



Tuuligeneraattorin purkupilotti

Prizztech Oy

Pekka Suominen, Minna Haavisto
31.12.2019

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	2
2.	Tuulivoimaloiden kierrättämispotentiaali	2
3.	Tuuligeneraattorin purkupilotti	3
3.1	Taustaa	3
3.2	Purkutyö Satakunnan pelastusharjoitusalueella	4
3.3	Purkutyöt hallissa	7
3.4	Roottorin lämpökäsittely ja magneettien irrotus	11
4.	Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet	14

1. Johdanto

Teknologiametallien kysyntä kasvaa, kun yhteiskunta sähköistyy. Kasvava ja tehostuva uusiutuvan energian tuotanto ja sähkönkäyttö tarvitsevat yhä enemmän myös harvinaisia maametalleja sisältäviä kestopagneetteja. EU on luokitellut harvinaiset maametallit kriittisiksi, sillä niiden saatavuuteen liittyy merkittävää epävarmuutta. Kriittisten metallien kierrättämistä täytyy tulevaisuudessa tehostaa, jotta voidaan varmistaa teknologisen kehityksen vaatimien raaka-aineiden saatavuus. Harvinaisten maametallien tuotantoa hallitsee Kiina ja metallien kauppa on toisinaan suurvaltapolitiikan välineenä.

Satakunnassa sijaitsee merkittävä NdFeB kestopagneetteja valmistava yritys Neorem Magnets Oy, jolle tiettyjen harvinaisten maametallien, kuten neodyymin, dysprosiumin ja terbiumin saatavuus on tärkeää. Prizztech Oy on toteuttanut vuonna 2018 Neorem Magnets Oy:n kanssa demonstraation, jossa käytöstä poistetun, suurikokoisen roottorin magneetit irrotettiin ja kierrätettiin pulveroinnin kautta uusien magneettien raaka-aineeksi. Demonstraatiossa onnistuttiin tuottamaan jopa 75 % kierrätysraaka-ainetta sisältäviä uusiomagneetteja. Uusiomagneettien valmistuksessa oleellista on kierrätysraaka-aineen tasalaatuisuus.

Energiatehokkaalla pulverointiprosessilla voidaan siis kierrättää riittävän suuria eriä samanlaisia käytöstä poistettuja magneetteja. Kierrätykseen soveltuvia magneettieriä voisi löytyä esimerkiksi purettavista tuulivoimaloista. Tuuligeneraattorit voivat sisältää muutamista sadoista kiloista muutamiin tuhansiin kiloihin NdFeB-magneetteja. Kestomagneetteja sisältäviä tuulivoimaloita on alettu valmistaa 2000-luvun alkupuolella ja ensimmäiset niistä ovat jo päätyneet purettaviksi. Usein magneetit päätyvät kierrätyksessä rautaromun joukkoon, jolloin magneettien sisältämät arvokkaat maametallit menetetään. Magneettien irrottaminen erillistä kierrätystä varten on osaamista vaativaa käsityötä.

Tässä raportissa kuvataan Prizztech Oy:n toteuttama tuuligeneraattorin purkupilotti. Pilotin avulla tuotetaan tietoa generaattorin purkutoimintaa tulevaisuudessa harjoittaville tahoille niistä toimenpiteistä, joilla magneetit voidaan irrottaa kierrättämistä varten. Pilotti on toteutettu osana Satakuntaliiton ja EU:n aluekehitysrahaston rahoittamaa Kriittisten kierrätysmetallien koetehdaskonsepti-hanketta. Pilotin toteuttamisesta ja raportin kirjoittamisesta ovat vastanneet Minna Haavisto ja Pekka Suominen. Mukana työryhmässä ovat olleet myös Jarkko Vuorela ja Timo Santa-Nokki.

2. Tuulivoimaloiden kierrättämispotentiaali

Tuulivoiman osuus Suomen sähköntuotannosta on kasvanut voimakkaasti 2010-luvulla. Vuodesta 2012 tuulivoimalla tuotetun sähkön vuosittainen määrä on yli kymmenkertaistunut. Tuulivoimalateknologia on samalla kehittynyt ripeästi, mikä onkin tehnyt nykyvoimaloista niin tehokkaita, että ne kykenevät toimimaan taloudellisesti kannattavasti ilman valtion tukia. Tuulivoiman lisärakentaminen oletettavasti jatkuu riippumatta tukipolitiikasta.

Vanhoja voimaloita alkaa samalla tulla purettavaksi, kun hyvätuuliset paikat halutaan hyödyntää uudemmalla ja tehokkaammalla tekniikalla. Vikaantuneita vanhoja voimaloita ei välttämättä kannata enää korjata, vaan koko voimala kannattaa vaihtaa uuteen ja tehokkaampaan.

Tuulivoimalan materiaaleista n. 80 % on kierrätettävissä. Kaikki metalliosat voidaan kierrättää, ne täytyy vain irrottaa ja erotella, jotta jokainen metalli saadaan kierrätettyä omassa prosessissaan. Komposiittimateriaalista valmistetut siivet sen sijaan ovat haastavia kierrätettäviä. WindEurope järjestö ilmoitti kesällä 2019 käynnistäneensä yhteistyön kemian- ja komposiittialan järjestöjen kanssa kehittääkseen siipien kierrätysmahdollisuuksia.

WindEurope on arvioinut, että seuraavien viiden vuoden aikana Euroopan n. 130 000 tuulivoimalasta purettavaksi tulee n. 12 000 voimalaa. Suomessa tällaisia ns. ensimmäisen sukupolven tuulivoimaloita on vain joitakin kymmeniä, mutta lähialueilta, kuten Ruotsista ja Virossa niitä löytyy lisää.

Ruotsissa oli vuoden 2018 lopussa kaikkiaan 3 569 tuulivoimalaa, Suomessa voimaloita oli 700 ja Virossa 139. Yli kymmenen vuotta vanhoja tuulivoimaloita on Suomessa käytössä 70, Virossa 69 ja Ruotsissa 1 371. Tiedot on poimittu maiden tuulivoimayhdistysten ylläpitämistä tilastoista.

Lähialueisiin voidaan laskea myös tuulivoiman edelläkävijämaat Tanska ja Saksa. Saksassa oli vuoden 2017 lopussa 29 844 voimalaa ja Tanskassa 6 157. Tanskassa purettiin 174 voimalaa vuonna 2017. Saksassa ennustetaan voimakasta tuulivoimaloiden purkuaaltoa vuoden 2020 jälkeen, kun noin 5 200 voimalan tariffikausi päättyy. Viisi vuotta myöhemmin päättyy jopa 8 000 voimalan tariffit. Osa näistä voimaloista varmasti jatkaa toimintaansa, mutta osa menee purkuun. Saksan nykyinen kierrätyskapasiteetti ei kuitenkaan riitä tällaisen voimalamäärän purkamiseen ja kierrättämiseen.

Kaikissa tuuligeneraattoreissa, varsinkin vanhimmissa, ei ole kestomagneetteja vaan tilalla on sähkömagneetit kuparikäämeineen. Kupari on magneettien ohella arvokas kierrätysmetalli ja se voidaan kierrättää Satakunnan värimetalliklusterin yrityksissä, esimerkiksi Boliden Harjavalta Oy:n kuparisulatossa tai Luvata Oy:n kuparivalimossa.

3. Tuuligeneraattorin purkupilotti

3.1 Taustaa

TVO Oyj oli lahjoittanut vaurioituneen 1 MW WinWinD tuulivoimalan Länsirannikon Koulutus Oy:lle (WinNova) asentajien koulutuskäyttöä varten. Laitos oli toiminut vuodesta 2004 Eurajoen Olkiluodossa, kunnes sen vaihteisto vaurioitui, eikä korjaaminen ollut enää kannattavaa. Tuulivoimalan purkutöön Olkiluodossa urakoi Pori Energia Oy ja laitoksen purettu osat siirrettiin Satakunnan pelastusharjoitusalueelle Poriin. Prizztech Oy sai luvan purkaa voimalan generaattorista roottorin ennen sen uudelleenpystytystä. Generaattorin purkutöä tilattiin Vuorsola Oy:ltä ja se toteutettiin kesän 2019 aikana.



Kuva 1. Tuulivoimalan naselli varastoituna Satakunnan pelastusharjoitusalueella

3.2 Purkutyö Satakunnan pelastusharjoitusalueella

Purkutyö alkoi kuivauksella, jossa voimalasta valutettiin pois kaikki nesteet. Näitä ovat esimerkiksi voiteluöljyt sekä jäähdytyspiireissä käytettävä glykoli. Riittävän korkeuseron puuttuessa öljy oli ensin valutettava ämpäreihin ja siitä vasta siirrettävä kemikaalikontteihin. Valutus kesti huomattavan pitkään koska öljy oli kylmää ja siksi jäykkää. Muutamia vuotoja sattui ja asfaltille näiden seurauksena valunut öljy imeytettiin asianmukaisesti. Kova, nesteitä läpäisemätön alusta on purkutyössä suositeltava, jotta mahdollisten nestevuotojen aiheuttamat ympäristöhaitat voidaan estää.

Kuivaus ja katon purun valmistelu kestivät yhteensä noin 3 päivää. Katon nostossa oli huomioitava, että nosto oli erittäin takapainoinen. Tätä pyrittiin minimoimaan purkamalla takaosasta helposti irti lähteneet jäähdytyskennot. Tässä voimalaitostyyppissä katto oli kiinni muutamalla kymmenellä pultilla, joiden irrotus oli helppoa. Nostossa pystyttiin hyödyntämään katolla olleita turvarakenteita (ks kuva 3).

Konehuoneesta noin puolet käsittää voimalinjan sekä valukappaleen, joka liittyy voimalinjan tornin runkoon. Toinen puoli konehuoneesta sisältää sähkökaappeja sekä jäähdytykseen liittyviä komponentteja. Nostoissa tulee huomioida myös voimalan hieman epätyypillinen rakenne, jossa konehuone on kannatettu voimalinjasta ja tavallaan roikkuu voimalinjan varassa. Tämän vuoksi maassa olevan konehuoneen alapuolella ei juurikaan ole kantavia rakenteita, joiden varassa se voisi "seisoa". Konehuoneen kuoren ollessa lasikuitua sitä oli haastava tukea alapuolelta niin että päällä oleva paino ei olisi murtanut lasikuituista kuorta.



Kuva 2. Voimalaitoksen kuivaus letkuilla ja ämpäreillä.

Voimalinjan eli generaattorin ja vaihteiston yhteispaino oli noin 20 tonnia. Sen nosto oli haastava ja se piti suunnitella erityisellä huolellisuudella. Hyvin hallittuun ja turvalliseen nostoon tarvittiin kaksi järeää nosturia. Nostoja varten valmisteltiin erinäisiä nostokorvakkeita, sillä alkuperäiset nostotyökalut eivät olleet käytössämme. Generaattorin valmistajan konkurssin vuoksi nostojen esivalmistelua varten oli vaikeaa saada tietoa. Kuvassa 8 näkyy, kuinka voimalinja nostettiin kuljetuslavetille. Sopivien tukien rakentamiseen ja kuorman sitomiseen oli kiinnitettävä erityistä huomiota.

Kuvassa 9 näkyy konehuoneeseen jäänyt valurautainen osa, joka liittyy tornin rungon ja voimalinjan toisiinsa. Osan alareunassa on laakerointi, jonka varassa konehuone voi pyöriä. Kuvassa näkyvät myös kaksi sähkömoottoria, joiden avulla konehuonetta voidaan kääntää (esim. tuulta kohti).



Kuva 3. Nasellin katon nosto.



Kuva 4. Konehuone ilman kattoa.



Kuva 5. Voimalinjan noston valmistelu



Kuva 6. Nostokorvakkeet, jotka valmistettiin ja kiinnitettiin voimalinjan nostoa varten



Kuva 7. Voimalinjan nosto kahden nosturin avulla



Kuva 8. Voimalinjan siirto kuljetuslavetille



Kuva 9. Konehuone ilman voimalinjaa

3.3 Purkutyöt hallissa

Generaattori-vaihteistopaketti siirrettiin Vuorsola Oy:n halliin, jossa sitä ensin tutkittiin vaaka-asennossa. Paketti jouduttiin kuitenkin kääntämään pystyyn, koska roottorin irrotus ei onnistunut vaaka-asennossa. Hallittu kääntäminen vaatii kaksi nosturia.



Kuva 10. Voimalinja Vuorsola Oy:n hallissa



Kuva 11. Voimalinjan kääntäminen pystyyn

Roottori ja peräpään laakerikansi irtoavat yhtenä pakettina, joka on nostettava pystyasennossa. Itse nosto oli helppo ja painoa mitattiin 4950 kg. Noston jälkeen huomattiin, että roottorin magneetit olivat vetäneet sen päin staattoria ja jotkut magneettinapojen pinnoista olivat hieman raappiutuneet. Tämä oli odotettavissa, koska keskittävä laakerointi irtoaa noston aikana.

Staattoripakka (sähköteräslevyt) oli kiinnitetty muutamilla pulteilla generaattorin runkoon. Vaikka pultit irrotettiin, niin osia ei saatu irrotettua. Syyksi arveltiin joko ruostetta osien välillä tai asennusvaiheessa tehtyä lämpösovitusta. Staattorin kupari olisi irronnut sahaamalla se pienempiin osiin, mutta em. työtä ei tässä projektissa tehty. Staattorin sisähalkaisijaksi mitattiin noin 162 cm.

Roottorin ja takakannen sovite oli niin tiukka, että niiden irrottamiseksi tarvittiin joitain erikoistyökaluja; mm. alumiininen pullotunkki.

Roottorin painoksi mitattiin 2980 kg josta magneettien osuus on noin 250 kg. Roottori nostettiin trukkilavalle ja väliin lisättiin noin 10 cm puuta. Näin roottorin siirrot onnistuivat kätevästi trukilla. Roottorin magneettikenttärakenne on 20-napainen (ks kuva 14). Magneettinavat on kasattu 16 mm paksuisista 100 mm x 100 mm magneeteista. Näitä on kaksi kappaletta vierekkäin ja aksiaalisuunnassa viisi kappaletta peräkkäin (ks kuva 15). Magneettien alla on magneettisesta teräksestä valmistetut sovitepalat, joiden sisäpinnan säde on sama kuin alla olevan roottorirakenteen. Magneettien päällä on sähköteräksestä valmistetut sovitekappaleet joiden ulkopinnan säde puolestaan vastaa staattorin sisäsädettä. Rakenteella varmistetaan mahdollisimman suuri magneettivuon tiheys roottorin ja staattorin välisessä ilmaraoissa. Magneettinavan uloin osa on Exel Oy:n valmistama suojakuori (lasi- ja hiilikuitua). Suojakuoren reunat ovat kiilamaiset jolloin sen lukitseminen roottoriin onnistuu vastaavalla kiilamaisella pidikkeellä (ks kuva 15). Kiilamainen pidike on valmistettu alumiinista, joka on kevyttä ja ei-magneettista.



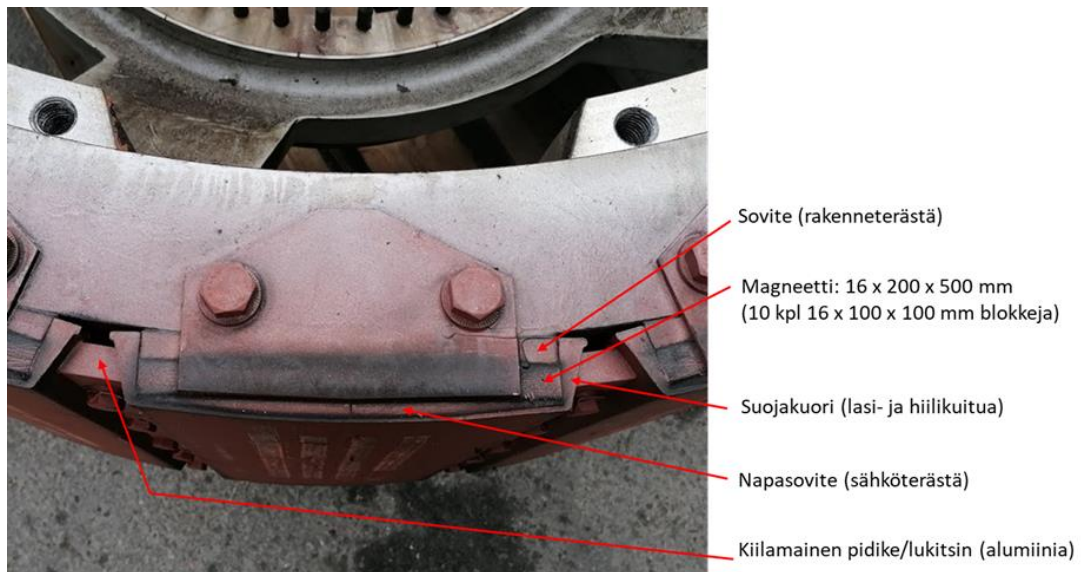
Kuva 12. Generaattorin takakannen irrotus ja nosto



Kuva 13. Staattorin rakenne



Kuva 14. Roottorin irrotus



Kuva 15. Roottorin ja magneetin rakenne

Roottoria siirrettäessä magneettien ja trukin metallisten osien välissä on hyvä pitää vähintään 20 cm turvaetäisyys. Roottori jouduttiin välivarastoimaan pihalle ja sen ympärille rakennettiin suoja-aita noin 1 m etäisyydelle. Roottorin molemmin puolin lisättiin voimakkaasta magneettikentästä varoittavat kyltit. Roottorin käsittelyssä ja varastoinnissa on huomioitava, että voimakkaat magneetit voivat olla vaarallisia. Rauta tarttuu niihin erittäin voimakkaasti ja vetovoima kasvaa usein yllättäen magneetteja lähestyttäessä. Lisäksi magneetit voivat häiritä esim. sydämentahdistimen toimintaa tai sekoittaa luottokortin magneettiraidan.

Roottori oli melko rasvainen ja pölyinen. Siksi se pestiin rekkapesuhallissa liuottimilla ja höyrypesurilla. Kuvassa 16 näkyy likainen roottorin runko ennen pesua ja kuvassa 19 puhdas valkoinen runko pesun jälkeen. Huolellisella pesulla ehkäistiin roottorin pinnassa olleen rasvan ja öljyn palaminen joko kiinni roottoriin tai varistamalla likaa uunin pohjalle. Halusimme varmistaa, että uuni ei kontaminoidu eivätkä sen pohjassa näkyvissä olevat vastukset vaurioitu esim. oikosulun vuoksi.



Kuva 16. Magnetoidun roottorin käsittely

3.4 Roottorin lämpökäsittely ja magneettien irrotus

Roottori lämpökäsiteltiin ennen purkamista, jotta magneetit saatiin demagnetoitua eli magneettisuus poistettua. Lämpökäsittely tehtiin Lehtosen konepajan teollisuusuunissa Kokemäellä. Lämpökäsittelyä varten roottori huputettiin sammutuspeitteellä. Kuvassa 17 on esitetty sammutuspeitteellä suojattu roottori. Sammutuspeite pitää sisällään kuumuudessa roottorista mahdollisesti irtoavat osat sekä lian ts. estää uunin kontaminoitumisen. Peitteen paikallaan pysyminen varmistettiin teräsverkolla.



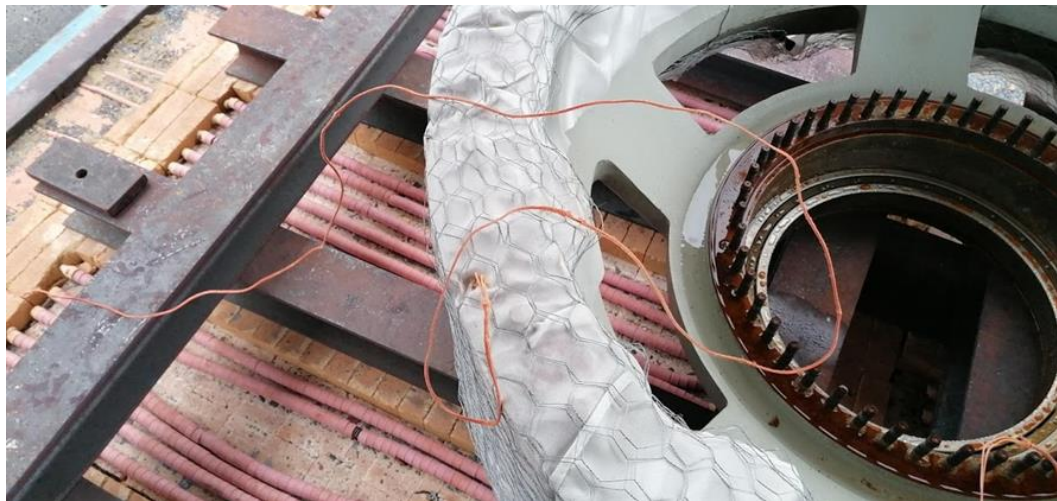
Kuva 17. Roottori valmisteltiin lämpökäsittelyyn huputtamalla se sammutuspeitteeseen

Lämpökäsittelyn aikana uunin lämpötilaa valvottiin kahdella termoparilla, jotka oli sijoitettu vastakkaisille puolille kiilamaisen pidikkeen alle (kuva 19). Uunin sivuseinälle asetettiin roikkumaan noin 1m pitkä RST-reikävannenauha. Tarkoituksena oli tutkia, tarttuuko nauhaan lämpökäsittelyn aikana näkyvää kontaminaatiota. Uunin lämpötila oli 500 °C ja pitoaika 7 tuntia. Lämpökäsittelyn jälkeen uunin annettiin jäähtyä vapaasti n. kuusi tuntia. Sen jälkeen uuni avattiin ja jäähtyminen nopeutui.

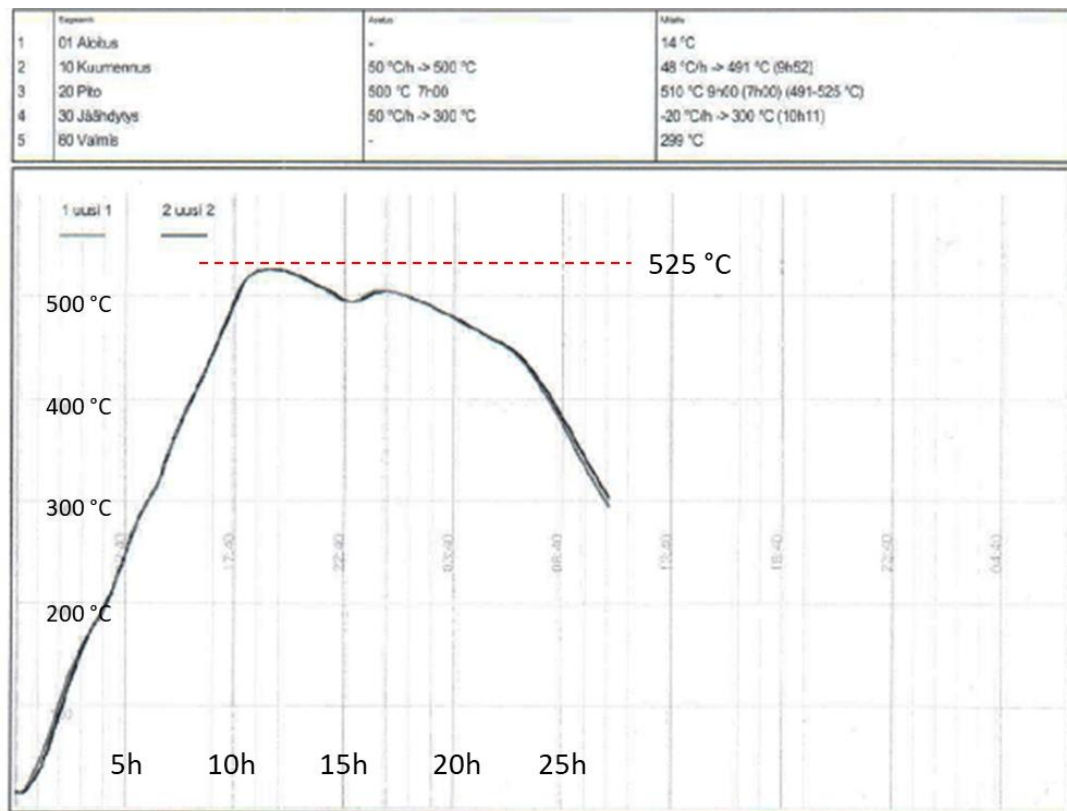
Kuvassa 21 on esitetty roottori lämpökäsittelyn jälkeen. Sisäpintojen valkoinen maali on hilseillyt ja muuttunut punertavammaksi. Muutoin roottori näyttää ulkoisesti hyvinkin samalta kuin ennen lämpökäsittelyä. Roottorin päällä näkyy RST kontrollinauha, jonka korkea lämpötila oli sinistänyt, mutta mitään silmin nähtävää kontaminaatiota siihen ei ollut tarttunut.



Kuva 18. Roottorin siirto lämpökäsittelyyn



Kuva 19. Termoparien sijoittelu lämpökäsittelyn aikana



Kuva 20. Termoparien mittaama lämpötila ajan funktiona



Kuva 21. Roottori lämpökäsittelyn jälkeen

Magneetit olisi voinut irrottaa avaamalla kiilapultit, mutta tässä tapauksessa päädyttiin nopeampaan vaihtoehtoon, eli lasi- ja hiilikuitukankaan leikkaamiseen. Kuvassa 22 on esitetty, miten lasi- ja hiilikuitukankaat leikattiin irti. Tämän jälkeen magneetit irtosivat kätevästi ilman työkaluja. Jäännösmagnetoitumaa ei havaittu. Yksikään magneetti ei haljennut eikä lohkeamia havaittu. Roottorin teräsosien kierrätettävyyden kannalta voisi olla järkevämpää irrottaa pultit, jolloin lasi- ja hiilikuitukankaat sekä alumiiniset kiilapalat saisi kokonaan pois. Ne täytyy joka tapauksessa irrottaa ja erotella roottorirungon jatkokäsittelyssä.

Sähköteräksiset napasovitteet toimitettiin teräksien kierrätyslavalle sekä pussillinen lasi- ja hiilikuitukangasta sekajätteeksi. Magneetit toimitettiin magneettien kierrättämisprosessin kehittämistyöhön.



Kuva 22. Lämpökäsitellyn roottorin purkaminen



Kuva 23. Irrotetut napasovitteet (vas.) ja magneetit (oik.)

4. Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet

Tässä tuuligeneraattorin purkupilotissa generaattori piti purkaa siten, että se oli vielä uudelleen koottavissa, joten rakenteita rikkovia menetelmiä voitiin käyttää ainoastaan roottorin purkamisessa. Tämä edellytti järeän nosturikaluston käyttöä, mikä aiheutti merkittäviä kustannuksia. Toisaalta, kun generaattori puretaan samassa järjestyksessä kuin se on aikanaan kasattu, voidaan irrotettuja osia mahdollisesti vielä käyttää esim. varaosina. Rikkovissa purkumenetelmissä kierrätettäväksi jää ainoastaan materiaali.

Tässä pilotissa purkukohteena olivat NdFeB kestomagneetit, joiden osuus generaattorikokonaisuudesta on kuitenkin melko pieni. Enemmän generaattorissa on kierrätettävää terästä, valurautaa ja kuparia. Nämä ovat myös taloudellisesti merkittävämpiä kierrätysjakeita. Ne on kuitenkin eroteltava kierrätystä varten ja magneetit on huomioitava tässä kierrättämisprosessissa jo turvallisuussyistä. Generaattori kannattaa siis purkaa siten, että magneetit saadaan hallitusti erilleen, jolloin niilläkin on oma kierrätysarvonsa. Kierrätysmagneettien arvo vaihtelee välillä 0-10 €/kg. Hintaan vaikuttaa mm. erä koko ja laatu, alkuperätiedon olemassaolo (jäljitettävyyys) sekä globaali harvinaisten maametallien markkinahinta.

Kyseinen 1 MW voimala on suhteellisen pieni, verrattuna uudempiin, usein yli 3 MW voimaloihin. Generaattorikoon kasvaessa kasvaa myös nosturikaluston vaatimukset. Suurempien generaattoreiden kohdalla voi olla järkevää suunnitella purku jo tuulivoimalan purkupaikalla, kun järeät nosturin ovat nostamassa nasellia alas tornin päästä. Mikäli generaattori puretaan, eli irrotetaan roottori staattorista samassa yhteydessä, on generaattorin kuivaaminen ja nesteiden talteenotto tehtävä jo ennen nasellin alaslaskemista, jotta vältetään ympäristön pilaantuminen.

Satakunnasta löytyy kaikki tuuligeneraattoreiden purkamiseen tarvittava infrastruktuuri sekä metallien kierrättämiseen erikoistuneita yrityksiä. Satakunnassa on myös alueita, kuten Peittoon kierrätyspuisto, jotka soveltuisivat hyvin käytöstä poistettujen tuulivoimaloiden osien varastointiin ja käsittelyyn. Satakunnasta löytyy magneettitehtaan lisäksi kuparinjalostusteollisuutta, joka voi hyödyntää kuparikäsit kierrätysraaka-aineena. Lisäksi Satakunnassa on kaksi satamaa, joiden kautta tuulivoimaloiden osia voidaan tuoda ja kierrätysjakeita tarpeen mukaan myös viedä ulkomaille.

Kaikessa kierrättämisessä haasteena on saada toiminta taloudellisesti kannattavaksi. Tuulivoimalan purkaminen ja siitä aiheutuvat kustannukset ovat tuulivoimayhtiön vastuulla. Purkuyritys laskuttaa tuulivoimayhtiötä purkamistyöstä ja myy puretut osat eteenpäin joko osina tai kierrätysmateriaaleina.

Jatkoselvitys tuulivoimaloiden purkamisen kustannuksista, kierrätysmetallien hinnoista ja kierrättämiseen liittyvistä liiketoimintamalleista olisi siten tarpeellinen, jotta toiminnan kannattavuutta voidaan arvioida. Samassa yhteydessä voisi pilottina suunnitella jonkun olemassa olevan tuulipuiston purkuoperaation pääpiirteittäin ja laskea purkamisen kokonaiskustannukset huomioiden kierrätysmateriaaleista saatavan hinnan.