

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

Luonnonkuitulujitetut komposiitit tuulienergian tuotannossa

Taipalsaarella 31.8.2011

Anna Keskisaari

0285662

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1 JOHDANTO.....	4
2 TUULIVOIMALAT	5
2.1 Tuulivoima tulevaisuudessa	5
2.2 Tuuliolot	5
2.3 Tuulivoiman historia	6
2.4 Tuulivoimalan rakenne	6
2.4.1 Pysty akselinen tuuliturbiini	8
2.4.2 Vaaka-akselinen tuuliturbiini	9
3 TUULIVOIMALAN MATERIAALI.....	12
4 LUONNONKUITUKOMPOSIITIT	14
4.1 Komposiitin valmistus.....	14
4.2 Luonnonkuitukomposiitin ominaisuudet.....	15
4.3 Muovit luonnonkuitukomposiitissa	16
4.4 Lujitekuidut luonnonkuitukomposiitissa	19
4.5 Täyteaineet luonnonkuitukomposiitissa	20
4.6 Komposiitin käyttökohteet	21
5 LUONNOKUITUKOMPOSIITTI TUULIVOIMALAN MATERIAALINA.....	23
5.1 Vaadittavat ominaisuudet	23
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	27
7 YHTEENVETO	30
LÄHTEET	32

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

kW	Kilowatti
MW	Megawatti
GW	Gigawatti
TWh	Terawattitunti
MPa	Megapascal

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos on saanut ihmiset nykyään ajattelemaan enemmän ympäristöä. Monessa asiassa, kuten myös energiantuotannossa, pyritään korostamaan ympäristöystävällisyyttä ja kierrätettävyyttä. Uusiutumattomien luonnonvarojen ehtyessä uusiutuvien energialähteiden etsimisestä ja kehittämisestä on tullut yhä tärkeämpää. Kierrätyksestä on myös tullut päivän sana, ja nykyisellään iso osa kaatopaikalle päätyvää jätettä voisi olla jo uusien tuotteiden rakennusaineita.

Viime vuosina monet ympäristöystävällisemmät ja kierrätettävämmät materiaalit ovat saaneet jalansijaa tuotannossa, ja näin on käynyt myös luonnonkuitulujitetuille komposiiteille. Usein lähes kokonaan kierrätettävästä materiaalista valmistettua komposiittia on alettu käyttää eri tuotteissa, sekä kestopuun, että muovin korvaajana. Vaikka luonnonkuiduilla lujitetut komposiitit eivät vedä vertoja kaikille muille lujitekuiduille, ympäristöystävällisyys ja kierrätettävyys ovat saaneet teollisuuden kiinnostumaan näistä kuiduista. Joissakin sovelluksissa jossa, lujuuden ei tarvitse olla huippuluokkaa, luonnonkuidut ovat vaihtoehto.

Tuulienergia lasketaan uusiutuviin energianlähteisiin. Tuulienergian tuotantolaitokset, eli tuulivoimalat eivät kuitenkaan ole yleensä rakennettu uusiutuvista tai kierrätettävistä materiaaleista. Luonnonkuitukomposiitin käytön myötä myös tuulivoimalan rakenteet voitaisiin saada ympäristöystävällisemmiksi.

Tämä kandidaatintyö on tehty teknillisen tiedekunnan puutekniikan laboratoriolle selvityksenä olisiko mahdollista käyttää luonnonkuitukomposiitteja tuulivoimalan rakenteissa.

2 TUULIVOIMALAT

Tuulienergian tuotanto lisääntyy koko ajan. Uusiutuvan energian tuotannon tarve kasvaa ja uusia tuotantomahdollisuuksia on parannettava. Tuulienergia on ympäristöystävällinen ja uusiutuva energian tuotantomuoto.

Tuuli saa voimansa auringon säteilyenergiasta. Tuulivoimalan avulla energia muutetaan sähköksi. Eli tuuli pyörittää voimalan lapoja ja lapojen pyörimisliike muutetaan sähköksi. (Suomen tuulivoimayhdistys ry)

2.1 Tuulivoima tulevaisuudessa

Valtio teki vuonna 2008 pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategian, joka koski myös tuulienergiaa. Vuoden 2008 120 MW:n tuotannon tasosta tuulienergian tuotanto olisi nostettava vuoteen 2020 2000 MW:iin. Sähköntuotannossa tämä vastaa noin 6 TWh vuodessa. (Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia 2008)

Euroopassa tuulienergian määrä kasvaa rajusti. Vuonna 1999 tuulienergian määrä Euroopassa on ollut 9500 MW. Vuodelle 2010 EWEA:n tavoitteena on ollut 50 GW ja tavoite vuodelle 2020 on 150 GW, josta rannikoilla sijaitsevien tuuliturbiinien osuus olisi 50 GW.

(Ancona and McVeigh 2010)

Maailman mittakaavassa vuonna 2007 oli The Global Wind Energy Council:n (GWEC) mukaan rakennettua tuulivoimaa 94 GW. Vuodelle 2012 arvioitu tuulivoiman osuus olisi jo 240 GW. Prosenttiosuuksilla tuulivoiman on arvioitu kattavan vuonna 2020 maailman sähköntuotannosta 11.5 -12.7 prosenttia ja vuonna 2030 20.2–24.9 prosenttia eli jopa neljännes koko maailman sähköntuotannosta. (Wind energy- the facts 2009)

2.2 Tuuliolot

Rannikon tuntumaan ja merelle rakennettavien tuuliturbiinien osuus on vielä vain noin prosentin luokkaa koko olemassa olevasta tuulivoimalakapasiteettista. Koska tuuli on voimakkainta usein rannikoilla, rannan läheisyyteen sijoitettavat tuulivoimalat olisivat maalle

sijoitettavia tuulivoimaloita huomattavasti tehokkaampia. Toistaiseksi veteen asennettavia tuulivoimaloita on vähän, mutta kasvua tapahtuu koko ajan. Rakenteellisten seikkojen takia veteen rakennettavien tuulivoimaloiden kustannukset ovat suurempia kuin maalle rakennettavien. Kuitenkin saavutettava hyöty vedessä olevista tuulivoimaloista on sen verran suuri, että asiaan kannattaa panostaa. Toistaiseksi voimaloita on pystytetty matalahkoon veteen (enintään 20 metriä) ja alle 20 kilometrin päähän rannikosta.

(Wind energy- the facts 2009)

Suomessa on kehitetty tuuliatlas tuulienergiakartasto kuvaamaan Suomen tuulioloja. Tämän työkalun avulla on pystytty määrittämään vuotuiset tuuliolosuhteet eri puolilla Suomea. Tuuliatlaksen avulla pystytään optimoimaan Suomen tuulivoimaloiden paikat. (Suomen tuuliatlas)

Suomen tuuliolot vaihtelevat vuodenaajoista riippuen, kesällä tuulee vähemmän kuin talvella. Tuulen nopeus kasvaa ylöspäin mentäessä, eli tuntureilla tuulee tasamaata enemmän. Myös merialueilla tuulennopeus on tasamaata suurempi. (Suomen tuuliatlas)

2.3 Tuulivoiman historia

Ensimmäisiä vaaka-akselisia tuulimyllyjä käytettiin Persiassa, Kiinassa ja Tiibetissä. Lähi-idän kautta tuulimyllyt levisivät välimeren maihin ja Keski-Eurooppaan. Tuulimyllyn yläosa oli kääntyvä, jolloin lavat käännettiin aina tuulen suuntaan. Euroopassa tuulimyllyjä käytettiin veden pumppaamiseen, jyvien jauhamiseen sekä soiden ja järvien tyhjentämiseen. 1800-luvulla esimerkiksi alankomaissa jopa 90 prosenttia teollisuuden käyttämästä energiasta saatiin tuulimyllyistä. Teollistumisen myötä tuulimyllyt hävisivät Euroopasta, ja niitä alettiin rakentaa Pohjois-Amerikkaan. Pohjois-Amerikassa pieniä tuulimyllyjä käytettiin veden pumppaamiseen. Pohjois-Amerikan malli poikkesi hieman Euroopassa käytössä olleesta mallista. Tuulivoimala saatettiin jättää vartioimatta kovallakin tuulella sen rikkoutumatta. Euroopan mallissa lavat oli myrskyn aikaa käännettävä, ettei tuulimylly hajoaisi. (Ackermann 2005)

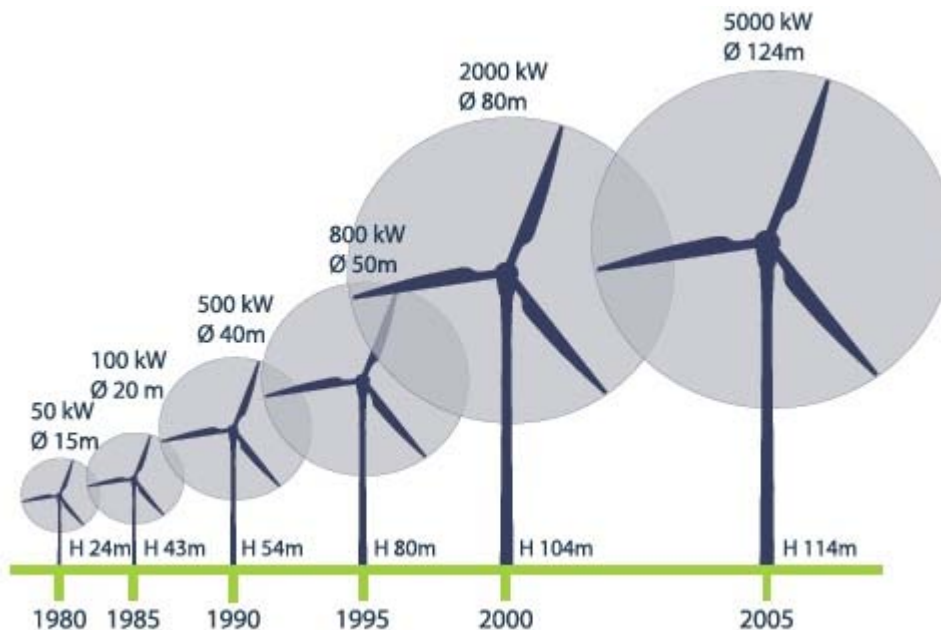
2.4 Tuulivoimalan rakenne

Tuulivoimala voi olla joko vaaka-akselinen tai pystyakselinen. Yleisemmin käytetty on vaaka-akselinen tuuliturbiini. (Suomen tuulivoimayhdistys ry)

Pystyakselisessa tuuliturbiinissa kuten savonius- tuuliturbiinissa voima tuulivoimalan pyörittämiseen syntyy nostovoiman ja vastuseron avulla. Pystyakselisen tuulivoimalan etuna on toimivuus heikoillakin tuulilla. Silti suuria voimaloita ei pystyakselisena ole rakennettu, koska voimalan paino suhteessa tuotettuun energiaan nousee liian suureksi. (Suomen tuulivoimayhdistys ry)

Vaaka-akseliset tuulivoimalan etu suhteessa pystyakseliseen on tehon suhde painoon. Tuulivoimaloiden lapojen pyyhkäisyala on suuri verrattuna voimalan massaan. Tällä tavalla saadaan siis enemmän tehoa suhteessa voimalan massaan kuin pystyakselisessa tuulivoimalassa. (Suomen tuulivoimayhdistys ry)

Tuulivoimaloiden koot ovat kasvaneet viime vuosina, kuten kuvasta 1 käy ilmi. Viimeisen kahdenkymmenenviiden vuoden aikana tuulivoimalasta saatu teho on kymmenkertaistunut ja lapojen halkaisijakin on lähes kymmenkertaistunut. Vuonna vaaka-akselisen 1980 turbiinin roottorin halkaisijat olivat 15 metriä ja teho 50 kW. (Manwell et al. 2002)



Kuva 1. Tuulivoimaloiden koon kasvu viime vuosikymmeninä. (Terra magnetica)

Nykyisin suurin rakennettu tuuliturbiini sijaitsee Saksan Emdenissä. Halkaisijaltaan tämä turbiini on 126 metriä ja pystyy tuottamaan yli 7 Megawatin(MW) tehon, vastaten teholtaan 5000 omakotitalon sähköntarvetta. (Justin 2008)

2.4.1 Pystyakselinen tuuliturbiini

Pystyakselinen tuuliturbiini on toinen tuuliturbiinin päätyypeistä. Kuvassa 2 näkyy pystyakselisen tuuliturbiinin rakenne.



Kuva 2. Pystyakselinen tuuliturbiini. (GALE wind turbine)

Pystyakselinen tuuliturbiini on vanhempi rakennelma kuin vaaka-akselinen tuuliturbiini. Kuitenkin vuosisatojen aikana vaaka-akselinen on vienyt pystyakselisen tuuliturbiinin markkinoita selvästi, ja pystyakselisen tuuliturbiinin kehitys on näin ollen jäänyt vähälle. Kuitenkin viime vuosituhatosen alkupuolella on patentoitu kolme erityyppistä pystyakselista tuuliturbiinia. Savonius-tuuliturbiinin kehitti Sigurd Savonius ja se patentoitiin 1924 Suomessa. 1931 George Darrieux patentoi Darrieux-tuuliturbiinin Ranskassa. Vuonna 1979 Risto Joutsiniemi patentoi spiraalituuliturbiini Windsiden Suomessa. (Äänettömät jäätyttömät tuulivoimalat säätövoimaksi sähköntuotantoon 2008)

Windside valmistaa nimeään kantavaa tuuliturbiinia vieläkin. Eroja vaaka-akseliseen tuuliturbiinin on tuulen hyödynnettävyys. Windsiden mukaan pystyakselinen tuuliturbiini pystyy hyödyntämään jo matalan 2m/s tuulen. Pystyakselinen tuuliturbiini ei ole herkkä myrskytuulille, vaan kestää yli 60 m/s puhaltavaa tuulta. Windsiden tuuliturbiini on valmistajan mukaan äänetön, eikä rakenteensa vuoksi ole vaarallinen linnuille. (Äänettömät jäätyttömät tuulivoimalat säätövoimaksi sähköntuotantoon 2008)

Suomessa pystymallisia tuulivoimaloita on rakennettu muutamia esimerkiksi Raision kauppakeskus myllyyn, jossa kaksi pystyakselista tuuliturbiinia tuottivat vuonna 2007 2713,57 kWh/m² kun tuulipinta-alaa oli 24 m². Tällä hetkellä Windside-tuuliturbiineja

rakennetaan muutaman metrin korkuisina, mutta mahdollisuudet olisivat valmistajan mukaan rakentaa turbiini jopa 50 x 200 metrin kokoisina. (Äänettömät jäätymättömät tuulivoimalat säätövoimaksi sähköntuotantoon 2008)

2.4.2 Vaaka-akselinen tuuliturbiini

Kuvassa 3 näkyy vaaka-akselisia tuuliturbiineja. Tämä turbiinimalli poikkeaa paljon toimintaperiaatteeltaan toisesta tuuliturbiinin päämallista, pystyakselisesta tuuliturbiinista.



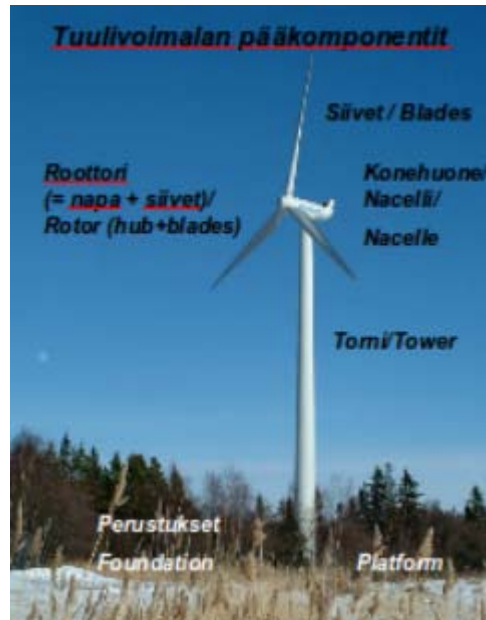
Kuva 3. Vaaka-akselinen tuuliturbiini. (Lehtikuva)

Vaaka-akselinen tuulivoimala koostuu muutamista peruskomponenteista. Nämä voimalan perusosat ovat torni, joka kiinnittyy perustuksiin. Tornin päässä on niin sanottu roottori, joka muodostuu siivistä ja navasta. Tämä osa on se, joka vastaanottaa tuulen. Konehuoneessa tekniikka muuttaa tuulen tuottaman energian joko sähköksi tai lämmöksi. (Suomen tuulivoimayhdistys ry)

Vaaka-akselisilla tuuliturbiineilla on tietty toiminta-alue. Suurien, noin megawattien kokoisten voimaloiden lavat alkavat pyöriä tuulenopeuden ollessa 3-4 m/s. Tuulen nopeuden ylittäessä noin 25 m/s voimaloiden lavat täytyy pysäyttää voimalan rikkoontumisen

estämiseksi. Toiminta-alue vaaka-akselisilla voimaloilla on siis tuulennopeusalueella 4-25 m/s. (Suomen tuuliatlas)

Kuvassa neljä näkyy vaaka-akselisen tuulivoimalan pääkomponentit, joista voimala koostuu.

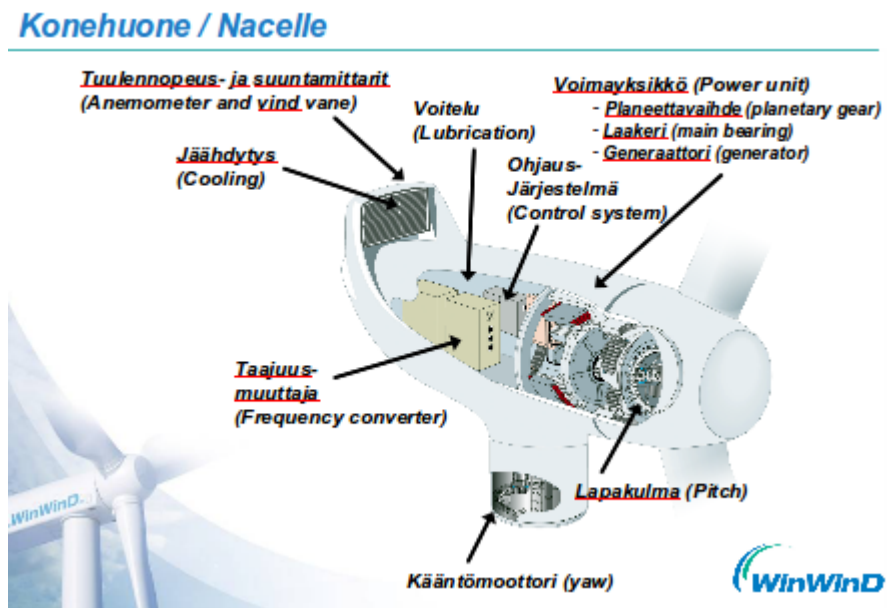


Kuva 4. Tuulivoimalan pääkomponentit. (Suomen tuulivoimayhdistys ry)

Yleisimmin tuulivoimaloissa on kolme lapaa. Kolmelapainen järjestelmä on pyörähdyssymmetrisesti tasapainossa ja massahitusvoimien suhteen tasapainossa. Kaksi- tai yksilapaisessa voimalassa ilmenee ongelmia kun roottoria käännetään tuuleen päin. Johtuen massahitusvoimien eroista vaaka- ja pystyakselin suhteen koneistoon kohdistuu koneistoa rasittavaa värinää kun roottoria käännetään. Kolme lapaa on optimaalisin määrä myös energian tuotannon suhteen. Lapojen määrän mennessä yli kolmen, ei energian tuotanto lisääntynyt merkittävästi. (Suomen tuulivoimayhdistys ry)

Kärkinopeussuhde on voimalan lapojen kappalemäärän määräävä tekijä. Kärkinopeussuhde ja nostovoimakertoimen määrittelevät lapojen yhteen lasketun leveyden suhteen koko pyörähdyspinta-alaan eli pyyhkäisyalaan. Hitaasti pyörivän voimalaitoksen lapojen yhteen laskettu leveys pitää olla suuri, nopeasti pyörivässä voimalassa pieni. Voimaloita, joissa on enemmän kuin kolme lapaa, käytetään lähinnä veden pumppaamiseen ja viljan jauhamiseen. (Suomen tuulivoimayhdistys ry)

Tuulivoimalan roottori sijoitetaan nykyisellään yleensä tuulen yläpuolelle. Vielä 80- luvulla roottori sijoitettiin usein mastoon nähden tuulen alapuolelle, mutta se toi usein melu- sekä turbulenssiongelmia. Konehuoneessa vaihteisto säätää roottorin kierrosluvun sopivaksi generaattorille jonka taajuus on sama sähköverkon kanssa. Konehuoneesta löytyy myös esimerkiksi suuntamittarit joiden avulla konehuone voidaan säätää tuulen suuntaan. (Tuulivoiman projektiopas 1999)



Kuva 5. Vaaka-akselisen tuuliturbiinin konehuone. (Suomen tuulivoimayhdistys ry)

3 TUULIVOIMALAN MATERIAALI

Materiaalinvalinta on tärkeä tekijää tuulivoimalaa rakennettaessa. Tarkoituksena on saada mahdollisimman kevyt ja kestävä rakenne. Tuulivoimalan koosta riippuen käytetään eri osissa eri materiaaleja. Luonnonkuitukomposiittien mahdolliset käyttökohteet tuulivoimaloissa olisivat lavoissa ja ehkä myös itse tornissa. Lavoissa käytetään tällä hetkellä lasikuitua, hiilikuidulla vahvistettua muovia ja puu-epoksilaminaattia. Torni tehdään useimmiten teräksestä, mutta myös alumiinia ja betonia käytetään. Pienissä tuulivoimaloissa käytetään usein alumiinia eri osissa, suuremmissa käytetään enemmän terästä sen parempien lujuusominaisuuksien takia. (Ancona & McVeigh 2010) Materiaaleille asetetaan paljon vaatimuksia varsinkin tuulimyllyjen koon kasvaessa. Materiaalilta vaaditaan hyvää väsymislujutta, kovuutta ja sitkeyttä, kimmoisuutta ja työstettävyyttä. (Manwell et al. 2002)

Tuulivoimalan lavat ovat useimmiten lasikuitua johtuen juuri lasikuidun sopivista ominaisuuksista kyseiseen kohteeseen. Lasikuitulujitetun muovin käyttöä lavoissa puoltaa materiaalin hyvä ominaislujuus- ja jäykkyys sekä keveys. Muilla käytettävissä olevilla materiaaleilla olisi hankala valmistaa yhtä kevyitä rakenteita. 55–60 metrisen tuulivoimalan (5 MW) siiven painoksi tulee 20 tonnia ja jo 30–32 metrisen siiven painokin on jo 5 tonnia, joten materiaalilta vaaditaan paljon. Kun siiven pituus ylittää 40 metriä, lasikuitukaan ei enää ole riittävän lujaa, vaan joukkoon täytyy laittaa myös hiilikuitua vähentämään siiven painoa, ja saamaan rakenteesta riittävän lujan. (Saarela et al. 2003)

Käytettävä lasikuitu on useimmiten E-lasikuitua, joka on edullista ja jolla on hyvä vetolujuus. Muovimatriisina lasikuidun kanssa käytetään tyydyttymättömiä polyestereitä, epokseja tai vinyylistereitä. (Manwell et al. 2002) Edellä mainituista tyydyttymättömät polyesterit ovat yleisimpiä matriiseja tuulivoimalakomponenteissa. Tyydyttymättömiä polyestereitä käytetään edullisen hinnan ja nopean kovettumisreaktion takia. Huonona ominaisuutena kuitenkin kahteen muuhun käytettävään matriisiin on suuri kutistuminen kuivuessa. Epoksit ovat vahvempia, kutistuvat vähemmän, mutta ovat myös verrattain kalliimpia kuin tyydyttymättömät polyesterit. Kuivumisaika epokseilla on myös pidempi kuin polyestereillä. Vinyylisterien käyttö on lisääntynyt viime vuosina. Ominaisuudet ovat samat kuin

epokseilla, mutta hinta on alhaisempi ja kuivumisaika nopeampi. Koska vinyyliesterit kestävät hyvin sääolosuhteiden vaihteluita, niitä on käytetty paljon merisovelluksissa. Tuulivoimaloissa voidaan käyttää myös hiilikuitua lujitekuituna. Hiilikuitukomposiitin kimmomoduli voi olla lähes kolminkertainen lasikuituun verrattuna ja veto sekä puristuslujuus ovat selvästi suuremmat. (Saarela et al. 2003) Hiilikuidun kallis hinta rajoittaa materiaalin käyttöä tuulivoimalakomponenteissa. Hiilikuitua voidaan käyttää myös lasikuidun seassa, eli koko rakennetta ei ole pakko tehdä pelkästään yhdestä kuitumateriaalista. (Manwell et al. 2002)

Suuret tuulivoimalat vaativat materiaalilta suuria lujuusominaisuuksia. Näitä vaatimuksia täyttämään on kehitetty uusi materiaali, hybtoniitti. Hybtoniitti on komposiittimateriaali, joka on valmistettu hiilinanoputkista ja epoksista. Hybtoniittia käytetään muun muassa jääkiekkomailoissa ja kilpasuksissa. Hybtoniitti on selvästi lujempaa materiaalia kuin esimerkiksi teräs. Hiilinanoputken lujuus teräkseen verrattuna on 100-kertainen ja hiilikuituunkin lähes 20-kertainen. Hybtoniitista on tehty suurien tuulivoimaloiden siipiä. (Pakkanen 2009)

Joissakin tapauksissa puu-epoksista on myös tehty voimalan osia. Puu on tässä tapauksessa ollut ohuena viiluna, eikä siis kuituna, kuten luonnonkuitukomposiitissa. Epoksi on ollut kappaleessa lujitemuovina. Puu-epoksin hyvinä ominaisuuksina on pidetty hyvää väsymislujuutta ja hyvää lujuuden ja painon suhdetta. Jotta materiaali olisi riittävän kestävä, puuviilut on täytynyt liimata yhteen puun syyt ristikkäin riittävän lujuuden saamiseksi. (Manwell et al. 2002)

Lapojen suunnittelussa materiaaliominaisuudet on otettava riittävästi huomioon. Kärkinopeussuhteesta ja tukevuudesta riippuen jäykkyys materiaalilla täytyy olla erilainen. Jos tuuliturbiinilla tavoitellaan suurempia kehänopeuksia, materiaalin täytyy olla joustavaa kuin turbiinilla joka on suunniteltu pyörimään hitaammin. Liiallisella joustavuudella on kuitenkin huonoja ominaisuuksia. Liian joustava rakenne voi alkaa lepattaa ja liian joustavilla rakenteilla ominaistajuus voi olla liian lähellä turbiinin nopeutta. (Manwell et al. 2002)

4 LUONNONKUITUKOMPOSIITIT

Komposiitti on määritelmän mukaan kahden tai useamman materiaalin seos, missä materiaalit ovat yhdessä, mutta eivät lienneena tai sulautuneena toisiinsa. Luonnonkuitukomposiitti on luonnonkuidulla lujitettua muovia. Luonnonkuituihin lasketaan puukuidut, kasvikuidut ja eläinkuidut, tosin eläinkuituja käytetään suhteellisen harvoin. Lujittaviksi kuituiksi kelpaavat melkein mitkä tahansa kasvin osat kuten rungot, lehdet, siemenet, hedelmät, ja pähkinät. Käytettävimmät kasvikuidut ovat puukuitujen lisäksi juutti, pellava, hamppu, kookos, kenaf, rami, sisal ja soijakuidut. (Saarela et al. 2003)

Luonnonkuitukomposiitin ominaisuuksia voidaan varioida eri materiaalivalinnoilla. Kasvi- ja puukuidut poikkeavat rakenteeltaan hieman toisistaan. Kuiduilla saadaan komposiittiin erilaisia piirteitä riippuen esimerkiksi kuidun pituudesta. Muovimatriisilla ja muilla täyteaineilla voidaan lisätä ja säätää haluttuja ominaisuuksia. Esimerkiksi yksi ratkaiseva tekijä ominaisuuksien kannalta on muovin ja lujitekuidun suhde. Käytettäviä muoveja ja erilaisia täyteaineita on laaja kirjo, kuten muoveissa jo kertamuovit ja kestumuovit poikkeavat paljon toisistaan. Yhteenvedona luonnonkuitukomposiitit voivat olla hyvin erilaisia riippuen käytettävistä materiaaleista. Mitä paremmin materiaalien käyttäytyminen yhdessä tunnetaan, sitä paremmin voidaan komposiitille säätää haluttuja ominaisuuksia.

4.1 Komposiitin valmistus

Komposiittien valmistus voidaan jakaa neljään eri valmistustyyppiin: laminointiin, injektiomenetelmään, puristusmenetelmään ja suulakemenetelmiin. Laminointimenetelmissä kappale muotoillaan käytettävän muotin mukaan. Injektiomenetelmissä massa ruiskutetaan muottiin paineen avulla. Puristusmenetelmässä massa laitetaan muottiin, mikä vastakappaleen avulla puristetaan haluttuun muotoon. Suulakemenetelmässä haluttua profiilia valmistetaan jatkuvalla syötöllä puristamalla sulaa massaa erilaisten suulakkeiden tai valssien läpi. (Saarela et al. 2003)

Kaksi käytetyintä luonnonkuitukomposiitin valmistusmenetelmää on injektiomenetelmällä suoritettava ruiskuvalu ja suulakemenetelmänä tehtävä ekstruusiopuristus. Ruiskuvalussa

granulaatteina eli muovirakeina oleva materiaali laitetaan syöttösuppilon kautta ruiskutus koneen ruuville, jossa massa sulatetaan. Sula massa ruiskutetaan muottiin käyttäen ruiskutus painetta välillä 40–200 MPa. Ruiskuvalulla valmistetaan suuria sarjoja pieniä tuotteita. Lujitettujen muovien valmistuksessa ongelmaksi tulee ruuvin materiaalia muokkaava ominaisuus. Ruuvi katkoo lujitekuitujen eli tässä tapauksessa luonnonkuitujen pituutta, jolloin syntyvän kappaleen lujuus alenee. (Saarela et al. 2003)

Ekstruusiopuristuksessa raaka-aine lisätään syöttösuppilon kautta ruuville, jossa massa sulatetaan. Ruuvi työntää sulan massan suulakkeen läpi, jolloin syntyy halutun muotoista profiilia. Ekstruusiopuristuksella valmistetaan erilaisia jatkuvia profiileja kuten putkia ja luonnonkuitulujuitetusta materiaalista terassilautoja. (Saarela et al. 2003)

Tuulivoimaloiden siivissä materiaali on useimmiten lasikuitu. Valmistusmenetelmänä käytetään käsin laminointia sekä injektio menetelmää. Injektio menetelmällä saadaan paremmin vaatimusten mukaisia kappaleita. (Saarela et al. 2003)

Voimaloiden valmistaminen luonnonkuitukomposiiteista tuottaisi haasteen valmistusmenetelmille. Tällä hetkellä lavat valmistetaan käsin laminointimenetelmällä lasikuitumatoista tai injektio menetelmällä. Pelkistettynä injektio menetelmässä kuitumatto asetellaan muottiin, jonne muovi ruiskutetaan. Luonnonkuitu lisätään yleensä jauhana sulaan muoviin, eli valmistusmenetelmän valinta tuottaisi jo yhden haasteen. Tosin injektio menetelmää on käytetty sekä tuulivoimaloiden osissa sekä luonnonkuitukomposiittien valmistusmenetelmänä. Lasikuidun osalta kyseisessä menetelmässä kuitu on jatkuvana kuituna, luonnonkuitu taas pilkottuna.

4.2 Luonnonkuitukomposiitin ominaisuudet

Luonnonkuitukomposiitin ominaisuudet ovat samanlaisia kuin mitä on muovilla oja luonnonkuiduilla. Hyvinä ominaisuuksina voidaan pitää raaka-aineiden uusiutuvuutta ja lopputuotteen kierrätettävyyttä. Luonnonkuitujen käyttöä edistää niiden edullinen hinta verrattuna muihin lujitekuituihin. Kuidut ovat biohajoavia ja kierrätettäviä, sekä niiden tiheys on alhainen. Komposiitin ominaislujuus ja kimmomoduli paranevat luonnonkuitujen käytön myötä johtuen alhaisesta tiheydestä. Luonnonkuitukompostilla on hyvä iskutkeys ja hyvä

iskulujuus. Kuitujen käyttö on valmistusystävällistä eikä luonnonkuitukomposiittien työstäminen kuluta yhtä paljon työkaluja kuin muiden komposiittien. (Saarela et al. 2003)

Huonoina ominaisuuksina luonnonkuitukomposiiteissa voidaan pitää niiden huonoa sään kestävyyttä. Luonnonkuitukomposiitit absorboivat vettä joka tekee komposiitin alttiiksi sienille, hyönteisille ja esimerkiksi homeelle. Kuidut ovat myös herkkiä lämmölle. (Saarela et al. 2003)

Huonoja ominaisuuksia muovin tapaan komposiitilla on huono UV-kestävyys. Kuitujen varastointi voi tuottaa myös ongelmia, koska kuidut imevät kosteutta ja ovat alttiina sienten ja homeiden hyökkäyksille. (Ton-That & Denault 2007)

Luonnonkuitukomposiitti absorboi kosteutta riippuen komposiitin koostumuksesta ja käytetyistä materiaaleista. Jos komposiitti imee liikaa kosteutta, se voi johtaa uusiin ongelmiin. Liian kostea komposiitti voi turvota, vääntyä, ja alkaa kasvaa homeita. Liika kosteus johtaa siis tuotteen yleiseen heikkenemiseen. Komposiitin yksi ongelma on homehtuminen. Homeita kasvaa yleensä tuotteeseen, jonka valmistukseen on käytetty liian kosteaa kuitua. Myös enemmän kosteutta imevät kuidut homehtuvat herkemmin. Homehtumista tapahtuu myös jos tuote on liian kauan kosteissa olosuhteissa, esimerkiksi ulkorakentamisen tuotteet liian kauan maakosketuksessa. Homeita voidaan estää muuttamalla raaka-aineita tai lisäämällä mikrobien kasvua vähentäviä täyteaineita. (Klyosov 2007)

4.3 Muovit luonnonkuitukomposiitissa

Muovit ovat synteettisiä suurimolekyylisiä polymeerejä. Muoveihin lisätään erilaisia apu- ja seosaineita parantamaan ominaisuuksia. Muovit voidaan jaotella eri tavoin mutta muovattavuuden perusteella voidaan jako tehdä kahtia, kestonuoveihin ja kertamuoveihin. Kestonuoveja voi muokata lämmön avulla uudestaan, mutta kertamuovia ei voi muovata uudelleen kovettumisen jälkeen. (Saarela et al. 2003)

Komposiitissa voidaan käyttää monenlaisia muoveja. Komposiittiin käy sekä kesto- että kertamuovi, tosin kierrätyksen näkökulmasta kestonuovi on ekologisempi ratkaisu. Tässä työssä on käsitelty enemmän kestonuoveja, koska ne ovat yleisempiä luonnonkuitukomposiiteissa kuin kertamuovit. Yleisimmät käytetyt kestonuovit ovat

polyeteeni, polyvinyylikloridi, polypropeeni, nylon ja ABS. Kertamuovit valmistetaan hartsista joka saadaan kovettumaan käyttäen lämpöä, kovetetta tai jotain ulkoista energiaa kovettamaan hartsi. Tyypillisiä kertamuoveja ovat epoksit, fenolit ja tyydyttymättömät polyesterit. (Saarela et al. 2003) Kertamuovi on itsestään haurasta, joten sen seassa käytetään jotain lujitekuitua, tyypillisimmin lasikuitua. (Järvinen 2008)

Tyydyttymättömät polyesterit ovat käytetyimpiä kertamuoveja lujitemuoviteollisuudessa. Tyydyttymättömien polyestereiden hyviä ominaisuuksia on kemiallisten aineiden kestävyys ja mekaaniset ominaisuudet. Ainut huono puoli verrattuna epoksiin ja vinyyliestereihin on suuri muottikutistuma. (Järvinen 2008)

Epoksin muottikutistuma on pieni. Epoksi on myös tyydyttymättömiä polyestereitä ja vinyyliestereitä lujempaa materiaalia. Epoksin haittapuolena on vaikeampi työstettävyys, ja kallis hinta. (Järvinen 2008)

Fenolihartsi tuli markkinoille ensimmäisen kerran vuonna 1907 kauppanimellä Bakeliitti. Valmistusprosessissa fenoli kondensoidaan formaliinin kanssa. Ominaisuuksia fenolihartseilla on hyvä sään-, virumisen-, lämmön- ja kemikaalien kesto, alhainen kutistuma, hyvä vesiabsorptio ja hyvä dimensionaalinen stabiliteetti. Fenoleja voidaan lujittaa muun muassa lasikuidulla ja puujauholla. Fenoleja käytetään paljon vaneriteollisuudessa liima-aineena. Taivutuslujuus vaihtelee täyteaineesta riippuen 70 ja 140 välillä olleen suurin käytettäessä lasia lujitteena. (Saarela et al. 2003)

Luonnonkuitukomposiiteissa käytettäviä kestumuveja ovat polyeteeni(PE), polypropeeni(PP), polyvinyylkloridi(PVC), Akryylinitriilibutadieenistyreeni (ABS) ja nylon. Polyeteeni on eniten valmistettu muovi maailmassa. Kyseistä muovia on montaa eri tiheystyyppiä, mutta kolme käytetyintä ovat high-density(HDPE), medium density(MDPE) ja low-density(LDPE). HDPE on vahvempaa ja jäykempää kuin LDPE mutta alttiimpaa vääntymään. HDPE:n vetolujuus voi olla jopa kaksin- kolminkertainen LDPE:n verrattuna. Heikkona puolena HDPE kutistuu voimakkaammin kuin LDPE. (Klyosov 2007)

Polypropeeni on polyeteeniin verrattuna kevyempää, jäykempää ja lujempaa. Polyeteeniin verrattuna polypropeeni on myös hauraampaa. (Klyosov 2007) Polypropeenia valmistetaan kolmea päätyyppiä, homopolymeeriä, blokkipolymeeriä ja randomkopolymeeriä. Polymeeri on ominaisuuksiensa takia yksi laaja-alaisimmin käytettävistä muoveista. Polypropeenin haittapuolena on huono pakkasenkestävyys verrattuna muihin muoveihin. (Järvinen 2008)

PVC:tä valmistetaan kahta eri päätyyppiä, joustavaa tai jäykempää. Joustavampaa ja pehmeämpää ei yleensä käytetä komposiiteissa, mutta jäykempää voidaan käyttää. Jäykempi PVC on kovempaa ja lujempaa kuin PE tai PP, mutta myös painavampaa. PVC on myös hauraampaa ja huonommin lämmönkestävää kuin PP ja PE. Näin ollen PVC:tä käytetään vain vähän komposiittien valmistuksessa. (Klyosov 2007)

ABS muovit ovat kovia ja jäykkiä. Muovin eri osaset, butadieeni, styreeni ja akrylinitriili omaavat hyviä ominaisuuksia erikseen, mutta yhteen tuotuna, muovisekoitteella on paljon huonoja ominaisuuksia, jotka vähentävät sen käyttöä. ABS ei ole säänkestävää, joka varsinkin luonnonkuituja käytettäessä olisi toivottava ominaisuus. Huonot palo-ominaisuudet, suuri paino ja kalliit valmistuskustannukset tekevät muovista kilpailukyvyttömän verrattuna muihin saatavilla oleviin muoveihin. (Klyosov 2007)

Nylon 6 on vähän käytetty materiaali luonnonkuitukomposiiteissa. Hankalaksi sen käytön tekee liian korkea sulamispiste jolloin lisättävät luonnonkuidut saattavat syttyä palamaan. Nylon absorboi paljon vettä verrattuna muihin muoveihin. Nylonilla on kuitenkin erittäin hyvät lujuusominaisuudet, jotka puoltavat sen käyttöä. (Klyosov 2007)

Polylaktidi valmistetaan kasvipärisiltä aineista kuten esimerkiksi sokerijuurikkaasta, vehnästä tai maissista. Pääasia on että raaka-aine sisältää paljon tärkkelystä. Valmistettava muovi on biologisesti hajoava ja kompostoitavissa. Vasta viimeaikoina kehitetyn materiaalin korkea hinta on suuri käyttöä haittaava tekijä. (Huda et.al. 2006)

Yhteenvetona muoveista lujuusominaisuuksiltaan parhaimpia ovat PVC, Nylon 6 ja ABS. Kuitenkin edellä mainituilla muoveilla on haittapuolia, jotka estävät käytön kuten liiallinen vedenimukyky tai huono säänkestävyys. Lujilla muoveilla on ominaispaino yleensä korkeampi kuin ei niin lujilla kuten esimerkiksi PP:llä ja PE:llä. Käyttökohteissa yleisimmin

käytössä olevin PP:n ja PE:n lujuusominaisuudet kuitenkin ovat riittävät, kun ottaa huomioon että komposiitit joutuvat käyttökohteissaan sään armoille. (Klyosov 2007) Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli löytää komposiitti, joka sopisi tuulivoimalaan materiaaliksi. Lujuusominaisuudet ovat ehkä tärkeimpiä vaadittavalle materiaalille. Niin lavoissa kun tornissakin materiaalilta vaaditaan hyviä lujuusominaisuuksia varsinkin mitä suurempiin rakenteisiin mennään. Säänkestävyyden on oltava hyvä varsinkin Suomen olosuhteissa missä lumi ja jää aiheuttavat lisäksi kuormituksia.

4.4 Lujitekuidut luonnonkuitukomposiitissa

Kaikki luonnonkuidut rakentuvat pääosin kolmesta aineesta, selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Selluloosa ja hemiselluloosa ovat polysakkarideja. Selluloosakuiduista rakentuu solujen seinämät. Ligniini sitoo polysakkaridit toisiinsa, eli se tekee esimerkiksi puusta kovaa ja kestäväää. Paperinvalmistuksessa ligniini erotetaan selluloosasta ja hemiselluloosasta, eli paperinvalmistuksessa käytetty massa pitää sisällään vain muutaman prosentin ligniiniä. Ligniini on kuiduissa se osa, joka ei kestä UV-säteilyä, eli ligniinin takia puu harmaantuu auringon valossa. (Klyosov 2007)

Puuta käytettäessä puu on yleensä sahanpuruna tai puujauhona komposiitissa. Sahajauhon partikkelikoko on 30–600 µm. Puujauhon partikkelikoko vaihtelee luokittain 50–150 µm, 100–200 µm, 200–450 µm tai 250–700 µm. Mitä suurempi partikkelikoko puujauholla on, sitä suurempi on taivutuskestävyys, pienempi muottikutistuma, ja parempi sulan komposiitin virtaus. (Klyosov 2007)

Luonnonkuitujen kirjo komposiiteissa on valtava. Ruokokuituja on esimerkiksi juutti, hamppu pellava ja kenaf. Sisalin, ananaksen ja manillan lehdistä voidaan ottaa kuituja. Puuvillasta voidaan käyttää siemeniä ja kookospähkinän hedelmän kuituja voidaan myös käyttää. Pitkät kasvikuidut ovat lujia ja monesti jopa lujempia kuin puukuidut. Hamppu on luonnonkuiduista lujin. Kasvikuitujen käyttöä rajoittaa niiden korkeampi hinta ja vaikeampi saatavuus verrattuna puukuituihin. (Klyosov 2007)

4.5 Täyteaineet luonnonkuitukomposiitissa

Luonnonkuitukomposiitti sisältää luonnonkuidun ja muovin lisäksi erilaisia täyteaineita. Täyteaineiden tarkoituksena on saada haluttuja ominaisuuksia tuotteeseen. Täyteaineilla voidaan muun muassa muokata väriä, parantaa palonkestoa, vähentää kosteudenimukykyä ja muokata tiheyttä. (Klyosov 2007)

Täyteaineina voidaan käyttää orgaanisia ja epäorgaanisia aineita. Tyypillisimpiä täyteaineita ovat savi, kalsiumkarbonaatti, tuhka ja talkki. Täyteaineilla voidaan saavuttaa tiettyjä ominaisuuksia, ja esimerkiksi tämän työn kohdalla yksi tärkeistä ominaisuuksista on komposiitin kyky olla imemättä vettä. Klyosovin kirjan mukaan kalsiumkarbonaatti ja wollastoniitti imevät hyvin vähän vettä (0,01-0,5 %). Talkki, alumiini trihydraatti ja kiille imevät vettä (0,1-0,6 %). Vertailun vuoksi puukuitu voi imeä 12 % vettä ja tuhka jopa 20 %.(Klyosov 2007)

Palonestoaineina käytetään alumiini trihydraattia ja magnesiumhydroksidia koska nämä aineet jäädyttävät paloaluetta päästämällä vettä tietyssä lämpötilassa.(Klyosov 2007)

Täyteaineita:

Kalsiumkarbonaatti (CaCO_3) Kalsiumkarbonaattia käytetään täyteaineena koska se lisää taivutuskestävyyttä 40–60 % ja iskunkestävyyttä 30–40 %. (Klyosov 2007)

Talkki() parantaa monia komposiitin ominaisuuksia. Tärkeimpänä ominaisuutena voidaan pitää jäykkyyden lisääntymistä. Samoin lisääntyy myös lujuus. Talkki vähentää myös kutistumista ja vaikuttaa veden imeytymiseen. Talkkia käytetään varsinkin polypropeenin kanssa. Huonona puolena talkilla on sen ominaisuus hajottaa ja hapettaa muoviva valmistuksen aikana. Tämä voidaan kuitenkin välttää lisäämällä tarvittava määrä antioksidantteja. (Klyosov 2007)

Lentotuhka sisältää 60–90 prosenttisesti lasia. Tuhka voi sisältää myös piidioksidia, magnesiumoksidia ja kalsiumoksidia. Tuhkan saatavuus on helppoa, tuhkaa tuotetaan esimerkiksi hävitettävillä kaatopaikoilla. Tuhkan ominaisuudet riippuvat muista käytettävistä materiaaleista. Joissakin tapauksissa tuhka lisää viskositeettia tuotantovaiheessa. Joissakin tapauksissa tuhka voi lisätä materiaalin lujuutta ja sitkeyttä. Tuhkan on myös todettu lisäävän

materiaalin kestoja kuumuutta vastaan. Tuhka on edullista tuottaa. Vaikka tuhka ei välttämättä paranna komposiitin ominaisuuksia merkittävästi, alentaa se joissakin tapauksissa hintaa, koska tuhkaa saa edullisesti. (Klyosov 2007)

Wollastoniitti() koostuu pääasiassa piidioksidista ja kalsiumoksidista sekä lukuisista muista aineista. Wollastoniitti ei ole vielä käytössä luonnonkuitukomposiiteissa, mutta muovin kanssa sen ominaisuuksia ovat jäykkyyden parantaminen, naarmuuntumisen estäminen ja palonkesto. (Klyosov 2007)

Kiille koostuu eri aineista kuten magnesiumoksidista, piidioksidista, alumiinioksideista, potassiumista ja raudan oksideista. Kiilteen tarkoituksena on lisätä lämmönkestävyyttä ja taivutuskestävyyttä. Kiille antaa komposiitille samantyyppisiä ominaisuuksia kuin kalsiumkarbonaatti. Kiillettä ei käytetä yleisesti (Klyosov 2007)

Nokimusta on suurimmaksi osaksi hiiltä, hieman metalleja, hivenaineita ja epämetalleja sisältävä täyteaine. 0,2-2,5 prosentin lisäys nokimusta parantaa polyeteenin kestävyttä UV-valoa vastaan. (Klyosov 2007)

4.6 Komposiitin käyttökohteet

Tyypillisin käyttöjohde komposiiteille ympäri maailmaa on ulkorakentamisen tuotteet, kuten terassit ja kaiteet. Kuvassa 6 on UPM:n valmistamia terassilankkuja.



Kuva 6. Luonnonkuitukomposiitista tehtyjä terassilankkuja. (UPM-Profideck)

Autoteollisuus on yksi voimakkaasti kasvava luonnonkuitukomposiittien käyttökohde varsinkin Euroopan autoteollisuudessa. Kun vuonna 1996 Euroopan autoteollisuudessa käytettiin 4300 tonnia luonnonkuitua, arviot vuodelle 2010 on lähes 100000 tonnia luonnonkuitua. (Ton-That & Denault 2007) Syynä tähän ovat olleet lainsäädännön muuttuminen tiukemmaksi. Uusien autojen muoviosien on oltava kierrätettäviä ja ne on pystyttävä hävittämään luontoa rasittamatta. (Saarela et al. 2003) Autoteollisuus käyttää lujitekuituina selvästi eniten pellavaa. Pellavan jälkeen käytetään chanvre ja kenaf nimisiä kuituja, jotka ovat molemmat hamppukasvista. Kookosta juuttia ja sisalia käytetään myös, mutta reilusti yli puolet käytettävästä kuidusta on pellavaa. Luonnonkuituja autoteollisuudessa käyttävät Volkswagen, Audi, BMW, Opel, Peugeot, Daimler Chrysler, Renault ja Mercedes-Benz. Luonnonkuitukomposiittien osat vaihtelevat hieman automerkeittäin. Pääasiallisesti kuitenkin kuituosista tehdään ovipaneeleita, istuimen selkänöitä, tavaratilan osia, eli tiivistetyksi eri sisätilan osia. (Ton-That & Denault 2007)

5 LUONNOKUITUKOMPOSIITTI TUULIVOIMALAN MATERIAALINA

Luonnonkuitulujitettujen komposiittien käyttö tuulivoimaloissa riippuu monesta tekijästä. Viitaten aikaisempiin lukuihin esimerkiksi lapojen vaadittavia ominaisuuksia ovat riittävä lujuus ja sitkeys. Nykyisen käytetyimmän materiaalin, lasikuidun ominaisuuksiin ei päästä luonnonkuitukomposiiteilla. Kuitenkin riittää että materiaali on riittävän kestävä, ei siis välttämättä parasta. Luonnonkuitukomposiittien selkeänä etuna on kierrätettävyys ja edullisuus verrattuna nykyisiin käytettäviin materiaaleihin.

5.1 Vaadittavat ominaisuudet

Tuulivoimalan materiaalien valinnassa täytyy ottaa huomioon useita asioita. Tuulivoimala joutuu valtavan kuormituksen alaiseksi, ja materiaalien on kestävä riittävästä kuormitusta. Voimalaan kohdistuu pääasiassa kahta erityyppistä kuormitusta, väsyttävää ja äärimmäistä. Äärimmäisen kuormituksen alaiseksi voimaksi kutsutaan voimaa, jonka alaiseksi turbiini joutuu esimerkiksi äärimmäisen kovan tuulen takia. Väsyttävän kuormituksen alaiseksi voimala joutuu päivittäin. Esimerkiksi tuulien voimakkuuksien ja suuntien vaihtelut väsyttävät voimalan rakenteita pikku hiljaa. Kuormituksia syntyy myös voimalan käynnistyksen ja pysäytyksien yhteydessä. Esimerkiksi kun voimala joudutaan pysäyttämään liian suuren tuulennopeuden takia. (Manwell et al. 2002)

Taulukko 1. (Saarela et al. 2003)

	Vetolujuus (MPa)	Taivutuslujuus (MPa)
Lasikuitu E	2600	
Lasikuitu S	4400	
Hiilikuitu	2600–5600	
Kevlar® 49(1000 fil)	3620	
Kevlar 49 53 % + Epoksi -BMC	160	290
HM-hiilikuitu 58 % + Epoksi-BMC	170	340
Lasikuitu E 63 % + Epoksi -BMC	190	470
Lasikuitu 30 % + PP	70	85
Lasikuitu 30 % + nylon6	160	235

Taulukkoon 1 on kerätty eri hiili-, aramidi ja lasikuitujen lujuusarvoja. Aramidikuidut eli taulukossa kauppanimellä merkitty Kevlar on aromaattinen polyamidikuitu. Taulukossa on myös lujuusarvoja kun kuitumateriaaliin on lisätty muovimatriisi. (Saarela et al. 2003)

Kuten taulukosta voidaan huomata, kuitu on itsestään huomattavasti lujempaa kuin lisättyä komposiittiin. Taulukosta voidaan huomata että komposiiteissa käytetty polypropeeni on lujuusarvoiltaan huomattavasti heikompaa kuin nylon 6. Taulukosta voidaan huomata myös että lasikuitu nylonin kanssa on lähes yhtä lujaa kuin kertamuovit, vaikka kuidun osuus nylonin kanssa on taulukossa selvästi pienempi. Tästä voi päätellä ettei ryhmien kestomuovit, ja kertamuovit välillä lujuuseroja ei voi tehdä, vaan jokaisella muovilla on erilainen lujuusarvo riippumatta siitä kumpaan ryhmään muovi kuuluu.

Hiilikuidun suuri vaihtelu lujuuksissa riippuu valmistettavan hiilikuidun laadusta ja valmistajasta. Taulukossa mainittu HM-hiilikuitu on jäykkää kuitua jota käytetään lentokone ja avaruusteollisuudessa. (Saarela et al. 2003)

Taulukosta voidaan huomata että sekä lasikuidun, aramidikuidun että hiilikuidun lujuusominaisuudet ovat kaikilla melkein samoja kun käytetään epoksia muovimatriisina. Tosin kuitulujuitteiden määrät vaihtelivat jonkin verran ja suurimmat lujuusarvot saatiin kun kuitulujuitetta oli enemmän suhteessa muoviin.

Taulukko2. (Klyosov 2007)

	Vetolujuus (MPa)	Taivutuslujuus (MPa)
Hamppu	1082	
Pellava	648	
PP	40	
Hamppu 33 % +PP	53	45
Lasikuitu 30 % + PP	53	115
Juutti 50 % + PP	73	
Sisal 20 % + PP	60	
Puujauho 20 % + PP	25	42
Puujauho 40 % +PP	26	44
Puujauho 60 % + PP	20	38
Nylon 6	66	67

Taulukossa 2 on eri luonnonkuitujen lujuusarvoja vertailtu pelkkänä kuituna sekä osana komposiittia. Vetolujuudeltaan suurempi on selvästi pelkkä kuitu ja näistä varsinkin kasvikuudit. Verrattuna taulukkoon 1 polypropeenin lujuus on heikompi suhteessa nyloniin riippumatta lujitekuidusta. Yleisesti taulukoita vertailtaessa voidaan huomata että lasikuitu kertamuovin kanssa antoi selvästi suuremman lujuuden kuin polypropeenin kanssa. Luonnonkuitukomposiitteja vertailtiin taulukossa vain polypropeenin kanssa. Vertailtaessa lasikuituja ja luonnonkuituja keskenään samalla matriisilla eli PP:llä ei suuria lujuuseroa ole havaittavissa. Itse asiassa juutti jopa voittaa lasikuidun vetolujuus tarkastelussa PP:tä käytettäessä. Kuitenkin lasikuidulla oli selvästi suurempi taivutuslujuus kuin luonnonkuiduilla. Koska taulukoiden arvot ovat otettu eri lähteistä, on niiden lukuarvot hieman erilaiset, joten taulukoihin on suhtauduttava kriittisesti.

Taulukossa kolme on vertailtu polylaktidin (PLA) ja polypropeenin (PP) erilaisia lujuusominaisuuksia käyttäen kuitulujitteena lasikuitua sekä kierrätettyä sanomalehtipaperikuitua.

Taulukko 3. (Huda et al.2006)

	Vetolujuus (MPa)	Taivutuslujuus (MPa)
PLA	63	99
Lasikuitu 30 % + PLA	80	109
Kierrätyskuitu 30 % + PLA	68	106
PP	33	36
Lasikuitu 30 % + PP	52	80

Taulukon mukaan polylaktidin lujuusominaisuudet ovat selvästi paremmat kuin polypropeenin.

Mahdollisia ongelmia komposiitin käytön kanssa niin tuulivoimalan lapojen, kuin tuulivoimalan torninkin suhteen tulee materiaalin säänkestävyyden kanssa. Muovimatriisi komposiitissa ei ime vettä, mutta luonnonkuitu imee riippuen kuidun määrästä ja laadusta. (Klyosov 2007) Kuitenkin tuulivoimalan osissa komposiitti ei joudu kosketuksiin maan tai kosteuden kanssa koko aikaa, mutta komposiitti imee kuitenkin vettä riippuen ilman kosteudesta.

Toinen huomionarvoinen seikka on kutistuminen. Luonnonkuitu kutistuu kuivuessaan, joka aiheuttaa koko komposiitin kutistumista. Mitä pienempi on komposiitin ominaispaino, sitä suurempi on kutistuminen. Kutistumista tapahtuu ominaispainosta riippuen 0,20–0,59 prosenttia, eli selvästi vähemmän kuitenkin kun vastaavalla sahatavaralla. (Klyosov 2007)

Komposiitin säänkestävyyttä voidaan parantaa käyttämällä erilaisia pinnoitteita, kuten maalausta. Komposiitilla on tapana imeä hieman kosteutta riippuen komposiitin raaka-aineista, ja tätä ei haluttua ominaisuutta voisi pienentää pinnoittamalla säälle alttiit osat. Verrattuna muihin tällä hetkellä käytössä oleviin materiaaleihin kuten alumiiniin ja lasikuituun, luonnonkuitukomposiitti on ainut joka imee selvästi muita enemmän kosteutta

Lasikuidun lujuus tulee esille jo valmistustavan johdattelemana. Lasikuituosat kuten esimerkiksi tuulivoimalan siivet valmistetaan lasikuidusta laminoimalla. Lasikuitu on eräänlaisena levynä, joka kovetetaan muovin avulla. Tällä tavoin materiaalista saadaan sitkeää. (Manwell et al. 2002) Puolestaan komposiitin kaikki raaka-aineet ovat hyvin pieninä osasina, ja muovi juoksevassa muodossa kun se yhdistetään lujitekuitujen kanssa. Komposiitti ei siis pidä sisällään minkäänlaista yhtenäistä kuitua tai muuta jatkuvaa osaa joka toisi komposiitille lujuutta ja sitkeyttä. Synteettisten kuitujen merkittävä etu on, että niitä voidaan siis käyttää jatkuvina kuituina eli niin kutsuttuina filamentteina. Filamentit kasataan kimpuiksi tai langoiksi ennen käyttöä. Luonnonkuidut lisätään komposiittiin taas lyhyinä kuituina. Selkeä etu jatkuvilla kuiduilla on lujuus. Vaikka lyhyiden kuitujen käyttö olisi optimoitu, vetolujuus on 50 % pienempi verrattuna jatkuvaan kuituun, ja kimmomodulikin on 10 % pienempi. (Saarela et al. 2003)

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tuulivoimalla saatavan energian määrä kasvaa vuosi vuodelta valtavasti. Tämä tarkoittaa myös uusien tuulivoimaloiden jatkuvaa rakentamista. Nykyisin tuulivoimalan rakennusmateriaalit eivät ole kierrätettävissä ja kun on kyse uusiutuvasta ja luontoa säästävästä energian tuotantomuodosta, olisi tärkeää saada luonnonmukaisuus ja uusiutuvuus myös mukaan itse tuulivoimalan rakenteisiin.

Luonnonkuitukomposiittien puolesta puhuu eniten niiden kierrätettävyys. Luonnonkuitukomposiitit korvaisivat tuulivoimaloissa tällä hetkellä käytettävän lasikuidun, joka ei ole missään määrin kierrätettävissä. Kestomuovista valmistettuna komposiitti olisi valmistettavissa jo kertaalleen kierrätetystä materiaaleista, ja materiaali pystyttäisiin kierrättämään uudelleen tuulivoimalan purkamisen jälkeen. Varsinkin jos muovina käytetään polylaktidia, olisi koko tuulivoimala kierrätettävissä elinkaarensa päässä. Kuitenkin materiaalilta vaaditaan paljon, joten riittääkö komposiitin ominaisuudet korvaamaan tämänhetkiset materiaalit.

Luonnonkuitukomposiitin puolesta puhuu materiaalin keveys verrattuna esimerkiksi torneissa käytettävään teräkseen ja alumiiniin. Toisaalta lujuusominaisuudet teräksellä ja alumiinilla ovat omaa luokkaansa. Painon ja lujuuden suhde on tekijä, jolla on paljon merkitystä haettaessa sopivaa materiaalia käyttökohteeseen.

Parhaiten tuulivoimalaan sopisi pitkät kasv kuidut. Hampulla, juutilla ja pellavalla on paljon paremmat lujuusominaisuudet kuin puukuiduilla. Tosin puukuitujen saatavuus on parempi verrattuna muihin kasvikuittuihin.

Edellisen kappaleen taulukoista voi tehdä päätelmän, että muovimatriisina polypropeeni on melko heikkoa. Tosin muovilta vaaditaan muitakin ominaisuuksia kuin pelkkä veto- tai taivutuslujuus, joten pelkkien taulukkoarvojen perusteella ei materiaalivalintaa voi tehdä.

Taulukoiden perusteella kun muovina käytettiin polypropeenaa, ei lasikuidun ja luonnonkuitujen välillä ollut suurta eroa. Tosin taulukko ei kerro mitä muita aineita komposiitti sisälsi, ja missä muodossa lasikuidut komposiitissa olivat. Jos siis muovina

käytettäisiin jotain lujempaa, voitaisiin taulukoiden perusteella uskoa että komposiitti luonnonkuidusta on yhtä lujaa kuin lasikuidusta. Tosin edellisen kappaleen taulukot kertovat vain pienen osan materiaalin lujuusominaisuuksista. Riittävä vetolujuus ei riitä, kappaleen täytyy kestää pitkäaikaisia, väsyttäviä kuormituksia vaihtelevissa sääolosuhteissa. Lasikuitua, aramidikuitua ja hiilikuitua käytettäessä kappaleeseen saadaan erilaisia sitkeysominaisuuksia. Edellä mainitut lujitekuidut kun valmistetaan pitkiksi langoiksi ja mahdollisesti tästä jalostaen vielä matoksi. Luonnonkuitujen valmistuksessa kuitumateriaali pilkotaan enimmillään millimetrin pitkiksi kuiduiksi, jolloin samanlaista jatkuvaa rakennetta ei komposiittiin saada kuten synteettisillä kuiduilla.

Valmistusmenetelmät tulisivat tuottamaan ongelmia siirryttäessä uuteen materiaaliin. Lasikuidusta valmistettaessa tuulivoimalan lavat tehdään käsin laminoimalla tai injektioimenetelmällä. Luonnonkuitukomposiitteja tehdään joko ekstruusiopuristuksella tai ruiskuvalamalla. Valmistusmenetelmä täytyisi muokata nykyisten luonnonkuitukomposiittien valmistusmenetelmistä, tai lasikuidun valmistusmenetelmistä hyväksi käyttäen. Luonnonkuituja valmistettaessa rakenteeseen ei saada kuidun osalta jatkuvuutta, kun lujitekuitu pilkotaan pieniksi partikkeleiksi. Lasikuitu lisätään tuulivoimalaan usein mattona, jolloin kuidut ovat pitkiä, ja sitoutuneet toisiinsa. Luonnonkuitujen lujuus alenee merkittävästi kun kuitu joudutaan pilkkomaan millimetrin kokoisiksi palasiksi. Tällöin ei synteettisten kuitujen kaltaista lujuutta saada tuotteeseen. Ruokokuidut kuten hamppu ja pellava voisivat kenties olla jalostettavissa jatkuviksi kuitukimpuiksi kuten synteettiset kuidut. Monista luonnonkuitukomposiittien lujitekuiduista tehdään teollisuudessa kankaita ja lankoja, joten miksi kyseisiä menetelmiä ei voisi soveltaa komposiitteihin. Materiaalin rakenne mahdollistaisi lähes jatkuvan kuidun tuottamisen. Jatkuvana kuituna käytettynä pellavan hyviä lujuusominaisuuksia voisi hyödyntää paremmin.

Luonnonkuitukomposiittien mahdollisia käyttökohteita vaaka-akselisissa tuulivoimaloissa olisi lavoissa ja tornissa. Tornissa käyttöä haittaa varsinkin luonnonkuitukomposiitin sopimattomuus kantaviin rakenteisiin. Riippuen tuulivoimalan koosta, torni joutuu kantamaan melkoisen massa roottorin ja konehuoneen takia. Tuuli kuormittaa vielä lisää rakenteita, joten komposiitti tarvitsisi rinnalleen jonkin lujan materiaalin kantamaan osaltaan voimalan massaa. Tällä hetkellä yksistään luonnonkuitukomposiittista valmistettu tuulivoimala ei ole mahdollinen.

Vaihtoehtona tuulivoiman tuottamiselle olisi mielestäni myös pysty akseliset tuuliturbiinit. Pysty akseliset tuuliturbiinit eivät juuri kilpaile vaak akselisten tuuliturbiinien kanssa pienemmän kokonsa puolesta. Pysty akselinen tuuliturbiini pystyy kuitenkin hyödyntämään paremmin heikon sekä voimakkaan tuulen kuin vaak akselinen tuuliturbiini. Vaikka pysty akselisesta tuuliturbiinista ei olisi koon puolesta kilpailemaan vaak akseliselletuuliturbiinille, voisi pienemmän koon tuulivoimaloilla tuottaa vaikka maatalouden tai pienemmän asuinyhteisön energiantarvetta, jolloin riippuvuus valtakunnan sähköverkosta pienenesi. Pysty akselisen tuuliturbiinin lavoissa voisi mahdollisesti käyttää luonnonkuitukomposiitteja koska pienemmässä mittakaavassa rakennettu tuuliturbiini ei joudu niin kovalle rasitukselle kuin suuremmat tuuliturbiinit. Erilainen muoto verrattuna vaak akseliseen tuulivoimalaan voisi tuoda uusia mahdollisuuksia valmistusmenetelmäänkin.

Luonnonkuitukomposiitin säänkestävyys on ongelmallisempi kuin synteettisistä kuiduista valmistetun komposiitin. Sään kestävyyttä voisi parantaa käyttämällä erilaisia pinnoitteita, kuten maalausta. Komposiitilla on tapana imeä hieman kosteutta riippuen komposiitin raaka-aineista ja tätä, ei haluttua, ominaisuutta voisi pienentää pinnoittamalla säälle alttiit osat. Verrattuna muihin tällä hetkellä käytössä oleviin materiaaleihin kuten alumiiniin ja lasikuituun, luonnonkuitu on ainut joka imee selvästi muita enemmän kosteutta.

Johtopäätöksenä luonnonkuitukomposiitti on potentiaalinen vaihtoehto yhdeksi materiaaliksi tuulivoimalaan. Yksinään kyseistä materiaalia ei voi käyttää, mutta ehkä yhdessä jonkin lujemman materiaalin kanssa. Materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa merkittävästi luonnonkuitukomposiitin ominaisuuksiin. Luonnonkuitukomposiittien käyttö tuulivoimaloissa vaatisi valmistusmenetelmien kehittämistä juuri kyseisiin kohteisiin sopivaksi. Tällä hetkellä tuotannossa olevia luonnonkuitukomposiitista valmistettuja tuotteita ei ole optimoitu luultavasti lujuuden suhteen, vaan ennemminkin saatavissa olevan materiaalin mukaan. Eli markkinoilla olevat tuotteet eivät vaadi suurta lujuutta, vaan jokin muu haluttu ominaisuus on noussut lujuuden edelle. Tuulivoimalaan luonnonkuitukomposiitista potentiaalista materiaalia suunniteltaessa olisi ensin kiinnitettävä huomiota materiaalin lujuusominaisuuksiin. Lujinta mahdollista komposiittia ei siis välttämättä ole vielä edes valmistettu, koska markkinoilla ei ole ollut sellaiselle kysyntää.

7 YHTEENVETO

Tuulienergian tuotanto on suuressa kasvussa niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa. Tuulienergian avulla pitäisi seuraavina vuosikymmeninä tuottaa huomattavasti enemmän energiaa kuin mitä nykyisin tuotetaan. Tuulivoiman lisääminen vaatii paljon uusia tuulivoimaloita. Varsinkin rannikoiden tuulivoimapotentiaalia on hyödynnetty vähän.

Tuulivoimaloiden käytetyin rakennetyyppi on vaaka-akselinen tuulivoimala. Toinen huomattavasti vähemmän käytetty, mutta kuitenkin huomionarvoinen voimalatyyppi, on pystyakselinen tuulivoimala. Vaaka-akselisen voimalan etuna on parempi tehon suhde painoon. Vaaka-akselisia tuulivoimaloita voidaan rakentaa tuottamaan yli 5 MW:n tehoja ja halkaisijaltaan tuulivoimala voi olla yli 120 metriä.

Materiaaleina nykyisissä voimaloissa käytetään pääasiassa lasikuitua, alumiinia ja terästä. Kun tuulienergian kohdalla kyseessä on uusiutuva energiamuoto, olisi hyvä jos myös laitteet energian tuotantoon olisivat jossakin määrin kierrätettävissä. Luonnonkuidulla vahvistetut komposiitit olisivat yksi mahdollinen materiaali. Kuitenkin materiaalilta vaaditaan melko paljon, varsinkin lujuutta, sitkeyttä, ja sään kestävyyttä.

Tällä hetkellä luonnonkuiduista tehtävää komposiittia valmistetaan lukuisista eri muovi ja lujitekuituvaihtoehdoista. Luonnonkuituja saadaan melkein mistä tahansa kasvista. Teollisuudessa käytetyimmät luonnonkuidut ovat puukuidut ja kasvikuidut, kuten hamppu ja pellava. Luonnonkuitukomposiitissa muovina käytetään useimmiten kestumuovia kuten polypropeenaa tai polyeteeniä. Synteettisiä kuituja kovetetaan useimmiten taas kertamuoveilla. Tässä työssä lujuuden osalta käsiteltiin tarkemmin polypropeenaa ja polylaktidia eri luonnonkuitujen kanssa. Myös vertailuja synteettisten lujitekuitujen kanssa tehtiin.

Polylaktidista ja jostain luonnonkuidusta voitaisiin saada täysin kierrätettävä materiaali tuulivoimalan osiin. Tällä hetkellä lujuusominaisuudet ja valmistustekniikka vaatisivat kuitenkin kehitystyötä luonnonkuitukomposiittien kanssa, jotta materiaali soveltuisi tuulivoimaloihin.

Synteettisistä kuiduista valmistetuilla materiaaleilla on tällä hetkellä selkeä etulyöntiasema niiden rakenteen takia. Jatkuvista kuiduista valmistettu synteettinen komposiitti on huomattavasti lujempi materiaali kuin lyhytkuituinen luonnonkuitukomposiitti. Luonnonkuiduista olisi kuitenkin mahdollista valmistaa pitkiä, jatkuvia kuituja kuten esimerkiksi lasikuiduista tehdään. Luonnonkuitujen suurimpana ongelmana voidaan pitää lyhyiden kuitujen lujuuden puutetta. Kuitenkin jos tuulivoimalan materiaalille vaadittavat lujuusominaisuudet saadaan optimoitua joillakin käytettävillä materiaaliyhdistelmillä käyttäen lujitekuituna luonnonkuitua, voi tulevaisuuden tuulivoimala olla osittain rakennettu luonnonkuitukomposiitista.

LÄHTEET

Ackermann T. 2005. Wind Power in Power Systems. John Wiley & Sons. Ltd ISBN: 0-470-85508-8

Ancona D. and McVeigh J. Wind Turbine - Materials and Manufacturing Fact Sheet.

[Verkkodokumentti] Princeton Energy Resources International, LLC. [viitattu 5.12.2010] 8 s.

Saatavissa PDF- tiedostona:

http://www.generalplastics.com/uploads/technology/WindTurbine-MaterialsandManufacturing_FactSheet.pdf

GALE wind turbine. [Verkkodokumentti] [Viitattu 15.12.2010] Saatavissa:

<http://www.diamondwindsolutions.com/Products.html>

Huda M.S. et al. 2006 Chopped glass and recycled newspaper as reinforcement fibers in injection molded poly/lactic acid (PLA) composites: A comparative study. In: Huda M.S., Drzal L.T., Mohanty A.K., Misra M. Composite science and Technology. Elsevier Ltd. Volume 66. S. 1813–1824.

Justin. 2008. Metaefficient. New record: world's largest wind turbine (7+ megawatts).

[Verkkodokumentti] [Viitattu 29.12.2010] Saatavissa:

<http://www.metaefficient.com/news/new-record-worlds-largest-wind-turbine-7-megawatts.html>

Järvinen P. 2008. Uusi muovitieto. Muovifakta oy. 263 s. ISBN 978-952-92-3558-2

Klyosov A. A. 2007. Wood-Plastic composites. Hoboken, New-Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 698 s. ISBN 978-0-470-14891-4

Lehtikuva. [Verkkodokumentti] 1.9.2010 [Viitattu 8.1.2011] Saatavissa:

<http://www.mtv3.fi/uutiset/kotimaa.shtml/2010/09/1178932/ks-tuulivoimalat-voivat-hairita-tutkia#kommentit>

Manwell J.F. McGowan J.G. Rogers A.L. 2002 Wind energy explained. John Wiley & Sons, Ltd. 577 s. ISBN 0 471 49972 2

Pakkanen S. 100 kertaa terästä vahvempi aine sai nimensä sarjakuvasta. Tekniikka & Talous. 25.2.2009. [Verkkodokumentti] [Viitattu 30.8.2011] Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/tk/nanotekniikka/article218745.ece?fail=f> palvelu vaatii kirjautumisen.

Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. [Verkkodokumentti] Valtioneuvoston selonteko. 2008. [Viitattu 30.10.2010]. 130 s. Saatavissa PDF: tiedostona: http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus_311008.pdf

Saarela et al. 2003. Komposiittirakenteet. Helsinki. Muoviyhdistys ry. 483 s. ISBN 951-9271-27-9

Suomen tuulivoimayhdistys ry. [Verkkodokumentti] [Viitattu 15.11.2010] Saatavissa: http://www.tuulivoimatieto.fi/kolme_lapaa

Suomen tuulivoimayhdistys ry. [Verkkodokumentti] [Viitattu 30.12.2010] saatavissa: <http://www.tuulivoimatieto.fi/pystyakseliset>

Suomen tuulivoimayhdistys ry. [Verkkodokumentti] [Viitattu 29.12.2010] Saatavissa: <http://www.tuulivoimatieto.fi/rakenne>

Suomen tuulivoimayhdistys ry.[Verkkodokumentti] [Viitattu 30.12.2010] Saatavissa: <http://www.tuulivoimatieto.fi/toimintaperiaate>

Suomen tuulivoimayhdistys ry.[Verkkodokumentti] [Viitattu 30.12.2010] Saatavissa: <http://www.tuulivoimatieto.fi/tuulivoimatekniikka>

Suomen tuulivoimayhdistys ry. [Verkkodokumentti] [Viitattu 14.11.2010] Saatavissa: <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima>

Suomen tuuliatlas. [Verkkodokumentti] [Viitattu 30.12.2010] Saatavissa:
<http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/index.html>

Suomen tuuliatlas. [Verkkodokumentti] [Viitattu 30.12.2010] Saatavissa:
<http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>

Suomen tuuliatlas. [Verkkodokumentti] [Viitattu 30.12.2010] Saatavissa:
<http://www.tuuliatlas.fi/tuulivoima/index.html>

Terra magnetica. [Verkkodokumentti] Ewea 2007 [viitattu 23.4.2011] Saatavissa:
<http://www.terramagnetica.com/2009/08/01/why-are-wind-turbines-getting-bigger/>

Ton-That M.T. & Denault J.2007. Development of Composites Based on Natural Fibers.
 [Verkkodokumentti] Industrial Materials Institute. The Institute of Textile Science, Ottawa.
 [Viitattu 8.12.2010]. 29 s. Saatavissa PDF- tiedostona:
http://www.textilescience.ca/downloads/presentation_Naturalfiber.pdf

Tuulivoiman projektiopas. Motivan julkaisu 5/1999 Energia-Ekono Oy
 Copyright Motiva, Helsinki, 1999 ISBN 952-5304-04-3

UPM:n profideck. [Verkkodokumentti.] [Viitattu8.1.2011] Saatavissa: [http://w3.upm-kymmene.com/upm/internet/upm_profi.nsf/images/UPM_ProFi_Deck_all_colours.jpg/\\$FILE/UPM_ProFi_Deck_all_colours.jpg](http://w3.upm-kymmene.com/upm/internet/upm_profi.nsf/images/UPM_ProFi_Deck_all_colours.jpg/$FILE/UPM_ProFi_Deck_all_colours.jpg)

Wind energy- the facts.[Verkkodokumentti] European Wind Energy Association. 2009. 32 s.
 [Viitattu 11.12.2010] Saatavissa PDF- tiedostona:
http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WETF/1565_ExSum_ENG.pdf

Äänettömät jäätymättömät tuulivoimalat säätövoimaksi sähköntuotantoon.
 [Verkkodokumentti] Ilmastonmuutoksen seurauksena historiallinen maaseudun, kaupunkien ja kehitysmaiden liitto. Osa1/2. SVVE. Syyskuu 2008. [Viitattu 28.12.2010]. 32 s. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.svve.fi/images/A_SVVEjaWindside.pdf