

**PIENTUULIVOIMALAN TEKNISTALOUELLINEN TARKASTELU JA
MARKKINASELVITYS**



Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto opinnäytetyö

Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus

Syksy 2022

Antti Vainikainen

Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä tuulivoimaan ja sen perusteella arvioida minkälainen pientuulivoima ratkaisu sopisi HAMKille. Luvun 2 teoriassa käytiin läpi tuulivoimalan toimintaa, miten tuulesta saadaan energiaa ja miten se voitaisiin maksimoida. Lisäksi käytiin läpi tuulivoimaloiden rakennetta, mitä osia voimaloissa on, sekä erilaisia tuulivoimalatyypppejä, miten ne eroavat toisistaan ja mitä haittoja ja hyötyjä kullakin erilaisella tuulivoimalalla on. Lopuksi luvussa 2 pyrittiin selvittämään miten tuulivoima vaikuttaa ihmisiin ja liikenteeseen, minkälaisia työmahdollisuuksia tuulivoimalat voisivat tuoda sekä miten häiritsevinä tuulivoimalat koetaan. Luvussa 2.4.4. käytiin läpi kysely tuulivoimaloiden vaikutuksesta asumiseen. Samalla pyrittiin myös arvioimaan, oliko kysely luotettavaa kyselyn korkea keski-ikä ja muiden seikkojen takia. Lopulta päädyttiin siihen tulokseen, että tuulivoimaloita ei koeta häiritsevinä, muutenkin tuulivoimaloihin perehtymisen jälkeen tuulivoimasta jäi positiivinen kuva.

Luvussa 3 valittiin 6 erilaista pientuulivoimala ratkaisua yhteensä 4 eri verkkosivustolta. Nämä pientuulivoimalat esiteltiin ja niistä koetettiin nostaa tärkeimmät seikat esille ja huomioida sitä mitkä asiat ovat tärkeimpiä pientuulivoimalan valitsemisessa. Samalla koetettiin myös katsoa pientuulivoimaloita kriittisesti ja selvittää mitkä seikat myyjät ovat nostaneet esille, tai jättäneet huomioimatta, vain jotta voimala saataisiin myytyä. Lopuksi luvussa 3 valitut pientuulivoimalat koottiin yhteen taulukkoon mihin pyrittiin tuomaan esille tuulivoimaloiden oleelliset asiat, mitkä vaikuttaisivat ostopäätökseen ja voimaloiden tuottamaan energiaan. Pientuulivoimalat vertailtiin ja lopuksi päädyttiin Ista Breeze -malliseen pientuulivoimalaan. Kyseisellä pientuulivoimalalla oli suurin siipien koko ja samalla suurin pinta-ala. Lisäksi valintaa auttoi voimalan keskitasoinen hinta, se ei ollut halvin eikä myöskään kallein voimaloista. Silentmill-turbiini nostettiin myös esille suuresta hinnasta huolimatta, voimalalla oli alhaisin käynnistys- sekä ihannetuulinopeus.

Luvussa 4 esiteltiin HAMKin Valkeakosken kampuksella sijaitseva valkoinen talo ja siinä oleva aurinkosähköjärjestelmä. Valkoisesta talosta esiteltiin aurinkopaneelit, invertteri sekä akusto. Lopuksi pyrittiin suunnittelemaan, miten pientuulivoimala voitaisiin liittää kyseiseen aurinkosähköjärjestelmään.

The goal of this thesis was to learn about wind power and use that knowledge to figure out what type of small wind turbine would work for HAMK. The theory of chapter 2 was about figuring out how wind power functions, how you can get energy out of wind and how to maximize it. In addition, there was a segment about the structure of a wind power plant, what type of parts does a wind power plant have and what different types of wind power plants there are, how do they differ from each other and what sort of advantages or disadvantages do each type have. At the end of chapter 2 there was an attempt at figuring out how wind power affects humans and traffic, what sort of job opportunities could they bring and do people find wind power plants disturbing. The chapter 2.4.4. was about a study about how wind power plants affect to people living near them. At the same time there was an attempt at finding out if the study was legitimate because of the high middle age of the participants of the study. At the end a conclusion was reached that wind power plants are not seen as disturbing and generally the wind power had left a positive mark.

6 different small wind power plants were chosen in chapter 3 they were in total from 4 different websites. There was first a showcase of all 6 small wind power plants and then an attempt at highlighting the most important factors when it comes down to choosing a small wind power plant. At the same time these wind power plants were critically observed to figure out what aspects of these power plants were being highlighted, or not, by the manufacturers just to sell the power plant. At the end of the chapter 3 these 6 chosen wind power plants were all brought together to a chart in where the most valuable information about the wind power plants to were highlighted. The sort of things that would impact the purchasing decision and the amount of energy that the plant could produce. The wind power plants were all compared to one and other and at the end a conclusion was reached that Ista Breeze -type of small wind power plant was the most suitable one. The wind power plant in question has the largest wing length and at the same time the largest surface area. The fact that the wind power plant wasn't the cheapest nor the most expensive also helped the decision. The Silentmill-turbine was also highlighted despite its high cost because it had the lowest starting and preferable speeds.

In chapter 4 a white house in the HAMK's Valkeakoski campus and the electrical solar system were showcased this included the solar panels, inverter and the batteries. At the end there was an attempt at figuring out how the newly selected small wind power plant could be integrated into the existing electrical solar system.

Keywords Small wind turbine, wind energy, renewable energy

Pages 47 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Pientuulivoimala	2
2.1	Tuulivoimalan rakenne.....	2
2.1.1	Tuulivoimalan asennuspaikka	2
2.1.2	Tuulivoimalan osat	3
2.2	Eri tuulivoimalatyyppejä	7
2.2.1	Savonius	7
2.2.2	Darrieus	9
2.2.3	Vaaka-akseliset.....	9
2.3	Tuulivoimalan toiminta	11
2.3.1	Tuulivoimalan tuottama teho	13
2.3.2	Nosto- ja vastusvoima	15
2.3.3	Pintasuhde.....	16
2.3.4	Kierrosnopeus	17
2.4	Tuulivoiman vaikutus ympäristöön.....	18
2.4.1	Työpaikat	18
2.4.2	Liikenne	20
2.4.3	Suhtautuminen tuulivoimaloihin	20
2.4.4	Asuminen.....	21
3	Tuulivoimalavertailu	25
3.1	Eri tuulivoimalatyyppien vertailu	25
3.1.1	Silentmill.....	26
3.1.2	Ista Breeze	27
3.1.3	Mytools vaaka-akselinen.....	29
3.1.4	Mytools pystyakselinen.....	30
3.1.5	MasterX	31
3.1.6	AirForce 1	33
3.2	Tuulivoimalavertailun analysointi.....	35

4	Tuulivoiman integrointi sähköntuottojärjestelmään	37
4.1	Olemassa oleva aurinkosähköjärjestelmä	38
4.2	Tuulivoimalan integroinnin toteutussuunnitelma	41
5	Yhteenveto	44
	Lähteet.....	45

1 Johdanto

Viime vuosina uusiutuvat energiamuodot, kuten esim. aurinko-, vesi- tai tuulienergia, ovat kasvattaneet suosiotaan ilmastomuutoksen takia. Suomessa missä aurinko ei paista talvella juuri ollenkaan, tuulivoima on aurinkovoimaa paljon parempi ratkaisu. Suuret tuulivoimalat ovat yksittäiselle kuluttajalle liian kalliita, mutta teknologian kehitys on mahdollistanut tuulivoimaloiden kutistamisen. Suuren kysynnän takia moni yritys haluaa myydä omaa pientuulivoimalaa kuluttajalle käyttöön. Tuulivoimaloihin perehtymätön kuluttaja ei välttämättä tiedä kuinka paljon myydystä pientuulivoimalasta on totta ja mikä on vain markkinointia. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on perehtyä tuulivoimaloihin, niiden rakenteeseen, miten ne tuottavat energiaa ja miten ne vaikuttavat ympäristöönsä sekä ihmisiin. Lisäksi opinnäytetyössä vertaillaan ostettavia pientuulivoimaloita ja selvitetään mikä niistä olisi paras HAMKille.

Luvussa 2 perehdytään tuulivoimaloiden toimintaa, rakenteeseen, ihmisten suhtautumiseen tuulivoimaloihin ja käydään läpi yleisimpiä tuulivoimala tyyppejä. Luvussa 3 esitellään erilaisia vertailuun valittuja pientuulivoimaloita. Vertailussa pyritään tuomaan kuluttajalle tärkeimmät asiat pientuulivoimaloista, jotka vaikuttavat eniten tuulivoimalan tuottamaan energiaan, ja pyritään erottamaan, mitkä seikat on tarkoitettu voimalan markkinoimiseen. Parhaan pientuulivoimalan valitsemisessa pyritään myös huomioimaan luvun 2 teoria ja selvittämään mikä on tärkeää pientuulivoimalan valitsemisessa. Lopuksi luvussa 4 ensin esitellään HAMKin Valkeakosken kampuksella sijaitseva aurinkosähköjärjestelmä ja sitten esitetään suunnitelma, miten luvun 3 tuulivoimalavertailussa valittu pientuulivoimala yhdistettäisiin kyseiseen järjestelmään.

2 Pientuulivoimala

Pientuulivoimaloiksi luetaan kaikki ne tuulivoimalat, jotka tuottavat alle 20 kW sähköä.

Tämän kokoiset tuulivoimalat soveltuvat kotikäyttöön. Suuret sähkön tuotantoon tarkoitettut tuulivoimalat ovat yli 200 kW tuottavia. (ABB, 2011, s. 14)

Vuoden 2021 lopussa Suomessa oli yhteensä 962 toimivaa tuulivoimalaa. Vuoden 2021 aikana rakennettiin yhteensä 141 uutta tuulivoimalaa, mikä vastaa 671 megawattia energiaa. Suomen tuulivoimaloiden yhteinen kapasiteetti oli 3 257 MW ja sähköä tuotettiin yhteensä 8,061 TWh. Vuonna 2021 11,7 % sähkön tuotannosta ja 9,3 % kulutuksesta hoidettiin tuulivoimalla. (Ståhle, 2022 s. 16)

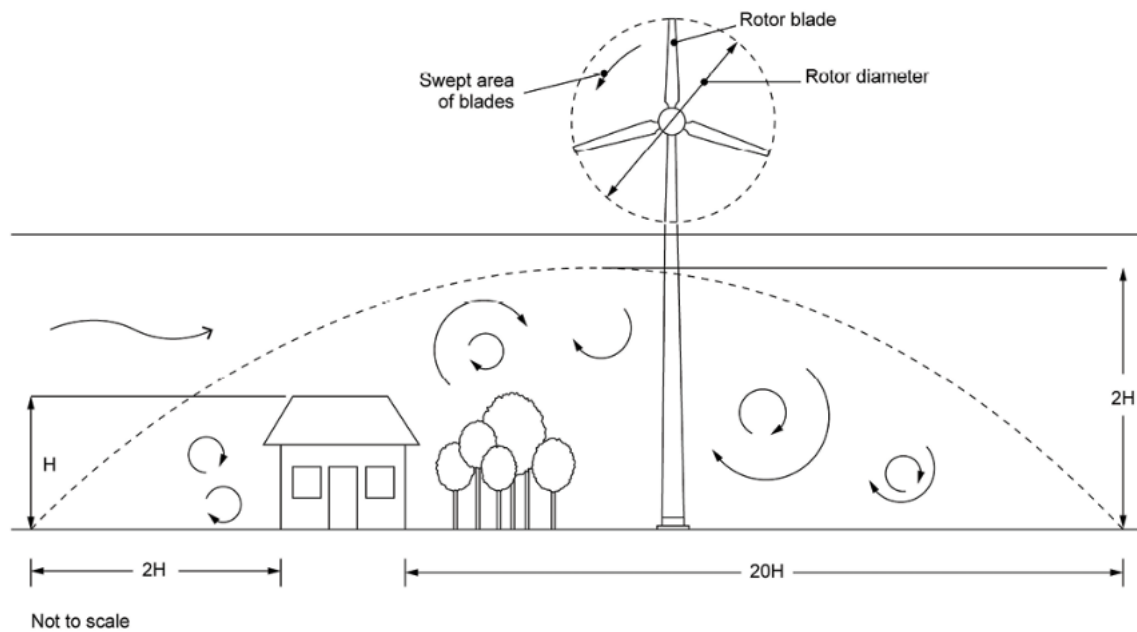
2.1 Tuulivoimalan rakenne

Tässä luvussa on käyty läpi tuulivoimaloiden rakenteeseen ja rakentamiseen liittyviä asioita. Luvussa käydään läpi, miten tuulivoimala pitäisi asentaa ja mitkä ovat tärkeimpiä osia tuulivoimalassa.

2.1.1 Tuulivoimalan asennuspaikka

Tuulivoimalan asennuksen tärkein vaihe on etsiä voimalalle sopiva paikka. Mikäli asennuspaikalla ei tuule tarpeeksi on voimala hyödytön. Mitä tuulisempaa asennuspaikalla on sitä parempi. Tuulivoimalat eivät tuota juuri ollenkaan sähköä, mikäli tuulen nopeus on alle 3 m/s. Suurin syy sille miksi tuulivoimala ei tuota sähköä on voimalan väärä asennuspaikka. Tuulivoimala tuottaa sitä enemmän energiaa mitä korkeampi torni on. Läheiset esteet kuten esim. talot tai puut tuottavat pyörteitä tuulessa. Siksi tuulivoimala tulisi sijoittaa joko siten että sen välittömässä läheisyydessä ei ole esteitä tai että se on riittävän korkealla, jotta esteistä ei synny pyörteitä tuuleen. Lapojen pitää olla jatkuvasti vähintään kaksi kertaa korkeammalla kuin lähin este. Kuvassa 1 näkyy miten tuuli luo pyörteitä esteiden läheisyyteen. (Saaristotekniikka, n.d. -a)

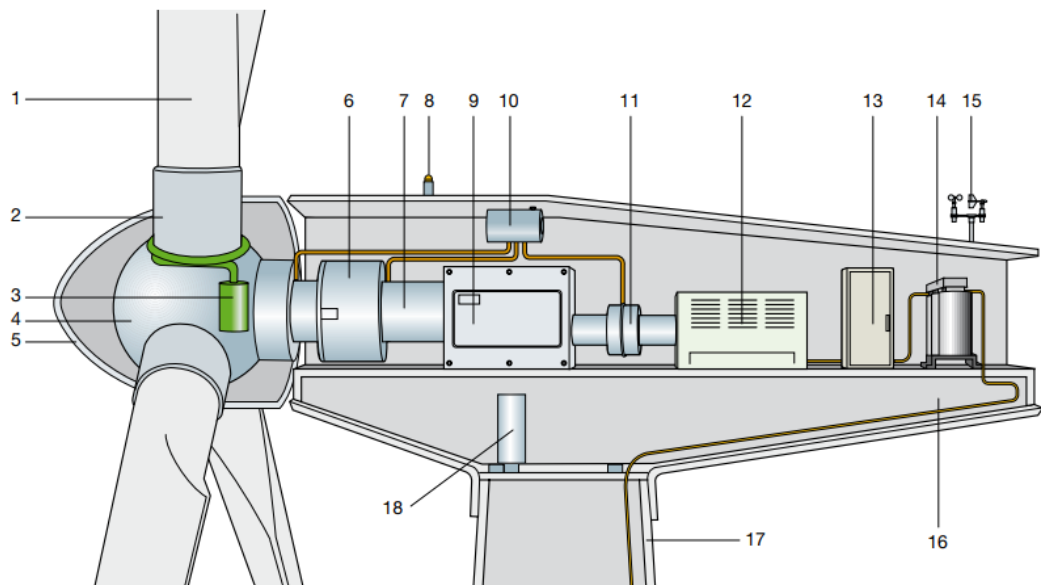
Kuva 1. Tuulivoimalan sijoitus esteiden läheisyyteen (Saaristotekniikka, n.d. -a)



2.1.2 Tuulivoimalan osat

Alla olevassa kuvassa 2 on käyty läpi tuulivoimalan konehuoneen (nasellin) osat. Kyseessä on pientuulivoimalaa suurempi voimala mutta pientuulivoimaloista löytyy samat osat hieman pienemmässä koossa. (ABB, 2011, s. 24)

Kuva 2. Tuulivoimalan osat (ABB, 2011, s. 24)



1. Lapa
2. Lavan tuki
3. Nousukulman toimilaite
4. Napa
5. Roottorin pyörittäjä
6. Pääkannatin
7. Pääakseli
8. Lentoliikennettä varoittava valo
9. Vaihteisto
10. Mekaaniset jarruttimet
11. Jäähdytysjärjestelmä
12. Generaattori
13. Konvertteri, sähköohjain sekä suojaus ja yhteyden katkaisu laitteet
14. Tuulennopeuden mittari
15. Muuntaja
16. Nasellin kuori
17. Tornin
18. Voimalan kääntämiseen tarkoitettu laitteisto

2.1.2.1 Lavat

Tuulivoimalan lavat täytyy suunnitella kestäviksi, sillä ne pyörivät koko ajan. Lapojen pitää kestää niin vesi- kuin lumisateet ja hirmumyrskyt. Tuulivoimalan lavat voivat olla jopa 80

metriä pitkiä ja painaa 15 000 kiloa, tämän takia niitä on vaikeata vaihtaa ja kuljettaa.

Tuulivoimalan lavoissa on käytetty mm. seuraavia materiaaleja:

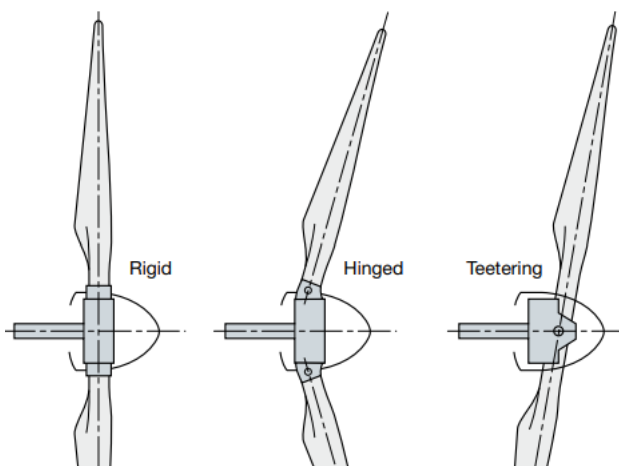
- Polymeerejä
 - Epoksi
 - Polyesteri
- Balsapuu
- Metalleja
- Lasikuituja
- Hiilikuituja

(Mattila, 2021, s. 29)

2.1.2.2 Napa

Tuulivoimalan napa yhdistää lavat muihin voimalan osiin ja navan pyörimisestä tuulivoimala tuottaa energiaa. Kuvassa 3 näkyy kolme eri tapaa millä lavat voidaan yhdistää napaan.

Kuva 3. Lajojen eri kiinnitystavat (ABB, 2011, s. 26)

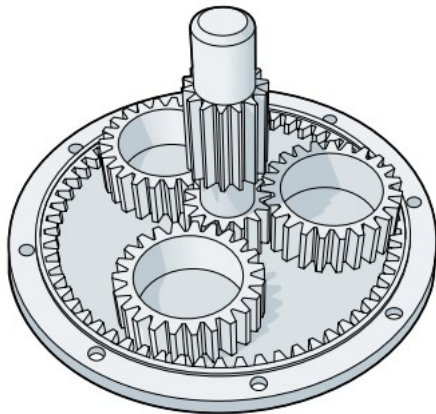


Kiinteänapa (rigid) on kaikkein yleisin ja sitä käytetään tuulivoimaloissa, joissa on kolme tai enemmän lapaa. Kiinteännavan täytyy olla tarpeeksi jykevää, että se kestää kovat tuulet sekä muut mekaaniset rasitukset mitä roottori voi joutua kokemaan. Keikkuvanapainen (teetering) on usein käytössä kaksilapaisessa roottorissa. Lapojen asennolla pyritään vähentämään roottorin huojumista ja saada roottori pyörimään tasaisemmin. Saranapa (hinged) on kahden edellisen yhdistelmä. Sitä käytetään useimmiten takatuulivoimaloissa kovien tuulien aiheuttamien vaurioiden minimoimiseksi. (ABB, 2011, s. 26)

2.1.2.3 Vaihteisto

Tuulivoimalan vaihteiston tarkoituksena on muuttaa tuulen liike-energia mekaaniseksi pyörimisenergiaksi. Kuvassa 4 on tuulivoimaloiden vaihteistona usein käytetty episykloidi-ratasta.

Kuva 4. Episykloidi-ratas (ABB, 2011, s. 26)

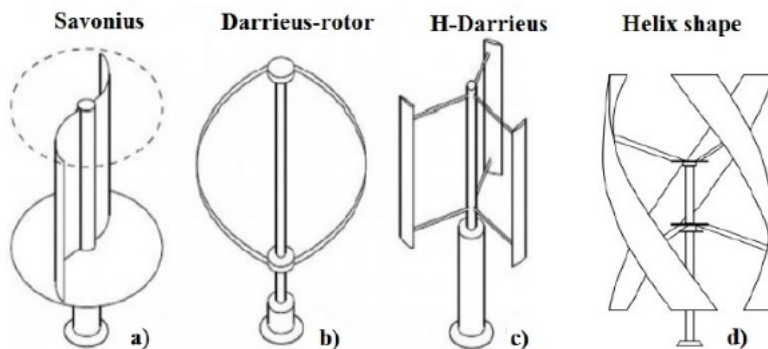


Uudemmissa tuulivoimala malleissa vaihteisto on jätetty kokonaan pois. Jatkuvasti pyörivät moniosaiset rattaat hajoavat usein ja niiden korjaaminen on hankalaa. Vaihteiston pyörimisestä syntyy melua ja voi usein haitata tuulivoimalan sähkön tuottoa. Vaihteiston poisjättäminen yksinkertaistaa tuulivoimalan rakennetta ja niiden poistaminen vähentää osien painoa. (ABB, 2011, s. 26)

2.2 Eri tuulivoimalatyyppejä

Tuulivoimalat jaetaan usein kahteen eri ryhmään: pysty akselisiin (Vertical Axis Wind Turbines, VAWT) sekä vaaka-akselisiin (Horizontal Axis Wind Turbines, HAWT). Kuvassa 5 on esitelty erilaisia pysty akselisiä tuulivoimaloita. Savonius- ja Darrieus-turbiinit (a ja b) ovat yleisimpiä ja niiden lisäksi on olemassa H-Darrieus-tyyppinen (c) sekä kierretyyppinen (d). Vaaka-akselituulivoimalat taas voidaan puolestaan jakaa etu- ja takatuulivoimaloihin. (ABB, 2011, s. 11)

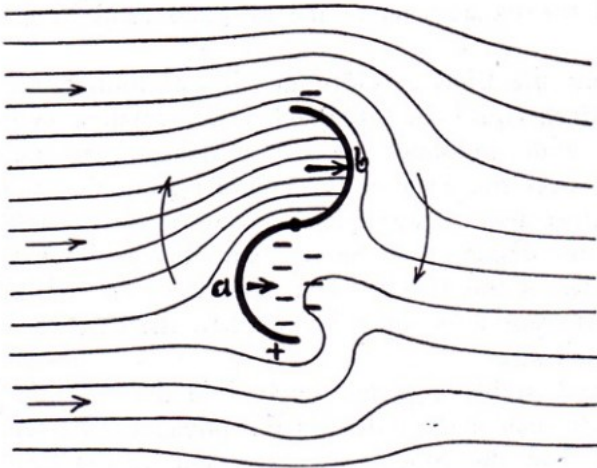
Kuva 5. Erilaisia pysty akselisiä tuulivoimaloita (Castellani ym., 2019, s. 3)



2.2.1 Savonius

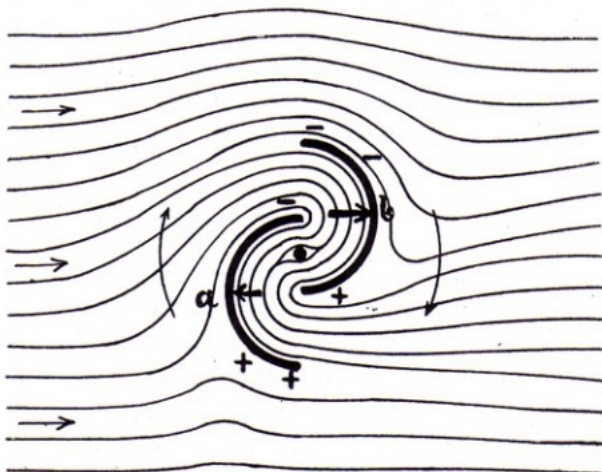
Toinen yleisimmistä pysty akselisistä tuulivoimaloista on suomalaisen Sigurd Johannes Savoniuksen vuonna 1925 kehittelemä Savonius-turbiini. Turbiinin saa tehtyä leikkaamalla putki kahtia ja kiinnittämällä palat S-kirjaimen muotoon. Kuvassa 6 havainnoidaan miten tuuli suhtautuisi turbiiniin. Siiven A puoliympyrä työntää tuulta siipeä B kohti mikä saa turbiinin pyörimään. Ongelmana on se, että siiven A taakse syntyy tyhjiö ja se hidastaa turbiinia. (Savonius, 1925, s. 10)

Kuva 6. Savonius-turbiini (Savonius, 1925, s. 10)



Mikäli siipiä siirtää kauemmaksi toisistaan turbiini hidastuu, sillä silloin se pyörii hitaammin mutta mikäli siipiä tuodaan lähemmäksi toisiaan, turbiini nopeutuu. Kuten kuvasta 7 huomaa siipien ollessa hieman erillään toisistaan tuuli voi kulkea niiden läpi eikä siiven A taakse synny tyhjiötä. Savoniuksen tekemien kokeiden perusteella hän tuli siihen tulokseen, että kaksi siipinen puoliympyrä on paras malli turbiinille. Siipien lisääminen aiheutti sen, että siivet peittivät toisensa ja näin hidasti turbiinia. (Savonius, 1925, s. 10–17)

Kuva 7. Savonius-turbiini (Savonius, 1925, s. 11)



Savonius-turbiinien etuihin kuuluu se, että ne voidaan tehdä varsin pieniksi ja vievät vähän tilaa eikä niissä esiinny paljoa mekaanista tärähtelyä, joten ne ovat hiljaisia. Pystyakselisiä

tuulivoimaloita ei tarvitse suunnata tuulen suuntaisesti niin kuin vaaka-akselisia ja ne toimivat paremmin hitailla tuulennopeuksilla. Haittoihin kuuluu esim. se, että siipien asentoa ei voida vaihtaa ja varsinkin suuremmat vaaka-akseliset tuulivoimalat ovat tehokkaampia. (ABB, 2011, s. 11)

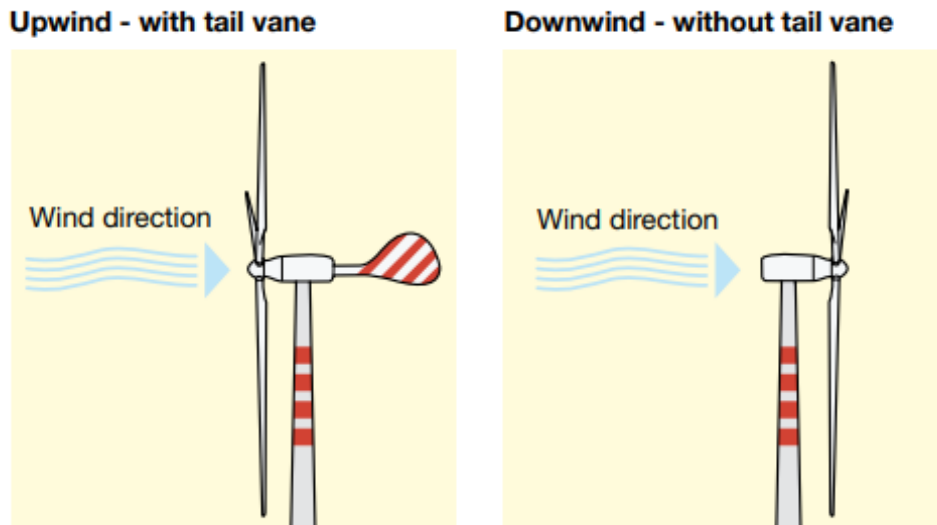
2.2.2 Darrieus

Alkuperäisen mallin Darrieus-turbiinille kehittänyt yhdysvaltalainen G.J.M. Darrieus mutta niitä alettiin kehittää kunnolla vasta 1970-luvulla Kanadassa ja Yhdysvalloissa. Darrieus-turbiinin etuihin kuuluu Savonius-turbiinin tavoin se, että sitä ei tarvitse suunnata tuulta kohti ja toimii paremmin hitaimmilla tuulennopeuksilla. Darrieus-turbiinin lavat ovat ohuita usein alumiinista valmistettuja ja halpoja. Etuna on myös se, että konehuone sijaitsee maan tasalla voimalan juuressa, joten siihen on helppo päästä käsiksi. Suurin ongelma Darrieus-turbiineissa on se, että ne eivät lähde käyntiin itsestään vaan tarvitsevat moottorin käynnistämään turbiinin. Ne tarvitsevat myös mekaaniset jarruttimet hidastamaan turbiinia. Turbiini tärisee ja vahingoittuu liian suurilla tuulennopeuksilla. (Turbinesinfo, 2019)

2.2.3 Vaaka-akseliset

Vaaka-akseliset tuulivoimalat ovat pystyakselisia yleisempiä ja tehokkaampia. Suurin osa vaaka-akselisista tuulivoimaloista on etutuulivoimaloita, joissa on kolme lapaa. Vaaka-akselituulivoimaloissa on enemmän pyyhkäisyypinta-alaa, joten ne ovat tehokkaampia kuin pystyakseliset. Kuten kuvassa 8 näkyy, etutuulivoimalassa roottori on käännetty siten että lavat pyörivät tuulen ja tornin välissä, kun taas takatuulivoimalassa lavat pyörivät tuulen ja tornin takana. Etutuulivoimalat ovat tehokkaampia sillä niissä torni ei häiritse aerodynamiikkaa, mutta takatuulivoimaloita ei tarvitse säätää tuulen suuntaiseksi. Pienemmissä etutuulivoimaloissa on pyrstö tuulivoimalan perässä ohjaamaan voimalaa mutta isommissa tuulivoimaloissa tämä tapahtuu mekaanisesti kääntämällä voimalaa. (ABB, 2011, s. 11–13)

Kuva 8. Etu- ja takatuulivoimala (ABB, 2011, s. 13)



Suurin osa vaaka-akselisista tuulivoimaloista on kolmilapaisia sillä ne ovat kaikista kustannustehokkaimpia. Siitä huolimatta myös kaksi- tai yksilapaisia tuulivoimaloita on olemassa. Kuten kuvassa 9 näkyy kaksilapaisessa tuulivoimalassa lavat ovat 180 asteen kulmassa toisiinsa nähden. (ABB, 2011, s. 14)

Kuva 9. Kaksilapainen tuulivoimala (North American Windpower, 2015)



Kuten kuvassa 10 käy ilmi yksilapainen tuulivoimala tarvitsee lavan lisäksi vastapainon, minkä takia yksilapainen voimala ei paljoa kaksilapaista halvempi. Mitä vähemmän lapoja tuulivoimalassa on sitä suurempaa vauhtia niiden pitää pyöriä mikä lisää voimalasta aiheutuvaa ääntä. Toisaalta lapojen vähentäminen vähentää voimalan painoa, joten tukirakenteisiin kuluu vähemmän rahaa. Näistä syistä kaksi- ja yksilapaiset tuulivoimalat soveltuvat paremmin merituulivoimaloiksi missä voimala ei haittaa asutusta. (ABB, 2011, s. 14)

Kuva 10. Yksilapainen tuulivoimala vastapainolla (ABB, 2011, s. 13)



2.3 Tuulivoimalan toiminta

Tuulivoimalan toiminnassa on otettava myös huomioon se, että tuulivoimala ei jatkuvasti tuota energiaa maksimitehollaan. Tuulivoimala, jolle on merkitty nimellistehoksi 400 W, yleensä tuottaa 400 W energiaa vain silloin kun tuulen nopeus on noin 8–12 m/s.

Tuulivoimalan nimellisteho ja se millä tuulennopeudella se tuottaa kyseisen nimellistehonsa riippuu sen valmistajasta. Tuulivoimaloilla on oma kapasiteettikertoimensa mikä tarkoittaa sitä kuinka paljon voimala tuottaa omasta maksimistaan vuoden aikana. Vuonna 2019

vuosien 2011 ja 2017 välisenä aikana asennettujen tuulivoimaloiden keskimääräinen kapasiteettikerroin oli noin 33 %. Toinen huomioitava asia on se, että talvella tuulee yleensä enemmän kuin kesällä. Noin 60 % tuotetusta tuulienergiasta saadaan loka- ja maaliskuun välillä. (Suomen Tuulivoimayhdistys, n.d. -a)

Tuulennopeus riippuu vahvasti ilmanpaineesta. Ilmanpaineen vaihdellessa lyhyellä välillä tuuli nopeutuu. Tuulennopeus ja sen vaikutus ympäristöön niin maalla kuin merellä on kuvattu taulukossa 1. (Ilmatieteen Laitos, 2021)

Taulukko 1. Tuulennopeuden vaikutus (Ilmatieteen Laitos, 2021)

Tuulennopeus (m/s)	Tuulen nimitys	Tuulen vaikutus maalla	Tuulen vaikutus merellä
0	Tyyntä	Savu nousee pystysuoraan.	Peilityyni meri
1	Heikkoa	Tuulen suunnan näkee savun liikkeestä.	Meren pinnalla pientä karettä.
2–3	Heikkoa	Tuulen tuntee iholla. Puiden lehdet kahisevat.	Lyhyitä aaltoja, jotka eivät murru.
4–5	Kohtalaista	Puiden lehdet ja lehvät liikkuvat. Kevyt lippu suoristuu.	Aallon harjat murtuvat sillin tällöin. Läpinäkyvää vaahtoa aallon harjalla.
6–7	Kohtalaista	Pienet oksat heiluvat. Nostaa maasta pölyä ja irtonaisia paperin palasia.	Pitkähköjä aaltoja. vaahtopäitä, jotka kohahtelevat.
8–10	Navakkaa	Pienuhköt lehtipuut heiluvat. Järvenselällä vaahtopäitä.	Aallon harjat kauttaaltaan valkoisina vaahtopäitä. Meri kohisee jatkuvasti.
11–13	Navakkaa	Suuret oksat heiluvat. Tuuli suhisee sattuessaan taloihin ja kiinteisiin esineisiin.	Aaltojen vaahto leviää. Meri kohisee kumeasti.
14–16	Kovaa	Puut heiluvat. Tuulta vasten kulkeminen vaikeaa.	Aaltojen huiput murtuvat. Vaahto järjestyy tuulen suuntaisiksi juoviksi. Kohina kuuluu kauas.
17–20	Kovaa	Katkoo puiden oksia. Ulkona liikkuminen vaikeaa.	Aallot pitkiä ja verraten korkeita. Vaahto tiheinä tuulen suuntaisina juovina.
21–24	Myrskyä	Katkoo puita. Vaurioittaa heikohkoja rakennuksia, irrottaa kattotiiliä ja särkee savupiipun hattuja.	Aallot korkeita. Aaltojen pärske huonontaa näkyvyyttä hiukan. Meri pauhaa.

25–28	Kovaa myrskyä	Kiskoo puita juurinen. Aiheuttaa huomattavaa vahinkoa rakennuksille. Sattuu harvoin sisämaassa.	Aaltovuoria. Merenpinta valkoisena vaahdosta. Pauhu kovaa, puuskittaista. Aaltojen pärske huonontaa näkyvyyttä.
29–32	Ankaraa myrskyä	Kaataa metsää. Siirtää rakennuksia. Sattuu erittäin harvoin sisämaassa.	Näköpiirissä olevat laivat katoavat aaltovuorien taakse. Koko merenpinta valkoisena. Pärske huonontaa näkyvyyttä huomattavasti.
≥ 33	Hirmumyrskyä	Tuhoaa perin pohjin rakennukset ym.	Koko merenpinta valkoisena. näkyvyys erittäin huono.

2.3.1 Tuulivoimalan tuottama teho

Alla olevassa kaavassa 1. on laskettu ilmavirtauksen teho P_0 , jossa ρ tarkoittaa ilman tiheyttä, A pinta-alaa mikä on kohtisuorassa ilmanvirtausta vastaan ja v_0 ilmavirtauksen nopeutta.

Kaava 1. Ilmavirtauksen teho (Korpela, 2016, s. 36)

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_0^3$$

Kaavan mukaan ilmavirtauksen teho riippuu vahvasti tuulennopeudesta, -nopeuden kolmannen potenssin takia. Kaavan mukaan tuulennopeuden kasvaessa kaksinkertaiseksi tuulen tuottama teho 8-kertaistuu. Tämän takia tuulivoimalan paikan määrittäminen tuulennopeuden mukaan on erittäin tärkeää voimalasta saadun hyödyn maksimoimiseksi. (Korpela, 2016, s. 36–37)

Kaava 2 osoittaa että tuulivoimalan roottorin teho (P) saadaan kertomalla lavan pisteen vääntömomentti roottorin akselin suhteen (τ_z) ja kulmanopeus, kun z-akseli on kiertoliikkeen akseli (ω_z).

Kaava 2. Tuulivoimalan roottorin teho (Korpela, 2016, s. 37)

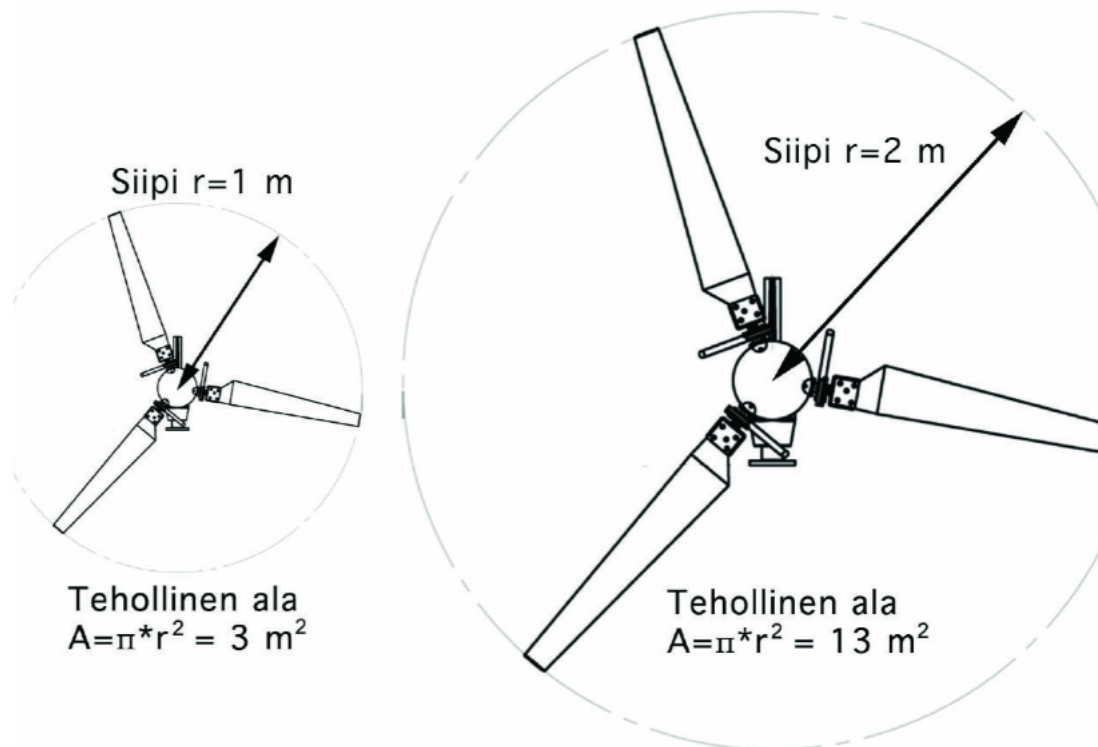
$$P = \tau_z \omega_z$$

Roottorin teho siis riippuu vääntömomentista eli voimasta mikä pyörittää lapaa sekä kulmanopeudesta eli siitä nopeudesta millä lavat pyörivät roottorissa. Betzin lain mukaan tuulivoimalasta voidaan saada teoriassa maksimissaan 59.3 % ilmavirtauksen tehosta mikä osuu roottorin ja lapojen poikkipinta-alalle. (Korpela, 2016, s. 56) Betzin laki on vain teoriassa mahdollista, sillä lain mukaan maksimiin voidaan päästä vain tuulivoimalalla, jossa on ääretön määrä lapoja, kitkaton ja massaton roottori, roottorissa ei ole vastusvoimaa ja puhaltavan tuulen oletetaan olevan pyörteetöntä lapojen ohittamisen jälkeen.

Tuulivoimaloiden on mahdotonta täyttää edes yhtä, saati sitten kaikkia vaatimuksia, joten todellisuudessa roottorin teho on paljon alhaisempaa ilmavirtaukseen verrattuna. (Korpela, 2016, s. 37–38)

Tuulivoimalan tuottama teho on paljolti riippuvainen siipien pituudesta ja pinta-alasta minkä lavat kattavat. Mitä suuremmat siivet tuulivoimalassa on sitä enemmän tuulivoimala tuottaa energiaa. Kuvassa 11 on esitetty miten siipien pituus vaikuttaa voimalan pinta-alaan. Siiven pituuden kasvattaminen yhdestä metristä kahteen yli nelinkertaistaa pinta-alan.

Kuva 11. Tuulivoimalan siiven pituuden vaikutus pinta-alaan. (Suomen Tuulivoimayhdistys, n.d. -b)



2.3.2 Nosto- ja vastusvoima

Kaikkiin kappaleisiin tuulessa vaikuttaa kaksi voimaa: nosto- sekä vastusvoima. Nostovoima pyrkii nostamaan kappaletta, sitä hyödynnetään tuulivoimalan lapojen pyörimisessä ja lentokoneen siivissä nousuun lähdössä. Vastusvoima pyrkii taivuttamaan kappaletta taaksepäin, tuulivoimalassa vastusvoima aiheuttaa mekaanista rasitusta koneistolle ja lisää lentokoneen siiven ilmanvastusta tehden nousuun lähdön vaikeammaksi. Tuulivoimaloiden suunnittelussa hyödyn maksimoimiseksi on saatava lapoihin kohdistuva nostovoima mahdollisimman suureksi ja vastusvoima mahdollisimman pieneksi. Tämän takia tuulivoimaloiden lavat suunnitellaan siten että lapa on kärjestä katsottuna vesipisaran mallinen. Tuuli osuu lavan paksumpaan puoleen saaden aikaan mahdollisimman vähän vastusvoimaa. Lavan katsomista kärjestä päin kutsutaan myös lapaprofiiliksi. (Korpela, 2016, s. 56–57)

Nostovoiman suuruuteen vaikuttaa myös kohtauskulma sekä sakkauspiste. Kohtauskulma on se kulma missä tuuli osuu lapaan. Kohtauskulman ollessa liian alhainen tai korkea nostovoimaa ei synny tarpeeksi paljon. Kohtauskulman avulla saatu nostovoima on maksimissaan juuri ennen sakkauspistettä. Sakkauspisteellä tarkoitetaan sitä kulmaa, jolloin ilmavirtaus irtoaa lavan yläreunasta. Kulman kasvattaminen lisää ilmavirtauksen irtoamista mikä taas puolestaan vähentää nostovoimaa. Tuulivoimalan lapojen sakkauspiste riippuu täysin itse lavan lapaprofiilista, joten sitä ei voida määrittää tiettyä kohtauskulmaa mihin lapa pitäisi asettaa. (Korpela, 2016, s. 60)

2.3.3 Pintasuhde

Pintasuhde saadaan jakamalla lapojen yhteispinta-ala ja roottorin pyyhkäisy pinta-ala. Lapojen lisääminen kasvattaa pyyhkäisy pinta-alaa ja samalla pintasuhdetta. Pintasuhteen kasvattaminen lisää voimalan vääntömomenttia. Pelkästään pintasuhteen kasvattaminen ei lisää voimalan tehoa sillä pitää ottaa huomioon myös voimalan kulmanopeus. Voimalan tuottama teho riippuu voimalan vääntömomentista ja kulmanopeudesta. Vääntömomentti kasvaa, kun lapojen määrää lisätään. Kulmanopeus taas puolestaan riippuu siitä kuinka nopeaan voimalan lavat pyörivät. Monilapaiset voimalat myös toimivat pienemmillä tuulennopeuksilla mikä tarkoittaa sitä, että ne ovat hyviä pientuulivoimaloille. Tämän ansiosta pientuulivoimala saadaan tuottamaan jatkuvasti energiaa. Haittana on se, että lapojen lisääminen kasvattaa voimalan kustannuksia. Pienemmissä tuulivoimaloissa lapojen uusiminen ja korvaaminen on helppoa eikä maksa kovinkaan paljoa. Mitä suurempi voimala on kyseessä, sitä vaikeampi sitä on korjata ja sitä enemmän materiaaleja kuluu uusien lapojen valmistamiseen. Isompiin tuulivoimaloihin on vakiintunut kolme lapa. Neljännen ja viidennen lavan lisääminen ei tuota tarpeeksi energiaa, että se olisi taloudellisesti kannattavaa ylläpitää useampaa lapa. Tuulivoimasta halutaan saada mahdollisimman paljon energiaa mahdollisimman vähillä kustannuksilla. Lapojen lisääminen siis nostattaa voimalan kuluja. (Korpela, 2016, s. 65–66)

Pyörimisvaiheessaan lavat tuottavat suurimman vääntömomentin, kun lavan kärki osoittaa ylös ja vähiten kun kärki osoittaa alas. Alimmassa kohdassaan lapa ohittaa tornin, jolloin ilmavirtaus muuttuu. Tätä kohtaa lavan pyörimisessä kutsutaan myös tornivarjoksi.

Yksilapainen tuulivoimala olisi kustannuksia ajatellen paras vaihtoehto mutta yhden lavan pyöriminen on epätasaista. Voimalan jatkuva ja nopeasti vaihteleva pyörimisnopeus aiheuttaa mekaanisia häiriöitä sen osiin. Mikäli lapoja olisi kaksi, toisen lavan ollessa vääntömomenttinsa maksimissa ja toinen minimissä, tästäkin aiheutuu mekaanista rasitusta koneistolle. Kolmilapainen tuulivoimala on paljon tasaisempaa kuin kaksi- tai yksilapaiset ja sen lavat on asennettu 120 asteen kulmiin toisistaan. Kun kolmilapaisessa voimalassa yksi lapa osoittaa kohti suoraan ylös kaksi muuta eivät osoita suoraan alas ja kun taas yksi lavoista osoittaa suoraan alas kumpikaan kahdesta toisesta lavasta ei osoita suoraan ylös. Vielä kolmea useampi lapaiset voimalat olisivat vieläkin tasaisempia, mutta niistä saatu hyöty ei olisi taloudellisesti kannattavaa lapojen ylläpidon kannalta. (Korpela, 2016, s. 66–67)

2.3.4 Kierrosnopeus

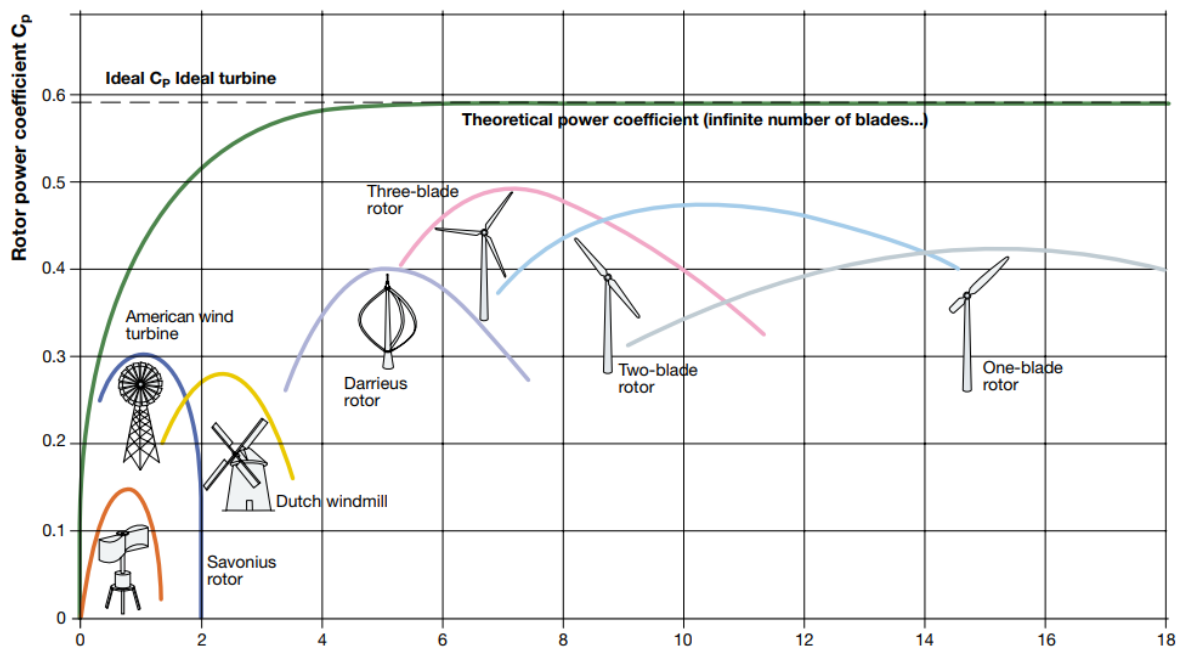
Tuulivoimaloiden hyötysuhde riippuu voimalan kierrosnopeudesta. Nopeammin pyörivä voimala tuottaa enemmän energiaa mutta mikäli voimala alkaa pyörimään liian lujaa osa tuulesta ei pysty kulkemaan lapojen väli vaan painuu sivulle. Tip Speed Ratio (TSR) kertoo voimalan lavan pää kierrosnopeuden, mikä voidaan laskea kaavan 3 avulla. Kaavassa λ tarkoittaa kierrosnopeutta, v_t perifeeristä tangentialinopeutta mikä voidaan laskea kertomalla kulmanopeus Ω roottorin säteellä R ja v_1 tuulennopeutta.

Kaava 3. Lavan päään kierrosnopeus (ABB, 2011, s. 38)

$$\lambda = \frac{v_t}{v_1} = \frac{\Omega R}{v_1}$$

Paras kierrosnopeus voimalalle riippuu sen tyypistä ja lapojen määrästä. Tuulennopeuden kasvaessa kierrosnopeutta on muutettava parhaan hyötysuhteen saamiseksi. Kuvassa 12 on vertailtu erityyppisiä tuulivoimaloita ja millä kierrosnopeudella voimaloista saadaan aikaan paras hyötysuhde. Kuvassa vasemmalla on hyötysuhde ja alla kierrosnopeus ja vihreällä viivalla teoreettinen maksimi tuulesta saatavalla energialle. Kuten kuvasta ilmenee pysty akselisilla voimaloilla, on hitaampi kierrosnopeus kuin vaaka-akselisilla ja mitä vähemmän lapoja sitä nopeammin voimalan pitää pyöriä. Kuvasta käy myös ilmi se miksi kolmilapaiset tuulivoimalat ovat yleisimpiä. (ABB, 2011, s. 38)

Kuva 12. Eri tuulivoimalatyyppien hyötysuhde (vasenlaita) ja kierrosnopeus (alalaita) (ABB, 2011, s. 38)



2.4 Tuulivoiman vaikutus ympäristöön

Erona tuulivoimassa on monin muihin energian muotoihin se, että tuulivoimalat ovat varsin korkeita ja helposti nähtävillä. Lisäksi voimaloita voidaan rakentaa periaatteessa, minne vain. Tuulivoimalat vaikuttavat paljolti ympäristöönsä ja ihmisiin. Tuulivoimalat tuovat työpaikkoja sekä uusia teitä rakennetaan voimaloiden takia ja se lisää liikennettä. Tuulivoimaloiden mahdollisista haitoista on ollut myös paljon keskustelua.

2.4.1 Työpaikat

Tuulivoimalat tuottavat uusia työpaikkoja eri alojen osaajille. Voimalat pitää rakentaa, huoltaa ja materiaalit pitää kuljettaa paikalle. Käytön aikana tuulivoimala ei tarvitse muuta kuin huoltoa, raaka-aineita ei tarvita eikä saasteitakaan ole. Tuulivoimaloiden rakentaminen ja huoltaminen tuo myös epäsuoria tuloja kunnille, kun huolto- ja rakennushenkilöstö pitää majoittaa ja ruokkia. Kunta saa myös periä kiinteistöveroja tuulivoimaloista. (Suomen Tuulivoimayhdistys, n.d. -c)

2.4.1.1 Verot

37 prosenttia Suomen tuulivoimaloista sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla mikä tekee siitä huomattavasti suurimman tuulivoiman tuotanto alueen Suomessa. Vuoden 2021 aikana Pohjois-Pohjanmaan kunnat saivat tuulivoimasta yhteensä seitsemän miljoonaa euroa kiinteistöverona. Vuonna 2021 Kalajoki sai yhteensä 1,6 miljoonaa euroa kiinteistöveroa ja sen lisäksi, Raahe, Pori, Ii ja Pyhäjoki saivat kaikki yli miljoona euroa. Pohjanmaalla on yhteensä 129, Lapissa 150 ja Pohjois-Pohjanmaalla 349 tuulivoimalaa. Toisaalta esim. Kymenlaaksossa oli 12 voimalaa ja Uudellamaalla vain 4. Suurimmaksi tuulivoimakunnaksi nousi vuoden 2021 aikana Simo mutta tuulivoimalat alkavat vaikuttaa veroihin vasta vuonna 2023. Yksittäisestä tuulivoimalasta kunta voi kerätä jopa 400 000 euroa korkeimmalla mahdollisella kiinteistöveroprosentilla. (Stähle, 2022 s. 16)

2.4.1.2 Purku

Tuulivoimaloiden purkamisestakin syntyy työpaikkoja. Materiaalien kierrättämisestä on tosin syntynyt jonkin verran ongelmia, varsinkin lapojen kierrätyksessä. Lavat ovat suuria ja ne on suunniteltu kestämään äärimmäisiä olosuhteita. Tämän takia lavoissa on käytetty paljon eri materiaaleja, jotka pitää kaikki kierrättää eri tavalla. Vaikka jonkin tuulivoimalan lavat kestäisivät koko voimalan käytön ajan niitä ei voida suoraan asettaa uuteen torniin. Tuulivoimalan käyttöikä voi olla jopa 30 vuotta ja sinä aikana teknologia on parantunut ja uusista lavoista tehdään entistä kestävämpiä. Toisaalta lapojen kierrätyksen tarve tuo lisää liiketoimintaa. Suomalainen Conenor Oy on kehittänyt teknologiaa, jolla voidaan lapajätteestä luoda rakennuksessa käytettyjä komposiittimateriaaleja. Myös Ilmatar Energy Oy on sitoutunut kierrättämään kaikkien tuulivoimaloidensa lavat. Voimalan muut osat ovat helpompia kierrättää ja esim. kupari ja teräs ovat haluttuja kierrätysmateriaaleja. Kierrätys kiinnostaa tuulivoimaloiden omistajia ja siihen kiinnitetään usein huomiota jo suunnittelussa. Tuulivoimalat halutaan pitää ympäristöystävällisinä myös käytön jälkeenkin. (Mattila, 2021, s. 29–31)

Suomessa tuulivoimaloiden purku ei ole vielä suuri ongelma. Suomen tuulivoimalat ovat varsin nuoria yli 95 % voimaloista on rakennettu joko 2011 tai sen jälkeen. Kun voimalat

voivat kestää jopa 30 vuotta Suomessa alkaa pakottava tarve vasta 2040-luvun alkupuolella. Tämän takia tuulivoimaloiden purkuun on helppo valmistua. (Stähle, 2022 s. 16)

2.4.2 Liikenne

Tuulivoimaloiden koon takia ne voivat luoda pitkiä varjoja varsinkin aamulla tai illalla. Lapojen tasaisesti pyörivät varjot voivat olla asukkaille häiritseviä ja joidenkin väittämien mukaan luoda jopa epilepsia kohtauksia tosin siitä ei ole mitään todisteita. Teiden läheisyydessä pyörivät lavat voivat olla häiritseviä kuljettajalle ja vetää huomiota pois tiestä, mikä voi johtaa onnettomuuksiin. Varsinkin risteyksissä, joissa pitää keskittyä liikenteeseen enemmän tai jos tuulivoimala tulee yllättäen kuljettajan näköpiiriin. Tämän takia tuulivoimaloita ei pidä rakentaa liian lähelle teitä. Yleisesti suosituksena on voimalan korkeus $\times 1.5$. Myös mainosten kiinnittäminen tuulivoimaloihin on kiellettyä. Suomessa varsinkin Lapissa tuulivoimaloiden jäätyminen voi johtaa voimalan osien tai jäänpalojen irtoamiseen mikä on vaaraksi ihmisille. Tätä voidaan estää sulkemalla tuulipuistot aidoilla tai varoittaa kulkijoita kylteillä. Rautateillä suurempana vaarana on tuulivoimalan osien ja jään irtoaminen. Merelle tai rannalle rakennetut tuulivoimalat voivat myös häiritä meriliikennettä. Tuulivoimaloissa on samoja haittoja myös meriliikenteelle ja tuulivoimalat voivat estää tai häiritä radioyhteyksiä. Myös sumun aikaan tuulivoimaloita voi olla vaikeampi havaita. Lentokenttien läheisyyteen ei sallita rakentaa mitään korkeaa. Lentoestepinta on alue kiitotien ympärillä joka Suomessa kattaa 15 km sen suuntaisesti ja 6 km kiitoradan sivuille. Tämän ympärillä on Minimum Sector Altitude (MSA) joka takaa sen että 56 km lentoaseman ympärillä on vähintään 300 metriä vapaata ilma tilaa. Tälle alueelle ei saa rakentaa mitään mikä ylittää 200 metriä. (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2012)

2.4.3 Suhtautuminen tuulivoimaloihin

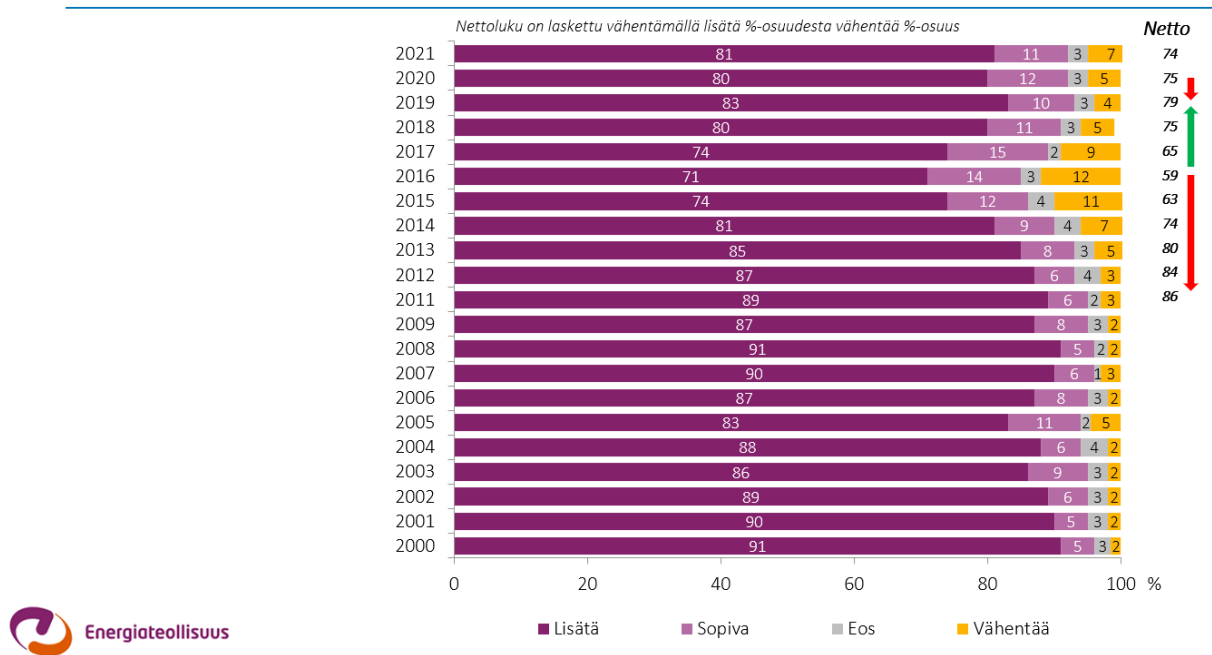
Tuulivoiman edullisuuden ja ympäristöystävällisyyden takia monet suomalaiset haluavat lisätä tuulivoimaloita. Energiateollisuuden vuonna 2021 teettämän kyselyn mukaan (kuva 13) 81 % kyselyyn osallistuneista halusi lisätä tuulivoimaa ja vain 7 % vähentää. Kuvasta 13 huomaa myös sen, että tuulivoimaloita halutaan yhä lisää. Vaikka vuosina 2015 ja 2016 haluttiin hieman vähemmän tuulivoimaloita, niiden suosio on kohonnut muutaman viime

vuoden aikana. Kyselyn mukaan tuulivoima on toiseksi halutuin sähköntuotanto muoto Suomessa aurinkosähkön jälkeen. (Energiateollisuus RY, 2021)

Kuva 13. Suomalaisten suhtautuminen tuulivoimalaan 2000–2021 (Energiateollisuus RY, 2021)

Tuulivoiman käyttöä pitäisi...

Kaikki vastaajat, n=1000



2.4.4 Asuminen

Vuosien 2015 ja 2016 aikana toteutettiin kyselytutkimus yhdeksässä Suomen kunnassa. Tutkimuksen toteutti Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL) ja rahoitti Sosiaali- ja terveysministeriö. Kyselyn tarkoituksena oli selvittää kuinka paljon tuulivoimala vaikuttaa asumiseen voimalan lähistöllä. Tutkimukseen valittiin ensin viisi aluetta ympäri Suomea, joissa oli vähintään 100 asuinrakennusta 2,5 km:n etäisyydellä voimalasta. Nämä alueet olivat: Summa ja Mäkelänkangas Haminassa, Kirkkokallio Honkajoella, Torkkola Vähäkyrössä, Puutaankangas ja Leipiö Simossa ja Varevaara Tervolassa. Tutkimukseen valittiin osallistumaan sattumanvaraisesti kustakin alueista 200 asuntoa kolmelta eri etäisyydeltä

tuulivoimalasta: alle 2,5 km, 2,5–5 km ja yli 5–10 km. Näitä alueita kutsuttiin tutkimuksessa alueiksi 1–5. Lisäksi tutkimukseen otettiin mukaan neljä harvempaan asuttua aluetta: Kopsa Raahessa, Latamäki Luhangassa, Jäneskeidas Siikaisissa ja Sysimäki Kauhajoella. Nämä neljä aluetta merkattiin tutkimuksessa alueiksi 6–9. Alueita 6–9 yhdisti se, että ne olivat olleet julkisuudessa asukkaiden kokeman meluhaitan vuoksi, näistä alueista valittiin tutkimukseen vain alle 2,5 km päässä asuvia. Alueilla 1–5 kyselyyn vastasi 1411 ja alueilla 6–9 102 henkilöä. Molemmissa tapauksissa noin puolet kyselyn saaneista vastasi. Huomioitavaa kyselyssä on se, että alueiden 1–5 keski-ikä oli 61 ja alueilla 6–9 keski-ikä oli 59 vuotta. Kyselyn tulokset on esitetty taulukossa 2. (Turunen, 2016, s. 76–77)

Varsin korkean keski-ikänsä takia tutkimuksen tuloksia voidaan kyseenalaistaa sillä nuorempien asukkaiden mielipiteitä ei saada kuuluviin ja vanhemmat asukkaat voivat suhtautua liiankin negatiivisesti muutoksiin. Toisaalta kysely lähetettiin satunnaisesti alueiden asukkaille, alueilla 1–5 yhteensä 2828 asukkaalle ja heistä hieman alle puolet päättivät vastata. Voitaisiin siis olettaa, että tuulivoimalat eivät haittaa nuorempaa väestöä tai he eivät ole edes ajatelleet koko asiaa. Toisaalta pitää pitää mielessään, että kysely tehtiin pienemmillä asuinalueilla missä väestön keski-ikä on korkeampaa kuin suuremmissa kaupungeissa mihin moni muuttaa työn tai opiskelun perässä. Joka tapauksessa kyselytutkimuksen tulokset ovat luotettavia, ja niistä käy ilmi se, miten tuulivoimala vaikuttaa sen läheisyydessä asuviin ja koetaanko tuulivoimalat häiritsevinä.

Taulukko 2. Tuulivoimaloiden äänen kuuluminen kotona. (Turunen, 2016, s. 78)

	Asuinrakennuksen etäisyys lähimpään tuulivoimalaan		
	<2,5 km	2,5–5 km	>5–10 km
Kuinka usein tuulivoimaloiden ääni kuuluu kotonanne sisätiloissa ikkunoiden ollessa suljettuna?	% (n)		
Alueet 1-5 (n=1307)			
Ei koskaan	89 (337)	97 (458)	99 (453)
Satunnaisesti	6,1 (23)	1,9 (9)	0,7 (3)
Viikoittain	3,4 (13)	0,6 (3)	0 (0)
Lähes päivittäin/päivittäin	1,6 (6)	0,4 (2)	0 (0)
Alueet 6-9 (n=102)			
Ei koskaan	61 (62)	-	-

Satunnaisesti	25 (26)	-	-
Viikoittain	6,9 (7)	-	-
Lähes päivittäin/päivittäin	6,9 (7)	-	-
Kuinka usein tuulivoimaloiden ääni kuuluu kotonanne ulkona pihalla tai parvekkeella?			
Alueet 1-5 (n=1306)			
Ei koskaan	60 (225)	92 (435)	99 (452)
Satunnaisesti	23 (88)	5,7 (27)	0,9 (4)
Viikoittain	9,3 (35)	0,6 (3)	0 (0)
Lähes päivittäin/päivittäin	7,9 (30)	1,5 (7)	0 (0)
Alueet 6-9 (n=102)			
Ei koskaan	27 (28)	-	-
Satunnaisesti	39 (40)	-	-
Viikoittain	11 (11)	-	-
Lähes päivittäin/päivittäin	23 (23)	-	-

Taulukosta huomaa nopeasti sen, että mitä kauempana tuulivoimalasta on, sitä vähemmän se koetaan haittaavan elämää. Molemmissa kysymyksissä yli 5 km voimalasta asuvista 99 % koki, ettei tuulivoimalaa koskaan kuule. Alueilla 1–5 suurin osa myös lähempänä asuvista ei koskaan kuullut tuulivoimalan aiheuttamaa ääntä. Ulkona tuulivoimala kuultiin useammin mutta silloinkin vain 7,9 % kuuli päivittäin tai lähes päivittäin ja silloinkin vain alle 2,5 km päässä tuulivoimalasta. Alueiden 6–9 vastaukset eroavat hieman alueiden 1–5 asukkaiden vastauksista. Ensinnäkin on syytä ottaa huomioon se, että nämä alueet valittiin kyselyyn juuri sen perusteella, että niiden asukkaat olivat kokeneet tuulivoimalat meluisiksi. Tästä aiheutuneen mediahuomion takia moni asukas on varmasti myös kiinnittänyt enemmän huomiota tuulivoimaloihin ja kokee ne haitallisemmaksi kuin mitä ne oikeasti ovat. On mahdollista, että alueilla 1–5 jotkut kyselyyn vastanneista eivät edes tiedäneet, että alueella on tuulivoimala tai kuinka lähellä se olisi. Toisekseen on huomioitava se, että alueilla 6–9 noin 100 ihmistä vastasi kyselyyn, kun taas alueilla 1–5 vastasi noin 1300. Alueilla 6–9 yhden ihmisen vastaus muuttaa tulosta noin yhdellä prosentilla, kun taas alueilla 1–5 tarvitaan vastaavaan tulokseen 13 ihmistä. Esimerkiksi toisessa kysymyksessä, mikä koski tuulivoimalan kuulumista pihalla/parvekkeella, alueilla 1–5 30 vastaajista alle 2,5 km päässä tuulivoimalasta kuuli voimalan päivittäin tai lähes päivittäin, kun taas alueilla 6–9 23 kuuli

päivittäin tai lähes päivittäin. Vaikka alueilla 6–9 vähemmän ihmisiä koko tuulivoimalat meluisiksi näiden ihmisten osuus kaikista vastaajista oli suurempi kuin alueilla 1–5. Kolmannekseen on syytä huomioida se, että alueilla 6–9 vain alle 2,5 km päässä tuulivoimalasta asuville lähetettiin kysely. Kyselystä ei selviä se mitä voimalasta kauempana asuvat ovat mieltä ja eroaako heidän vastauksensa alueiden 1–5 asukkaista.

Kyselyn perusteella voidaan sanoa, että tuulivoimaloita ei koeta häiritsevinä edes lähempänä asuttaessa. Meluhaittojen kokemisen uutisointi vaikuttaa ihmisten asenteeseen tuulivoimaloista. Negatiivinen asenne tuulivoimaloita kohtaan näyttää tämän kyselyn perusteella olevan aiheen uutisoinnin syytä. Lisäksi on huomioitavaa se, että tämä kysely toteutettiin vuosien 2015 ja 2016 aikana. Kyselyn jälkeen tuulivoimaloihin on kehittynyt parempaa teknologiaa mikä vähentää tuulivoimaloista kuuluvaa melua.

3 Tuulivoimalavertailu

Luvussa 3 vertaillaan erilaisia pientuulivoimaloita eri valmistajilta. Vertailussa käydään läpi voimaloiden hyviä ja huonoja puolia sekä lopuksi pyritään selvittämään mikä valituista pientuulivoimaloista sopisi parhaiten HAMKille. Luvussa 3.1 on ensin esitelty vertailtavat tuulivoimalat ja luvussa 3.2 on tehty itse vertailu, kokoamalla kaikki pientuulivoimalat taulukkoon.

3.1 Eri tuulivoimalatyypin vertailu

Tuulivoimalavertailuun on kerätty kuusi erilaista pientuulivoimalaa neljältä eri verkkosivulta. Mukana on kaksi pystyakselista ja neljä vaaka-akselista tuulivoimalaa. Kaikkien vertailtavien pientuulivoimaloiden nimellisteho on 1 kW. Vertailussa otetaan huomioon sellaisia asioita kuten hinta, koko, lähtönopeus ym.

3.1.1 Silentmill

Ensimmäinen vertailtava pientuulivoimala on Saaristotekniikan Silentmill. Roottori on esitelty kuvassa 14. Tuulivoimala on pystyakselinen ja muistuttaa Savonius-turbiinia sekä siinä on kolme lapaa. Turbiinin halkaisija on 1,7 m ja korkeus 1,35 m ja painoa on 28 kg. Roottori on tehty kierrätettävästä muovista ja runko alumiiniseoksesta sekä akseli on terästä. Voimalan teoreettinen ihannetuuli on 10 m/s, eli voimala tuottaa 1 kW energiaa vain silloin kun tuulee 10 m/s, ja käynnistymistuuli on 1,8 m/s. Tuotekuvauksen mukaan tuulivoimalan pitäisi tuottaa sähköä 1,5–25 m/s ja kestää aina 40 m/s asti. Tuulivoimala on markkinoitu hiljaisena ja se tuottaa maksimissaan 20 dB 5 metrin päässä. Voimalan ääriämpötiloiksi on merkitty -35°C ja +80°C. Verkkosivun mukaan voimala on suomalainen keksintö ja siinä on patentoitu rakenne. Silentmill-tuulivoimalan hinta on 2 990 € (Saaristotekniikka, n.d. -b)

Kuva 14. Silentmill (Saaristotekniikka, n.d. -b)



3.1.2 Ista Breeze

Toinen vertailtava tuulivoimala on Saaristotekniikan myymä Ista Breeze. Silentmill-tuulivoimalasta poiketen Ista Breeze on vaaka-akselinen tuulivoimala, siinä on kolme lapaa ja siinä on perässä pyrstö. Lavat on tehty komposiitti muovista, lasikuitu ja nylon, minkä pitäisi tehdä niistä kevyet ja vakaat. Voimalan naselli on tehty alumiinista ja generaattorissa on mukana jäähdytysurat. Ista Breeze tuulivoimala on esitelty kuvassa 15. (Saaristotekniika, n.d. -c)

Kuva 15. Ista Breeze tuulivoimala (Saaristotekniika, n.d. -c)

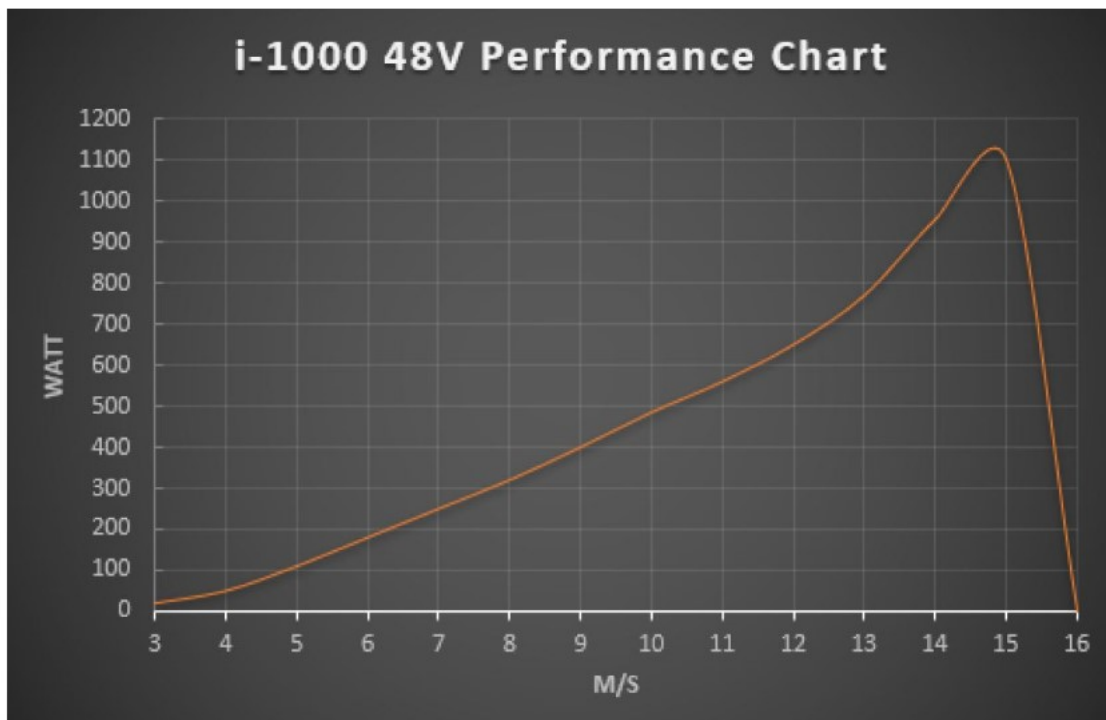


Pientuulivoimalan hinta on 899 € ilman lataussäädintä. Lataussäädin maksaa 790 € ja yhteensä sekä voimala että lataussäädin maksaa 1 689 €. Asennusmasto ei sisälly hintaan, joten sen joutuu ostamaan erikseen mikä lisää voimalan hintaa. Roottorin halkaisija on 225 cm ja koko voimalan paino 25 kg. Voimala lähtee käyntiin tuulennopeuden ollessa 2 m/s ja toimii aina 60 m/s asti. Tuulivoimalalle merkitty ihannenopeus sivuston mukaan on 12,5 m/s. Kuva 16 kertoo paljonko energiaa pientuulivoimala tuottaa milläkin tuulennopeudella. Eriskummallista kuvassa on se, että se on merkitty 48 voltin voimalalle, vaikka kyseinen

voimala on 24 voltin. Kyseessä voi olla valmistajan virhe tai sitten molemmat voimalat tuottavat saman verran energiaa. Kuvasta huomataan se, että vaikka voimalalle on merkitty nimellistehoksi 1 kW tuulivoimala tuottaa nimellistehonsa vasta kun tuulee yli 14 m/s mikä tarkoittaa jo varsin kovaa tuulta. Toinen huomioitava asia on se, että tuulivoimalalle on merkitty ihannenopeudeksi 12,5 m/s mikä riittää kuvan 16 mukaan vain 700 watile eli voimala ei tuota nimellistehoansa ihannenopeudellaan. Sivuston mukaan pientuulivoimala kestää jopa 60 m/s tuulen mikä on vaikeata uskoa sillä yli 33 m/s tuuli luokitellaan hirmumyrskyksi, joka voi kaataa taloja. (Saaristotekniika, n.d. -c)

Kuva 16. Ista Breeze pientuulivoimalan tuottama teho eri tuulennopeuksilla.

(Saaristotekniika, n.d. -c)



3.1.3 Mytools vaaka-akselinen

Kolmas vertailtava pientuulivoimalan valmistaja on Mytools ja sitä myydään Cdonissa.

Kyseinen pientuulivoimala on kuusi lapainen, vaaka-akselinen ja se maksaa 676 €. Roottorin halkaisija on 1,14 m ja lavat on tehty nailonkuidusta sekä kuori alumiiniseoksesta. Voimalan ihannetuulennopeudeksi on merkitty 13 m/s ja käynnistysnopeudeksi 2 m/s.

Käyttölämpötilaksi on merkitty -40°C ja +80°C välillä. Sivuston mukaan voimalasta ei pitäisi aiheutua paljoa melua. Pakkauksessa tulee mukana tuulivoimalan osat sekä MPPT hybridiohjain mutta sivustolla ei mainita mitään asennustangosta mikä todennäköisesti joudutaan ostamaan erikseen. Pientuulivoimala on esitetty kuvassa 17. (Cdon, n.d. -a)

Kuva 17. Mytoolsin kuusi lapainen pientuulivoimala (Cdon, n.d. -a)



3.1.4 Mytools pysty akselinen

Neljäs vertailtava pientuulivoimala on Mytoolsin valmistama ja se on ostettavissa Cdonista. Toisin kuin kolmas tuulivoimala neljäs on pysty akselinen ja siinä on viisi lapaa. Tuulivoimalan hinta on 660 € ja se muistuttaa hieman Darrieus-tyyppistä voimalaa. Sivustolla on luvattu voimalalle 20 vuoden käyttöikä. Turbiinin halkaisija on 84 cm. Voimalan käynnistystuulenoisuus on 2 m/s, nimellistuulenoisuus 13 m/s, voimala tuottaa sähköä 25 m/s asti ja sen pitäisi kestää 60 m/s tuulen. Lavat on valmistettu nylonkuidusta ja käyttölämpötilaksi on merkitty -40°C ja $+80^{\circ}\text{C}$. Kyseinen voimala on esitetty kuvassa 18. (Cdon, n.d. -b)

Kuva 18. Mytools viisilapainen pysty akselinen tuulivoimala (Cdon, n.d. -b)



3.1.5 MasterX

Viides vertailtava voimala on Tesupin valmistama ja myymä MasterX-pientuulivoimala. Kyseinen voimala on vaaka-akselinen, siinä on kolme lapa. Pelkän voimalan hinta on 890 € ja kiinnitystangon 100 € eli yhteensä 990 €. Hintaan ei ole myöskään lisätty akkua, joka lisää 150 € voimalan hintaan ja mikäli voimala halutaan yhdistää kotiin se maksaa 1 070 € eli voimalasta voi joutua maksamaan maksimissaan 2 060 € yli tuplasti lähtöhinnan. MasterX tuulivoimala on esitetty kuvassa 19. (Tesup, n.d.)

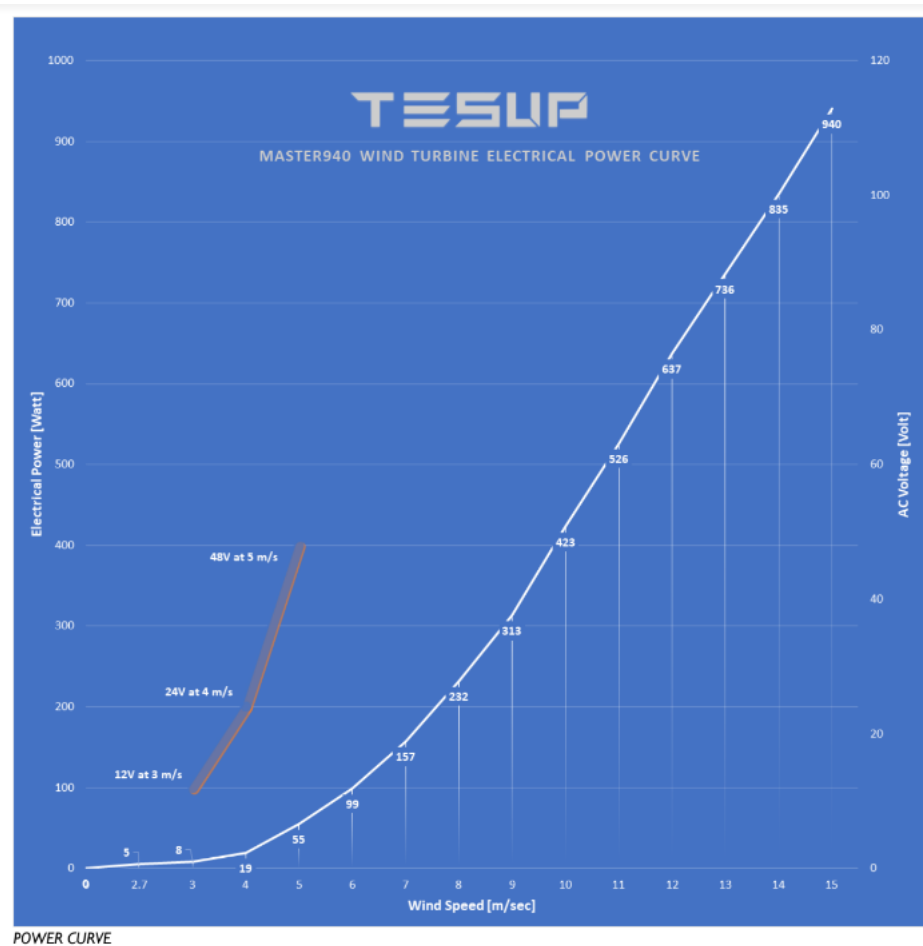
Kuva 19. Tesupin MasterX-pientuulivoimala (Tesup, n.d.)



MasterX-pientuulivoimalan painaa 9 kg ja yksittäinen lapa 200 g. Pientuulivoimala on valmistettu pääosin alumiinista ja lavat muovista. Lapojen halkaisija on 1,6 m. Käynnistystuulenoisuus voimalalle on 2 m/s, maksimi kierrosnopeus on 1500 rpm ja se tuottaa 35 dB ääntä. Voimala kestää -25°C ja +40°C lämpötilan. Voimalan käyttöohjeen mukaan voimalan tuottaa maksimissaan vain 940 W kun tuulenoisuus on 15 m/s vaikka

pientuulivoimala markkinoidaan 1 kW voimalana. MasterX-pientuulivoimalan tuottama teho on esitetty kuvassa 20. (Tesup, 2020, s. 12–16)

Kuva 20. MasterX-pientuulivoimalan tuottama teho eri tuulennopeuksilla (Tesup, 2020 s. 13)



3.1.6 AirForce 1

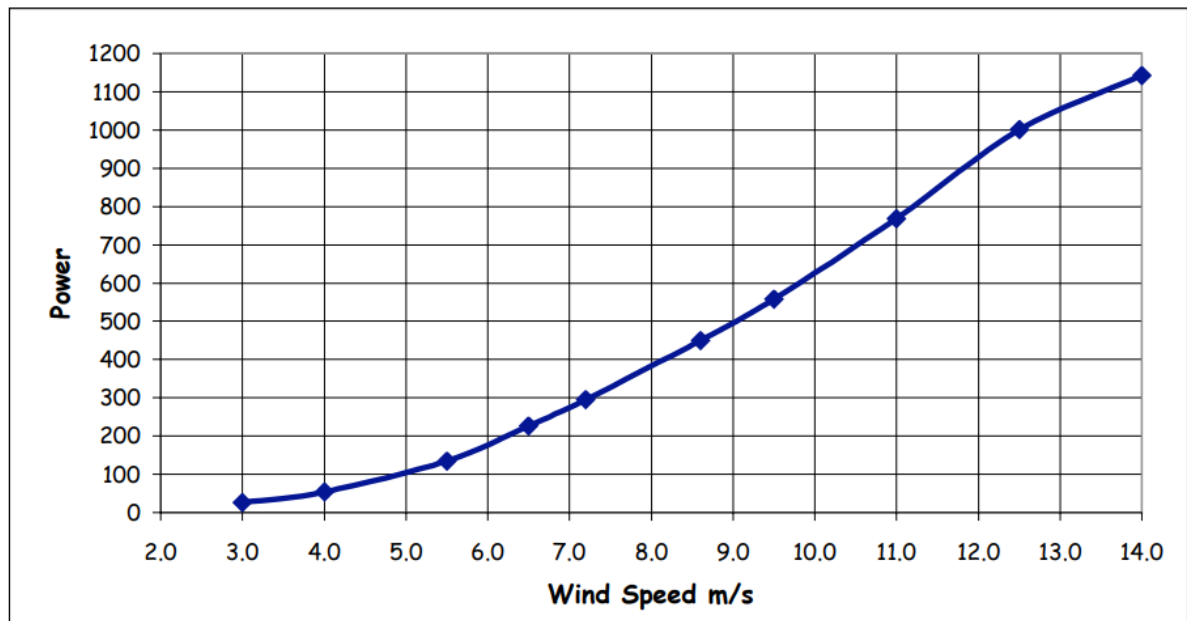
Kuudentena ja viimeisenä pientuulivoimalana vertailussa on Voltaconin myymä Futurenergyn AirForce 1 merkinen pientuulivoimala. Voimala on vaaka-akselinen ja kolmilapainen. Lähtönopeus turbiinille on 3.5 m/s, ihannetuulenopeus 12.5 m/s ja sen pitäisi kestää aina 52 m/s asti. Itse turbiini painaa 19 kg ja lapojen säde n 1.8 m. Kierrosnopeus voimalalle vaihtelee 200 ja 800 välillä. Lavat on valmistettu nylonista ja käyttöikä voimalalla on noin 20 vuotta. Voltacon on brittiläinen verkkokauppa, joten sen toimitus voi olla hieman pitempi kuin muissa voimaloissa ja se maksaa 2 925 puntaa eli noin 3 350 euroa. Lisäksi verkkosivuston otsikossa lukee, että kyseinen voimala olisi 48 voltin mutta tuotteen tiedoissa lukee, että voimala olisi 24 voltin voimala. Kyseinen voimala on esitetty kuvassa 21. (Voltacon, n.d.)

Kuva 21. Futureenergy AirForce 1 (Voltacon, n.d.)



Futurenergyn tuulivoimaloiden tuottama teho eri tuulennopeuksilla on esitetty kuvassa 22. Kyseinen kuva näyttää 24 voltin voimala tuoton. Kuvan mukaan voimala tuottaa hieman yli nimellistehonsa, kun tuulee yli 12.5 m/s. (Futurenergy, 2017)

Kuva 22. Futurenergyn 24 voltin pientuulivoimalan tuottama teho eri tuulennopeuksilla (Futurenergy, 2017)



3.2 Tuulivoimalavertailun analysointi

Kaikki vertailtavat pientuulivoimalat on koottu taulukkoon 3. Taulukkoon on pyritty tuomaan esille vain kaikista tärkeimmät asiat pientuulivoimaloista. Taulukon perusteella pyritään selvittämään mikä pientuulivoimaloista olisi paras ratkaisu.

Taulukko 3. Tuulivoimalavertailu

	Hinta €	Käynnistys- tuulen- nopeus m/s	Ihanne- tuulen- nopeus m/s	Roottorin Halkaisija cm	Lapojen määrä
Silentmill	2 990	1,8	10	170	3
Ista Breeze	899 (1 689)	2	14,2	225	3
Mytools vaaka	676	2	13	114	6
Mytools pysty	660	2	13	84	5
MasterX	890 (2 060)	2	15	160	3
AirForce 1	3 350	3,5	12,5	180	3

Valituista pientuulivoimaloista taulukon 3 mukaan paras on Ista Breeze. Turbiini on kolmanneksi halvin, mikäli maksetaan suurin mahdollinen määrä mitä pientuulivoimalasta. Mikäli verrataan pelkkien pientuulivoimaloiden hintoja MasterX 9 € halvempi kuin Ista Breeze joka maksaa 899 €. Silentmill ja AirForce 1 ovat molemmat selvästi kalliimpia kuin muut. Mytools pientuulivoimalat ovat halvimpia mutta ne ovat samalla myös pienimpiä, joten ne tuottavat loppujen lopuksi paljon vähemmän sähköä. Ista Breeze on kaikista vertailtavista pientuulivoimaloista suurin ja melkein kaksi kertaa suurempi kuin Mytoolsin vaaka-akselinen voimala. Vaikka Silentmill ja AriForce 1 ovat kalleimpia oletuksena myös on, että ne ovat kestävimpiä, kun taas toisaalta Mytools-turbiinit ovat halpoja ja oletettavasti ne myös rikkoutuvat helpommin. Tästä syystä Ista Breeze ja MasterX, jotka ovat molemmat keskivaiheilla hinnan suhteen, ovat molemmat oletettavasti kestävimpiä kuin Mytools-turbiinit mutta eivät yhtä kalliita kuin Silentmill tai AirForce 1.

Silentmill-turbiinilla on alhaisin käynnistysnopeus, kun taas AirForce 1-turbiinilla on korkein, Silentmill-turbiini on kuitenkin vaaka-akselinen, paljon kalliimpi ja pienempi kuin Ista Breeze. Kuvan 11 perusteella kolmilapainen vaaka-akselinen tuulivoimala on kaikista tehokkain ratkaisu, mikä tekee Ista Breezestä myös parhaan vaihtoehdon. Huonoina puolina Ista Breeze-turbiinissa on se tuottaa nimellistehonsa varsin korkealla tuulenopeudella. Tosin MasterX tarvitsee sitäkin korkeamman tuulenopeuden ja silloinkin se pystyy tuottamaan vain 940 wattia. Ista Breeze-turbiiniin ei sisälly asennustankoa, joten se lisää turbiinin hintaa ja vaikka turbiini maksaa varsin paljon lataussäätimen kanssa se on silti paljon halvempi kuin Silentmill tai AirForce 1. Sivustolla mainostetaan Ista Breeze-turbiini hiljaisena mutta mitään tiettyä desibeli määrää ei ole missään annettu toisin kuin toisissa pientuulivoimaloissa.

Toisaalta Silentmill-turbiinikin on hyvä ratkaisu. Sillä on alhaisin käynnistys- ja ihannetuulenopeus sekä se tuottaa sähköä aina 25 m/s asti kun taas Ista Breezen tuotto romahtaa 15 m/s jälkeen. Silentmill-turbiini on myös markkinoitu hiljaisena pientuulivoimalana ja vaikka vain Silentmill- ja MasterX-turbiineissa on ilmoitettu voimalan tuottama desibeli määrä Silentmill on näistä kahdesta hiljaisempi.

4 Tuulivoiman integrointi sähköntuottojärjestelmään

Kuvassa 23 on HAMKilla on Valkeakosken kampuksen pihalla sijaitseva valkoinen talo. Valkoisessa talossa on aurinkosähköjärjestelmä ja sitä käytetään usein erilaisissa projekteissa tai opinnäytetoissa. Luvussa 4.1 esitellään valkoisen talon aurinkosähköjärjestelmä ja käydään hieman läpi, miten se toimii. Luvussa 4.2 koitetaan luoda suunnitelma, miten luvussa 3 valittu pientuulivoimala voitaisiin kytkeä aurinkosähköjärjestelmään.

Kuva 23. Valkoinen talo HAMKin Valkeakosken kampuksella



4.1 Olemassa oleva aurinkosähköjärjestelmä

Aurinkopaneeleina HAMKilla on käytössä ranskalaisen DualSunin Spring 425 Shingle Black -aurinkopaneeli. Paneelit ovat hybridejä eli niistä saadaan sekä aurinkosähköä että -lämpöä. Lämmitys on integroitu paneeliin, vettä käytetään aurinkopaneelin jäähdyttämiseen mikä tuottaa lämpöä. Aurinkopaneeli ja sen toiminta on kuvailtu kuvassa 24. Paneeli käyttää lämmönsiirrin nestettä lämpöenergian siirtämiseen tai varastoitumiseen. Aurinkosähkö ja -lämpö tarvitsevat auringonvaloa mitä ei Suomessa varsinkaan talviaikaan ole paljoa saatavilla. Tästä syystä pientuulivoimala sopisi hyvin aurinkosähkö järjestelmän kanssa sillä tuulivoima tuottaa enemmän sähköä talvisin. Aurinkopaneelit tuottavat enemmän lämpöä kuin sähköä. (DualSun, 2022, s. 6)

Kuva 24. DualSun Spring hybridi aurinkopaneeli (DualSun, 2022, s.7)



1. **Photovoltaic solar cells** : monocrystalline, high efficiency, they are cooled by the circulation of water
2. **Heat exchanger** : fully integrated into the panel, it allows excellent heat transfer between the photovoltaic front panel and the circulation of water.

Invertterinä valkoisessa talossa on Froniuksen Symo Gen24 10.0 Plus. Invertterin tarkoitus on ottaa aurinkopaneelien tuottama tasavirta ja muuttaa se vaihtovirraksi. Tällöin aurinkopaneeleista saatu sähkö voidaan jakaa yleiseen sähköverkkoon tai varastoida akkuihin. Invertteri myös tarkkailee sähköverkkoa mahdollisten ongelmatilanteiden takia ja

kytkee sähkönsyötön pois päältä. Invertteri kytketään aurinkopaneelien, akkujen ja julkisen verkon risteyskohtaan ja sillä säädetään mihin aurinkopaneeleista saatu sähkö käytetään. Koululla oleva invertteri on esitetty kuvassa 25. (Fronius, n.d., s. 13)

Kuva 25. Froniuksen Gen 24 invertteri



HAMKin valkoisessa talossa akustona toimii PV BYD Battery-Box Premium HVS 7.7. Akku on esiteöty kuvassa 26. HVS-mallisen akun maksimi virta on 25 A kun taas HVM-mallisella akulla on 50 A. HVS 7.7-merkkisessä akussa on 3 moduulia, se varastoi 7.68 kWh energiaa ja sen käyttö jännite on 240–360 V. (BYD, n.d., s. 45)

Kuva 26. BYD B-Box Premium HVS 7.7 akusto (Onninen, n.d.)

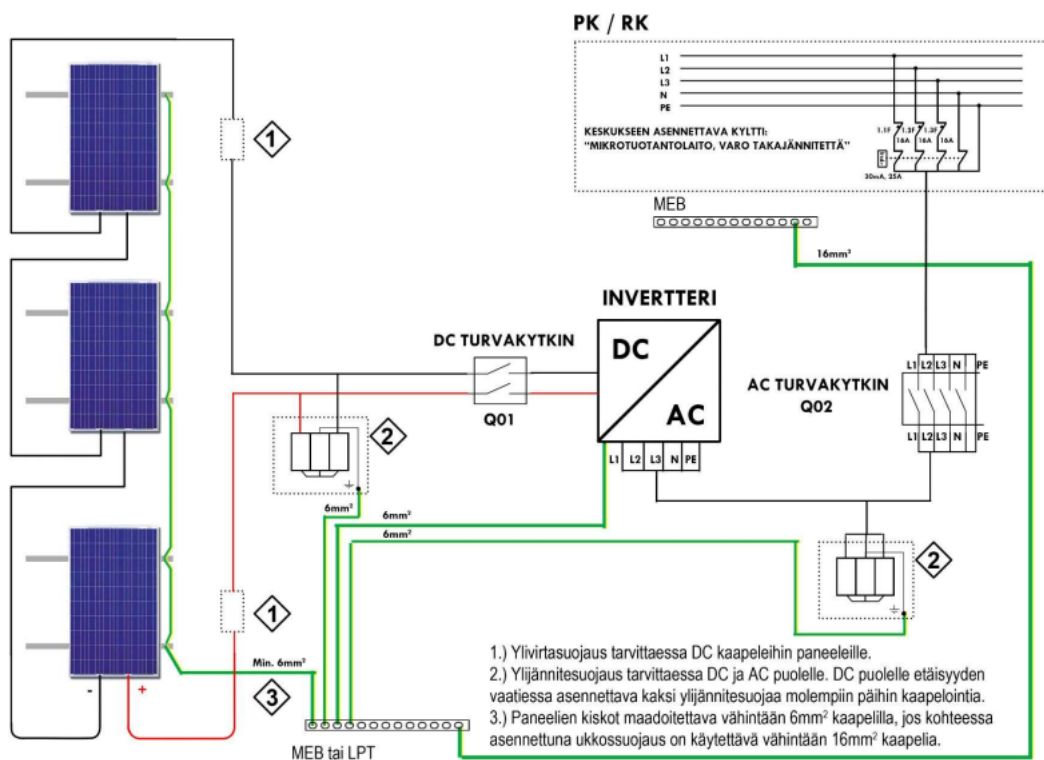


4.2 Tuulivoimalan integroinnin toteutussuunnitelma

Tuulivoimalan sijoituksessa tärkeimpänä on se, kuinka paljon tuulee, joten tarkan sijainnin pientuulivoimalan asennukselle pitäisi selvittää laajoilla mittauksilla. Todennäköisin sijoitus paikka pientuulivoimalalle olisi joko A- tai B-talon katolla. Mikäli pientuulivoimala asennettaisiin B-talon katolle, pitäisi varmistaa, että johdot riittävät valkoiseen taloon sillä se on kauempana kuin A-talo. Lisäksi olisi hyvä varmistaa, että maston tukivaijerit saisi kiinnitettyä kattoon.

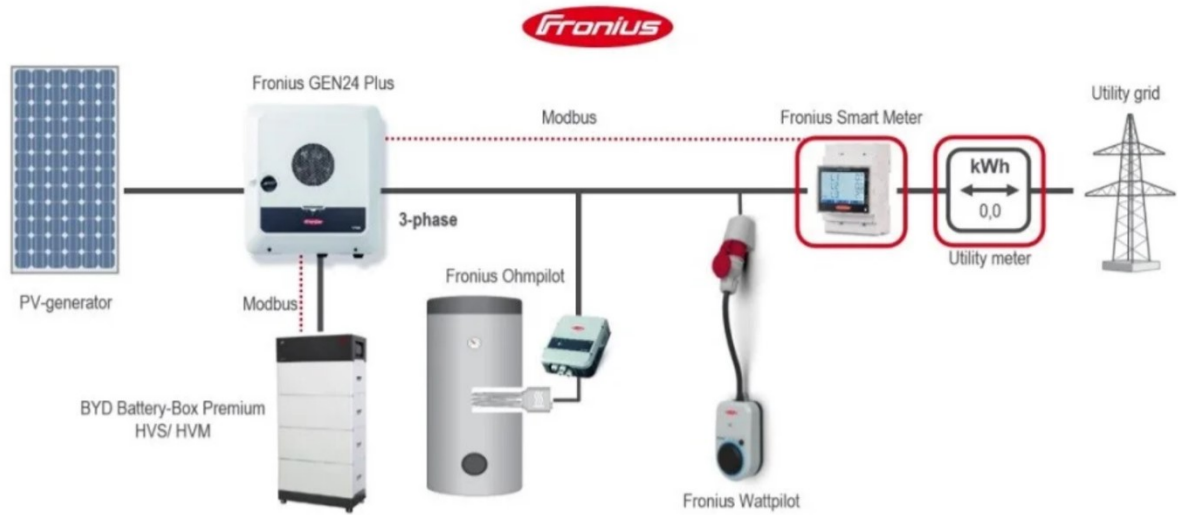
Kuvassa 27 on esitelty, miten aurinkopaneelit yhdistetään invertteriin. Invertteri muuttaa aurinkopaneelien tuottaman tasavirran vaihtovirraksi, jolloin se voidaan kytkeä akustoon tai sähköverkkoon.

Kuva 27. 3-vaiheisen aurinkosähköjärjestelmän kytkentäkaavio (Koivisto, 2018, s. 19)



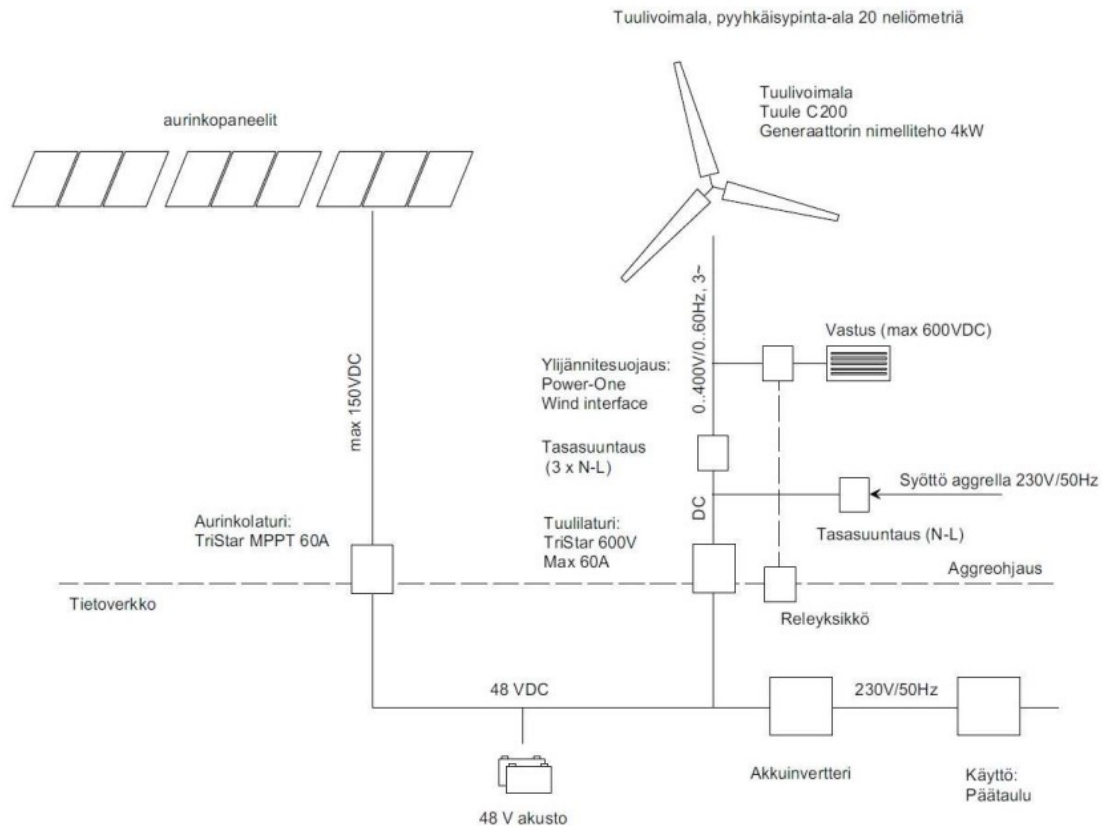
Kuvassa 28 vasemmalla esitetään miten aurinkopaneelit sekä Froniuksen invertteri ja akusto liittyvät toisiinsa. Invertteri on kytketty mittarien kautta sähköverkkoon. Lisäksi samaan järjestelmään voidaan liittää esim. sähköauton latauspiste.

Kuva 28. Froniuksen aurinkopaneelijärjestelmä. (NordSolar, n.d.)



Kuvassa 29 on esitelty, miten pientuulivoimala voitaisiin liittää aurinkosähköjärjestelmään ja mitä laitteita järjestelmä tarvitsisi. Kuvassa esitelty tuulivoimala on 4 kW, jonka siiven pituus on noin 2,5 metriä.

Kuva 29. Aurinkosähkö ja tuulivoima hybridijärjestelmä (Kangas, 2015, s. 41)



5 Yhteenveto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutustua tuulivoimaan ja sen perusteella pyrkiä selvittämään mikä pientuulivoimala sopisi HAMKille vertailun avulla. Huomioitavaa opinnäytetyössä on se, että tuulivoimalavertailu oli vahvasti riippuvainen siitä mitä voimaloiden valmistajat ja verkkosivustot halusivat jakaa voimaloistaan. Parhaimman pientuulivoimalan saisi selville vain ostamalla ja testaamalla jokainen vertailuun valittu pientuulivoimala. Vertailun lopputulos on vain arvio sen perusteella mitä pientuulivoimaloista kerrottiin. Tuulivoiman toimintaa ja rakennetta käytiin läpi luvussa 2 ja se auttoi parhaan pientuulivoimalan valitsemisessa. Työssä opittiin paljon tuulivoimasta ja saatiin selville, että tuulivoima on varsin hyvä energiantuotanto ratkaisu. Tuulivoiman monet positiiviset puolet syrjäyttävät muutamat negatiiviset puolet. Monet väittävät tuulivoimaloiden olevan häiritseviä ja äänekkäitä, mutta tutkimusten mukaan asia on aivan päinvastoin. Tämän opinnäytetyön perusteella voi sanoa sen että tuulivoima on kannattavaa ja suositeltavaa.

Lähteet

- ABB. (2011). *Technical Application Papers No. 13 Wind power plants*.
<https://library.e.abb.com/public/92faf0c1913f5651c1257937002f88e8/1SDC007112G0201.pdf>
- BYD. (n.d.). *Battery-Box Premium Operating Manual*. <https://kesko-onninen-pim-resources-production.s3-eu-west-1.amazonaws.com/pimdocuments/20688594.pdf>
- Castellani, F., Astolfi, D., Peppoloni, M., Natili, F., Buttà, D., & Hirschl, A. (2019). *Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System of Residential Use*. *Machines*. <https://doi.org/10.3390/machines7020035>
- Cdon. (n.d. -a). *Tuulivoimala – Tuulimyly – Sähkögeneraattori – 12V – 1000w – 6 lapa - MPPT-hybridisäätimellä varustettuna* https://cdon.fi/rakentaminen-tyokalut/tuulivoimala-tuulimyly-sahkogeneraattori-12v-1000w-6-lapa-mppt-hybridisaatimella-varustettuna-p109122442?gclid=EAlaIqobChMIqrnG2dz2-gIVRvgYCh1tFg-IEAQYBCABEgls_PD_BwE&gclsrc=aw.ds
- Cdon. (n.d. -b). *Tuuliturbiini – Pystysuora tuuliturbiini -Sähkögeneraattori – 12V – 1000w – 5 lapa – MPPT-hybridisäätimellä varustettuna* <https://cdon.fi/rakentaminen-tyokalut/vindturbin-vertikal-elgenerator-12v-1000w-5-blad-mppt-hybrid-c106097146053025>
- DualSun. (2022). *Installation, use, maintenance manual DualSun SPRING*
<https://my.dualsun.com/wp-content/uploads/sites/2/DualSun-EN-Installation-use-maintenance-manual-SPRING.pdf>
- Energiateollisuus RY. (2021). *Suomalaisten energia-asenteet 2021*.
<https://energia.fi/meista/tutkimus/energia-asenteet>
- Fronius. (n.d.). *Fronius Symo GEN24 6.0 Plus / 8.0 Plus / 10.0 Plus - Käyttöohje* <https://kesko-onninen-pim-resources-production.s3-eu-west-1.amazonaws.com/pimdocuments/16915197.pdf>
- Futureenergy. (2017). *Wind Turbine Performance Data*. <https://futureenergy.co.uk/wp-content/uploads/2017/05/af1-24v-turbine-spec-power-curve.pdf>
- Ilmatieteen Laitos. (2021). *Tuulet ja myrskyt*. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuulet>
- Kangas, J. (2015). *Pientuulivoima osana hybridi-sähköntuotantojärjestelmää*. [opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201505087043>

Koivisto, A. (2018). *Aurinkosähkö – Maahantuojan näkökulma*. Onninen.

<https://sary.fi/images/2018/pdf/Koivisto.pdf>

Korpela, A. (2016). *Tuulivoiman perusteet*. Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka.

Liikenne- ja viestintäministeriö, Hytönen K., Harju M., Piispanen J., Haulos S. (2012).

Tuulivoimaloiden vaikutukset liikenneturvallisuuteen. Selvitys etäisyysvaatimuksista tie-, rautatie-, meri- ja lentoliikenteen osalta. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-321-3>

Mattila, V. (2021). Tuulivoimalat tuotannosta kiertoon. *Energiautiset*, (4), 28–31.

NordSolar. (n.d.). *Fronius Wattlepilot GO 22 J latausasema.* <https://nordsolar.fi/tuote/fronius-wattlepilot-go-22-j-latausasema/>

North American Windpower. (2015). *Two-Bladed Wind Turbine Powers Texas Desalination Plant.* <https://nawindpower.com/two-bladed-wind-turbine-powers-texas-desalination-plant>

Onninen. (n.d.). *PV BYD B-BOX PREMIUM HVS 7.7 (7,68 KWH).* <https://www.onninen.fi/byd-pv-byd-b-box-premium-hvs-7-7-7-68-kwh-/p/CLL158>

Saaristotekniikka. (n.d. -a). *LUE OPAS tuulivoimaloista.*

<https://verkkokauppa.saaristotekniikka.com/product/199/lue-opas-tuulivoimaloista>

Saaristotekniikka. (n.d. -b). *Silentmill 1kW.*

<https://verkkokauppa.saaristotekniikka.com/product/500/1kw-pystytuulivoimala-silentmill>

Saaristotekniikka. (n.d. -c). *1 kW Tuulivoimala 24 volt ISTA BREEZE.*

<https://verkkokauppa.saaristotekniikka.com/product/142/1-kw-tuulivoimala-24-volt-ista-breeze>

Savonius, S. (1925). *The Wing-rotor in theory and practice*. Savonius & CO.

http://kho.unis.no/doc/savonius_kirja.pdf

Ståhle, R. (2022). Tuuli tuo rahaa kuntiin. *Sähkö & Tele*, (2), 16–17.

Suomen Tuulivoimayhdistys. (n.d. -a). *Talvella tuulee eniten.*

<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/talvella-tuulee-eniten>

Suomen Tuulivoimayhdistys. (n.d. -b). *Yleistä pientuulivoimasta.*

<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/pientuulivoima/yleista-pientuulivoimasta>

- Suomen Tuulivoimayhdistys. (n.d. -c). *Miksi tuulivoimaa*. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/miksi-tuulivoimaa>
- Tesup. (n.d.). *MasterX tuuliturbiini (valmistettu Euroopassa)* <https://www.tesup.fi/product-page/masterx-tuuliturbiini-kotiin-Suomi?gclid=EAIaIQobChMIj6y9yt72-gIVXQqiAx3X0QUiEAQYASABEgJrH D BwE>
- Tesup. (2020). *MasterX Wind Turbine User Manual*
<https://drive.google.com/file/d/1hA6DxXlfPnyRVIVs1bETfQb7j6VR4dr3/view>
- Turbinesinfo. (2019). *Darrieus Wind Turbines*. <https://www.turbinesinfo.com/darrieus-wind-turbines/>
- Turunen, A. (2016). Meluhaittojen kokeminen ja oireilu yhdeksällä tuulivoima-alueella Suomessa. *Ympäristö ja Terveys-lehti*, (5), 76–81.
- Voltacon. (n.d.). *1kW Wind Generator PMG – 48V Battery Charger*.
<https://voltaconsolar.com/1kw-wind-turbine-pmg-with-24.html>