

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikka
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

TUULIVOIMALOIDEN NYKYTILANNE JA TULEVAISUUS

Lappeenrannassa 5.5.2021
Juuso Mursu

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Juuso Mursu

Tuulivoimaloiden nykytilanne ja tulevaisuus

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Aki Grönman

Ohjaaja: Tutkijaopettaja Aki Grönman

29 sivua, 17 taulukkoa ja 4 kuvaa

Hakusanat: kandidaatintyö, tuulivoimala, tuulivoima, merituulivoima, maatuulivoima, tuuliluokka, kokoluokka, teknologiset ratkaisut

Tässä kandidaatintyössä esitellään suurimpien tuulivoimavalmistajien tarjoamat tuulivoimalatyypit, kokoluokat ja tuuliluokat käyttäen lähteenä valmistajien omia verkkosivuja. Työssä käsitellään myös, millaisia teknologisia ratkaisuja eri valmistajat ovat kehittäneet voimaloihinsa. Lisäksi selvitetään, millaisia uusia turbiineja eri valmistajilta on tulossa tulevaisuudessa. Vuonna 2020 lisätyn tuulivoimatuotannon perusteella suurimmat tuulivoimavalmistajat ovat Vestas, GE Renewable Energy ja Goldwind. Lisäksi suurin merituulivoimavalmistaja on Siemens Gamesa.

Tuulivoimalat jaetaan vaaka- ja pysty akselisiin voimaloihin. Kaikki tässä työssä käsiteltävät voimalat ovat vaaka-akselisia ja kolmilapaisia. Merituulivoimaloiden nimellistehot ja roottorin halkaisijat ovat suuremmat kuin maatuulivoimaloissa, ja ne ovat myös useimmiten mitoitettu suuremmille tuulennopeuksille. Eri valmistajat ovat pyrkineet omilla teknologisilla ratkaisuilla muun muassa vähentämään voimaloiden melutasoa, vähentämään sähköntuotantokustannuksia ja parantamaan vuotuista energiantuotantoa. Toisaalta tuulivoimaloita pyritään rakentamaan alueille, joissa se ei ole aiemmin ollut mahdollista.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	5
2	NYKYISET TUULIVOIMALAT	7
2.1	Tuulivoimalatyypit	7
2.2	Kokoluokat	8
2.2.1	Siemens Gamesa	8
2.2.2	Vestas	9
2.2.3	Goldwind.....	10
2.2.4	GE Renewable Energy	11
2.3	Tuuliluokat	12
2.3.1	Siemens Gamesa	12
2.3.2	Vestas	13
2.3.3	Goldwind.....	14
2.3.4	GE Renewable Energy	15
2.4	Tuulennopeuden vaikutus voimalan tehoon	16
2.5	Teknologiset ratkaisut	17
2.5.1	Siemens Gamesa	18
2.5.2	Vestas	19
2.5.3	Goldwind.....	19
2.5.4	GE Renewable Energy	20
3	TUULIVOIMALAT TULEVAISUUDESSA	21
3.1	Siemens Gamesa.....	21
3.2	Vestas	21
3.3	Goldwind	21
3.4	GE Renewable Energy	22
3.5	Yhteenveto tulevista tuulivoimalamalleista	22
4	YHTEENVETO	24
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	27
	LÄHTEET	28

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

I turbulenssin intensiteetti

U tuulennopeus m/s

Alaindeksit

ref referenssi

ave keskimääräinen

Lyhenteet

AEP annual energy production

LCOE levelized cost of energy

1 JOHDANTO

Vuoden 2020 aikana tuulivoimatuotanto lisääntyi maailmassa peräti 93 gigawattilla, kun edellisvuonna lisäys oli ollut 61 gigawattia. Kasvu oli hurjinta Kiinassa, jossa uutta tuotantoa lisättiin 52 gigawattia. Yhdysvalloissa tuulivoimatuotanto lisääntyi noin 17 gigawattia. Yhteensä maailmassa oli vuoden 2020 lopussa tuulivoimatuotantoa 744 gigawattia, joka kattaa 7 prosenttia maailman sähkön tarpeesta. Tästä peräti 290 gigawattia tuotetaan Kiinassa, jonka jälkeen toiseksi eniten tuotetaan Yhdysvalloissa, 122 gigawattia, ja kolmanneksi eniten Saksassa, 63 gigawattia. (WWEA 2021)

Tuulivoimavalmistajien kehittäessä uusia teknologioita ja tehokkaampia tuulivoimaloita maailman tuulivoimatuotannon voidaan olettaa jatkavan kasvuaan. Vuoteen 2025 mennessä yli 180 gigawattia maailman tuulivoimatuotannosta tuotetaan vähintään 15 vuotta vanhoilla tuulivoimaloilla (IEA 2020). Vanhoja tuulivoimaloita voidaankin päivittää uusilla teknologioilla ja siten lisätä niiden tuotantokapasiteettia. Koska tarvittava infrastruktuuri ja sähköverkot ovat jo olemassa, investointikustannukset vähenevät ja myös sähkön tuotantohinta pienenee.

Toisaalta tuulivoimaa pyritään lisäämään alueilla, jossa tuotanto on aiemmin koettu mahdottomaksi olosuhteiden tai kuljetuksen hankaluuden vuoksi. Esimerkiksi Tyynellemerelle asennetaan paremmin tuuliolosuhteita kestäviä tuulivoimaloita ja vuoristoalueille suunnitellaan tuulivoimaloita, joiden roottorin lavat kootaan vasta paikan päällä. Tuulivoimatuotantoa pyritään lisäämään myös Afrikassa, jossa epävakaa olosuhteet ja heikko infrastruktuuri ovat hidastaneet tuulivoiman kehitystä (IEA 2020).

Tuulivoiman osuuden lisääntyminen maailman sähköntuotannossa asettaa kuitenkin haasteita. Tuulisuus voi vaihdella päivänkin aikana huomattavasti ja siten tuotantoa on hankala ennustaa, eikä toisaalta sähkön varastointi nykyteknologialla onnistu. Tuulivoima tarvitseekin rinnalleen säätövoimaa, esimerkiksi vesivoimaa ja ydinvoimaa.

Vuonna 2020 lisätyn tuulivoimatuotannon perusteella kolme suurinta tuulivoimavalmistajaa ovat tanskalainen Vestas, yhdysvaltalainen GE Renewable Energy ja kiinalainen Goldwind. Näistä Vestas lisäsi tuotantoa eniten, hieman yli 16 gigawattia. Vielä vuonna 2019 maailman toiseksi suurin tuulivoimavalmistaja oli Siemens Gamesa, joka jäi kuitenkin vuonna 2020 viidennelle sijalle. Kärkikolmikun ja Siemens Gamesan väliin kiilasi kii-

nalainen Envision. Siemens Gamesa kuitenkin toimitti merituulivoimaloita eniten maailmassa. (Global Wind Energy Council, 2021)

Seuraavassa kappaleessa käsitellään Vestasin, GE Renewable Energyn, Goldwindin ja Siemens Gamesan tarjoamia tuulivoimalatyyppejä, kokoluokkia, tuuliluokkia sekä toisistaan eroavia teknologisia ratkaisuja. Lisäksi tarkastellaan Vestasin tarjoamaa tietoa turbiininsa vuotuisesta energiantuotannosta ja Siemens Gamesan samankokoisen turbiinin tehokäyrää. Kolmannessa kappaleessa tehdään katsaus, millaisia tuulivoimaloita edellä mainitut valmistajat ovat suunnitelleet tuovansa markkinoille lähivuosina. Lopuksi kootaan tutkimuksen tärkeimmät tulokset. Työssä hyödynnetyistä informaatiosta valtaosa on saatu valmistajien omilta verkkosivuilta.

2 NYKYISET TUULIVOIMALAT

2.1 Tuulivoimalatyypit

Yleisimmät tuulivoimatuotannossa käytettävät tuulivoimalat, niin maa- kuin merituulivoimalatkin, ovat vaaka-akselisia ja kolmilapaisia (kuva 1). Kaikki tässä kandidaatintyössä käsiteltävät tuulivoimalat ovatkin tyypiltään vaaka-akselisia ja kolmilapaisia. Maatuulivoimaloihin verrattuna merituulivoimaloiden napakorkeus on pienempi, lavat ovat pidemmät ja nimellisteho on suurempi. Vaaka-akselisen voimalan pyyhkäisyala on muodoltaan ympyrä, jonka säde on yhden lavan pituus eli puolet roottorin halkaisijasta. Mitä suurempi pyyhkäisyala on, sitä enemmän tuulen liike-energiasta saadaan talteen. Vaaka-akselisen tuulivoimalan napakorkeus on yhtä kuin roottorin keskikohdan ja maanpinnan välinen etäisyys. Voimalan toimimiseksi roottori on moottorikäyttöisesti käännettävä tuulen suuntaiseksi. (Suomen Tuulivoimayhdistys)



Kuva 1. Vaaka-akselinen, kolmilapainen tuulivoimala Lappeenrannan Skinnarilassa

Pystyakselitiuliturbiinien etuna on, että ne toimivat tuulen suunnasta riippumatta ilman erillistä suuntausta. Niiden käyttö on kuitenkin jäänyt hyvin vähäiseksi teollisessa kokoluokassa, sillä niiden pyyhkäisyypinta-ala ja siten tuulesta saatu energia on pienempi kuin vaaka-akselisissa (Suomen Tuulivoimayhdistys). Pystyakselitiuliturbiineista esimerkkejä ovat Darrieus- ja Savonius-turbiinit.

2.2 Kokoluokat

2.2.1 Siemens Gamesa

Taulukosta 1 nähdään, että Siemens Gamesan maatuulivoimaloiden nimellisteho vaihtelee 2,1 megawatin ja 5,0 megawatin välillä. Pienin roottorin halkaisija, 114 metriä, on SG 2.1-114 ja SG 2.6-114 -malleissa. Näiden voimaloiden nimellistehot ovat 2,1 megawattia ja 2,625 megawattia. Mitä suuremmaksi nimellisteho kasvaa, sitä suurempi myös roottorin halkaisija on. Tosin tällä hetkellä tuotannossa olevista nimellisteholtaan suurimman SG 5.0-145 -mallin roottorin halkaisija on 145 metriä, kun taas SG 4.7-155 -mallin nimellisteho on 4,7 megawattia, mutta roottorin halkaisija peräti 155 metriä.

Taulukko 1. Siemens Gamesan maatuulivoimaloiden nimellistehot ja roottorin halkaisijat (Siemens Gamesa)

Malli	Nimellisteho [MW]	Roottorin halkaisija [m]
SG 2.1-114	2,1	114
SG 2.2-122	2,2	122
SG 2.6-114	2,625	114
SG 2.9-129	2,9	129
SG 3.4-132	3,465	132
SG 3.4-145	3,465	145
SG 4.7-155	4,7	155
SG 5.0-132	5,0	132
SG 5.0-145	5,0	145

Siemens Gamesalla on tällä hetkellä sarjatuotannossa kolme eri merituulivoimalamallia. Näistä kauimmin, vuodesta 2014 saakka, on tuotannossa ollut SWT-6.0-154, jonka nimellisteho on 6,0 megawattia ja roottorin halkaisija 154 metriä. Vuodesta 2017 saakka sarjatuotannossa olleen SWT-7.0-154-merituulivoimalan nimellisteho on 7,0 megawattia ja roottorin halkaisija 154 metriä. Uusimman merituulivoimalan, SG 8.0-167 DD -mallin,

jonka sarjatuotanto aloitettiin vuonna 2019, nimellisteho on 8,0 megawattia ja roottorin halkaisija 167 metriä. (Siemens Gamesa)

Huomataan, että kappaleessa 2.1 tehty vertailu maa- ja merituulivoimaloiden välillä pitää paikkansa. Siemens Gamesan merituulivoimaloista pienimmänkin nimellisteho on suurempi kuin suurimman maatuulivoimalan.

2.2.2 Vestas

Kuten taulukosta 2 nähdään, Vestasin maatuulivoimalat ovat nimellisteholtaan kuudessa eri luokassa. Pienimpien tuulivoimaloiden nimellisteho on 2,0 megawattia ja näiden roottorin halkaisijat ovat joko 90, 100 tai 110 metriä, kun taas 2,2 megawatin tuulivoimalan roottorin halkaisija on 120 metriä ja 3,3 megawatin tuulivoimalan roottorin halkaisija on peräti 155 metriä. 3,45 megawatin tuulivoimaloita on saatavilla viidellä eri roottorin halkaisijalla, joka vaihtelee 105 metristä 136 metriin. Nimellisteholtaan 4,2 megawatin tuulivoimaloiden roottorin halkaisijat ovat 117, 136 tai 150 metriä. Nimellisteholtaan suurimpien EnVentus-voimaloiden roottorin halkaisija on joko 150 metriä tai 162 metriä.

Taulukko 2. Vestasin maatuulivoimaloiden nimellistehot ja roottorin halkaisijat (Vestas)

Malli	Nimellisteho [MW]	Roottorin halkaisija [m]
V90-2.0 MW	2	90
V100-2.0 MW	2	100
V110-2.0 MW	2	110
V120-2.2 MW	2,2	120
V155-3.3 MW	3,3	155
V105-3.45 MW	3,45	105
V112-3.45 MW	3,45	112
V117-3.45 MW	3,45	117
V126-3.45 MW	3,45	126
V136-3.45 MW	3,45	136
V117-4.2 MW	4,2	117
V136-4.2 MW	4,2	136
V150-4.2 MW	4,2	150
EnVentus V150-6.0 MW	6,0	150
EnVentus V162-6.0 MW	6,0	162

Lisäksi Vestasilla on tällä hetkellä kaupallisessa tuotannossa neljä merituulivoimalaa (taulukko 3). Pienimmän merituulivoimalan nimellisteho on 4,2 megawattia ja roottorin halkaisija 117 metriä. Muiden nimellistehot ja roottorin halkaisijat ovat huomattavasti suu-

remmat. Näistä uusimman V174-9.5 MW -merituulivoimalan kaupalliset asennukset alkavat vuonna 2022 (Vestas).

Taulukko 3. Vestasin merituulivoimaloiden nimellistehot ja roottorin halkaisijat

Malli	Nimellisteho [MW]	Roottorin halkaisija [m]
V117-4.2 MW	4,2	117
V164-9.5 MW	9,5	164
V164-10.0 MW	10,0	164
V174-9.5 MW	9,5	174

2.2.3 Goldwind

Taulukosta 4 nähdään, että kiinalaisen Goldwindin tuulivoimaloiden nimellisteho vaihtelee 2,5 megawattista 8,0 megawattiin, ja roottorin halkaisija on pienimmillään 121 metriä ja suurimmillaan 184 metriä. Nimellisteholtaan 2,5–3,0 megawatin tuulivoimalat ovat tarkoitettu vain maatuulivoimatuotantoon, nimellisteholtaan 3,4–4,8 megawatin tuulivoimalat sekä maa- että merituulivoimatuotantoon ja suurimmat 6,45–8,0 megawatin voimalat vain merituulivoimatuotantoon (de Vries 2020).

Taulukko 4. Goldwindin tuulivoimaloiden nimellistehot ja roottorin halkaisijat (Goldwind)

Malli	Nimellisteho [MW]	Roottorin halkaisija [m]
GW121-2.5MW	2,5	121
GW130-2.5MW	2,5	130
GW140-2.5MW	2,5	140
GW150-2.8MW	2,8	150
GW140-3.0MW	3	140
GW150-3.0MW	3	150
GW140-3.4MW	3,4	140
GW140-3.57MW	3,57	140
GW136-4.2MW	4,2	136
GW155-4.5MW	4,5	155
GW136-4.8MW	4,8	136
GW171-6.45MW	6,45	171
GW184-6.45MW	6,45	184
GW154-6.7MW	6,7	154
GW175-8.0MW	8	175

2.2.4 GE Renewable Energy

Taulukkoon 5 on koottu GE Renewable Energyn tarjoamat maatuulivoimalat. 2MW- ja 3MW-luokkaan kuuluvien maatuulivoimaloiden nimellisteho vaihtelee 2,3 megawattista 3,8 megawattiin ja roottorin halkaisija 116 metristä 137 metriin. Kookkaampien Cypress-tuulivoimaloiden nimellistehot ovat 4,8–5,5 megawattia ja roottorin halkaisija 158 metriä.

Taulukko 5. GE Renewable Energyn maatuulivoimaloiden nimellistehot ja roottorin halkaisija (GE Renewable Energy)

Malli	Nimellisteho [MW]	Roottorin halkaisija [m]
2MW-116	2,3–2,7	116
2MW-127	2,5–2,8	127
2MW-132	2,5 tai 2,8	132
3.2-130	3,2	130
3.8-130	3,8	130
3.6-137	3,6	137
Cypress 4.8-158	4,8	158
Cypress 5.3-158	5,3	158
Cypress 5.5-158	5,5	158

Lisäksi GE Renewable Energyllä on markkinoilla toistaiseksi kaksi merituulivoimalaa. Haliade 150-6 MW -merituulivoimalan nimellisteho on 6,0 megawattia ja roottorin halkaisija 150 metriä. Vuoden 2021 lopussa sarjatuotantoon tulevan Haliade-X 12 MW -merituulivoimalan nimellisteho on 12 megawattia ja roottorin halkaisija 220 metriä. (GE Renewable Energy)

2.3 Tuuliluokat

Tuulivoimalan tuuliluokka kertoo, millaisiin tuuliolosuhteisiin voimala on mitoitettu. Taulukossa 6 on esitelty tuuliluokkien mitoitussarvot. Referenssinopeus U_{ref} kuvaa 50 vuoden aikana ilmenevää maksimituulennopeutta ja U_{ave} on vuotuinen keskituulennopeus (Burton et al. 2011, s. 194). I_{ref} on turbulenssin intensiteetti, kun tuulennopeus on 15 m/s (Burton et al. 2011, s. 19). Turbulenssin intensiteetti kuvaa mittausajan aikana esiintyneiden hetkellisten tuulennopeuksien hajonnan ja tuulennopeuden keskiarvon suhdetta (Suomen Tuuliatlas). Alueita, joiden olosuhteet eivät vastaa tuuliluokkia I-III, varten on kehitetty neljäs luokka, S. Valmistaja määrittelee tuuliluokkaan S kuuluvien tuulivoimaloiden parametrit (Burton et al. 2011, s. 194).

Taulukko 6. IEC-61400-1 standardin mukaiset tuuliluokat (Burton et al., 2011)

IEC Tuuliluokat		I	II	III	S
U_{ref}	[m/s]	50	42,5	37,5	Suunnittelijan määrittelemät arvot
U_{ave}	[m/s]	10	8,5	7,5	
A	I_{ref}	0,16			
B	I_{ref}	0,14			
C	I_{ref}	0,12			

Esimerkiksi tuuliluokkaan IA kuuluva tuulivoimala on suunniteltu alueille, joilla sekä vuotuinen keskituulennopeus että turbulenssin intensiteetti ovat suuria. Vastaavasti IIIC-tuuliluokan mukainen tuulivoimala on mitoitettu matalille tuulennopeuksille ja vähäiselle turbulenssin intensiteetille.

2.3.1 Siemens Gamesa

Taulukkoon 7 on koottu Siemens Gamesan maatuulivoimaloiden tuuliluokat. Kun verrataan esimerkiksi 3,4 megawatin tuulivoimaloita, huomataan, että roottorihalkaisijaltaan pienempi SG 3.4-132 on mitoitettu suuremmille tuulennopeuksille kuin roottorihalkaisijaltaan suurempi SG 3.4-145. Tämä johtuu siitä, että saman tehon tuottamiseksi pienemmillä tuulennopeuksilla tarvitaan suurempi pyyhkäisyypinta-ala. Huomataan myös, että nimellisteholtaan likimain samankokoisia tuulivoimaloita on saatavilla niin suurille, keskisuurille kuin pienillekin tuulennopeuksille. Osa Siemens Gamesan maatuulivoimaloista on suunniteltu erityisesti tietyille alueille. Esimerkiksi SG 3.4-145 on mitoitettu Intian tuuliolosuh-

teisiin ja SG 2.9-129 Amerikkaan alueille, jossa tuulennopeudet ovat pieniä tai keskisuuria (Siemens Gamesa).

Taulukko 7. Siemens Gamesan maatuulivoimaloiden tuuliluokat (Siemens Gamesa)

Malli	Tuuliluokka
SG 2.1-114	IIA/IIIA/S
SG 2.2-122	III/S
SG 2.6-114	IA/IIA/S
SG 2.9-129	S
SG 3.4-132	IA/IIA
SG 3.4-145	III/S
SG 4.7-155	IIIB
SG 5.0-132	IA
SG 5.0-145	IIB

Kaikkien Siemens Gamesan merituulivoimaloiden tuuliluokka on I/S (Siemens Gamesa), sillä merellä tuulennopeus on suurempi kuin maalla.

2.3.2 Vestas

Taulukossa 8 on koottuna Vestasin maatuulivoimaloiden tuuliluokat. Nimellisteholtaan pienimpiä kahden megawatin tuulivoimaloita on saatavilla vain pienille ja keskisuurille tuulennopeuksille. Sen sijaan kolmen ja neljän megawatin tuulivoimaloita on kaikille tuulennopeuksille. Useat tuulivoimalat on mitoitettu joko suuremmalle tuulennopeudelle ja keskisuurelle turbulenssin intensiteetille tai pienemmälle tuulennopeudelle ja suurelle turbulenssin intensiteetille. Lisäksi Vestasin V117-4.2 MW on mitoitettu toimimaan myös taifuuniolosuhteissa, mistä kertoo tuuliluokan perässä oleva T-kirjain. Taifuuniolosuhteissa turbulenssin intensiteetti voi olla suurempi kuin luokalle A määritelty arvo (Vestas).

Tuuliluokkaan S kuuluvista tuulivoimaloista V155-3.3 MW on suunniteltu pienille ja erityyppisille pienille tuulennopeuksille. EnVentus V150-6.0 MW on suunniteltu keskisuurille ja suurille tuulennopeuksille sekä suurelle turbulenssin intensiteetille. EnVentus V162-6.0 MW on puolestaan suunniteltu pienille ja keskisuurille tuulennopeuksille, mutta sitä on mahdollista käyttää myös suurilla tuulennopeuksilla. (Vestas)

Taulukko 8. Vestasin maatuulivoimaloiden tuuliluokat (Vestas)

Malli	Tuuliluokka
V90-2.0 MW	IIA/S
V100-2.0 MW	IIB
V110-2.0 MW	IIIA
V120-2.2 MW	IIB/S
V155-3.3 MW	S
V105-3.45 MW	IA
V112-3.45 MW	IA
V117-3.45 MW	IB/IIA
V126-3.45 MW	IIA/IIB
V136-3.45 MW	IIIA/IIB
V117-4.2 MW	IB-T/IIA-T/S-T
V136-4.2 MW	IIB/S
V150-4.2 MW	IIIB
EnVentus V150-6.0 MW	S
EnVentus V162-6.0 MW	S

Taulukosta 9 nähdään, että Vestasin merituulivoimaloista nimellisteholtaan pienin on mitoitettu suurelle tuulennopeudelle, mutta keskisuurelle turbulenssin intensiteetille, tai keskisuurelle tuulennopeudelle, mutta suurelle turbulenssin intensiteetille. Lisäksi edellä mainittu merituulivoimala on V164-10.0 MW ja V174-9.5 MW -merituulivoimaloiden tapaan mitoitettu kestävämyös taifuuniolosuhteita. Siten Vestasin merituulivoimaloita voidaan asentaa myös Tyynenmeren alueelle, jossa esiintyy paljon taifuuneja.

Taulukko 9. Vestasin merituulivoimaloiden tuuliluokat (Vestas)

Malli	Tuuliluokka
V117-4.2 MW	IB-T/IIA-T/S-T
V164-9.5 MW	S
V164-10.0 MW	S/S-T
V174-9.5 MW	IB/IB-T

2.3.3 Goldwind

Taulukkoon 10 on koottu Goldwindin tuulivoimaloiden tuuliluokat. Vain maatuulivoimatuotantoon tarkoitettujen nimellisteholtaan 2,5–3,0 megawatin tuulivoimalat on mitoitettu keskisuurille ja pienille tuulennopeuksille (Goldwind) samoin kuin keskikokoiset 3,4–4,8 megawatin tuulivoimalat, jotka soveltuvat sekä maa- että merituulivoimatuotantoon. Suurimmat 6,45–8,0 megawatin merituulivoimalat kuuluvat tuuliluokkaan S, jonka parametrit ovat suunnittelijan määräämiä. Esimerkiksi GW154-6.7MW on suunniteltu toimimaan tai-

fuuniolosuhteissakin (Goldwind), jossa tuulennopeus on suurempi kuin tuuliluokan I määrittelemä arvo. GW171-6.45MW on puolestaan suunniteltu toimimaan kaikilla tuulennopeuksilla ja myös taifuuniolosuhteissa.

Taulukko 10. Goldwindin tuulivoimaloiden tuuliluokat (Goldwind)

Malli	Tuuliluokka
GW121-2.5MW	IIA
GW130-2.5MW	S
GW140-2.5MW	S
GW150-2.8MW	S
GW140-3.0MW	S
GW150-3.0MW	S
GW140-3.4MW	IIIA/IIIB
GW140-3.57MW	IIIB
GW136-4.2MW	IIA
GW155-4.5MW	IIIB/S
GW136-4.8MW	IIB
GW171-6.45MW	S
GW184-6.45MW	S
GW154-6.7MW	S
GW175-8.0MW	S

2.3.4 GE Renewable Energy

Taulukkoon 11 on koottu GE Renewable Energyn maatuulivoimaloiden tuuliluokat. Huomataan, että kahden ja kolmen megawatin tuulivoimalat on mitoitettu keskisuurille ja pienille tuulennopeuksille. Cypress-tuulivoimalat puolestaan soveltuvat laajalle skaalalle tuuliolosuhteita (GE Renewable Energy).

Taulukko 11. GE Renewable Energy'n maatuulivoimaloiden tuuliluokat (GE Renewable Energy)

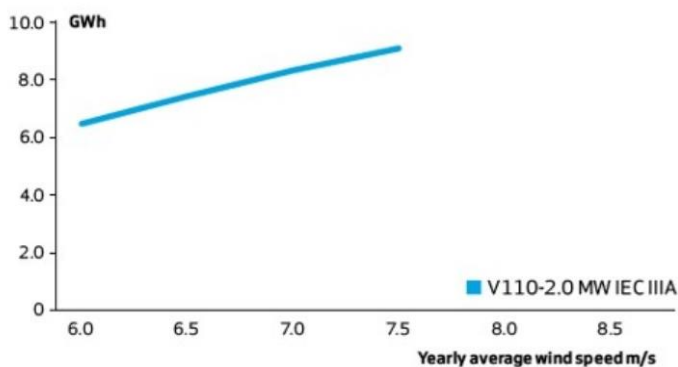
Malli	Tuuliluokka
2MW-116	II/III/S
2MW-127	II/III/S
2MW-132	S
3.2-130	IIB/IIIA
3.8-130	IIB/IIIA
3.6-137	IIIB
Cypress 4.8-158	S
Cypress 5.3-158	S
Cypress 5.5-158	S

GE Renewable Energy'n molemmat merituulivoimalat kuuluvat tuuliluokkaan IB, joten ne on mitoitettu alueille, joissa tuulennopeus on suuri ja turbulenssin intensiteetti keski-suuri.

2.4 Tuulennopeuden vaikutus voimalan tehoon

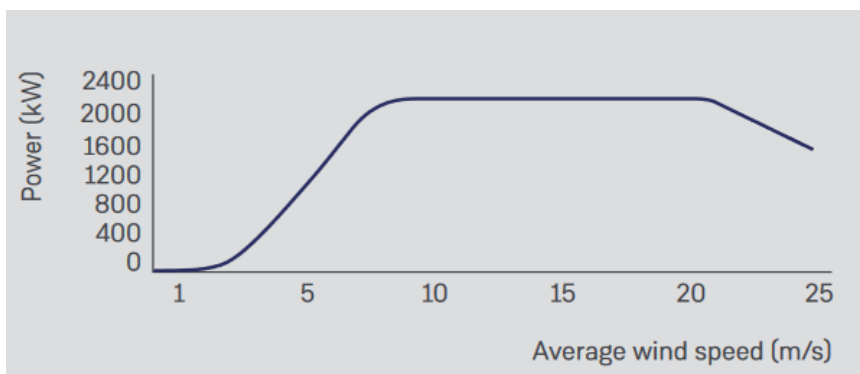
Kuvassa 2 nähdään Vestasin V110-2.0MW -maatuulivoimalan vuotuinen energiantuotanto vuotuisen keskituulennopeuden funktiona. Kyseinen tuulivoimala kuuluu tuuliluokkaan IIIA, joten se on suunniteltu alueille, jossa vuotuinen keskituulennopeus on noin 7,5 m/s. Kun keskituulennopeus voimalan sijaintipaikalla on 7,5 m/s, voimalan vuotuinen energiantuotanto on noin 9 gigawattituntia. Vastaavasti keskituulennopeuden ollessa 6,0 m/s, vuotuinen energiantuotanto jää noin 6,5 gigawattituntiin.

Voimalan vuotuinen huipunkäyttöaika kuvaa aikaa, joka kuluu vuodessa tuotetun energian tuottamiseen, jos se tuottaisi energiaa koko ajan nimellistehollaan (Suomen Tuulivoimayhdistys). Edellämainituista tilanteista ensimmäisessä huipunkäyttöaika olisi 4500 tuntia ja jälkimmäisessä 3200 tuntia.

**Kuva 1.** Vestasin V110-2.0MW -maatuulivoimalan vuotuinen energiantuotanto (Vestas)

Kuvassa 3 puolestaan on esitetty Siemens Gamesan SG 2.1-114 -maatuulivoimalan tehokäyrä. Tehokäyrästä voidaan arvioida, kuinka paljon tuulivoimala tuottaa eri tuulennopeuksilla (Suomen Tuulivoimayhdistys). Kyseinen tuulivoimala kuuluu tuuliluokkaan IIA/IIIA/S (taulukko 7), joten se on suunniteltu alueille, joiden vuotuinen keskituulennopeus on joko 7,5 m/s tai 8,5 m/s.

Tehokäyrästä huomataan, että voimalan käynnistymistuulennopeus on noin 2 m/s. Käynnistymistuulennopeudella (cut-in wind speed) tarkoitetaan tuulennopeutta, jolla generaattori alkaa tuottaa sähköä (Suomen Tuulivoimayhdistys). Kun tuulennopeus saavuttaa 7,5 m/s, tuottaa voimala nimellistehonsa mukaisen tehon, 2,1 megawattia. Tämän jälkeen tuulennopeuden kasvaessa voimalan teho ei enää kasva. Tuulennopeuden saavuttaessa 20 m/s alkaa voimalan teho laskea, sillä roottorin pyörimisnopeutta vähennetään muuttamalla roottorin lapojen asentoa, jotta liian kova tuuli ei vahingoittaisi voimalaa. Tätä tuulennopeutta kutsutaan pysäytystuulennopeudeksi (cut-out wind speed).



Kuva 2. Siemens Gamesan SG 2.1-114 -maatuulivoimalan tehokäyrä

2.5 Teknologiset ratkaisut

Pääpiirteittäin teollisen kokoluokan tuulivoimatuotannossa käytettävät voimalat ovat hyvin samankaltaisia. Eri valmistajat ovat kuitenkin kehittäneet omia teknologisia ratkaisuja esimerkiksi hyötysuhteen parantamiseksi ja tuotantokustannusten alentamiseksi. Tuotantokustannukset määritellään yleisesti LCOE-menetelmällä (levelized cost of energy), jossa voimalan koko elinkaaren aikaiset kustannukset jaetaan tuotetun sähkön määrällä (Suomen Tuulivoimayhdistys). LCOE-menetelmän ansiosta eri sähköntuottamiskeinojen vertailu on helpompaa. Tuulivoimatuotantoa myös pyritään lisäämään alueilla, jossa se on koettu

aiemmin mahdottomaksi olosuhteiden tai kuljetusmahdollisuuksien vuoksi. Lisäksi tuuli- ja aurinkoenergiantuotanto on hyvin sääriippuvainen, minkä vuoksi sähköverkon stabiiliuden varmistamiseksi verkkokoodit asettavat tuotantolaitoksille erilaisia vaatimuksia.

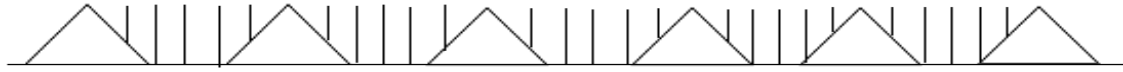
Vuonna 2019 maatuulivoiman LCOE-menetelmällä laskettu tuotantohinta oli 37 \$/MWh ja merituulivoimalle, joka on asennettu kiinteästi meren pohjaan, 85 \$/MWh. Maatuulivoiman hinnasta noin puolet (17,5 \$/MWh) muodostuu turbiinin kustannuksista ja kolmasosa käyttö- ja huoltokustannuksista (11,6 \$/MWh). Merituulivoiman hinnasta vain viidesosa (17,9 \$/MWh) muodostuu turbiinin kustannuksista, mutta kolmasosa käyttö- ja huoltokustannuksista (29,2 \$/MWh) ja saman verran muun muassa perustuksen ja muun infrastruktuurin kustannuksista. (Stehly et al., 2019) Tuulivoimavalmistajat ovatkin pyrkineet vähentämään merituulivoimaloiden huoltokustannuksia. Tämän vuoksi merituulivoimalat ovat pääasiassa suorakäyttöisiä (direct drive), kun taas maatuulivoimaloissa hyödynnetään voimansiirtoa (geared). Suorakäyttöisyyden ansiosta kuluvien osien määrä pienenee, jolloin huoltoväli kasvaa ja huoltaminen on myös helpompaa.

2.5.1 Siemens Gamesa

Siemens Gamesan tarjoamissa 3–5 megawatin maatuulivoimaloissa on OptimaFlex-ominaisuus. Tämä tarkoittaa, ettei voimalaa suunnitella haastavimpien mahdollisten olosuhteiden mukaiseksi, vaan voimalan ominaisuudet voidaan muokata asiakkaan tarpeen mukaiseksi. Esimerkiksi tuulivoimalan tornia ei ylimitoiteta kestäämään äärimmäisiä tuulennopeuksia, vaan juuri kyseisen alueen tuuliolosuhteita. Tällä pystytään vähentämään materiaalikustannuksia. Tuulivoimalan napakorkeudelle voi olla rajoitteena esimerkiksi paikallinen lainsäädäntö tai maastonmuodot, mutta OptimaFlex mahdollistaa napakorkeuden valitsemisen juuri sijaintipaikalle sopivaksi. Toisaalta OptimaFlexillä varustetut turbiinit pystyvät sopeutumaan tuuliolosuhteiden muutoksiin ovatpa ne pysyviä tai hetkellisiä. Pysyvä muutos tuuliolosuhteisiin voi syntyä esimerkiksi metsien hakkuusta, ja vastaavasti hetkellinen muutos vuodenaikojen vaihtelusta. OptimaFlexin ominaisuudet lisäävät myös sähköverkon stabiiliutta ja parantavat sen toimintaa. (Siemens Gamesa)

Melurajoitukset aiheuttavat myös haasteen tuulivoimapuistojen sijoittelulle. Tähän haasteeseen Siemens Gamesa on kehittänyt roottorin lapoihin aerodynaamisen lisäosan, Dino-Tails® Next Generationin (kuva 4). Hammastetuilla jättöreunoilla ja hampaiden välissä

olevilla pienillä kammoilla voidaan vähentää melutasoa niin, ettei vuotuinen energiantuotanto laske tai sähkön tuotantohinta nouse. (Siemens Gamesa).



Kuva 4. Havainnekuva roottorin lavan jättöreunasta

2.5.2 Vestas

Vestasin useimmat merituulivoimalat on mitoitettu myös taifuuniolosuhteisiin, jolloin voimaloita on mahdollisuus asentaa Tyynenmeren alueelle. Esimerkiksi Japanissa tuuli-voimapotentialiaali on hyvin suurta ja ydinvoimasta luopumisen jälkeen Japanin energiantuotanto on ollut hyvin vahvasti fossiilisten polttoaineiden varassa. Alueen tuuliolosuhteet voivat kuitenkin olla ajoittain erittäinkin rajut, mikä aiheuttaa haasteen tuulivoimalan rakenteiden kestolle. Vestasin merituulivoimaloiden rakenteet onkin suunniteltu kestämään 57 m/s tuulennopeuksia ja jopa sitä kovempia puuskia. Kun tuulennopeus ylittää 30 m/s, roottorin lavat kääntyvät asentoon, joka hidastaa roottorin pyörimistä. Tällöin voimala lakkaa tuottamasta sähköä, mutta tuottaa kuitenkin riittävästi tehoa pitääkseen tärkeät turvallisuusjärjestelmät toiminnassa. (Wood 2020)

Lisäksi Vestasin High Wind Operation -säätöjärjestelmä mahdollistaa turbiinin toimimisen myös pysäytystuulennopeutta (cut-out wind speed) suuremmilla tuulennopeuksilla. Tällöin turbiinin energiantuotanto pienenee tuulennopeuden kasvaessa. HWO-säätöjärjestelmän avulla on mahdollista parantaa vuotuista energiantuotantoa sekä sähköverkon stabiiliutta. Kyseinen ominaisuus on saatavilla ainakin V136-4.2 MW, V136-3.45 MW, V126-3.45 MW, V117-4.2 MW, V117-3.45 MW, V112-3.45 MW, V105-3.45 MW ja V110-2.0 MW -tuulivoimaloihin. (Vestas)

2.5.3 Goldwind

Myös kiinalaisen Goldwindin tuulivoimaloissa on otettu huomioon Tyynenmeren ja siten myös esimerkiksi Kiinan rannikkoalueiden tuuliolosuhteet. Useimmat tuulivoimalat on mi-

toitettu taifuuniolosuhteisiin, niiden rakenteet kestävät jopa noin 80 m/s tuulennopeutta ja tuottavat sähköä jopa 35 m/s tuulennopeuteen asti. (Goldwind)

Lisäksi Goldwind on kehittänyt erilaisia teknologioita energiantuotannon parantamiseen. Esimerkiksi GW154-6.7MW-tuulivoimalan roottorin lavoissa on pyörteensynnyttäjät (vortex generator), joilla voidaan tehokkaasti erottaa rajakerrokset ja siten lisätä energiantuotantoa. GW175-8.0MW-tuulivoimalassa puolestaan voimalan omaa energiankulutusta pyritään vähentämään E-top-muotoilulla, ja tuulisille merialueille suunniteltu joustava tehonsäätöjärjestelmä, E-plus, parantaa turbiinin energiantuottoa. GW184-6.45MW-mallin HQ-siipiprofiili parantaa nosteen suhdetta vastukseen (lift-to-drag ratio) 30 prosentilla tavanomaiseen DU-siipiprofiiliin verrattuna, jolloin myös hyötysuhde paranee kaksi prosenttia. (Goldwind)

2.5.4 GE Renewable Energy

GE Renewable Energyn Cypress-tuulivoimaloissa on kaksiosainen lapa, jonka osat liitetään yhteen tuulivoimalan sijaintipaikalla. Tällä mahdollistetaan suuremmat roottorihalkaisijat ja myös kuljetus vaikeampiin sijainteihin helpottuu. Suuremman roottorihalkaisijan ansiosta vuotuinen energiantuotto kasvaa ja sähköntuotantohinta pienenee. (GE Renewable Energy)

3 TUULIVOIMALAT TULEVAISUUDESSA

3.1 Siemens Gamesa

Siemens Gamesan uusimpien maatuulivoimaloiden ensimmäiset prototyypit on tarkoitus ottaa käyttöön alkuvuodesta 2021. SG 5.8-155 on nimellistehoaltaan 5,8 megawattia, roottorin halkaisija on 155 metriä ja se on tarkoitettu suurille ja keskisuurille tuulennepeuksille. Nimellistehoaltaan yhtä suuri SG 5.8-170 on vastaavasti 170-metrinen roottorinsa myötä mitoitettu keskisuurille ja pienille tuulennepeuksille. (Siemens Gamesa)

Siemens Gamesan tarjoamien merituulivoimaloiden nimellisteho on tulevaisuudessa kasvamassa. Vuonna 2022 sarjatuotantoon tulevan SG 11.0-200 DD:n nimellisteho on 11,0 megawattia ja vuonna 2024 sarjatuotantoon tulevan SG 14-222 DD:n nimellisteho 14,0 megawattia. Molemmat merituulivoimalat on mitoitettu suurille tuulennepeuksille. (Siemens Gamesa)

3.2 Vestas

Ennen kuin GE Renewable Energy toi markkinoille Haliade-X-merituulivoimalansa, Vestas tarjosi markkinoiden suurimmat merituulivoimalat. Palauttaakseen asemansa Vestasilla on suunnitelmassa aloittaa vuonna 2024 V236-15.0 MW –tuulivoimalan sarjatuotanto. Voimalan nimellisteho olisi 15,0 megawattia ja roottorin halkaisija 236 metriä, sekin ylivoimaisesti markkinoiden suurin. Kyseinen merituulivoimala on mitoitettu suurille tuulennepeuksille ja jopa taifuuniolosuhteisiin. (Vestas)

3.3 Goldwind

Muihin suuriin tuulivoimavalmistajiin verrattuna Goldwind ei ole tavoitellut uusien tuulivoimaloidensa kohdalla mahdollisimman suuria nimellistehoja. Sekä GW165-4.0MW että GW165-5.0MW ovat suunniteltu sekä maa- että tuulivoimatuotantoon. Näistä ensimmäisen prototyypin otettiin käyttöön joulukuussa 2020. Sen nimellisteho on 4,0 megawattia ja roottorin halkaisija 165 metriä, ja se on suunniteltu pienille ja keskisuurille tuulennepeuksille. Jälkimmäisen nimellisteho on yli 5,0 megawattia ja roottorin halkaisija 165 metriä, ja se on suunniteltu keskisuurille ja suurille tuulennepeuksille. (de Vries 2020)

3.4 GE Renewable Energy

GE Renewable Energyn Cypress-tuulivoimaloiden uusin malli, Cypress 6.0-164, on tulossa sarjatuotantoon vuonna 2022. Sen nimellisteho on 6,0 megawattia ja roottorin halkaisija 164 metriä, mikä tekee siitä GE:n suurimman maatuulivoimalan niin nimellistehonsa kuin roottorin halkaisijansa perusteella. Kuten aiemmatkin Cypress-tuulivoimalat, myös tämä on suunniteltu kattamaan kaikki tuulennopeudet. (GE Renewable Energy)

GE Renewable Energyn Haliade-X-merituulivoimaloiden uusista malleista vuonna 2023 sarjatuotantoon on tulossa voimala, jonka nimellisteho on 13 megawattia ja roottorin halkaisija 220 metriä. Vuonna 2026 sarjatuotantoon tulevan voimalan nimellisteho puolestaan on 14 megawattia ja roottorin halkaisija myös 220 metriä. Molempien tuuliluokka on IC, mikä tarkoittaa, etteivät voimalat sovellu alueille, jossa turbulenssin intensiteetti on suuri. (GE Renewable Energy)

3.5 Yhteenveto tulevista tuulivoimalamalleista

Taulukkoon 12 on koottu kaikki uudet maatuulivoimalamallit, jotka tässä työssä käsitellyt valmistajat ovat vuoden 2021 alkuun mennessä julkaisseet, ja taulukkoon 13 uudet merituulivoimalamallit. Goldwindiä lukuun ottamatta valmistajat ovat pyrkineet mahdollisimman suuriin nimellistehoihin, sillä markkinoille tullessaan kyseiset voimalat ovat valmistajiensa suurimmat. Myös roottorien halkaisijat ovat pääasiassa suurempia kuin nykyisten voimaloiden roottorien halkaisijat. Uusia maatuulivoimaloita on saatavilla kaikille tuulennopeuksille, kun taas merituulivoimalat on pääasiassa mitoitettu tuuliluokkaan I soveltuviksi.

Taulukko 12. Eri valmistajien uudet maatuulivoimalamallit

Valmistaja	Malli	Nimellisteho	Roottorin halkaisija	Tuuliluokka
GE Renewable Energy	Cypress 6.0-164	6,0	164	S
Siemens Gamesa	SG 5.8-155	5,8	155	I, II
Siemens Gamesa	SG 5.8-170	5,8	170	II, III
Goldwind	GW165-5.XMW	yli 5,0	165	I, III
Goldwind	GW165-4.0MW	4,0	165	II, III

Taulukko 13. Eri valmistajien uudet merituulivoimalamallit

Valmistaja	Malli	Nimellisteho	Roottorin halkaisija	Tuuliluokka
Vestas	V236-15.0 MW	15	236	I-T
Siemens Gamesa	SG 14-222 DD	14	222	I
GE Renewable Energy	Haliade-X 14 MW	14	220	IC
GE Renewable Energy	Haliade-X 13 MW	13	220	IC
Siemens Gamesa	SG 11.0-200 DD	11	200	I
Goldwind	GW165-5.XMW	yli 5,0	165	I, II
Goldwind	GW165-4.0MW	4,0	165	II, III

4 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin maailman kolmen suurimman tuulivoimavalmistajan, Vestasin, GE Renewable Energyn ja Goldwindin, sekä maailman suurimman merituulivoimavalmistajan, Siemens Gamesan, tuulivoimalamalleja, niiden kokoluokkia, tuuliluokkia ja teknologioita ratkaisuja. Lisäksi selvitettiin, millaisia turbiineja suuret valmistajat ovat tulevaisuudessa tuomassa markkinoille.

Taulukkoon 14 on koottu jokaisen tässä työssä käsitellyn tuulivoimavalmistajan nimellistehonsa perusteella suurimmat maatuulivoimalat. Eri valmistajien voimaloiden nimellistehoja vertailtaessa huomataan, että tällä hetkellä suurimmat maatuulivoimalat ovat Vestasin 6,0 megawatin nimellistehoiset EnVentus-voimalat. Jokaiselta valmistajalta löytyy kuitenkin nimellisteholtaan laaja valikoima maatuulivoimaloita aina kahdesta megawatista noin viiteen megawattiin.

Taulukko 14. Eri valmistajien suurimmat maatuulivoimalat nimellistehon perusteella

Valmistaja	Malli	Nimellisteho [MW]
Vestas	V162-6.0 MW	6,0
GE Renewable Energy	Cypress 5.5-158	5,5
Siemens Gamesa	SG 5.0-145	5,0
Goldwind	GW136-4.8MW	4,8

Vuoden 2021 alkuun mennessä julkaistuista uusista tuulivoimalamalleista (taulukko 12) voidaan huomata, että Siemens Gamesa ja GE Renewable Energy pyrkivät kasvattamaan voimaloidensa nimellistehoa. Goldwind sen sijaan keskittyy sähköntuotantohinnan alentamiseen päivitettyjä teknologioita hyödyntäen (de Vries 2020).

Taulukkoon 15 on koottu tässä työssä käsiteltyjen tuulivoimavalmistajien nimellistehonsa perusteella suurimmat merituulivoimalat. Tällä hetkellä markkinoilla olevista merituulivoimaloista suurin nimellisteholtaan on puolestaan GE Renewable Energyn Haliade-X 12 MW. Muiden merituulivoimaloiden nimellistehot vaihtelevat hieman yli kolmesta megawatista kymmeneen megawattiin. Laajin valikoima merituulivoimaloita on Goldwindillä, jonka voimaloiden nimellisteho on pienimmillään 3,4 megawattia ja suurimmillaan 8,0 megawattia.

Taulukko 15. Eri valmistajien suurimmat merituulivoimalat nimellistehon perusteella

Valmistaja	Malli	Nimellisteho [MW]
GE Renewable Energy	Haliade-X 12 MW	12,0
Vestas	V164-10.0 MW	10,0
Siemens Gamesa	SG 8.0-167 DD	8,0
Goldwind	GW175-8.0MW	8,0

Tulevaisuudessa GE Renewable Energyltä ovat tulossa nimellisteholtaan 13 ja 14 megawatin merituulivoimalat, ja Siemens Gamesalta 11 ja 14 megawatin merituulivoimalat, mutta Vestasilta peräti 15 megawatin merituulivoimala. Merituulivoiman potentiaali onkin huomattavan suuri, ja sen osuuden maailman sähköntuotannosta voidaan olettaa kasvavan seuraavan 10 vuoden aikana.

Taulukkoon 16 on koottu eri valmistajien roottorihalkaisijan perusteella suurimmat maatuulivoimalat. Roottorihalkaisijoiltaan sekä pienin että suurin maatuulivoimala ovat Vestasin. V90-2.0 MW -maatuulivoimalan roottorihalkaisija on vain 90 metriä ja EnVentus V162-6.0 MW -maatuulivoimalan roottorihalkaisija on 162 metriä. Pieni roottorihalkaisija mahdollistaa kuljetukset myös hankalampiin sijainteihin.

Taulukko 16. Eri valmistajien suurimmat maatuulivoimalat roottorin halkaisijan perusteella

Valmistaja	Malli	Roottorin halkaisija [m]
Vestas	V162-6.0 MW	162
GE Renewable Energy	Cypress 5.5-158	158
Siemens Gamesa	SG 4.7-155	155
Goldwind	GW155-4.5MW	155

Taulukkoon 17 on puolestaan koottu eri valmistajien roottorihalkaisijan perusteella suurimmat merituulivoimalat. Merituulivoimaloiden roottorihalkaisijat vaihtelevat Goldwindin GW140-3.4MW -mallin 140 metristä GE Renewable Energyn Haliade-X 12 MW -mallin 220 metriin.

Taulukko 17. Eri valmistajien suurimmat merituulivoimalat roottorin halkaisijan perusteella

Valmistaja	Malli	Roottorin halkaisija [m]
GE Renewable Energy	Haliade-X 12 MW	220
Goldwind	GW184-6.45MW	184
Vestas	V174-9.5 MW	174
Siemens Gamesa	SG 8.0-167 DD	167

Tulevaisuudessa markkinoille tulevien (taulukot 12 ja 13) sekä maa- että merituulivoimaloiden roottorihalkaisijat kasvavat entisestään mahdollistaen suuremman tehontuoton pienemmälläkin tuulilla. Kaikkien vuoden 2021 alkuun mennessä julkaistujen uusien merituulivoimaloiden roottorin halkaisija ylittää 200 metriä. Maatuulivoimaloistakin Siemens Gamesan SG 5.8-155 -mallia lukuun ottamatta kaikkien roottorin halkaisija on suurempi kuin nykyinen suurin halkaisija, 162 metriä.

Suurien valmistajien tarjoamia tuuliluokkia vertailtaessa huomataan, että roottorihalkaisijaltaan suuremmat tuulivoimalat on tarkoitettu pienemmille tuulennopeuksille ja vastavasti pienemmät roottorihalkaisijat suuremmille tuulennopeuksille. Lähtökohtaisesti kaikilta valmistajilta on saatavilla jokaiseen tuuliluokkaan soveltuvia erikokoisia tuulivoimaloita. Tosin Goldwindin ja GE Renewable Energyn (taulukot 10 ja 11) maatuulivoimaloista yksikään ei kuulu tuuliluokkaan I, mutta osa tuuliluokkaan S kuuluvista tuulivoimaloista voi olla käytettävissä myös suurilla tuulennopeuksilla. Suuret valmistajat pyrkivätkin suunnittelemaan voimalansa ensisijaisesti sen sijaintipaikan olosuhteiden mukaan. Monien voimaloiden parametrien valinnat on myös tehty suurien markkina-alueiden, kuten Intian, Pohjois-Amerikan ja Tyynenmeren alueen, mukaisiksi.

Jotta tuulivoimatuotannon osuus maailman sähköntuotannosta pystyy jatkamaan kasvuaan, vanhoja tuulivoimaloita täytyy päivittää uusien teknologioiden mukaisiksi ja tuulivoimapaistoja pyritään rakentamaan alueille, joissa se ei aiemmin ole ollut mahdollista. Tämä mahdollistuu esimerkiksi, kun tuulivoimaloiden rakenteet suunnitellaan kestävämmän alueen tuuliolosuhteita ja voimaloiden melua pyritään vähentämään lapojen muotoilulla. Tekemällä voimalan lavoista useampiosaisia voidaan roottorihalkaisijoita kasvattaa, tällöin myös kuljetukset vaikeammille alueille helpottuvat. Vuotuisen sähköntuotannon (AEP) ja sähköntuotantohinnan (LCOE) optimointi on myös tärkeää.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kaikki teollisen kokoluokan tuulivoimalat ovat tyypiltään vaaka-akselisia ja kolmilapaisia. Pystyakselituuliturbiinien etuna on se, että ne toimivat tuulen suunnasta riippumatta ilman erillistä suuntausta. Siitä huolimatta niiden käyttö on toistaiseksi hyvin vähäistä.

Työssä tehdyn vertailun perusteella voidaan todeta, että suurimmat tuulivoimavalmistajat pyrkivät kasvattamaan tuulivoimaloiden nimellistehoa tulevaisuudessa. Tämä mahdollistuu suurempien roottorin halkaisijoiden avulla ja toisaalta kehittämällä teknologioita, joiden avulla tuulen liike-energiasta saadaan hyödyksi mahdollisimman suuri osa. Lisäksi merituulivoimaloiden nimellistehot ja roottorin halkaisijat ovat suurempia kuin maatuulivoimaloiden. Koska merellä tuulennopeudet ovat suurempia kuin mantereella, on merituulivoimalan potentiaali huomattavan suuri.

Kun tuulivoimaloiden rakenteet saadaan optimoituja äärimmäisiä tuuliolosuhteita kestäväksi mahdollisimman vähäisillä materiaalikustannuksilla, voi LCOE-menetelmällä määritetyn tuulivoiman sähköntuotantohinnan olettaa laskevan tulevina vuosina tehden tuulivoimasta entistä kilpailukykyisemmän. Sähkönvarastointikeinojen kehittymistä odotellessa on kuitenkin myös säätövoimalle tarvetta.

LÄHTEET

Burton et al. 2011. Wind Energy Handbook. 2nd Edition. s. 19, 194. ISBN 978-1-119-99272-1

de Vries, Eize. 2020. Goldwind prioritises larger rotors over higher ratings to reduce LCoE. Windpower Monthly. [verkkoaineisto] [viitattu 14.4.2021] Saatavissa: <https://www.windpowermonthly.com/article/1700741/goldwind-prioritises-larger-rotors-higher-ratings-reduce-lcoe>

GE Renewable Energy. Wind energy. [verkkoaineisto] [viitattu 14.4.2021] Saatavissa: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy>

Global Wind Energy Council. 2021. GWEC releases Global Wind Turbine Supplier Ranking for 2020. [verkkoaineisto] [viitattu 14.4.2021] Saatavissa: <https://gwec.net/gwec-releases-global-wind-turbine-supplier-ranking-for-2020/>

Goldwind. Products. [verkkoaineisto] [viitattu 14.4.2021] Saatavissa: <http://www.goldwindglobal.com/product>

IEA. 2020. Renewables 2020. [verkkoaineisto] [viitattu 14.4.2021] Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020/wind>

Siemens Gamesa. Products and services. [verkkoaineisto] [viitattu 14.4.2021] Saatavissa: <https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services>

Stehly, T., Beiter, P., Duffy, P. 2019 Cost of Wind Energy Review. NREL. [verkkoaineisto] [viitattu 18.4.2021] Saatavissa: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78471.pdf>

Suomen Tuuliatlas. Turbulenssi. [verkkoaineisto] [viitattu 14.4.2021] Saatavissa: http://www.tuuliatlas.fi/mitoitus/mitoitus_1.html

Suomen Tuulivoimayhdistys. Eri tuulivoimalatyyppejä. [verkkoaineisto] [viitattu 14.4.2021] Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/eri-voimalatyyppeja>

Suomen Tuulivoimayhdistys. Tuulivoimasanastoa. [verkkoaineisto] [viitattu 15.4.2021]
Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tuulivoimasanastoa>

Vestas. Products. [verkkoaineisto] [viitattu 14.4.2021] Saatavissa:
<https://www.vestas.com/en/products>

Wood, Johnny. 2020. Wind Turbines That Stand Up To Typhoons. Forbes. [verkkoaineisto] [viitattu 14.4.2021] Saatavissa:
<https://www.forbes.com/sites/mitsubishiheavyindustries/2020/09/21/wind-turbines-that-stand-up-to-typhoons/?sh=fb6fffa79d90>

WWEA. 2021. Worldwide Wind Capacity Reaches 744 Gigawatts – An Unprecedented 93 Gigawatts added in 2020. [verkkoaineisto] [viitattu 14.4.2021] Saatavissa:
<https://wwindea.org/worldwide-wind-capacity-reaches-744-gigawatts/>