

## TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

### Kevennetyt häiveratkaisut RF- taajuusalueella

Pertti Lintunen, VTT PL 1300, 33101 Tampere, [Pertti.Lintunen@vtt.fi](mailto:Pertti.Lintunen@vtt.fi)  
Tomi Lindroos, Arto Hujanen, VTT

Tiivistelmä: Häivetekniikalla on keskeinen rooli nykyaikaisessa puolustustoiminnassa. Elektronisen suojauksen lisäksi voidaan sähkömagneettisen säteilyn synnyttämiä herätteitä hallita materiaalteknologian avulla. Aiemmissä tutkimuksissa on löydetty vaimennuskyvyltään riittäviä häiveratkaisuja, mutta tiettyihin suojauskohteisiin kyseisten häiveratkaisujen neliöpainot ovat edelleen olleet liian suuria. Vaikuttamalla materiaalin sähköisiin ja magneettisiin ominaisuuksiin voidaan materiaalin kykyä absorboida säteilyä mikroaaltoalueella tehostaa. Häiveratkaisua voidaan tehokkaasti keventää käyttämällä onttoja mikropalloja, joiden pintaan valmistetaan haluttu mikroaalloja absorboiva tehoainekerros. Projektissa valittiin pinnoitekerroksen valmistustekniikaksi kemiallinen pinnoitus lähtien liikkeelle metallisuoloista. Pinnoitusalueina tutkittiin pallogeometriian lisäksi muun muodon omaavia alustoja. Käytännössä toimiviksi alustoiksi lopulta valikoitui muovien täyteaineena yleisesti käytössä oleva mikropallolaatu eri kokoluokissa sekä katkottu lasikuitu. Projektissa löydettiin kemiallisen pinnoituksen prosessointiolosuhteet, joilla saatiin aikaan onnistunut pinnoitekerros mikropallojen sekä kuitujen pintaan. Pinnoitetut alustamateriaalit dispergoitiin epoksipohjaiseen matriisiin eri täyteainepitoisuuksilla ja näin valmistetuista komposiittimateriaaleista mitattiin häviöt taajuuden funktiona RF-taajuusalueella. Valittuun referenssivaimennusmateriaaliin nähden saavutettiin parhaimmillaan 53 %:n kevennys häivemateriaalin neliöpainossa, mikä ylittää projektille asetetun tavoitteen.

### 1. Johdanto

Tämä on kaksivuotisen projektin (2015-16) jälkimmäisen vuoden raportti. Sähkömagneettisen spektrin käyttö ja samalla riippuvuus sen häiriöttömästä toiminnasta on lisääntynyt viime aikoina sodankäynnissä. Häivetekniikalla on keskeinen rooli nykyaikaisessa puolustustoiminnassa: sillä pyritään kätkemään haluttu kohde taastaansa, jotta kohde ei olisi havaittavissa sitä etsivillä sensorijärjestelmillä. Elektronisen suojauksen lisäksi voidaan sähkömagneettisen säteilyn synnyttämiä herätteitä hallita materiaalteknologian avulla.

Vaikuttamalla materiaalin sähköisiin ja magneettisiin ominaisuuksiin voidaan materiaalin kykyä absorboida säteilyä mikroaaltoalueella tehostaa. Häiveominaisuudet tutkasäteilyn aallonpituusalueella (mikro-aaltoabsorptio) on usein ratkaistu esim. kerrosrakenteilla tai pintojen tarkalla geometrialla. Näissä ratkaisuissa on käytetty kaupallisia materiaaleja, jotka on valittu useinkin edullisuuden perusteella. Esimerkkinä tunnetusta häivemateriaaliratkaisusta voidaan mainita karbonyylirauta-polymeerikomposiitti. Näillä materiaaliratkaisuilla on ongelmana liian suuri neliöpaino aiheuttaen suhteellisen suuren painon nousun suojauskohteissa kuten esim. laivat tai kevyet lennokit. Tämä karbonyylirauta-polymeerikomposiitti valittiin referenssimateriaaliksi, johon projektin aikana kehitettyjä häivemateriaaliratkaisuja verrattiin.

Viimeaikainen kehitys on johtanut siihen, että sähkömagneettisen spektrin käyttö ja hallinta on yleistynyt ja laajentunut perinteisten taajuusalueiden ulkopuolelle. Sähkömagneettinen spektri muodostaa rajallisen luonnonvaran, joten spektri on koko ajan käymässä ruuhkaisemmaksi.

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			



Tavanomaisen tutka-taajuusalueen (9-12 GHz) ulkopuolella on myös toimilaitteita, joiden suojaus häivetekniikalla on tarpeen. Korkeat taajuusalueet aina 50 GHz:iin asti ovat kiinnostuksen kohteena. Kyky ymmärtää materiaalikoostumuksen ja sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutusta mahdollistaa parhaan häivemateriaali-koostumuksen löytämisen kullekin taajuusalueelle.

Tämä projekti edistää häivemateriaalien kehittämistä ja on luontevaa jatkoa aiempina vuosina 2010-2013 toteutetuille, häivemateriaalien tutkimukseen keskittyneille MATINE projekteille. ABSOLITE projektissa keskitytään löytämään ratkaisuja häiveratkaisun keventämiseksi suorituskyvyn pysyessä ennallaan verrattuna tunnettuun karbonyylirauta-polymeerikomposiitti häivemateriaaliin RF- taajuusalueella. Aiempien MATINE projektien puitteissa on ABSOLITE hankkeen tärkeydestä keskusteltu PVTUTKL:n häivetutkimuksen henkilöiden kanssa. VTT:n sisällä hanke toteutettiin Materiaalit ja valmistus - sekä Antennit ja RF- teknologiat -tutkimusalueiden välisenä, tiiviinä yhteistyönä.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Projektin tavoitteena oli tutkia ja selvittää kevyempien absorptiomateriaalien käyttömahdollisuutta suojauskohteissa. Tutkittavat materiaalit koostuivat ontoista ferromagneettisella tehoaineella pinnoitetuista mikropalloista tai katkotuista lasikuiduista ja polymeerien yhdistelmistä (komposiitit). Projektin ensimmäisen vuoden jälkeen tavoitteita täsmennettiin ja myös muita pinnoitealustageometrioita kartoitettiin ja selvitettiin niiden pinnoitettavuus. Tavoitteena oli keventää vähintään 50 % häivemateriaalin tiheyttä verrattuna häivemateriaalina tunnettuun karbonyylirauta-polymeerikomposiittiin, jonka tiheys on noin 2,58 g/cm<sup>3</sup>. Kokonaisratkaisussa tavoiteltiin ohuita kerrospaksuuksia, jotka eivät vaikeuttaisi autonomisten järjestelmien liikkuvuutta/toimivuutta. Projektin tavoitteena oli:

- tutkia ja kehittää kevennettyjä hybridimateriaalikoostumuksia, joiden vaimennuskyky määritetään RF taajuusalueella.
- tutkia onttojen mikropallojen sekä erimuotoisten, kuten kuitumaisten alustojen pinnoitusmahdollisuudet ja määrittää pinnoitusolosuhteet halutun tehoaineen saamiseksi alustamateriaalin pintaan.
- valmistaa komposiittimateriaaleja eri täyteainepitoisuuksilla käyttäen täyteaineena (tehoaineena) pinnoitettuja mikropalloja tai kuituja.
- kehittää näytekappaleiden mittaustulosten perusteella tehoainepartikkelien koostumusta ja komposiittimateriaalin rakennetta

Mittaustuloksista määritettiin koemateriaalin vaimennuskyky ja optimaaliset kerrosvahvuudet.

## 3. Aineisto ja menetelmät

Mikroaaltoja absorboivat materiaaliratkaisut ovat käytännössä yleensä olleet komposiittirakenteita koostuen dielektrisestä komponentista ja ferromagneettisesta komponentista, joka yleensä on metalli tai metalliseos. Absorptioratkaisuissa on käytetty dielektrisinä materiaaleina mm. vaahtoja, elastomeerejä ja muoveja. Nämä dielektriset materiaalit toimivat absorptioratkaisuissa matriisimateriaaleina, johon seostetaan tehoaineita kuten esim. karbonyylirautaa, koboltti-nikkeli-seosta jauhemaisena lisäyksenä. Vaikka yksittäinen metallinen jauhepartikkeli on kooltaan pieni, sen tiheys on kuten metalleilla yleensä esim. raudan tiheys 7,8 g/cm<sup>3</sup>. Kun nämä metalliset tehoaineet saadaan pinnoitteena esim. onton mikropallon pintaan ja nämä pinnoitetut mikropallot lisätään matriisimateriaaliin, voidaan saavuttaa merkittävää painonsäästöä.

Tutkimustyön toteutus koostui seuraavista osa-alueista:

- Onttojen mikropallojen sekä muiden pinnoitealustamuotojen pinnoituskokeet

tehoainekerroksen aikaansaamiseksi alustan pintaan.

- Valmistettujen pinnoitekerrosten karakterisointi koostumuksen ja kerrospaksuuden määrittämiseksi.
- Koemateriaalien valmistus mikroaaltoabsorptiomittauksiin eri täyteaineilla ja pitoisuuksilla.
- Koemateriaalien mittaukset ja ominaisuuksien laskenta mittausten pohjalta sekä rakenteiden edelleen kehittäminen laskentatulosten pohjalta

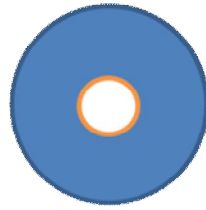
Onttojen mikropallojen pinnoituskokeet:

Kirjallisuuden<sup>1)</sup> pohjalta löytyi potentiaalinen valmistusreitti, jota sovellettiin absorboivan pinnoitekerroksen aikaansaamiseksi mikropallojen ja muiden alustojen pintaan. Projektissa valittiin pinnoitekerroksen valmistusteknikaksi kemiallinen pinnoitus lähtien liikkeelle metallisuoloista (electroless plating). Pinnoituskokeet olivat projektin toteutuksen kannalta suurimman riskin osa-alue, koska siinä jouduttiin ottamaan haltuun uusi tekniikka. Myöhemmässä vaiheessa käytetyt tekniikat, komposiittimateriaalin valmistus ja koemateriaalien vaimennusominaisuuksien määritykset, olivat olleet käytössä jo aiemmissa häivemateriaalitutkimukseen liittyneissä projekteissa ja siten entuudestaan tutumpia. Pinnoituskokeissa lähdettiin liikkeelle tunnetun valmistajan ontosta mikropallosta, jonka keskimääräinen partikkelikoko oli noin 20 µm. Jatkossa otettiin mukaan hienempi (noin 10 µm) ja karkeampi (noin 38 µm) mikropallolaatu sekä katkottu lasikuitu. Kun koepinnoitusten prosessointiolosuhteet saatiin kohdalleen, pinnoitetut ontot mikropallot sekä katkotut lasikuidut tarkasteltiin elektronimikroskopian ja energiadiispersiivisen analyysin (SEM+EDS) sekä röntgendiffraktion (XRD) avulla pinnoitekerroksen koostumuksen ja paksuuden määrittämiseksi. Kun tarkastelujen jälkeen pinnoitekerros todettiin riittävän hyväksi, niin siirryttiin toteutuksessa seuraavan vaiheeseen.

<sup>1)</sup> Sung-Soo Kim, Seo-Tae Kim, Joon-Mo Ahn, Keun-Hong Kim, *Magnetic and microwave absorbing properties of Co-Fe thin films plated on hollow ceramic microspheres of low density*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 271 (2004) 39-45.

Komposiittimateriaalien ja mittauskappaleiden valmistus:

Komposiittimateriaalin matriisiksi valittiin yleisesti käytetty epoksi, joka sisältää hartsin ja kovetinosan. Tehoaineina käytettiin pinnoitettuja onttoja mikropalloja tai pinnoitettuja, katkottua lasikuitua ja niitä lisättiin matriisiin eri täyteainepitoisuuksilla aina 50 p%: iin asti mikä osoittautui käytännössä valmistettavuuden kannalta ylärajaksi. Kun seos oli saatu riittävän homogeeniseksi, niin komposiittiseos valettiin pieneen muottiin noin 3 mm paksuisena kerroksena, josta työstettiin alla oleva kuvan 1 mukainen rengas mittauksiin taulukossa mainituin mitoin.



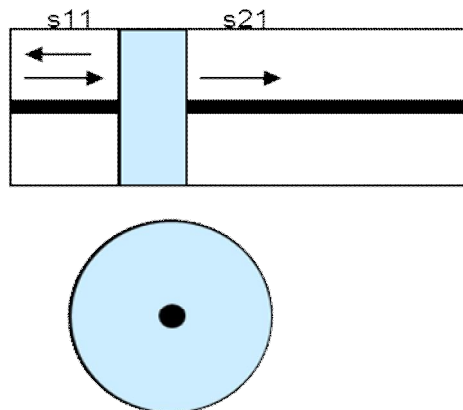
Frequency range	Outer diameter / mm	Tolerance	Inner diameter / mm	Tolerance
0.1-18 GHz	7.00	+0.0/-0.05 mm	3.04	+0.05/-0.0 mm

Kuva 1. Mikroaaltoabsorptiomittauksissa käytetyn rengasmaisen näytteen dimensiot.

Koemateriaalien mittaukset ja materiaalin vaimennusominaisuuksien määrittäminen mittausten pohjalta:

VTT:llä on mittauslaitteistoa tutkittavien pintojen heijastus- ja absorptio-ominaisuuksien mittaamiseen laboratorio-olosuhteissa melkein aukottomasti 5-110 GHz taajuusalueilla. Myös materiaalin sähköisten ja magneettisten aineparametrien analysointi on mahdollista samalla taajuuskaistalle.

Mittauksissa käytettiin ns. koaksiaalista näytteenpidintä, johon sopii kuvan 1 mukainen rengasmainen näyte. Mittaus perustuu näytteen läpimenevän ja heijastuvan säteilyn detektointiin. Periaatekuva mittauksesta on esitetty kuvassa 2. Kun mitattavan näytteen paksuus tunnetaan, voidaan mitattujen  $s_{11}$  ja  $s_{21}$  arvojen pohjalta määrittää materiaalin kompleksinen sähköinen parametri  $\epsilon^*$  ja magneettinen parametri  $\mu^*$ .



Kuva 2. Mikroaaltoabsorptiomittauksen periaatekuva jossa näytteestä (sininen) mitataan heijastuva  $s_{11}$  säteily ja läpimenevä  $s_{21}$  säteily.

ABSOLITE projektin keskeisenä ideana oli hyödyntää mikroaaltoalueen absorptiomateriaaleissa metallisella tehoaineella pinnoitettuja ontoja mikropalloja tai lasikuituja upotettuna sähköä eristävään matriisiin. Tarkoituksena oli aikaansaada komposiittimateriaaliin perustuva häiveratkaisu, johon mikroaaltosäteily (MA) tunkeutuu mahdollisimman vähän heijastuen ja absorboituu komposiittimateriaaliin valittujen tehoainepartikkelien sekä matriisimateriaalin yhteisvaikutuksesta. MA- säteilyn absorboituminen tapahtuu sähköisten ja magneettisten häviöiden kautta.

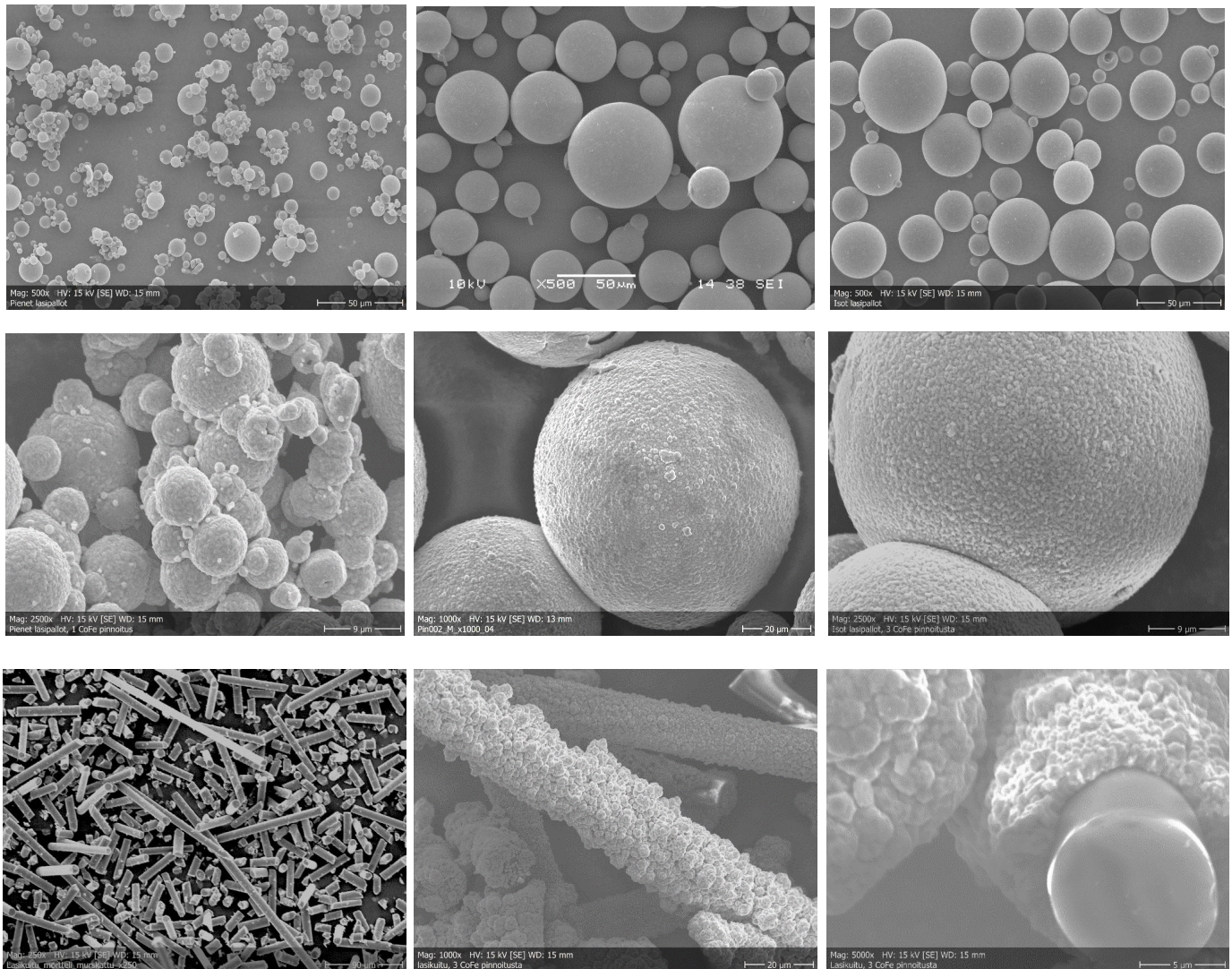


---

#### 4. Tulokset ja pohdinta

Projektin alkuvaiheessa valittiin onttoja mikropalloja pinnoitusaluksiksi. Edullisuutensa ja saatavuutensa ansiosta valittiin muovien täyteaineena käytetty ontto mikropallolaatu, jonka keskimääräinen partikkelikoko oli noin 20  $\mu\text{m}$ . Valittu mikropallolaatu toimi kemiallisessa pinnoituksessa hyvin ja sen pintaan aikaansaatiin Co-Fe- pohjainen metallinen pinnoitekerros noin 1  $\mu\text{m}$ :n vahvuutena. Pinnoitusprosessin olosuhteissa todettiin liuoksen pH:n ja lämpötilan olevan merkittäviä parametreja pinnoituksen onnistumisen kannalta. Jatkossa pinnoituksia tehtiin myös hiukan pienemmille mikropalloille sekä suuremmille mikropalloille kemiallisen pinnoituksen toimivuuden testaamiseksi erikokoisille palloalustoille. Suuremmilla (keskimäärin noin 38  $\mu\text{m}$ ) mikropalloilla pinnoitusolosuhteet olivat lähes samat kuin aluksi valitulla 20  $\mu\text{m}$  mikropallolla ja pintaan saatiin tasainen, kattava kerros. Pienten pallojen (keskimäärin noin 10  $\mu\text{m}$ ) tapauksessa pinnoitusolosuhteita jouduttiin säätämään sekä lämpötilan että pH:n suhteen alkuarvoista melko voimakkaasti ennen kuin pinnoitekerros saatiin syntymään mikropallojen pintaan. Katkottujen lasikuitujen tapauksessa oli haasteena löytää sellaiset pinnoitusolosuhteet, että pinnoite alkoi kasvaa kuidun pintaan eikä muodostanut erillisiä metallisia rykelmiä pinnoitusliuokseen. Useiden pinnoituskokeiden jälkeen lasikuidut onnistuttiin pinnoittamaan riittävän kattavasti, jotta voitiin edetä komposiittimateriaalin valmistukseen. Kuvassa 3 on esitetty SEM kuvat pinnoitealustana käytetyistä ontoista mikropalloista sellaisenaan ja pinnoituksen jälkeen sekä lasikuiduista vastaavat kuvat. Pinnoituksen jälkeen kuvatuissa mikropalloissa on näkyvissä jonkin verran murtuneita mikropalloja sekä alueita, joihin pinnoitekerros ei ole kasvanut. Pinnoitekerroksen paremman kattavuuden aikaansaamiseksi pinnoitusprosessi toistettiin kolme kertaa, jonka todettiin olevan riittävä kattavan pinnoitekerroksen muodostamiseksi koko pinnoituserän mikropalloihin sekä kuituihin.



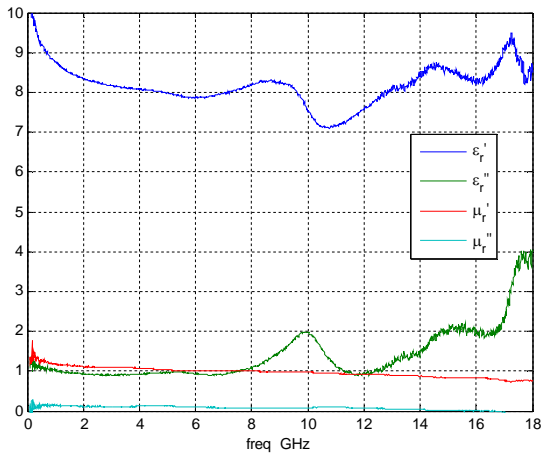


Kuva 3. Ylärivissä mikropallot sellaisenaan, vasemmalla hienoin ja oikealla karkein laatu. Keskirivissä vastaavat mikropallot pinnoituksen jälkeen. Alarivissä katkottu lasikuitu sellaisenaan (vasen kuva) ja pinnoituksen jälkeen.

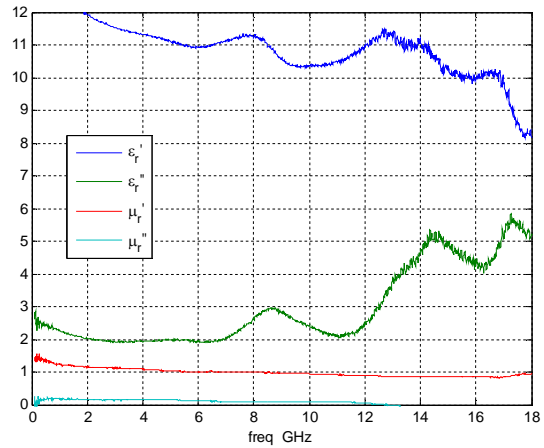
Varsinaiset mittauksiin menevät koemateriaalit valmistettiin dispergoimalla valmistetut pinnoitetut mikropallot ja lasikuidut epoksिमatriisiin. Aiempien kokemusten perusteella valmistettiin näytteet 30 ja 40 p-% täyttöasteella ja näin saatiin hyvä vertailukohta aiempiin mittauksiin. Komposiittiseokset valettiin pieneen muottiin noin 3 mm vahvuiseksi kerrokseksi.

Mittaukset suoritettiin aiemmin esitetyn kuvan 1 mukaisille rengasmaisille näytteille. Mittausarjassa oli mukana useampi valmistettu näyte, joista seuraavassa on esitetty muutamia tulosesimerkkejä.

Kuvassa 4 on esitetty Co-Fe- seoksella pinnoitetuilla, katkotuilla lasikuiduilla seostetun epoksipohjaisen komposiitin mittausten pohjalta määritetyt sähköiset parametrit  $\epsilon'$  ja  $\epsilon''$  sekä magneettiset parametrit  $\mu'$  ja  $\mu''$  taajuuden funktiona. Vertailtaessa kahdella eri täyttöasteella seostettujen komposiittien tuloksia, havaitaan täyttöasteen kasvattamisen vaikuttavan enemmän sähköiseen parametriin  $\epsilon'$ , magneettisten parametrien pysyessä likimain samalla tasolla kummassakin tapauksessa.



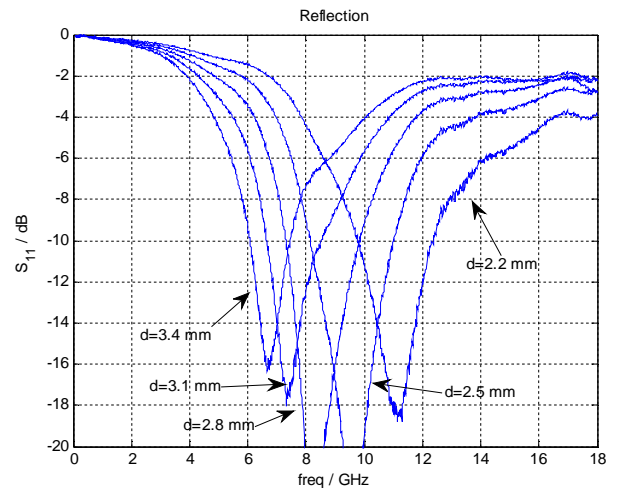
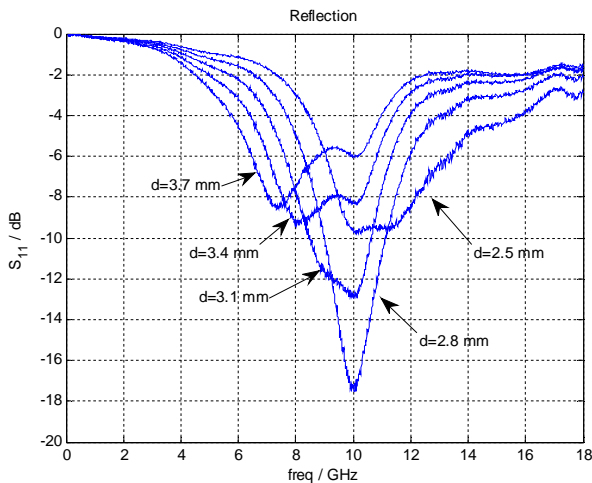
a)



b)

Kuva 4. Mittausten pohjalta määritetyt  $\epsilon$  ja  $\mu$  kompleksiset arvot taajuuden funktiona Co-Fe pinnoitetuilla, katkotuilla lasikuidulla seostetulle epoksipohjaiselle komposiittimateriaalille, kun a) täyttöaste on 30 p-% ja b) täyttöaste on 40 p-%.

Kompleksisten sähköisten ja magneettisten arvojen pohjalta voidaan laskea edellä kuvatus materiaalin absorptiokyky taajuuden funktiona. Kuvassa 5 on esitetty laskennalliset heijastusvaimennukset vastaavista materiaalinäytteistä eri vaimennuskerroksen paksuuksilla.



Kuva 5. Lasketut heijastusvaimennukset eri vaimennuskerroksen paksuuksilla, kun pinnoitetun, katkotun lasikuidun täyttöaste on a) 30 p-% ja b) 40 p-%.

Katkotun ja pinnoitetun lasikuidun tapauksessa riittävät vaimennuksen maksiarvot saavutetaan kummallakin täyttöasteella, mutta korkeampi 40 p% täyttöaste mahdollistaa ohuemman ja sitä kautta kevyemmän häivepinnoitteen. Lisäksi vaimennuksen kaistanleveys on suurempi 40 p% täyttöasteella. Vastaavat mittaukset ja tarkastelut tehtiin muillekin valmistetuille näytteille. Kun resonanssitaajuus sovitetaan pinnoitepaksuudella 9 GHz:n taajuudelle, saadaan laskennallisesti määritettyä taulukon 1 neliöpainot kolmelle parhaalle koostumukselle. Taulukossa on esitetty



myös vastaavan suorituskyvyn omaavan referenssinä käytetyn, karbonyylirauta-polymeerikomposiitin neliöpaino.

Taulukko 1. Häiveratkaisun laskennalliset neliöpainot, kun resonanssitaajuus on sovitettu pinnoitepaksuudella 9 GHz:n taajuudelle.

<u>Neliöpainot</u>			
Fe (ref)	Pinnoitettu kuitu	Pinnoitettu mikropallo n.20µm	Pinnoitettu mikropallo n.38 µm
	Täyttöaste 40%	Täyttöaste 40%	Täyttöaste 40%
7,1 kg/m <sup>3</sup>	4,0 kg/m <sup>3</sup>	3,3 kg/m <sup>3</sup>	3,3 kg/m <sup>3</sup>

## 5. Loppupäätelmät

Projektin aikana kehitettiin valmistusreitti onttojen mikropallojen sekä katkotun lasikuidun pinnoittamiseksi Co-Fe pohjaisella koostumuksella. Projektissa määritettiin kemiallisen pinnoituksen prosessointiolosuhteet, joilla saadaan aikaan yhtenäinen kontrolloitu pinnoitekerros mikropallojen tai katkottujen lasikuitujen pintaan. Erikokeilla mikropalloilla tehtyjen pinnoituskokeiden perusteella voidaan todeta noin 20 µm ja 38 µm kokoisten pallojen toimivan parhaiten pinnoituksissa. Näillä saavutettiin myös keveimmät, riittävän suorituskyvyn omaavat häiveratkaisut. Pinnoitettujen lasikuitujen tapauksessa pinnoitekerros oli haastavaa saada tasaisena kaikkien kuitujen pintaan. Pinnoitettujen mikropallojen ja lasikuitujen dispergointi epoksiin onnistui eri täyteainepitoisuuksilla ja näin valmistetuista komposiittimateriaaleista mitattiin häviöt taajuuden funktiona RF taajuusalueella. Täyteainepitoisuuden vaikutuksesta absorptiomateriaalin suorituskykyyn saatiin arvokasta tietoa ja löydettiin täyteainepitoisuuden vähimmäismäärä, jolla tavoitellut vaimennusominaisuudet saavutettiin. Parhailla koostumuksilla, joissa täyteaineina olivat karkeahkot mikropallot 40 % täyttöasteella, valittuun vastaavan suorituskyvyn omaavaan referenssivaimennusmateriaaliin nähden saavutettiin 53 %:n kevennys häivemateriaalin neliöpainossa, mikä ylittää projektille asetetun tavoitteen. Jatkoa ajatellen seuraavina toimenpiteinä olisi hyödyllistä valmistaa pinta-alaltaan suurempi näyte vapaan mittaradan mittauksiin, jolla saadaan paremmin käytäntöä vastaava mittaustulos. Neliöpainoltaan näin kevyt häivemateriaali voidaan myös ajatella sovellettavaksi sovitekerroksena monikerrosrakenteissa.

## 6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Projektin aikana ei syntynyt tieteellisiä julkaisuja tai muita raportteja