



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **TUULIVOIMALOIDEN LAPOJEN UUSIOKÄYTÖN JA KIERRÄTYKSEN MAHDOLLISUUDET**

Jaakko Nissilä

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintyö

Joulukuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Tuulivoimaloiden lapojen uusiokäytön ja kierrätyksen mahdollisuudet

Jaakko Nissilä

Oulun yliopisto, ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2022, 34 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Satu Pitkäaho

Muut työn ohjaajat: Katri Luoma-aho, Aila Ryhänen

Runsaasti päästöjä aiheuttava energiasektori on ottanut edistysaskelia kohti kestävämpiä ratkaisuja. Lisääntyvä tuulivoimakanta nostaa Suomen energiaomavaraisuutta ja auttaa vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Tuulivoimatuotannon kasvu luo kuitenkin uusia haasteita, esimerkiksi kiertotalouteen liittyen. Tuuliturbiinin lavat ovat monimutkaisen rakenteen ja koostumuksen vuoksi haastavia kierrättää.

Tähän mennessä ainoa laajan teollisen mittakaavan kiertotalousratkaisu lavoille on ollut niiden hyödyntäminen sementtiteollisuudessa. Epäorgaaninen aines hyödynnetään sementtiklinkkerinä ja orgaaninen aines energiana. Menetelmä ei ole täysin kierrättämistä, joten toimiminen jätehierarkian mukaisesti vaatii kehitystä kiertotalouden osalta.

Tutkielma on kirjallisuuskatsaus tuulivoiman tilanteesta ja siihen liittyvän kiertotalouden kehityksestä Suomessa. Tutkielman tavoitteena on tarkastella lapojen uusiokäytön sekä kierrätyksen mahdollisuuksia ja markkinoita. Erityisen tarkastelun kohteena ovat ison mittakaavan ratkaisut, joista löytyisi vaihtoehto kooltaan ja määrältään kasvavan tuulivoimakannan kiertotaloudelle. Lapojen uusiokäyttöä on tähän mennessä sovellettu lähinnä yksittäisissä kohteissa ja tutkimus on pienimuotoista. Mahdollisuuksia on käyttää lapoja esimerkiksi kaupunki-installaatioina, sähköpylväinä tai rakennusteollisuudessa.

Kierrätykseen liittyvää tutkimusta on laajemmin, mutta ympäristön ja markkinoiden kannalta kestävät ratkaisut ovat vielä löytämättä. Lämpöä hyödyntävät tekniikat, kuten pyrolyysi ja leijupetipoltto ovat teollisessa mittakaavassa sovellettavia, mutta energiaintensiivisiä menetelmiä. Solvolyyysillä on potentiaalia tehokkaaksi kierrätystekniikaksi, mutta ongelmina ovat korkea energiankulutus ja hinta. Mekaanista

käsittelyä vaaditaan yleensä kierrätyksessä lapojen pienentämiseksi eri tekniikoita varten. Mekaanisen käsittelyn avulla voidaan myös käsitellä komposiitti murskaksi tai jauheeksi asti.

Suomessa tuulivoimaloiden lapoja on toistaiseksi hyödynnetty vasta vähän. Lapoja on viety muualle Eurooppaan ja viime aikoina hyödynnetty myös Suomen sementtiteollisuudessa. Monipuolisemmalle kierrätykselle ja uusiokäytölle on kuitenkin edellytyksiä. Uusiokäyttö pidentää lujiksi valmistettujen rakenteiden elinikää. Kierrätyksen avulla vähennetään tarvetta neitsytmateriaaleille. Keskeisenä tekijänä kiertotaloudelle on uusiokäytön ja kierrätetyn materiaalin markkinat, joita tässä tutkielmassa myös selvitetään.

*Asiasanat: Tuulivoima, uusiokäyttö, kierrätys, kiertotalous, tuulivoimalan lavat*

# ABSTRACT

Repurpose and recycling possibilities of wind turbine blades

Jaakko Nissilä

University of Oulu, Degree Programme of Environmental Engineering

Bachelor's thesis 2022, 34 pp.

Supervisor at the university: Satu Pitkäaho

Other supervisors: Katri Luoma-aho, Aila Ryhänen

Energy sector causes most of Finland's greenhouse gas emissions. However, there are positive steps towards more sustainable energy production. Increasingly important wind power lifts the energy self-sufficiency in Finland while helping to lower the need for fossil fuel use. New challenges to circular economy come along. Wind turbine blades are difficult for the waste management due to their complex structure and composition.

So far, the only way on an industrial scale to handle the used wind turbine blades is in cement industry. Inorganic matter is utilized in cement clinker and organic matter as energy. The process is not fully recycling. There is increasing need for progress circular economy to follow the waste hierarchy.

This thesis is a literature review about circular economy of wind power in Finland with the focus on North Ostrobothnia. The goal is to examine the possibilities and the market of blade repurposing and recycling, especially on a large scale. Blade repurposing is not yet big enough. However, possible applications include urban installations, utility poles, and construction industry.

Research on recycling is broader but there are still issues with sustainable solutions. Thermal techniques, such as pyrolysis and fluidized bed combustion are applicable on an industrial scale, but they are highly energy intensive. Solvolysis has potential for efficiency but has high energy consumption and price. Mechanical grinding is used in most of the cases to reduce the size of the blade. Grinding can also be used all the way to reduce the grain size to crushed aggregate or powder.

Wind turbine blades from Finland have to date been utilized in cement industry abroad in Europe and now also in Finland. There is demand for more diverse set of recycling and

repurposing. Repurposing increases the lifecycle of strong structures. Recycling decreases the need for virgin materials. One key aspect in circular economy examined in this paper is the market for repurposing and recycled materials.

*Keywords: Wind power, repurpose, recycling, circular economy, wind turbine blades*

# SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	7
2 Tuulivoimalan rakenne.....	9
2.1 Lapojen rakenne .....	10
3 Tuulivoima osana kestäväää energiantuotantoa.....	12
4 Tuulivoimalan lapojen uusiokäyttö.....	17
5 Tuulivoimalan lapojen kierrätys ja hyödyntäminen.....	20
5.1 Mekaaninen käsittely osana kierrätysprosessia.....	21
5.2 Kuitujen erottaminen matriisista pyrolyysin avulla .....	23
5.3 Leijupetipoltto kuitujen lähteenä.....	24
5.4 Solvolyyysi komposiitin kemiallisena kierrätystekniikkana.....	25
5.5 Mikroaaltopyrolyysi potentiaalisena komposiitin kierrätystekniikkana .....	26
6 Yhteenveto ja Johtopäätökset.....	28
LÄHTEET .....	30

# 1 JOHDANTO

Tarkastellessa energiasektorin jopa 72 % osuutta Suomen kasvihuonekaasupäästöistä (Suomen virallinen tilasto 2020) sekä eri energiamuotojen elinkaaren aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä (Schlömer ym. 2014), tuulivoiman voidaan todeta olevan keskeinen osa tulevaisuuden energiantuotantoa, kun halutaan vähentää päästöjä ja tavoitellaan hiilineutraaliutta. Tuulivoima onkin kasvattanut osuuttaan Suomessa, ja tilastojen mukaan tuotantokapasiteetti on viimeisen kymmenen vuoden aikana lähes 16-kertaistunut (VTT 2014; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b). Tuulivoimaloiden purkamisen jälkeiset toimenpiteet ovat merkittävä kysymys kestävyuden kannalta. Erityisesti kiertotalous tuulivoimalan lapojen osalta tuottaa haasteita, joihin tässä tutkielmassa pyritään etsimään ratkaisuja.

EU:n jätepuitedirektiivin (2008/98/EC) mukaisen jätehierarkian tavoitteena on ympäristön ja yhteiskunnan edun mukainen luonnonvarojen käytön optimointi. Luonnonvaroihin kohdistuvaa painetta pyritään pienentämään ensisijaisesti vähentämällä jätteen määrää ja haitallisuutta. Seuraavana vaihtoehtona suositaan uusiokäyttöä, jossa jo valmis tuote valjastetaan uudelleen käyttöön joko alkuperäiseen tai muuhun tarkoitukseen. Seuraavaksi paras vaihtoehto on kierrätys, jossa jätteeksi päätyneen tuotteen materiaali prosessoidaan uudelleen käytettäväksi materiaaliksi siten, että sillä voidaan korvata neitseellisten materiaalien käyttöä. Muu hyödyntäminen sisältää esimerkiksi jätteenpolton, jossa jäte hyödynnetään energiaksi, jolloin voidaan vähentää jonkin muun materiaalin energiakäyttöä. Viimeisin vaihtoehto on jätteen loppusijoitus esimerkiksi kaatopaikalle, jolloin sitä ei voida hyödyntää mihinkään. (Direktiivi 2008/98/EC) Tuulivoimalan lapoja ei Suomessa loppusijoiteta orgaanisen jätteen kaatopaikkakiellon vuoksi. Vuodesta 2016 alkaen orgaanista ainesta ei ole saanut olla yli 15 % loppusijoitettavassa jätteessä laskettuna orgaanisen hiilen pitoisuutena. (Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 2013/331 § 53)

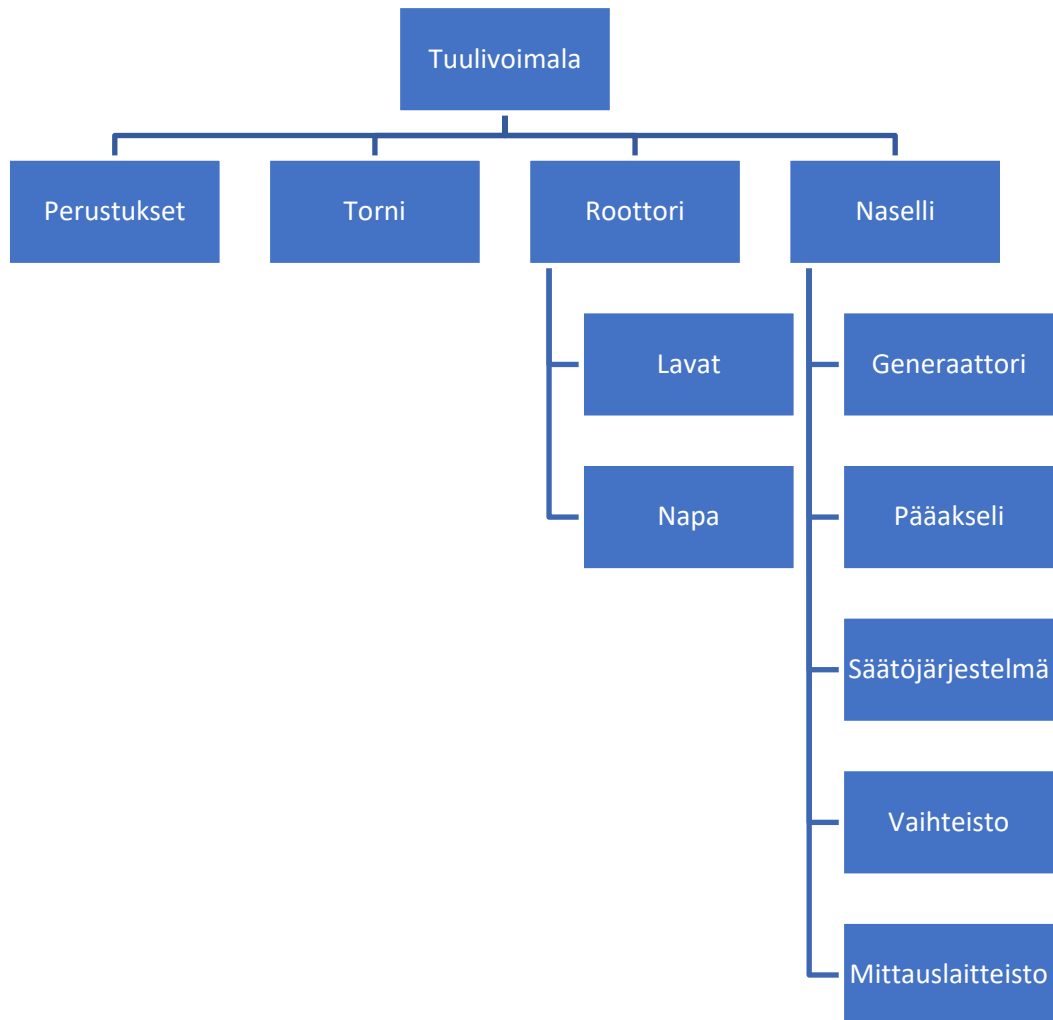
Tässä tutkielmassa keskitytään kierrätyksen osalta tuulivoimalan lapoihin, koska ne ovat kokonsa ja koostumuksensa puolesta vielä tänä päivänä haastavia kierrättää (Mattsson ym. 2020). Kierrätettävyyden ja uusiokäytön mahdollisuuksien lisäksi tutkielmassa tarkastellaan käytöstä poistuneiden tuulivoimaloiden lapojen ja niistä saatavien

materiaalien markkinoita. Erityisesti pyritään löytämään suuren mittakaavan kiertotalousratkaisuja, joita tarvitaan yhä enemmän, kun uudetkin tuulivoimalat saapuvat käyttöikänsä päähän lähivuosikymmeninä. Maantieteellisesti tutkielma painottuu Suomeen, erityisesti Pohjois-Pohjanmaalle. Kiertotalousratkaisuja tuulivoimalan lavoille pyritään löytämään uusimpien tutkimusten sekä muiden maiden esimerkkien kautta. Nykyisellään tuulivoimaloiden jätteeksi päätyviä lapoja pystytään hyödyntämään kierrätyksen tasolla vasta osittain, ja uusiokäytön osalta tutkimus on toistaiseksi ollut vähäistä. Lukumäärältään sekä kooltaan kasvava tuulivoimalakanta tarvitsee kiertotalouden mukaista ratkaisua, jota tässä tutkielmassa pyritään löytämään.



## 2 TUULIVOIMALAN RAKENNE

Tuulivoimala koostuu roottorista, konehuoneesta sekä tornista, joka on pystytetty tyypillisesti betonisiin perustuksiin (Kuva 1). Roottorin osia ovat lavat sekä napa. Konehuone, eli naselli, puolestaan pitää sisällään generaattorin, turbiinin pääakselin, vaihteiston, säätöjärjestelmät sekä mittauslaitteistot. Konehuoneen säätöjärjestelmiin kuuluvat suunnanmuutoslaakeri ja -moottori ohjaavat mittauslaitteiston datan perusteella turbiinia ideaaliin kulmaan tuulen suhteen. (Korpela 2016, s. 49–51)



Kuva 1. Tuulivoimalan rakenteen pääpiirteet (Korpela 2016).

Lapojen tehtävä on vastaanottaa tuulen liike-energiaa roottoria pyörittäväksi pyörimisenergiaksi. Roottorin kiertoliike pyörittää mahdolliseen vaihdelaatikkoon

yhteydessä olevaa pääakselia. Vaihdelaatikko muuttaa roottorin pyörimisnopeuden (n. 10 kierrosta minuutissa) generaattorille suotuisaksi (> 1000 kierrosta minuutissa). Kaikissa tuulivoimaloissa vaihdelaatikkoa ei kuitenkaan ole, jolloin käytössä on suoravetotekniikka ja tuulivoimalan roottorin pyörimisnopeudelle suunniteltu erityinen generaattori. Generaattorin tehtävänä on muuntaa roottorin pyörimisenergiaa edelleen sähköenergiaksi. (Korpela 2016, s. 49–51, 70)

Tyypillinen tuulivoimatuotannossa oleva voimala on vaaka-akselinen ja kolmilapainen. Tuulivoimalat, joissa lapoja on kolme, ovat vakaampia ja omaavat suuremman vääntömomentin kuin yhden tai kahden lavan voimalat. Toisaalta yli kolmen lavan voimaloiden pyörimisnopeus pienenee, jolloin ne häviävät tehossa kolmilapaiselle voimalalle. (Korpela 2016, s. 65–67)

## 2.1 Lapojen rakenne

Kolme lapaa on vakioitunut määrä tuulivoimaloissa, mutta vääntömomenttia on kasvatettu tekemällä lavoista suurempia. Suomen Tuulivoimayhdistys ry:n (2022b) tilastojen mukaan roottorin halkaisija on noin viisinkertaistunut asennetuissa voimaloissa vuosien 1993 ja 2022 välillä. Asennettujen tuulivoimaloiden teho on kasvanut merkittävästi, sillä 2000-luvun taitteessa keskimääräinen teho oli noin 1 MW, kun se vuoden 2022 alkupuoliskolla oli yli 5 MW. Keskimääräinen tuulivoimala oli Suomessa teholtaan vuoden 2022 kesäkuussa 3,5 MW ja Pohjois-Pohjanmaalla 3,7 MW. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b)

Lapojen kasvava koko luo lisää haasteita kiertotaloudelle, jonka kannalta lavat ovat jo valmiiksi tuulivoimalan haastavimpia yksittäisiä komponentteja (Mattsson ym. 2020). Tämä johtuu niiden monimutkaisesta koostumuksesta ja rakenteesta. Tuulivoimalan lavat koostuvat kahdesta ulospäin kuperasta komposiittilevystä. Komposiittilevyissä on tukevia laminaattirakenteita keskiosissa sekä päädyissä. Päädyistä lavan komposiittilevyt ovat kiinnitettyinä toisiinsa kerrosrakenteeksi liimasaumalla. Sisältä onto rakenne on tuettu keskiosan laminaattirakenteisiin yhdellä tai useammalla palkilla. Lavat ovat

valmistettu komposiitista, jossa lujitteena toimivat tyypillisesti lasi- tai hiilikuidut ja matriisimateriaalina käytetään kerta- tai kestopuoveja. Lisäksi lapojen rakennetta tukemaan tarvitaan balsapuuta tai vaahtomuoveja, erilaisia metalleja sekä pinnoitteita. (Jensen & Skelton 2018, s. 166; Mattsson ym. 2020, s. 1, 3; Mishnaevsky Jr. ym. 2017, s. 2–3, 5–10)

### 3 TUULIVOIMA OSANA KESTÄVÄÄ ENERGIANTUOTANTOA

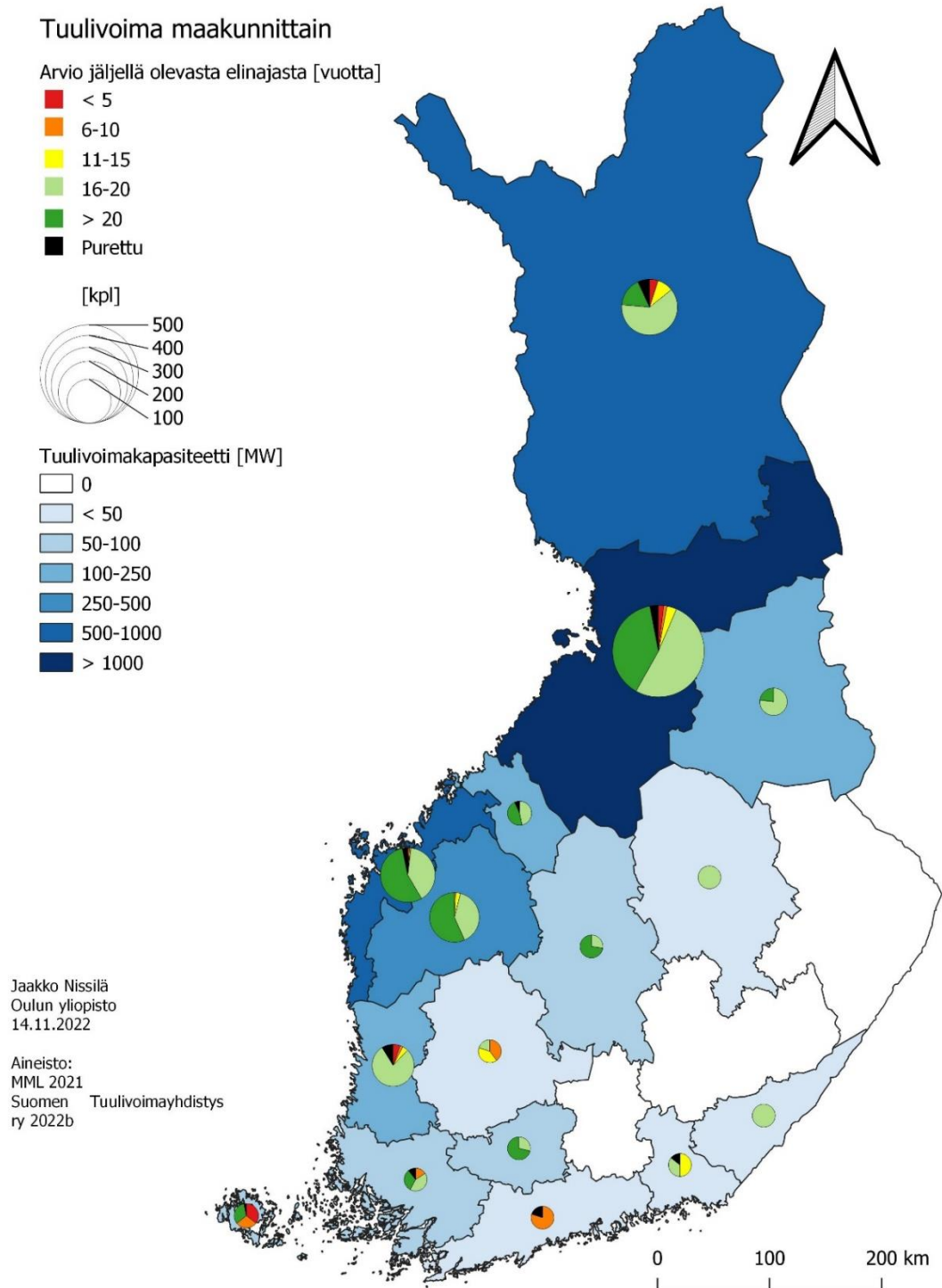
Uusiutuvien energiamuotojen osuus energian kokonaiskulutuksesta on kasvattanut osuuttaan Suomessa ripeästi. Kun vuonna 2010 uusiutuvat energiamuodot tuottivat kokonaiskulutuksesta noin 27 %, oli osuus 10 vuotta myöhemmin noussut reiluun 39 %:iin. Samassa ajassa tuulivoimatuotannon osuus energiankulutuksesta kasvoi jopa 38 kertaisesti. (Suomen virallinen tilasto 2022) Yksi syy tuulivoimatuotannon suosioon on, että sen elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt ovat mediaaniltaan kaikkein matalimpia yhdessä ydinvoiman kanssa. Uusiutuvista energiamuodoista tuulivoiman elinkaaren aikaisten kasvihuonekaasupäästöjen mediaaniarvo on maatuulivoimaloilla 12 ja merituulivoimaloilla 11 gCO<sub>2</sub>eq./kWh, kun vesivoimalla vastaava luku on 24 ja aurinkovoimalla 27–48 gCO<sub>2</sub>eq./kWh riippuen kennotyypistä. (Schlömer ym. 2014, s. 1335)

Tuulivoiman osalta kasvihuonekaasupäästöt koostuvat Schlömerin ym. (2014) kokoamissa laskelmissa komponenttien tuotannosta, perustuksesta, logistiikasta, operoinnista, huoltamisesta sekä jälkikäsittelystä. Arvesenin ja Hertwichin (2012, s. 11–12) mukaan tuulivoiman suurimmat päästöt syntyvät komponenttien tuotannosta sekä perustuksesta, mutta myös jälkikäsittelyllä on merkittävä rooli ympäristövaikutuksissa. Kierrättämällä voidaan arvioiden mukaan vähentää noin 20 % kokonaispäästöistä. Tuulivoiman päästömääriin liittyy epävarmuustekijöitä, sillä kaikki tieto ei ole avoimesti saatavilla. Esimerkiksi tuulivoiman lapojen materiaalit eivät ole julkista tietoa yksittäisten lapojen osalta. (Arvesen & Hertwich 2012)

Kesäkuun 2022 lopussa Suomessa oli käytössä 1112 tuulivoimalaa, joista 154 oli rakennettu kuluneena vuonna. Vielä merkittävämpää uusien tuulivoimaloiden rakentamisessa on tuotantokapasiteetti, joka on yksikkökohtaisesti kasvanut ajan mittaan. Kokonaiskapasiteetti vuoden 2022 kesäkuussa oli 4 037 MW, josta 784 MW oli lisäystä kyseisen vuoden ensimmäisellä puoliskolla rakennetuista tuulivoimaloista. Yhtenä merkittävänä tekijänä tuulivoimakapasiteetin huomattavassa kasvussa on yhä suurempi napakorkeus asennetuissa voimaloissa. Napakorkeudella tarkoitetaan etäisyyttä maanpinnasta tuulivoimalan navan keskipisteeseen. Kun 1990-luvulla napakorkeus oli

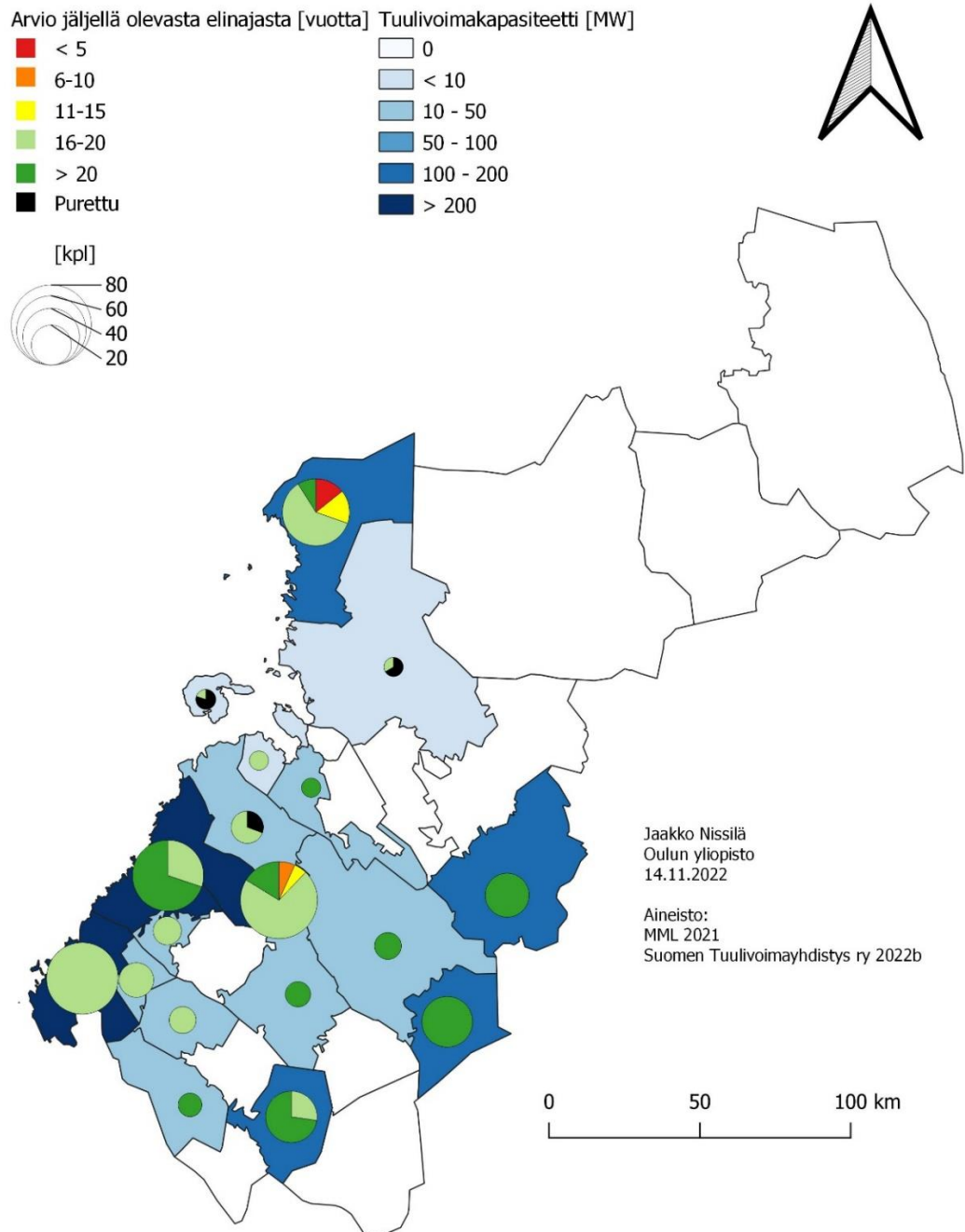
tyypillisesti alle 50 metriä, saavuttavat voimalat nykyisin keskimäärin jo lähes 150 metrin napakorkeuden, mikä luonnollisesti kasvattaa niiden tuotantokapasiteettia. (Suomen tuulivoimayhdistys ry 2022b)

Tuulivoiman tuotantokapasiteetin suhteen Suomesta löytyy huomattavia alueellisia eroja. Tuulivoima on keskittynyt Suomessa pohjoisiin maakuntiin sekä länsirannikolle, kun taas Itä- ja Kaakkois-Suomen maakunnissa tuulivoima on hyvin vähäistä, tai olematonta (Kuva 2). Erityisesti Pohjois-Pohjanmaa on tuulivoiman suhteen Suomen mittakaavalla hyvin merkittävä. Pohjois-Pohjanmaan lähes 1 600 MW kapasiteetti on yli 1 000 MW suurempi toiseksi suurimpaan, Pohjanmaan maakuntaan, nähden. Pohjois-Pohjanmaalla suurimmat tuulivoimakapasiteetit ovat Pyhäjoen, Raahen ja Kalajoen kunnissa, joissa kussakin tuulivoimakapasiteetti on yli 200 MW (Kuva 3).



Kuva 2. Tuulivoiman määrä maakunnittain. Kuvassa esitettyä tuulivoiman määrää energiantuotannonkapasiteettina [MW], tuulivoimaloiden lukumäärä ja arvio tuulivoimaloiden jäljellä olevasta eliniästä (Kuvan tekijä: Jaakko Nissilä, Lähteet: MML 2021; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b).

### Tuulivoima kunnittain Pohjois-Pohjanmaalla



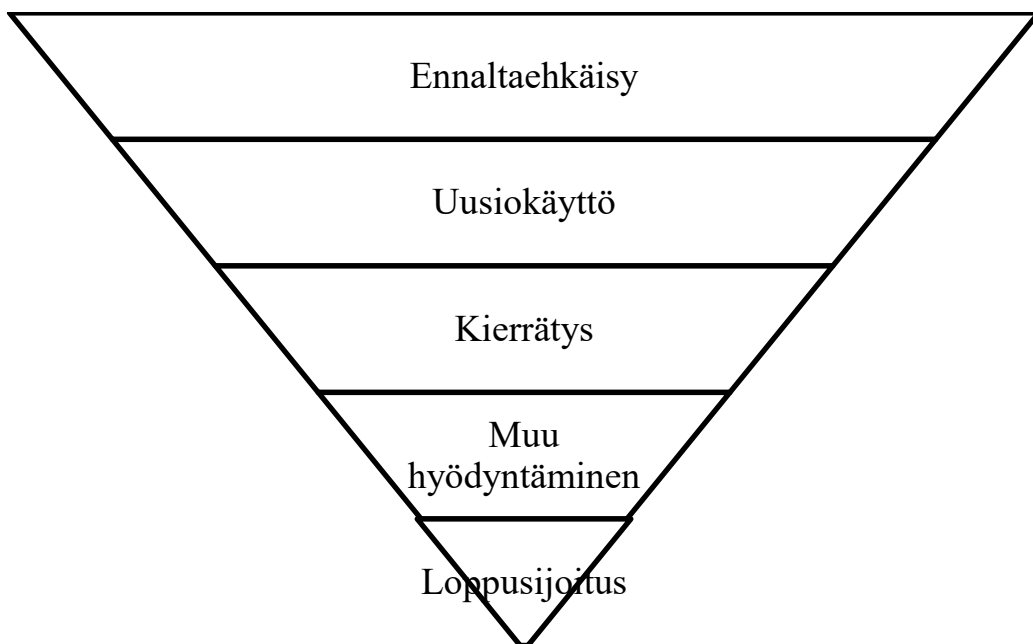
Kuva 3. Tuulivoiman määrä kunnittain Pohjois-Pohjanmaalla. Kuvassa esitettynä tuulivoiman määrä energiantuotannonkapasiteettina [MW], tuulivoimaloiden lukumäärä ja arvio tuulivoimaloiden jäljellä olevasta eliniästä (Kuvan tekijä: Jaakko Nissilä, Lähteet: MML 2021; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b).

Tyypillinen käyttöikä tuulivoimaloilla on noin 25 vuotta, joskin uusin teknologia mahdollistaa yli 30 vuoden turvallisen käytön. Kesäkuun lopussa 2022 Suomeen rakennetuista tuulivoimaloista oli purettu vasta 45, joten tarve suuren mittakaavan jätehuollolle on vasta edessäpäin, kun huomioi nykyisen 1112 tuulivoimayksikön volyymin. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b; Suomen Tuulivoimayhdistys ry n.d.). Tarkastellessa tuulivoimaloiden elinaikaa Suomessa maakuntien tasolla (Kuva 2) ja Pohjois-Pohjanmaalla kuntien tasolla (Kuva 3) voidaan huomata tuulivoimakannan olevan pääosin uutta. Kuvissa 2 ja 3 tilannetta on arvioitu 25 vuoden elinajalla alkaen siitä vuodesta, jolloin turbiini on pystytetty. Eteläisessä Suomessa tuulivoimakannan voidaan huomata olevan keskimäärin vanhempaa, kun taas pohjoisemmassa tuulivoimaloita on pystytetty suurella volyymilla viimeisen kymmenen vuoden aikana (kuvissa 2 ja 3 vihreät ja vaaleanvihreät). Näin ollen tuulivoimaloihin liittyvän kiertotalouden tarpeen voidaan arvioida kasvavan valtavasti reilun 15 vuoden kuluttua. Maailmanlaajuisesti tuulivoimaloiden lopoja arvioidaan vuonna 2050 otettavan pois käytöstä jopa kahden miljoonan tonnin verran (Joustra ym. 2021, s. 2).



## 4 TUULIVOIMALAN LAPOJEN UUSIOKÄYTTÖ

Jätehierarkian (Kuva 4) mukaisesti ensisijaisena vaihtoehtona ympäristövaikutusten vähentämiseksi on jätteen määrän tai haitallisuuden vähentäminen. Tyypillisesti lavat koostuvat erilaisista komposiittimateriaaleista, mutta esimerkiksi Stora Ensolla on kehitteillä puupohjaisia ratkaisuja yhteistyössä Voodin Blade Technologyn kanssa (Yle 2022). Jo valmistettujen tuulivoimaloiden lapojen saapuessa elinikänsä loppuun, uusiokäyttö on ensisijainen kiertotalousratkaisu. Kierrätykseen verrattuna uusiokäyttö vaatii vähemmän jätteen prosessointia, mikä on huomattava etu kooltaan suurten ja rakenteeltaan kestävien lapojen kohdalla. Uusiokäytön avulla voidaan hyödyntää valmista rakennetta kokonaisuutena tai osina ympäristövaikutuksia pienentäen. (Beauson ym. 2022, s. 7–8; Jensen & Skelton 2018, s. 168–172) Vaikka ideoita uusiokäytölle löytyy alan tutkimuksista, jäävät ne enimmäkseen maininnan tasolle. Tuulivoimalan lapojen uusiokäytön mahdollisuuksia on tutkittu tähän mennessä vain vähän. Erityisesti laajan mittakaavan uusiokäytölle soveltuvista ratkaisuista on puutetta (Beauson ym. 2022, s. 8).



Kuva 4. Jätehierarkia (mukaillen Direktiivi 2008/98/EC).

Uusiokäyttöä varten on lapojen laatu ja kunto selvitettävä, kun käyttöikä on saavutettu. Lapojen uusiokäytölle halutaan kehittää suuren mittakaavan ratkaisu, mutta jokainen yksittäinen lapa nykyisellään on tutkittava erikseen. Haasteiksi tuulivoimaloiden lapojen uusiokäytölle on mainittu myös erilaiset rakenteet ja materiaalit sekä tarvittava käsittely uusiokäyttöön sopivaan muotoon. Turvallista uusiokäyttöä varten tarvitaan edelleen vahinkojen ja kunnan tutkimisen kehitystä. Yhtenä keinona lavan rakenteen, materiaalien ja tilan selvittämiseksi on pohdittu 3D-mallintamista, jolloin salassa pidettäviä tietoja lavoista ei välttämättä tarvita. (Beauson ym. 2022)

Myös logistiikka on uusiokäytössä epäedullista; kokonaisten lapojen tai osien kuljettaminen erilaisiin kohteisiin luo omia haasteitaan (Jensen & Skelton 2018, s. 170). Toisaalta uusiokäyttö kohteesta riippuen voi myös helpottaa logistiikkaa, sillä käytöstä poistuvia lapa on joka tapauksessa kuljetettava maanteitä pitkin. Uusiokäyttökohteen valitseminen käytöstä poistettavan tuulivoimalan läheisyydestä on logistisesti edullista. (Martini & Xydis 2022, s. 4)

Mahdolliseksi vaihtoehdoksi ison mittakaavan uusiokäyttöratkaisuksi Alshannaq ym. (2021) ehdottavat jätteiksi päätyvien lapojen käyttöä sähköpylväinä. Mallissa roottorin navassa kiinni oleva leveämpi pääty sijoitettaisiin maata vasten kohtisuoraan. Alaosan ontto sisäosa täytettäisiin laastilla, jolloin se kestäisi muuttuvia sääolosuhteita. Mallissa pohjaan valetaan lisäksi betonia, johon sijoitettaisiin myös lavan alaosaan asti yltävät teräksiset raudoitustangot. Yläosaan mallissa on kiinnitetty kaksi kuitulujitetusta muovista valmistettua poikkisuuntaista palkkia, jotka kannattelevat yhteensä kolmea sähköjohtoja. (Alshannaq ym. 2021)

Tuulivoimalan lavat ovat kokonsa puolesta logistisesti haasteellisia. Lapojen kuljettaminen on haasteellisinta silloin, kun lapa on välttämätön käsitellä kokonaisena, eli käyttöönottaessa sekä joitain uusiokäyttökohteita varten. (Beauson ym. 2022, s. 8) Alshannaq ym. (2021) esittämä lapojen uusiokäyttökohteeksi sähköpylväinä on suotuisaa logistisista ja taloudellisista syistä. Lapa tarvitaan avoimessa maastossa laajalti, joten ne voitaisiin usein sijoittaa sähköpylväiksi puretun tuulivoimalan läheisyydessä. Näin

vältyttäisiin lapojen osalta pahimmilta logistisilta haasteilta. (Martini & Xydis 2022, s. 4) Hiilikomposiitin kuljetukseen energiaa kuluu arviolta noin 0,57 MJ/kg (Kooduvalli ym. 2022, s. 7, 9)

Toinen potentiaalinen uusiokäyttöratkaisu lavoille on kaupunki-installaatiot. Julkiseen tilaan sopiviksi muutetuista tuulivoimaloiden lavoista on jo kokemusta: lavoista on tehty esimerkiksi penkki, leikkipuisto, merkkikyyltti sekä katos Alankomaissa. Lavat ovat valmistettu sietämään erilaisia sääolosuhteita, joten ne ovat turvallisia käytettäviksi ulkotiloissa sellaisenaan. Suurimmat haasteet laajan mittakaavan toteutuksessa liittyvät installaatioiden yksilölliseen suunnitteluun lavan tullessa uusiokäytettäväksi. (Jensen & Skelton 2018, s. 170)

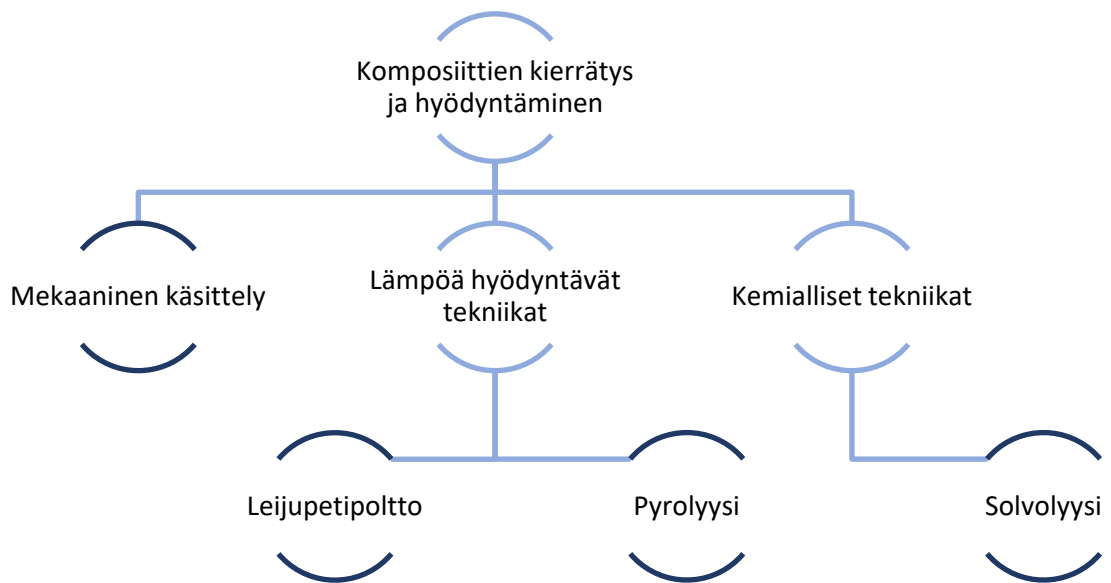
Tuulivoimaloiden lapoja voidaan uusiokäyttää myös siltoihin. Tähän lavat sopivat muotonsa ja rakenteensa puolesta, ja niitä voidaankin joissain tapauksissa käyttää ilman pilkkomista pienempään kokoon. Vaatimuksena on ominaisuuksien ja kunnan laskelmointi esimerkiksi käytöstä poistetun lavan vahvuuden suhteen. (Jensen & Skelton 2018, s. 170) Uusiokäytettävän lavan tilan ja ominaisuuksien todentaminen on haastavaa mutta välttämätöntä riippumatta käyttökohteesta. Sillan tapauksessa kyse on välittömästä käyttäjien turvallisuudesta, ja niihin kohdistuva paine voi olla suuri. Siksi lavan tilan selvittäminen siltoihin käytettäväksi on erityisen tärkeää.

Bank ym. (2018) ovat mallintaneet mahdollisuuksia tuulivoimalan lapojen osille talonrakennuksessa. Tutkimus sijoittuu itäisen Meksikon sateisiin ja kosteisiin olosuhteisiin, joissa lavoilla on mahdollisuus eristää ja estää kosteuden vahingollisia vaikutuksia rakenteisiin. Lapojen paksusta osasta leikattuja ontton lieriön muotoisia osia voidaan käyttää korottamaan rakennuksia. Tämä auttaa estämään tulvien aiheuttamia tuhoja. Lapojen sisällä olevia tukirakenteita voidaan potentiaalisesti uusiokäyttää esimerkiksi Meksikon Yucatánin osavaltiossa kosteudelle ja varkauksille alttiiden ovien ja ikkunoiden suojaamiseen. Lapoja voidaan uusiokäyttää myös kattoina. Näin hyödynnettäisiin lapojen vahvaa, mutta kevyttä rakennetta. Vaihtoehtoina on käyttää joko lavan sisällä olevaa tukirakennetta kannattelemassa kaltevaa ulkorakennetta tai pilkkoa katoksi lavan kaarevia osia. (Bank ym. 2018)

## 5 TUULIVOIMALAN LAPOJEN KIERRÄTYS JA HYÖDYNTÄMINEN

Komposiittimateriaaleja voidaan kierrättää mekaanisia, termisiä ja kemiallisia prosesseja hyödyntäen (Kuva 5). Kierrättämisessä kasvavana haasteena on uusien tuulivoimalan lapojen huomattavasti suurempi koko vanhempiin verrattuna. Tähän mennessä kierrätetyt lavat ovat olleet tyypillisesti pituudeltaan 15–20 metrisiä. Suomen Tuulivoimayhdistys ry:n (2022b) mukaan roottorin keskimääräinen halkaisija on 2020-luvun taitteessa asennetuissa tuulivoimaloissa kolminkertaistunut ennen vuosituhannen vaihdetta asennettuihin verrattuna. Uusimpien lapojen, jotka voivat olla pituudeltaan 75–80 metrisiä, kierrätys ja uusiokäyttö ovat hankalampia logistisesti sekä vaativat enemmän mekaanista prosessointia. (Jensen & Skelton 2018, s. 167)

Kierrätetyistä materiaaleista ei toistaiseksi valmisteta uusia tuulivoimaloiden lapoja. Kyseisen teeman parissa piileekin mahdollisuus kasvattaa taloudellisia intressejä kierrättää komposiittimateriaaleja. Jos kierrätetyistä kuiduista voitaisiin valmistaa uutta komposiittia lapojen materiaaliksi, niiden arvo nousisi suhteessa neitseellisiin materiaaleihin. (Beauson ym. 2022, s. 4–5)



Kuva 5. Yleisimmät komposiitin kierrätysprosessiin käytettävät tekniikat (Beauson ym. 2022; Dorigato 2021; Oliveux ym. 2015).

## 5.1 Mekaaninen käsittely osana kierrätysprosessia

Komposiitit voidaan kierrättää hyödyntäen mekaanisia käsittelytapoja, joilla materiaalista saadaan pienempiä hyödyntämiskelpoisia partikkeleja. Tyypillisesti partikkelit pienennetään rakeiksi, murskaksi tai jauheeksi asti. Mekaanisesti käsiteltyä komposiittia voidaan hyödyntää esimerkiksi täyteaineena tai uuden komposiitin raaka-aineena. Mekaaninen käsittely pitää sisällään esimerkiksi jauhamisen, jyrsimisen, silppuamisen, murskauksen ja paloittelun. (Beauson ym. 2022, s. 8; Dorigato 2021, s. 119–120)

Mekaanisella käsittelyllä kuitujen vetolujuus säilyy parhaiten muihin kierrätystekniikoihin verrattuna. Esimerkiksi lasikuitujen lujuusominaisuudet heikkenevät, kun niitä käsitellään yli 250 °C lämpötilassa. (Beauson ym. 2014, s. 1550–1551) Mekaaninen käsittely on tällä hetkellä ainoa yleisesti käytössä oleva tekniikka, jonka avulla komposiittia voidaan kierrättää alle 250 °C lämpötilassa. Mekaanisen käsittelyn etuna on myös tasalaatuisuus, jolloin materiaalin käyttö uusissa kohteissa helpottuu. Eri raekoot voidaan erottaa toisistaan seuloilla mekaanisen käsittelyn

prosessissa. Materiaalin koostumuksen pystyy selvittämään rakeista, jolloin kierrätysmahdollisuudet ovat monipuolisempia myös ilman salassa pidettäviä tietoja lapojen koostumuksesta. Mekaanisen käsittelyn avulla pienennettyä komposiittia voidaan näin käyttää myös yhdessä muun komposiittijätteen kanssa. (Beauson ym. 2022, s. 8)

Olenainen osa tuulivoimaloiden lapojen uusiokäyttöä ja kierrättämistä on pilkkominen pienemmiksi paloiksi. Näin komponentti saadaan sopimaan esimerkiksi lämpöä vaativien kierrätystekniikoiden polttouuneihin tai leikkipuistojen rakenteisiin. Paloitteluun soveltuu esimerkiksi lankasaha, sirkkeli, tai vesisuihkuleikkauskone. Mekaanisessa käsittelyssä syntyy runsaasti pölyä, joka itsessään on terveysriski. (Beauson ym. 2022, s. 7–8) Pilkkomisessa syntyvää pölyä voidaan hallita erilaisilla veteen tai imuun perustuvilla keräysjärjestelmillä. (Jensen & Skelton 2018, s. 168–170)

Mekaanisesti käsiteltyä komposiittia voidaan käyttää teollisuudessa esimerkiksi täyteaineena, uusien komposiittien raaka-aineena sekä sementin valmistuksessa. Mekaanisesti käsiteltyä komposiittia on käytetty muun muassa liikenneinfrastruktuurissa, kuten ratapölkyissä ja betoniporsaissa sekä rakennusteollisuuden komponenteissa, kuten terassilautoissa ja äänieristepaneeleissa. Yleisesti mekaaninen käsittely heikentää materiaalin arvoa. Suuren komponentin mekaaniseen käsittelyyn vaaditaan monta prosessointivaihetta ja materiaalin mekaaniset ominaisuudet heikkenevät neitseellisiin materiaaleihin verrattuna. (Beauson ym. 2022, s. 8) Lasikuitukomposiitin osalta mekaaninen käsittely säilyttää lämpöä tai kemiallista käsittelyä vaativiin tekniikoihin verrattuna parhaat ominaisuudet. Energiankulutus on mekaanisessa käsittelyssä suhteessa hyvin pientä: 0,27 MJ/kg. (Liu ym. 2019)

### ***Komposiittimurskan hyödyntäminen sementtiteollisuudessa***

Mekaanisesti käsiteltyä komposiittia voidaan hyödyntää esimerkiksi sementtiteollisuudessa. Sementin valmistuksessa komposiittimurska syötetään polttoaineen mukana sementtiuuniin, jolloin komposiitin orgaaninen aines voidaan hyödyntää energiana. Tällöin muiden polttoaineiden tarve vähenee prosessissa, jossa

lämpötilan tulee nousta jopa 1 450 °C:een. Epäorgaaninen palamaton materiaali sekoittuu muuhun ominaisuuksiltaan vastaavaan kiviainekseen, jota hyödynnetään klinkkerinä sementin valmistuksessa. Klinkkeri on sementin valmistuksessa käytettävä pääosin kiviaineksestä koostuva sidosaine. Komposiittimurskan hyödyntäminen on sementtiteollisuuden kiertotalouden kannalta oiva ratkaisu tyydyttäen osittain tarpeen täyteaineelle. Sementtiteollisuudessa käytettävästä komposiittimurskasta tarvitaan kuitenkin tietoa ennen polttoa, jotta voidaan varmistua laadusta. (Beauson ym. 2022, s. 9; Fonte & Xydis 2021, s. 4)

Edellä kuvattua tekniikkaa ei voida puhtaasti laskea kierrätykseksi, vaan se sijoittuu jätehierarkiassa kierrätyksen ja muun hyödyntämisen välille. Laajassa mittakaavassa lapoja ei toistaiseksi ole pystytty hyödyntämään jätehierarkiassa tätä korkeammalla (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022a). Tuulivoimaloiden lapoja on tyypillisesti viety Suomesta Saksaan, jossa sementtiteollisuuden laitteistolla on edellytykset komposiittimateriaalin hyödyntämiselle (Beauson ym. 2022, s. 9), mutta sementtiteollisuus on alkanut käyttää lapoja prosesseissaan myös Suomessa (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022a). Komposiittijätteen avulla sementin valmistuksen hiilijalanjälkeä voidaan Muoviteollisuus ry:n (2014, s. 6) mukaan pienentää 16 % käyttämällä komposiittia raaka-aineesta 75 %.

## **5.2 Kuitujen erottaminen matriisista pyrolyysin avulla**

Keskeinen lämpöä hyödyntävä komposiittijätteen kierrätystekniikka on pyrolyysi. Korkeassa lämpötilassa, 450–1000 °C, komposiitista saadaan erotettua kuidut samalla tuottaen öljyä ja kaasuja. Pyrolyysi voidaan toteuttaa hapettomassa tai hapellisessa tilassa, mutta kuitujen hiiltymisen minimoimiseksi hapen poissaolo on edullisempaa. (Oliveux ym. 2015, s. 65–66) Hiiltymisen lisäksi pyrolyysin kautta kierrätetyt kuidut ovat lujuusominaisuuksiltaan heikompia ja satunnaisen muotoisia, jolloin niiden arvo neitseellisiin kuituihin verrattuna on pienempi. (Beauson ym. 2022, s. 8)

Korkeat lämpötilat vaativat runsaasti energiaa. Pyrolyysiin energiaa kuluu noin 21 MJ/kg, mikä on kierrätystekniikoita vertailtaessa suuri luku. Tekniikan avulla hiilikuitukomposiitin mekaaniset ominaisuudet säilyvät lasikuitukomposiittia paremmin. (Liu ym. 2019) Pyrolyysiä varten tarvitaan mekaanista käsittelyä, jotta lavat mahtuvat pyrolyysiuuniin. Pyrolyysiä voidaan käyttää teollisen mittakaavan kierrätysprosessissa. Esimerkiksi Tanskassa valmistetaan eristemateriaaleja tuulivoimalan lavoista hyödyntäen pyrolyysiä. (Beauson ym. 2022, s. 8) Pyrolyysissä komposiitista saadaan lisäksi erotettua pyrolyysiöljyä (Cousins ym. 2019, s. 1253).

### 5.3 Leijupetipoltto kuitujen lähteenä

Materiaalien nopeaan lämpenemiseen perustuvassa leijupetipoltossa lasi- tai hiilikuidut saadaan eroteltua komposiitista syöttämällä materiaali hiekkapedilliseen leijupetikattilaan. Höyryllä lämmitetyssä korkeassa lämpötilassa, 450–550 °C, komposiitin hartsi tuhoutuu, jolloin kuidut ja täyteaineet irtoavat matriisista. Höyryn sekä siivilöiden avulla kuidut ja täyteaineet saadaan eroteltua partikkelien koon mukaan. Kun kuidut on eroteltu, komposiitin hartsin orgaaniset aineet poltetaan noin 1000 °C:ssa, jolloin niistä saadaan energia hyötykäyttöön. Koska osa materiaalista hyödynnetään energiana, leijupetipolttoa ei voida täysin laskea kierrättämiseksi. (Fonte & Xydis 2021, s. 4; Oliveux ym. 2015, s. 66–67)

Pickering ym. (2015) ovat laskeneet, että leijupetipolton kautta kierrätettyihin hiilikuituihin käytetään alle 10 % neitseellisiin materiaaleihin käytettävästä energiasta. Leijupetipoltto on huomattavasti tehokkaampi hiilikuitu- kuin lasikuitukomposiitille. Hiilikuitukomposiitista saatiin Liun ym. (2019) vertailun mukaan erotettua jopa kaksinkertainen määrä kuituja lasikuitukomposiittiin verrattuna. Kierrättämiseen kului energiaa hiilikuitukomposiitin osalta 9 MJ/kg ja lasikuitukomposiitin osalta noin 22 MJ/kg. Vertailussa käytettiin optimiarvoja syötölle, minkä vuoksi arvot voivat vaihdella merkittävästi. (Liu ym. 2019)



Leijupetipoltossa ideaali tilanne on vähähappinen ilma, jolloin kuitujen hiiltymistä voidaan hillitä. Tekniikan etuna on erilaisten materiaalien ja epäpuhtauksien sietäminen. Vertailtaessa eri tekniikoita toisiinsa, leijupetipoltto ei ole kierrättävyydeltään kaikkein tehokkain, sillä kierrätetyt kuidut ovat ominaisuuksiltaan heikentyneitä, eikä hartsia saada hyödynnettyä kuin energiana. (Oliveux ym. 2015, s. 66–67) Fonten ja Xydiksen (2021, s. 4) mukaan leijupetipolton kautta kierrätetyillä kuiduilla voidaan korvata puolet neitseellisestä materiaalista heikentämättä komposiitin laatua merkittävästi.

#### **5.4 Solvolyyysi komposiitin kemiallisena kierrätystekniikkana**

Solvolyyysi on kemiallista kierrätystä, joka perustuu komposiitin hajottamiseen liuottimen sekä lämpötilan ja paineen avulla. Solvolyyysissä komposiitista saadaan erotettua liukenemattomat kuidut sekä hartsi ja/tai kemikaalit nesteenä (Beauson ym. 2022, s. 9). Liuottimena solvolyyysissä toimii tyypillisesti vesi, sekä mahdollisena lisäliuottimena alkoholi. Solvolyyysi voidaan jakaa eri tyyppeihin perustuen lämpötilaan ja paineeseen. Näistä yleisin on korkeaan lämpötilaan (200–370 °C) ja paineeseen (100–250 bar) perustuva solvolyyysi. (Mattsson ym. 2020, s. 2; Oliveux ym. 2015)

Solvolyyysin avulla erotetut hiili- tai lasikuidut ovat hyvälaatuisia, eivätkä hiiltyneitä, usein pyrolyysiä matalamman lämpötilan vuoksi. Toisaalta solvolyyysissä on riski korroosiolle happamien olosuhteiden vuoksi. (Fonte & Xydis 2015, s. 6) Taloudellisesti solvolyyysi on kallis kierrätystekniikka erityisesti yli 200 °C lämpötilassa ja yli 200 bar paineessa (Beauson 2022, s. 9). Saantoprosenttiltaan solvolyyysi on lupaavin kierrätystekniikka, sillä kuidut saadaan eroteltua komposiitista lähes täydellisesti. Solvolyyysi lukeutuu kuitenkin kierrätystekniikoiden energiasyöppöihin noin 19 MJ/kg kulutuksellaan. (Liu ym. 2019)

Katalyyttien ja lisäaineiden avulla solvolyyysi on mahdollinen myös matalassa lämpötilassa (< 200 °C) ja paineessa (60 bar). Tällöin pystytään välttymään jatkoreaktioilta ja säilyttämään kuitujen korkeampi laatu. Matala lämpötila luo potentiaalin ylläpitää kuitujen lujuusominaisuuksia (Beauson ym. 2014, s. 1551; Fonte &

Xydis 2021, s. 6) Haittapuolena on käytettyjen kemikaalien vaarallisuus, sillä matalan lämpötilan ja paineen solvolyyssissä tarvitaan vahvoja happoja, jotka ovat haitallisia terveydelle, turvallisuudelle ja ympäristölle. Erotetut kuidut ovat ominaisuuksiltaan samankaltaiset kuin korkeassa lämpötilassa ja paineessa, mutta kierrätyksen kannalta erityiseksi ongelmaksi muodostuvat vahvat kemikaalit. (Oliveux ym. 2015, s. 72) Vaikka matalampi lämpötila ja paine luovat potentiaalia energiatehokkaalle vaihtoehdolle, voidaan muita kierrätysratkaisuja pitää toistaiseksi ympäristöystävällisempinä.

Vielä kehitysvaiheessa oleva komposiittien kemiallinen kierrätystekniikka on solvolyyssi ylikriittisen nesteen avulla. Vesi ja/tai alkoholi toimii ylikriittisessä lämpötilassa ja paineessa korkean liuottavuuden ja diffuusiokyvyn avulla. Laboratoriotutkimuksissa pystyttiin erottamaan yli 90 % hiilikuiduista polymeerimatriisista hyvillä mekaanisilla ominaisuuksilla. (Dorigato 2021, s. 121) Ylikriittisen nesteen avulla tehtävällä kierrätyksellä on potentiaalia erotetun kuidun hyvän laadun puolesta (Dauget ym. 2015, s. 737). Vaadittavaa lämpötilaa ja painetta ylläpitävän laitteiston korkean hinnan sekä vähäisen tutkimustiedon vuoksi sen laajan mittakaavan käyttö ei ole vielä kannattavaa (Dorigato 2021, s. 125).

## **5.5 Mikroaaltopyrolyysi potentiaalisena komposiitin kierrätystekniikkana**

Edellä mainittujen yleisemmin käytössä olevien komposiittien kierrätystekniikoiden lisäksi mahdollisia vaihtoehtoja tutkitaan jatkuvasti. Perinteisemmän pyrolyysin rinnalle on tutkittu mikroaaltosäteilyä hyödyntävää mikroaaltopyrolyysiä. Tekniikka perustuu pyrolyysiin 300–600 °C typpi-atmosfäärissä, jossa magnetronit tuottavat mikroaaltoja. Mikroaaltopyrolyysin etuna on tarkasti kohdennettu lämmitys, jolla massa saadaan tehokkaasti kuumennettua (Åkesson ym. 2012). Tällöin hajoaminen kiihtyy ja prosessiin tarvittava aika pienenee (Dorigato 2021, s. 121). Kuitujen lisäksi mikroaaltopyrolyysissä saadaan talteen pyrolyysiöljyä polttoaineeksi sekä pyrolyysikaasua lämmöntuotantoon (Åkesson ym. 2012).

Mikroaaltpyrolyysin osalta tutkimus on vielä pienimuotoista, eikä sitä ole teollisessa käytössä. Positiivisia viitteitä on tutkimuksista kuitenkin löydettävissä. Kuitujen osalta laadultaan ja määrältään mikropyrolyysin tulokset ovat samansuuntaisia tavanomaisen pyrolyysin kanssa. Liu ym. (2019) vertailussa mikroaaltpyrolyysi oli energiatehokas suhteessa muihin lämpöä hyödyntäviin tekniikoihin. Mikroaaltpyrolyysin kautta komposiitista saadaan erotettua arviolta noin 70 % kuiduista käyttäen energiaa 5–10 MJ/kg. (Åkesson ym. 2013, s. 586; Liu ym. 2019)

Mikroaaltpyrolyysillä on onnistuttu erottamaan komposiiteista hiilikuidut (Lester ym. 2004) sekä lasikuidut (Åkesson ym. 2012), joita on mahdollista käyttää uuden komposiitin valmistusmateriaalina. Neitseelliseen materiaaliin verrattuna mikroaaltpyrolyysistä saaduilla lasikuiduilla on heikentyneet mekaaniset ominaisuudet sekä hiiltynyt pinta (Oliveux ym. 2015, s. 67–68). Hiilikuitujen osalta tutkimuksissa on kuitenkin saatu hyviä tuloksia niin mekaanisten ominaisuuksien kuin puhtaan pinnan suhteen, joka esimerkiksi tavanomaisessa pyrolyysissä on haasteena (Dorigato 2021, s. 121). Yleistyksiä on tässä vaiheessa hankala tehdä, sillä tutkimustuloksia on vain vähän saatavilla.

## 6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tuulivoimaloiden tullessa käyttöikänsä päähän lapojen uusiokäytön avulla voidaan rakenteiden ja materiaalien elinikää pidentää. Tämä on ympäristövaikutusten kannalta hyvä ottaen huomioon lapojen kompleksisen rakenteen ja hankalasti kierrätettävät materiaalit. Uusiokäyttöä hankaloittaa tarve käytöstä poistettujen lapojen tilan tutkimiselle sekä yksilölliselle käyttökohteen suunnittelulle. Ison mittakaavan uusiokäyttöratkaisuja varten tarvittaisiin helppo tapa mallintaa ja tutkia lavat ja niiden kunto sekä käyttökohde. Tällaisia uusiokäyttöratkaisuja voisivat olla esimerkiksi sähköpylväät, rakennusteollisuus tai erilaiset kaupunki-installaatiot.

Komposiittien kierrätys heikentää poikkeuksetta kuitujen mekaanisia ominaisuuksia. Komposiitin eri materiaaleja ei saada myöskään täysin kierrätettyä, jonka vuoksi lapoja ei voida toistaiseksi täysin kierrättää. Eri kierrätys- ja hyödyntämistekniikat toimivat eri tavoin riippuen komposiitista. Hiilikuitukomposiitin ominaisuuden säilyvät paremmin kierrätäessä mekaanista käsittelyä lukuun ottamatta.

Kierrätys- ja hyödyntämistekniikoista solvolyyysin avulla kuituja saadaan erotettua hyvin tehokkaasti. Teollisen mittakaavan ratkaisuksi solvolyyysi ei vielä sovellu korkeiden kustannusten vuoksi. Lämpöä hyödyntävillä pyrolyysillä sekä leijupetipoltolla teollinen mittakaava on mahdollinen, mutta ne kuluttavat runsaasti energiaa ja heikentävät huomattavasti kuitujen lujuutta. Lasikuitukomposiitille paremmin sopiva mekaaninen käsittely on energiatehokas tekniikka, mutta sen kautta kierrätetyt kuidut ovat taloudelliselta arvoltaan heikkoja neitseellisiin materiaaleihin verrattuna.

Ainoa osittain kierrätystä oleva nykyisin laajassa teollisessa käytössä oleva tekniikka on komposiitin hyödyntäminen sementtiteollisuudessa. Lapoja hyödyntämällä sementtiteollisuuden energiantarve ja päästöt pienenevät, mutta jätehierarkian kannalta ratkaisu ei ole ideaali, sillä vain epäorgaaninen aines saadaan kierrätettyä.

Tutkielmassa käsitellään kiertotalouteen liittyviä tekniikoita kierrätys- ja hyödyntämistekniikkoina. Lähes kaikissa käyttämissäni aineistoissa menetelmät määriteltiin kierrätykseksi. Nykytiedon valossa ei voida kuitenkaan puhua täysin

kierrättämisestä, koska komposiitti ei kokonaisuudessaan päädy uudeksi materiaaliksi. Toistaiseksi komposiittijätteelle ei ole sovellettavissa tekniikkaa, joka voitaisiin lukea kierrätykseksi. Tähän liittyviä ongelmia ovat esimerkiksi komposiitin orgaanisen aineksen hyödyntäminen energiana sekä kierrätettyjen kuitujen heikot markkinat.

Tuulivoimaloiden lapojen kiertotalouteen liittyvä tutkimus on edelleen pienimuotoista. Kattavaa ja yhtenäistä kokonaiskuvaa eri kierrätys- ja hyödyntämistekniikoista on hankala muodostaa. Useat alan tutkimukset käsittelevät komposiittimateriaalien kierrätystä pienissä erissä. Suurikokoisten lapojen kierrätykseen liittyy paljon muitakin tekijöitä, kuten komponenttien pienentämistä sekä logistiikkaa. Eri lähteistä kerätyt arvot kierrätettyjen kuitujen ominaisuuksille myös poikkesivat toisistaan. Kiertotalouden kokonaisvaikutuksia ympäristölle on muutoinkin vaikea arvioida, jonka vuoksi jätehierarkia on hyvä ohjenuora kiertotalouden suunnittelulle.

Merkittävänä osana tuulivoimaloiden lapojen kiertotaloutta on jätteen synnyn ehkäisy ja haitallisuuden vähentäminen. Tähän tutkielmassa ei juurikaan paneuduta. Kehitys lapojen materiaalien suhteen esimerkiksi luonnonmukaisempaan suuntaan on kuitenkin käynnissä. Esimerkiksi Stora Enson tekee yhteistyötä Voodin Blade Technology -yhtiön kanssa puupohjaisten lapojen kehittämiseksi ja valmistamiseksi. Toistaiseksi lavat koostuvat pääosin kiertotalouden kannalta haasteellisista komposiittimateriaaleista.

Tutkielman perusteella jatkotutkimukselle on tarvetta erityisesti tuulivoimalan lapojen uusiokäytön parissa. Uusiokäytön osalta tarvetta on erityisesti laajan mittakaavan kohteita. Näin välttyttäisiin tarpeelta suunnitella käyttökohteita yksilöllisesti. Olettaen, että tulevana vuosikymmeninä tuulivoimaloita tullaan edelleen rakentamaan kasvavalla volyymilla, jatkotutkimuskohteena voidaan nähdä myös jätteeksi tulevien lapojen kierrätys uusiksi lavoiksi. Näin vähenisi tarve löytää ison mittakaavan käyttökohteita uusiokäyttöön sekä kierrätetyille kuiduille.

## LÄHTEET

Alshannaq, A., Bank, L., Scott, D., Gentry, T. 2021. *Structural Analysis of a Wind Turbine Blade Repurposed as an Electrical Transmission Pole*. Journal of Composites for Construction, 25 (4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001136](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001136).

Arvesen, A., Hertwich, E. 2012. *Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 5994–6006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.023>.

Bank, L., Arias, F., Yazdanbakhsh, A., Gentry, T., Al-Haddad, T., Chen, J., Morrow, R. 2018. *Concepts for Reusing Composite Materials from Decommissioned Wind Turbine Blades in Affordable Housing*. Recycling, 3, 3.

Beauson, J., Lilholt, H., Brøndsted, P. 2014. *Recycling solid residues recovered from glass fibre-reinforced composites – A review applied to wind turbine blade materials*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33(16), 1542–1556.

Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D., Pagh Jensen, J. 2022. *The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 155. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111847>.

Dauget, M., Mantaux, O., Perry, N., Zhao, Y. 2015. *Recycling of CFRP for high value applications: Effect of sizing removal and environmental analysis of the SuperCritical Fluid Solvolysis*. Procedia CIRP 29, 734–739. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.064>.

Direktiivi 2008/98/EC: Euroopan parlamentin ja neuvoston jätepuitedirektiivi. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM:waste\\_hierarchy](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM:waste_hierarchy) [viitattu: 23.9.2022].

Dorigato, A. 2021. *Recycling of thermosetting composites for wind blade application*. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4, 116–132. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.02.002>.

Fonte, R., Xydis, G. 2021. *Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials*. *Journal of Environmental Management* 287. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112269>.

Jensen, J., Skelton, K. 2018. *Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 97, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.041>.

Joustra, J., Flipsen, B., Balkenende, R. 2021. *Structural reuse of high end composite products: A design case study on wind turbine blades*. *Resources, Conservation & Recycling* 167, 105393. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105393>.

Kooduvalli, K., Unser, J., Ozcan, S., Vaidya, U. 2022. *Embodied Energy in Pyrolysis and Solvolysis Approaches to Recycling for Carbon Fiber-Epoxy Reinforced Composite Waste Streams*. *Recycling*, 7, 6. <https://doi.org/10.3390/recycling7010006>.

Korpela A. 2016. *Tuulivoiman perusteet*. Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka. 1. painos. ISBN 978-952-5491-84-5.

Lester, E., Kingman, S., Hoong Wong, K., Rudd, C., Pickering, S., Hilal, N. 2004. *Microwave heating as a means for carbon fibre recovery from polymer composites: a technical feasibility study*. *Materials Research Bulletin*, 39, 1549–1556. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2004.04.031>.

Liu, P., Meng, F., Barlow, C. 2019. *Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison*. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.043>.

Martini, R., Xydis, G. 2022. *Repurposing and recycling wind turbine blades in the United States*. Environmental Progress & Sustainable Energy, 13932. <https://doi.org/10.1002/ep.13932>.

Mattsson, C., Andre, A., Juntikka, M., Tränkle, T., Sott, R. 2020. *Chemical recycling of End-of-Life wind turbine blades by solvolysis/HTL*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 942. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012013>.

Mishnaevsky Jr., L., Branner, K., Nørgaard Petersen, H., Beauson, J., McGugan, M., Sørensen, B. 2017. *Materials for Wind Turbine Blades: An Overview*. Materials, 10, 1285. <http://dx.doi.org/10.3390/ma10111285>.

Muoviteollisuus ry 2014. *Muovikomposiittien kierrätys*. [verkkojulkaisu] [https://www.plastics.fi/document.php/1/195/muovikomposiittien\\_kierratys/2b5572dace7417fc6e15310244eb0a7e](https://www.plastics.fi/document.php/1/195/muovikomposiittien_kierratys/2b5572dace7417fc6e15310244eb0a7e) [viitattu: 12.10.2022].

Oliveux, G., Dandy, L., Leeke, G. 2015. *Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties*. Progress in Materials Science 72, 61-99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>.

Pickering, S., Turner, T., Meng, F., Morris, C., Heil, J., Wong, K., Melendi, S. 2015. Developments in the fluidised bed process for fibre recovery from thermoset composites. Composites and advanced materials expo, 2384–2394.

Schlömer, S., Bruckner, T., Fulton, L., Hertwich, E., McKinnon, A., Perczyk, D., Roy, J., Schaeffer, R., Sims, R., Smith, P., Wisser, R. 2014. *Annex III: Technology-specific cost and performance parameters*. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New



York, NY, USA. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_annex-iii.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf).

Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022a. *Ensimmäiset tuulivoimaloiden lavat kierrätetty onnistuneesti Suomessa – uusi kotimainen ratkaisu syntyi usean toimijan yhteisprojektissa.* [verkkojulkaisu]

<https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/ensimmaiset-tuulivoimaloiden-lavat-kierratetty-onnistuneesti-suomessa-uusi-kotimainen-ratkaisu-synty-i-usean-toimijan-yhteisprojektissa> [viitattu: 12.10.2022].

Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b. *Tuulivoimatilastot 6/2022.* [verkkojulkaisu] <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tilastot-2/tuulivoimatilastot-6-2022> [viitattu: 25.9.2022].

Suomen Tuulivoimayhdistys ry (n.d.). *Tuulivoimaloiden purku ja kierrätys.* [verkkojulkaisu] <https://tuulivoimayhdistys.fi/media/13-2021update-interactive.pdf> [viitattu: 6.10.2022].

Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut [verkkojulkaisu]. ISSN=1797-6049. 2020, Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 25.9.2022]. Saantitapa: [http://www.stat.fi/til/khki/2020/khki\\_2020\\_2021-12-16\\_kat\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-12-16_kat_001_fi.html).

Suomen virallinen tilasto (SVT): Suomi lukuina 2022 [verkkojulkaisu]. ISSN=2242-847X. Toukokuu 2022. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 6.10.2022]. Saantitapa: [https://www.stat.fi/tup/suoluk/suoluk\\_energia.html](https://www.stat.fi/tup/suoluk/suoluk_energia.html).

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 2013/331. Annettu Helsingissä 2.5.2013.

VTT 2014. *Wind energy statistics in Finland 2012.* [verkkojulkaisu] [https://www.tuulivoimayhdistys.fi/media/vtt\\_wind\\_energy\\_statistics\\_year\\_report\\_2012\\_public.pdf](https://www.tuulivoimayhdistys.fi/media/vtt_wind_energy_statistics_year_report_2012_public.pdf) [viitattu 25.9.2022].

Yle 2022. *Stora Enso alkaa kehittää puisia tuulivoimaloiden roottorilapoja saksalaisen yhteistyökumppanin kanssa.* [verkojulkaisu] <https://yle.fi/a/74-20004713> [viitattu 21.11.2022].

Åkesson, D., Foltynowicz, Z., Christéen, J., Skrifvars, M. 2012. *Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines.* Journal of Reinforced Plastics and Composites, 31, 1136–1142. <https://doi.org/10.1177/0731684412453512>.

Åkesson, D., Foltynowicz, Z., Christéen, J., Skrifvars, M. 2013. *Products obtained from decomposition of glass fiber-reinforced composites using microwave pyrolysis.* Polymery, 58, 7–8.