



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Nico Yritys

Yksikomponenttihartsin testaus valutuskyllästyksessä

Opinnäytetyö

Kevät 2023

Insinööri (AMK), Automaatiotekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Automaatiotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Koneautomaatio

Tekijä: Nico Yritys

Työn nimi: Yksikomponenttihartsin testaus valutuskyllästyksessä

Ohjaaja: Samuel Suvanto

Vuosi: 2023

Sivumäärä: 41

Liitteiden lukumäärä: 0

Tämän työn tavoitteena oli tutkia yksikomponenttihartsin sopivuutta Vaasan ABB:n IEC LV Motors -yksikön valutushartsaukseen. Tutkimuksessa testauskäytössä olleet kyllästyshartsit eivät sisältäneet paloherkkää ja terveydelle haitallista styreeniä, kuten nykyisin käytössä oleva kaksikomponenttiharts. Tutkimusta varten hartsattiin ja tutkittiin 22 staattoria kyllästyshartsien sopivuuden selvittämiseksi.

Hartsaus tarkoittaa sähkömoottorin valmistuksen vaihetta, jossa staattori kyllästetään hartsilla. Hartsin tehtävänä on suojata staattorin käämitystä lämpötilanvaihteluilta, kosteudelta, kemikaaleilta ja mekaanisilta rasituksilta.

Testien perusteella saatiin selville, että erityisesti yksi työssä käytetyistä uusista hartseista ja samalla ainut yksikomponenttiharts osoittautui ominaisuuksiensa vuoksi varsin päteväksi vaihtoehdoksi. Työn perimmäisenä tavoitteena oli turvallisuuden parantamisen lisäksi yksinkertaistaa valutuskyllästyksessä käytössä olevaa kaksikomponenttihartsia, johon sekoitetaan kahden pääkomponentin lisäksi vielä kvartsihiekkaa täyteaineeksi. Uuteen yksikomponenttihartsiin ei sekoitettu mitään, joten se oli käyttövalmista suoraan säiliöstään. Osittaispurkausmittauksista havaittiin, että yksikomponenttihartsilla saatiin myös enimmäkseen erinomaisia osittaispurkausten syttymisjännitteitä. Jatkotutkimuksia kuitenkin tarvitaan staattorin sahauksien osalta, jotta yksikomponenttihartsin hartsaustuloksista saadaan enemmän tietoa.

¹ Asiasanat: ABB, yksikomponenttiharts, valutushartsaus, osittaispurkaus

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Automation Engineering

Specialisation: Machine Automation

Author: Nico Yritys

Title of thesis: Testing of single component resin in trickle impregnation

Supervisor: Samuel Suvanto

Year: 2023

Number of pages: 41

Number of appendices: 0

The goal of the thesis was to examine the suitability of using a single component resin in trickle impregnation at the IEC LV Motors unit of ABB in Vaasa. The new impregnation resins used in the thesis differed from the two-component resin currently in use as it did not contain highly flammable styrene, which is harmful to health. In total 22 stators were impregnated and tested to determine the suitability of the impregnation resins.

Stator impregnation is a phase in electric motor manufacturing, where the stator is impregnated with impregnation resin. The purpose of the resin is to protect the stator winding because of temperature fluctuations, moisture, chemicals and mechanical stress.

The impregnation resin tests showed that especially the only single component resin used in the tests proved to be a very valid alternative due to its properties. The main goal of the thesis was not only to improve safety, but also to simplify the impregnation resin used in trickle impregnation. The two-component resin is made by mixing the two main components with quartz sand. Quartz sand works as a filler in the resin. The new single component resin was not mixed with anything, so it was ready for use straight from the container. Partial discharge (PD) measurements showed that the single component resin also gave mostly excellent partial discharge inception voltages. However, further studies about stator sawing are required to provide more information on the impregnation results of the single component resin.

¹ Keywords: ABB, single component resin, trickle impregnation, partial discharge (PD)

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	1
Thesis abstract	2
SISÄLTÖ	3
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	5
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	7
1 Johdanto	8
1.1 Yritysesittely	8
1.2 Työn tausta ja tutkimusongelma.....	8
1.3 Työn tavoite.....	10
2 Sähkökoneet ja hartsaus	11
2.1 Sähkökoneet	11
2.2 Sähkömoottorin rakenne	11
2.2.1 Staattori.....	12
2.2.2 Roottori	13
2.3 Staattorin hartsaaminen	14
2.3.1 Hartsauksen tarkoitus	14
2.3.2 Hartsin valinta ja mittaukset	14
2.3.3 Osittaispurkaukset	15
2.3.4 Valutuskyllästys	15
2.3.5 Hartsausvälineet ja -työkalut.....	17
2.3.6 Hartsaamon suojarusteet ja yleinen turvallisuus	18
2.3.7 Harts 1	18
2.3.8 Harts 2	19
2.3.9 Harts 3	19
2.3.10 Harts 4	19
2.3.11 Hartsivarasto.....	20
2.3.12 Hartsinsekoittamo	20
3 Tutkimuksen suunnittelu ja toteutus	22

3.1	Tutkimuksen suunnittelu.....	22
3.2	Tutkimuksen toteutus	22
4	Hartsitestit ja tulokset	25
4.1	Hartsien valmistus	25
4.2	Staattoreiden hartsaus	25
4.2.1	Runkokoon 280 staattoreiden hartsaus	25
4.2.2	Runkokoon 355 staattoreiden hartsaus	26
4.3	Osittaispurkausmittaukset	28
5	Hartsitestien tulokset	30
5.1	Staattoreiden valutusaika ja hartsien viskositeetti	30
5.2	Valutuskyllästyksen kokonaisprosessiajat.....	30
5.3	Hartsijäämä ja täytösprosentti	32
5.4	Osittaispurkausmittaukset	33
5.4.1	Runkokoko 280	33
5.4.2	Runkokoko 355	36
5.5	Tuloksien yhteenveto	39
6	Johtopäätökset ja tulevaisuuden jatkotutkimukset	40
6.1	Johtopäätökset.....	40
6.2	Jatkotutkimukset.....	40
	LÄHTEET	41

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluettelo

Kuva 1. Eri kokoisia staattoreita odottamassa hartsausta.....	13
Kuva 2. Hartsauskone Thumm ja staattori valmiiksi kytkettynä hartsaamista varten.	17
Kuva 3. Hartsinsekoitin. Vasemmassa reunassa hartsinsekoittimen sähkökeskus. Sähkökeskuksesta oikealle valkoinen kvartsihiekkasäkki, keskellä A- ja B-kyllästyshartsikomponenttitynnyrit. Oikeassa reunassa hiekan ja hartsikomponentit sekoittava hartsinsekoitin.....	21
Kuva 4. Hartsattu staattori kytkettynä osittaispurkausmittausta varten.	29
Kuvio 1. Sähkömoottorin räjäytyskuva, josta näkee pienikokoisen sähkömoottorin koko rakenteen.....	12
Kuvio 2. Runkokoon 280 staattoreiden keskimääräiset valutukseen kuluneet ajat ja hartsien viskositeetit.....	30
Kuvio 3. Runkokoon 280 staattoreiden kokonaisprosessiajat.	31
Kuvio 4. Runkokoon 355 staattoreiden kokonaisprosessiajat.	31
Kuvio 5. Hartsattujen runkokoon 280 staattoreiden hartsijäämät ja täytösprosentit.	33
Kuvio 6. Runkokoon 280 staattoreiden U-V-W -vaiheiden välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet.....	34
Kuvio 7. Runkokoon 280 staattoreiden vaiheiden ja maan välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet.....	35
Kuvio 8. Runkokoon 280 staattoreiden kierrosten välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet.	35
Kuvio 9. Runkokoon 280 staattoreiden kaikkien vaiheiden yhdessä ja maan välisten toistuvien osittaispurkausten syttymisjännitteet.	36

Kuvio 10. Runkokoon 355 staattoreiden U-V-W -vaiheiden välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet.....	37
Kuvio 11. Runkokoon 355 staattoreiden vaiheiden ja maan välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet.....	37
Kuvio 12. Runkokoon 355 staattoreiden kierrosten välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet.	38
Kuvio 13. Runkokoon 355 staattoreiden kaikkien vaiheiden yhdessä ja maan välisten toistuvien osittaispurkausten syttymisjännitteet.	39

Käytetyt termit ja lyhenteet

ABB	Asea Brown Boveri, sveitsiläis-ruotsalainen teknologiayhtiö.
Kokonaisprosessiaika	Työssä käytetty aikamääre, johon on mitattu aika sekuntikellolla staattorin esilämmityksen alusta staattoriin syötetyn virran katkaisemiseen eli hartsauksen lopettamiseen.
PDIV	Alin jännite, jolla osittaispurkaus esiintyy, kun mittauslaitteen syöttämää jännitettä nostetaan (Partial Discharge Inception Voltage).
PDEV	Jännite, jossa osittaispurkauksia ei enää esiinny, kun mittauslaitteen syöttämää jännitettä lasketaan huipusta (Partial Discharge Extinction Voltage).
RPDIV	Alin jännite, jolla osittaispurkauksia esiintyy toistuvasti, kun mittauslaitteen syöttämää jännitettä nostetaan (Repetitive Discharge Inception Voltage).
RPDEV	Jännite, jossa osittaispurkauksia ei enää esiinny toistuvasti, kun mittauslaitteen syöttämää jännitettä lasketaan huipusta (Repetitive Partial Discharge Extinction Voltage).
Viskositeetti	Suure, joka kuvaa nesteen kykyä vastustaa virtaamista. ”Paksummalla” nesteellä on korkeampi viskositeetti, kuin ”ohuemmalla” nesteellä.

1 Johdanto

1.1 Yritysesittely

ABB Oy on maailmanlaajuisesti tunnettu teknologiayritys, jonka pääkonttori sijaitsee Sveitsin Zürichissä (ABB, 2022a). ABB:n toiminta-alueisiin kuuluu automaatiotekniikka sekä sähkövoimatekniikka. Maailmanlaajuisesti ABB on levittäytynyt yli 100 maahan ja ABB:llä työskentelee noin 105 000 alan ammattilaista. ABB toimii Suomessa noin 20 paikkakunnalla noin 5000 työntekijän voimin. Suomessa isoimmat tehdaskeskittymät sijaitsevat Helsingissä, Vaasassa, Porvoossa ja Haminassa.

ABB IEC LV Motors -divisioona suunnittelee ja valmistaa sähkömoottoreita ja generaattoreita kaikkiin toimintatarpeisiin maailmanlaajuisesti (ABB, 2022a). Vaasan ABB:n IEC LV Motors -tehtaalla on vastuu yhtiön pienjännitemoottoreiden kehityksestä ja valmistuksesta vaativimpiinkin käyttökohteisiin. Vaasan tehtaalla työskentelee noin 600 ammattilaista.

1.2 Työn tausta ja tutkimusongelma

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsauksen työhöjeen mukaan Vaasan ABB:n IEC LV Motors -tehtaan yhtenä osastona on hartsaamo. Hartsaamossa hartsataan staattoreita. Hartsaus on vaihe sähkömoottoreiden valmistuksessa, jossa staattorin käämi kyllästetään hartsilla. Hartsia on nestemäistä ainetta, joka suojaa staattoria kolhuilta, lämpötilanvaihtelulta, tärinältä, kosteudelta ja kemikaaleilta. Vaasan toimipisteessä on käytössä kaksi hartsausmenetelmää: valutuskyllästys- sekä upotuskyllästysmenetelmät. Tässä työssä käsitellään valutuskyllästysmenetelmää. Valutuskyllästysmenetelmässä staattorin käämin päälle kaadetaan polyesterihartsia, joka lämmitessään muodostaa kovettuneen, kiinteän ja yhtenäisen pinnan kuparin, eristeiden ja lisälaitekaapeleiden pinnalle.

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsauksen työhöjeen mukaan valutuskyllästyksessä nykyisin käytetty polyesterihartsia valmistetaan hartsaamon sekoittamossa kahdesta nestemäisestä pääkomponentista. Pääkomponenttien lisäksi

hartsin sekoitetaan hienojakoista kvartsihiekkaa täyteaineeksi. Kaksikomponenttihartsin A- ja B-komponentit säilytetään 200 litran tynnyreissä hartsivarastossa sopivan viileässä lämpötilassa, jotta komponentit eivät ala reagoimaan itsekseen liian korkean lämpötilan vuoksi. Tynnyrit saapuvat tehtaalle lavalla, jolle mahtuu neljä 200 litran tynnyriä. Lavat täytyy purkaa ja tynnyrit siirtää mahdollisimman nopeasti varastoon, jotta vältetään liiallisilta lämpötilanvaihteluilta. Uusia tynnyreitä saapuu sitä mukaa, kun jo varastossa olevat alkavat käymään vähiin. Tämän lisäksi 200 litran tynnyreiden siirtely päivittäin hartsivarastosta sekoittamoon on hidasta ja jokseenkin työlästä.

Vuosien saatossa hartsit ovat kehittyneet ja markkinoille on tullut uusia vaihtoehtoja. Näistä vaihtoehtoista houkuttelevimpia ovat ns. yksikomponenttihartsit. Tämän opinnäytetyön aiheena onkin tutkia uusia vaihtoehtoisia hartseja tarkemmin erilaisten hartsauksen kannalta oleellisten parametrien osalta. Tässä opinnäytetyössä eniten testauskäytössä olevan yksikomponenttihartsin säiliöt ovat edelleen 200 litran tynnyreitä, mutta tulevaisuudessa nämä säiliöt voisivat olla esimerkiksi 1000 litran säiliöitä, jotka tyhjenisivät huomattavasti hitaammin. Myöhemmin tulevaisuudessa yksikomponenttihartsit voitaisiin myös ohjata suoraan hartsaamon työpisteille, koska yksikomponenttihartsin ei tule täyteainetta, joka jämähtäisi pumppuihin, letkuihin ja putkistoihin, eikä se vaatisi hartsin täydellistä sekoittamista.

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) Chemical Manager -kemikaalirekisterin mukaan uusi, testikäytössä ollut yksikomponenttihartsit ei sisällä terveydelle haitallista styreeniä eikä käytännössä mitään erittäin myrkyllisiä aineita. Uutta hartseja ei pidetä vaarallisena ihmiselle, mutta nestemäisenä se saattaa ärsyttää ihoa sekä aiheuttaa allergioita. Jos hartseja päätyy suun kautta elimistöön, tulee hankkiutua välittömästi lääkäriin. Myöskään ympäristöön ainetta ei tule päästää, koska se on esimerkiksi vesieliöille haitallista. Nykyisin Vaasan ABB:n valutushartsauksessa käytettävä kaksikomponenttihartsit sisältää styreeniä.

Styreeni eli vinyylibentseeni ärsyttää silmiä, ihoa ja hengitysteitä, sekä sen epäillään olevan sikiölle haitallista ja se voi vahingoittaa kuuloa (Työterveyslaitos, 2016).

Pitkäaikainen altistuminen voi aiheuttaa keskushermoston toiminnan häiriintymistä tai jopa

täydellistä keskushermoston lamaantumista. Styreenille altistutaan hengitettäessä styreenipitoisia kaasuja ja ihokontaktissa nestemäisessä muodossa.

1.3 Työn tavoite

Työn tavoitteena on testata ja tutkia uusien valutuskyllästyshartsiens sopivuutta Vaasan IEC LV Motors -tehtaan hartsaamon staattoreiden valutuskyllästyksessä. Uudet, työtä varten tilatut valutuskyllästyshartsit ovat hartsi 2 -niminen yksikomponenttihartsi, hartsi 3 -niminen kaksikomponenttihartsi ja hartsi 4 -niminen kaksikomponenttihartsi. Näistä hartseista valitaan parhaiten Vaasan hartsaamon valutuskyllästysosastolle sopiva kyllästyshartsi, joka korvaa nykyisin käytössä olevan hartsi 1 -kaksikomponenttihartsin. Hartsien sopivuutta tutkitaan staattorien hartsaamisesta, mittaustuloksista ja lopulta sauhuksesta saaduista tiedoista.

2 Sähkökoneet ja hartsaus

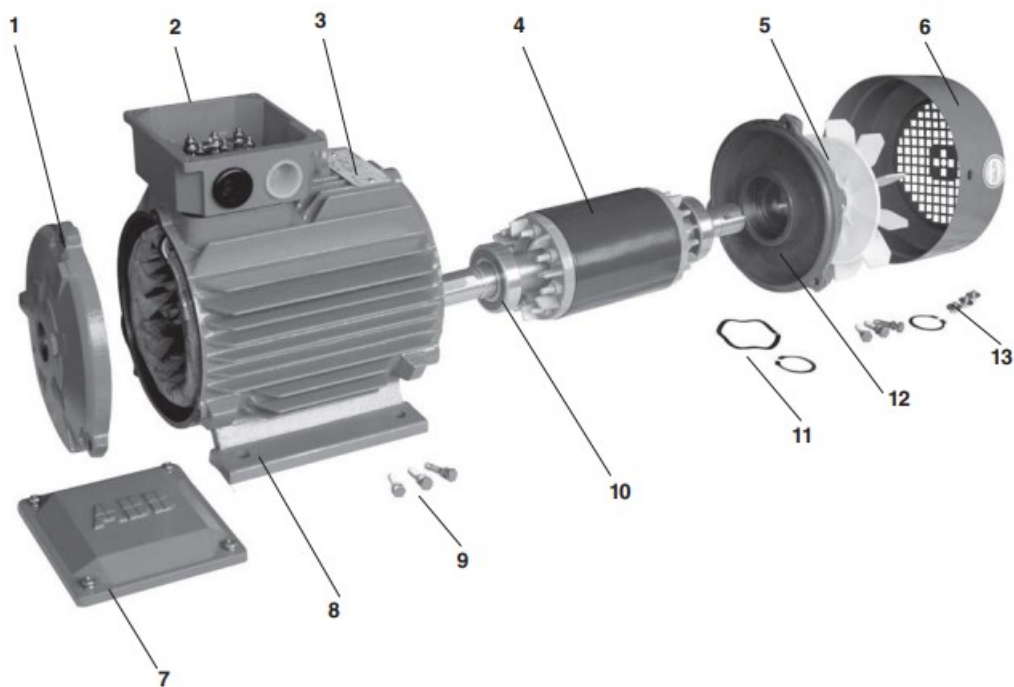
2.1 Sähkökoneet

Sähkökoneiden tehtävä on muuttaa energiaa toiseen muotoon (Korpinen, 2008, s. 1). Sähkömoottori muuttaa sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi, kun taas generaattori muuttaa päinvastoin mekaanisen energian sähköenergiaksi. Useimmat sähkökoneet voivat toimia niin moottorina kuin generaattorinakin.

Sähkökoneita on lukuisia erityyppisiä, mutta kaikkien normaalirakenteisten koneiden perusosat ovat samat (Korpinen, 2008, s. 1). Olennaisimmat sähkömoottorityypit ovat tasavirta-, epätahti- ja tahtikoneet. Tasavirtakone toimii tasavirtalähteen avulla. Epätahti- ja tahtikoneet vaativat vaihtovirtaa toimiakseen, minkä takia niitä kutsutaan myös vaihtovirtakoneiksi. Niiden toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään koneen sisällä. Jokainen konetyyppi valmistetaan vaadittavien ominaisuuksien perusteella, jolloin niiden rakenteet poikkeavat toisistaan.

2.2 Sähkömoottorin rakenne

Kaikissa normaalirakenteisissa sähkökoneissa on pyörivä roottori (pyörijä) akseleineen, staattori (seisoja), laakerikilvet tai laakeripukit ja laakerit (Korpinen, 2008, s. 1). Staattorin sisäpuolella roottoriaukossa sijaitsee roottori, jota laakerit kannattelevat. Laakerit on kiinnitetty laakerikilpiin tai laakeripukkeihin. Laakerit ovat rulla-, kuula- tai liukulaakereita. Laakerikilvet ovat kiinni staattorin rungossa. Roottorin ja staattorin välissä on ilmarako, jotta roottori pyörii vapaasti. Ilmaraosta pyritään tekemään mahdollisimman pieni, koska magneettinen johtokyky ilmalla on paljon matalampi kuin raudalla. Koneen rungon päällä on myös yleensä liitinkotelo, johon syöttökaapeli kytketään. Kuviossa 1 nähdään sähkömoottorin räjäytyskuva, josta erottuu hyvin sähkömoottorin rakenne.



1	D-pään laakerkilpi	8	Staattori
2	Liitännäkotelo	9	Pultti
3	Arvokilpi	10	Laakeri
4	Roottori	11	Aaltomuotoinen jousirengas
5	Tuuletin	12	N-pään laakerkilpi
6	Tuulettimen suojus	13	Ruuvi
7	Liitännäkotelon kansi		

Kuvio 1. Sähkömoottorin räjäytyskuva, josta näkee pienikokoisen sähkömoottorin koko rakenteen (ABB, 2004).

2.2.1 Staattori

Staattori eli seisoja on sähkömoottorin kiinteä ja aktiivinen osa (Korpinen, 2008, s. 1).

Kuvassa 1 nähdään muutama esimerkki hartsausta vaille valmiista staattoreista.

Staattoripaketin runko rakentuu peräkkäin asetetuista sähköteräslevyistä. Staattorilevyistä muodostuvan paketin uriin käämitään kuparilangasta tehdyt vyyhdet. Vyyhdet ja staattorilevyt on eristetty toisistaan uraeristeillä, jotka asetetaan ura-aukkoihin. Johtimien tueksi ja johtimien purkautumisen estämiseksi voidaan laittaa vielä uratikut tai urakiilat ura-aukkojen suulle. Käämitys pidetään yhtenäisenä eristeellä ja sidontanauhalla. Lopuksi staattoripaketti hartsaataan ennen runkoon puristamista. Hartsaamisesta kerrotaan lisää luvussa Valutuskyllästys (Luku 2.3.4). Staattorin sähköisiä ominaisuuksia voidaan

muokata esimerkiksi muuttamalla sähkölevyjen pinta-alaa tai muotoa tai lisäämällä niihin seosaineita.



Kuva 1. Eri kokoisia staattoreita odottamassa hartsausta (Yritys, 2023).

2.2.2 Roottori

Roottori eli pyörijä on sähkömoottorin toinen aktiivinen osa (Korpinen, 2008, s. 1–2). Staattoripaketin tavoin roottori rakentuu myös peräkkäin asetetuista rautalevyistä ja kummassakin päässä on päätylevy. Rautalevyjen ulkopinnalla on urat, joihin sijoitetaan käämityksenä toimivat alumiinisauvat. Alumiinisauvojen kummatkin päät suljetaan oikosulkurenkaalla. Roottoripaketin ulkohalkaisija sorvataan sopivan kokoiseksi. Roottorin rungon sisälle asetetaan akseli. Mikäli roottori on epätasapainossa, voidaan se tasapainottaa erilaisin menetelmin. Roottorin tasapainotus on tärkeää, sillä epätasapainossa oleva roottori aiheuttaa moottorin tärinää. Myös roottorin sähköisiä ominaisuuksia voidaan muokata levyjen muotoa vaihtamalla, erilaisilla seosaineilla sekä sauvojen lukumäärää tai muotoa muuttamalla.

2.3 Staattorin hartsaaminen

2.3.1 Hartsauksen tarkoitus

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsauksen työohjeen mukaan hartsaus tarkoittaa staattoripaketin käämin ja eristeiden kyllästystä hartsilla. Hartsin tarkoituksena on käämin suojaaminen lämpötilanvaihteluilta, kosteudelta, kemikaaleilta ja mekaaniselta rasitukselta, kuten värinältä ja kulumiselta. Hartsi estää kuparilankojen hankaamisen toisiinsa, mikä vähentää kulumisen lisäksi oikosulkujen vaaraa. Hartsi parantaa käämin eristeiden jännitekestoisuutta. Hartsi täyttää myös staattorin levyrungon ja käämin väliset ilmataskut, jolloin oikosulku- ja osittaispurkausmahdollisuudet rungon ja käämin välillä katoavat, lämpö saadaan johdettua käämistä runkoon tehokkaammin ja staattorin eristysvastus kasvaa.

2.3.2 Hartsin valinta ja mittaukset

Vaasan ABB:n IEC LV Motors -tehtaan tutkimus- ja kehitysosaston pääinsinööri M. Takalan (henkilökohtainen tiedonanto, 22.3.2023) mukaan valittaessa sopivaa kyllästyshartsia staattorille tarkastellaan hartsin mekaanista lujuutta ja lämmönkestävyyttä. Toisaalta hartsin viskositeetti ja reagoimisaika ovat myös tärkeitä kriteerejä, koska ne vaikuttavat suoraan hartsaustuotannon nopeuteen. Kyllästyshartsin ei tarvitse kestää kaikkia kemiallisia aineita, koska tarvittaessa staattori voidaan suojata esimerkiksi korroosiosuojalakalla. Lopulta näiden kriteerien täyttymisen jälkeen valitaan matalapäästöisin ja terveydelle haitattomin kyllästysharts koetestejä varten. Koetesteistä nähdään, kuinka kyllästysharts reagoi oikeissa olosuhteissa staattorin käämityksen pinnalla. Mekaanista lujuutta eli sidoslujuuutta voidaan mitata venyttämällä hartsattua käämilankaa sitä varten suunnitellulla laitteella. Staattorin hartsaus jälkeen koetesteissä suoritetaan erilaisia mittauksia, joilla voidaan havaita, täyttääkö hartsi kaikki vaatimukset. Näihin koemittauksiin kuuluvat osittaispurkausmittaus ja lämpenemäajo.

2.3.3 Osittaispurkaukset

Osittaispurkausmittaus on yksi tärkeimmistä hartsatuille staattoreille tehdyistä mittauksista. Jos staattori ei läpäise osittaispurkausmittauskoetta, todennäköisesti staattorin kääminnäissä tai hartsauksessa on mennyt jotain vikaan. Osittaispurkauksen mittaamisesta kerrotaan enemmän luvussa Osittaispurkausmittaukset (Luku 4.3).

Osittaispurkauksella tarkoitetaan sähköistä purkausta, joka ei täysin täytä kahden johtavan elektrodin välistä tilaa (IRISS, 2019). Osittaispurkauksia tapahtuu keski- ja korkeajännitteisissä sähkölaitteissa sijaitsevissa kahden sähkökomponentin välisissä liitoskohdissa, kuten esimerkiksi kiinteissä eristyksissä, eristeiden pinnalla ja nestemäisissä eristyksissä olevissa ilmakuplissa tai ilmataskuissa. Osittaispurkaukset aiheuttavat kemiallisia, mekaanisia tai kuumuudesta johtuvia vaurioita. Mikäli osittaispurkaukset jäävät havaitsematta, sähkölaitteille voi aiheutua suuria vaurioita, jotka voivat johtaa vakaviin turvallisuusriskeihin, kuten sähkölaitteiden tuleen syttymiseen tai valokaariin.

2.3.4 Valutuskyllästys

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsauksen työohjeen mukaan valutuskyllästyksellä tarkoitetaan staattorin hartsaamista työntekijän toimesta. Valutuskyllästyksessä työntekijä käyttää osittain automatisoitua hartsauskoneita. Vaasan ABB:n hartsaamon valutuskyllästysosastolla on käytössä viisi erilaista hartsauskoneita. Esimerkki hartsauskoneesta on esitetty kuvassa 2. Jokainen hartsauskone on suunniteltu tietyn kokoisille staattoreille. Hartsauskoneet ovat toiminnaltaan myös jokseenkin erilaisia keskenään, mutta koko valutuskyllästysprosessi on kaikissa samanlainen. Staattorin valutuskyllästykseen kuuluu joukko erilaisia työvaiheita, joita ovat staattorin esivalmisteluvaihe, valutusvaihe, hyytelöitymisvaihe, kovetusvaihe, viimeistelyvaihe ja staattorin uuniin laitto.

ABB Oy:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsauksen työohjeen mukaan esivalmisteluvaiheessa staattori nostetaan staattorille suunnitellulta kuormalavalta

siltanosturin avulla ja lasketaan esivalmistelupöydälle. Siltanosturissa on koukkuvaaka, jolla punnitaan staattorin paino ennen hartsaamista ja hartsaamisen jälkeen. Tällä tavoin saadaan selville hartsijäämä, eli paljonko hartsia on kovettunut käämin ympärille.

Esivalmistelupöydällä staattori valmistellaan hartsaamista varten. Staattorin kytkentäpäähän asennetaan tarvittavat liittimet. Vastakkaiseen kääminpäähän kiedotaan kreppipaperi ja rungon sisäpinnan reunaan ja uriin kittimassa tiiviiden parantamiseksi. Asennusten jälkeen staattori siirretään siltanosturilla hartsaus koneeseen.

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsaus työhjeen mukaan staattori kytketään hartsaus koneeseen siten, että tasavirta saadaan kulkemaan koko käämin läpi tasaisen lämpenemisen vuoksi. Staattori kallistetaan 0–90 asteen kulmaan vaakatasoon nähden ja esilämmitetään tasavirralla valutuslämpötilaan, joka on hieman staattorin koosta ja napaisuudesta riippuen noin 20–150°C. Staattori laitetaan pyörimään hartsaus koneessa vastapäivään. Staattorin pyörimisellä ja staattorin korkean kallistuskulman avulla hartsi saadaan valumaan koko staattorin läpi suhteellisen nopeassa ajassa.

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsaus työhjeen mukaan valutusvaiheessa työntekijä valuttaa kannulla kaatamalla kyllästyshartsia ulomman kääminpään sisäpinnalle. Tässä vaiheessa kreppipaperi muodostaa kuppimaisen reunan kääminpään ympärille, mikä mahdollistaa kyllästyshartsin pysymisen käämin sisäpinnalla. Tästä kyllästyshartsin valuu hiljalleen staattorin levyrungon sisään uria pitkin ja siitä toiseen kääminpäähän kastellen käämilangat myös staattorin sisäpuolelta. Hartsin valuessa staattorin kytkentäpäästä reilusti lasketaan staattorin kallistuskulma lähemmäs vaakatasoa, noin 0–60 asteeseen, ja kastellaan kytkentäpää kauttaaltaan. Tämän jälkeen kreppipaperi poistetaan ja kastellaan ulompi kääminpää.

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsaus työhjeen mukaan valutusvaiheen jälkeen staattori asetetaan 0–40 asteen kulmaan ja lämmitetään käämi noin 50–200°C:n lämpötilaan. Tässä lämpötilassa hartsi alkaa hyytelöityä. Hyytelöitymisvaiheessa kaadetaan vielä viimeinen kerta hartsia molempiin päihin, jotta saadaan käämilangan pintaan hyvä kerros hartsia juuri ennen kyllästyshartsin kovettumista.

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsauksen työohjeen mukaan hyytelöitymisvaiheen jälkeen käämi lämmitetään 60–200 °C lämpötilaan, jolloin hartsi kovettuu. Kovetusvaihetta jatketaan vähintään 1–60 minuuttia staattorin koosta riippuen. Kovetusvaiheessa staattorin rungon ulkopinnasta puhdistetaan hartsivalumat räteillä. Kovetusvaiheen jälkeen staattorin kytkennät avataan hartsauskoneesta ja staattori siirretään siltanosturilla viimeistelypöydälle. Viimeistelypöydällä staattorin liittimet irrotetaan ja staattori puhdistetaan tinnerillä, räteillä, puhdistustyökaluilla ja paineilmalla. Puhdistuksen jälkeen staattorin paino mitataan koukkuvaa'alla hartsijäämää varten ja staattori siirretään uuniin. Uunissa hartsi kovettuu täysin myös staattorin sisäpuolelta noin 100–250 °C lämpötilassa. Uunissa staattori on vähintään 0–600 minuutin ajan.



Kuva 2. Hartsauskone Thumm ja staattori valmiiksi kytkettynä hartsaamista varten (Yritys, 2022).

2.3.5 Hartsausvälineet ja -työkalut

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsauksen työohjeen mukaan hartsausvälineinä käytetään 20 litran peltiämpäreitä ja 2 litran muovikannuja. Hartsinsekoittamossa valmistettu kyllästyshartsi lasketaan peltiämpäreihin, jotka kuljetetaan hartsauskoneelle. Peltiämpäristä kaadetaan muovikannuun kyllästyshartsia, jonka työntekijä kaataa käämin

päälle. Valutushartsauksessa käytetään myös muita työkaluja ja välineitä, kuten puhdistustyökaluja, rättejä, paineilmapuhaltimia ja paineilmakäyttöisiä työkaluja.

2.3.6 Hartsaamon suojaruusteet ja yleinen turvallisuus

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsauksen työohjeen mukaan hartsaamon valutuskylästäytösosastolla on käytössä monenlaisia pakollisia suojaimeja. Kaikilla valutuskylästäytösosastolla liikkuvilla henkilöillä täytyy olla turvakengät, suojalasit ja kuulonsuojaimet. Näiden lisäksi hartsaamon työntekijöillä sekä hartsauskoneiden ääreen saapuvilla henkilöillä täytyy olla moottoroitu hengityssuojain. Trukkia operoivien työntekijöiden täytyy käyttää trukin turvavyötä. Hartsaamon työntekijöiden muihin erityissuojavarusteisiin kuuluu pitkähihainen paita, vedenpitävät ja tulenkestävät housut sekä erilaiset suojakäsineet. Suojakäsineinä työntekijä käyttää viiltosuojattuja hanskoja ja hartsatessa nitrilikumihanskoja. Nitrilikumihanskat suojaavat työntekijää hartsilta ja muilta hartsaamossa käytössä olevilta kemikaaleilta, sekä ne kestävät hyvin staattoripaketin kuumia pintoja.

2.3.7 Hartsit 1

Hartsit 1 -kaksikomponenttihartsia käytetään Vaasan ABB:n hartsaamon valutuskylästäytöksessä (Elantas Electrical Insulation, 2017a, 2017b). Tämä hartsit koostuu kahdesta nestemäisestä pääkomponentista nimeltään A ja B komponentit. Näiden komponenttien sekaan sekoitetaan kvartsihiekkaa täyteaineeksi. Sekoitussuhteena on yksinkertaisesti 33 % jokaista komponenttia. Molemmat komponenttiseokset on luokiteltu vaarallisiksi niin eliöille kuin ympäristöllekin. Seosten neste sekä höyry ovat myös herkästi syttyviä. Pelkästään komponenttien höyryn hengittäminen on vaarallista komponenttien sisältämän styreenin ja muiden ainesosien takia. Kosketuksessa seokset ärsyttävät ihoa ja voimakkaasti silmiä. Pitkäaikaisesti hengitettynä ja varsinkin nieltynä seokset vahingoittavat sisäelimiä (mt.).

2.3.8 Harts 2

Harts 2 -yksikomponenttiharts 2 on tässä opinnäytetyössä eniten testattuna ollut uusi kyllästysharts 2. ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) Chemical Manager -kemikaalirekisterin mukaan tähän harts 2iin ei sekoiteta mitään muita aineita, vaan se on heti käyttövalmis kyllästysharts 2. Harts 2 -kyllästysharts 2 on luokiteltu vaarattomaksi. Harts 2in yksi ainesosa saattaa aiheuttaa allergisia reaktioita. Harts 2 on kaikesta huolimatta syytä pitää loitolla ihokosketuksesta, ja harts 2in höyryä tai sumua ei tule hengittää. Tämä harts 2 on jo pelkästään vaarattomuutensa ja helppokäyttöisyytensä vuoksi varteenotettavan hyvillä ominaisuuksilla varustettu kyllästysharts 2. Harts 2in viskositeetti on suhteellisen matala, sekä harts 2illa on miesto haju. Harts 2illa on hyvä sidoslujuus ja korkea lämmönkestävyys kovetettuna. Harts 2 säilyy käyttövalmiina avatussa säiliössä harts 2intoimittajan mukaan jopa 12 kuukautta.

2.3.9 Harts 3

Harts 3 -kaksikomponenttiharts 3 on toinen tässä opinnäytetyössä testattu uusi kyllästysharts 3. ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) Chemical Manager -kemikaalirekisterin mukaan harts 3 -kyllästysharts 3 koostuu yhdestä pääkomponentista, johon lisätään erillistä katalysaattoriainetta. Katalysaattoriaine mahdollistaa harts 3in kovettumisen tarpeeksi korkeassa lämpötilassa. Harts 3 -kyllästysharts 3iin ei sekoiteta täyteainetta. Itse harts 3 sekä katalysaattoriaine ja niiden höyryt on luokiteltu vaarallisiksi niin eliöille kuin ympäristöllekin. Katalysaattoriaine on myös palovaarallinen kuumennettaessa. Harts 3illa on erinomainen sidoslujuus kovetettuna, korkea stabiliteetti, matala viskositeetti ja miesto haju.

2.3.10 Harts 4

Harts 4 -kaksikomponenttiharts 4 on kolmas tätä opinnäytetyötä varten tilattu uusi testiharts 4. ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) Chemical Manager -kemikaalirekisterin mukaan harts 4 -kyllästysharts 4 koostuu yhdestä pääkomponentista, johon lisätään erillistä katalysaattoriainetta. Katalysaattoriaine toimii tässä kyllästysharts 4issa samalla tavalla kuin em. harts 3 -kyllästysharts 4issa. Harts 4 on luokiteltu vaaralliseksi eliöille ja

katalysaattoriaine eliöiden lisäksi ympäristölle. Molemmat aineet ovat palovaarallisia kuumennettaessa. Hartsilla on hyvä sidoslujuus ja korkea lämmönkestävyys kovetettuna.

2.3.11 Hartsivarasto

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsauksen työohjeen mukaan hieman tavallista huonelämpötilaa viileämmässä hartsivarastossa säilötään 200 litran A- ja B-kyllästyshartsikomponenttitynnyreitä, maaleja, erilaisia teollisuusrasvoja, liuottimia ja muita nestemäisiä aineita. Hartsivaraston ilman lämpötila pysyy automatiikan avulla tasaisena ja viileänä, sillä liian korkea lämpötila sekä suuret lämpötilanvaihtelut voivat aiheuttaa hartsikomponenttitynnyreiden räjähdysvaaran.

2.3.12 Hartsinsekoittamo

ABB:n (sisäinen tietolähde, 20.1.2023) hartsauksen työohjeen mukaan hartsinsekoittamossa sekoitetaan valutushartsauksessa käytettävä kyllästyshartsi. Hartsi sekoitetaan automatisoitua hartsinsekoitinta käyttäen. Kuvassa 3 esiintyy Vaasan ABB:n hartsaamon hartsinsekoitin. Työntekijä määrittelee, montako 20 kg:n annosta hartsia tarvitaan. Yksi annos vastaa yhtä peltiämpärillistä. Työntekijä vaihtaa tarpeen tullen hartsinsekoittimesta tyhjän kvartsihiekkasäkin sekä tyhjät A- ja B-komponenttitynnyrit täysinäisiin. Hartsinsekoitin vaihdetaan kahden tai kolmen kuukauden välein puhdistusta varten. Hartsinsekoittamossa valmistetaan myös staattorin rungon uriin laitettava tiiviyttä parantava kvartsihiekkaparafiinikittimassa. Kittimassa valmistetaan sekoittamalla parafiiniöljyä ja kvartsihiekkaa sekaisin. Hartsinsekoittamossa on käytettävä hengityksensuojaimia.



Kuva 3. Hartsinsekoitin. Vasemmassa reunassa hartsinsekoittimen sähkökeskus. Sähkökeskuksesta oikealle valkoinen kvartsihiekkasäkki, keskellä A- ja B-kyllästyshartsikomponenttitynnyrit. Oikeassa reunassa hiekan ja hartsikomponentit sekoittava hartsinsekoitin (Yrittys, 2023).

3 Tutkimuksen suunnittelu ja toteutus

3.1 Tutkimuksen suunnittelu

Tutkimuksen suunnittelu aloitettiin pohtimalla Vaasan ABB:n hartsausosaston kehittämiskohteita. Vaasan ABB:n hartsaamon valutuskyllästysosastolla on käytössä kaksikomponenttiharts, johon lisätään kahden nestemäisen ainesosan lisäksi vielä täyteaineeksi hienojakoista kvartsihiekkää. Tämän kaksikomponenttihartsin ja täyteaineen yhdistäminen ja tasaiseksi sekoittaminen vaativat ison sekoituslaitteiston, jossa on useita rikkoutuvia, tukkeutuvia ja likaantuvia osia. Tämän lisäksi käytössä oleva kaksikomponenttiharts sisältää terveydelle haitallista styreeniä ja täyteaineena käytettävä kvartsihiekkä on niin hienojakoista, että sen pöly aiheuttaa myös terveysriskejä hengitettynä.

Aiheesta on tehty aikaisemmin Vaasan ABB:n hartsaamossa tutkimus, jonka tuloksista voitiin päätellä, että siinä testikäytössä ollut hartsi ei soveltunut valutuskyllästykseen. Tämän aikaisemman tutkimustuloksen perusteella etsittiin paremmin soveltuvia valutuskyllästyshartseja, joita tutkitaan tässä työssä.

3.2 Tutkimuksen toteutus

Tutkimus toteutettiin yhteistyössä ABB:n IEC LV Motors -yksikön sekä hartsitoimittaja 1:n kanssa. Hartsitoimittaja 1:n asiantuntijoita saapui Euroopasta esittelemään hartseja sekä valitsemaan sopivat parametrit kullekin hartsille ja staattorille. Hartsitoimittaja 1:n asiantuntijat vierailivat Vaasassa kolme kertaa testihartsausten aikana. He seurasivat hartsausprosessia yhteensä muutaman päivän ajan.

Tutkimus aloitettiin tilaamalla hartsitestejä varten 22 kappaletta kahden kokoisia staattoreita, jotka olivat pelkästään testihartsausta varten valmistettuja. Staattorit olivat runkokooltaan 280 ja 355, ja molempia kokoja tilattiin 11 kappaletta. Myöhemmässä vaiheessa, kun uusilla hartseilla hartsattujen staattoreiden mittaustulokset selvisivät, tilattiin vielä kaksi runkokoon 450 staattoria testejä varten.

Staattoreiden tilauksen jälkeen valittiin testikäyttöön kolme ominaisuuksiltaan erilaista uutta hartsia jo käytössä olleen hartsin lisäksi. Valitut hartsit olivat nykyisin käytössä oleva hartsi 1 -kaksikomponenttihartsi referenssimittauksia varten, hartsi 2 - yksikomponenttihartsi, hartsi 3 -kaksikomponenttihartsi sekä hartsi 4 - kaksikomponenttihartsi.

Jo ennen testihartsausten aloittamista päätettiin, että hartsi 4 -kaksikomponenttihartsia ei testata valutuskyllästyksessä sen muita testihartseja huonompien ominaisuuksien vuoksi. Ennen testihartsausta pystyttiin myös sanomaan, että hartsi 3 - kaksikomponenttihartsikaan ei täytä kaikkia Vaasan ABB:n hartsausosaston vaatimia valutuskyllästyshartsin kriteereitä. Hartsi 3 -kaksikomponenttihartsi vaati toisen nestemäisen komponentin kovettuakseen kiinteäksi hartsiksi riittävän korkeassa lämpötilassa. Tästä ylimääräisestä aineiden sekoittelusta tutkimuksessa juuri yritettiin päästä eroon. Tämän lisäksi kovettumisen mahdollistava katalysaattoriaine oli terveydelle haitallista.

Näistä huolimatta hartsi 3 -kaksikomponenttihartsia testattiin kolmessa runkokoon 355 staattorissa, kahden staattorin kohdalla niin, että katalysaattoriainetta oli 1 % hartsissa ja yhden staattorin kohdalla 2 %.

Runkokoon 280 staattoreita hartsattiin kaksi kappaletta referenssiksi hartsi 1 - kyllästyshartsilla, toinen kokonaan ilman täyteainetta testiksi ja toinen 33 %:n täyteaineella nykyisen menetelmän tavalla. Runkokoon 355 staattoreita hartsattiin referenssiksi hartsi 1 -kyllästyshartsilla kolme kappaletta 33 %:n täyteaineella nykyisen menetelmän tavalla.

Loput yhdeksän runkokoon 280 staattoria ja viisi runkokoon 355 staattoria hartsattiin hartsi 2 -yksikomponenttihartsilla ilman täyteainetta muuttaen eri vaiheissa kallistuskulmia, valutus-, hyytelöinti- ja kovetuslämpötiloja sekä valutus-, hyytelöinti- ja kovetusaikoja. Näin saatiin erilaisilla parametreilla hartsattuja staattoreita, joista mittaustulosten avulla selvitettiin parhaimmat parametrit. Myöhemmässä vaiheessa tilatuista ja hartsatuista runkokoon 450 staattoreista ensimmäinen hartsattiin hartsi 2 -yksikomponenttihartsilla ja toinen nykyisin käytössä olevalla hartsi 1 -kaksikomponenttihartsilla.

Hartsaukset tehtiin Vaasan ABB:n IEC LV Motors -yksikön hartsaamossa. Runkokoon 280 ja 355 staattorit hartsattiin Thumm-hartsauskoneella ja runkokoon 450 staattorit hartsattiin NewTech-hartsauskoneella. Ennen hartsausta ja hartsauksen jälkeen staattorien massat punnittiin koukkuvaa'alla. Hartsauksen aikana mitattiin hartsien viskositeetti ja hartsin läpivalumiseen kulunut aika sekuntikellolla. Hartsauksen ja uunituksen jälkeen staattoreille tehtiin osittaispurkausmittaukset. Osittaispurkausmittausten jälkeen staattoreista valittiin osa auki sahaamista varten. Sahaamalla staattorit auki voidaan tarkastella, kuinka hyvin hartsi on täyttänyt ilma-aukot staattorin sisäpuolelta, ja voidaan havaita, onko hartsi valunut kunnolla staattorin urista käämin pinnalle.

4 Hartsitestit ja tulokset

4.1 Hartsien valmistus

Hartsit saapuivat hyvissä ajoin ennen hartsaamiseen varattuja päiviä. Hartsit varastoitiin hartsivarastoon odottamaan lähempää testausajankohtaa. Hartsit 3 -kaksikomponenttihartsia varten tarvittiin porakoneeseen liitettävä sekoitusvispilä ja tarkka vaaka. Vaa'an avulla mitattiin tarkasti oikea määrä katalysaattoriainetta sekoitettavaksi hartsin sekaan. Sekoitusvispilän avulla katalysaattoriaine sekoitettiin tasaisesti hartsin sekaan. Uusien hartsien valmistamiseen kului paljon aikaa, kun ottaa huomioon myös välineiden esille ottamisen, välineiden puhdistamisen ja tarkkoihin mittauksiin kuluneet ajat.

Testihartsit pumpattiin käsipumpuilla tynnyreistä pienempiin ämpäreihin, joilla hartsit kuljetettiin hartsauslaitteen luo. Hartsit 1 -kaksikomponenttihartsit täyteaineen kanssa sekoitettiin hartsinsekoittamon omalla sekoituslaitteella. Yhtä testistaattoria varten valmistettu hartsit 1 -kaksikomponenttihartsit ilman täyteainetta saatiin myöskin sekoitettua samalla hartsinsekoituslaitteella.

4.2 Staattoreiden hartsaus

4.2.1 Runkokoon 280 staattoreiden hartsaus

Kaikki 11 kappaletta runkokoon 280 staattoria hartsaattiin Thumm-hartsaus koneella. Staattoreiden hyvin lyhyen rungon vuoksi jouduttiin kunnostamaan vanha lyhyempi kumituurna, jotta kumituurna ei olisi liian pitkä ja täten vaikeuttaisi huomattavasti hartsin pääsyä kytkentäpään käämin sisäpinnalle. Uusilla hartseilla hartsaattaessa käytettiin hartsitoimittaja 1:n antamia lämpötiloja, valutuskuilimia sekä hyytelöinti- ja kovetusajoja. Referenssihartsilla hartsaattaessa käytettiin hartsaus koneella normaalisti käytettyjä parametreja.

Runkokoon 280 staattoreiden valutusajat olivat referenssihartsin kohdalla samat noin 2 minuuttia molemmissa. Harts 2 -yksikomponenttihartsilla hartsattujen staattoreiden valutusajat olivat kaikkien kohdalla vähän reilu 5 minuuttia.

Hartsauksessa valutuslämpötila oli harts 2 -yksikomponenttihartsilla aluksi 20–200°C, josta se laskettiin lopulta 20–150°C. Hyytelöintilämpötilat olivat aluksi hyytelöinti 1:ssä 40–200°C ja hyytelöinti 2:ssa 50–200°C, josta ne asettuivat lopulta 40–200°C:seen ja 45–200°C:seen. Kovetuslämpötilat olivat aluksi korkeammat, kovetus 1:ssä 60–200°C sekä kovetus 2:ssa ja 3:ssa 65–200°C. Lopulta ne asetettiin 50–200°C:seen ja 60–200°C:seen.

Hyytelöintiäika oli aluksi lyhyempi, yhteensä 1–20 minuuttia, josta se nostettiin heti toisen staattorin kohdalla lopulliseen 1–30 minuuttiin. Kovetusaika oli aluksi yhteensä 2–60 minuuttia, josta se vakiintui lopulta 2–40 minuuttiin. Kallistuskulmia säädeltiin alkuun hieman normaalista poiketen nostamalla kallistuskulma viimeisen kovetusvaiheen kohdalla tavallista korkeammaksi. Lopulta kallistuskulma vakiinutettiin testihartsinkin kohdalla normaalin kaltaiseksi 280 runkokoon staattoreissa. Kokonaisprosessiaika oli referenssihartsilla noin 23 minuuttia riippumatta siitä, oliko hartsissa täyteainetta vai ei. Harts 2 -yksikomponenttihartsilla kokonaisprosessiaika vaihteli hieman, mutta pysytteli kuitenkin 37–40 minuutin kohdilla.

Täytösprosentit vaihtelivat staattoreiden kohdalla jokseenkin. Ensimmäisen staattorin kohdalla, jossa käytettiin referenssihartsia täyteaineen kanssa, täytösprosentti oli korkein 8,8 %. Toisen staattorin, jossa käytettiin samaa referenssihartsia, mutta ilman täyteainetta, täytösprosentti oli 7,0 %. Ero täytösprosentteissa johtuu suoraan puuttuvasta täyteaineesta, jonka tiheys on suurempi kuin polyesterihartsin tiheys. Täytösprosentti lasketaan jakamalla staattoriin kertynyt hartsimassa staattorin käämin eli kuparin massalla.

4.2.2 Runkokoon 355 staattoreiden hartsaus

Myös kaikki 11 kappaletta runkokoon 355 staattoreista hartsattiin Thumm-hartsauskoneella. Runkokoon 355 staattoreista kolme ensimmäistä hartsattiin vahingossa toisen hartsaajan toimesta normaalisti käytössä olevalla harts 1 -kaksikomponenttihartsilla. Näitä kolmea staattoria käytettiin sitten referenssihartsilla

hartsattuina staattoreina mittauksissa. Näiden staattoreiden hartsaamisesta ei tehty muistiinpanoja. Ainoastaan tuotannonohjauksessa käytetyllä hartsausprosessia valvovalla tietokoneohjelmalla näkyvät lämpötilat ja prosessiajat voitiin ilmoittaa tarkasti. Näiden kolmen ensimmäisen referenssistaattorin jälkeen kokeiltiin hartsi 3 -kaksikomponenttihartsia ensin 1 %:n katalysaattoriainesuhteella kahdella staattorilla ja lopuksi kolmannen staattorin kohdalla 2 %:n katalysaattoriainesuhteella.

1 %:n katalysaattoriainesuhteella hartsattujen staattoreiden valutusaika oli noin 22 minuuttia ja 2 %:n katalysaattoriainesuhteella hartsatun staattorin noin 19 minuuttia. Hartsi 2 -yksikomponenttihartsilla hartsatun staattorin valutusaika oli ensimmäisen staattorin kohdalla poikkeavalla tavalla korkeampi, noin 18,5 minuuttia. Tämä saattoi johtua siitä, että läpi valunutta hartsia ei havaittu heti kunnolla hartsin melko läpinäkyvän värin ja liian pimeän hartsauskopin vuoksi. Toinen syy saattoi olla tiheämpi eriste tai tiukemmat urat. Muiden hartsi 2 -yksikomponenttihartsilla hartsattujen staattoreiden valutusaika oli noin 15–16 minuuttia.

Ensimmäisen staattorin kohdalla lämpötilat olivat 10°C korkeampia kuin muiden runkokoon 355 staattoreiden kohdalla, pois lukien referenssistaattorit. Nämä lämpötilat olivat turhan korkeat, ja hartsi alkoi reagoimaan liian aikaisin. Loppujen seitsemän staattorin kohdalla lämpötilat vakiinnettiin niin, että valutuslämpötila oli sama 20–150°C kuin runkokoon 280 staattoreilla. Hyytelöintilämpötilat olivat hyytelöinti 1:ssä 40–200°C ja hyytelöinti 2:ssa 50–200°C. Kovetuslämpötilat kovetus 1:ssä 60–200°C ja kovetus 2:ssa ja 3:ssa 65–200°C.

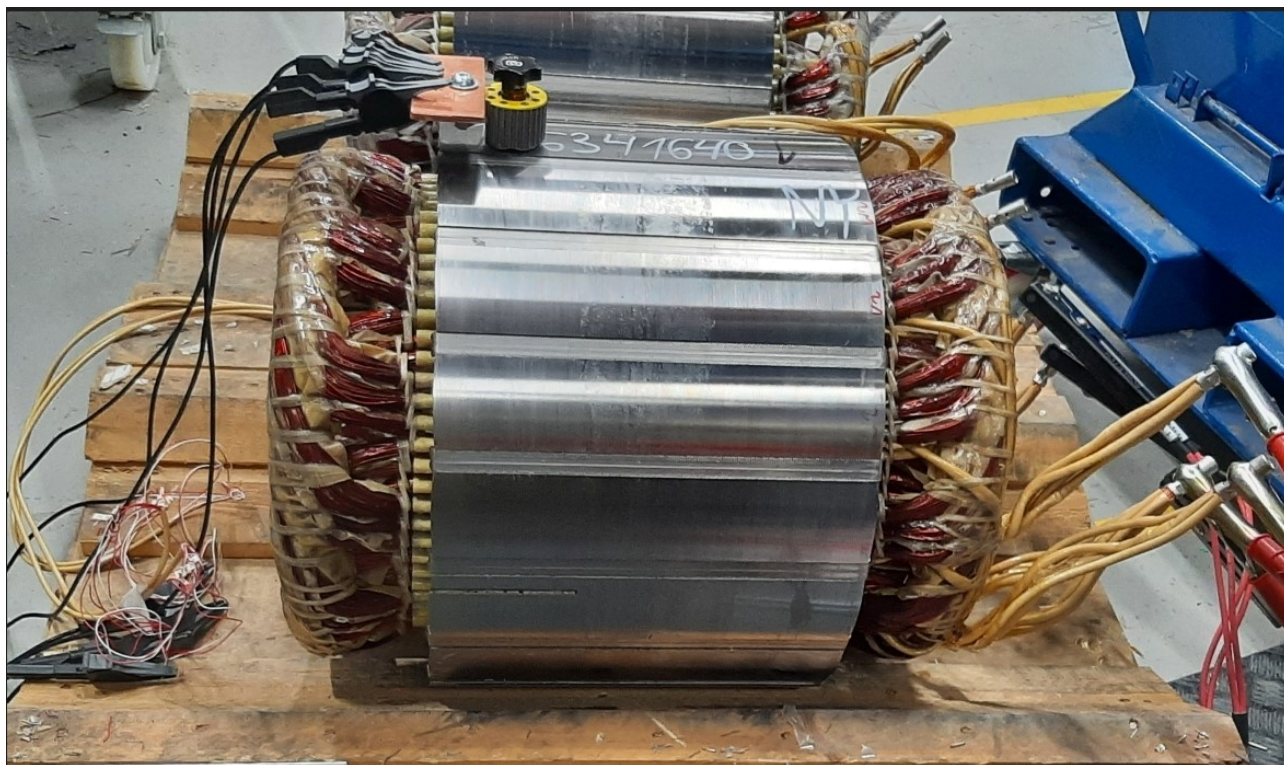
Hyytelöintiaikoja muutettiin jonkin verran eri staattoreiden kohdalla. Ensimmäisen hartsi 3 -kaksikomponenttihartsilla 1%:n katalysaattoriainesekoituksella hartsatun staattorin kohdalla testattiin 1–20 minuutin kokonaishyytelöintiaikaa. Tämä tehtiin siitä syystä, että lämpötilat olivat tämän staattorin kohdalla 10°C korkeammat kuin seuraavaksi hartsattujen staattoreiden kohdalla. Tästä siirryttiinkin seuraavaksi 1–25 minuutin hyytelöintiaikaan matalammalla lämpötilalla. Kahden viimeisen staattorin kohdalla testattiin 1–23 minuutin hyytelöintiaikaa. Kovetusaikoja muutettiin melko paljon, koska 355 runkokoon staattoreiden kohdalla havaittiin, että staattorin sisälle jää hieman ylimääräistä, vielä nestemäistä hartsia, joka haluttiin staattorista ulos ennen kuin staattoria alettiin siirtämään viimeistelypöydälle ja uuniin. Tämän vuoksi kokonaiskovetusaikaa nostettiin 1–40

minuutista 2–60 minuuttiin ja kovetus 3:n kohdalla kallistuskulma nostettiin takaisin jyrkemmäksi, jotta ylimääräinen hartsi valuisi ulos staattorista.

Kokonaisprosessiajat runkokoon 355 staattoreiden kohdalla olivat referenssihartsilla hartsattujen staattoreiden kohdalla 42–48 minuuttia. Tarkkaa aikaa ei pystytty laskemaan, koska sitä ei mitattu em. vahingon vuoksi. Hartsi 3 -kaksikomponenttihartsilla hartsattujen staattoreiden kohdalla kokonaisprosessiajat olivat 52–55 minuuttia. Hartsi 2 -yksikomponenttihartsilla hartsattujen staattoreiden kokonaisprosessiajat vaihtelivat hieman enemmän. Lyhimmillään kokonaisprosessiajat olivat hieman alle 48 minuuttia ja pisimmillään noin 52 minuuttia.

4.3 Osittaispurkausmittaukset

Osittaispurkausmittaukset suoritettiin Schleich MTC2 12kV-R-PD -laitteella (Nikkola, 2020, s. 21–22). Mittalaite kytkettiin staattoriin ja mittalaite alkoi syöttämään staattoriin nopean nousuajan syöksyjännitepulsseja käyttäen step-by-step-metodia. Jännitettä nostettiin 100 voltia kerralla, ja yhdellä jännitetasolla oli 10 pulssia. Pulssien syöttäminen aloitettiin 1000 voltista ja sitä jatkettiin aina 10000 volttiin saakka. Osittaispurkauksen purkausrajaksi asetettiin 25 millivoltia. Mittalaite antoi lukeman kohtaan PDIV (Partial Discharge Inception Voltage), kun mittalaite havaitsi sille asetetun purkausrajan ylittyvän. Jännitteen nostamista jatkettiin, kunnes mittalaite antoi lukeman kohtaan RPDIV (Repetitive Partial Discharge Inception Voltage). Tämän jälkeen jännitettä laskettiin, kunnes mittalaite antoi lukeman kohtaan RPDEV (Repetitive Partial Discharge Extinction Voltage) ja lopulta lukeman kohtaan PDEV (Partial Discharge Extinction Voltage). Mittaukset tehtiin kolmen vaiheen väliltä, jokaisella yksittäisellä vaiheella maata vasten, kierrosten väliltä ja kaikki vaiheet yhdessä maata vasten. Kuvassa 4 esiintyy yksi testihartsauksen staattoreista kytkettynä osittaispurkausmittariin.

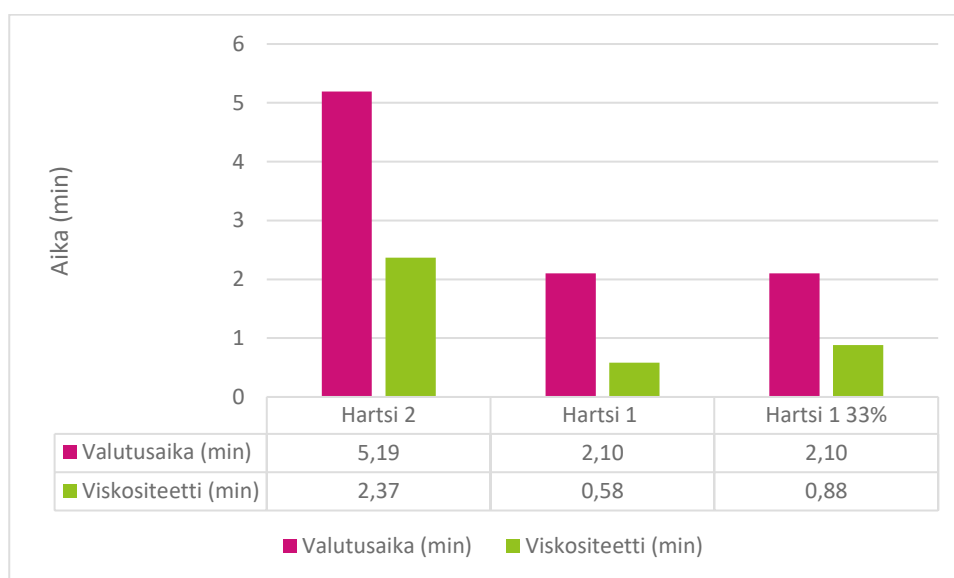


Kuva 4. Hartsattu staattori kytkettynä osittaispurkausmittausta varten (Yritys, 2022).

5 Hartsitestien tulokset

5.1 Staattoreiden valutusaika ja hartsien viskositeetti

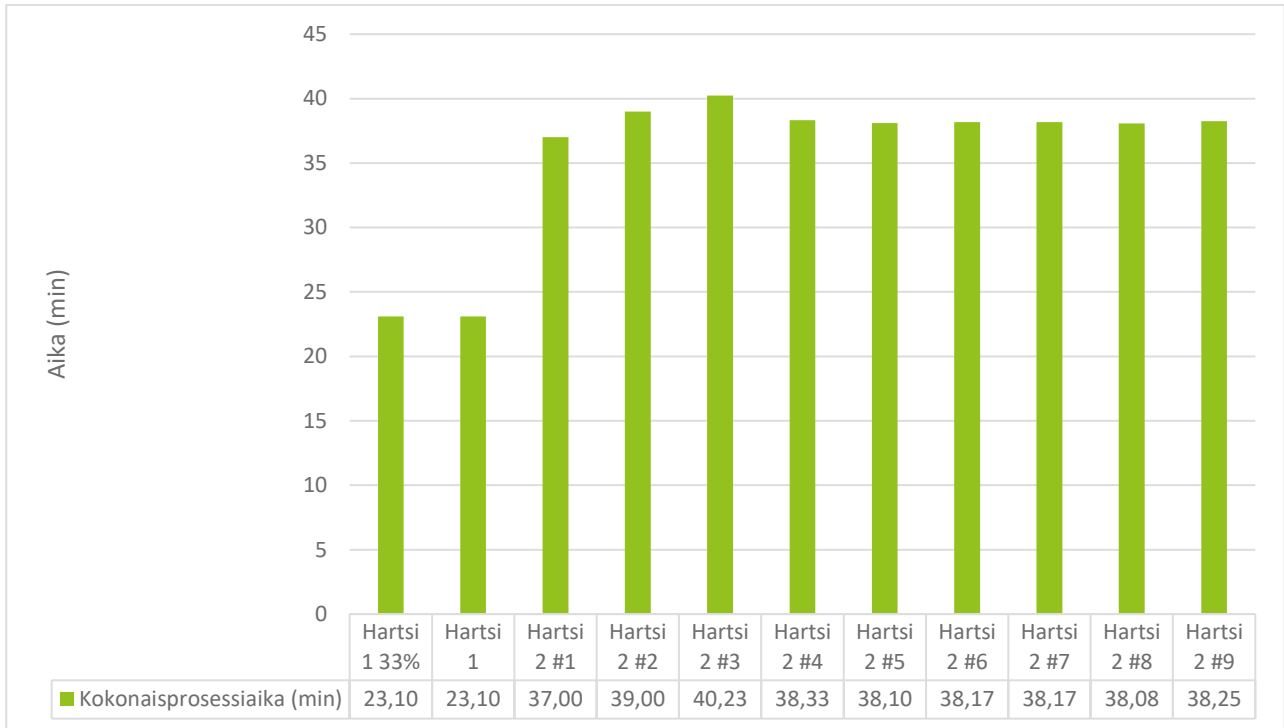
Kuviossa 2 nähdään, miten hartsin viskositeetti on yhteydessä staattorin valutusaikaan. Kuviossa esitetyt arvot ovat runkokoon 280 staattoreiden keskimääräiset valutusajat eri hartseilla ja hartsien mitatut viskositeetit. Hartsi 2 -yksikomponenttihartsin valutusaika oli keskimäärin 2,5-kertainen verrattuna nykyisin käytössä olevaan hartsi 1 -kaksikomponenttihartsiin.



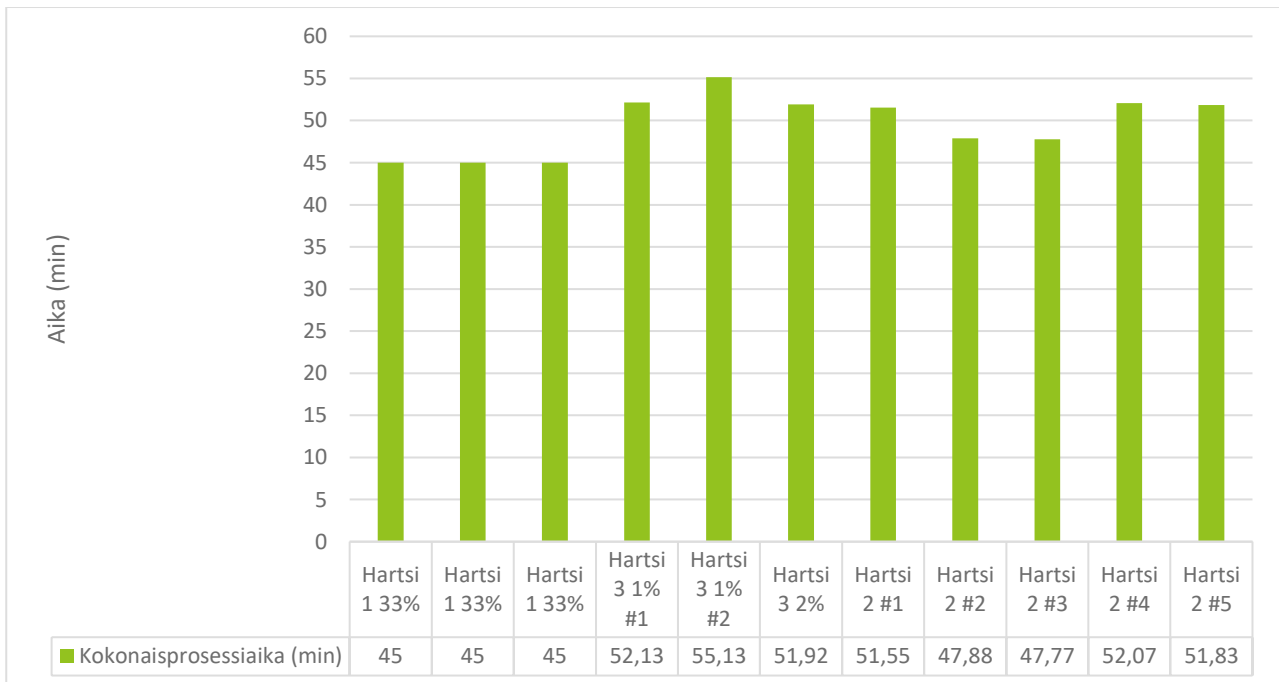
Kuvio 2. Runkokoon 280 staattoreiden keskimääräiset valutukseen kuluneet ajat ja hartsien viskositeetit (Yritys, 2023).

5.2 Valutuskyllästyksen kokonaisprosessiajat

Kokonaisprosessiajalla tarkoitetaan staattorin hartsaamiseen kulunutta aikaa. Kokonaisprosessiaikaan ei sisälly staattorin valmisteluun, kiinnitykseen, kytkentään, irroittamiseen, viimeistelyyn tai uuniin laittamiseen kuluva aikaa. Nämä ajat riippuvat paljon staattorin mallista, koosta sekä hartsaajasta itsestään. Kuviossa 3 nähdään runkokoon 280 staattoreiden kokonaisprosessiajat. Kuviossa 4 nähdään runkokoon 355 staattoreiden kokonaisprosessiajat.



Kuvio 3. Runkokoon 280 staattoreiden kokonaisprosessiajat (Yritys, 2023).



Kuvio 4. Runkokoon 355 staattoreiden kokonaisprosessiajat (Yritys, 2023).

Kuvioista voidaan päätellä, että varsinkin runkokoon 280 staattoreiden kokonaisprosessiaika kasvoi niillä staattoreilla, jotka hartsattiin hartsii 2 - yksikomponenttihartsilla. Runkokoon 355 staattoreiden kokonaisprosessiaika ei prosentuaalisesti kasvanut yhtä paljon kuin runkokoon 280 staattoreilla.

5.3 Hartsijäämä ja täytösprosentti

Hartsijäämällä tarkoitetaan staattoriin jääneen hartsin massaa. Staattorin massa punnitaan koukkuvaa'alla ennen hartsausta ja hartsauksen jälkeen.

Staattorin hartsijäämä hj määritetään kaavalla

$$hj = pj - pe$$

Missä

pj on staattorin massa hartsauksen jälkeen

pe on staattorin massa ennen hartsausta

Täytösprosentilla tarkoitetaan, kuinka monta kilogrammaa hartsia staattorissa on suhteessa staattorin kuparikäämin massaan. Kuparikäämin massa riippuu staattorin kääminnän koosta. Kuparikäämin massa ilmoitetaan staattorin työkortissa.

Täytösprosentti $T\%$ määritetään kaavalla

$$T\% = hj / km * 100$$

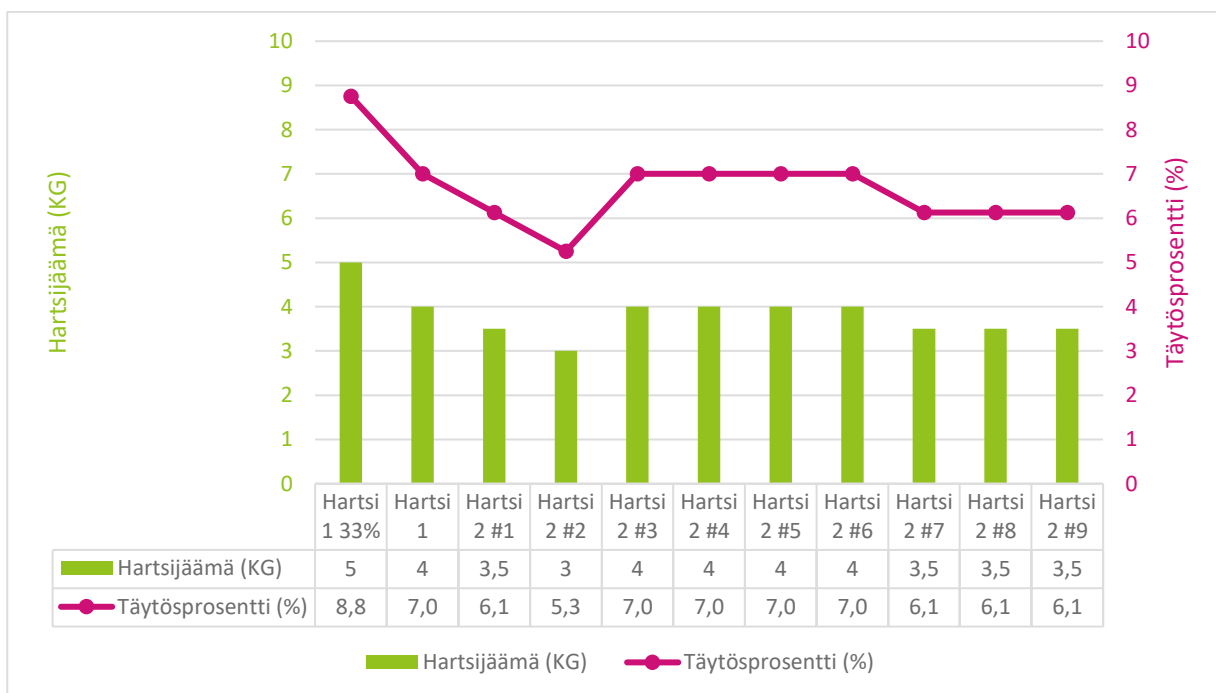
Missä

hj on hartsijäämä

km on kuparin massa staattorissa

Kuviossa 5 nähdään runkokoon 280 staattoreiden hartsijäämät ja täytösprosentit. Kuvioista selviää, että paras täytösprosentti saavutettiin hartsin 1 -referenssihartsilla. Täytösprosentti laski heti, kun referenssihartsista poistettiin täyteaine. Täyteaineettoman kyllästyshartsin tiheys on matalampi, joten se vaikuttaa suoraan hartsin massaan. Kun siirryttiin hartsin 2 -yksikomponenttihartsilla hartsattuihin staattoreihin, aluksi hartsijäämä ja täytösprosentti olivat hieman matalampia. Näitä saatiin kuitenkin hieman nostettua muokkaamalla

hartsauksen parametreja ja kastelemalla staattoreita runsaammalla hartsimäärällä. Pienemmillä täytösprosentteilla ei kuitenkaan ollut huomattavia eroja mittaustuloksissa verrattuna suurempiin täytösprosentteihin. Kolmen viimeisen staattorin kohdalla hartsijäämä ja täytösprosentit laskivat taas hieman. Tähän saattoi olla syynä se, että hartsausprosessia muutettiin niiden kohdalla sen verran, että staattorin läpi valunut hartsi käytettiin uudestaan sekoittamalla se puhtaan ja huoneenlämpöisen hartsin sekaan. Tämä on normaali käytäntö valutuskyllästysosastolla. Tällä tavalla saadaan vähennettyä hukkaan menevää hartsia. Staattorin läpivaluneen hartsin lämpötila kasvaa hartsin mennessä kuumen staattorin läpi. Nesteen lämpötila vaikuttaa suoraan sen viskositeettiin.



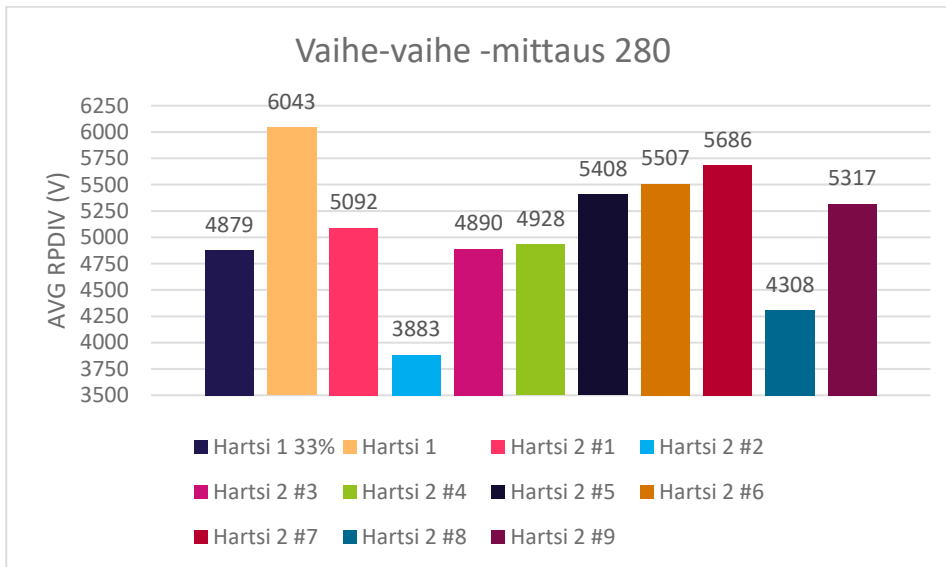
Kuvio 5. Hartsattujen runkokoon 280 staattoreiden hartsijäämät ja täytösprosentit (Yritys, 2023).

5.4 Osittaispurkausmittaukset

5.4.1 Runkokoko 280

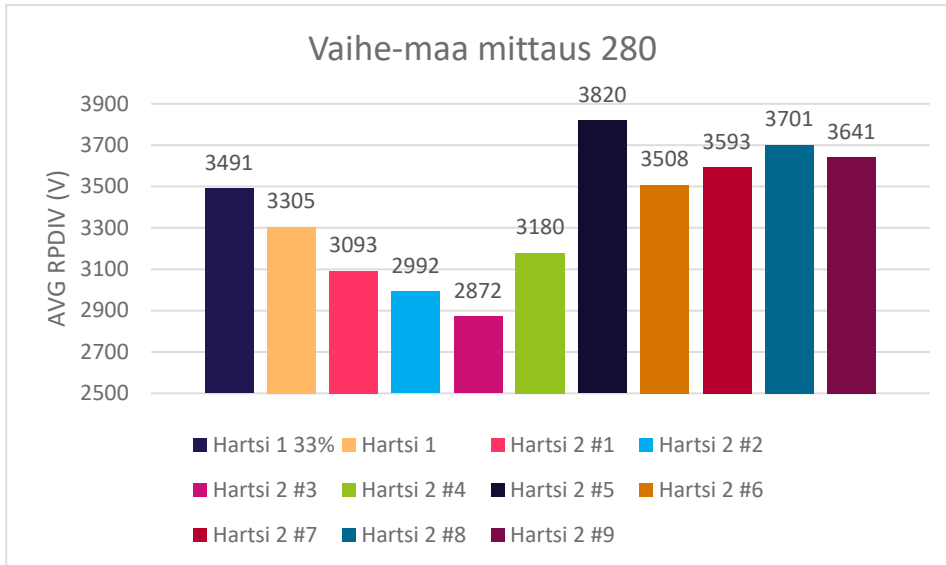
Kuviossa 6 nähdään runkokoon 280 staattoreiden vaiheiden välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet. Kuvioista voidaan heti nähdä, että hartsi 2 -yksikomponenttihartsilla hartsattujen staattoreiden numerot 2 ja 8 antoivat selvästi

muita pienemmät mittaustulokset. Tähän voidaan esittää monia syitä, kuten hartsausprosessien aikana tapahtuneet parametrien muutokset. Näiden staattoreiden eristeet ovat voineet myös olla jo ennen hartsausta mahdollisesti vioittuneita tai niiden käämitys ei ole ollut tarpeeksi tiukkana pakettina.



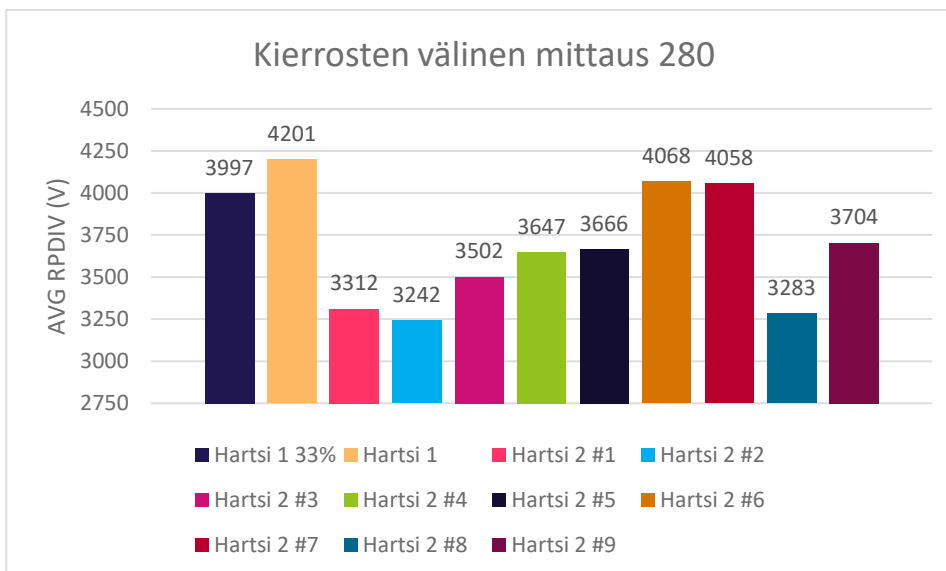
Kuvio 6. Runkokoon 280 staattoreiden U-V-W -vaiheiden välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet (Yritys, 2023).

Kuviossa 7 nähdään runkokoon 280 staattoreiden vaiheiden ja maan välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet. Kuvion perusteella voitaisiin sanoa, että hartsausprosessin parametreja saatiin loppua kohden paranneltua. Kuvioista voidaan huomata myös, että hartsi 2 -yksikomponenttihartsilla saatiin jo enimmäkseen paremmat mittausarvot kuin nykyisellä hartsi 1 -kaksikomponenttihartsilla.



Kuvio 7. Runkokoon 280 staattoreiden vaiheiden ja maan välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet (Yritys, 2023).

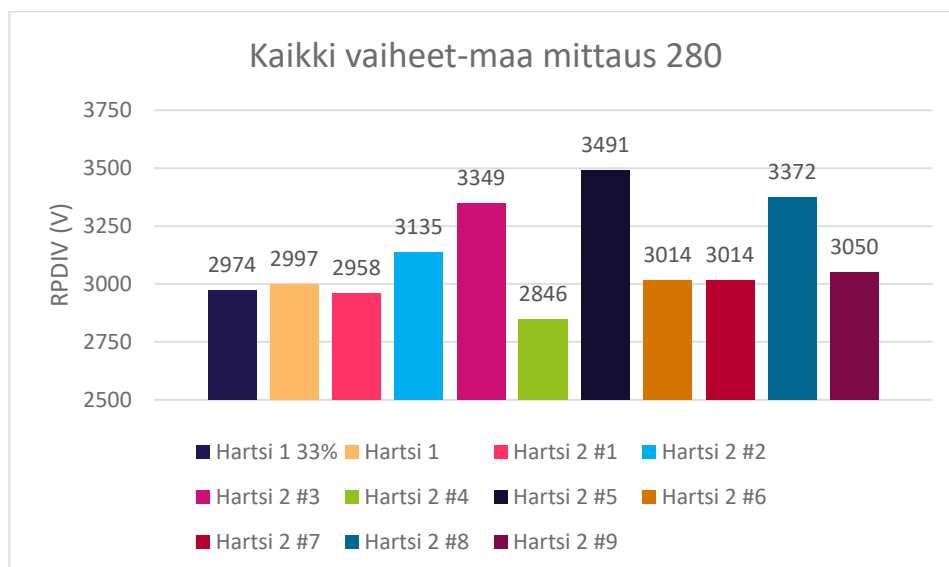
Kuviossa 8 nähdään runkokoon 280 staattoreiden kierrosten välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet. Kuviosta erottuvat taas samat harts 2 -yksikomponenttihartsilla hartsatut staattorit 2 ja 8. Staattoreiden sahauksella voitaisiin mahdollisesti pystyä selvittämään, miksi mittausarvot ovat heikommat juuri näillä staattoreilla.



Kuvio 8. Runkokoon 280 staattoreiden kierrosten välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet (Yritys, 2023).

Kuviossa 9 on esitetty UVW-maa eli yhdessä kaikkien vaiheiden ja maan välillä tapahtuvien toistuvien osittaispurkauksien syttymisjännitteet. Kuvion perusteella arvot

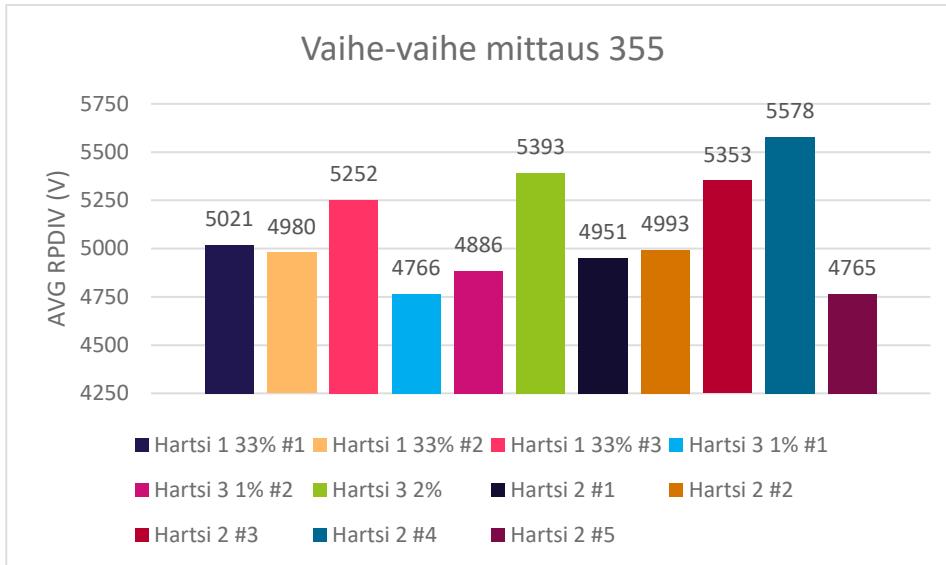
olivat enimmäkseen yhteneviä, lukuun ottamatta muutamaa poikkeavaa hartsin 2 -yksikomponenttihartsilla hartsattua staattoria.



Kuvio 9. Runkokoon 280 staattoreiden kaikkien vaiheiden yhdessä ja maan välisten toistuvien osittaispurkausten syttymisjännitteet (Yritys, 2023).

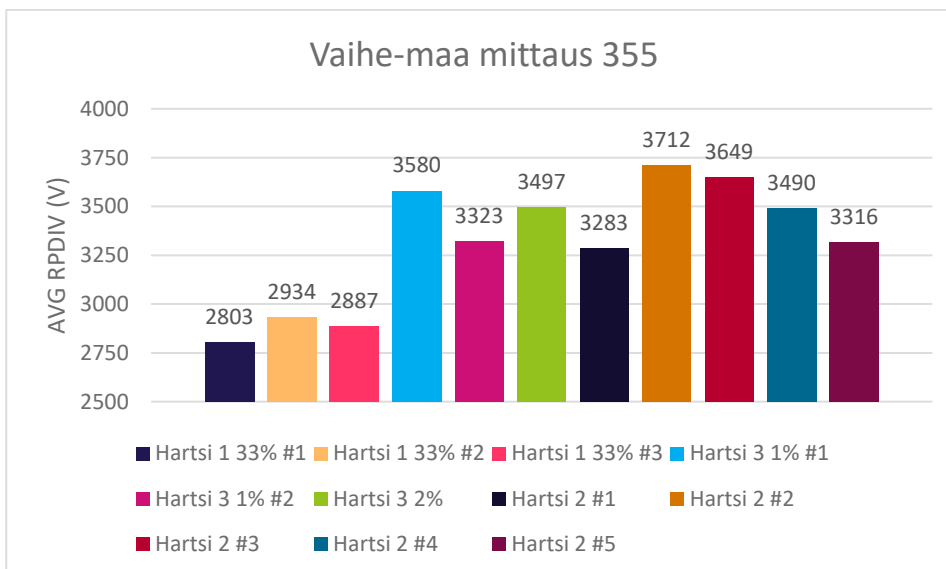
5.4.2 Runkokoko 355

Kuviossa 10 nähdään runkokoon 355 staattoreiden vaiheiden välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet. Runkokoon 355 staattoreita hartsattiin aiempien hartsin 1 -kaksikomponenttihartsin ja hartsin 2 -yksikomponenttihartsin lisäksi myös kolme kappaletta hartsin 3 -kaksikomponenttihartsilla. Kaksi kappaletta testattiin 1 %:n katalysaattoriainesekoituksella ja yksi kappale 2 %:n sekoituksella. Kuvioista voidaan huomata heti, että 1 %:n sekoituksella saatiin huonommat mittaustulokset kuin 2 %:n sekoituksella vaiheiden väliltä. Kuvion viimeisen staattorin matalaa mittaustulosta täytyisi selvittää sahaamalla staattori auki ja tarkastelemalla, kuinka hyvin hartsin on levittäytynyt urien sisäpuolella.



Kuvio 10. Runkokoon 355 staattoreiden U-V-W -vaiheiden välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet (Yritys, 2023).

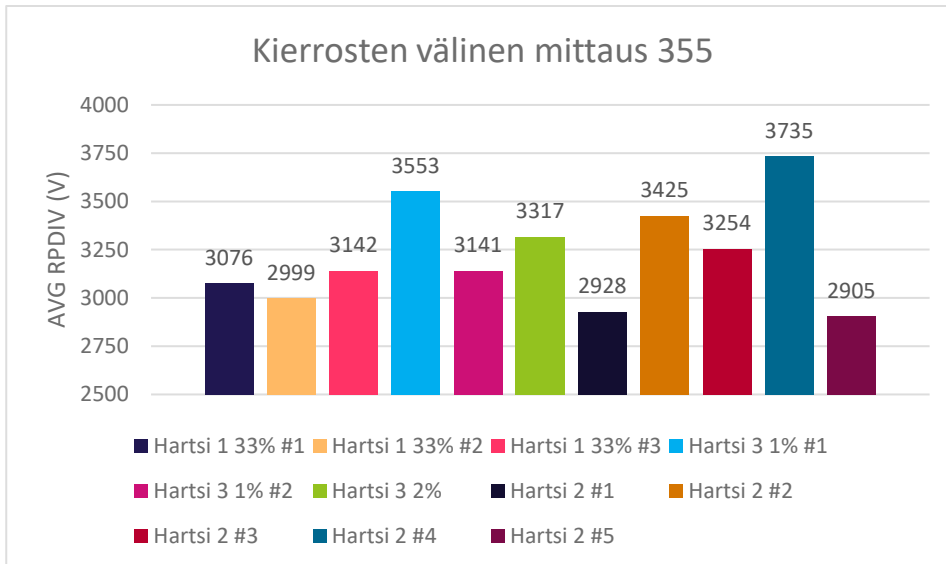
Kuviossa 11 huomataan, että nykyisellä harts 1 -kaksikomponenttihartsilla saatiin hieman matalammat keskimääräiset mittaustulokset vaiheiden ja maan välille kuin uusilla testihartseilla. Harts 1 -kaksikomponenttihartsilla hartsatut staattorit läpäisivät testin kuitenkin hyvin, vaikkakin niiden mittausarvot olivat muita hieman alemmat. Testihartseilla saatiin melko tasaisia mittausarvoja kaikkien staattoreiden välillä.



Kuvio 11. Runkokoon 355 staattoreiden vaiheiden ja maan välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet (Yritys, 2023).

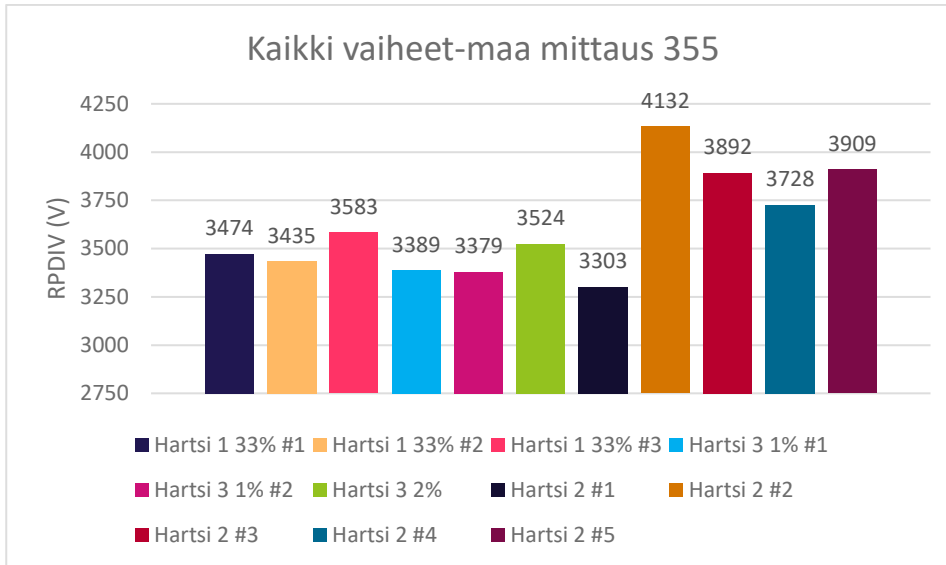
Kuviossa 12 nähdään runkokoon 355 staattoreiden kierrosten välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet. Kuviosta voidaan päätellä, että harts

2 -yksikomponenttihartsilla hartsattu staattori numero 4 läpäisi kierrosten välisen mittaustestin parhaiten. Samoin harts 3 -kaksikomponenttihartsilla 1 %:n katalysaattoriainesekoituksella hartsattu staattori numero 1 sai hyvät mittausravot. Yleisesti muiden hartsattujen staattoreiden osalta mittausravot olivat samaa luokkaa toistensa kanssa.



Kuvio 12. Runkokoon 355 staattoreiden kierrosten välisten toistuvien osittaispurkausten keskimääräiset syttymisjännitteet (Yritys, 2023).

Kuviossa 13 on esitetty UVW-maa eli yhdessä kaikkien vaiheiden ja maan välillä tapahtuvien toistuvien osittaispurkauksien syttymisjännitteet. Kuvioista voidaan huomata, että neljä viimeistä harts 2 -yksikomponenttihartsilla hartsattua staattoria sai parhaimmat mittaustulokset. Parametrimuutokset ovat olleet mahdollisesti suurimpana vaikuttajana parempiin mittaustuloksiin.



Kuvio 13. Runkokoon 355 staattoreiden kaikkien vaiheiden yhdessä ja maan välisten toistuvien osittaispurkausten syttymisjännitteet (Yritys, 2023).

5.5 Tuloksien yhteenveto

Runkokoon 280 staattoreilla saatiin hieman suurempi mittaustulosten hajonta staattoreiden välille. Tämä johtuu mahdollisesti siitä, että runkokoon 280 staattorit hartsattiin ennen runkokoon 355 staattoreita. Runkokoon 280 staattoreilla etsittiin ensin sopivimmat hartsausprosessissa käytetyt parametrit käytännössä kokeilemalla, ja niiden perusteella saatiin runkokoon 355 staattoreille heti alkuun sopivimmat parametrit.

Molempien runkokokojen staattoreiden mittaustuloksia tarkastelemalla voidaan todeta, että viimeisenä tehdyt viisi runkokoon 280 staattoria ja viimeiset neljä runkokoon 355 staattoria saivat parhaimmat keskimääräiset mittaustulokset. Voidaan siis todeta, että suurempi määrä testikäyttöön tarkoitettuja staattoreita oli hyvä valinta. Molempia runkokokoja olisi voinut olla jopa vielä kaksi tai kolme enemmänkin, jotta oltaisiin saatu mahdollisesti vielä yhteneväisempiä mittaustuloksia loppuun saakka hiotuilla parametrimuutoksilla. Kuitenkin tässä työssä esiintyneiden kaikkien staattoreiden osittaispurkausmittaustulokset olivat reilusti yli IEC60034-18-41 (2019) -standardissa esitettyjen minimiarvojen.

6 Johtopäätökset ja tulevaisuuden jatkotutkimukset

6.1 Johtopäätökset

Työn tuloksista voitiin päätellä, että eniten tutkinnan kohteena ollut hartsi 2 - yksikomponenttihartsi soveltuu parhaiten ominaisuuksiensa perusteella Vaasan ABB:n hartsaamon valutuskyllästyksen. Hartsi on ympäristöystävällistä, terveydelle haitattomampaa ja paloturvallista. Näiden lisäksi testattu yksikomponenttihartsi säilyy nykyisin käytössä olevaa hartsia reilusti pidempään, mikä mahdollistaisi hartsin ohjaamisen isoista astioista kiinteillä ratkaisulla suoraan hartsauslaitteille. Hartsi 3 - kaksikomponenttihartsi ei soveltunut Vaasan ABB:n hartsaamon valutuskyllästyksen, koska se vaatii kovettuakseen erillisen katalysaattoriaineen, joka täytyy sekoittaa erikseen hartsi 3 -kaksikomponenttihartsin pääaineen sekaan. Sekoitettuna hartsi alkaa reagoimaan hiljalleen säiliössään, joten sen käyttöikä ei ole yhtä korkea kuin hartsi 2 - yksikomponenttihartsilla. Yksikomponenttihartsilla saatiin myös jopa parempia osittaispurkausmittaustuloksia kuin nykyisin käytössä olevalla hartsi 1 - kaksikomponenttihartsilla. Paremmat mittaustulokset olivat erittäin positiivinen asia.

6.2 Jatkotutkimukset

Hartsi 2 -yksikomponenttihartsin korkean viskositeetin vuoksi hartsausprosessi kuitenkin hidastui melko paljon. Jatkotutkimuksissa voitaisiin selvittää, voitaisiinko esimerkiksi staattoreiden kovetusaikaa lyhentää ulkoisilla lämmityslaitteilla. Staattoreita hartsaattaessa huomattiin myös, että hartsin korkean viskositeetin takia hartsi valui johtimia pitkin riviliittimien ja syöttöliittimien pinnalle saakka. Tämä aiheuttaa suuren määrän ylimääräistä puhdistustyötä, koska liittimiä ei voida käyttää uudelleen, elleivät ne ole puhtaat. Jatkotutkimuksissa voitaisiin selvittää, onko liittimien suojaamiseksi mahdollista suunnitella esimerkiksi kuppimainen suoja, joka estää hartsin valumisen johtimia pitkin liittimiin saakka. Jatkotutkimuksia hartsi 2 -yksikomponenttihartsilla tarvitaan mahdollisesti myös runkokoon 500 sekä eri eristystason staattoreiden osalta. Testistaattoreiden sahaukset ovat myös tärkeitä. Staattoreiden sahauksella selvitetään, onko hartsaustulos riittävä myös staattorin sisällä.

LÄHTEET

ABB. (2022a). *ABB lyhyesti*. Haettu 30.12.2022, <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti>

ABB. (2004). *Driveit Pienjännitteiset vakiomoottorit*. Haettu 11.2.2023, <https://library.e.abb.com/public/f99be400a43336a8c1257b130056f076/Drive%20IT%20pienjannitteiset%20vakiomoottorit%20FI%2010-2004.pdf>

Elantas Electrical Insulation. (2017a). *FT1040A hartsin turvallisuus- ja käyttöohjeet*.

Elantas Electrical Insulation. (2017b). *FT1040B hartsin turvallisuus- ja käyttöohjeet*.

IRISS. (2019). *What is partial discharge (PD) and why is it important to detect?* Haettu 18.3.2023, <https://iriss.com/articles/what-is-partial-discharge-pd-and-why-is-it-important-to-detect/>

Korpinen, L. (2008). *Sähkövoimatekniikkaopus: Sähkökoneet: Osa 1*. (Alkuperäinen teos julkaistu 1998). http://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf

Nikkola, A. (2020). *Yksikomponenttihartsin käyttö valutushartsauksessa* [AMK-opinnäytetyö, Vaasan ammattikorkeakoulu]. Theseus. Haettu 18.3.2023, https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/342411/Nikkola_Aarni.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Työterveyslaitos. (2016). *Kemikaalit ja työ: altistumistietosivusto: Styreeni*. Haettu 30.12.2022, <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvallisuus/altistuminen-tyoympariston-haittatekijoille/kemiallisten-tekijoiden-hallinta-tyopaikalla/kemikaalit-ja-tyo-altistumistietosivusto/styreeni>