



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Kriittiset materiaalit tuulivoimassa

Topias Itämies

Ympäristötekniikka

Kandidaatintyö

Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Kriittiset materiaalit tuulivoimassa

Topias Itämies

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 35 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Jenni Ylä-Mella TkT

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on ymmärtää kriittisten materiaalien tuomat haasteet tuulivoimalle. Työssä esitellään energiamurroksen taustat ja sen vaikutus tuulivoimaan. Lisäksi perehdytään tuulivoimaan liittyviin suurimpiin haasteisiin nyt ja tulevaisuudessa. Työssä pyritään esittämään erilaisia vaihtoehtoja nykyiselle tilanteelle kriittisten materiaalien tuoman epävarmuuden vähentämiseksi.

Harvinaisia maametalleja kuluttavat kestopagneetit ovat suuressa kasvussa ja niiden saanti on riippuvainen Kiinasta. Eurooppa haluaisi olla omavarainen maanosa. Tämä edellyttää korvaavan menetelmän kehittämistä harvinaisten maametallien syrjäyttämiseksi tai oman tuotannon perustamista. Euroopan riippuvuuden vähentäminen Kiinasta harvinaisten maametallien osalta onkin tärkeää. Toimivan kierrätysjärjestelmän sekä kestopagneettien valmistuksen kehittäminen vähentäisi Kiinasta tarvittavaa primäärimateriaalin tarvetta. Euroopassa on potentiaalisia paikkoja harvinaisten maametallien louhimiselle. Uuden teknologian kehittämiseen liittyvää kehitystyötä on paljon, mutta ne ovat vielä suhteellisen aikaisessa kehitysvaiheessa.

Asiasanat: Energiamurros, Uusiutuva energia, Tuulivoima, Kriittiset materiaalit,

ABSTRACT

Critical raw materials in wind energy

Topias Itämies

University of Oulu, Environmental Engineering

Bachelor's thesis 2021, 35 pp.

Supervisor(s) at the university: Jenni Ylä-Mella D.Sc. (Tech.)

The goal of this Bachelor's thesis is to understand the challenges of wind energy caused by critical raw materials. In this thesis the background and the effects of energy transition is introduced. In addition, a thorough look has been made in the greatest challenges in the wind industry now and in the future. This thesis look for alternatives for the present situation to minimize the uncertainty caused by critical raw materials.

Permanent magnets that consume REEs has been increasing in the last years. The supply of REEs is completely dependent on China. Europe has announced a goal to be self-sufficient continent. To be a self-sufficient continent Europe either must develop a substitute technology to replace REEs or establish its own production. It is important to decrease Europe's REE dependency on China. It is mandatory for Europe to develop a functioning recycling system and permanent magnet production to reduce the need of primary raw materials from China. In Europe there are potential areas for mining REEs. There is plenty ongoing research on developing new technologies but yet in an early stage of research.

Keywords: Energy transition, Renewable energy, Wind power, Critical raw materials

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	6
2 Energiamurros	7
2.1 Euroopan Unionin vähähiilisyys tavoitteet.....	8
2.2 Suomen vähähiiliset tiekartat ja pitkän aikavälin strategia	8
2.3 Materiaalitarve energiamurroksessa.....	11
2.3.1 Kriittisten materiaalien määritelmä.....	11
2.3.2 Kriittiset materiaalit Euroopassa.....	12
3 Tuulivoima Suomessa	15
3.1 Tuulivoimaloiden yleinen toimintaperiaate ja rakenne	16
3.2 Tuulivoiman yleiset generaattoryypit	17
3.2.1 Induktiogeneraattorit	18
3.2.2 Tahtigeneraattorit.....	19
3.2.3 Kestomagneettigeneraattorit	19
3.3 Tuulivoimassa käytetyt kriittiset materiaalit	20
3.3.1 Neodyymi	21
3.3.2 Praseodyymi	21
3.3.3 Dysprosium.....	22
3.3.4 Boori.....	22
3.3.5 Niobi.....	23
4 Tuulivoiman trendit ja rajoittavat tekijät.....	24
4.1 Kestomagneettien käyttökohteet muilla teollisuuden sektoreilla	24
4.2 Tuulivoimatuotannon trendit ja tulevaisuuden skenaariot	26
4.3 Vaihtoehtoja nykyiselle tilanteelle ja huomioitavia seikkoja	29
5 Yhteenveto.....	31
LÄHDELUETTELO.....	32

MERKINNÄT JA LYHENTEET

B	Boori
Dy	Dysprosium
Fe	Rauta
GW	Giga Watti
HREE	Raskaat harvinaiset maametallit (Heavy Rare Earth Elements)
HTS	High temperature superconductors
LREE	Kevyet harvinaiset maametallit (Light Rare Earth Elements)
MW	Mega Watti
Nd	Neodyymi
Pr	Praseodyymi
REE	Harvinaiset maametallit (Rare Earth Elements)
TWh	Tera Wattitunti
WEM	With existing measures

1 JOHDANTO

Työn aiheena on tuulivoimassa käytetyt kriittiset materiaalit, kriittisten niiden merkitys tuulivoimalle sekä kriittisten materiaalien aiheuttamat haasteet. Tällä hetkellä uusiutuvat energiamuodot ovat erittäin ajankohtaisia, siksi niihin liittyvien haasteiden ja rajoittavien tekijöiden ymmärtäminen on ensisijaisen tärkeää. Tässä opinnäytetyössä perehdytään tuulivoiman käyttöönoton lisäämisen kiireellisyyden taustalla oleviin ajaviin voimiin, tuulivoiman tämänhetkisiin trendeihin ja tulevaisuuden skenaarioihin, sekä tuulivoiman lisäämisen synnyttämiin haasteisiin. Tavoitteena työssä on ymmärtää kriittisten materiaalien kasvaneesta kysynnästä syntyvät haasteet ja esittää erilaisia vaihtoehtoja haasteiden minimoimiseksi.

Energiamurroksen ajaman valtavan perustavanlaatuisen muutoksen varmistamiseksi, on tiedostettava aiheeseen liittyvät epävarmuustekijät sekä haasteiden moniselitteisyys. Ymmärtämällä uusiutuvan energian kasvun syyt ja ajavat tekijät, sekä riittävällä käsityksellä kriittisistä materiaaleista, voidaan tehdä päätelmiä aiheeseen liittyvistä mittavista haasteista niiden ratkaisemiseksi. Erilaisten vaihtoehtojen tuntemisella ja uusien teknologioiden kehittämällä voidaan pienentää aiheeseen liittyvää epävarmuutta.

Työssä esitellään ensin energiamurros käsitteenä sekä sen taustat ja perehdytään energiamurrosta vauhdittaviin poliittisiin päätöksiin niin Euroopassa kuin Suomessakin. Lisäksi esitellään kriittinen materiaali käsitteenä sekä Euroopan unionin tämänhetkinen listaus kriittisistä materiaaleista. Seuraavassa kappaleessa on katsaus Suomen tuulivoimatilanteeseen sekä nykytuulivoimaloiden suosimiin teknologioihin. Teknologioihin liittyen esitellään myös tuulivoimassa käytetyt kriittiset materiaalit. Viimeisessä kappaleessa syvennytään tuulivoiman käyttöönottoon liittyviin trendeihin ja rajoittaviin tekijöihin, kilpailevien sektorien ja kriittisten materiaalien näkökulmasta.

2 ENERGIAMURROS

”Energiamurros on globaali ilmiö, joka viittaa energiantuotanto- ja kulutusjärjestelmien perustavanlaatuisen muutokseen, tyypillisesti uusien älykkäiden sähkötekniikoiden, energiavarastoinnin ja uusiutuvan energian ajamana.” (Kivimaa 2016). Energiamurroksessa pyritään kehittämään esimerkiksi energian toimitus- ja huoltovarmuutta, kysyntäjoustoa sekä metropolien lämmitystä ja liikenneratkaisuja. Pitkään esillä ollut ilmaston lämpeneminen ja siihen reagoiminen käynnisti energiamurroksen, joka tällä hetkellä on parhaillaan menossa. Energiamurroksen avulla pyritään saamaan hiilidioksidipäästöt ja ilmastonlämpeneminen kuriin. Fortumin (2020) mukaan hiilidioksidipäästöt voidaan jakaa neljään päätekijään, joita ovat väestönkasvu, talouskasvu, energiankulutus asukasta kohden sekä aiheutuneet päästöt tuotettua energiayksikköä kohden. Näistä kaksi viimeisintä koskee energiamurrosta. Haasteet tätä murrosta koskien aiheutuvat kasvavasta energiantarpeesta kahden ensimmäisen tekijän vuoksi. (Fortum 2020)

Siirtyminen hiilivapaisiin tuotantomuotoihin, ja lopulta hiilineutraaliuteen pyrkivä murros, aiheuttaa suuria muutoksia vanhoihin toimintatapoihin. Maailmanlaajuisesti energiamurros ajaa valtiot siirtymään kohti kestäviä ja älykkäitä energiamuotoja. Energiamurros avaa paljon mahdollisuuksia uusille ideoille ja liiketoimintamalleille vaatien vanhoja liiketoimintamalleja sopeutumaan ja uusiutumaan. Meneillään oleva murros etenee suurella vauhdilla, vaikuttaen monen eri alan yrityksiin ja toimijoihin. Energiamurros aiheuttaa valtavia rakenteellisia muutoksia energiantuotanto- ja kulutusjärjestelmiin (Kivimaa 2016).

Euroopan Unionissa ja siten myös Suomessa on asetettu tavoitteita vähähiilisyydestä ja kestävien energioiden käytön suosimisesta energiamurroksen edistämiseksi. Pariisin ilmastopimuksen ja Euroopan vihreän kehityksen ohjelman myötä EU on laatinut yleisiä linjauksia sen jäsenmailleen vuoteen 2030 ja 2050 mennessä hiilidioksidipäästöjen vähentämisestä (Euroopan komissio 2019). Suomessa tähän on vastattu varsin kunnianhimoisesti tavoitteena olla hiilineutraali jo vuoteen 2035 mennessä ja pian tämän jälkeen olla hiileneutraali. Pohjoismaissa käytetään jo entuudestaan enemmän uusiutuvaa energiaa kuin valtaosassa Euroopan maissa. (Työ- ja elinkeino ministeriö 2020)

2.1 Euroopan Unionin vähähiilisyys tavoitteet

Pariisissa 12. joulukuuta 2015 järjestetyssä YK:n kokouksessa sovittiin maailmanlaajuisesta ja oikeudellisesti sitovasta Pariisin ilmastopimuksesta. Pariisin ilmastopimus on astunut voimaan 2020. ”Pariisin ilmastopimuksen tavoitteena on pitää maapallon keskilämpötilan nousu selvästi alle kahdessa asteessa suhteessa esiteolliseen aikaan ja pyrkiä toimiin, joilla lämpeneminen saataisiin rajattua alle 1,5 asteen.” (Ympäristöministeriö 2021a). Pariisin sopimuksessa asetettiin myös pitkän aikavälin tavoitteet, jonka mukaan vuoteen 2050 mennessä ihmisten aiheuttamat päästöt ja nielut tulisivat olla tasapainossa. Kaikilta sopimuksen osapuolilta vaaditaan kunnianhimoisia ja kiristyviä toimenpiteitä tavoitteiden saavuttamiseksi. (Ympäristöministeriö 2021a)

Pariisin ilmastopimuksen toimien mukaisesti EU on laatinut Euroopan vihreän kehityksen ohjelman, jonka keskeisenä tavoitteena on saavuttaa ilmastoneutraalius vuoteen 2050 mennessä. Ilmastoneutraalius on talous, jossa kasvihuonekaasujen nettopäästöt ovat nolla. Tähän ilmastoneutraalisuuteen siirtymiseen tarvitaan suuria muutoksia muun muassa energia-alalla, teollisuudessa, liikkuvuudessa, rakennusallalla sekä maa- ja metsäteollisuudessa. Ilmastoneutraaliuden saavuttamisen takaamiseksi EU on vaatinut sen jäsenmailtaan laadittavan kansallisen pitkän aikavälin strategiansa kasvihuonekaasujen vähentämiseksi. Pitkän aikavälin strategiassa tulee kertoa, miten kyseinen valtio aikoo vähentää päästöjään EU:n tavoitteiden saavuttamiseksi. (Euroopan komissio 2021) EU:n välitavoite vuoteen 2030 mennessä olisi vähentää päästöjä vähintään 55% vuoden 1990 tasosta (Ympäristöministeriö 2021b).

2.2 Suomen vähähiiliset tiekartat ja pitkän aikavälin strategia

Suomi EU:n jäsenmaana on laatinut kansallisen pitkän aikavälin strategiansa sekä asettanut tavoittelevansa hiilineutraaliutta jo vuoteen 2035 mennessä. Tämän jälkeisestä ajasta vuoteen 2050 ei ole asetettu tavoitteita hiilinegatiivisuuden prosentuaalisista määristä. ”Hallituksen 2035 hiilineutraaliustavoite perustuu kansallisen ilmastopaneelin arvioon siitä, mitä Pariisin sopimuksen 1,5 °C velvoite tarkoittaa Suomen osalta.” (Työ- ja elinkeinoministeriö 2020) Suomen tavoitetta pidetään erityisen kunnianhimoisena ja haastavana, mutta tutkijoiden mukaan mahdollisena. Tämä vaatii kuitenkin jokaisella toimialalla päästövähennyksiä päästöjen suurusluokasta riippumatta. Energiamurros on

tärkeässä roolissa hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi ja siksi sen vauhdittaminen on olennaista. Tärkeää on myös varmistaa kohtuuhintainen ja toimitusvarma sähkö, joka on edellytyksenä energiamurrokselle (Paloneva ja Takamäki 2020).

Suomen kansallisen pitkän aikavälin strategian taustalla on kolme eri skenaariota, joiden lähtökohdana toimii hallituksen hiilineutraalius 2035 tavoitteen saavuttaminen ja ne on laadittu vuoteen 2050 saakka. Vaihtoehtoiset vähäpäästöskenaariot ovat säästö -skenaario ja jatkuva kasvu -skenaario lisäksi vertailuskenaariona on with existing measures (WEM) -skenaario. WEM-skenaario perustuu nykyisten toimien mukaiseen kehitykseen ja noudattaa vuoden 2016 kansallisen energia- ja ilmastostrategian sekä vuoden 2017 keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman standardeja vuoteen 2030 saakka. Vuosien 2030-2050 välinen kehitys on ekstrapoloitu. Säästö -skenaariossa vähäpäästötavoitteen saavuttamisessa keskeisinä tekijöinä toimivat kiertotalous, jakamistalous ja energiatehokkuuden paraneminen. Jatkuva kasvu -skenaariossa tavoitteiden saavuttamiseksi tukeudutaan uuden teknologian kiihdytettyyn käyttöönottoon. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2020)

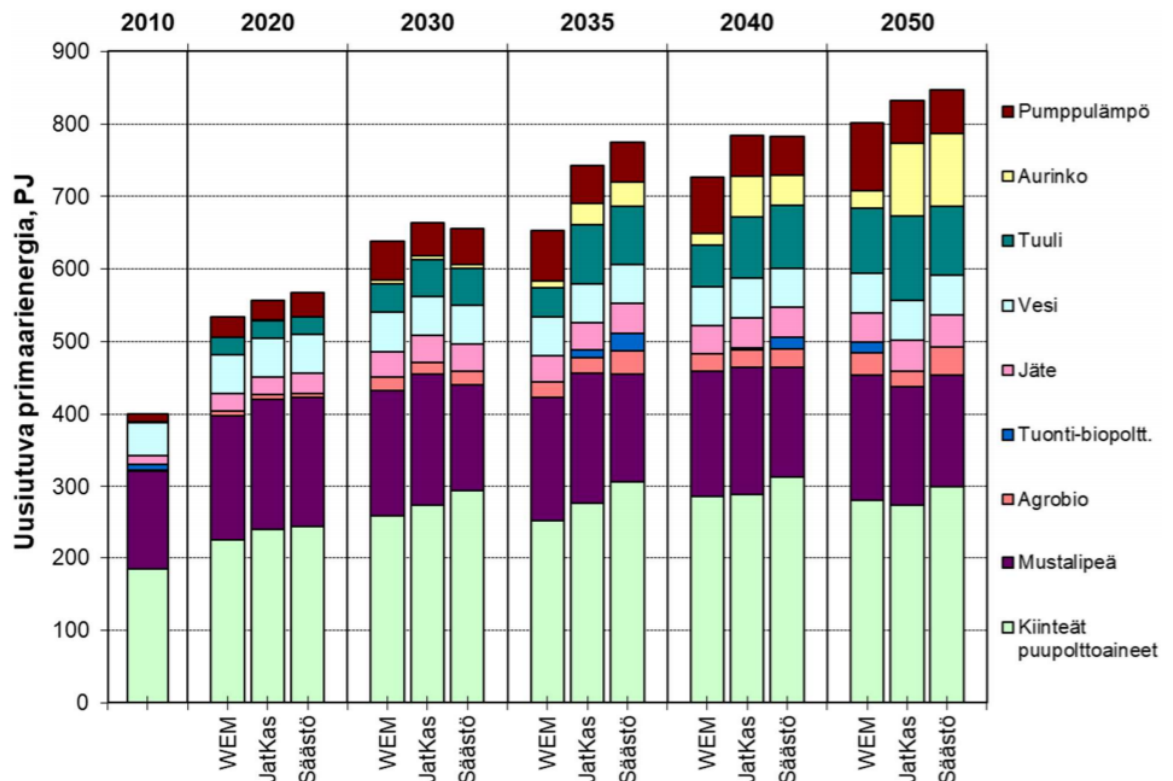
Alla on esitetty työ- ja elinkeinoministeriön asettamia energia- ja ilmastopoliittisia tavoitteita vähäpäästöskenaarioille vuodelle 2030 (Työ- ja elinkeinoministeriö 2020):

- Taakanjakosektorin kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoite 39 % vuoden 2005 päästötasoon verrattuna.
- Kivihiilen energiakäytöstä luopuminen viimeistään vuonna 2029.
- Turpeen käytön vähintään puolittaminen vuoteen 2030 mennessä.
- Biopolttoaineiden osuus tieliikenteen energiankulutuksesta vuonna 2020 13,5 %:n energiasisältöosuudesta ja 30 % vuonna 2030 (kasvaa lineaarisesti). 10 %:n bionesteen sekoitusvelvoite rakennusten erillislämmityksessä käytettävälle kevyelle polttoöljylle ja työkonien dieselöljylle, joka kasvaa lineaarisesti vuosina 2020–2030.
- Sähkökäyttöisten autojen määrä on vähintään 250 000 (täyssähköautot, vetyautot, ladattavat hybridit) ja vastaavasti kaasukäyttöisten autojen määrä on vähintään 50 000 vuonna 2030.

- 38 %:n uusiutuvan energian vähimmäisosuus energian loppukulutuksesta vuonna 2020 ja vastaavasti 50 %:n uusiutuvan energian vähimmäistavoite vuonna 2030.

- 55 %:n energian hankinnan omavaraisuustavoite vuonna 2030 ja tuonti öljyn energiankäytön puolittaminen.

Kuten työ- ja elinkeinoministeriön vuoden 2030 tavoitteistakin nähdään, on selvää, että uusiutuvan energian käyttöönoton lisääminen on tärkeässä asemassa hiilineutraaliuden tavoittelemisessa. Kivihiilestä luopuminen ja turpeen käytön vähentäminen vaatii muiden energiantuotantomuotojen lisäämistä. Kuvassa 1 on esitetty energiankulutuksen arvioitu kehitys tulevaisuudessa.



Kuva 1. Uusiutuvan primäärienergian mallinnettu kulutus skenaarioittain. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2020)

Suomen pitkän aikavälin strategioiden vähäpäästöskenaarioissa tuulivoimatuotanto tulee kasvamaan etenkin vuoteen 2035. Myöhemmissä vaiheissa 2040-2050 välisenä aikana myös aurinkoenergiatuotannon odotetaan kasvavan korvatakseen käytöstä poistuvien tuulivoimaloiden takia (Työ- ja elinkeinoministeriö 2020). Uusiutuviin energiamuotoihin

kuulumatonta päästötöntä ydinenergiaa tullaan myös lisäämään kasvavan energiatarpeen tyydyttämiseksi (Paloneva ja Takamäki 2020).

2.3 Materiaalitarve energiamurroksessa

Energiamurroksen edellyttämä perustavanlaatuinen muutos energiantuotanto- ja kulutusjärjestelmissä aiheuttaa tiettyjen materiaalien kasvavaa tarvetta. Uusiutuvan energian, sähköautojen sekä älykkäiden sähkötekniikoiden yleistyminen ja kasvu aiheuttaa tietyille materiaaleille erittäin suurta kysyntää. Tämä ja materiaalien niukkuus synnyttää tilanteen, jossa kysyntä ja tarjonta ei ole tasapainossa. Vaikka nykyään materiaalien kierrätys toimii melko suuressa mittakaavassa, kaikkia materiaaleja ei voida kierrättää erinäisistä syistä ja se tekee tilanteesta haastavan.

2.3.1 Kriittisten materiaalien määritelmä

Materiaalien kysynnän ja tarjonnan välille syntyneen epätasapainon seurauksena EU on laatinut kriittisten materiaalien listauksen. Se on ensimmäisen kerran laadittu 2010 ja tämän jälkeen päivitetty muutaman vuoden välein. Kriittisyyden määrittämisen kaksi keskeisintä tekijää ovat kyseisen materiaalin merkitys taloudelle tai jollekin talouden osasektorille sekä materiaalin saatavuusriski. Kun tarkastellaan yhtä talouden sektoria, keskeiseksi nousee materiaalin kanssa kilpailevat muut käyttökohteet. Esimerkiksi kriittisiä materiaaleja kuluttavia kestopagneetteja käytetään myös sähköautoissa. Kriittinen materiaali voi siis merkittävä vain yhdelle talouden sektorille tai usealle erille. Kriittisyyteen vaikuttaa myös materiaalin korvattavuus eli voidaanko kriittisen luokituksen saanutta materiaalia korvata jollain toisella materiaalilla. Uuden teknologian myötä voidaan korvata jokin kriittinen materiaali aiheuttaen aiemmin kriittisen luokituksen saaneen materiaalin poistumista kriittisten materiaalien joukosta. Materiaalin kierrätysaste ja sen kehittäminen on myös yksi osatekijä kriittisyydelle. (Euroopan komissio 2017)

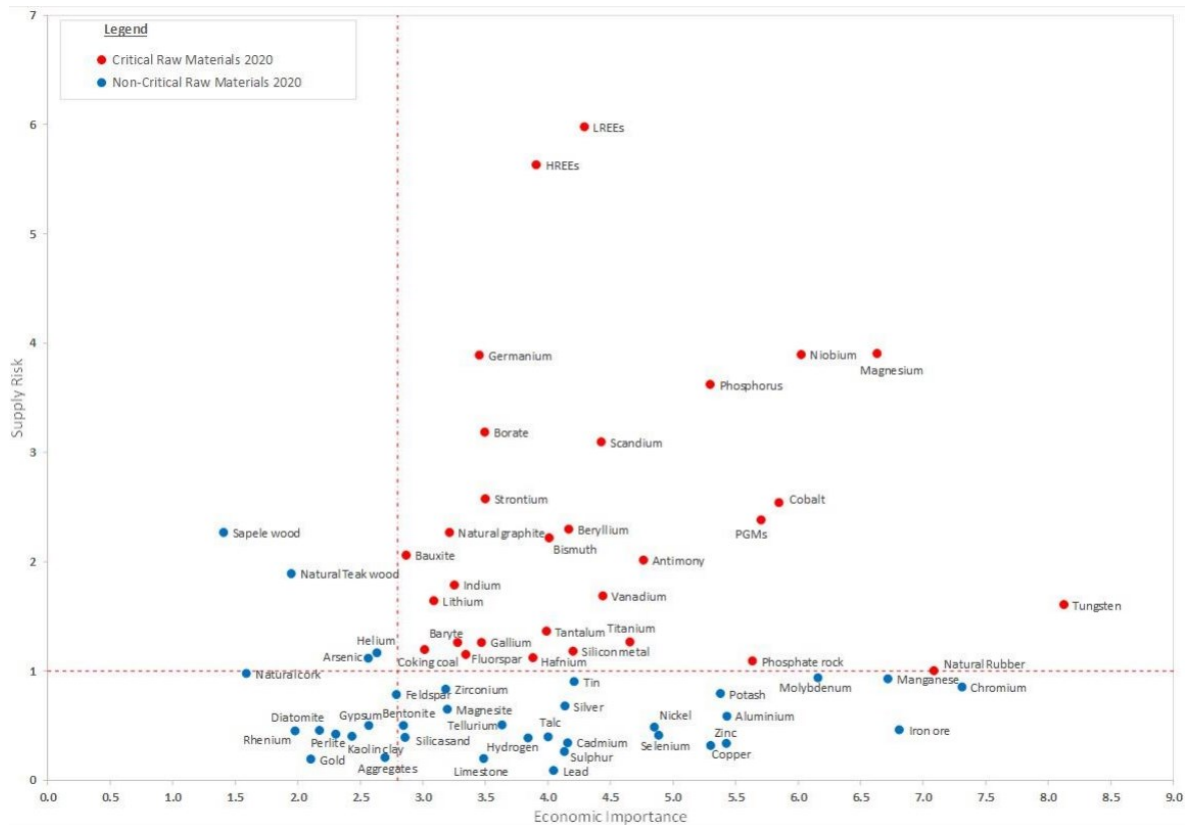
Materiaalin saatavuusriskin arvioiminen on toinen oleellinen tekijä kriittisyyden arvioimisessa. Mineraalivara- ja varantoarvioinnissa esitetään kaikki tunnetut geologiset esiintymät, jotka suhteutetaan vuotuisen kulutuksen kanssa, saadakseen ensimmäisen arvion materiaalin kriittisyydestä. Saatavuusriskiä nostattaa yhteistuotanto muiden materiaalien kanssa tai materiaalin ollessa toisen materiaalin louhinnan sivutuote. Näissä tapauksissa materiaalin tuotantoon vaikuttaa kaivoksen pääasiallisen mineraalin

markkinanäkymät, huolimatta sivutuotteen kasvavasta kysynnästä. Geologinen saatavuus ei ole ainoa vaikuttava asia saatavuuteen vaan lisäksi myös tuotantomaiden poliittisella ja taloudellisella vakaudella on suuri merkitys. Saatavuusriskiä kasvattaa myös materiaalien tuotannon keskittyminen maailmanlaajuisesti vain muutamaa maahan. Esimerkiksi tuulivoimassa käytettyjen kriittisten materiaalien suurimmat esiintymät ovat lähes poikkeuksetta kaikki Kiinassa. Kiristynvä ympäristölainsäädäntö voi pahimmassa tapauksessa estää kaivostoimintaa, jolloin materiaalin saatavuus huononee sen kaivostoiminnan lopettamisen seurauksesta. (Euroopan komissio 2017)

Materiaalia kierrättämällä voidaan vähentää neitseellisen raaka-aineen riippuvuutta, mutta kriittisillä materiaaleilla on usein lukuisia rajoittavia tekijöitä mitä kierrättämiseen tulee. Materiaalin kallis hintakaan ei välttämättä tuo riittävää kannustinta kierrätykselle, myös puutteellinen kierrätysinfrastruktuuri tai -teknologia voi olla esteenä kierrättämiselle. Materiaalien fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet sekä pienet pitoisuudet kierrätettävissä lopputuotteissa voivat tehdä kierrätyksestä vaikeaa ja taloudellisesti kannattamatonta. Materiaalin kriittisyyteen vaikuttaa myös aikaväli, jolla tarkastelemme tilannetta. Materiaalia voidaan tarkastella lyhyellä, keskipitkällä tai pitkällä aikavälillä. (Euroopan komissio 2017)

2.3.2 Kriittiset materiaalit Euroopassa

Kriittisille materiaaleille on olemassa kriittisyysasteikko, jolla voidaan arvioida ylittääkö materiaali kriittisyyden vaatimukset sekä kuinka kriittinen kukin materiaali on. Kriittisyysasteikolla vaaka-akselilla on taloudellinen merkitys ja pystyakselilla on saatavuusriski. Näille molemmille akseleille on omat raja-arvonsa kriittisyyden ylittymiselle, kun materiaali ylittää molempien akselien raja-arvot, luokitellaan se kriittiseksi. Kuvassa 2 on esitetty materiaalit kriittisyysasteikolla.



kuva 2. Vuoden 2020 kriittisten materiaalien sijainnit kriittisyysasteikolla (Blengini et al. 2020)

Voidaan havaita kevyiden ja painavien harvinaisten maametallien saatavuusriski on ylivoimaisesti suurempi kuin muilla kriittisillä materiaaleilla. Lisäksi niiden taloudellinen merkitys on helposti keskitasoa muiden materiaalien joukossa. Harvinaiset maametallit ovat erityisen tärkeitä kestopäätteiden raaka-aineita, joita tuulivoimassakin käytetään. Tämän kriittisyysasteikon avulla on koottu vuoden 2020 kriittiset materiaalit, jotka ovat esitetty taulukossa 1. Taulukkoon 1 on koottu 30 materiaalia, joista osa käsittää useamman kuin yhden materiaalin esim, HREEs ja LREEs.

 2020 Critical Raw Materials (30)

Antimony	Fluorspar	Magnesium	Scandium
Baryte	Gallium	Natural Graphite	Silicon Metal
Bauxite	Germanium	Natural Rubber	Tantalum
Beryllium	Hafnium	Niobium	Titanium
Bismuth	HREEs	PGMs	Vanadium
Borates	Lithium	Phosphate rock	Tungsten
Cobalt	LREEs	Phosphorus	Strontium
Coking Coal			

Taulukko 1. Vuoden 2020 kriittiset materiaalit Euroopassa (Blengini et al. 2020).

3 TUULIVOIMA SUOMESSA

Tuulivoiman käyttö Suomessa energiantuotantomuotona alkoi huomattavasti monia Euroopan maita myöhemmin, mutta sen käyttö kasvanut nopeasti ja kasvun ennustetaan myös jatkuvan tulevaisuudessa (Tuulivoimayhdistys 2021a). Suomessa uusiutuvan energian potentiaali biotuotteiden ja vesivoiman suhteen on melko hyvin käytössä. Tämän takia juurikin tuulivoima on Suomessa tärkeä tulevaisuudessa, koska tälle energiamuodolle on valjastamatonta potentiaalia. Suomessa on paljon matalahkoja vesiä, jotka ovat merituulivoimaa ajatellen otollisia sijainteja (Tuulivoimayhdistys 2021b). Vaikkakin tällä hetkellä lähes kaikki suunnitteilla ja rakenteilla olevat tuulivoimahankkeet ovat maatuulivoimaloita, tulee merituulivoiman lisääminen olemaan tärkeää tulevaisuudessa.

Suomessa on tällä hetkellä 821 tuulivoimalaa, joista 67 rakennettiin vuonna 2020. Vuoden 2020 lopussa Suomen tuulivoimakapasiteetti oli 2 586 megawattia, joka kasvoi 302 megawattilla viime vuoden aikana. Suomen tuulivoima tuottivat vuonna 2020 noin 10% kaikesta Suomen sähkönkulutuksesta eli tuotanto oli noin 7.8 TWh. Tämä tarkoittaa sitä, että tuulivoimaloiden tuottama sähkön määrä kasvoi edelliseen vuoteen verrattuna 32%. Suomessa on tällä hetkellä 240 maatuulivoimala sekä 9 merituulivoimala projektia meneillään, niiden yhteen laskettu kapasiteetti on noin 21 300 MW. (Tuulivoimayhdistys 2020) Suunnitteluprosessin eri vaiheissa olevien tuulivoimalahankkeiden määrä on suurempi edellisvuoteen verrattuna, lisäksi noin 30% hankkeista on rakennusvalmiita tai parhaillaan rakentumassa. Suomen tuulivoimayhdistyksen mukaan Suomen tuulivoimatuotannon odotetaan kaksinkertaistuvan vuoteen 2024 mennessä. Mikäli kaikki Suomessa meneillään olevat tuulivoimahankkeet toteutuisivat, Suomi tulisi 8-kertaistamaan tämänhetkisen tuulivoimakapasiteettinsä. Suomen Tuulivoimayhdistyksen toimitusjohtajan Anni Mikkosen mukaan tilannetta, jossa kaikki hankkeet toteutuisivat ei koskaan tapahdu, mutta tämä osoittaa Suomen suuren potentiaalin tuulivoimassa. (Tuulivoimayhdistys 2021c)

Suomen Tuulivoimayhdistys arvioi, että Suomella on potentiaalia vähintään 30 TWh vuotuisen tuulivoimatuotantoon vuoteen 2030 mennessä, kunhan tuulivoimarakentaminen etenee esteettä kuten tähänkin asti. Joidenkin arvioiden mukaan Suomessa voisi olla 60 TWh vuotuisen tuulivoimatuotantoon vuoteen 2040. Tavoitteen saavuttamiseksi Suomen pitäisi lisätä myös merituulivoima-hankkeiden määrää. Myös Euroopan Unionin strategian mukaan Euroopassa on lisättävä merituulivoimaa. EU on asettanut kunnianhimoisen tavoitteen merituulivoimakapasiteetin nostamista nykyisestä 12 GW:sta 300 GW:iin. Merituulivoiman tuotantokustannukset ovat huomattavasti korkeammat kuin maatuulivoimalla, mutta ne ovat laskeneet viime vuosina. Suomella onkin huomattava potentiaali merituulivoiman lisäämiseen. (Tuulivoimayhdistys 2021d)

Merituulivoiman lisääminen varsinkin tulevaisuudessa ja tämänhetkiset maatuulivoimahankkeet aiheuttavat kasvavaa kysyntää kriittisille materiaaleille myös Suomessa. Globaalilla tasolla maa- ja merituulivoimaloiden vuosittaisesta asennettujen tuulivoimaloiden osuudesta voidaan olettaa myös Suomessa kestoplaneettatransformaation suosion kasvua. Myös tilastojen mukaan lähes kaikki viime vuosina asennetuista merituulivoimaloista on kestoplaneettatransformaation generaattoreilla toimivia.

3.1 Tuulivoimaloiden yleinen toimintaperiaate ja rakenne

Suurin osa tuulivoimaloista nykyään on vaaka-akselisia ja kolmilapaisia sekä niiden roottorit ovat tuulen mukaan kääntyviä, jolloin ne eivät ole riippuvaisia tuulen suunnasta. Tuulen liike-energia saa tuuliturbiinin siivet pyörimään synnyttäen pyörimisliikkeen, josta aiheutunut pyörimisenergia voidaan muuttaa sähköksi. Generaattori on turbiinin se komponentti, joka muuttaa mekaanisen energian sähköiseksi energiaksi. Generaattorin synnyttämä sähkö johdetaan muuntajaan ja siitä eteenpäin aina sähköverkkoon asti. (Tuulivoimayhdistys 2021e)

Tuulivoimala voidaan jakaa roottoriin, konehuoneeseen eli naselliin, torniin ja perustukseen. Napa ja lavat muodostavat roottorin, jonka lavat valmistetaan tyypillisimmin komposiittimateriaaleista. konehuone koostuu taas useammasta komponentista, joita ovat vaihteisto, generaattori, muuntaja sekä säätö- ja ohjausjärjestelmät. Muuntaja ja ohjauskeskukset voivat sijaita myös tornin alaosassa nasellin kokonaispainon vähentämiseksi. Konehuoneen runko on yleensä terästä ja sitä ympäröivä kuori on lasikuitua. (Tuulivoimayhdistys 2021e)

Tuuliturbiineista suunnitellaan entistä tehokkaampia, sähkötuotannon, luotettavuuden, käytettävyyden, huoltamisen, hinnan sekä kuljetuksen suhteen. Modernit tuulivoimalat sisältävät paljon erilaisia tarkkaan säädettyjä komponentteja halvimman mahdollisen sähkön hinnan tuottamiseksi. Generaattori on esimerkiksi tällainen komponentti ja sitä voidaan pitää oleellisimpana kriittisten materiaalien näkökulmasta. (Euroopan Komissio 2020a) Tuulivoimaloissa käytettäviä generaattoreja on erilaisia, joista osa on laajemmassa käytössä niiden parempien ominaisuuksien ja soveltuvuutensa vuoksi. Generaattorien tärkeitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi hyötysuhde, luotettavuus sekä voimansiirto, lisäksi generaattorin hinta on tärkeä sen valintaan vaikuttava tekijä. Induktiogeneraattorit ovat olleet jo pitkään suosituimpia generaattoreja halvan hintansa ja yksinkertaisen rakenteensa vuoksi.

3.2 Tuulivoiman yleiset generaattorityypit

Perinteisesti generaattorit voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin, joita ovat tasavirtageneraattori, vaihtovirta tahtigeneraattori eli synkronigeneraattori sekä vaihtovirta epätahtigeneraattori yleisimmin induktiogeneraattori. Periaatteen tasolla kaikkia näitä generaattorityyppejä voidaan käyttää vakio- sekä muuttuvanopeuksisissa tuulivoimaloissa. (Euroopan Komissio 2020a) Tässä työssä olennaista on kuitenkin tarkastella generaattoreja kriittisten materiaalien näkökulmasta ja keskittyä kestopagneettia käyttäviin generaattoreihin sekä kilpaileviin tekniikoihin, joten tasavirtageneraattorit sivuutetaan tämän työn osalta. Asennettujen tuulivoimaloiden nykyinen ja tulevaisuuden trendi on tärkeässä roolissa, sillä sen avulla voidaan arvioida kriittisten materiaalien tarvetta nyt ja tulevaisuudessa.

Sopivan generaattorin valinta riippuu useista tekijöistä, kuten sijainnista eli tuleeko tuulivoimala maalle vai merelle, tunturille vai tasaiselle maalle, onko kannattavampaa valita hidas vai korkeanopeuksinen tuulivoimala, sekä paljon muita huomioitavia tekijöitä. Tästä johtuen generaattorityyppejä on käytössä erilaisia niiden erilaisten soveltuvuutensa vuoksi. Yleisesti käytössä olevat generaattorit voidaan jakaa kuuteen luokkaan niiden voimansiirtomekanismien avulla. Näihin lukeutuu erilaisia induktiogeneraattoreja sekä tahtigeneraattoreja, joihin kestopagneettigeneraattorit luokitellaan. Näitä generaattoreja on vaihteellisina, hybrideinä sekä vaihteettomina. Taulukossa 2 on esitetty yleisesti tuulivoimassa käytössä olevat generaattorityypit.

Type	Configuration	Gearbox/ Gearless	Category
A	High-speed – Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)	Gearbox	Geared high-speed WT
B	High-speed Wounded Rotor Induction Generator (WRIG)	Gearbox	
C	High-speed Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)	Gearbox	
D-EE	Low-speed Electrically Excited Synchronous Generator (EESG) with full power converter	Gearless (Direct Drive)	Direct drive WT
D-PM	Low-speed Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) with full power converter	Gearless (Direct Drive)	
E-EE	Medium/High-speed Electrically Excited Synchronous Generator (EESG) with full power converter	Gearbox	Hybrid drive trains
E-PM	Medium/High-speed Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) with full power converter	Gearbox	
F	High-speed – Squirrel Cage Induction Generator (SCIG) with full power converter	Gearbox	

Taulukko 2. Generaattorit luokiteltuna voimansiirtomekanismien mukaan (Telsnig 2020).

3.2.1 Induktiogeneraattorit

Induktiogeneraattori eli oikosulkugeneraattori on epätahtikone ja se on toistaiseksi eniten käytössä oleva generaattorityyppi kaikista turbiineista. Induktiogeneraattorit toimivat ainoastaan vaihtovirralla ja ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, kestäviä sekä helppohuoltoisia. Niitä valmistetaan suurissa erissä, mikä mahdollistaa myös niiden edullisen hinnan. Koska induktiogeneraattorit eivät sisällä kestopagneetteja eivätkä ole ulkoisesti magnetoituja, kuluttavat ne sähkövirtaa synnyttääkseen magneettikentän. Tarvittava virta voidaan ottaa sähköverkosta tai tehoelektroniikan avulla. Tuottaakseen energiaa roottorin pyörimisnopeus täytyy olla suurempi kuin tyhjäkäyntinopeus. (Hansen 2017)

Epätahtigeneraattorissa sähkökenttä indusoituu roottorin ja pyörivän staattorin välille roottorin jättämän seurauksena, joka aiheuttaa sähkövirran käämiin. Koska roottori ja staattori pyörivät eritahdissa, kutsutaan sitä epätahtigeneraattoriksi. Epätahtigeneraattorin jättämän takia se tarjoaa turbiinille edullisia mekaanisia ominaisuuksia, esimerkiksi

vääntömomentin muutokset eivät kuluta vaihteistoa yhtä paljon. Vakionopeutta voidaan säätää lapojen sekä magneetoinnin avulla. (Hansen 2017)

3.2.2 Tahtigeneraattorit

Tahtigeneraattoreja on kahdenlaisia, kestopagneetilla toimivia sekä sähkömagneetilla toimivia generaattoreja. Molemmat tahtigeneraattorin sovellukset ovat aktiivisesti edelleen käytössä, joista kuitenkin kestopagneetilla toimivat ovat suuressa kasvussa. Kestomagneettigeneraattoreilla niiden suurimmat haasteet ovat magneetissa käytettävät kriittiset materiaalit. Magneetikäämillä toimivien generaattorien käytön haasteet syntyvät niiden monimutkaisesta mekaanisesta rakenteesta, joka on paljon vikaantumisherkempi kestopagneettisovelluksiin verrattuna. Tahtikoneet eivät kuitenkaan tarvitse samanlaista magneetoivaa virtaa toimiakseen toisin kuin induktiogeneraattorit tarvitsevat. (Hansen 2017)

Tahtigeneraattorit toimivat verkon taajuuden määräämällä nopeudella, huolimatta vääntömomentin suuruudesta. Tahtimoottoreissa roottori pyörii magneetikäämin synnyttämän magneetikentän kanssa samaa vauhtia. Tahtikoneiden staattorilla on yleensä samankaltainen magnetointipiiri kuin induktiogeneraattoreilla. Kaksi yleisintä vaihtoehtoa roottorin magneetoimiseksi, voidaan tehdä kestopagneettien avulla tai tasavirralla synnytetyn magneetoinnin erillisen piirin avulla. (Chen 2011)

3.2.3 Kestomagneettigeneraattorit

Kestomagneettigeneraattorit ovat yleensä tahtigeneraattoreja, joissa roottorikäämitys on korvattu kestopagneeteilla, jotka magneetoivat generaattorin. Kestomagneettigeneraattoreja voidaan kuitenkin myös käyttää epätahtikoneina. Toimintaperiaate on muuten samankaltainen perinteisten tahtigeneraattorien kanssa, mutta erillistä magnetointipiiriä ei tarvita, minkä seurauksena hyötysuhde paranee. Kestomagneettigeneraattorin magnetointipiiriä ei voida säätää, ja siksi magnetointi on vakio. Magneetikäämin jättäminen pois vähentää voimahäviötä, mutta se tekee magnetointipiirin säädöstä mahdollottoman. Lisäksi tuuliturbiinin koon kasvaessa hinta voi kasvaa suureksi. Koska tuuliolosuhteet vaihtelevat, kestopagneettigeneraattorit tarvitsevat taajuusmuuntajan toimiakseen määrättyssä nopeudessa. (Cao et al. 2012)

Kestomagneettigeneraattorien hyviin puoliin lukeutuu hyvän hyötysuhteen lisäksi niiden kevyt rakenne, helppo kuljetus, simppele rakenne sekä niiden luotettavuus. Tämä johtuu siitä, että kestopagneettia hyödyntämällä voidaan korvata muita komponentteja. Kestomagneettigeneraattorit tarjoavat erittäin hyvän vaihtoehdon vaihteettomiin generaattoreihin, sekä hybridigeneraattoreihin. Vaihteettomana generaattorina välttyään ongelmallisista vaihdelaatikoista, jotka aiheuttavat suurimman osan turbiinien vioista. (Hansen 2017)

Kestomagneettigeneraattorien käyttö on yleistynyt suurella vauhdilla viime vuosina sen laajan soveltuvuuden ja hyvän hyötysuhteen ansiosta. Kestomagneettigeneraattorien ominaisuuksien kehitys kuten alhainen vikaantumisen on johtanut sen kasvavaan suosioon. Niiden potentiaali merelle asennetuista turbiineista on suuri ja merelle pyritään lisäämään huomattavasti uusia voimaloita tulevien vuosien aikana. Kestomagneettien suosion kasvu on johtanut harvinaisten maametallien kysynnän kasvuun, mikä on nostanut niiden kriittisyyttä ennestään. Kestomagneettigeneraattoreissa käytetään yleensä NdFeB-magneetteja, jotka sisältävät muun muassa kriittiseksi materiaaliksi luokiteltavaa Neodyymia.

3.3 Tuulivoimassa käytetyt kriittiset materiaalit

Nyt kun kestopagneettigeneraattorien rakenne ja toimintaperiaate on esitelty yleisellä tasolla, voidaan keskittyä kestopagneeteissa käytettyihin kriittisiin materiaaleihin. NdFeB-kestopagneetti koostuu nimensä mukaisesti neodyymista, raudasta ja boorista. Lisäksi magneeteissa käytetään myös dysprosiumia sekä praseodyymia. Näistä materiaaleista rautaa lukuun ottamatta kaikki ovat kriittisiä materiaaleja. Muissa generaattorityypeissä ei näitä kyseisiä materiaaleja tarvita. Yleisesti käytössä kaikissa tuulivoimaloissa generaattorityypistä riippumatta, ainoana merkittävänä kriittisenä materiaalina on Niobium, jota käytetään turbiinin tornirakenteessa. Merkittävimmät tuulivoimaloissa käytettävät kriittiset materiaalit ovat harvinaisia maametalleja, niobia ja booria lukuun ottamatta.

Harvinaiset maametallit ovat ryhmä samankaltaisia metallisia alkuaineita, joihin kuuluu 17 metallia. Harvinaiset maametallit koostuvat 15 lantanidista, yttriumista ja scandiumista. Metallisina aineina ryhmän jäsenet ovat kiiltäviä, pehmeitä, taipuisia sekä reaktiivisia. Harvinaisilla maametalleilla on paljon erityisominaisuuksia, joita ovat muun

muassa magneettisuus, valon heijastuvuus ja kestävyys. (King 2013) Harvinaiset maametallit jaetaan kahteen ryhmään, kevyihin ja painaviin maametalleihin. Harvinaiset maametallit, kuuluvat EU:n kriittisten materiaalien listalle. Niiden merkitys raaka-aineena on tärkeä useille eri korkean teknologian aloille, esimerkiksi uusiutuvalla energialla ja puolustusjärjestelmille. (Euroopan Komissio 2020a)

3.3.1 Neodyymi

Neodyymi on hopeanvalkoinen nopeasti hapettuva lantanidi ja se kuuluu kevyisiin harvinaisiin maametalleihin. Neodyymi on huoneenlämmössä paramagneettinen, josta jäädyttämällä siitä tulee antiferromagneettinen. Neodyymi magneettien valmistamiseen tarvitaan seoksena rautaa, joka on ferromagneetti. (Royal Society of Chemistry 2021a). Neodyymin suurin käyttökohde on magneetit, mutta sillä on myös useita muita käyttökohteita. Näitä ovat esimerkiksi patterit, keramiikka, lasi, katalyytti sekä laser valo. Tuulivoimassa neodyymiä käytetään siis kestopagneetteihin, joissa se on erittäin olennaisena osana. (Blengini et al. 2020) Neodyymin laajan soveltuvuuden ja merkittävyyden takia sen kysyntä on kasvanut viime vuosina.

Neodyymiä esiintyy luonnossa erilaisina isotooppeina ja sitä sisältäviä mineraaleja ovat esimerkiksi monatsiitti ja synkysiitti (Royal Society of Chemistry 2021a). Kiinalla on miltein monopoli neodyymin suhteen, sillä valtaosa neodyymiesiintymistä on Kiinassa. EU:n raportin mukaan 99% kaikesta toimitetusta neodyymistä tulee Kiinasta (Euroopan Komissio 2020a). Kiina ei myöskään ole halukas viemään ulkomaille matalasti jalostettua neodyymiä. Suuren saatavuusriskin takia neodyymi on luokiteltu kriittiseksi materiaaliksi, lisäksi sen merkitys taloudelle on tärkeä. Neodyymi onkin luokiteltu yhdessä muutaman muun harvinaisen maametallin kanssa yhdeksi kriittisimmäksi materiaaliksi. (Euroopan Komissio 2020a)

3.3.2 Praseodyymi

Praseodyymi on pehmeä hopeinen lantanidi, joka kuuluu keveysiin harvinaisiin maametalleihin (Royal Society of Chemistry 2021b). Praseodyymiä käytetään useissa eri tarkoituksissa seoksina, joista suurimpana käyttökohteena kestopagneeteissa. Kestomagneettien lisäksi praseodyymiä käytetään muun muassa keramiikassa, pattereissa, metalleissa ja katalyyteinä (Blengini et al. 2020) Kestomagneetissa

praseodyymi lisää demagnetoitumisen sietokykyä sekä parantaa sen suorituskykyä korkeissa lämpötiloissa (Steve Constantinides, 2015).

Praseodyymiä esiintyy muiden lantanidien tavoin useissa eri mineraaleissa. Praseodyymin kaksi pääasiallista lähdettä ovat monatsiitti ja bastnäsiitti, josta se saadaan uuttamalla sekä ioninvaihdolla otettua talteen. Praseodyymin suurimmat esiintymät ovat Kiinassa ja siksi se on myös suurin praseodyymin toimittaja. Kuten muidenkin harvinaisten maametallien suhteen, Kiina ei halua toimittaa praseodyymiä kuin korkeasti jalostettuna. Praseodyymin kierrätysaste on kestromagneetteihin käytettävistä kriittisistä materiaaleista suurin (Blengini et al. 2020).

3.3.3 Dysprosium

Dysprosium kuuluu painaviin harvinaisiin maametalkeihin ja se on lantanidi. Dysprosium on kirkas hopeanhohtoinen metalli. Sitä käytetään harvoin puhtaana metallina, sillä se on reagoi herkästi veden ja ilman kanssa. (Royal Society of Chemistry 2021c) Dysprosiumin pääkäyttökohde onkin neodyymi pohjaisissa magneeteissa seoksena. Se kasvattaa magneetin lämmönsietokykyä, mikä on tärkeää moottoreissa ja generaattoreissa. Dysprosium on tärkeä osa kestromagneettia, jota käytetään tuuliturbiineissa, mutta myös esimerkiksi sähköautoissa. Sen vuoksi dysprosiumin kysyntä on ollut kasvussa viime vuosina. (Euroopan Komissio 2020a) Dysprosiumilla ei ole muita merkittäviä käyttökohteita (Blengini et al. 2020).

Dysprosiumia esiintyy lantanideille tyypilliseen tapaan monatsiitista ja bastnäsiitistä, mutta sitä esiintyy myös pienempinä pitoisuuksina useissa muissa mineraaleissa kuten ksenotiimissä sekä fergusoniiitissä (Royal Society of Chemistry 2021c). Kuten harvinaisille maametalliesiintymille tyypillistä, suurin osa siitä on Kiinassa ja Kiina on myös sen suurin tuottaja. Suuren saatavuusriskin lisäksi dysprosiumin merkitys taloudelle on suuri, lisäksi sen kierrätysprosentti on erittäin alhainen verrattuna esimerkiksi praseodyymiin. Tämä lisää dysprosiumin kriittisyyttä ja siksi sekin kuuluu kriittisimpien materiaalien joukkoon (Blengini et al. 2020).

3.3.4 Boori

Boori on puhtaana tummaa amorfista jauhetta ja kuuluu puolimetalleihin (Royal Society of Chemistry 2021d). Sillä on paljon eri käyttökohteita, joista kestromagneetit ovat

häviävän pieni osa. Boorin merkittävin käyttökohde on lasiteollisuudessa, jossa siitä valmistetaan borosilikaattilasia. Muita käyttökohteita sillä on keramiikassa, lannoitteena, kemikaalien valmistuksessa sekä rakennusmateriaaleissa (Blengini et al. 2020). Boorin käyttö kestopagneetissa ei suoranaisesti vaikuta magneettisuuteen, mutta se parantaa koheesiota.

Booria esiintyy boorihappona joissain vulkaanisista lähdevesissä sekä boraatteina mineraaleissa, kuten booraksissa sekä kolemaniitissa. Turkissa on laajoja booraksi esiintymiä, mutta tärkein boorin lähde on kerniitti, jota löytyy yhdysvaltojen Kaliforniasta (Royal Society of Chemistry 2021d). Kuitenkin turkki on tärkein boorin toimittaja ja siellä on myös suurimmat boraattiesiintymät. Kuten dysprosiumilla, myös boorilla on erittäin pieni kierrätysprosentti (Blengini et al. 2020).

3.3.5 Niobi

Niobi on hohtavan valkoinen, joustava ja se kuuluu siirtymämetalleihin. Fysikaalisilta ja kemiallisilta ominaisuuksiltaan se on samankaltainen kuin tantaali, ja siksi ne monesti ryhmitetään yhteen. Molemmat aineet ovat tyypillisesti hyviä johteita, korroosionkestäviä ja ovat korkean sulamispisteen omaavia. Niobia käytetään yleensä seosmetallina erikoisteräksissä. (Royal Society of Chemistry 2021e) Sen käyttökohteet ovat melko laajat. Hyvän lämmönkestävyyden takia sitä käytetään suihku- ja rakettimootoreissa, mutta sillä on myös paljon muita käyttökohteita kuten, ydinvoima-, elektroniikka- ja optiikkateollisuus (Blengini et al. 2020). Pieninä määrinä ja pitoisuuksina sitä käytetään myös sähköisessä liikenteessä sekä energiasektorilla parantamaan materiaalien suorituskykyä. Tuulivoimassa sitä käytetään seosmetallina kestäviin teräsrakenteisiin, joista turbiinin torni koostuu (Euroopan Komissio 2020a).

Niobia esiintyy maankuoressa vain pienissä määrin, mutta luonnossa sitä esiintyy erilaisissa taloudelle merkittävässä oksidimineraaleissa. Tällaisia oksideja ovat muun muassa kolumbiitti, eukseniitti, lueshiitti ja pyrokloori. Valtaosa niobin tuotannosta on ferroniobia, jonka käyttökohteet ovat erikoislujan ja niukkaseosteisen teräksen valmistuksessa, kemikaaleissa ja kovametalleissa. Niobin saanti on suurimmaksi osin riippuvainen Brasiliasta, sillä niobivarantojen on arvioitu enimmäkseen olevan Brasiliassa. Myös suuri osa niobin tuotannosta on Brasiliassa. Varannot ovat sitoutuneet suurelta osin karbonaateissa oleviin pyrokloori esiintymiin. (Royal Society of Chemistry 2021e)

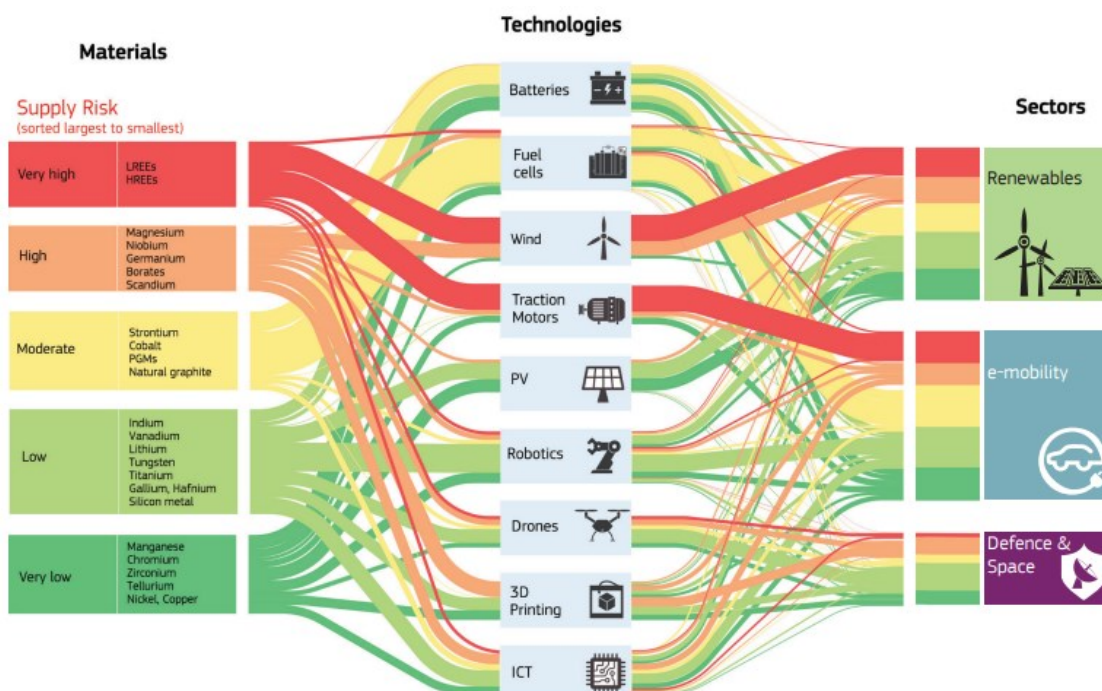
4 TUULIVOIMAN TRENDIT JA RAJOITTAVAT TEKIJÄT

Tässä luvussa perehdytään tarkemmin vielä tuulivoimassa käytettyihin kriittisten materiaalien muihin käyttökohteisiin sekä niiden teollisuuden alojen vallitseviin tilanteisiin. Kestomagneettien käyttö on kasvanut suuresti viime vuosina, niin tuulivoimassa kuin muissakin sen käyttökohteissa. Tuulivoiman kannalta tärkeät harvinaiset maametallit toimivat raaka-aineena myös usealla muulla korkeaa teknologiaa hyödyntävällä teollisuuden alalla.

4.1 Kestomagneettien käyttökohteet muilla teollisuuden sektoreilla

Kestomagneettien käyttökohteita ovat autoteollisuus, kulutustavara- ja elektroniikkateollisuus, ilmailuala ja puolustusvoimat, energiateollisuus, lääketieteellisyys sekä pienemmässä määrin myös muut teollisuuden alat. Tämä laaja kirjo eri käyttökohteita auttaa ymmärtämään kestopomagneettien kasvavaa kysyntää. Moni kestopomagneetteja käyttävä sektori on kasvava ala. Oleellista on muistaa, että kaikki näistä kestopomagneettien käyttökohteista ei välttämättä käytä tuulivoimassa käytettäviä NdFeB -magneetteja. NdFeB -magneettien vuosittainen markkinaosuus kaikista kestopomagneeteista on kuitenkin ylivoimaisesti suurin. Neodyymi-magneettien käyttö perustuu sen hyvien ominaisuuksien lisäksi myös halvimpaan hintaan. (Grand View Research 2020)

Kriittisten materiaaleja ja niiden merkitystä tietyille, EU:n näkökulmasta strategisesti tärkeille tulevaisuuden teknologioille ja teollisuuden sektoreille on kartoitettu EU:n ennakoititutkimuksessa (Euroopan Komissio 2020a). Tutkimuksessa (2020) on mallinnettu kriittisten materiaalien käyttökohteiden jakautumista luokiteltuna saatavuusriskin mukaan suurimmasta pienimpään. Tuulivoiman kohdalla taulukossa HREE ja LREE ovat tärkeimpiä ja nähdäänkin, että ne omaavat suurimman riskitason. Alemmalla riskitasolla nähdään tuulivoimassakin käytettäviä Niobia sekä Boraatteja. Tuulivoimassa käytetyillä raaka-aineilla on siis erittäin suuri saatavuusriski, mikä juontaa juurensa niiden laajasta soveltuvuudesta ja huonosta saatavuudesta. Tutkimuksessa on valittu yhdeksän eri teknologiaa, jotka ovat esitetty kuvassa 3. Kaikki teknologiat eivät käytä samoja materiaaleja tuulivoimassa käytettyjen materiaalien kanssa, mutta kuva auttaa hahmottamaan kokonaisuutta.



Kuva 3. Kriittisten materiaalivirtojen esitys niiden saatavuusriskin mukaan suurimmasta pienimpään yhdeksän strategisesti merkittävimmän teknologian ja kolmen sektorin osalta (Euroopan Komissio 2020a).

Neodyymimagneettien yksittäisistä käyttökohteista tuulivoimalat ja autoteollisuus ovat suurimmat. Roskillin mukaan tuulivoimalat vastasivat vajaa 10% NdFeB-magneettien kysynnästä, mikä oli suurin yksittäisen käyttökohteen osuus. Sähköautojen kuitenkin uskotaan lähiaikoina ohittavan tuulivoimalat suurimpana neodyymimagneettien käyttökohteena. Syynä tähän on sähköautojen ennustettu suuri vuosittainen kasvu: Roskillin mukaan vuosikymmenen lopulla sähköautomarkkinoiden vastaavan yli 40% neodyymimagneettien vuosittaisesta kysynnästä. Tuulivoimaloiden määrän kasvu ja etenkin puhtaasti kestopagneetteihin tukeutuvien merituulivoimaloiden odotetaan olevan sähköautojen kasvua hitaampi. Sähköautoilla tarkoitetaan sekä hybridi että täyssähköautoja. (Backeberg ja Merriman 2020)

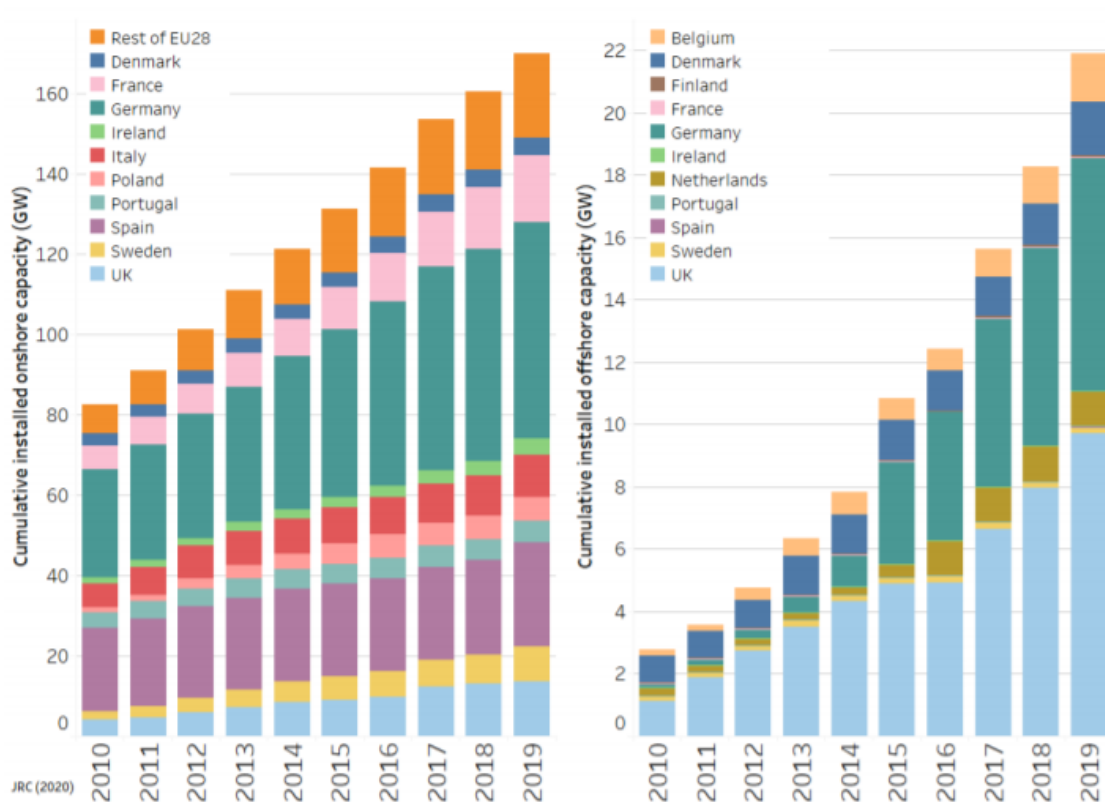
Kun mennään alkuaineiden tasolle, kriittisillä materiaaleilla on useita eri käyttökohteita. Kun mietitään raaka-aineiden kysynnän jakautuvan vielä useaan muuhun käyttökohteeseen ja sitten vielä tuulivoimassa vaadittuihin kestopagneetteihin, huomataan sen olevan vain yksi osa kaikesta vuosittaisesta kysynnästä. Tähän pohjautuu kriittisiin materiaaleihin liittyvä epävarmuus. Se on riippuvainen monesta muusta sektorista sekä muiden sektorien trendeistä. Harvinaisten maametallien tapauksessa

raaka-aineen saanti on täysin yhden valtion varassa. Tähän epävarmuuden pienentämiseksi, joudutaan kehittämään korvaavia menetelmiä tai käyttämään vanhempaa vähemmän kannattavaa teknologiaa.

4.2 Tuulivoimatuotannon trendit ja tulevaisuuden skenaariot

Uusiutuvaa energiaa tullaan lisäämään tulevina vuosina poliittisten päätösten ja energiamurroksen ajamana. Uusiutuvan energian lisääminen tulee tapahtumaan niin Suomessa kuin muuallakin Euroopassa, ja sen lisäämisessä tuulivoimalla tulee olemaan osuutensa. Tuulivoiman käytön lisääminen sekä muiden kestävien teknologioiden suosiminen asettaa paineita kuten tietynlaisten materiaalien kasvavaa kysyntää. Tarkastellaan siis viime vuosien Euroopassa asennettujen tuulivoimaloiden trendiä sekä tulevaisuuden skenaarioita, jotta saadaan käsitys kriittisten materiaalien todellisesta kysynnästä tuulivoiman osalta.

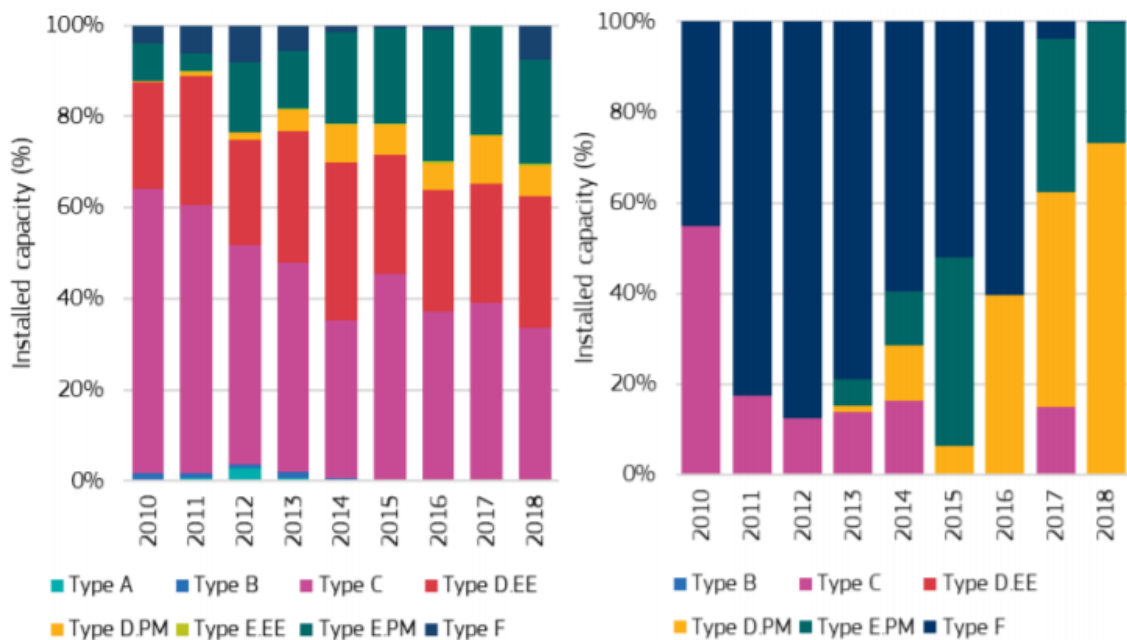
Asennettujen tuulivoimaloiden trendi viime vuosina on mennyt siihen suuntaan, että kestromagneettigeneraattorien käyttö on lisääntynyt huomattavasti kahdesta syystä. Merituulivoimaloiden yleistyminen sekä kestromagneettigeneraattorien kehittyminen. Kestomagneettigeneraattorien kehittyminen on mahdollistanut niiden laajan soveltuvuuden eri nopeudella toimiviin sekä eri kokoihin tuulivoimaloihin. Tällä hetkellä kaikki tuulivoimassa käytetyt kestromagneetit ovat NdFeB-magneetteja, joihin liittyy huomattavasti rajoittavia tekijöitä. Niiden valmistamiseen tarvitaan harvinaisia maametalleja, jotka ovat luokiteltu kriittisiksi materiaaleiksi. Viime vuosikymmenen aikana sekä maa- että merituuliturbiinien määrä on kasvanut EU:n jäsenmaissa merkittävästi. Merituulivoiman suuri prosentuaalinen kasvu voidaan myöskin havaita alla olevasta kuvasta 4, jossa on esitetty viime vuosien maatuuli- sekä merituulivoimaloiden määrän kasvu Euroopassa.



Kuva 4. Vuosien 2010-2019 Euroopassa asennettujen tuulivoimaloiden kumulatiivinen kapasiteetti maittain. (vasen kuva maatuulivoiman kapasiteetin kehitys ja oikea kuva merituulivoiman kapasiteetin kehitys). (Telsnig 2020)

Osassa Euroopan maissa aletaan olla tuulivoimaloiden kohdalla siinä tilanteessa, että niitä aletaan viemään yhä enemmän rannoille ja merille pois ihmisten luota. Syynä tähän on yksinkertaisesti tuulivoimaloille suotuisien maa-alueiden loppuminen, sekä lähellä asutusta olevien turbiinien aiheuttamat melu- ja välkehaitat. Suotuisilla maa-alueilla tarkoitetaan niitä alueita, jotka ovat tuulen sekä maantieteellisen sijainnin puitteissa soveltuvia. Sijainnin täytyy olla tarpeeksi lähellä verkkoa, johon se voidaan helposti yhdistää sekä riittävän lähellä energiaa kuluttavaa toimintaa (Fingrid 2021). Maantieteellisellä sijainnilla on siis suuri merkitys muunkin kuin pelkkien tuuliolosuhteiden näkökulmasta. Maalle on yleisesti halvempi rakentaa, mutta merellä rakennetuilla tuulivoimaloilla voidaan päästä lähemmäksi kulutusta. Lisäksi merituulivoiman vastustus on huomattavasti vähäisempää kuin tiivisti asutetuilla alueilla, mikä monesti myös nopeuttaa kaavoitusta ja rakentamista.

Maa- ja merituulivoimaloiden olosuhteet ovat hyvin erilaiset. Tämä vaikuttaa myös generaattoryyppien jakaumaan, jossa on havaittavissa selkeitä poikkeavuuksia. Molemmissa sekä maa- että merituulivoimaloissa kestromagneettigeneraattorien käyttö on kuitenkin yleistynyt merkittävästi. Vuosittain asennetuista maatuulivoimaloista noin kolmannes on kestromagneettigeneraattoreja, mikä vuosikymmenen alussa oli huomattavasti vähemmän, joten niissäkin selvää kasvua on havaittavissa. Merelle asennetuista uusista tuulivoimaloista lähes kaikki ovat kestromagneettigeneraattoreja. Merellä käytetyille generaattoreille tärkeitä ominaisuuksia ovat toimiminen vaihtelevissa olosuhteissa, luotettuus sekä huoltovapaus. Kestomagneettigeneraattorit dominoivat merituulivoimaloiden markkinoita juuri näistä edellä mainituista syistä. Merituulivoimaan ja merelle rakennettavaan uusiutuvaan energiaan on kehitteillä erilaisia tekniikoita todellisen potentiaalin saavuttamiseksi (Euroopan komissio 2020b).



Kuva 5. Vuosien 2010-2019 vuosittainen asennettujen tuulivoimaloiden markkinaosuus voimansiirtomekanismien ja generaattoryyppien perusteella. Vasemmalla esitetty maatuulivoima ja oikealla merituulivoima (Telsnig 2020).

Voidaan todeta kestromagneettigeneraattorien kasvun olevan suuri vuosittain asennetuista tuulivoimaloista viime vuosikymmenen aikana. Selkein kasvu on havaittavissa merituulivoimassa, jossa kestromagneetit dominoivat markkinoita. Tulevaisuudessa kestromagneettigeneraattorien dominointi varsinkin merituulivoimassa odotetaan edelleen kasvavan (Telsnig 2020). Tämä asettaa haasteita merituulivoiman kasvulle, sillä se vaikuttaisi olevan täysin riippuvainen kestromagneeteilla toimivista generaattoreista.

4.3 Vaihtoehtoja nykyiselle tilanteelle ja huomioitavia seikkoja

Uusiutuvan energian ja varsinkin tuulivoiman käyttöönoton lisäämisen takaamiseksi on paljon huomioitavia asioita, jotka herättävät huolta ja epävarmuutta. Kestomagneettien ja harvinaisten maametallien kysynnän kasvu niin tuulivoimassa kuin muillakin kilpailevilla aloilla, aiheuttaa huolta kasvavan saatavuusriskin takia. Valtavan kysynnän vuoksi harvinaisten maametallien hinta voi kasvaa suuresti ja se voi vaikuttaa merkittävästi tuulivoimateollisuuteen (Euroopan Komissio 2020a). Kiinan hallitessa harvinaisten maametallien markkinoita ja ollessa lähes monopoliasemassa REE:n tuottamisen ja kestopagneettien valmistuksen suhteen, hintojen vaihtelu sekä saatavuuden heikkeneminen ovat täysin mahdollisia. Tämä epävarmuus on kuitenkin johtanut materiaalitehokkuuden paranemiseen. Nykyään materiaaleja tarvitaan vähemmän yhtä tuulivoimalaa kohden kuin aikaisemmin. Kestomagneettien tilalle on myös mahdollista käyttää vähemmän kannattavia, mutta toimivia induktiogeneraattoreita, jotka ovat edelleen suosituimpia maatuulivoimaloissa. Induktiogeneraattorien kannattavuus merituulivoimaloissa on kuitenkin huomattavasti kestopagneetteja huonompi. (Euroopan Komissio 2020a)

Euroopan kannalta on ongelmallista, että suurin osa harvinaisten maametallien esiintymistä sijaitsee Kiinassa. Ongelmallista myös on, ettei Kiina ei suostu tuomaan harvinaisia maametalteja matalasti jalostettuna Eurooppaan. Tämän takia prosessin pullonkaula syntyy raaka-aineiden hankintaan ja aiheuttaa kasvavan kysynnän myötä materiaalien saatavuuteen ongelmia. Pelko siitä, ettei Kiina pysy tai ei ole halukas pysymään kasvavan kysynnän tahdissa, on tästä syystä aiheellista. Tämän takia onkin tärkeää saada materiaalivirta pysymään Euroopassa siinä vaiheessa, kun tuulivoimaloita aletaan poistamaan käytöstä. Onkin ensisijaisen tärkeää kehittää toimiva ja kannattava kierrätysjärjestelmä Eurooppaan, jolloin materiaali saataisiin pidettyä Euroopassa.

Kestomagneeteissa käytettyihin kriittisten materiaalien kierrätykseen liittyy kuitenkin haasteita. Monissa harvinaisia maametalteja käyttävissä laitteissa pitoisuudet ovat hyvinkin pieniä, jolloin erotuksesta tulee hankalaa ja kallista (Euroopan Komissio 2020a). Toimivalla kierrätyksellä primäärimateriaalin tarve saataisiin kuitenkin pidettyä kurissa. Tämä edellyttää kierrätyksen lisäksi sen, että Euroopassa on oltava mahdollisuudet harvinaisten maametallien prosessointiin ja valmistukseen. Takaamalla sekundaari materiaalivirta, voidaan vähentää raaka-aineiden hankintaan liittyvää

ympäristökuormitusta ja taata materiaalin kestävämpi käyttö, mikä on myös Euroopan vihreän kehityksen ohjelman mukaista. Materiaalien kestävää käyttöä helpottaisi myös raaka-aineiden hankinnan hajauttaminen. Euroopassa on havaittu potentiaalisia maa-alueita harvinaisten maametallien louhimiselle muun muassa myös Suomessa (Euroopan Komissio 2020a).

Myös uusien korvaavien tai vaihtoehtoisten tuulivoimateknologioiden kehittäminen on erittäin tärkeää. Kuten aiemmin jo todettiin, maatuulivoimaloille induktiogeneraattorit ovat toimivaksi ja kannattavaksi todettu vaihtoehto vielä nykyäänkin. Kuitenkin merituulivoimaloiden merkityksen kasvaessa, niille ei toistaiseksi löydy käyttöönottovaiheessa olevia kilpailevia vaihtoehtoja kestomagneettigeneraattorien rinnalla. Tällä hetkellä jo pitkään kehitysvaiheessa ollut HTS teknologia, voisi olla varteenotettava vaihtoehto kestomagneettien rinnalla. Varsin lupaava HTS teknologia on kuitenkin vielä melko aikaisessa kehitysvaiheessa, mutta voi tulevaisuudessa olla tärkeässä roolissa ainakin tuulivoimassa. Toinen varteenotettava teknologia on rautanitraattikestomagneetti, jonka valmistamiseen ei tarvita kriittisiä materiaaleja ja on lisäksi edullinen valmistaa. Rautanitraattikestomagneettien kaupallistumisen myötä, Euroopan riippuvuus Kiinasta loppuisi täysin. Tämä korvaisi kaikki harvinaiset maametallit raaka-aineena halvemmilla ja helpommin saatavilla olevilla materiaaleilla. Materiaalien kysyntä siirtyisi muualle aiheuttaen halvempien ja yleisempien raaka-aineiden käyttöä. (Euroopan Komissio 2020a)

5 YHTEENVETO

Ihmisten aiheuttamien päästöjen vaikutus ilmaston lämpenemiseen ja ympäristön monimuotoisuuden häviämiseen, on johtanut poliittisten päätösten ajamana energiamurrokseen, jossa pyritään kestäviin, älykkäisiin ja päästöttömiin toimintatapoihin. Tämä on johtanut uusiutuvan energian suosimiseen energiantuotantomuotona. Päästöjen vähentäminen vaati valtavia muutoksia etenkin energiasektorilla, josta suurin osa ihmisten aiheuttamista päästöistä syntyy. Tämä uusiutuvan energian lisääminen kiireellisellä aikataululla synnyttää uusia haasteita. Materiaalien kasvavan kysynnän myötä materiaalien saatavuusriski ja taloudellinen merkitys kasvaa. Tämä synnyttää kriittisiä materiaaleja tai kasvattaa jo entuudestaan kriittisten materiaalien kriittisyysluokitusta. Kriittisten materiaalien suuri kysyntä ja tarve voi uhata materiaalien kestävästä käytöstä, mikä on Euroopan vihreän kehityksen ohjelman vastaista.

Tuulivoiman kannalta saatavuusriskit aiheutuvat kriittisiä materiaaleja sisältävien kestopagneettien käytöstä, joiden suosio tuulivoimassa on ollut suuressa kasvussa. Kestomagneettien käyttö tuulivoimassa perustuu kestopagneettigeneraattoreiden yksinkertaiseen rakenteeseen, hyvään hyötysuhteeseen sekä luotettavuuteen. Tuulivoiman potentiaalinen valjastaminen merellä on suuressa roolissa kestopagneettien suosioon, sillä kestopagneettien ominaisuudet ovat ylivoimaiset muihin generaattoryyppisiin verrattuna meriolosuhteissa. Kestomagneettien suosio ei rajaudu vain tuulivoimaan vaan sen kysyntä myös muilla kilpailevilla sektoreilla on ollut jatkuvassa kasvussa. Suurimpana kilpailijana sähköistyvä liikenne, joka on ohittanut tuulivoiman yksittäisenä suurimpana kestopagneettien kuluttajana.

Tuulivoimaloissa käytettävät kestopagneetit koostuvat harvinaisista maametalleista, joiden tuotanto sekä valmistus on täysin riippuvainen Kiinasta. Kiinan lähestulkoon monopoliasema herättää huolta, sillä kestopagneettien kasvava kysyntä voi uhata kestopagneettien saantia ja hintojen merkittävät vaihtelut ovat täysin mahdollisia. Tämän seurauksena EU:ssa on tärkeää ylläpitää tietotaitoa kestopagneettien valmistuksesta sekä kehittää toimiva kierrätysjärjestelmä. Kun jätevirtaa alkaa syntyään, olisi Euroopan kannalta tärkeää saada pidettyä materiaalivirta itsellään taatakseen materiaalin saanti sekä kestävä käyttö. Myös pidemmällä aikavälillä uusien sekä vaihtoehtoisten menetelmien kehittäminen on ensisijaisen tärkeässä asemassa.

LÄHDELUETTELO

Backeberg, N., Merriman, D., 2020. Rare earths: A not “quite so” bullish forecast [verkkodokumentti]. Lontoo: Roskill. Saatavissa: <https://roskill.com/news/rare-earths-a-not-quite-so-bullish-forecast/> [viitattu 2.4.2021].

Blengini, G. A., EL Latunussa, C., Eynard, U., Torres de Matos, C., Wittmer, D., Georgitzikis, K., Pavel, C., Carrara, S., Mancini, L., Unguru, M., Blagoeva, D., Mathieux, F., Pennington, D. (2020). Study on the EU’s list of Critical Raw Materials – Final Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 158s. ISBN 978-92-76-21049-8

Chen Z., 2011. Wind turbine drive train systems – Chapter 7. Cambridge: Woodhead Publishing, 208-246s. ISBN 9781845695804

Euroopan komissio, 2017. METHODOLOGY FOR ESTABLISHING THE EU LIST OF CRITICAL RAW MATERIALS. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 25s. ISBN 978-92-79-68051-9

Euroopan komissio, 2019. Euroopan vihreän kehityksen ohjelma [verkkodokumentti]. Bryssel: Euroopan komissio. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640#document2> [viitattu 20.2.2021].

European Commission, 2020a. Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 100s. ISBN 978-92-76-15336-8

Euroopan komissio, 2020b. EU:n strategia avomerellä tuotettavan uusiutuvan energian potentiaalin valjastamiseksi ilmastoneutraalin tulevaisuuden tarpeisiin [verkkodokumentti]. Bryssel: Euroopan komissio. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX:52020DC0741> [viitattu 15.3.2021].

Euroopan komissio, 2021. 2050 – Pitkän aikavälin strategia [verkkodokumentti]. Bryssel: Euroopan komissio. Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_fi [viitattu 25.2.2021].

Fingrid 2021. Kantaverkko, Kantaverkon kehittäminen ja ylläpito, Verkkovisio [verkkodokumentti]. Suomi: Fingrid. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/verkkovisio/> [viitattu 2.4.2021].

Fortum, 2021. Tietopaketti medialle, Mikä ihmeen energiamurros? [verkkodokumentti]. Suomi: Fortum. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/uutishuone/tietopaketti-medialle/mika-ihmeen-energiaturros> [viitattu 15.2.2021].

Grand View Research, 2020. Permanent Magnets Market Size, Share & Trends Analysis Report By Material (Ferrite, NdFeB, Alnico, SmCo), By Application (Medical, Consumer Goods & Electronics), By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027 – Report overview [verkkodokumentti]. San Fransisco: Grand View Research. Saatavissa: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/permanent-magnets-industry> [viitattu 23.3.2021].

Hansen A. D., 2017. Wind Energy Engineering – Chapter 8. Cambridge: Academic Press, 145-160s. ISBN 9780128094518.

King, H. M., 2013. REE–rare earth elements and their uses [verkkodokumentti]. Geoscience News and Information. Saatavissa: <https://geology.com/articles/rare-earth-elements/> [viitattu 15.3.2021].

Kivimaa, P., 2016. Uusi energia- ja ilmastostrategia, energiamurros ja ‘luova tuho’ [verkkodokumentti]. Suomi: Smart energy transition. Saatavissa: <http://smartenergytransition.fi/fi/uusi-energia-ja-ilmastostrategia-energiaturros-ja-luova-tuho/> [viitattu 15.2.2021].

Paloneva, M., Takamäki, S., 2020. Yhteenveto toimialojen vähähiilikartoista. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö, 132s. ISBN PDF: 978-952-327-525-6.

Royal Society Of Chemistry, 2021a. Periodic Table, Neodymium [verkkodokumentti]. Lontoo: Royal Society Of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/60/neodymium> [viitattu 9.3.2021].

Royal Society Of Chemistry, 2021b. Periodic Table, Praseodymium [verkkodokumentti]. Lontoo: Royal Society Of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/59/praseodymium> [viitattu 9.3.2021].

Royal Society Of Chemistry, 2021c. Periodic Table, Dysprosium [verkkodokumentti]. Lontoo: Royal Society Of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/66/dysprosium> [viitattu 9.3.2021].

Royal Society Of Chemistry, 2021d. Periodic Table, Boron [verkkodokumentti]. Lontoo: Royal Society Of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/5/boron> [viitattu 9.3.2021].

Royal Society Of Chemistry, 2021e. Periodic Table, Niobium [verkkodokumentti]. Lontoo: Royal Society Of Chemistry. Saatavissa: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/41/niobium> [viitattu 9.3.2021].

T., Telsnig, 2020. Wind Energy Technology Development Report 2020, EUR 30503 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 113s. ISBN 978-92-76-27273-1.

Tuulivoimayhdistys, 2020. Tuulivoima Suomessa 2020 [verkkodokumentti]. Jyväskylä: Tuulivoimayhdistys. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tilastot-2/tuulivoimatilastot-2020> [viitattu 23.3.2021].

Tuulivoimayhdistys, 2021a. Tuulivoima Suomessa [verkkodokumentti]. Jyväskylä: Tuulivoimayhdistys. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa> [viitattu 23.3.2021].

Tuulivoimayhdistys, 2021b. Tiedotteet, Myös Suomen on suunnattava katseensa kohti merituulivoimaa [verkkodokumentti]. Jyväskylä: Tuulivoimayhdistys. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/myos-suomen-on-suunnattava-katseensa-kohti-merituulivoimaa> [viitattu 23.3.2021].

Tuulivoimayhdistys, 2021c. Tiedotteet, Tuulivoimahankkeissa potentiaalia kahdeksankertaistaa Suomen tuulivoimakapasiteetti [verkkodokumentti]. Jyväskylä: Tuulivoimayhdistys.

Saatavissa:<https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimahankkeissa-potentiaalia-kahdeksankertaistaa-suomen-tuulivoimakapasiteetti> [viitattu 23.3.2021].

Tuulivoimayhdistys, 2021d. Tuulivoima Suomessa ja maailmalla, Tuulivoimaennusteita [verkkodokumentti]. Jyväskylä: Tuulivoimayhdistys. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoimaennusteita> [viitattu 23.3.2021].

Tuulivoimayhdistys, 2021e. Tuulivoimaloiden rakenne [verkkodokumentti]. Jyväskylä: Tuulivoimayhdistys. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne> [viitattu 3.5.2021].

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020. Suomen pitkän aikavälin strategia [verkkodokumentti]. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/sites/lts/lts_fi_fi.pdf [viitattu 17.3.2021].

win, W., Xie, Y., Tan, W., 2012. Wind Turbine Generator Technologies – Chapter 7. London: IntechOpen. Saatavissa: <https://www.intechopen.com/books/advances-in-wind-power/wind-turbine-generator-technologies> [viitattu 15.3.2021].

Ympäristöministeriö, 2021a. Kansainväliset ilmastoneuvottelut, Pariisin ilmastopimus [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <https://ym.fi/pariisin-ilmastopimus> [viitattu 25.2.2021].

Ympäristöministeriö, 2021b. Euroopan ilmastopolitiikka [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <https://ym.fi/euroopan-unionin-ilmastopolitiikka> [viitattu 25.2.2021].

