

## Tuulivoimalat ja mikromuovi

### 1.1. Tuulivoimaloiden materiaalien kulumisesta aiheutuvat päästöt

#### 1.1.1. Kuluminen

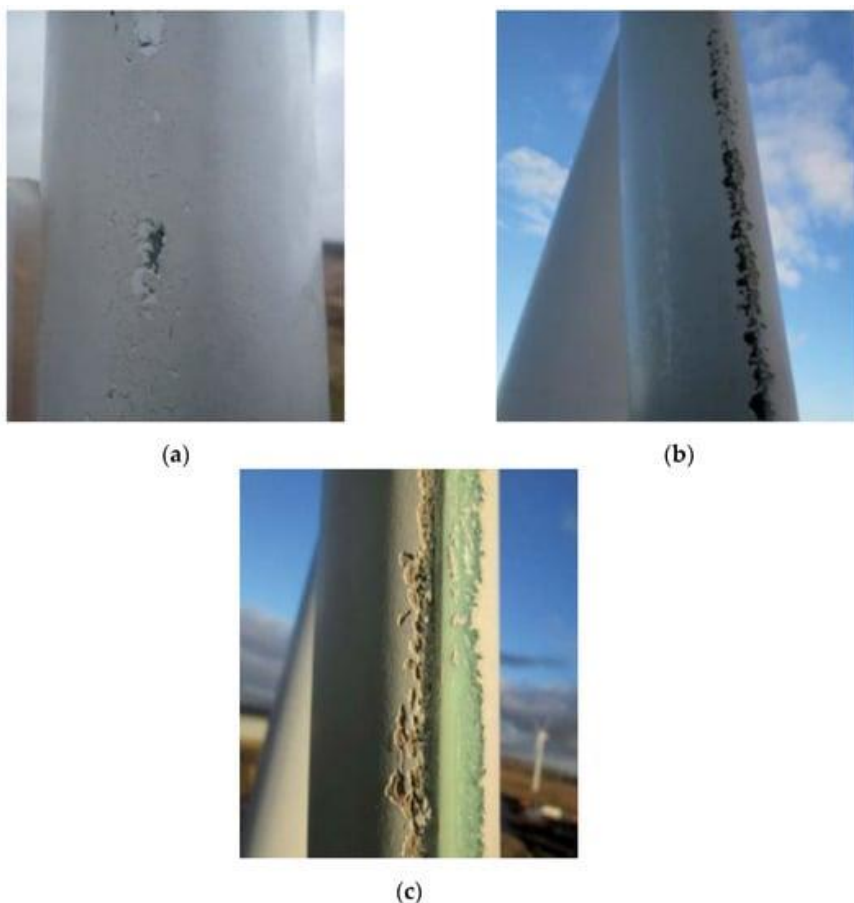
Tuulivoimalat altistuvat elinkaarensa aikana erilaisille olosuhteille ja luonnonvoimille, jotka kuluttavat tuulivoimaloiden pintamateriaaleja. Päästöjen tarkastelu keskittyy tuulivoimaloiden liikkuviin ja enemmän kuluviin lapoihin. Muihin kiinteämpiin komponentteihin (roottori, konehuone, torni, perustukset) ei kohdistu yhtä suurta kulumista. Suurimpana kulumista aiheuttavana tekijänä pidetään mekaanista kulumista, joka aiheutuu tuulivoimaloihin kohdistuvasta vesisateesta, rakeista, ilmassa olevista pienhiukkasista kuten hiekasta ja tuhkasta, sekä törmäyksistä lintuihin, lepakoihin ja hyönteisiin. Voimalat altistuvat lisäksi suurille lämpötilan vaihteluille, jäätämislle, auringon UV-säteilylle sekä salamoille.

Kuluttavat vaikutukset keskittyvät voimaloiden pyöriviin lapoihin, erityisesti niiden kärkiin ja johtoreunoihin (lapojen ”etureuna” pyörimissuuntaan nähden). Kärjet kulumat lavan muita osia nopeammin, koska pyörimisnopeus on sitä suurempi mitä kauempana ollaan ympyräliikkeen keskipisteestä, eli tässä tapauksessa roottorista. Suurten lapojen kärkinopeus voi olla maksimissaan 80–100 m/s, eli 360 km/h (Fæster et al. 2021). Siinä vauhdissa lapoihin osuvia vesipisaroita voi verrata tehokkaiisiin painepesureihin, joista lähtevän vedennopeus on noin 80–200 m/s (Guha et al. 2011). Johtoreunan ja kärkien kulumisen sateen vuoksi katsotaan olevan tuulivoimaloiden yleisin vahingoittumismekanismi.

Riippuen olosuhteista ja lapojen pintakäsittelystä, havaittavaa kulumista voi mahdollisesti tapahtua jo ensimmäisten käyttövuosien aikana. Säännöllisillä huolloilla kulumista voidaan kuitenkin ehkäistä. Kuva 1 näkyy pintakerroksen vaurioita eri ikäisissä lavoissa. Kuvissa näkyviin voimaloihin ei oletettavasti ole tehty nykyisten käytäntöjen mukaisesti huoltotoimenpiteitä. Kuvan (a) vauriot voivat näkyä 1–3 vuoden käytön jälkeen, kuvan (b) vauriot arviolta 3–5 käyttövuoden jälkeen, ja suurimmat vauriot kuten kuvassa (c) esiintyvät lähemmäksi 10 vuotta käytössä olleissa lavoissa. Nämä ajat ovat suuntaa antavia arvioita perustuen Cortes et al. (2017) kulumiskuvien vertailuun.

Kulumisessa voi olla suuria eroja johtuen erilaisista materiaaleista, alueellisista olosuhteista sekä lapojen huollosta. Johtoreunan kulumisen tarkistetaan yleensä säännöllisesti, eikä sitä päästetä pahaksi, sillä pahasti kuluneet lavat vaikuttavat jo lapojen aerodynaamisiin ominaisuuksiin ja voivat siten huonontaa tuulivoimalan hyötysuhdetta. Johtoreunan kulumisen vaikutus voimaloiden vuotuisen sähköntuotantoon on arviolta 1–5 % (Law & Koutsos 2020). On syytä huomioida, että johtoreunan kulumiseen on pyritty puuttumaan, ja uudemmissa lavoissa kulumisen on vähäisempää kuin vanhoissa malleissa.

Mekaaniseen kulumiseen vaikuttavat myös muut tekijät; mm. lämpötila ja UV-säteily voivat vaikuttaa pintamateriaalien ominaisuuksiin hidastaen tai kiihdyttäen niiden mekaanista kulumista. Lämpötilan vaikutusta on tutkittu polyuretaaniseen johtoreunan kulumiseen vertaamalla materiaalin kulumista +25°C ja -30°C lämpötiloissa: kulumisen oli huomattavasti nopeampaa kylmissä -30°C olosuhteissa (Godfrey et al. 2021). Tämän vaikutusta tuulivoimaloiden kulumiseen todellisessa käytössä on kuitenkin vaikeaa arvioida mm. koska pakkasella ei tapahdu kulumista vesisateesta eikä lumisateen kuluttavaa vaikutusta ole tutkittu.



Kuva 1. Esimerkkejä lapojen kulumistyypeistä: **(a)** pistemäisiä kuoppia, **(b)** laajempia pitkittäisiä uurteita, **(c)** pintasuojaksen kokonainen kuluminen isommilta alueilta, komposiitti paljastunut  
(Lähde: Groucott, S.; Pugh, K.; Zekos, I.; M Stack, M. A Study of Raindrop Impacts on a Wind Turbine Material: Velocity and Impact Angle Effects on Erosion MAPS at Various Exposure Times. Lubricants 2021, 9, 60.)

Kulumisen tutkiminen on haastavaa. *In situ* -mittaukset oikeilta tuulivoimala-alueilta olisivat haastavia, sillä tuulivoimaloista irtoavia päästöjä olisi vaikeaa erottaa muista lähteistä johtuvista taustapäästöistä ja kaukokulkeumasta. Laboratoriotutkimuksissa pystytään sulkemaan muut päästölähteet pois, mutta todellisten tuulivoimaloiden komponenttien käyttäminen on niiden koon puolesta haastavaa. Myös kulumista aiheuttavat ympäristöolosuhteet pitäisi mallintaa keinotekoisesti, jolloin ne eivät välttämättä vastaisi todellisen käytön tilannetta. Realistisinta dataa saisi tallentamalla ja mittaamalla lapojen pintakerrosten kuluminen tarkasti lapojen säännöllisten huoltojen yhteydessä, jolloin pintakerroksia uusitaan ja kulumia paikataan.

### 1.1.2. Lapojen materiaalit

Tuulivoimaloiden lavat koostuvat kuoriosasta ja painoa kantavasta tukirakenteesta. Kuoriosaa voidaan koota kahdesta palasta, jotka liimataan yhteen, tai valamalla lapa kokonaan muotilla. Muotilla valamista käytetään lähinnä pienempien lapojen valmistuksessa. Kuoriosan rakenne koostuu useasta eri kerroksesta, mutta rakenne voi vaihdella lavan eri osissa. Tyypillisesti kuoriosaa muodostuu kerrospaneelista, sekä sen päälle laminoituista hartsikerroksista, pinnoitteista ja maaleista. Tuulivoimaloiden lapojen kuoriosaa valmistetaan pääsääntöisesti lujitemuovista. Lujitemuovi, tai kuituluji-tettu muovi, on komposiittimateriaali, joka koostuu lujitekuiduista ja sidosaineena toimivasta hart-sista. Yleisimmin tuulivoimaloiden lavoissa kuituna käytetään lasikuitua, ja hartsinä epoksia, vinyly-liesteriä tai polyesteriä. Käytetyin lasikuitumateriaali on tällä hetkellä alumiini-borosilikaattilasi, eli E-lasi (E-glass, "electrical glass"). Lasikuidun sijaan voidaan käyttää myös hiili-, aramidi- tai puukui-tua. (Mishnaevsky et al. 2017)

Lapojen päällimmäisenä kerroksena on tyypillisesti laminaattien pinnalle laitettava "gelcoat", maali, tai muu suojaava pinnoite. Kerros voi koostua mm. polyesteristä, epoksista, polyuretaanista tai ak-ryylistä (Kjærside Storm 2013). Maalit ja pinnoitteet voivat myös sisältää fluoropolymeerejä, poly-tetrafluorieteeniä (PTFE, kauppanimeltä Teflon), ja muita PFAS-yhdisteitä (poly- ja perfluorattuja alkylyihdisteitä) (Karmouch et al. 2009, OECD 2022, Qin et al. 2020). Koska suurin kuluminen koh-distuu lapojen johtoreunoihin, niihin lisätään tyypillisesti erillinen vahvempi suojaus (LEP, leading edge protection) normaalin pinnoitteen lisäksi. Suojakerroksen materiaali vaihtelee valmistajasta riippuen; polyuretaani on yksi yleisimmistä materiaaleista, mutta myös metalli-polymeeri seoksien ja muiden polymeerien käyttöä tutkitaan. (Mishnaevsky et al. 2023, Mishnaevsky et al. 2021)

### 1.1.3. Mikromuovit

Mikromuovilla tarkoitetaan yleisesti 1 µm – 5 mm kokoisia kiinteitä muovihiukkasia, jotka koostuvat polymeerien ja funktionaalisten lisäaineiden (esim. pehmentimet, UV-suojat, väriaineet, stabilisaat-torit, palonestoaineet, hapettumisenestoaineet) seoksesta. Alle 1 µm:n (0,001 mm) muovihiukka-set luokitellaan yleisesti nanomuoviksi. Mikromuovi koostuu monen muotoisista ja kokoisista hiuk-kasista sekä monesta eri muovilaadusta. Yleisimpiä ympäristöstä löytyviä muovilaatuja ovat mm. polyeteeni (PE), polypropeeni (PP), polyvinyylikloridi (PVC) ja polyetylenitereftalaatti (PET), mutta myös hyvin monia muita muovityyppejä voi löytyä näytenäytteen sijainnista riippuen.

Muovijäte ja mikromuovit ovat jo levinneet kaikkialle maailmaan; niitä on löydetty vuorten hui-puilta, maaperästä, ilmasta, meristä, järvistä, Antarktikselta ja jopa ihmisten verenkierrosta. Mikro-muovit voivat päätyä ympäristöön suoraan mikromuovina (esim. tekonurmikentät, renkaiden kulu-minen, tekstiileistä irtoavat kuidut), tai ympäristöön päätyneet suurempi makromuovijäte voi hajota ulkoisten vaikutusten (mekaaninen kuluminen, lämpötilan muutokset, UV-säteily, biologinen tai ke-miallinen hajoaminen) seurauksena mikrokokoisiksi partikkeleiksi.

Mikromuovia päätyy ympäristöön monista eri päästölähteistä. Muovia käytetään niin laajasti yh-teiskunnassamme, että päästölähteitä on kaikkialla ympärillämme. Mikromuovin päästölähteitä ovat mm. liikenne, teollisuus, maatalous, ympäristössä olevien roskien hajoaminen ja jäteveden-puhdistamot. Muihin yhteiskunnan päästölähteisiin nähden tuulivoimaloiden mikromuovipäästöt ovat hyvin vähäisiä niiden vähäisen määrän ja pienen kulumispinta-alan takia.

Mikromuovin haittavaikutuksista ihmisille on niukasti tutkimuksia johtuen mm. siitä, että kontrolli-ryhmää, joka ei olisi altistunut mikromuoveille on lähes mahdotonta löytää. Koe-eläinten ja solu-mallien avulla tehdyissä tutkimuksissa on löytynyt useita mahdollisia haitallisia vaikutuksia, kuten oksidatiivista stressiä, solutoksisuutta, tulehduksen lisääntymistä, häiriöitä aineenvaihdunnassa,

muovien kulkeutumista kudoksiin, sekä vähäisemmässä määrin havaintoja neurotoksisuudesta, lisääntymistoksisuudesta ja karsinogeenisuudesta (THL 2023). Haitalliset vaikutukset ovat kuitenkin vaatineet tutkimuksissa suhteellisen korkeita mikromuovipitoisuuksia, joille altistuminen elinympäristöstä johtuen on epätodennäköistä ainakin nykyisin.

#### 1.1.4. Tuulivoimaloiden mikromuovipäästöt

Tuulivoimaloiden mikromuovipäästöistä löytyy paljon mielipidekirjoituksia, yritysten ja yhdistysten kannanottoja sekä infosivustoja, mutta suurin osa näistä ei pohjaudu tieteelliseen tutkimukseen. Metsähallituksen sekä Suomen Tuulivoimayhdistyksen sivustoilla tuulivoiman ympäristövaikutuksista ja mikromuovipäästöistä kerrotaan, että päästöt ovat vähäisiä. Molemmilla sivustoilla viitataan ruotsalaisen Naturskyddsforeningenin (Luonnonsuojeluyhdistys) artikkeliin, jossa arvioidaan kaikkien ruotsalaisten tuulivoimaloiden päästävän luontoon noin 645 kiloa mikromuovia vuodessa. Päästöt olisivat hyvin vähäisiä muihin päästölähteisiin nähden; 0,98 % kosmetiikan, 0,03 % – 0,04 % tekonurmikenttien, ja 0,01 % tieliikenteen mikromuovipäästöistä. Luku perustuu ilmeisesti norjalaisen organisaation NORWEA:n (nyk. Fornybar Norge, suom. Uusiutuva Norja) dataan, mutta alkupeiräistä ”Faktaark Vindkraft, Plast og Bisfenol A” artikkelia ei enää löydy, eikä tietoa mistä sen sisältämä data on peräisin. Lukuja ei voi siis pitää täysin luotettavina, koska lukujen taustalta ei vaikuta löytyvän tieteellistä tutkimusta.

Yleisenä trendinä näkyy, että tuulivoimaa vastustavissa lähteissä mikromuovipäästöjen väitetään olevan jopa tonneja tuulivoimaloiden elinkaaren aikana, kun vihreää energiaa kannattavien tahojen luvut ovat sadoissa grammoissa per vuosi, joka vastaisi tuulivoimalan 30 vuoden elinkaaren aikana muutaman kilon tai enintään kymmenien kilojen kokonaispäästöjä. Näistä väitteistä jälkimmäinen on selvästi lähempänä totuutta; 150 metrisen lavan paino on noin 17200 kg eli 17,2 tonnia, ja jos lavoista poistuisi tonneittain materiaalia, se tarkoittaisi hyvin suurta osaa lavan painosta. Mikäli ainetta irtoaisi näin paljon, kuluminen tekisi lavoista käyttökeltomia tuulivoimakäyttöön hyvin nopealla aikataululla. Luvut eivät kuitenkaan perustu tutkittuun tietoon, sillä vartenotettavia tieteellisiä tutkimuksia on aiheesta vielä vähäisesti. Useat aiheita käsittelevät lähteet, joissa kulumismäärät ovat esitetty erityisen suurina, viittaavat samaan skotlantilaiseen tutkimukseen (ks. Pugh et al. 2021). Tutkimuksen koeasetelmaa monet tahot ovat kritisoineet riittämättömäksi kuvastamaan todellista tuulivoimalan kulumista. Tutkimuksessa tehty kulumistesti on toteutettu pienellä palalla epoksi-lasikuitu komposiittia, ilman oikeissa lavoissa olevia suojaavia pintakerroksia, pyörimisnopeudella joka vaikuttaisi vain lapojen kärkiin ja jatkuvassa sateessa suurilla paikallisilla sademäärillä. Tutkimuksesta ei siis voi vetää johtopäätöksiä todelliseen lapojen kulumiseen.

Suurin osa aiheesta käydystä keskustelusta keskittyy virheellisesti puhumaan lapojen komposiittimateriaalin kulumisesta eikä lapojen pintakerrosten kulumisesta. Kuitenkin pintakerros nimenomaan suojaa sisempiä komposiittimateriaaleja kulumiselta, ja pintakerroksia myös korjataan huoltojen yhteydessä. Ensimmäisenä ja eniten kuluvana kerroksena oleellista kulumisen päästöjä tarkasteltaessa olisi tutkia, mitä materiaaleja pinta- ja suojakerroksissa käytetään. Polyuretaani (PU) vaikuttaa useiden lähteiden mukaan olevan hyvin yleisesti käytetty materiaali johtoreunojen suojauksessa sekä lapojen pinnoitteessa. Lapojen kulumisesta aiheutuvien hiukkaspäästöjen voi siis olettaa sisältävän mikromuovina polyuretaania ja muita pinnoituksen polymeerejä.

#### 1.1.5. Bisfenoli A (BPA)

Mikromuovin lisäksi huolta on herättänyt mahdolliset bisfenoli A (BPA) päästöt tuulivoimaloiden lavoista. BPA on monomeeri, jota polymeroimalla valmistetaan epoksihartsia, joka on yksi lapojen komposiittimateriaalin pääraaka-aineista. Valmistusprosessi kuitenkin muuntaa valtaosan BPA:sta

polymeeriksi, ja valmiin materiaalin BPA jäännöspitoisuus on pieni (arviolta 10 mg/kg, mm. ECHA 2006, Sakamoto et al. 2007). Lisäksi siiven pintakerros suojaa komposiittimateriaalia kulumiselta, kuten edellä on kuvattu.

Vaikka BPA on ihmiselle terveysriski suoran altistumisen kautta, ei mahdollinen BPA-päästö tuulivoimaloista aiheuta riskiä. Usean tieteellisen tutkimuksen mukaan BPA:ta hajottavia mikrobeja on ympäristössä runsaasti, ja ympäristöön päätynyt BPA hajoaa nopeasti muutaman päivän sisällä (mm. THL 2023, Choi & Lee 2017, Kang & Kondo 2002, Klecka et al. 2001, Dorn et al. 1987).

## 1.2. Kulumisesta aiheutuvien päästöjen vaikutukset

Lapoihin kohdistuu ulkoisia voimia, jotka kuluttavat lapoja niiden elinkaaren aikana. Kulumisen kohdistuu pintakerrokseen, kuten maaleihin ja pinnoitteisiin, mutta voi kohdistua myös komposiittirunkoon, jos pintakerroksen ehtivät kulua pois. Kulumisen keskittyy pyöriviin osiin ja erityisesti lapojen kärkiin ja johtoreunoihin. Vaikka kulumista tapahtuu, on kulumisen pintojen pinta-ala vähäinen, jolloin ympäristöön päätyvän materiaalin määrä on myös vähäinen. Tuulivoimaloista irtoavan mikromuovien määrää arvioitaessa tulisi arvion perustua lapojen materiaalien kulumisen mittaamiseen sekä massan muutokseen. Ympäristöstä otetuissa näytteissä olisi mikromuovia muistakin lähteistä kaukokulkeuman seurauksena.

Tutkimusten mukaan kuluttava tekijä on sade, joka myös kuljettaa päästöt voimaloiden läheiseen maaperään ja mahdollisiin pintavesiin. Kuivissa olosuhteissa päästöjä voi muodostua ilmaan lapojen törmätessä eläimiin tai kuluessa ilman hiekan, tuhkan ja muiden pienhiukkasten vaikutuksesta, mutta näiden päästöjen määrän oletetaan olevan huomattavasti pienempiä sateesta johtuviin päästöihin.

Vaikutuksia arvioitaessa oleellista on lapojen pinnassa käytetyt materiaalit. Nykytiedon valossa, polyuretaani (PU) on laajasti käytetty johtoreunojen suojamateriaali, joten kulumisesta aiheutuvien pienhiukkaspäästöjen voi olettaa sisältävän polyuretaanista koostuvaa mikromuovia. Polyuretaania käytetään laajasti eri käyttökohteissa mm. rakennuslalla, mutta pehmeämpää polyuretaanivaahtoa käytetään myös huonekalujen, sänkyjen ja auton penkkien materiaalina. Polyuretaanin ympäristövaikutuksia ei täysin tunneta. Kestävänä polymeerinä sen hajoamisaika ympäristössä on pitkä. Vaikka luonnosta on myös löydetty sitä hajottavia mikro-organismeja (Howard 2002), niidenkin läsnä ollessa hajoamisaika on vähintään kymmeniä vuosia.

Ihmisille polyuretaani voi teoriassa aiheuttaa haitallisia vaikutuksia, mutta tuulivoimaloiden tapauksessa päästöjen ei arvioida oleva terveysriski. Polyuretaanit valmistetaan tyypillisesti polymeroimalla isosyanaateista, joille altistuminen on yhdistetty työperäisen astman kehittymiseen (TTL 2023) isosyanaattien kanssa työskentelevillä henkilöillä. Valmiissa polyuretaanissa on kuitenkin vain pieniä jäännöspitoisuuksia isosyanaatteja (Franklin et al. 2016, Mutsuga et al. 2014), ja suurimman osan päästöistä arvioidaan päätyvän maaperään vesisateen mukana. Tuulivoimalat rakennetaan lisäksi etäälle asuinrakennuksista, mikä vähentää altistumista ilmaan päätyville hiukkasille. Polyuretaania ei myöskään käytettäisi niin laajasti esim. huonekalujen ja sänkyjen materiaalina, jos se olisi ihmiselle erityisen haitallista.

Mikäli lavoissa edelleen käytetään PFAS-yhdisteitä sisältäviä pinnoitteita, niiden ympäristö- ja terveysvaikutukset voivat olla muita yhdisteitä vakavampia. Niiden käyttöä tulisi ensisijaisesti rajoittaa, ja korvata ne vähemmän haitallisilla ja nopeammin hajoavilla yhdisteillä.

Lapojen kulumisesta kaivattaisiin lisää tieteellistä tutkimusta. Tutkimuksia kaivattaisiin etenkin uudemmissa tuulivoimaloista, joissa on entistä suurempi lapakoko ja uusia materiaaleja.

### 1.3. Haitallisten vaikutusten ennalta ehkäisy

Kulutuksesta johtuvien päästöjen haitallisia vaikutuksia voidaan ehkäistä kulutusta vähentävillä toiminnoilla, kuten kulutusta kestäville suojakerroksilla johtoreunoissa ja muissa kuluviissa pinnoissa sekä laipien säännöllisellä tarkastuksella ja huollolla. Pintakerroksen kulumien varhainen korjaus vähentäisi ympäristöön päätyvien päästöjen määrää. Laipien tilaa olisi mahdollista seurata etänä ja reaaliajassa laipoihin asennettavien sensorien avulla (McGucan et al. 2008), joiden avulla laipien huoltoa voisi optimoida reaaliaikaisen tarpeen mukana.

Päästöjen vaikutuksia ympäristöön voidaan myös minimoida ympäristöystävällisiä materiaaleja suosimalla, jotka mm. hajoaisivat nopeasti ympäristössä. Haitallisia ja pysyviä materiaaleja, kuten PFAS-yhdisteitä sisältäviä materiaaleja, tulisi välttää.

## 1.4. Käytetyt lähteet

- Choi, Y. & Lee, L. (2017). Aerobic Soil Biodegradation of Bisphenol (BPA) Alternatives Bisphenol S and Bisphenol AF Compared to BPA. *Environmental Science & Technology*. 51. 10.1021/acs.est.7b03889.
- Cortes, E., Sánchez López, F., O'Carroll, A., Madramany, B., Hardiman, M., Young, T. (2017). On the Material Characterisation of Wind Turbine Blade Coatings: The Effect of Interphase Coating–Laminate Adhesion on Rain Erosion Performance. *Materials*. 10. 1146. 10.3390/ma10101146.
- Dorn, P.B., Chou, C-S., Gentempo, J.J. Degradation of bisphenol A in natural waters, *Chemosphere*, Volume 16, Issue 7, 1987, Pages 1501-1507, ISSN 0045-6535, [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(87\)90090-7](https://doi.org/10.1016/0045-6535(87)90090-7).
- ECHA, Decision on substance evaluation pursuant to article 46(1) of regulation (EC) No 1907/2006 for 4,4'-isopropylidenediphenol (Bisphenol A), CAS No 80-05-7 (EC No 201-245-8). <https://echa.europa.eu/documents/10162/8bb649b0-de61-08ac-a6e0-d8f803df1317>
- Fæster, S., Johansen, N. F-J., Mishnaevsky, L., Kusano, Y., Bech, J.I., Madsen, M.B. Rain erosion of wind turbine blades and the effect of air bubbles in the coatings. *Wind Energy*. 2021; 24: 1071–1082. <https://doi.org/10.1002/we.2617>.
- Franklin, G., Harar,i H., Ahsan, S., Bello, D., Sterling, D.A., Nedrelow, J., Raynaud, S., Biswas, S., Liu, Y. Residual Isocyanates in Medical Devices and Products: A Qualitative and Quantitative Assessment. *Environ Health Insights*. 2016 Oct 13;10:175-190. doi: 10.4137/EHI.S39149. PMID: 27773989; PMCID: PMC5067089.
- Godfrey, M., Siederer, O., Zekonyte, J., Barbaros, I., Wood, R. The effect of temperature on the erosion of polyurethane coatings for wind turbine leading edge protection. *Wear*, Volume 476, 2021, 203720, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203720>.
- Guha, A., Barron, R.M., Balachandar, R. An experimental and numerical study of water jet cleaning process. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 211, Issue 4, 2011, Pages 610-618, ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.017>.
- Howard, G.T. Biodegradation of polyurethane: a revie. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 49, Issue 4, 2002, Pages 245-252, ISSN 0964-8305, [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(02\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00051-3).
- Kang, J.H. & Kondo, F. Bisphenol a degradation by bacteria isolated from river water. *Arch Environ Contam Toxicol*. 2002 Oct;43(3):265-9. doi: 10.1007/s00244-002-1209-0. PMID: 12202920.
- Karmouch, R., Coudé, S. & Abel, G., Ross, G. (2009). Icephobic PTFE coatings for wind turbines operating in cold climate conditions. *IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*. 1 - 6. 10.1109/EPEC.2009.5420897.
- Kjærside Storm, B. 12 - Surface protection and coatings for wind turbine rotor blades. Editor(s): Povl Brøndsted, Rogier P.L. Nijssen, In *Woodhead Publishing Series in Energy, Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*, Woodhead Publishing, 2013, Pages 387-412, ISBN 9780857094261, <https://doi.org/10.1533/9780857097286.3.387>.
- Klecka, G.M., Gonsior, S.J., West, R.J., Goodwin, P.A., Markham, D.A. Biodegradation of bisphenol A in aquatic environments: river die-away. *Environ Toxicol Chem*. 2001 Dec;20(12):2725-35. PMID: 11764155.

Law, H. & Koutsos, V. Leading edge erosion of wind turbines: Effect of solid airborne particles and rain on operational wind farms. *Wind Energy* 2020, 23, 1955–1965.

McGugan, M., Larsen, G.C., Sørensen, B.F., Borum, K.K., Engelhardt, J. Fundamentals for Remote Condition Monitoring of Offshore Wind Turbines. Forskningscenter Risoe, Danmarks Tekniske Universitet, Risø; Roskilde, Denmark: 2008. p. 48 Risoe-R; No. 1639EN.

Metsähallitus. Merituulivoiman ympäristövaikutukset.

<https://www.metsa.fi/vastuullinen-liiketoiminta/tuulivoima/merituulivoimassa-suuret-mahdollisuudet/merituulivoiman-ymparistovaikutukset/>. Viitattu 8.11.2023.

Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H.N., Beauson, J., McGugan, M., Sørensen, B.F. Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials (Basel)*. 2017 Nov 9;10(11):1285. doi: 10.3390/ma10111285.

Mishnaevsky, L., Hasager, C.B., Bak, C., Tilg, A-M., Bech, J.I., Rad, S.D., Fæster, S. Leading edge erosion of wind turbine blades: Understanding, prevention and protection. *Renewable Energy*, Volume 169, 2021, Pages 953-969, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.044>.

Mishnaevsky, L., Tempelis, A., Kuthe, N., Mahaja, P. Recent developments in the protection of wind turbine blades against leading edge erosion: Materials solutions and predictive modelling. *Renewable Energy*, Volume 215, 2023, 118966, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118966>

Mutsuga, M., Yamaguchi, M., Kawamura, Y. Quantification of isocyanates and amines in polyurethane foams and coated products by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Food Sci Nutr*. 2014 Mar;2(2):156-63. doi: 10.1002/fsn3.88. Epub 2014 Jan 23. PMID: 24804074; PMCID: PMC3959962.

Naturskyddsforeningen. Vanliga myter om vindkraft.

<https://www.naturskyddsforeningen.se/artiklar/vanliga-myter-om-vindkraft/>. Viitattu 8.11.2023.

OECD (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances and alternatives in coatings, paints and varnishes (CPVs) - Report on the commercial availability and current uses. OECD Series on Risk Management, No. 70, Environment, Health and Safety, Environment Directorate, OECD.

<https://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/per-and-polyfluoroalkyl-substances-alternatives-in-coatings-paints-varnishes.pdf>

Pugh, K., Stack, M.M. Rain Erosion Maps for Wind Turbines Based on Geographical Locations: A Case Study in Ireland and Britain. *J Bio Tribo Corros* 7, 34 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00472-0>

Qin, C., Mulrone, A.T., Gupta, M.C. Anti-icing epoxy resin surface modified by spray coating of PTFE Teflon particles for wind turbine blades. *Materials Today Communications*, Volume 22, 2020, 100770, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100770>.

Sakamoto, H., Shoji, S., Kaneko, H. (2007). Leaching characteristics of bisphenol A from epoxy-resin pavement materials. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 89. 191-203. 10.1080/02772240601010105.

Suomen Tuulivoimayhdistys. Tuulivoima ja mikromuovi.

<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietopankki/tuulivoima-ja-mikromuovi>. Viitattu 8.11.2023.



THL. Bisfenoli A. 2023.

<https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/bisfenoli-a>. Viitattu 8.11.2023.

THL. Mikromuovit. 2023.

<https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/mikromuovit>. Viitattu 28.12.2023

TTL. Isosyanaatit. 2023.

<https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvaluus/altistuminen-tyoympariston-haittatekijoille/kemiallisten-tekijoiden-hallinta-tyopaikalla/kemikaalit-ja-tyo-altistumistietosivusto/isosyanaatit>. Viitattu 8.11.2023.