

TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

Materiaalien sähköisten ja magneettisten parametrien räätälöinti RF- taajuusalueella

Pertti Lintunen, VTT PL 1300, 33101 Tampere, Pertti.Lintunen@vtt.fi, 0207 223 701
Tomi Lindroos, Arto Hujanen, VTT

Tiivistelmä

Häivetekniikalla on keskeinen rooli nykyaikaisessa puolustustoiminnassa. Elektronisen suojauksen lisäksi voidaan sähkömagneettisen säteilyn synnyttämiä herätteitä hallita materiaalitekniikan avulla. Vaikuttamalla materiaalin sähköisiin ja magneettisiin ominaisuuksiin voidaan materiaalin kykyä absorboida säteilyä mikroaaltoalueella tehostaa. Projektissa suoritetun mittauskoesarjan tuloksena voidaan todeta valmistettujen materiaalien käyttäytyvän ennakoitusti ja esitettyjen teorioiden mukaisesti. Metallisten partikkelien eli tehoaineiden myllyttämisellä voidaan parantaa komposiittimateriaalin valmistettavuutta ja samalla saavutetaan homogeenisempi koostumus. Tehoaineen hiutalemainen muoto vaikutti myös vaimennuskykyä tehostavasti. Matriisin johtavuuden muokkaamisella voitiin vaikuttaa voimakkaasti komposiitin absorptiokykyyn. Oikealla tehoaineen valinnalla ja matriisin johtavuuden muokkaamisella voitiin ohentaa 30% tarvittavan vaimennuskerroksen paksuutta, mikä tuo mukanaan merkittävän painonsäästön.

1. Johdanto

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 taustaansa, jotta kohde ei olisi havaittavissa sitä etsivillä sensorijärjestelmillä. Elektronisen suojauksen lisäksi voidaan sähkömagneettisen säteilyn synnyttämiä herätteitä hallita materiaalitekniikan avulla.

Vaikuttamalla materiaalin sähköisiin ja magneettisiin ominaisuuksiin voidaan materiaalin kykyä absorboida säteilyä mikroaaltoalueella tehostaa. Häiveominaisuudet tutkasäteilyn aallonpituusalueella (mikroaaltoabsorptio) 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 rautakarbonyyli-polymeeri komposiitti. Näillä materiaaliratkaisuilla on ongelmana liian suuri neliöpaino aiheuttaen suhteellisen suuren painonnousun suojauskohteissa kuten esim. laivat tai kevyet lennokit.

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

Tämä projekti edistää häivemateriaalien kehittämistä ja on luontevaa jatkoa vuosina 2010-2012 toteutetuille, häivemateriaalien tutkimukseen keskittyneille MATINE projekteille (TS-ABSO, HYBRID-PAINT). Nämä aiemmat tutka-absorption kehitykseen liittyneet, VTT:llä toteutetut projektit ovat kes-

kittyneet lähinnä kahden eri valmistustekniikan mahdollisuuteen tuottaa mikroaaltoja absorboivia pintoja. ABSOTAILOR projektissa on tavoitteena selvittää syvällisemmin materiaalikoostumuksen ja rakenteen vaikutusta kykyyn absorboida säteilyä RF- taajuusalueella. Aiempien projektien puitteissa on tämän perustutkimuksellisen hankkeen tärkeydestä keskusteltu PVTTn häivetutkimuksen henkilöiden kanssa.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Projektin tarkoituksena oli tutkia ja selvittää tehokkaampien ja kevyempien absorptiomateriaalien käyttömahdollisuutta suojauskohteissa. Tutkittavat materiaalit koostuivat ferro-magneettisen faasin ja polymeerin yhdistelmästä (komposiitti), jossa ferromagneettisen faasin ominaisuuksia pyrittiin säättämään absorption tehostamiseksi.

Projektin tavoitteena oli:

- tutkia ja kehittää hybridimateriaalikoostumuksia joiden absorptiokyky RF taajuusalueella määritetään mittausten pohjalta
- modifioida materiaalin sähköisiä ja magneettisia ominaisuuksia tutka-absorption optimoimiseksi halutulle taajuusalueelle.
- selvittää hybridipartikkelien (core shell) mahdollisuudet absorptiokyvyn tehostamiseksi mahdollistaen pienemmät täytepartikkelipitoisuudet ja sitä kautta rakenteen keventämisen
- kehittää näytekappaleiden mittaustulosten perusteella komposiitin vaimennuskykyä mm. säättämällä tehoainepartikkelien koostumusta, muotoa ja rakennetta.

Tutkimukseen valittujen, jauhemaisten materiaalien partikkelikoon, muodon ja pinnoituksen vaikutusta tutka-absorptiokykyyn selvitettiin mittauksin.

3. Aineisto ja menetelmät

Mikroaaltoja absorboivat materiaaliratkaisut ovat käytännössä yleensä olleet komposiittirakenteita koostuen dielektrisestä komponentista ja ferromagneettisesta komponentista. Absorptioratkaisuissa on käytetty dielektrisinä materiaaleina mm. vaahtoja, elastomeerejä ja muoveja. Nämä dielektriset materiaalit toimivat absorptioratkaisuissa matriisimateriaaleina, johon seostetaan tehoaineita kuten esim. rautakarbonyyliä, koboltti-nikkeliseosta jauhemaisena lisäyksenä.

Tehoaineiden ja myös matriisivalinnassa materiaalien permittiivisyys- sekä permeabiliteettiarvot ja niiden säädettävyys ovat keskeisessä roolissa. Vaikuttamalla materiaalin sähköisiin ja magneettisiin ominaisuuksiin voidaan materiaalin kykyä absorboida säteilyä mikroaaltoalueella tehostaa.

Tutkimustyön toteutus koostui seuraavista osa-alueista:

- Jauhemaisten täyteaineiden valinta ja modifioinnit
- Komposiittimateriaalien ja mittauskappaleiden valmistus
- Koemateriaalien mittaukset ja ominaisuuksien laskenta mittausten pohjalta sekä rakenteiden edelleen kehittäminen laskentatulosten pohjalta

Jauhemaisten lähtöaineiden valinta ja modifiointi:

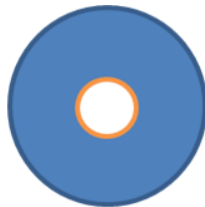
Projektin aluksi valittiin kirjallisuuden pohjalta potentiaalisimpia metallisia jauheita käytettäväksi komposiittien tehoaineina. Sähkömagneettisten ominaisuuksien lisäksi täyteainepartikkelien koko, koko jakauma ja muoto ovat suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä. Valittujen potentiaalisten täyteainemate-

riaalien modifiointi painottui lähinnä partikkelimuodon myllyttämiseen hiutalemaiseksi. Tarkoitus on myös jatkossa, lähinnä toisen vuoden tutkimuksessa, testata partikkelien pinnoittamista ja sen vaikutusta komposiittimateriaalin ominaisuuksiin. Oleellisena mahdollisuutena rakenteen keventämisen kannalta on onttojen täyteainepartikkelien käyttö. Tämän vuoksi kartoitettiin onttojen lasipallojen saatavuus sellaisenaan ja pinnoitettuna ferromagneettisella materiaalilla.

Komposiittimateriaalien ja mittauskappaleiden valmistus:

Koska projektin tarkoituksena oli selvittää materiaalikoostumuksen ja sisäisen rakenteen vaikutus mikroaaltosäteilyn absorptiokykyyn, projektin alkuvaiheessa valmistusmenetelmäksi valittiin epoksi-täyteainekomposiittien valaminen muottiin. Valmistustekniikka haluttiin pitää mahdollisimman yksinkertaisena, jotta valmistustekniikka itsellään tuo mahdollisimman vähän muuttujia materiaalin ominaisuuksiin ja siten vertailu eri koostumusten välillä voidaan tehdä luotettavasti. Jatkossa voidaan selvittää koostumusten soveltuvuutta muihin valmistustekniikoihin.

Komposiittimateriaalin matriisiksi valittiin yleisesti käytetty epoksi, joka sisältää hartsin ja kove-tinosan. Tehoaineina käytettiin valittuja metallijauheita sellaisenaan ja myllytettyinä hiutalemaisiksi. Tehoaineen tilavuusosuus vakioitiin valmistetuissa näytteissä samaksi, jotta koemateriaaleista tuli mahdollisimman vertailukelpoisia keskenään. Osassa koemateriaaleja matriisiin seostettiin hiilinanoputkia metallisen tehoaineen lisäksi. Lähtöaineiden sekoituksessa käytettiin apuna ultraääni-haudetta, ultraäänisauvaa tai mekaanista dispermat sekoitinta. Valmistettavuuden kannalta tehoai- neen partikkelikoko toi haasteita: mitä pienempi ja kevyempi partikkeli/kuitu sitä haasteellisempaa oli dispergoida haluttu määrä matriisiin. Kun seos oli saatu riittävän homogeeniseksi, niin komposiittiseos valettiin 90x90 mm 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 |

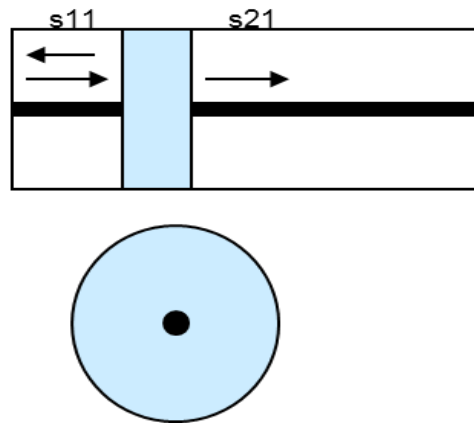
Kuva1. Mikroaaltoabsorptiomittauksissa käytetyn rengasmaisen näytteen dimensiot.

Koemateriaalien mittaukset ja materiaalin sähköisen parametrin ϵ sekä magneettisen parametrin μ 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 rengasmaisen näyte. Mittaus perustuu näytteen läpimenevän ja heijastuvan säteilyn detektointiin. Periaatekuva mit-tauksesta on esitetty kuvassa 2. Kun mitattavan näytteen paksuus tunnetaan, voidaan mitattujen s_{11} ja s_{21} arvojen pohjalta määrittää materiaalin kompleksinen sähköinen parametri ϵ^* ja magneettisen

parametri μ^* .



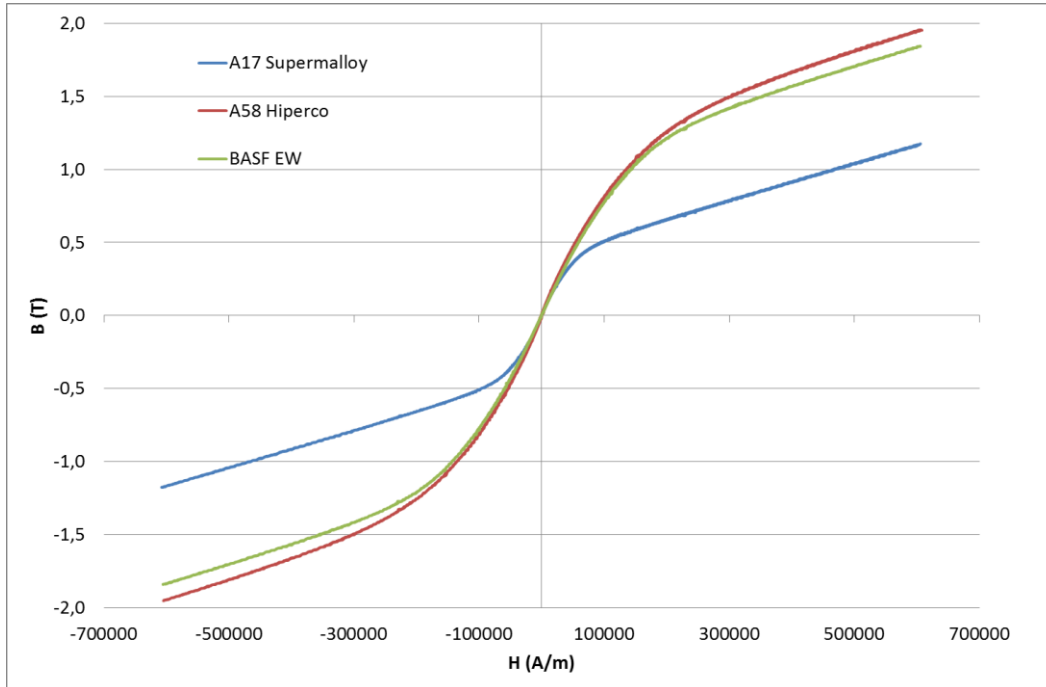
Kuva 2. Mikroaaltoabsorptiomittauksen periaatekuva jossa näytteestä (sininen) mitataan heijastuva s_{11} säteily ja läpimenevä s_{21} säteily.

ABSOTAILOR projektissa hyödynnettiin mikroaaltoalueen absorptiomateriaaleissa metalleja jauhemaisessa muodossa upotettuna sähköä eristävään matriisiin. Ideana oli aikaansaada pinnoiteratkaisu johon mikroaaltosäteily (MA) tunkeutuu mahdollisimman vähän heijastuen ja absorboituu pinnoitteen valittujen tehoainepartikkelien sekä matriisimateriaalin yhteisvaikutuksesta. MA- säteilyn absorboituminen tapahtuu sähköisten ja magneettisten häviöiden kautta. Metalliset magneettiset materiaalit mahdollistavat ohuempien sähkömagneettista säteilyä absorboivien kerrosten valmistamisen korkean saturaatiomagnetisaation ja siitä seuraavan suuren dynaamisen permeabiliteetin johdosta.

4. Tulokset ja pohdinta

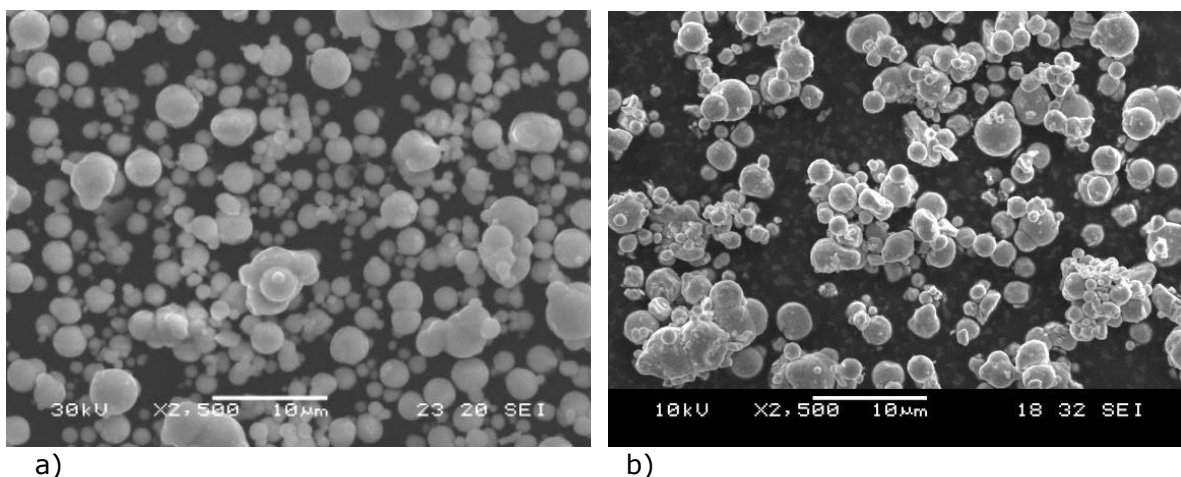
Projektin alkuvaiheessa kartoitettiin kiinnostavimpia jauhemaisia metallisia tehoaineita, joiden avulla voitaisiin vaikuttaa komposiittimateriaalin mikroaaltoja vaimentaviin ominaisuuksiin. Potentiaalisiksi tehoaineiksi valittiin karbonyylirauta, supermalloy- tyyppinen seos ja Hiperco seos, joista jälkimmäiset valmistettiin VTT:n omalla kaasuatomisointilaitteistolla. Lisäksi kartoitettiin onttojen lasipallojen saatavuus sellaisenaan ja pinnoitettuina. Pinnoitettujen lasipallojen osalta voidaan todeta että saatavilla olevien tuotteiden pinnoitekerrokset olivat varsin ohuita eikä erilaisia metallisia pinnoitemateriaalivaihtoehtoja ollut saatavilla halutuilla koostumuksilla. Esimerkiksi Fe- pinnoitettuja onttoja lasipalloja ei ollut saatavilla halutulla pinnoitepaksuudella. Liian ohuet pinnoitteet partikkelien pinnalla eivät välttämättä sisällä riittävää määrää tehoainetta, jotta sillä olisi merkittävä vaikutus absorptiokykyyn.

Kirjallisuustarkastelujen pohjalta valittujen metallisten materiaalien ominaisuuksista mitattiin magneettinen saturaatioarvo. Mittaukset suoritettiin Priztech Oyn toimesta. Useassa kirjallisuusviitteessä oli mainittu että mitä suurempi materiaalin magneettinen saturaatioarvo M_s on, niin sitä paremmat mahdollisuudet on kasvattaa komposiitin permeabiliteettia myös suurilla taajuuksilla. Kuvassa 3 on esitetty jauhemaisista näytteistä mitatut saturaatiomagnetisaatiokäyrät. Saturaatioarvot ovat hieman alemmat kuin kirjallisuusarvot, mikä saattaa johtua näytteen jauhemaisesta olomuodosta, joka ei vastaa bulkkimateriaalin tiheyttä. Esimerkiksi Hiperco seokselle magneettiseksi saturaatioarvoksi on mainittu 2.35 T, nyt mittauksissa saatiin arvoksi hieman alle 2 T, vastaavasti raudalle kirjallisuuden arvo 2.15 T.



Kuva 3. Magneettiset saturaatiokäyrät valituille, kolmelle metallijauheelle.

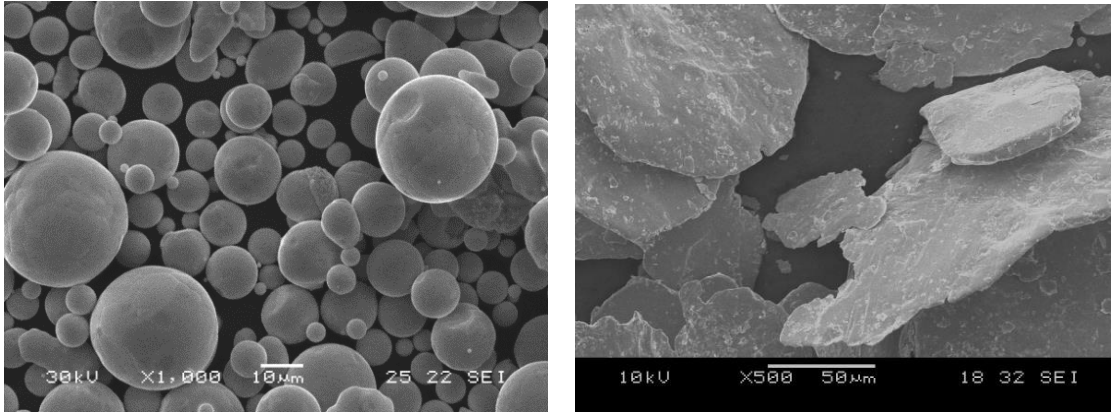
Jauhemaisten raaka-aineiden modifioinnissa kokeiltiin pyöreiden partikkeleiden myllyttämistä hiutalemaisiksi. Kun lähtöjauheen partikkelikoko oli kooltaan muutamia mikrometrejä, niin myllytyksellä ei ollut juurikaan vaikutusta partikkelimuotoon. Kuvassa 4 on esitetty rautapohjaiseen jauheen lähtötilanne sekä tilanne myllytyksen jälkeen.



Kuva 4. Rautapohjainen jauhe a) lähtötilanne ja b) myllytyksen jälkeen.

Kun lähtöaineen partikkelikoko oli kymmenissä mikrometreissä, niin myllytyksen lopputulos oli halutunlainen: pyöreät partikkelit olivat muokkautuneet hiutalemaisiksi ollessaan ohuimmillaan 1-2 μm paksuisia. Kuvassa 5 on esitetty myllytyksen avulla aikaansaatu halutunlainen partikkelin muodonmuu-

tos.



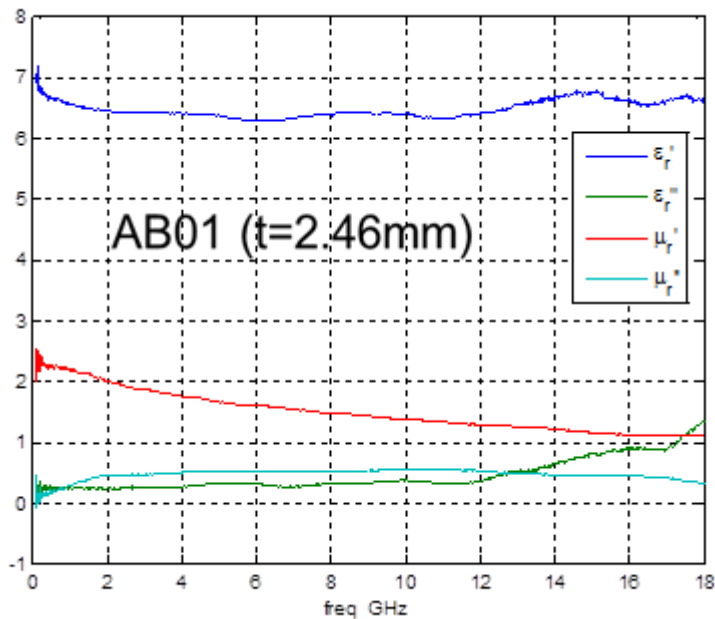
a)

b)

Kuva 5. Hiperco jauheen partikkelien muokkautuminen hiutalemaiseksi myllytyksen ansiosta, a) lähtötilanne ja b) myllytyksen jälkeen.

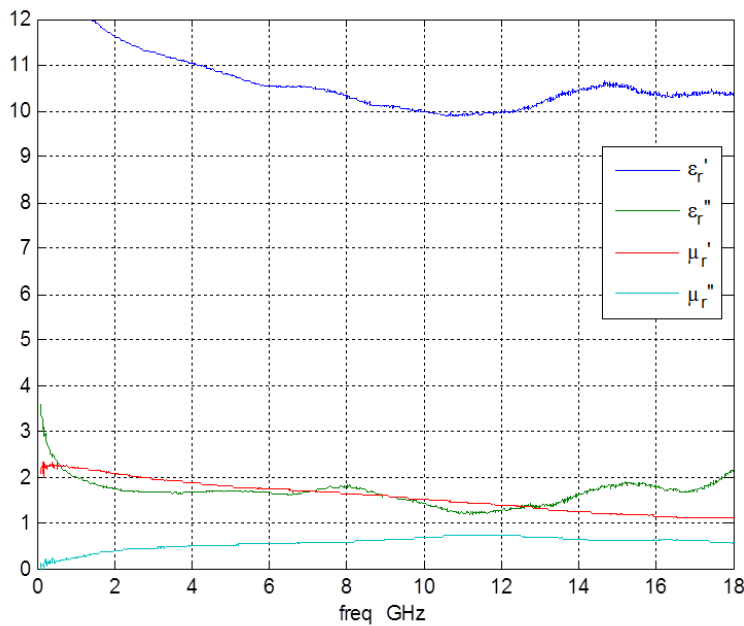
Hiutalemaisat tehoaineet käyttäytyivät koemateriaalin valmistusvaiheessa edullisesti verrattuna pyöreisiin metallipartikkeleihin, sillä hiutaleet eivät pyrkineet sedimentoitumaan (laskeutumaan) valumuotin pohjalle kuten pyöreillä partikkeleilla oli taipumus. Hiutalemaisista metallipartikkeleista saatiin valmistettua homogeeninen komposiittimateriaali.

Mittaukset suoritettiin aiemmin esitetyn kuvan 1 mukaisille rengasmaisille näytteille. Mittaussarjassa oli mukana useampi valmistettu näyte, joista seuraavassa on esitetty muutamia tulosesimerkkejä. Kuvassa 6 on esitetty rauta-epoksi komposiitin mittausten pohjalta määritetty sähköinen parametri ϵ sekä magneettinen parametri μ taajuuden funktiona. Tehoaineena käytettiin kaupallista Fe- jauhetta sellaisenaan, jonka partikkelikoko on luokkaa 1-3 μm .

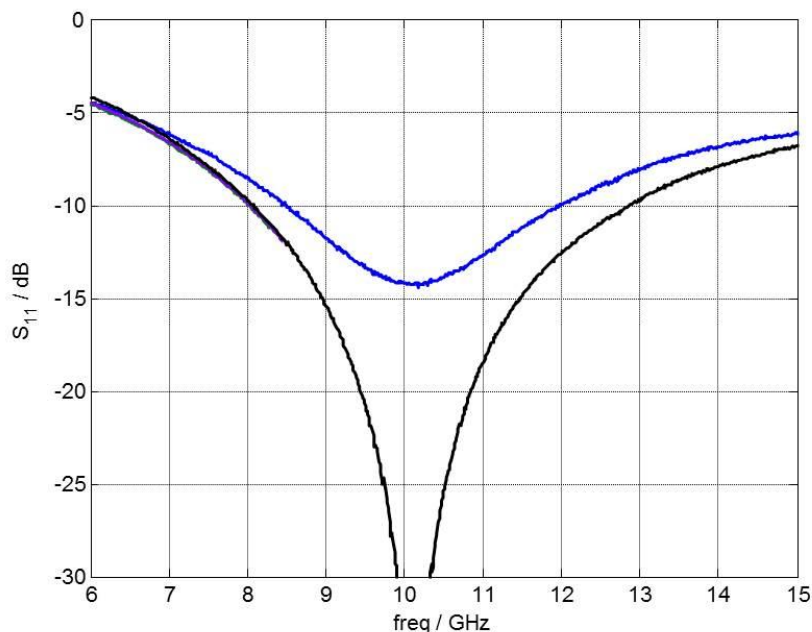


Kuva 6. Mittausten pohjalta määritetyt ϵ ja μ kompleksiset arvot taajuuden funktiona Fe-epoksi komposiitille.

Kun komposiittimateriaalin matriisiin lisättiin hiilinanoputkia sekä käytettiin myllytettyä Fe- jauhetta tehoaineena, niin saatiin kuvan 7 mukainen tulos. Verrattuna käsittelemättömään Fe- komposiittiin voidaan todeta permittiivisyysarvon ϵ kohonneen hiukan. Permeabiliteetti-arvo μ pysyy hyvin samankaltaisena. Kuvassa 8 on esitetty lasketut heijastusvaimennukset vastaavista materiaalinäytteistä: sininen käyrä kuvaa pelkän Fe lisäyksen antamaa heijastusvaimennusta ja musta käyrä heijastusvaimennusta kun käytetään myllytettyä Fe- jauhetta sekä hiilinanoputkilisäystä matriisiin.



Kuva 7. Mittausten pohjalta määritetyt ϵ ja μ kompleksiset arvot taajuuden funktiona Fe-epoksi komposiitille, jossa käytetty myllytettyä Fe- jauhetta sekä hiilinanoputkia tehoaineina.



Kuva 8. Lasketut heijastusvaimennukset kun pinnoitepaksuus sovitettu heijastusvaimennuksen mak-

simia (10 GHz) vastaavalle taajuudelle: Fe- jauhe sellaisenaan (sininen käyrä) ja kun Fe-jauhe myllytetty sekä matriisiin lisätty hiilinanoputkia (musta käyrä).

Suoritettujen mittausten tuloksena voidaan todeta valmistettujen materiaalien käyttäytyvän ennakoitusti ja esitettyjen teorioiden mukaisesti. Matriisin johtavuuden muokkaaminen hiilinanoputkilisäyksellä vaikuttaa voimakkaasti pinnoitteen absorptiokykyyn. Vaadittu vaimennuskerroksen paksuus pienenee 30% verrattuna perustilanteeseen ja samalla vaimennuksen maksimiarvo sekä kaistanleveys kasvavat merkittävästi. Hiilinanoputkilisäyksen seurauksesta komposiitin tiheys laskee verrattuna Fe-EW-komposiittiin, minkä seurauksesta tarvittavan pinnoitekerroksen painon alennus on vielä paksuusmuutosta suurempi.

5. Loppupäätelmät

Suoritetun mittauskoesarjan tuloksena voidaan todeta valmistettujen materiaalien käyttäytyvän ennakoitusti ja esitettyjen teorioiden mukaisesti. Metallisten partikkelien eli tehoaineiden myllyttämisellä voidaan parantaa komposiittimateriaalin valmistettavuutta ja samalla saavutetaan homogeenisempi koostumus. Tehoaineen hiutalemainen muoto vaikutti myös vaimennuskykyä tehostavasti. Matriisin johtavuuden muokkaamisella voitiin vaikuttaa voimakkaasti komposiitin absorptiokykyyn. Oikealla tehoaineen valinnalla ja matriisin johtavuuden muokkaamisella voitiin ohentaa 30 % tarvittavan vaimennuskerroksen paksuutta, mikä tuo mukanaan merkittävän painonsäästön. Nyt suoritettulla mittauskoesarjalla todennettiin että koostumusta säätämällä voidaan kohtuullisen yksinkertaisin keinoin säätää vaimennuksen suuruutta sekä myös vaimennuksen taajuuskaistan leveyttä. Vielä merkittävämpää on että absorptiomateriaalin koostumuksen säädöllä voidaan saavuttaa erittäin merkittävää painon säästöä verrattuna perinteisiin karbonyyliraudasta valmistettuihin absorptiomateriaaleihin.

Jatkossa voidaan vaimennuskykyä tehostaa entisestään pinnoittamalla hiutalemaiset tehoaineet halutulla koostumuksella ja sitä kautta voidaan ohentaa vaimennusmateriaalin kerrospaksuutta sekä edelleen keventää vaimennusratkaisua.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Projektin aikana ei syntynyt tieteellisiä julkaisuja tai muita raportteja