisääntyvä käyttö saattaa aiheuttaa kyseisen metallin hinnan suuren nousun. Voimaloiden sijaitessa kauempana rannikosta generaattorien luotettavuudesta tulee entistä tärkeämpää, sillä huonot kulkuyhteydet kasvattavat voimalan kunnossapidon kustannuksia. Tämän vuoksi tulevaisuudessa pyritään kehittämään generaattoreita siten, että saadaan vähennettyä vikojen määrää sekä niiden huolto ja korjaaminen on nopeampaa ja halvempaa. [26]

Kelluvalla tuulivoimalla on myös sille ominaisia haasteita. Toisin kuten perustetut tuulivoimalat, kelluvat voimalat heiluvat tuulen ja aaltojen vuoksi aiheuttaen huomattavia eroavaisuuksia koko voimalan luonnollisiin värähtely- ja heilumistaajuuksiin. Tutkimuksen mukaan kelluvat tuulivoimalat kokevat suurempia kuormia ja täten rasitusta lyhentäen voimalan elinikää. Tämän vuoksi kelluvia tuulivoimaloita tulisi rakentaa vahvemiksi kuin perustetut voimalat kasvattaen kelluvien voimaloiden hintaa. Tämän takia kelluvat tuulivoimalat ovatkin edelleen hieman kalliimpia kuin perustetut merituulivoimalat. [26]

Merituulipuistojen liittäminen sähköverkkoon on prosessi, joka sisältää paljon haasteita sekä muuta huomioitavaa. Kaapelointia pidetään myös osa-alueena, jolla voidaan saada alennettua merituulivoiman kokonaishintaa. Tuulipuistoissa voimalat eivät saa sijaita liian lähellä toisiaan, joten puistot levittyvät todella laajoille alueille. Tämän takia osa voimaloista saattaa sijaita melko kaukana ala-asemasta. Tämä on ongelma, sillä tällä välillä olevissa keskijännitekaapeleissa tapahtuu suurimmat jännitehäviöt ja häviöiden määrä kasvaa johdon pidentyessä. Häviöitä voitaisiin pienentää kasvattamalla jännitetasoa voimaloiden ja ala-aseman välillä. Tämä vaatisi suuremman kaapelikoon käyttöä, joten rakennuskustannukset kasvaisivat, mutta voimaloiden koko eliniän aikaista hintaa saataisiin alennettua. [26]

Kaapeloinnin suunnitteleminen ei myöskään ole yksinkertaista. Tyypillisesti lyhin reitti on paras vaihtoehto, mutta on aina otettava huomioon merenpohjan muodot sekä olosuhteet. Tämän lisäksi kaikki tuulipuistot eroavat toisistaan, joten ei ole tiettyä oikeaa tapaa

tehdä suunnitelmia, vaan kaikissa projekteissa on omat olosuhteensa, jotka saattavat aiheuttaa viivästyksiä voimaloiden valmistumisessa. [26]

Merituulivoiman haasteita tutkiessa huomataan, että suurin osa haasteista on sellaisia, jotka kasvattavat voimaloiden hintaa. Tämän takia tuotettua energiaa kohden merituulivoima maksaa edelleen noin 50 % enemmän kuin maatuulivoima [26].

## 4.2 Arktiselle tuulivoimalle ominaiset haasteet

Arktisella alueella eniten haasteita aiheuttaa kylmyys ja sen aiheuttama jäätäminen. Jäätäminen tarkoittaa tuulivoiman yhteydessä voimalan lapojen pintaan kertyvää jäätä. On olemassa kaksi erilaista jäätämistyyppiä, pilvijäätäminen sekä jäätävät sateet. Näistä yleisempi on pilvijäätäminen. Siinä matalalla olevissa pilvissä olevat alijäähtyneet pisarat jäätyvät välittömästi osuessaan voimalan lavan pintaan muodostaen karheen jääkertymän. Jäätävät sateet puolestaan ovat harvinaisempia ja myös niiden aiheuttama haitta tuulivoimaloille on vähäisempi. Jäätävissä sateissa vesipisararat ovat suurempia kuin pilvissä, joten pisarat ehtivät levitä voimalan lavan pinnalle tasaisesti ennen jäätymistä muodostaen sileän jääkerroksen. [27] Voimalan lapojen jäätyminen aiheuttaa haittaa sekä sähköntuotannon kannalta, että voimalan rakenteen keston kannalta [25].

Voimalat, joissa ei ole asennettuna minkäänlaista jäätymisen esto- tai poistomenetelmää, täytyy pysäyttää, kun jäätä on kertynyt liian paljon. Keskeytykset jään poistamiseksi voivat kestää useita päiviä tai jopa viikkoja. Tämä aiheuttaa merkittäviä häviöitä tuotetun sähkö määrässä. [25]

Voimalan lapojen jäätyminen muuttaa lapojen muotoa siten, että niiden aerodynaamiset ominaisuudet heikkenevät merkittävästi. Tämä pienentää voimalan tuulesta ottaman energian määrää ja täten koko voimalan tuottaman sähköenergian määrää. Jos jäätä on kertynyt paljon lapojen pintoihin, voimalan tuottama energia voi vähentyä jopa 50 %. [25]

Tämän lisäksi kertynyt jää kasvattaa lapojen massaa ja täten aiheuttaa suuremman kuorman voimalan rakenteille. Tämä saattaa lyhentää voimalan elinikää, sillä liika kuormitus kuluttaa nopeammin joitakin voimalan komponentteja ja saattaa hajottaa ne. Jää ei yleensä myöskään kerry lapoihin tasaisesti, jolloin voimala ei ole tasapainossa. Tämä aiheuttaa muutoksia voimalan luonnolliseen heilumistaajuuteen mahdollisesti aiheuttaen resonanssia voimalan rakenteissa aiheuttaen suurempia vahinkoja. [25]

Voimalan lapoihin kertynyt jää saattaa aiheuttaa myös turvallisuusriskin. Jää saattaa irrota nopeasti liikkuvista lavoista ja lentää pitkiäkin matkoja. Tätä kutsutaan jäänheitoksi. Tämä voi aiheuttaa vaaratilanteita lähistöllä oleville ihmisille, liikenteelle tai rakennuksille. [25]



Jäätymisen estoon käytetyt passiiviset menetelmät ovat edelleen niin heikkoja, ettei niitä voida käyttää tehokkaasti arktisella alueella. Pinnoiteaineen käyttö on edelleen kehitysvaiheessa ja yhtä tiettyä toimivaa ja halpaa pinnoiteainetta ei ole vielä kehitetty. [25] Testeissä on havaittu lupaaviakin tuloksia, mutta silti pinnoitteet eivät ole kuitenkaan olleet tarpeeksi luotettavia estämään jäätymistä kokonaan etenkin kylmimmillä alueilla [23]. Arktisella alueella on myös talvisin niin kylmä, että lapojen maalaaminen mustaksi -menetelmä ei riitä pitämään jäätä poissa voimalan lavoista. Suunniteltujen toimintakatkosten hyödyt ovat ainakin toistaiseksi melko vähäiset. [25] Nämä kaikki passiiviset menetelmät siis eivät ole vielä niin tehokkaita, että niitä otettaisiin yleiseen käyttöön arktisella alueella. Passiiviset menetelmät voivat toimia sellaisilla alueilla, joissa lämpötila käy pakkasen puolella vain lyhyitä aikoja kerrallaan. [23]

Aktiiviset menetelmät ovat tehokkaita poistamaan jäätä tai ehkäisemään sen muodostumista, mutta niilläkin on paljon omia haasteita. Mekaanisista menetelmistä paineilmaan perustuva menetelmä heikentää hieman lavan aerodynaamisia ominaisuuksia sekä kyseisen paineilmajärjestelmän asentaminen on erittäin haasteellista. Puolestaan jään poistamista ultraäänellä ei ole vielä kunnolla sovellettu tuulivoimaloihin, vaikka se on todettu toimivaksi menetelmäksi esimerkiksi helikopterin lapojen jään poistossa. [23]

Lämmitykseen perustuvista keinoista puolestaan kuumen ilman kierrättäminen lavan sisällä kuluttaa paljon energiaa ja sen tehokkuus heikkenee huomattavasti, kun kyseessä on suurikokoinen voimala ja kun jäätämistä tapahtuu paljon. Lämpövastuksissa käytetty teknologia vahingoittuu helposti salaman osuessa voimalaan, joten vastukset on suojattava salamoilta, mikä kasvattaa lämpövastusten aiheuttamia kustannuksia. Olemassa oleviin voimaloihin ei voida jälkeinpäin asentaa lapojen sisälle lämpövastuksia. Lapojen ulkopinnoille voidaan kiinnittää lämpövastukset liimaamalla, mutta haastavissa olosuhteissa nämä vastukset voivat irrota lavasta aiheuttaen häviöitä tuotannossa sekä korjauskustannuksia. Säteilyn avulla lavan lämmittäminen puolestaan aiheuttaa suuria turvallisuusriskejä. Aktiivisessa kallistuksen hallinnassa haasteeksi muodostuu se, että voimalan lavat eivät jäädy säännöllisesti aina samalla tavalla, joten tämä tapa vaatii merkittävää tuntemusta lapojen aerodynaamisista profiileista. Lisäksi menetelmä ei ota huomioon voimalalle jäästä aiheutuvaa lisäkuormaa. [25]

Kylmyyden aiheuttamat haasteet on siis mahdollista saada erittäin pieniksi, mutta se aiheuttaa merkittäviä lisäkustannuksia. Näiden lisäkustannusten määrää on kuitenkin vaikea laskea yksiselitteisesti. Tämä johtuu siitä, että kylmyydestä aiheutuvat lisäkustannukset ovat riippuvaisia lämpötilasta, joka puolestaan vaihtelee eri alueiden välillä, sekä eri aikoina.

Suurella osalla maailman arktista aluetta sähköverkot eivät ole vielä niin kehittyneitä tai laajoja, että arktisella tuulivoimalla voidaan tuottaa laajamittaisesti energiaa. Esimerkiksi Venäjän pohjoisosissa sekä Alaskassa tuulivoimaa syötetään vain pieniin paikallisiin sähköverkkoihin, jolloin tuulivoimaa tuotetaan vain yksittäisiin kyliin, eikä sitä ole mahdollista siirtää muualle ilman suuria investointeja maanlaajuisiin sähköverkkoihin. Tästä poikkeuksena ovat esimerkiksi Suomi, Ruotsi ja Norja, joissa sähköverkko kattaa koko maan mukaan lukien arktisen alueen. Tämä tarkoittaa sitä, että arktista tuulivoimaa voidaan hyödyntää helposti myös laajana osana maan sähköntuotantoa. [24]

## 5. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin ensin hieman tuulivoimaa yleisesti, jonka jälkeen perehdyttiin tarkemmin merituulivoimaan sekä arktiseen tuulivoimaan. Työn tarkoituksena oli tarkastella merituulivoiman sekä arktisen tuulivoiman tulevaisuutta osana Suomen sekä koko maailman energiantuotantoa. Tämän lisäksi työssä tarkasteltiin niissä esiintyviä haasteita.

Tämän vuosituhanen puolella tuulivoiman tuotantoa on lisätty niin paljon, että siitä on tullut yksi merkittävimmistä energiantuotannon muodoista maailmanlaajuisesti. Ennusteiden mukaan lisäkapasiteetin rakentamista ei olla myöskään hidastamassa, vaan vuosittain rakennettavan tuulivoimakapasiteetin määrä on edelleen kovassa kasvussa. Suomessa tuulivoima saattaa kattaa jopa 25 % koko Suomen sähköntuotannosta vain viiden vuoden kuluttua. Uuden teknologian avulla tuulivoimalla tuotettua energiaa voidaan myös lähitulevaisuudessa varastoida kustannustehokkaasti sekä hyödyntää moniin eri käyttötarkoituksiin.

Maailman tuulivoimapotentiaalista suurin osa sijaitsee merialueilla, mutta silti melko pieni osa maailman kokonaistuulivoimakapasiteetista on merituulivoimaa. Ennusteiden mukaan merituulivoiman osuus on kuitenkin kasvamassa. Kiinnostus merituulivoimaa kohtaan johtuu pääosin paremmista tuuliolosuhteista sekä pienemmästä ihmisille aiheutuvasta haitasta.

Merituulivoima on edelleen kalliimpaa kuin maatuulivoima. Tämä johtuu useasta eri tekijästä merituulivoimalan rakentamisessa sekä toiminnassa. Merellä rajuissa olosuhteissa voimala vaatii suuremmat perustukset sekä vahvemmat rakenteet kuin maalla. Tämän lisäksi merellä vaarallisissa olosuhteissa työskentely kasvattaa merituulivoiman rakennus- sekä kunnossapitokustannuksia. Meri- ja maatuulivoiman hintaero on kuitenkin pienenemässä kehittyvän teknologian vuoksi, joten tulevaisuudessa merituulivoiman osuus tuulivoiman tuotannossa tulee kasvamaan.

Maailman arktisella alueella tuulivoimaa on nykypäivänä melko vaihtelevasti käytössä. Lapissa tuotetaan merkittävä osuus Suomen tuulivoimasta, kun taas esimerkiksi Venäjän ja Kanadan arktisen alueen tuulivoiman tuotanto on hyvin vähäistä. Arktisen alueen viehätys tuulivoiman kannalta johtuu pääosin käytettävissä olevasta tilasta.

Suurin haaste tuulivoimalle arktisella alueella on ilmaston kylmyys, joka aiheuttaa jäätämistä voimalan rakenteissa. Keinoja jäätämisen estämiseksi on kehitetty vasta melko vähän aikaa ja toistaiseksi käytössä olevat menetelmät ovat joko melko kalliita tai eivät

ole tarpeeksi luotettavia. Toinen merkittävä haaste osassa arktista aluetta on harvasta asutuksesta johtuva vähäinen sähköverkon siirtokapasiteetti. Teknologian kehityksen sekä uusien standardien myötä arktisen tuulivoiman hintaa saadaan laskettua lähitulevaisuudessa hyvin lähelle muualla sijaitsevan tuulivoiman hintaa, mikä tulee kasvattamaan yleistä kiinnostusta arktisen tuulivoiman tuottamista kohtaan. Lähitulevaisuudessa arktisen tuulivoiman tuotantokapasiteetti ei kuitenkaan tule kasvamaan suhteellisesti yhtä nopeasti kuin merituulivoiman.

Nykypäivänä siis sekä merituulivoima, että arktinen tuulivoima ovat tavallista maatuulivoimaa kalliimpia. Kuitenkin hintaerot ovat pienenevässä, joten on kannattavaa pyrkiä kehittämään merellä ja arktisella alueella käytettävää teknologiaa sekä toimintamenetelmiä edelleen hinnan alentamiseksi. Merkittävimpiä kehityskohteita hinnan alentamiseksi ovat merituulivoimassa perustukset tai erilaiset kellumismekanismit sekä voimalan luotettavuus. Arktisessa tuulivoimassa puolestaan jäätyminen on saatava estettyä mahdollisimman halvalla, jotta muualla sijaitsevan tuulivoiman kanssa voidaan kilpailla. Vaativissakin olosuhteissa toimiva pinnoiteaine olisi luultavasti paras ratkaisu jäätyksen aiheuttamien lisäkustannusten minimoimiseksi.

# LÄHTEET

- [1] Renewable Energy – Our World in Data, Viitattu 24.1.2022, Saatavissa: <https://ourworldindata.org/renewable-energy#wind-energy-generation>
- [2] Eri voimalatyyppejä, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Viitattu 31.1.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka>
- [3] R. P. Walker, A. Swift, Wind Energy Essentials: Societal, Economic, and Environmental Impacts, Wiley, 2015, s.80-84. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=1895788>
- [4] Sähkötillastot – Energiateollisuus, Energiavuosi 2021, Viitattu 4.2.2022, Saatavissa: <https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot>
- [5] Tuulivoimatilastot 2021: Tuulivoiman rakentamisessa ennätysellinen vuosi, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Viitattu 4.2.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimatilastot-2021-tuulivoiman-rakentamisessa-takana-ennatysellinen-vuosi>
- [6] Ilmatar, Suomen suurin tuulipuisto valmistui Piiparinmäkeen ja tuottaa pian 1% koko maan sähköstä – Ilmatar käynnistää kaksi uutta tuulivoimahanketta Paltamossa, Viitattu 7.2.2022, Saatavissa: <https://www.epressi.com/tiedotteet/energia/suomen-suurin-tuulipuisto-valmistui-piiparinmakeen-ja-tuottaa-pian-1-koko-maan-sahkosta-ilmatar-kaynnistaa-kaksi-uutta-tuulivoimahanketta-paltamossa.html>
- [7] Tuulivoima Suomessa 2021, Suomen Tuulivoimayhdistys ry. Viitattu 27.4.2022, Saatavissa: [https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima\\_vuositilastot\\_2021-1.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot_2021-1.pdf)
- [8] Tuulivoimahankkeet Suomessa, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Viitattu 7.2.2022, Saatavissa: [https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimahankkeet\\_2022.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimahankkeet_2022.pdf)
- [9] Wind energy in Europe – 2020 statistics and outlook for 2021-2025, Feb 2021, WindEurope, Viitattu 23.2.2022, Saatavissa: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2020-statistics-and-the-outlook-for-2021-2025/>
- [10] GWEC, Global wind report 2021, Viitattu 10.4.2022, Saatavissa: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>
- [11] I. C. Gil-García, M. S. García-Cascales , A. Fernández-Guillamón, A. Molina-García, Categorization and Analysis of Relevant Factors for Optimal Locations in Onshore and Offshore Wind Power Plants: A Taxonomic Review, ProQuest, 2019, s.4-13. Saatavissa: <https://www.proquest.com/docview/2548663315/fulltextPDF/E4F1FF6A267A4832PQ/1?accountid=14242>

- [12] Tuulivoiman ympäristövaikutukset 2021, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Viitattu 1.3.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoiman-vaikutukset/tuulivoiman-ymparistovaikutukset>
- [13] Esiselvitys ja sopivan alueen etsintä, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Viitattu 1.3.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/esiselvitys-ja-sopivan-alueen-etsinta>
- [14] Tuulivoimaloiden sijoittelu, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Viitattu 1.3.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/tuulivoimaloiden-sijoittelu>
- [15] A. Sayigh & D. Milborrow, The Age of Wind Energy: Progress and Future Directions from a Global Perspective, Springer, 2020, s.3. Saatavissa: <https://link.springer-com.libproxy.tuni.fi/content/pdf/10.1007%2F978-3-030-26446-8.pdf>
- [16] M. Arshad & B. O’Kelly, Global status of wind power generation: theory, practice, and challenges, Taylor & Francis Group, International Journal of Green Energy, 2019, s.1075. Saatavissa: <https://www-tandfonline-com.libproxy.tuni.fi/doi/pdf/10.1080/15435075.2019.1597369?needAccess=true&>
- [17] J. Lee & F. Zhao, GWEC, Global offshore wind report 2021, Viitattu 4.4.2022, Saatavissa: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/09/GWEC-offshore-wind-2021-updated-1.pdf>
- [18] P. Breeze, Wind power generation. 1st ed. Amsterdam, Netherlands, Academic Press, 2016, s.75-91. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=4082036&ppg=82>
- [19] S. Bhattacharya, Design of Foundations for Offshore Wind Turbines, Wiley, 2019, ch.1. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=5721171>
- [20] S. Bhattacharya, G. Nikitas, S. Jalbi, On the use of scaled model tests for analysis and design of offshore wind turbines, Feb 2018. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/figure/Different-foundations-to-support-offshore-wind-turbines-based-on-water-depths\\_fig5\\_323118519](https://www.researchgate.net/figure/Different-foundations-to-support-offshore-wind-turbines-based-on-water-depths_fig5_323118519)
- [21] A. Mikkonen, Myös Suomen on suunnattava katseensa kohti merituulivoimaa, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Viitattu 4.4.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/myos-suomen-on-suunnattava-katseensa-kohti-merituulivoimaa>
- [22] Arktinen keskus, Lapin yliopisto, Arktinen alue, Perustietoja arktisesta alueesta, Viitattu 27.4.2022, Saatavissa: <https://www.arcticcentre.org/FI/arktinenalue>
- [23] T. Wallenius & V. Lehtomäki, Overview of cold climate wind energy: challenges, solutions, and future needs, WIREs Energy Environ 2016, 5:128–135. Saatavissa: <https://wires-onlinelibrary-wiley-com.libproxy.tuni.fi/doi/pdfdirect/10.1002/wene.170>
- [24] L. Mortensen, A. M. Hansen, A. Shestakov, How three key factors are driving and challenging implementation of renewable energy systems in remote Arctic communities, Polar Geography, 2017, s.165-185. Saatavissa: <https://www-tandfonline-com.libproxy.tuni.fi/doi/full/10.1080/1088937X.2017.1329758>

- [25] O. Fakorede, Z. Feger, H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, C. Masson, Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis, Elsevier, 2016. s.664-672. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.080>
- [26] C. Ng, L. Ran. Offshore Wind Farms - Technologies, Design and Operation, Elsevier, 2016. Saatavissa: <https://app-knovel-com.lib-proxy.tuni.fi/web/view/khtml/show.v/rcid:kpOWFTDO01/cid:kt010VZFR3/viewerType:khtml/?page=last&view=collapsed&zoom=1>
- [27] Jäätäminen, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Viitattu 2.6.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/jaaminen>