



MAATUULIVOIMALAN PURKAMINEN JA TUULITURBIININ LAPOJEN KIER- RÄTYS

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

Mia Suomalainen

Tarkastaja: Tutkijaopettaja TkT Aki Grönman

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Mia Suomalainen

Maatuulivoimalan purkaminen ja tuuliturbiinin lapojen kierrätys

Energiatekniikan kandidaatintyö

33 sivua, 7 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: Tutkijaopettaja TkT Aki Grönman

Avainsanat: Tuulivoima, tuuliturbiinin lavat, purku, kierrätys, uusiokäyttö

Tuulivoima on yhä edelleen kasvava uusiutuvan energian lähde niin Suomessa kuin muualla maailmalla. Tuulivoima on käytönaikana käytännössä päästötön energian lähde, mutta tuulivoimalan komponenttien valmistuksen ja elinkaaren lopun jälkeinen käsittely aiheuttavat päästöjä ja kuluttavat energiaa.

Kandidaatintyössä tutkitaan Suomen maatuulivoimaloiden purkutapoja, purkukustannuksia ja tuuliturbiinin lapojen kierrätystä ja uusiokäyttömahdollisuuksia. Työssä esitellään maatuulivoimalan purkaminen ja purkukustannuksiin vaikuttavia tekijöitä. Tuuliturbiinin lapojen kierrätysteknologioita esitellään ja niiden kehityskohteita ja etuja vertaillaan. Työssä kerrotaan Suomessa suoritetusta Ympäristöministeriön rahoittamasta hankkeesta, jonka tavoitteena on edistää lapajätteen kierrätysjärjestelmän kehitystä.

Lapajätteen käsittelyä ohjaa EU:n jätedirektiivin jätehierarchy, jonka mukaan lapajätettä ei tule loppusijoittaa kaatopaikalle. Lapajätettä tulisi käyttää uudelleen tai kierrättää. Työn tuloksena vertailtuja kierrätysteknologioita ovat lapajätteen käyttö sementin valmistuksen rinnakkaisprosessissa, mekaaninen jauhaminen, pyrolyysi, sähkömekaaninen käsittely, solvolyyysi ja leijupetiteknologia.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Mia Suomalainen

Decommission of an onshore wind farm and recycling of wind turbine blades

Bachelor's thesis

2022

33 pages, 7 figures and 2 tables

Examiners: Associate professor Ph.D Aki Grönman

Keywords: Wind power, wind turbine blades, decommission, recycling, reuse

Wind power is a still growing source of renewable energy in Finland and globally. During the operational time the wind power is practically emission less. However, manufacturing of the wind turbine components and processing of the end-of-life waste cause emissions and consume energy.

In this bachelor's thesis wind turbines decommission, costs of the decommission, recycling and re-use of the wind turbine blades are studied. The decommission of onshore wind turbine as well as contributing factors of the decommission costs are explained. Recycling technologies of the wind turbine blades are considered and their pros and cons are compared. A project funded by Finnish Ministry of Environment, which has a goal to improve a blade waste recycling system, is explained.

The handling of the blade waste is guided by the EU's the Waste Framework Directive's waste hierarchy. According to the hierarchy landfill of the blade waste should be avoided. The blade waste should be re-used or recycled. Compared recycling technologies are parallel process of cement production, mechanical grinding, pyrolysis, electromechanical treatment, solvolysis and fluidized bed technology.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	[m ²]
C_p	hyötysuhde	[-]
M	vääntömomentti	[Nm]
P	teho	[W]
U	nopeus	[m/s]

Kreikkalaiset

ρ	tiheys	[kg/m ³]
ω	kulmanopeus	[rad/s]

Lyhenteet

WTG	Wind Turbine Generator
-----	------------------------

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Tuulivoima energianlähteenä	7
2.1	Tuulivoima Suomessa	8
3	Tuulivoimalan rakenne	10
4	Tuulivoimalan purkaminen	13
4.1	Tuulivoimala-alueen uusiokäyttö.....	14
4.2	Tuulivoimalan purkukustannukset	14
5	Tuuliturbiinin lapojen kierrätys ja uusiokäyttö	17
5.1	Valmistusmateriaalien kehitys	19
5.2	Komposiittien kierrätysteknologiat	20
5.2.1	Käyttö sementin valmistuksen rinnakkaisprosessissa.....	20
5.2.2	Mekaaninen jauhaminen	21
5.2.3	Pyrolyysi	22
5.2.4	Sähkömekaaninen käsittely.....	24
5.2.5	Solvolyysi	24
5.2.6	Leijupetiteknologia	25
5.3	KiMuRa -hanke	26
5.4	ECOBULK EU -hanke.....	27
6	Johtopäätökset	29
	Lähteet	30

1 Johdanto

Tuulivoima on yksi merkittävä energianlähde Suomen uusiutuvien energianlähteiden joukossa. Tuulivoiman määrä on yhä kasvussa ja uusia tuulipuistohankkeita syntyy jatkuvasti lisää. Tuulivoimaloiden purku on keskeinen osa tuulivoimalahanketta. Keskustelu tuulivoimalan tuuliturbiinin lapojen kierrätyksestä on ollut tiivistä viime vuosien aikana. Tuulivoiman ollessa päästötöntä energiaa, tulee voimalan elinkaaren lopussa komponenttien kierrätyksenkin olla kestäväää ja ympäristöystävällistä.

Tämän kandidaatintyön aiheena on tutkia Suomen maatuulivoimaloiden purkua ja tuulivoimalan tuuliturbiinin lapojen kierrätysteknologioita ja uusiokäyttömahdollisuuksia. Tutkimus on tehty yhteistyössä Neoenin kanssa ja se on suoritettu kirjallisuuskatsauksena. Tuulivoimalan purkuun liittyviä vaiheita ja purkukustannuksia tarkastellaan. Tutkimuksen tavoitteena on luoda tiivistetty katsaus lapojen valmistusmateriaalien, komposiittimateriaalien, nykyisin olemassa olevista kierrätystavoista. Työssä pohditaan eri kierrätysteknologioiden haittoja ja kehittämiskohteita sekä etuja muihin teknologioihin verrattuna. Myös joitakin Suomessa toteutettuja komposiittimateriaalien kierrätystä edistäneitä hankkeita esitellään.

Kandidaatintyön tutkimuskysymyksiä ovat:

- Miten tuulivoimalan purkaminen suoritetaan ja mitä tuulivoimala-alueelle tapahtuu sen käytön jälkeen?
- Kuinka suuret ovat tuulivoimalan purkamisen kustannukset ja mitkä eri tekijät vaikuttavat kustannuksiin?
- Miten tuuliturbiinin lapoja voidaan uusiokäyttää tai kierrättää?

Tutkielma on rajattu käsittelemään ainoastaan Suomen maatuulivoimaloita. Tutkimuksessa ei käsitellä tuulivoimalan kaikkien komponenttien kierrätystä, vaan ainoastaan lapojen kierrätystä. Tutkielma alkaa katsauksella tuulivoimaan yleisesti. Seuraavaksi käydään läpi tuulivoimalan rakennetta pääpiirteissään, minkä jälkeen tarkastellaan tuulivoimalan purkua ja lapojen kierrätystä.

2 Tuulivoima energianlähteenä

Yhteiseen globaaliin ongelmaan ilmastonmuutokseen tulee tarttua edistämällä useita eri ratkaisuja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Taloudellinen sektori, joka yksin tuottaa suurimman osan näistä ilmastoa lämmittävistä kasvihuonekaasupäästöistä, on energiasektori. Energiasektori tuotti 73,2 % maailman kaikista kasvihuonekaasupäästöistä vuonna 2016 (Ritchie & Roser 2020). Maailmanlaajuisesti kasvihuonekaasupäästöt ovat edelleen kasvussa energian tarpeen ja taloudellisen kasvun myötä erityisesti kehittyvissä maissa. Yksi keino vähentää energiasektorin päästöjä on lisätä tuulivoiman käyttöä uusiutuvana energianlähteenä.

Vuoden 2019 loppuun mennessä maailman tuulivoimakapasiteetti oli 651 000 MW, jolla voitiin kattaa noin 6 % maailman sähkönkulutuksesta. Tuulivoiman tuotanto on ollut kasvussa ja kasvaa edelleen globaalisti. Kasvua on edesauttanut tuotantokustannusten lasku sähkön vuosituoton kasvun ja teknologian kehityksen myötä. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2021a.) Samaan aikaan kun tuulivoimaloiden määrä on lisääntynyt, niiden kokoluokka on kokenut suuria harppauksia viimeisen 25 vuoden aikana. Maatuulivoimaloiden roottorin halkaisijat ovat kasvaneet 15 metristä jopa 150 metriin. Samalla tuulivoimaloiden tornin korkeus on kasvanut 22 metristä jopa 180 metriin. Maatuulivoimaloiden nimellisteho on kasvanut 55 kilowattista 5 megawattiin tuulivoimaloiden tornin korkeuden ja pyyhkäisypinta-alan kasvaessa. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2021b.)

Roottorin halkaisijan kasvu kasvattaa pyyhkäisypinta-alaa ja tätä kautta tuulivoimalan tehoa. Pyyhkäisypinta-ala on suoraan verrannollinen tehoon:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A U^3 \quad (1)$$

jossa C_p on hyötysuhde [%], ρ ilman tiheys [kg/m^3], A roottorin pyyhkäisypinta-ala [m^2], U tuulennopeus [m/s].

Yhtälöstä 1 havaitaan, että myös tuulennopeus vaikuttaa voimalan tehoon. Näin ollen myös tornin korkeuden kasvattamisella on vaikutusta tehoon, sillä tuulisuus kasvaa huomattavasti, mitä korkeammalle maan pinnasta nousee. (Jenkins et al. 2021.)

Yksinkertaistettuna tuulivoimalla tuotetaan sähköenergiaa muuttamalla tuulen liike-energia roottorin pyörimisenergiaksi. Roottorin pyörimisenergia johdetaan generaattorille, jossa tuotetaan sähköenergiaa sähkömagneettisen induktion kautta. Tuuli syntyy, kun lämpötila- ja ilmanpaine-erot maan pinnalla pyrkivät tasoittumaan. Lämpötilaerot syntyvät, kun maan eri leveysasteet lämpenevät epätasaisesti auringonsäteilyenergian vuoksi. Tuulivoimalla voidaan täten tuottaa energiaa niin kauan kun auringonsäteilyenergia lämmittää maata. (Korpela 2016.)

Tuuliolosuhteet muuttuvat jatkuvasti. Tuulivoiman ollessa riippuvainen tuulisuudesta, se ei sovellu itsessään säätövoimaksi. Tästä huolimatta tuulivoimalla on ja tulee olemaan tulevaisuudessa entistä suurempi merkitys päästöttömän sähkön tuotannossa. Tuulivoimalan käyttäjän päästöt ovat hyvin pienet. Hiilidioksidipäästöt ovat noin 10-11 g/kWh luokkaa ja ne aiheutuvat pääasiassa voimalan rakentamisen, kuljetuksen ja huoltojen aiheuttamista päästöistä. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2021c.)

Kuten kaikilla energiantuotantomuodoilla niin myös tuulivoimalla on negatiivisia vaikutuksia ympäristöön. Negatiivisia ympäristövaikutuksia ovat muun muassa vaikutukset biodiversiteettiin ja maisemaan sekä melu. Yksi huolta aiheuttava ympäristövaikutus on tuulivoimaloiden rakentamiseen tarvittavien harvinaisten metallien, kuten dysprosium (Dy) ja neodyymi (Nd), louhinta ja käyttö. (Sokka et al. 2016.)

2.1 Tuulivoima Suomessa

Suomessa tuulivoimarakentaminen lähti kunnolla nousuun vuodesta 2012 alkaen. Rakentaminen alkoi muihin valtioihin verrattuna varsin myöhään. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 2021d.) Vuonna 2011 otettiin käyttöön syöttötariffijärjestelmä, jossa valtio maksaa tuulivoimaloiden tuottaman sähkön ennalta sovitun tavoitehinnan ja markkinahinnan välisen erotuksen. Syöttötariffijärjestelmä lopetettiin vuoden 2017 loppupuolella uusien tuulivoimaloiden tukemisen osalta. Syöttötariffijärjestelmä toimi kannustimena tuulivoimarakentamiseen ja vaikutti omalta osaltaan Suomen sähkön tuotantorakenteeseen kasvattamalla uusiutuvaa tuulivoiman tuotantoa. (Motiva 2021.)

Vuonna 2019 Suomen tuulivoimalat olivat teholuokaltaan keskimäärin 4,3 MW. Kasvu on ollut nopeaa verrattuna Suomen ensimmäiseen vuonna 1991 rakennettuun tuulipuistoon Korsnäsissä, joka koostui neljästä teholtaan 200 kW:n tuulivoimalasta. Vuonna 2020

tuulivoimalla tuotettiin noin 10 % Suomen sähköntuotannosta 2 586 MW:n kapasiteetilla. Suurin osa Suomen tuulivoimaloista sijaitsee Länsi-Suomessa Pohjois-Pohjanmaalla, tuuliolosuhteiden ollessa paremmat Itä-meren läheisyydessä muuhun Manner-Suomeen verrattuna. Tällä hetkellä Suomen suurin tuulipuisto sijaitsee Pohjanmaalla. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2021d.) Neoenilla on rakenteilla oleva hanke Mutkalammillä, josta tulee valmistuttuaan teholtaan Suomen suurin tuulipuisto. Mutkalammin tuulipuistossa tulee toimimaan 69 tuulivoimalaa 404 MW:n kokonaiskapasiteetilla. Tuulipuiston tuottama energia tulee vastaamaan noin 2 % koko Suomen sähköntuotannosta. (Neoen 2021.)

Suomessa on hyvät tuuliolosuhteet ja suunnitteilla on useita tuulivoimalahankkeita. Täten tuulivoiman kapasiteetti tulee kasvamaan tulevaisuudessakin. Suomen Tuulivoimayhdistys ry arvioi, että Suomen tuulivoimatuotannon olisi parhaimmillaan mahdollista viisinkertaistua vuodesta 2019 vuoteen 2030 mennessä. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2021e.) Vuonna 2020 Suomessa oli toiminnassa 821 tuulivoimalaa (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2021g.). Tuulivoimaloiden käyttöikä on 25-30 vuotta ja useat tuulivoimalat päätyvät elinkaarensa loppupäähän 2030-luvulla (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2021f). Tällöin on odotettavissa useiden eri voimaloiden purkamisen. Vuoteen 2020 mennessä joitakin kymmeniä tuulivoimaloita on ehditty purkaa. Seuraavassa taulukossa on esitetty käytössä olevien ja purettujen tuulivoimaloiden lukumäärät ja kapasiteetit (taulukko 1).

Taulukko 1: Vuonna 2020 Suomessa käytössä olevien ja käytöstä poistettujen tuulivoimaloiden lukumäärät ja kapasiteetit (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022c).

Käytössä olevat tuulivoimalat [WTG]	821
Käytössä olevien voimaloiden kapasiteetti [MW]	2586
Puretut tuulivoimalat [WTG]	41
Purettujen tuulivoimaloiden kapasiteetti [MW]	61

Purettujen tuulivoimaloiden määrä on vielä suhteellisen pieni verrattuna käytössä olevien tuulivoimaloiden lukumäärään. Purettujen voimaloiden kapasiteetin suuruudesta voidaan havaita purettujen voimaloiden olevan nimellisteholtaan keskimäärin pienempiä kuin käytössä olevat voimalat. Purettu voimalat ovat vanhempia ja teholuokan kehitys on selvästi havaittavissa käytössä olevien voimaloiden osalta.

3 Tuulivoimalan rakenne

Tuulivoimalan pääosat ovat perustukset, torni, roottori ja konehuone eli naselli. Nasellissa sijaitsee muun muassa voimalan generaattori, generaattorin jäähdytysjärjestelmä ja lämmönvaihdin, tuuliturbiinin pääakseli, säätö- ja ohjausjärjestelmät sekä mahdollinen vaihteisto. (Korpela 2016, s. 49 – 50.)

Roottori koostuu lavoista ja navasta. Roottorin tehtävä on muuntaa tuulen liike-energia roottorin pyörimisenergiaksi ja välittää energia tuuliturbiinin pääakselin kautta generaattorille. Generaattori on sähkömekaaninen laite. Generaattori muuntaa mekaanista liike-energiaa sähköenergiaksi. Generaattori koostuu tyypillisesti käämeistä koostuvasta staattorista ja kiineettisellä energialla pyöritettävästä roottorista. Pyörivä roottori voi olla kestmagnetoitu tai sähkömagnetoitu. Vaihtovirta syntyy, kun magnetoitu pyörivä roottori aiheuttaa muuttuvan magneettikentän, joka indusoi jännitteen staattorin käämeihin. (Letcher et al. 2017.)

Säätö- ja ohjausjärjestelmät mittaavat muun muassa tuulen nopeutta ja roottorin pyörimisnopeutta ja pysäyttävät turbiinin tarvittaessa, jos esimerkiksi tuulennopeus kasvaa liian suureksi (Letcher 2017). Säätöjärjestelmät huolehtivat myös lapakulman säädöstä sekä roottorin ja nasellin kääntämisestä tuulen suunnan mukaan (Korpela 2016, s. 49 – 50). Säätö- ja ohjausjärjestelmien tavoitteena on maksimoida energian tuotanto ja minimoida mekaaninen rasitus (Letcher 2017, s. 153).

Tuulivoimalat voidaan jakaa eri tyyppeihin monien eri ominaisuuksien perusteella. Perinteisesti tuulivoimalat voidaan jakaa pysty- ja vaaka-akselisiin voimaloihin. Nykyisin kaikki kaupalliset tuulivoimalat ovat lähes poikkeuksetta vaaka-akselisia ja kolmilapaisia. Lapojen lukumäärä vaikuttaa turbiinin tuottamaan vääntömomenttiin, mitä enemmän lapoja sitä suurempi vääntömomentti. Vääntömomentti ei automaattisesti kasvata voimalan tehoa, sillä kulmanopeudella on myös vaikutusta tuotettuun tehoon.

$$P = M\omega \quad (2)$$

jossa P on roottorin tuottama teho [W], M on vääntömomentti [Nm] ja ω kulmanopeus [rad/s]. (Korpela 2016, s. 36.)

Kun tuulennopeus on heikko ja kulmanopeus pieni, useasta lavasta olisi hyötyä. Jokainen lisälapa kuitenkin maksaa lisää. Yksi- tai kaksilapainen tuulivoimala olisi täten kustannuksiltaan edullisin vaihtoehto. Yksi- ja kaksilapaiset roottorit pyörivät kuitenkin epästabiilisti aiheuttaen mekaanisia rasituksia, kitkahäviöitä ja melua. Kolmilapaisen roottorin pyörimisliike aiheuttaa mekaanista rasitusta huomattavasti vähemmän ja pyörimistä voidaan pitää riittävän stabiilina. Lisälavan lisääminen kolmilapaiseen roottoriin altistaa voimalaa rasituksille esim. myrskytuulissa. Stabiilius ei kasva merkittävästi vertailtaessa kolmi- ja nelilapaista roottoria. Tuulivoimalan suunnittelussa on otettava huomioon niin taloudellinen kuin teknillinen puoli. Tuulivoimalan suunnittelussa energiantuotannon maksimoinnin sijaan tavoitteena on kustannustehokkuus. Nykyaikaisissa kaupallisissa sähköenergiaa tuottavissa tuulivoimaloissa käytetään tämän vuoksi melkein ainoastaan kolmilapaisia roottoreita. (Korpela 2016, s. 65 – 67.)

Vaaka-akseliset tuulivoimalat voidaan jakaa myös vakio- ja muuttuvanopeuksisiin voimaloihin. Nimensä mukaisesti vakionopeuksisen tuulivoimalan roottori pyörii vakionopeudella, jolloin roottori on optimoitava tietylle tuulennopeudelle. Voimala voidaan kytkeä suoraan verkkoon ilman suuntaajaa, sillä generaattori toimii vakiotaaajuudella roottorin pyöriessä vakionopeudella. Vakionopeuksisissa voimaloissa käytetään yleensä massatuotantogeneraattoreita niiden edullisuuden vuoksi. Massatuotantogeneraattorit vaativat vaihteiston, sillä generaattorin vaatima pyörimisnopeus on huomattavasti suurempi kuin roottorin pyörimisnopeus. Roottorin pyörimisnopeus on noin 10-25 rpm ja pyörimisnopeus generaattorille tulisi olla jopa tuhansia kierroksia minuutissa. Vakionopeuksisissa voimaloissa ongelmana on vaihteiston epäluotettavuus. Suurin osa vaihteistoista pettää ennen kahden vuoden käyttöikä (Letcher 2017, s. 147). Vakionopeuksisten tuulivoimaloiden suosio on ollut laskussa ja tilalle on tullut viimeisten kahden vuosikymmenen aikana muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat osatehoisella suuntaajakäytöllä. (Korpela 2016, s. 77 – 79.)

Muuttuvanopeuksisten tuulivoimaloiden osatehoisella suuntaajakäytöllä voidaan vaihdella roottorin pyörimisnopeutta rajoitetusti. Suuntaajakäytön tehon kasvattaminen on kallista, mutta aerodynaaminen hyötysuhde on parempi roottorin pyörimisnopeuden vaihtelun ansiosta. Tämä voimalatyyppe on teknis-taloudellisesti hyvä vaihtoehto ja edullisempi kuin aidosti muuttuvanopeuksinen voimala. (Korpela 2016, s. 79 – 80.)

Aidosti muuttuvanopeuksisissa voimaloissa käytetään täystehoista suuntaajaa, jota tarvitaan muuntamaan roottorin vaihtelevasta pyörimisnopeudesta johtuva taajuudeltaan vaihteleva

sähköenergia verkkoon sopivaan muotoon. Generaattorityypistä riippuen voimala voi olla vaihteeton eli suoravetoinen. Generaattorin nopeus laskee, kun generaattorin napojen lukumäärää kasvatetaan. Vaihteistoa ei tarvita, jos käytetään useampinapaisia generaattoreita, joissa napapareja voi olla jopa yli 100 (Letcher 2017, s. 147). Tällöin generaattorina toimii tuulivoimakäyttöön suunniteltu kestopagneettigeneraattori. Voimala ilman vaihteistoa on kallis, mutta teknisesti erinomainen. Muuttuvanopeuksisissa tuulivoimaloissa täystehoisella suuntaajakäytöllä voidaan tuottaa enemmän energiaa kuin osatehoisella suuntaajakäytöllä, mutta sähkön hinta kasvaa. (Korpela 2016, s. 81.)

Suoravetoiset tuulivoimalat ovat yleistyneet lähivuosina. Tätä selittää vaihdelaatikon vikaantumisen olevan yksi tuulivoimalan yleisimmistä vioista lapakulman säätömekanismin ohella. Vikaantuminen vaatii huoltoa ja tuotannon väliaikaista keskeyttämistä. Suoravetoisissa voimaloissa generaattorin pyörimisnopeus on sama kuin tuuliturbiinin roottorin. Jotta generaattorin hyötysuhde olisi hyvä, generaattorin tulee olla suunniteltu nimenomaan tuulivoima käyttöön. Tämä lisää tuotantokustannuksia, mutta vähentää huoltotarvetta käytön aikana. (Korpela 2016.)

4 Tuulivoimalan purkaminen

Tuulivoimahankkeeseen kuuluu useita vaiheita, joita ovat hankekehitys, investointipäätös, rakentaminen, tuotanto ja purkaminen. Tuulivoimaloiden purkutarve on odotettavissa 2030-luvulle tultaessa, kun yhä useampi tänä päivänä Suomessa toiminnassa oleva tuulivoimala päätyy elinkaarensa päähän. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022d.)

Yleensä erillinen purkuyhtiö palkataan purkamaan voimalat ja jätteenkäsittelyvastuu jää eri yhtiölle (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2021h). Tuulivoimalan purulle on useita eri strategioita, joiden valinta riippuu turbiinityypistä sekä mahdollisuudesta myydä tuuliturbiini jatkokäyttöön. Käytetty voimala voidaan myydä ja pystyttää uudelleen, mutta yleensä voimalat puretaan ja kierrätetään (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022d). Jos turbiini on tarkoitus myydä eteenpäin, se puretaan varovaisesti ja valmistellaan myyntiä varten. (Beauson et al 2022, s. 6.)

Purku toteutetaan yleensä nosturin avulla, mikä kasvattaa purkukustannuksia huomattavasti. Tuulivoimala puretaan nosturilla irrottamalla ensin lavat yksitellen navasta, minkä jälkeen naselli irrotetaan ja lopuksi torni puretaan lohkoina. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022d.) Tuuliturbiinin lavat pilkotaan yleensä noin metrin pituisiin tai pienempiin osiin, jotta kuljettaminen jatkokäsittelyyn olisi vaivattomampaa sekä kustannuksiltaan edullisempaa. (Liu et al. 2022.) Tuulivoimalan perustukset jätetään yleensä paikoilleen ja ne maisemoidaan. Perustukset voidaan peittää maalla tai, jos ne päätetään purkaa, alue maisemoidaan maataytöllä. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022e.)

Harvoissa tapauksissa purku voidaan toteuttaa hallitusti räjäyttämällä, mutta räjäyttäminen on vaihtoehtona ainoastaan poikkeustilanteissa (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022d). Tällöin turbiini puretaan räjäyttämällä voimala maan tasalle ja keräämällä jätemateriaalit jälkikäteen. Tämä pienentää kustannuksia, kun nosturia ei tarvita purun toteuttamiseen, mutta samalla altistaa jätteen maaperästä jätteeseen sekoittuville epäpuhtauksille. (Beauson 2022, s. 6.)

4.1 Tuulivoimala-alueen uusiokäyttö

Tuulivoima-aluetta on mahdollista käyttää uudelleen rakentamalla alueelle uusi tuulivoimala. Tuulivoimala-alueen uusiokäyttö on kannattavaa, sillä alueelle on jo rakennettu tarvittava sähköverkko ja infrastruktuuri. Lisäksi alueen tuulisuudesta on paljon tietoa pitkältä ajanjaksolta, mikä helpottaa uuden voimalan suunnittelua. Uusi tuulivoimala joudutaan rakentamaan kuitenkin perustuksineen täysin uudestaan. Uuden tuulivoimalan pystyttäminen vaatii aina uudet luvat ja ympäristövaikutusten arvioinnin. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022d.)

4.2 Tuulivoimalan purkukustannukset

Tuulivoimalan purkukustannuksiin vaikuttavat monet eri tekijät kuten tuulivoimalan koko, torniratkaisu, tuulipuiston voimaloiden määrä ja purkutapa. Tuulivoimalan omistaja on vastuussa voimalan purusta kuten myös purkukustannuksista. Tuulivoimalahanketta suunniteltaessa myös purkukustannukset tulee ottaa huomioon ja niihin on varauduttava. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022d.) Suomessa tuulivoimalan suunnitteluvaiheessa kustannuksiin lasketaankin mukaan tuulivoimalan elinkaaren lopussa vaadittavat purkukustannukset. Purkukustannukset ovat yleensä alimitoitettuja. (Beauson 2022, s. 6.) Purkukustannuksien kattamiseksi on mahdollista perustaa myös rahasto maanomistajan turvaksi (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2021h).

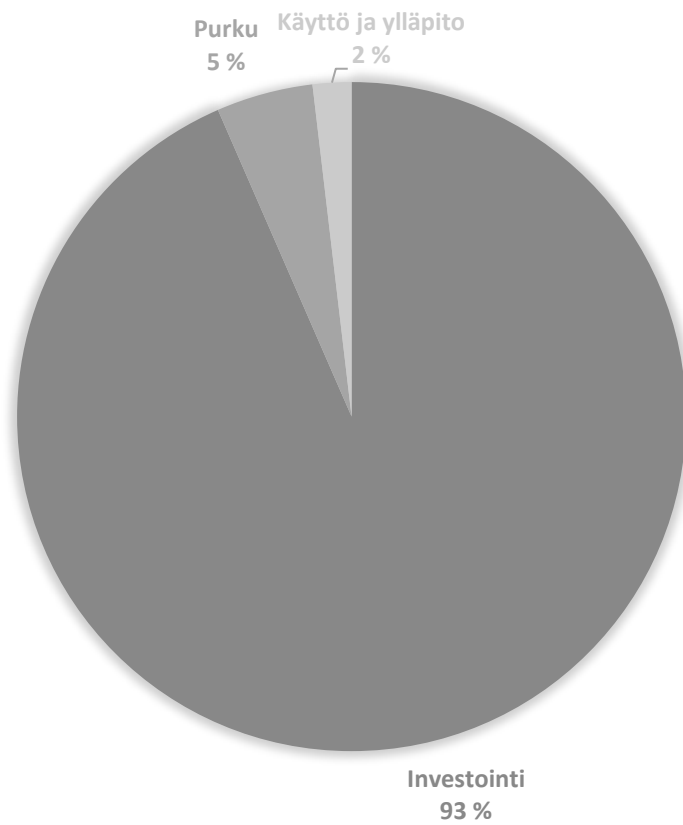
Tuulivoimalan komponentit sisältävät eri metalleja. Kierrätetyistä metalleista saatavat tulot pienentävät purkukustannuksia. Lavoissa olevat metallit saadaan kerättyä helposti magneettien avulla talteen. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022d.) Purkukustannuksiin vaikuttaa myös tornin rakenne. Tornin rakenne vaikuttaa siitä saatavien kierrätettävien materiaalien tulojen kautta. Terästorni on yleisin tornityyppi Suomessa. Suomesta löytyy myös muutamia hybriditorneja, joissa yläosa on valmistettu teräksestä ja alaosa betonista. Ainoastaan betonista valmistettuja betonitorneja ei ole Suomessa ollenkaan. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2021h.) Tämänhetkisen tiedon mukaan yhden voimalan purkukustannus maisemoinnilla maksaa noin 60 000 – 120 000 euroa (ELY 2021). Suomen Tuulivoimayhdistys ry on tehnyt yksityiskohtaiset laskelmat kymmenen tuulivoimalan puiston purkukustannuksista tornityypeittäin (taulukko 2).

Taulukko 2: 10 tuulivoimalan puiston purkukustannukset tornityypeittäin (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2021h).

Kustannustekijä [€/voimala]	Terästorni	Hybriditorni
Purkamisen valmistelu	34 900 – 40 300	34 900 – 40 300
Nasellinen ja roottorin purkaminen sekä poiskuljetus	46 000 – 51 000	46 000 – 51 000
Tornin purkaminen ja poiskuljetus	28 500 – 29 500	34 200 – 43 700
Perustusten maisemointi	2000 – 3000	2000 – 3000
Materiaalien kierrätys	(-52 100) – (-44 100)	(-31 700) – (-26 300)
Yhteensä	59 300 – 79 700	85 400 – 111 700

Purkukustannusten tuloksista huomataan terästornin olevan edullisempi purkukustannuksiltaan verrattuna hybriditorniin. Terästornillisen tuulivoimalan purkukustannuksia alentaa muun muassa metallien kierrätyksestä saatavat tulot.

Purkukustannukset ovat vain pieni osa tuulivoimalan kokonaiskustannuksista. Suurinta kustannusosaa edustaa tuulivoimalan investointikustannukset, joihin vaikuttaa muun muassa tuulipuiston koko. Yhden maatuulivoimalan investointikustannus on noin 1,2 – 1,5 miljoonaa euroa. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022a.) Käyttö- ja ylläpitokustannukset ovat noin 2 – 3 % investointikustannuksesta. Tuulivoimalalla ei ole polttoainekustannuksia, jolloin käytönaikaiset kustannukset muodostuvat ainoastaan huolto-, vakuutus-, korjaus- ja hallinnointikustannuksista. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022b.) Tuulivoimalan purkukustannukset kattavat lopulta noin 5 % kokonaiskustannuksista.



Kuva 1: Maatuulivoimalan kustannusrakenne koostuu pääpiirteissään investointi, purku ja käyttö- sekä ylläpitokustannuksista.

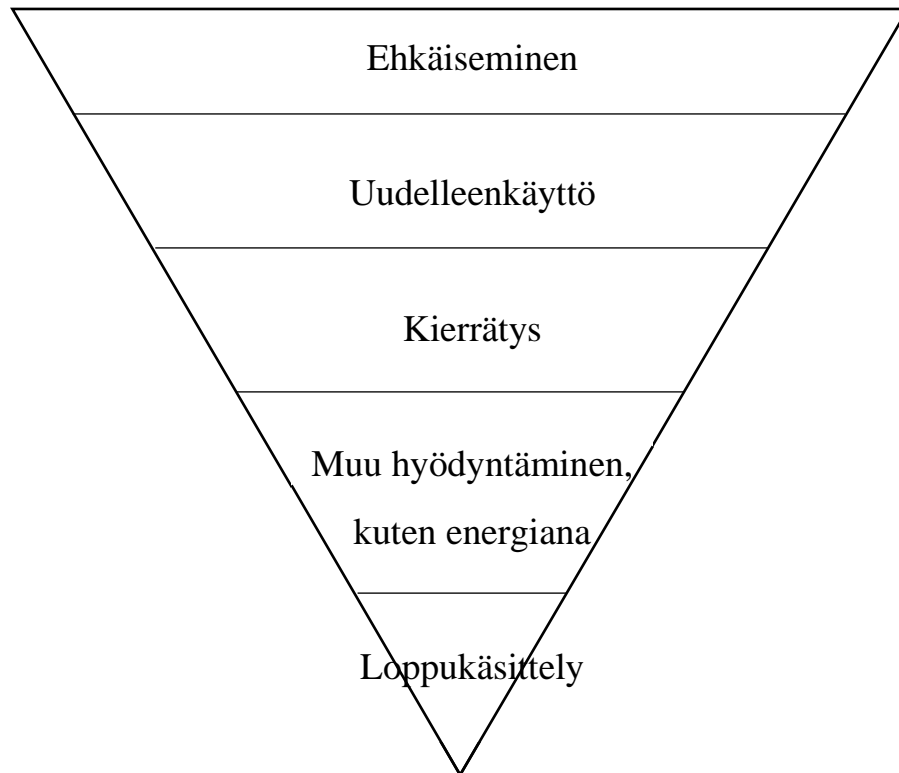
5 Tuuliturbiinin lapojen kierrätys ja uusiokäyttö

Tuulivoimalla tuotetaan puhdasta ja päästötöntä energiaa, jos tuulivoimalaa tarkastellaan sen käytön aikaisten ilmastovaikutuksien kannalta. Kun tuulivoimala päätyy elinkaarensa loppupäähän, tuulivoimalan komponenttien kierrätysprosessit vaativat runsaasti energiaa tuottaen samalla saasteita. (Liu et al. 2022, s. 1.) Yli 80-95 % tuulivoimalasta on kierrätyskelpoista. Metallikomponenttien, kuten alumiinin, teräksen, lyijyn ja kuparin tapauksessa päästään jopa 100 %:in kierrätysasteeseen. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022e.) Suurimmalla osalla tuulivoimalan komponenteista, kuten nasellin komponenteilla, tornilla sekä perustuksilla, on vakiintuneet kierrätystavat. Haasteena on roottorin lapojen kierrätys, sillä niiden valmistusmateriaalit ovat vaikeasti eroteltavissa toisistaan. Tässä tutkielmassa keskitytään nimenomaan lapojen kierrätys- ja uusiokäyttöratkaisuihin ja -mahdollisuuksiin. (Schmid et al. 2020, s. 5.)

Lavat joutuvat kestävämpään kovaan rasitukseen ja kuormitukseen elinkaarensa aikana. Komposiittimateriaalit kestävämpiä kuormitusta vertailtaessa moniin muihin materiaaleihin. Tämän takia lapojen valmistusmateriaalina käytetään komposiittimateriaaleja. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022e.) Komposiittimateriaali koostuu useammasta kuin yhdestä kiinteästä aineesta. Komposiittimateriaalissa aineilla on erilaisia fyysisiä tai kemiallisia ominaisuuksia, joiden ansiosta materiaalille muodostuu uusia ominaisuuksia. Kestävyyden ohella komposiittimateriaalien hyödyllisiä ominaisuuksia ovat muun muassa keveys, pitkä käyttöikä, korroosion kestävyys ja muokattavuus. (Strong 2008, s. 1 – 2.)

Lapojen komposiittimateriaalikoostumus riippuu lapatyypistä ja valmistajasta, mutta yleisesti lavat koostuvat seuraavista materiaaleista. Lujitteena toimii joko yksin tai hybridinä lasi- tai hiilikuitu tai basaltti. Hiilikuituja käytetään vielä nykypäivänä hyvin vähän lapojen valmistukseen verrattuna lasikuituun (Beauson 2022, s. 6). Matriisimateriaalina voidaan käyttää polymeerejä, kuten kertamuoveja, epoksia, polyesteria, vinyyliesteriä, polyuretaania tai kestumuveja. Ydinkerroksena on balsapuuta tai polyeteeni-tereftalaattia. Pinnoitusmateriaalina käytetään muun muassa polyeteeniä. Lisäksi lavoissa käytetään erilaisia metalleja. (Jensen & Skelton 2018, s.166.)

Elinkaarensa loppuun päätyneiden tuuliturbiinin lapojen käsittelyyn vaikuttavat hinta, saatavilla oleva teknologia, lainsäädäntö ja ympäristövaikutukset. EU:n jätedirektiivin (2008/98/EY) jätehierarkia ohjaa Suomen jätehuoltoa. Seuraava kuva havainnollistaa hierarkian viittä eri tasoa. (EUR-Lex 2020.)



Kuva 2: EU:n jätehierarkia (EUR-Lex 2020).

Lapajätteen käsittelyssä pyritään toimimaan ylimmällä mahdollisella tasolla muut jätteen käsittelyyn vaikuttavat asiat huomioiden. EU:n jätedirektiivin mukaan säädetty kaatopaikkakieltoasetus on kieltänyt komposiittijätteen sijoituksen kaatopaikoille vuodesta 2016 lähtien (Muoviteollisuus Ry 2014). Kaatopaikalle loppusijoitetut komposiittijätteet saastuttavat paikallista ympäristöä ja hiiliyhdisteitä sisältävät materiaalit vapauttavat kasvihuonekaasu metaania hajotessaan (Gharde & Kandasubramanian 2019, s. 5). Suomessa tuulivoimaloiden lapojen lasikuitumuovijätteen ei siis tulisi päätyä kaatopaikkajätteeksi, vaan se tulisi yrittää kierrättää ja uusiokäyttää mahdollisimman tehokkaasti (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022e).

Lapoja voidaan käyttää sellaisenaan uusissa käyttökohteissa, kuten siltojen komponentteina, erilaisina katoksina tai leikkikenttinä. Uusiokäyttö ei vaadi kalliita prosessoitteja ja komposiitin laatu pysyy muuttumattomana. Uusiokäyttökohteet ovat kuitenkin pienen mittakaavan

ratkaisuja lapajätteen käsittelemiseksi. Myös kokonaisien lapojen kuljettamisessa on omat haasteensa. (Beauson 2022, s. 7 – 8.)

Yksi merkittävä lapojen uusiokäyttö- ja kierrätyskohde on sementin valmistus. Lapojen materiaali murskataan ja käytetään sementin välituotteen klinkkerin valmistuksen raaka-aineena. Suuri osa eurooppalaisesta lapajätteestä päätyy sementin valmistukseen. Suomen ympäristöministeriö rahoittaa KiMuRa-projektia, jossa on tavoitteena luoda komposiittimuovi-jätteelle keräys- ja käsittelyverkosto. Suomen tuulivoima-ala on mukana edistämässä KiMuRa-projektia. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2022d.) Seuraavaksi tarkastellaan nykyisin käytössä olevia komposiittien kierrätysteknologioita sekä hankkeita, joiden kautta on pyritty parantamaan komposiittien kierrätysmahdollisuuksia Suomessa.

5.1 Valmistusmateriaalien kehitys

Turbiinin lapojen suunnitteluvaiheessa tulee huomioida ympäristövaikutukset materiaalien valinnassa. Erilaisiin kierrätysteknologioihin elinkaaren lopussa tulisi kiinnittää huomiota jo lapojen suunnittelussa, mikä omalta osaltaan edesauttaisi kierrätysteknologioiden mahdollisuuksia kehittyä. Lapojen valmistusmateriaalin kehityksellä voidaan vaikuttaa lapajätteen kierrätyksessä vaadittavan energian määrään ja kierrätyksen kustannuksiin. Valmistusmateriaalien kehityksellä pyritään parantamaan muun muassa lapojen ominaisuuksia, elinikää ja hiilijalanjälkeä sekä pienentämään valmistuskustannuksia, mutta kehityksellä voidaan vaikuttaa myös lapajätteen käsittelyyn. (Schmid et al. 2020, s. 12.)

Eri vaihtoehtoja valmistusmateriaalin kehitykseen on tutkittu. Yksi kehitysaskel olisi siirtyminen luonnonkuituihin kuten bambuun, jonka ympäristövaikutukset olisivat pienemmät kuin lasikuidulla. Luonnonkuidut aiheuttavat kuitenkin omat haasteensa materiaalin lujuuden ja yhtenäisyyden osalta. Toinen vaihtoehto olisi hyödyntää helpommin kierrätettävää kestumuovihartsia komposiitin matriisimateriaalina kertamuovien sijaan, mikä mahdollistaisi uusiotuotannon. Kestumuovit ovat kuitenkin vielä liian kalliita kaupallisten tuuliturbiinilapojen tuotantoon. Tuulivoimaloiden koon kasvaessa lapojen materiaalien tulisi olla entistä kevyempiä. Materiaalivalinnoissa tulisi siirtyä kohti helpommin kierrätettäviä ja kevyempiä hiilikuituja, joiden käyttö on tähän asti ollut vähäistä muun muassa niiden kalliiden hintojen vuoksi. (Liu 2022, s. 1269 – 1270.)

5.2 Komposiittien kierrätysteknologiat

Tällä hetkellä tuulivoima-ala käyttää yhteensä 2,5 miljoonaa tonnia komposiittimateriaaleja komponenteissaan globaalisesti. Kierrätyksen tarve tulee tulevaisuudessa lisääntymään tuulivoimaloiden lisääntyessä ja niiden purkutarpeen kasvaessa. Tästä huolimatta vielä tällä hetkellä haasteena on lapajätteen riittävyys. Komposiittijätettä syntyy paljon muiltakin aloilta, kuten veneteollisuudesta ja lentokoneteollisuudesta. Kierrätysjärjestelmän kehittämisen piiriin olisi tärkeää saada yrityksiä myös muilta sektoreilta kuin vain tuulivoima-alalta. (Schmid 2020, s. 6.)

Jotta lapajätteelle ja muulle komposiittijätteelle voidaan luoda kiertotalousjärjestelmä, tulee ratkaisuja kehittää niin logistiikan, purun, keräilyn, jätteen käsittelyn kuin arvoketjun luomisessa. Lapojen kierrätykseen on jo olemassa monenlaisia teknologioita ja yhä useammat yritykset tarjoavat palveluitaan lapojen kierrätykseen. Kaikki erinäiset ratkaisut eivät kuitenkaan ole vielä laajasti käytössä tai kustannuksiltaan kilpailukykyisiä. (Schmid 2020, s. 5 – 6.) Kierrätys vaatii kalliita kustannuksia eikä kierrätetty raaka-ainemateriaali tarjoa samoja ominaisuuksia kuin neitseellinen materiaali (Gharde 2019, s. 5).

5.2.1 Käyttö sementin valmistuksen rinnakkaisprosessissa

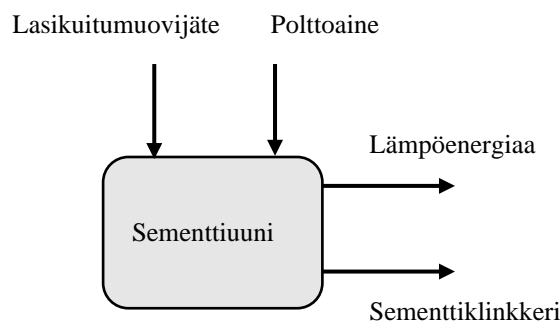
Sementin valmistuksen pääraaka-aineena toimii louhittu kalkkikivi. Valmistukseen tarvitaan kalkkikiven sisältämää kalsiumkarbonaattia (CaCO_3) sekä louhitusta sivukivestä ja teollisuuden sivuvirroista saatavaa piioksidia (SiO_2), rautaoksidia (Fe_2O_3) ja alumiinioksidia (Al_2O_3). Raaka-aineet murskataan, raakajauhetaan ja annostellaan esilämmitystä varten. Savukaasut lämmittävät raaka-aineseosta saaden aikaan halutun kemiallisen reaktion, esikalsinoinnin. Esikalsinoinnissa kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Lopuksi raaka-aineet poltetaan kiertouunissa 1450 celsius asteen lämpötilaan, jossa ne sint-raantuvat sementtiklinkkeriksi. Prosessissa vapautuu paljon hiilidioksidia, jota on pyritty vähentämään käyttämällä kierrätyspolttoaineita. (Finnsementti Oy 2018.)

Kierrätettäessä lasikuitumuovijätettä jäte syötetään sementtiuuniin polttoaineen seassa. Lasikuitumuovijätettä poltetaan kiertouunissa, jossa komposiitin matriisiosuus hyödynnetään energiana sementtiklinkkerin valmistuksessa. Lujiteosuus lasikuidusta hyödynnetään sementtiklinkkerin raaka-aineena sen sulaessa ja sekoitussa kuumennettavan kiviaineksen sekaan. Noin kaksi kolmasosaa lasikuitumuovijätteestä voidaan käyttää sementin

valmistuksen raaka-aineena ja yksi kolmasosa hyödynnetään energiana. Lasikuitumuovijäte sopii koostumukseltaan erittäin hyvin sementtiklinkkerin valmistukseen. (Muoviteollisuus Ry 2014.)

Lasikuitu vähentää sementin valmistuksessa tarvittavien neitseellisten raaka-aineiden määrää. Lasikuitumuovijätteen matriisimateriaali toimii kierrätyspolttoaineena sementin valmistuksessa korvaten perinteisiä fossiilisia polttoaineita kuten kivihiiltä. Sementin valmistuksen hiilijalanjälkeä voidaan vähentää näin jopa 16 %. Sementtiuunissa ei myöskään synny hienojakoista lasituhkaa tai kuonaa polttolämpötilan ollessa erittäin suuri. (Muoviteollisuus Ry 2014.) Toisaalta rinnakkaisprosessissa menetetään kuidun alkuperäinen fyysinen rakenne. (Schmid 2020, s. 6.)

Kierrätyspolttoaineen laatu on tarkasti valvottua, minkä johdosta komposiittijätteen synty- paikkalajittelu on tärkeää. Jäte tulee säilyttää asianmukaisesti, jotta se ei kerää kosteutta ja menetä lämpöarvoaan. Menetelmä on käytössä teollisessa ja kaupallisessa mittakaavassa Saksassa ja muualla Keski-Euroopassa. (Muoviteollisuus Ry 2014.)



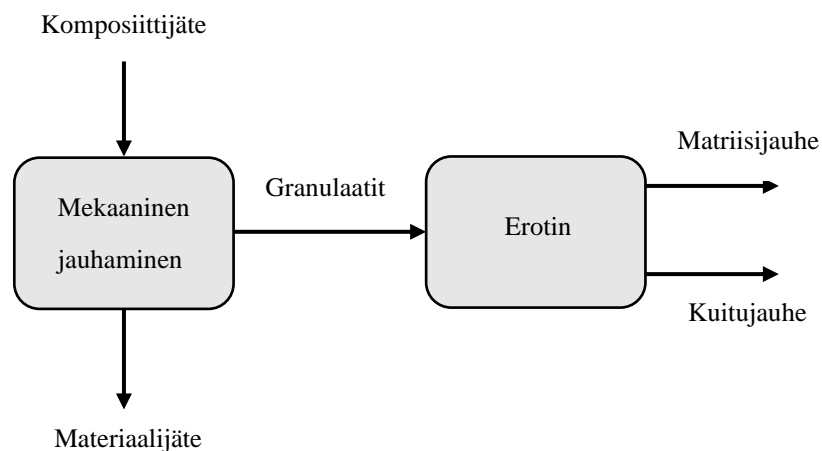
Kuva 3: Sementin valmistuksen rinnakkaisprosessi (Schmid 2020, s. 25).

5.2.2 Mekaaninen jauhaminen

Mekaanista jauhamista kierrätysmenetelmänä on kehitetty vuodesta 1970 alkaen. Mekaanisessa jauhamisessa prosessiin kuuluvia vaiheita ovat manuaalinen tai automaattinen lajittelu, jätteen murskaus 50 – 100 mm partikkelikokoon ja granulointi 50 µm – 10 mm partikkelikokoon. Prosessoinnin jälkeen komposiittimateriaalit erotetaan toisistaan joko syklonien ja seulojen avulla tai sähköstaattisella erottimella. Tämän jälkeen tuotteet, matriisi- ja lyhyt kuitujauhe, ovat valmiita uusiokäyttöön esimerkiksi lujitteena tai täyteaineena. Tekniikka

sopii paremmin lasikuitumuovijätteen kierrätykseen kuin hiilikuitukomposiitin käsittelyyn. (Gharde 2019, s. 4 – 5.)

Prosessi on tehokas, edullinen, vaatii vähän energiaa eikä tuota kasvihuonekaasupäästöjä toisin kuin polttoa vaativat kierrätysmenetelmät. Mekaanisessa jauhamisessa komposiittimateriaalin rakenne ei merkittävästi muutu (Gharde 2019, s. 4). Siitä huolimatta kierrätettyjen materiaalien arvo ja mekaaniset ominaisuudet laskevat. Uusiokäyttö on rajattua laadun heikkenemisen myötä. Kierrätettyä jauhetta ei ole vielä kannattavaa käyttää täyteaineina johtuen neitseellisten materiaalien kuten kaliumkarbonaatin ja piidioksidin edullisista hinnoista (Job et al. 2016). Kierrätetyn materiaalin koostumuksen vaihtelut ja mahdolliset epäpuhtaudet vaikuttavat niiden käyttöön myös lujitteena. Mekaanisen jauhamisen prosessin aikana syntyy jopa 40 % materiaali-jätettä, jota ei saada hyödynnettyä. Prosessi vaatii myös erityisjärjestelyitä jauhetun pölyn hallintaan. Haasteista johtuen teollisen mittakaavan sovelluksia ei ole vielä kehitetty. (Schmid 2020, s. 26.)



Kuva 4: Mekaanisen jauhamisen kierrätysprosessi (Schmid 2020, s. 26).

5.2.3 Pyrolyysi

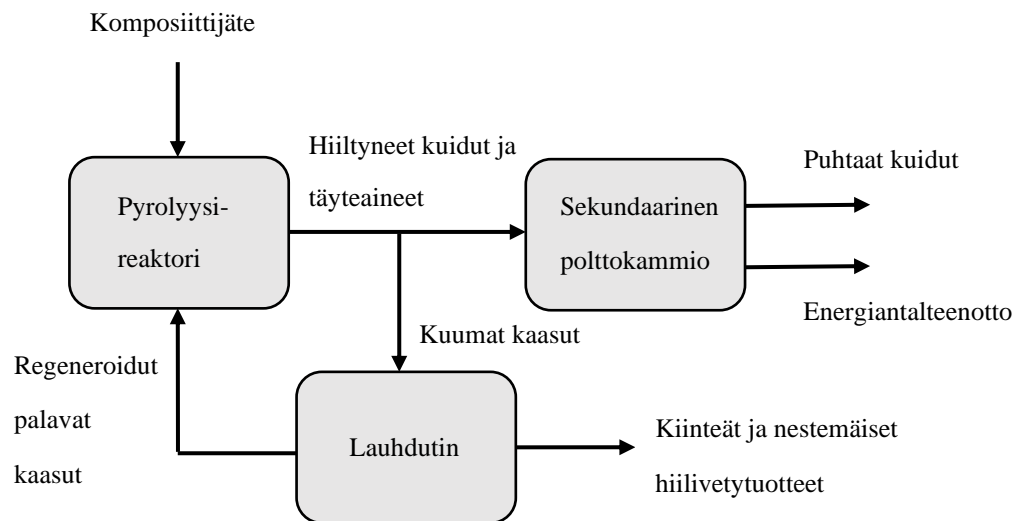
Pyrolyysissä komposiittijätettä kuumennetaan hapettomassa tilassa 450 – 700 celsius asteen lämpötilassa, jolloin komposiittimateriaalit saadaan erotetuksi toisistaan (Gharde 2019, s. 11). Kuituosasta saadaan hienojakoista tuhkaa, jonka mekaaniset ominaisuudet ja laatu kärsivät johtuen prosessin korkeasta lämpötilasta. Tästä huolimatta pyrolyysissä on pienimmät materiaalin laatumenetykset vertailtaessa teollisen mittakaavan kierrätysteknologioita.

Esimerkiksi pitkien kuitujen rakenne saadaan säilytettyä paremmin kuin mekaanisessa jauhamisessa. Kierrätettyjä kuituja voidaan käyttää uusien komposiittien tai tuotteiden valmistuksessa. (Gharde 2019, s. 12.) Kierrätettyjen kuitujen uusiokäyttöä hankaloittaa prosessissa syntyneen hiilen tarttuminen kuitujen pintaan. Hiiltyminen heikentää kierrätettyjen kuitujen mekaanisia ominaisuuksia. Kemiallisella käsittelyllä ja kuitujen jälkilämmityksellä voidaan rajoitetusti vähentää hiililyymistä. (Abdallah et al. 2021, s. 19.)

Matriisimateriaali saadaan erotettua lujiteosasta hiilivetytuotteiksi. Matriisimateriaali muunnetaan prosessissa joko öljyksi, kaasuiksi tai jauheeksi. Saatuja hiilivetytuotteita voidaan käyttää täyteaineena tai polttoaineena. (Schmid 2020, s. 27.) Kaasuja voidaan käyttää itse pyrolyysissä energianlähteenä vähentäen kierrätysprosessin energiakulutusta (Gharde 2019, s. 12).

Pyrolyysi vaatii mittavia investointeja ja juoksevia kustannuksia. Teknologia sopii paremmin hiili- kuin lasikuitukomposiiteille, sillä materiaalin laatumenetykset ovat pienemmät kierrätettäessä hiilikuitukomposiitteja (Gharde 2019, s. 12). Pyrolyysi on käytössä kaupallisesti, mutta vain hiilikuitukomposiittien kierrätykseen. Pyrolyysin käyttöä rajoittaa täten hiilikuitukomposiittijätteen vähäisyys. Tulevaisuudessa pyrolyysin käytön voidaan odottaa kasvavan hiilikuitukomposiitin käytön lisääntyessä tuulivoimalan turbiinien lapojen valmistuksessa. (Schmid 2020, s. 27.)

Pyrolyysi kierrätysteknologia on aktiivisesti käytössä Yhdysvalloissa, Saksassa, Italiassa ja Japanissa hiilikuitukomposiittijätteen kierrätyksessä. Pyrolyysi voidaan toteuttaa myös hyödyntämällä mikroaaltoja jätteen kuumentamiseen. Lämmönsiirto on tällöin erittäin nopeaa, minkä ansiosta energiantarve on pienempi. Mikroaaltoja ei ole vielä käytetty pyrolyysi prosessissa kaupallisesti. (Job 2016, s. 6 – 7.)



Kuva 5: Pyrolyysin kierrätysprosessi (Abdallah 2021, s. 9).

5.2.4 Sähkömekaaninen käsittely

Sähkömekaanisessa käsittelyssä matriisimateriaali ja kuidut erotetaan toisistaan sähkövirran avulla. Mekaaniseen jauhamiseen verrattuna kuitujen laatumenetykset ovat pienemmät. Sähkömekaanisella käsittelyllä on mahdollista käsitellä suuria jätemääriä tulevaisuudessa. Tällä hetkellä teknologia on vasta pilottivaiheessa. Sähkömekaaninen käsittely ei ole välttämättä sopiva teknologia kierrättämään tuulivoimaloiden lapoja tulevaisuudessa. (Schmid 2020, s. 28.)

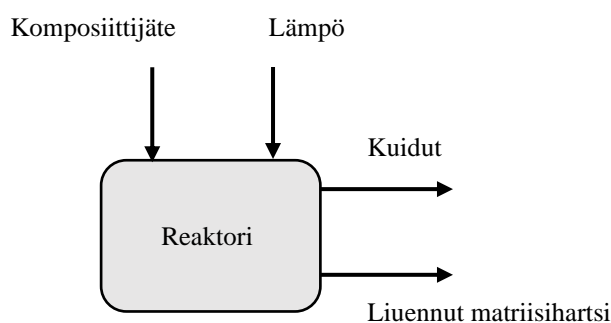
5.2.5 Solvolyyysi

Solvolyyysi eli liuotuskierrätys on kemiallinen prosessi, jossa matalariskisellä liuottimella, kuten vedellä, alkoholilla, glykolilla tai hapolla, rikotaan matriisin rakennetta. Solvolyyysi tarjoaa monia eri vaihtoehtoja prosessissa käytettävien liuottimen, lämpötilan, paineen ja katalyyttien suhteen. Kemiallisessa prosessissa polymeerit hajotetaan kemiallisesti monomeereiksi tai oligomeereiksi, jotka ovat vain muutaman monomeerin yhdisteitä (Gharde 2019, s. 12). Hiilikuidut eivät liukene liuottimeen ja ne voidaan näin erottaa matriisihartsista (Job 2016, s. 7). (Schmid 2020, s. 29.)

Verrattuna muihin kierrätysteknologioihin, solvolyyysin toimintalämpötila on matalampi, jolloin kuitujen rakenne ei heikkene yhtä paljon. Hiilikuitujen mekaaniset ominaisuudet

saadaan pysymään jopa yli 90 % tasolla neitseelliseen materiaaliin verrattuna (Job 2016, s. 8). Käytettäessä ylikriittistä vettä (paine yli 221 bar ja lämpötila yli 374 celsius astetta) saadaan niin kuituosan kuin matriisimateriaalin mekaaniset ominaisuudet pysymään lähellä alkuperäistä. (Schmid 2020, s. 29.) Solvolyyysi voidaan toteuttaa myös matalassa alle 200 celsius asteen lämpötilassa normaalissa ilmanpaineessa. Matalasta lämpötilasta johtuen kemialliseen reaktioon tarvitaan lisäksi katalyyttejä, lisäaineita ja sekoitinta. Matalasta lämpötilasta saatuja hyötyjä ovat parempi reaktion hallittavuus ja sivureaktioiden välttäminen. (Gharde 2019, s. 12.) Toisaalta katalyyttien käyttö vaikuttaa kuidun mekaanisiin ominaisuuksiin tarttuen kuidun pintaan ja vaikeuttaen kuidun uusiokäyttöä (Job 2016, s. 7).

Pyrolyysin ohella myös solvolyyysi vaatii mittavia investointeja, juoksevia kustannuksia ja ainoastaan hiilikuitukomposiittijätettä voidaan kierrättää prosessin kautta. (Schmid 2020, s. 29). Solvolyyysi prosessiteknologia on pääasiassa vielä laboratorio- ja pilotti vaiheessa. (Job 2016, s. 8).



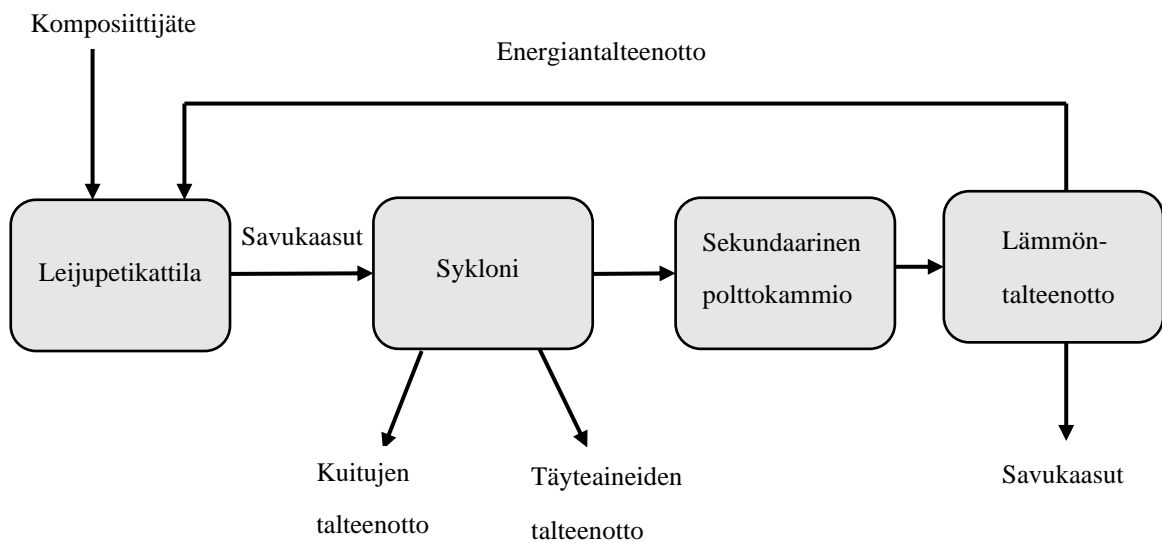
Kuva 6: Solvolyyysin eli liuotuskierrätyksen prosessi (Schmid 2020, s. 29).

5.2.6 Leijupetiteknologia

Komposiittijäte voidaan polttaa leijupetikattilassa, jossa polttoaine sekoittuu ilman avulla leijutettavaan hiekkapetiin. Teknologia kehitettiin 1990-luvun puolivälissä ja sillä voidaan kierrättää sekä lasi- että hiilikuitukomposiitteja. Jättemateriaali murskataan ensin noin 25 mm partikkelikokoon, joka syötetään leijupetikattilan hiekkapedin joukkoon. Petimateriaalia, johon murskattu jäte on sekoitettu, leijutetaan kuumun ilman avulla 450 – 550 celsius asteen lämpötilassa nopeudella 0,4 – 1,0 m/s. Kuidut ja täyteaineet kerätään talteen savukaasuista syklonin avulla uusiokäyttöä varten. Jäljelle jääneet polymeerejä sisältävät savukaasut

johdetaan sekundaariseen polttokammioon, jossa komposiitin polymeerit hapettuvat täysin 1000 celsius asteen lämpötilassa. Polymeereista saadaan lämpöenergiaa prosessiin. (Gharde 2019, s. 9.)

Tässäkin kierrätysteknologiassa koetaan laatumenetyksiä kuitumateriaalien osalta. Etuna leijupetiteknologiassa on mahdollisuus polttaa epätasaista ja epäpuhtauksia sisältävää polttoainetta. Leijupetiteknologia on vielä pilottivaiheessa. (Muoviteollisuus Ry 2014.)



Kuva 7: Leijupetiteknologian kierrätysprosessi (Goodship 2010, s. 69).

5.3 KiMuRa -hanke

Suomessa ei ole vielä olemassa yhtenäistä jätteenkäsittelyä komposiittimateriaaleille. Komposiittijäte ajetaan jätteenpolttoon tai kaatopaikalle erityisluvilla, mikä ei ole ympäristönäkökulmasta kestävin vaihtoehto. Komposiittijätteen kierrätysjärjestelmälle on suuri tarve ja KiMuRa -hanke edistää järjestelmän kehitystä eri toimijoiden yhteistyöllä. KiMuRa -lyhenne muodostuu sanoista kierrätetty, murskattu raaka-aine. Ympäristöministeriön rahoittama ja Muoviteollisuus ry:n vetämä KiMuRa -projekti käynnistyi tammikuussa 2021 ja projektin on määrä päättyä syyskuussa vuonna 2022. (Paalatie 2021.)

KiMuRa -projektin tavoitteena ei ole järjestää kustannustehokasta muovikomposiittijätteen kierrätysverkostoa ainoastaan lapajätteelle vain myös muilta aloilta syntyvälle

komposiittijätteelle. KiMuRa -projektissa luodaan lajittelujärjestelyt yrityksissä ja tarvittava logistiikka komposiittijätteen kuljettamiseksi keräilyasemille ja loppukäyttöön. Kiertotalouslogistiikasta on vastuussa Kuusankoski Oy, jonka vastuulla on suunnitella ja hallinnoida komposiittijätteen murskausta ja seulontaa. Valmis jätemurska toimitetaan suomalaiselle sementtiä valmistavalle yritykselle Finnsementti Oy:lle, jossa komposiittijätteen muoviosa hyödynnetään polttoaineena ja lujitteista valmistetaan sementtiklinkkerin raaka-ainetta. Komposiittijätteen materiaalit saadaan näin hyödynnettyä tehokkaasti. Etuna on myös vähäinen tuhkan määrä verrattuna jätteenpolttolaitoksissa poltettavasta komposiittimateriaalista syntyvään terveydelle vaaralliseen hienoon lasituhkaan. (Paalatie 2021.)

Edelleen haasteena on komposiittijätteen riittävyys. Jätevirran tulisi olla tasaista, jotta kierrätysjärjestelmä olisi teknistaloudellisesti kannattava. Jätevirtojen kasvu on odotettavissa vasta 2030-luvulle tultaessa lapajätteen määrän kasvaessa. Tällöin valmiille ja vakiintuneelle kierrätysjärjestelmälle on käyttöä. Tuulivoimalan purkaminen ja kierrätys toteutetaan usein alihankintana. Tuulivoimatoimijoiden tulee varmistaa, että alihankkijat ovat tietoisia KiMuRa -hankkeesta, jotta lapajäte voidaan kierrättää KiMuRan kierrätysjärjestelmän kautta. (Paalatie 2021.)

Marraskuuhun 2021 mennessä jo sata tonnia komposiittijätettä oli kierrätetty KiMuRan kierrätysjärjestelmän läpi onnistuneesti. Komposiittijätteen hyödyntäminen sementtiklinkkerin valmistuksessa on tällä hetkellä ainoa taloudellisesti, teknisesti ja teollisesti mahdollinen tapa kierrättää ja uusiokäyttää komposiittimateriaaleja Suomessa. Tulevaisuudessa muidenkin kierrätysprosessien teollinen hyödyntäminen voi olla mahdollista niiden kehittyessä. (Laurila 2021.)

5.4 ECOBULK EU -hanke

Suomalainen yritys Conenor Oy on kehittänyt teknologian komposiittijätteen kierrättämiseksi uudeksi raaka-aineeksi. Menetelmää on kehitetty osana ECOBULK EU -hanketta. Yritys tarjoaa tätä patentoitua teknologiaa lisenssi- tai kaupallisilla sopimuksilla eri yrityksille. (EEN 2021.)

Prosessissa käytetään valmiiksi silputtua ja haitallisista epäpuhtauksista vapaata komposiittijätettä, jonka partikkelikoko on alle 100 mm. Jätettä ei tarvitse jauhaa hienojakoiseksi, mikä vähentää prosessikustannuksia ja energian kulutusta. Prosessissa voidaan hyödyntää mistä

tahansa tuotteesta syntynyttä komposiittijätettä sekä tuotteen valmistuksen aikana syntynyttä tuotantojätettä. Silputtu komposiittijäte toimii lujitteena termomekaanisessa sintrausprosessissa, johon lisätään kestopuovimateriaaleja, kuten kierrätettyä tai neitseellistä PE:tä (polyeteeniä) tai PP:tä (polypropeenia), täyteaineeksi halutussa suhteessa. Kestomuovin puolisulassa vaiheessa lujite ja täyteaineet muodostavat yhdessä 1 – 10 mm kokoisia agglomeraatteja eli kasumia. Prosessissa ei synny jätettä ja energian kulutus on suhteellisen pientä. (EEN 2021.)

Kierrätetyllä komposiittijätteellä lujitettu uusi kuitumateriaali on valmista raaka-ainetta, jota voidaan käyttää muun muassa rakenteellisiin sovelluksiin ja tuotteisiin. Kierrätetty raaka-aine on kierrätettävissä yhä uudelleen ja uudelleen. Prosessiteknologiaa on testattu silputulla lapajätteellä ja se on myös todistettu toimivaksi. (EEN 2021.)

6 Johtopäätökset

Suomen tuulivoimaloiden purkuun on olemassa erilaisia tekniikoita, jotka tulevat vakiintumaan tulevaisuudessa purkutarpeen kasvaessa. Purkukustannuksiin vaikuttaa useat eri tekijät kuten tuulivoimalan koko, torniratkaisu, tuulipuiston voimaloiden määrä ja purkutapa. Purkukustannukset tulee ottaa huomioon jo tuulivoimalahankkeen alkuvaiheessa.

Tuuliturbiinin lapojen uusiokäyttö sellaisenaan on pienen mittakaavan ratkaisu lapajätteen käsittelyyn. Lapajätteen kierrättämiseen on sen sijaan olemassa monia eri vaihtoehtoja kuten käyttö sementin valmistuksen rinnakkaisprosessissa, mekaaninen jauhaminen, pyrolyysi, sähkömekaaninen käsittely, solvolyyysi ja leijupetiteknologia. Suurin osa kierrätysteknologi- oista on vielä pilottivaiheessa, mutta osaa voidaan käyttää jo teollisessa ja kaupallisessa mit- takaavassa. Lasikuidusta valmistettuja lapoja kierrätetään teollisesti Euroopassa sementin valmistuksen yhteydessä. Hiilikuitujätteelle sementin valmistusta edullisempi kierrätystapa on pyrolyysi. Jokaisella kierrätysteknologialla on omat haasteensa, jotka liittyvät muun mu- assa lopputuotteiden laatuun, kustannus- ja energiatehokkuuteen. On odotettavissa, että tek- nologiat kehittyvät tulevaisuudessa, kun lapajätteen kierrätystarve kasvaa.

Lapajäte on komposiittijätettä, jota syntyy myös monilta muilta aloilta kuin vain tuuliturbiin- nin lavoista. Suomessa lapajätteen ja muun komposiittijätteen hyödyntämistä sementin val- mistuksen rinnakkaisprosessissa on edistetty eri toimijoiden yhteistyöllä KiMuRa -hankkeen kautta. Kierrätysjärjestelmän luominen on ajankohtaista, sillä lapajätteen määrän kasvaessa 2030-luvulta lähtien valmiille kierrätysjärjestelmälle on kysyntää.

Lapajätteen käsittely on ollut ajankohtaista jo pidemmän aikaan muulla Euroopassa ja maa- ilmalla kuin Suomessa. Tuulivoiman rakentaminen ja käyttö on yleistynyt muualla maail- massa aiemmin kuin Suomessa. Tämän vuoksi ulkomaiset tuulivoimalat ovat vanhempia kuin Suomen voimalat ja vaativat purku- ja kierrätystoimia aiemmin. Suomen tulee kehittää omaa kierrätysjärjestelmäänsä ottaen oppia jo käytetyistä kierrätystavoista ja kehittää niitä eteenpäin. Tuuliturbiinien kestävä kierrätys on erittäin tärkeää, jotta tuulivoimaa voidaan pitää kokonaisuudessaan puhtaana uusiutuvana energianlähteenä.

Lähteet

Abdallah, R., Juaidi, A., Savaş, M. A., Çamur, H., Albatayneh, A., Abdala, S. & Manzano-Agugliaro, F. 2021. *A Critical Review on Recycling Composite Waste Using Pyrolysis for Sustainable Development*. MDPI AG. *Energies* (Basel). Vol. 14. ISSN 1996-1073.

Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D.P. & Pagh Jensen, J. 2022. *The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context*. *Renewable & sustainable energy reviews*. Vol. 155. ISSN 1364-0321.

EEN. 2021. *Finnish Company Offers a New Thermomechanical Process Technology for Recycling and Converting Fiber Reinforced Plastics (FRP) Waste Under a Licensing Agreement Or a Commercial Agreement with Technical Assistance*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 18.3.2022]. Saatavilla: <https://een.ec.europa.eu/tools/services/PRO/Profile/Detail/0bae7549-fdfb-42b0-b10c-b3ef69acdf63>.

ELY. 2021. *Tuulivoiman Yleisopas*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 28.3.2022]. Saatavilla: <https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/57296/Tuulivoiman+yleisopas.pdf/9f0ed0a3-7df6-ee6c-81ed-e90279b264fe?t=1636093932871>.

EUR-Lex. 2020. *EU:N Jätehuoltolaki*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 17.3.2022] Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=legissum%3Aev0010>.

Finnsementti Oy. 2018. *Ympäristöraportti 2018*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 16.3.2022]. Saatavilla: https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2018/09/Finnsementti_ymparistoraportti_2018.pdf.

Gharde, S., Kandasubramanian, B. 2019. *Mechanochemical and chemical recycling methodologies for the Fibre Reinforced Plastic (FRP)*. *Environmental Technology & Innovation*. Vol. 14. ISSN 2352-1864.

Goodship, V. 2010. *Management, recycling and reuse of waste composites*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited. ISBN 1-84569-766-9.

Hau, E. 2013. *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 3. painos. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 9783642271519.

- Jenkins, N., Burton, T.L., Bossanyi, E., Sharpe, D., Graham, M. 2021. *Wind Energy Handbook*. 3. painos. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated. ISBN 1-5231-3735-5.
- Jensen, J.P., Skelton, K. 2018. *Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy*. Renewable & Sustainable Energy Reviews. Vol. 97. s. 165 – 176. ISSN 1364-0321.
- Job, S. et al. 2016. *COMPOSITES RECYCLING://Where are we Now?* [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 28.3.2022]. Saatavilla: <https://compositesuk.co.uk/system/files/documents/Recycling%20Report%202016.pdf>.
- Korpela, A. 2016. *Tuulivoiman Perusteet*. 1. painos. Tampere: AMK-Kustannus Oy Tammertekniikka. 98 s. ISBN 978-952-5491-84-5
- Laurila, M. 2021. *Muovikomposiittijätteen Kierrätystä Testataan KiMuRa -Hankkeessa*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 16.3.2022] Saatavilla: https://www.plastics.fi/document.php/1/488/2021_11_22_lehdistotiedote/09eeced390d914ec5e5d3a52ada859b4.
- Letcher, T. & Letcher, T.M. 2017. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*. 1. painos. London, England: Academic Press. ISBN 0-12-809429-X.
- Liu, P., Meng, F., Barlow, C.Y. 2022. *Wind turbine blade end-of-life options: An economic comparison*. Resources, Conservation and Recycling. Vol. 180. ISSN 0921-3449.
- Motiva. 2021. *Syöttötariffi*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 2.12.2021] Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa/uusiutuvan_energian_tuet/syottotariffi.
- Muoviteollisuus Ry. 2014. *Muovikomposiittien Kierrätys*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 16.3.2022] Saatavilla: https://www.plastics.fi/document.php/1/195/muovikomposiittien_kierratys/2b5572dace7417fc6e15310244eb0a7e.
- Neoen. 2021. *Neoen Finland*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 2.12.2021] Saatavilla: <https://www.neoen.com/en/Neoen-Finland>.
- Paalatie, H. 2021. *Lapajäte. KiMuRa Ratkaisee Lapajätehaastetta.*: Tuulivoimalehti. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 01-2021. s. 30 – 32. ISSN 2342-2300.

Paalatie, H. 2019. *Lapojen Uusi Elämä.*: Tuulivoimalehti. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 02-2019. s. 20 – 23. ISSN 2342-2300.

Ritchie, H. & Roser, M. 2020. *Emissions by Sector*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 22.11.2021] Saatavilla: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.

Schmid, M. et al. 2020. *Accelerating Wind Turbine Blade Circularity*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 20.3.2022] Saatavilla: <https://wind-europe.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf>.

Sokka, L., Sinkko, T., Holma, A., Manninen, K., Pasanen, K., Rantala, M., Leskinen, P. 2016. *Environmental impacts of the national renewable energy targets – A case study from Finland*. Renewable & Sustainable Energy Reviews. Vol. 59. s. 1599 – 1610. ISSN 1364-0321.

Strong, A.B. 2008. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*. Society of Manufacturing Engineers. ISBN 1-62104-007-0.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2022a. *Investoinnit*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 14.4.2022] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/investoinnit>

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2022b. *Käyttö- ja ylläpitokustannukset*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 14.4.2022] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/kaytto-ja-yllapitokustannukset>

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2022c. *Toiminnassa olevat & puretut voimalat*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 14.4.2022] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa/toiminnassa-olevat-puretut>

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2022d. *Tuulivoimaloiden Purku Ja Kierrätys*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 11.2.2022] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietopankki/tuulivoimaloiden-purku-ja-kierratys>.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2022e. *Käytön Lopettamisen Ympäristövaikutukset*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 23.2.2022] Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa->

tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoiman-vaikutukset/tuulivoiman-ymparistovaikutukset/kayton-lopettamisen-ymparistovaikutukset.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2021a. *Tuulivoima Maailmalla*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 22.11.2021] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-maailmalla>.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2021b. *Tuulivoimatekniikka*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 22.11.2021] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimatekniikka-2>.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2021c. *Puhtaampi Sähköntuotanto*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 22.11.2021] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoiman-vaikutukset/tuulivoiman-ymparistovaikutukset/puhtaampisahkontuotanto>.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2021d. *Tuulivoima Suomessa*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 22.11.2021] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa>.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2021e. *Tuulivoimaennusteita*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 22.11.2021] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoimaennusteita>.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2021f. *Miksi Tuulivoimaa*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 10.11.2021] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/miksi-tuulivoimaa>.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2021g. *Tuulivoimatilastot 2020*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 18.12.2021] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tilastot-2/tuulivoimatilastot-2020>.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2021h. *STY:N Tuulivoimaloiden Purku & Kierrätys -Webinaari*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 28.3.2022] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tapahtumat/styn-tuulivoimaloiden-purku-kierratys-webinaari>.