

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

### Laajakaistainen ultrakevyt RF-taajuusalueen absorptioratkaisu

Pertti Lintunen, VTT PL 1300, 33101 Tampere, Pertti.Lintunen@vtt.fi, 020722 3701  
Tomi Lindroos, Arto Hujanen, VTT

**Tiivistelmä:** Häivetekniikalla on keskeinen rooli nykyaikaisessa puolustustoiminnassa. Elektronisen suojauksen lisäksi voidaan sähkömagneettisen säteilyn synnyttämiä herätteitä hallita materiaalitekniikan avulla. Aiemmissä tutkimuksissa on löydetty vaimennuskyvyltään riittäviä häiveratkaisuja, mutta tiettyihin suojaus-kohteisiin kyseisten häiveratkaisujen neliöpainot ovat edelleen olleet liian suuria. Aihepiirin tutkimuksen edetessä häiveratkaisua saatiin kevennettyä huomattava määrä suorituskyvyn pysyessä ennallaan. Tämän jälkeen kehitystarve kohdistettiin vaimennuksen taajuuskaistan leventämiseen koskemaan samanaikaisesti mikroaaltoalueen X- ja K<sub>u</sub>-kaistoja. Taajuuskaistan leventämistavoite ei ollut enää saavutettavissa pelkästään yksikerrosratkaisulla. Tavoitteen saavuttamiseksi tarvittiin kaksikerrosrakenne, jossa varsinaisen häviökerroksen päällä on sovitekerros. Sovitekerroksen koostumusta säätämällä erilaisten täyteaineiden avulla, voidaan aikaansaada häviöllinen ja samalla kevyt materiaaliratkaisu varsinaisen häviökerroksen päälle. Projektin aikana valmistettiin sovitekerrosmateriaaleja, joiden tiheys oli luokkaa 0,50 g/cm<sup>3</sup> ja joiden sähkömagneettiset ominaisuudet mitattiin taajuuden funktiona RF-taajuusalueella. Kaksikerrosrakenteiden simulaatioissa laskettiin yksittäisistä kerroksista mitattujen sähkömagneettisten ominaisuuksien pohjalta vaimennuskyky metallin päällä olevalle kerrosrakenteelle. Tavoiteltu kaksikerrosrakenteen vaimennustaso simulaatiolaskennan perusteella ylsi lähes koko X- ja K<sub>u</sub>-taajuuskaistojen leveydelle yhdistelmän neliöpainon ollessa luokkaa 4,5 kg/m<sup>2</sup>, mikä merkitsee noin 50 % kevennystä vertailurakenteeseen nähden.

#### 1. Johdanto

Sähkömagneettisen spektrin käyttö ja samalla riippuvuus sen häiriöttömästä toiminnasta on lisääntynyt viime aikoina sodankäynnissä. Lainaus Puolustusvoimien tutkimusagentista 2015: "Kuvantavan tutkateknologian pienentyminen ja tarkkuuden kasvaminen sekä laser- ja moni- sekä hyperspektritekniikat edellyttävät joukkojen häivetekniikan suojan parantamista. Vastasensoritekniologioita kehittämällä sekä uusien materiaali- ja rakennetekniologioiden käyttöön ottamisella pyritään osaltaan vastaamaan sensoritekniologioiden kehittyvään uhkaan." Häivetekniikalla on keskeinen rooli nykyaikaisessa puolustustoiminnassa: sillä pyritään kätkemään haluttu kohde taustaansa, jotta kohde ei olisi havaittavissa sitä etsivillä sensorijärjestelmillä. Muotoilun avulla pyritään sirottamaan tutkasta kohteeseen suunnattu säteily lähettäjältä pois päin. Muotoilun ja elektronisen suojauksen lisäksi voidaan sähkömagneettisen säteilyn synnyttämiä herätteitä hallita materiaalitekniikan avulla.

Vaikuttamalla materiaalin sähköisiin ja magneettisiin ominaisuuksiin voidaan materiaalin kykyä absorboida säteilyä mikroaaltoalueella tehostaa. Materiaalin pinnasta aiheutuvan heijastuksen minimoimiseksi tulee materiaalin impedanssin olla lähellä ilman impedanssia. Käytännössä tämä tarkoittaa, että permittiivisyyden ja permeabiliteetin arvojen tulee olla mahdollisimman lähellä toisiaan. Impedanssisovitusta pyritään parantamaan tyypillisesti erillisillä sovitekerroksilla, jolloin päästään yksikerroksista vaimennusmateriaalia laajempaan kaistanleveyteen. Sovitekerros koostuu tällöin alhaisen permittiivisyyden

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			

omaavasta matriisimateriaalista, sekä täyteaineesta jolla permittiivisyyden arvo ja tätä kautta impedanssi sovitetaan tavoiteltavalle tasolle. Lisäämällä sovitekerroksen häviöitä kasvatetaan kokorakenteen vaimennuskykyä sekä vaimennuskaistan leveyttä. Hyvää impedanssisovitusta tavoiteltaessa polymeeripohjaisen matriisin permittiivisyyttä tulee säätää alemmas, jotta päästään lähemmäs ilman impedanssia. Tämä voidaan toteuttaa joko vaahtomaisilla rakenteilla tai täyteaineiden avulla [1]. Tällaisia täyteaineita ovat mm. mikrolasipallot ja aerogeelipartikkelit. Vaatimus permittiivisyyden alentamisesta johtaa tilanteeseen, jossa materiaalin sähköiset häviöt ovat merkityksettömiä. Sovitekerroksen magneettisia häviöitä voidaan kuitenkin kasvattaa magneettisilla tehoaineilla. Häviöllinen kerros sovitekerroksen takana on tyypillisesti polymeeripohjainen partikkelikomposiitti, joka koostuu ferromagneettisista partikkeleista sekä sähköisten ominaisuuksien säätämiseen käytetyistä hiilipohjaisista partikkeleista.

ABSOWIDE-projekti edistää häivemateriaalien kehittämistä ja on luontevaa jatkoa aiempina vuosina 2010–2015 toteutetuille, häivemateriaalien tutkimukseen keskittyneille MATINE-projekteille. Tässä projektissa keskitytään löytämään keinoja kaksikerroksisen häiveratkaisun keventämiseksi sekä vaimennuskaistan levenämiseksi muun suorituskyvyn pysyessä ennallaan. Aiempien MATINE-projektien puitteissa on vaimennuskaistan levenämisen tärkeydestä keskusteltu PVTUTKL:n häivetutkimuksen henkilöiden kanssa. VTT:n sisällä hanke toteutettiin Materiaalimallinnus- ja tehokkuus- sekä Antennit ja RF-teknologiat -tutkimustiimien välisenä, tiiviinä yhteistyönä.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Projektin tarkoituksena on tutkia ja kehittää uudentyyppistä ultrakevyttä ja laajan kaistanleveyden omaavaa absorptioratkaisua painokriittisiin kohteisiin. Tutkimus keskittyy uusien tehokkaiden simulointityökalujen hyödyntämiseen sekä uusien materiaaliyhdistelmien kehitykseen. Tutkittavat materiaaliyhdistelmät koostuvat pääosin ferromagneettisista polymeerikomposiiteista. Merkittävä osa tutkimuksesta keskittyy eri materiaaliyhdistelmien sähköisten ja magneettisten ominaisuuksien yhteensovittamisesta. Työn keskeisenä tavoitteena on osoittaa laboratoriomittauksin varsinaisella häviökerroksella ja osittain häviöllisellä sovitekerroksella saavutettava absorptiorakenteen keventäminen sekä toiminta-alueen laajennus leveämmälle taajuuskaistalle.

Projektin tavoitteena on:

- Hyödyntämällä kehittyneitä simulointityökaluja optimoida suorituskykyinen ja kevyt vaimennusrakenne mitattujen materiaaliparametrien pohjalta.
- Mitoittaa, valmistaa ja todentaa mittauksin anisotropiaan perustuva vaimennuskerros joka mahdollistaa perinteistä isotrooppista kerrosta >50% kevyemmän ratkaisun.
- Mitoittaa, valmistaa ja todentaa mittauksin häviöllisellä sovitekerroksella saavutettava painon kevennys sekä taajuuskaistan leveneminen.
- Tavoiteltava vaimennus -10dB yhtäaikaisesti  $X$  ja  $K_u$  taajuuskaistalla, 50% nykyistä kevyemmällä rakenteella.

Tutkimuksen alkuvaiheessa keskitytään sovitekerrosmateriaalin koostumuksen säätämiseen ja sen valmistettavuuden toteamiseen. Koostumuksen säätämiseksi epoksipohjaiseen matriisiin sekoitettavia täyteaineita käytetään seuraavien periaatteiden mukaan:

- ontot lasipallot, paisutetut muovipallot sellaisenaan, keveyden aikaansaaminen
- pinnoitetut ontot lasipallot tai paisutetut muovipallot, keveys + häviöt samanaikaisesti

- myös pienillä lisäyksillä ferromagneettista partikkelia tai esim. hiilinanoputkia voidaan magneettisia -ja sähköisiä häviöitä kasvattaa ilman merkittävää painon lisäystä.

Koostumusta suunniteltaessa ja säädettäessä pidetään tavoitteena säilyttää häviöllisen sovitekerroksen tiheys reilusti alle  $1 \text{ g/cm}^3$ . Kun sovitekerrosmateriaalit on saatu valmistettua, mitataan materiaalin sähköiset ja magneettiset ominaisuudet, joiden pohjalta määritetään koemateriaalin vaimennuskyky ja optimaaliset kerrosvahvuudet.

Monikerrosrakenteiden suunnittelussa simulointi- ja optimointityökalujen avulla tehty laskenta on merkittävä työvaihe optimaalisen monikerrosrakenteen löytämiseksi. Simulointien lähtökohdaksi on aikaisemmissa projekteissa luotu mittausdata, joka antaa hyvät lähtökohdat optimaalisten materiaalkoostumusten sekä materiaaliyhdistelmien määrittämiselle. Myös hankkeen aikana valmistetuista yksittäisistä kerroksista mitatut materiaaliparametrit syötetään simulointimalliin, jonka avulla voidaan laskennallisesti optimoida tarvittava monikerrosrakente.

### 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 dielektrisiä materiaaleina mm. vaahtoja, elastomeerejä ja muoveja. Nämä dielektriset materiaalit toimivat absorptioratkaisuissa matriisimateriaaleina, johon seostetaan tehoaineita kuten esim. karbonyylirautaa, koboltti-rautaseosta jauhemaisena lisäyksenä. Kun nämä metalliset tehoaineet saadaan pinnoitteena onton mikropallon pintaan ja nämä pinnoitetut mikropallot lisätään matriisimateriaaliin, voidaan saavuttaa merkittävää painonsäästöä. Tämä on todettu jo aiemmissa MATINE-hankkeissa ja niiden yhteydessä on kemiallinen pinnoitusmenetelmä saatu hyvin hallintaan. Tehoaineella pinnoitetut mikropallot tai paisutetut polymeeripallot yhdistettynä vastaavien pinnoittamattomien pallojen käyttöön seostuksessa mahdollistavat kevyen sovitekerroksen aikaansaamisen, kun tavoitellaan tiettyä häviöllisyyttä eikä maksimaalista suorituskykyä häviöiden suhteen.

Tutkimustyön teema-alueita ovat:

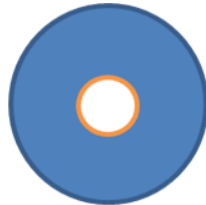
- Valittujen täyte- ja tehoaineiden sekä anisotrooppisten ominaisuuksien modifiointi vaimennuskyvyn tehostamiseksi monikerrosrakenteissa.
- Monikerroksisten anisotrooppisten komposiittirakenteiden valmistustekniikat sekä koekappaleiden valmistus mittauksiin.
- Mikroaaltoalueen sähköisten ja magneettisten parametrien mittaukset ja absorptio-ominaisuuksien todentaminen laboratoriomittauksin.
- Kehittyneiden simulointityökalujen hyödyntäminen monikerrosrakenteiden optimoinnissa käyttäen lähtöarvoina yksittäisistä kerroksista mitattuja materiaaliparametreja.

Jo aiemmissa MATINE-hankkeissa kirjallisuuden [2] pohjalta löytyi potentiaalinen valmistusreitti, jota sovellettiin absorboivan pinnoitekerroksen aikaansaamiseksi mikropallojen pintaan. Projektissa käytettiin pinnoitekerroksen valmistustekniikkana kemiallista pinnoitusta lähtien liikkeelle metallisuoloista (electroless plating). Menetelmä oli testattu aiemmissa MATINE-hankkeissa ja näiden aikana oli pinnoituksen prosessiolosuhteet saatu hyvin hallintaan. Siksi ABSOWIDE-projektissa päädyttiin valitsemaan mikropallojen lisäksi pinnoitusalueeksi myös paisutetut polymeeripallot, joiden tiheys on kertaluokkaa kevyempi mikropalloihin verrattuna. Tämä valinta toi lisää tutkimuksellista haastetta projektin

toteutukseen. Myöhemmässä vaiheessa käytetyt tekniikat, komposiittimateriaalin valmistus ja koemateriaalien vaimennusominaisuuksien määritykset, olivat olleet käytössä jo aiemmissa häivemateriaalitutkimukseen liittyneissä projekteissa ja siten entuudestaan tutumpia. Pinnoitettavaksi polymeeripallolaaduksi valittiin tunnetun valmistajan paisutettu pallo, jonka keskimääräinen partikkelikoko oli valmistajan ilmoituksen mukaan välillä 30-50  $\mu\text{m}$ . Kun koepinnoitusten prosessointiolosuhteet saatiin kohdalleen, pinnoitetut paisutetut polymeeripallot tarkasteltiin elektronimikroskopian ja energiadispersiivisen analyysin (SEM+EDS) sekä röntgendiffraktion (XRD) avulla pinnoitekerroksen koostumuksen ja paksuuden määrittämiseksi. Kun tarkastelujen jälkeen pinnoitekerros todettiin riittävän hyväksi, niin siirryttiin toteutuksessa seuraavaan vaiheeseen.

### 3.1 KOMPOSIITTIMATERIAALIEN JA MITTAUSKAPPALEIDEN VALMISTUS

Komposiittimateriaalin matriisiksi valittiin yleisesti käytetty epoksi, joka sisältää hartsin ja kovetinosan. Tehoaineina käytettiin pinnoitettuja, paisutettuja polymeeripalloja 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.



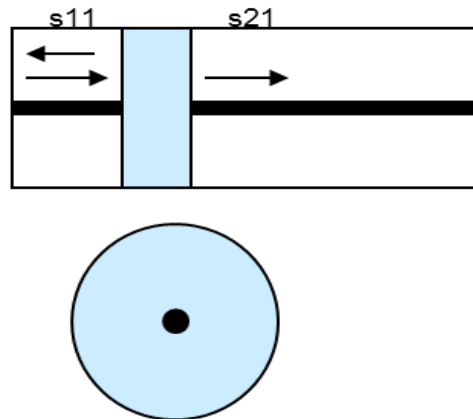
Frequency range	Outer diameter / mm	Tolerance	Inner diameter / mm	Tolerance
0.1-18 GHz	7.00	+0.0/-0.05 mm	3.04	+0.05/-0.0 mm

Kuva 1: Mikroaaltoabsorptiomittauksissa käytetyn rengasmaisen näytteen dimensiot.

### 3.2 KOEMATERIAALIEN MITTAUKSET JA MATERIAALIN VAIMENNUSOMINAISUUKSIEN MÄÄRITYS 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 dektekointiin. 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.

ABSOWIDE-projektin keskeisenä ideana oli hyödyntää mikroaaltoalueen absorptiomateriaaleissa metallisella tehoaineella pinnoitettuja paisutettuja polymeeripalloja upotettuna sähköä eristävään matriisiin. Tarkoituksena oli aikaansaada erittäin kevyt, häviöllinen sovittekerros varsinaisen häivemateriaaliin päälle (monikerrosratkaisu), johon mikroaaltosäteily (MA) tunkeutuu mahdollisimman vähän heijastuen ja absorboituu edetessään komposiittimateriaaliin valittujen tehoainepartikkelien sekä matriisimateriaalin yhteisvaikutuksesta. MA-säteilyn absorboituminen tapahtuu sähköisten ja magneettisten häviöiden kautta. Tällä monikerrosratkaisulla saadaan vaimennuksen kaistanleveyttä laajennettua.

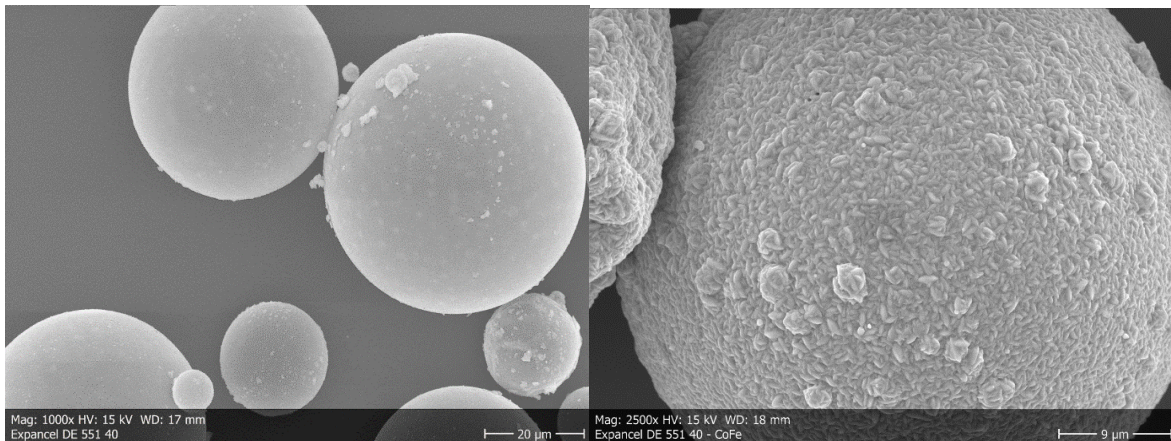
#### 4. Tulokset ja pohdinta

Vaimennuksen taajuuskaistan leventäminen kaksikerrosratkaisulla samalla pitäen keveys mahdollisimman alhaisena edellytti uusien täyteaineiden soveltamista komposiittimateriaalin valmistuksessa. Projekti keskittyi aluksi sovittekerroksessa käytettäviin täyteaineisiin. Mikropallojen rinnalle valitut paisutetut polymeeripallot olivat valmistajan ilmoituksen mukaan tiheydeltään luokkaa  $0,042 \text{ g/cm}^3$  (true density) ja kooltaan keskimäärin  $30\text{--}50 \mu\text{m}$ . Vastaavat arvot aiemmin käytetyille mikropalloille olivat tiheys  $0,34 \text{ g/cm}^3$  ja koko keskimäärin  $40 \mu\text{m}$ , arvot hiukan vaihdellen riippuen käytetystä laadusta. Polymeeripallot ovat siis kertaluokkaa kevyempiä tiheyden perusteella, ja niiden soveltuvuus kemialliseen pinnoitukseen selvitettiin heti projektin alussa. Muutamien koepinnoitusten jälkeen löytyi pinnoitusparametrit, joilla saatiin aikaan yhtenäinen, kattava pinnoitekerros polymeeripallon pintaan. Kuvassa 3 on esitetty polymeeripallojen pintamorfologiaa a) pinnoittamattomasta ja b) pinnoitetusta näytteestä elektronimikroskoopilla (SEM) kuvattuna. Pinnoitekerroksen paksuuden selvittämiseksi osa pinnoitetuista polymeeripalloista murskattiin murtopintojen synnyttämiseksi. Kuvassa 4 on esitetty SEM-kuvat pinnoitteen poikkeileikkauksen rakenteesta ja paksuudesta, joka oli tässä näytteessä noin  $1,5 \mu\text{m}$ . SEM-kuvien perusteella voidaan todeta pinnoitekerroksen olevan hyvin tasalaatuinen ja kattava tutkitussa koe-erässä.

Ensimmäisenä tavoiteltu pinnoitekerroksen koostumus oli kirjallisuusviitteen 2 mukainen seos Co-6% Fe (pitoisuus painoprosenttia). Tämän pinnoitekoostumuksen valmistus on ns. autokatalyyttinen reaktio, mikä käytännössä tarkoittaa, että reaktio etenee loppuun nopeasti ilman suurempaa ulkopuolista energiaa, sen jälkeen kun käynnistämiseen tarvittavat tietyt kynnyksarvot ylittyvät reaktioastiassa (pH,T). Kun koostumusta haluttiin varioida Fe-pitoisuuden kasvattamiseksi, reaktioaika hidastui huomattavasti ja sen ylläpitä-

---

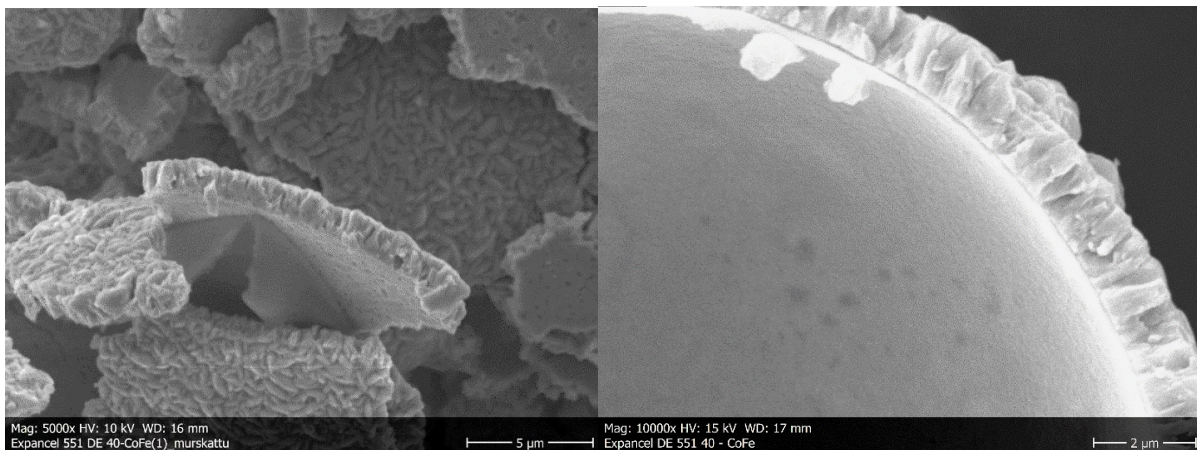
miseksi tarvittiin ulkopuolista energiaa. Rautapitoisuutta onnistuttiin kasvattamaan pinnoitekoostumuksessa aina 40 p-%: iin saakka. Tällöin syntynyt pinnoitekerros ei kattanut niin hyvin kaikkia pinnoitealustoja (palloja), mutta pallot joihin pinnoitekerros oli tarttunut, se kattoi koko pallopinnan. Koostumuksella Co-40% Fe pinnoitettuja mikropalloja käytettiin komposiittimateriaalin täyteaineena pitoisuudella 40 p-%, jotta saadaan vertailu aiemmin tehtyihin mittauksiin. Tässä vaiheessa ko. komposiittimateriaalin sähköisiä ja magneettisia parametreja ei vielä oltu ehditty mitata, mutta tullaan raportoimaan ohjausryhmälle tulosten saavuttua.



a)

b)

Kuva 3: Kemiallisessa pinnoituksessa käytetyt polymeeripallot a) sellaisenaan ja b) pinnoituksen jälkeen.



a)

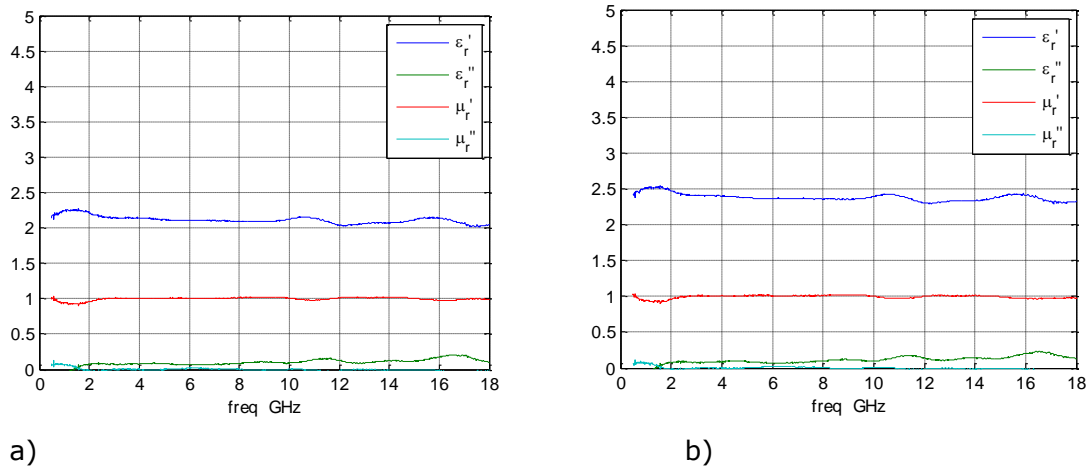
b)

Kuva 4: Pinnoitettujen polymeeripallojen a) murskauksessa syntyneet poikkipinnat ja b) yksityiskohtaisempi kuva pinnoitekerroksesta pallon pinnalla, pinnoitekerroksen paksuus noin 1,5 µm.

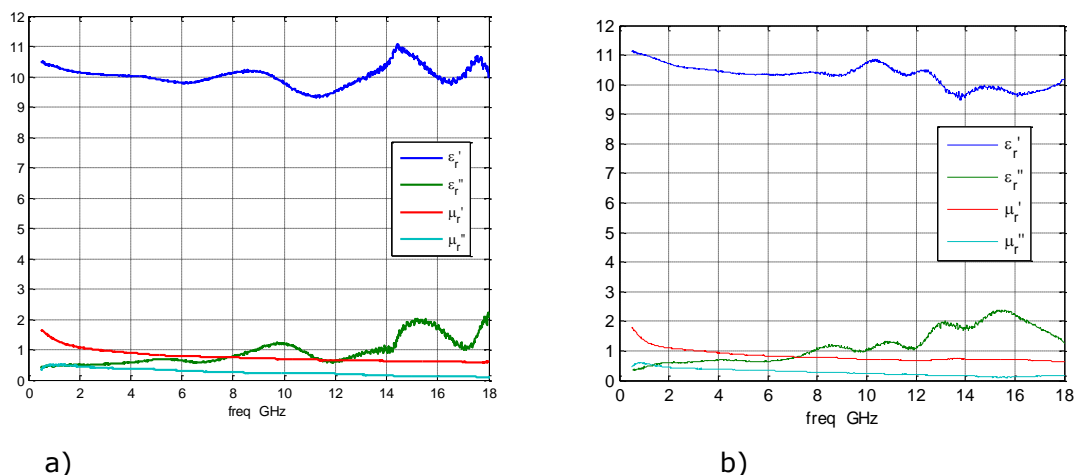
Varsinaiset mittauksiin menevät koemateriaalit valmistettiin dispergoimalla valmistetut pinnoitetut polymeeripallot tai mikropallot epoksिमatriisiin. Täyteainepitoisuutta varioitiin onnistuneesti 10–50 p% välillä, jolloin voitiin valmistaa mittauksiin riittävä määrä erilaisia näytteitä koostumuksen ja vaimennusominaisuuksien välisen korrelaation löytämiseksi. Komposiittiseokset valettiin pieneen muottiin noin 3 mm vahvuisena kerroksena. On huomioitava, että tässä vaiheessa keskityttiin häviöllisen sovitekerrosmateriaalin valmistukseen, jolloin varsinaiset tehoainepitoisuudet eivät olleet maksimaalisia. Toinen merkit-

tävä valmistettavaa materiaalikoostumusta ohjaava tekijä oli tiheyden pitäminen reilusti alle  $1 \text{ g/cm}^3$ .

Mittaukset suoritettiin aiemmin esitetyn kuvan 1 mukaisille rengasmaisille näytteille. Mittaussarjassa oli mukana useampi valmistettu näyte, joista seuraavassa on esitetty muutamia tulosesimerkkejä. Kuvassa 5 on esitetty eri seostuksilla täyteaineistetun epoksi-pohjaisen komposiitin mittausten pohjalta määritetyt sähköiset parametrit  $\epsilon'$  ja  $\epsilon''$  sekä magneettiset parametrit  $\mu'$  ja  $\mu''$  taajuuden funktiona. Vertailtaessa kahdella eri tiheydellä olevan komposiittimateriaalin materiaaliparametreja, ne ovat hyvin samankaltaiset keskenään ja niiden molempien todettiin soveltuvan sovitekerrokseksi varsinaisen häviökerroksen päälle. Sovitekerros päätettiin sijoittaa aiemmassa MATINE-hankkeessa valmistetun ja mitatun häviöllisen materiaalikoostumuksen päälle. Lisäksi vertailuun otettiin lähes samalla koostumuksella ABSOWIDE-projektin aikana valmistettu häviöllinen materiaalikoostumus. Näiden molempien valittujen häviökerrosten tiheydet olivat noin  $1,1 \text{ g/cm}^3$ , ja niiden mittausten pohjalta määritetyt  $\epsilon$  ja  $\mu$  kompleksiset arvot taajuuden funktiona on esitetty kuvassa 6.



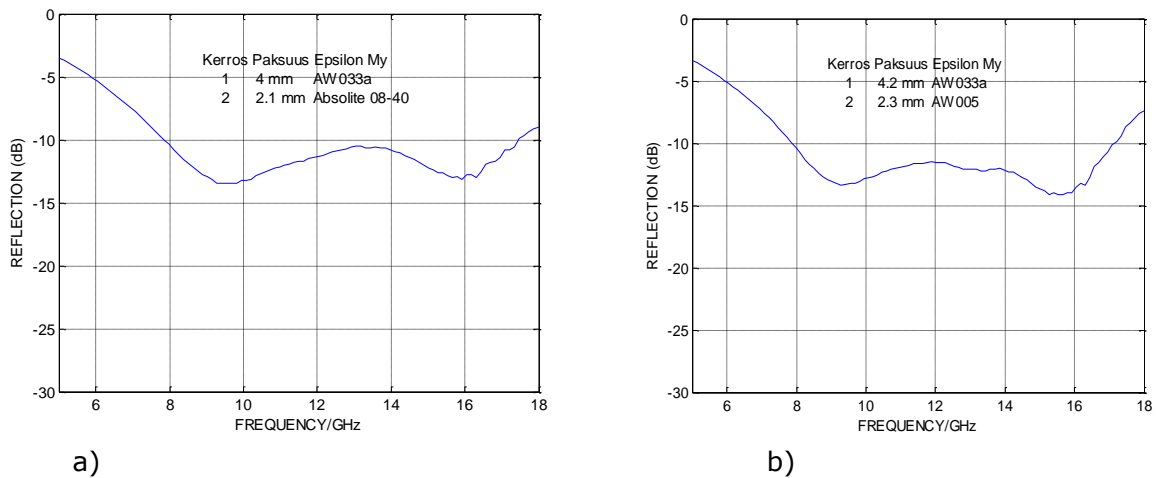
Kuva 5: Mittausten pohjalta määritetyt  $\epsilon$  ja  $\mu$  kompleksiset arvot taajuuden funktiona täyteaineistetulle epoksi-pohjaiselle, sovitekerrokseksi soveltuvalle komposiitille, kun materiaalin tiheys on a)  $0,54 \text{ g/cm}^3$  (näyte AW033) ja b)  $0,48 \text{ g/cm}^3$  (näyte AW031).



Kuva 6: Mittausten pohjalta määritetyt  $\epsilon$  ja  $\mu$  kompleksiset arvot taajuuden funktiona täyteaineistetulle epoksi-pohjaiselle häviökerrokselle, kun materiaalin koostumus on a) Epoksi-40 p% CoFe pinnoitettu lasipallo (näyte ABSOLUTE 08-40) ja b) Epoksi-45 p%

CoFe pinnoitettu lasipallo (näyte AW005).

Monikerrosrakenteiden suunnittelussa simulointi- ja optimointityökalujen avulla tehty laskenta on merkittävä työvaihe optimaalisen monikerrosrakenteen löytämiseksi. Simulointien lähtökohdaksi oli aiemmissa kuvissa 5 ja 6 esitetty yksittäisistä kerroksista saatu mitausdata, joka syötetään simulointimalliin, jonka avulla voidaan laskennallisesti optimoida tarvittava monikerrosrakenteen vaimennuskyvyn laskentaa suoritetiin useammalle sovite/häviökerros- yhdistelmälle. Potentiaalisimmat materiaaliyhdistelmät ja simuloinnin laskentatulokset kaksikerrosrakenteen vaimennuskyvylle on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7: Lasketut heijastusvaimennukset kaksikerrosrakenteelle, jossa a) sovitekerroksena näyte AW033, häviökerroksena ABSOLITE 08-40 ja b) sovitekerroksena näyte AW033, häviökerroksena AW005.

Simuloinnissa haettiin optimaaliset kerrospaksuudet sovite- ja häviökerrokselle vaimennuskyvyn optimoimiseksi koko X ja  $K_u$  taajuuskaistalle. Kuvassa 7 a) esitetty vaimennuskyky saavutetaan sovitekerroksen AW033 paksuudella 4,0 mm ja häviökerroksen ABSOLITE 08-40 paksuuden ollessa 2,1 mm. Vastaavasti kuvassa 7 b) esitetty vaimennuskyky saavutetaan sovitekerroksen AW033 paksuudella 4,2 mm ja häviökerroksen AW005 paksuuden ollessa 2,3 mm. Simulointitulosten perusteella kaksikerrosrakenteen vaimennustavoite -10 dB ulottuu lähes koko taajuuskaistan 8-18 GHz leveydelle. Kuvassa 7 b) esitetyn kaksikerrosrakenteen laskennallinen neliöpaino on 4,47 kg/m<sup>2</sup> ja kuvassa 7 b) esitetyn yhdistelmän neliöpaino vastaavasti 4,78 kg/m<sup>2</sup>. Tarkkaa tietoa nykyisin käytössä olevan kaksikerrosrakenteen neliöpainosta ja suorituskyvystä ei ollut saatavilla, mutta neliöpainon suhteen arvio on noin 9-10 kg/m<sup>2</sup>.

## 5. Loppupäätelmät

Projektin aikana kehitettiin edelleen valmistusreittiä onttojen mikropallojen pinnoittamiseksi Co-Fe pohjaisella koostumuksella: pinnoitusalueksi todettiin soveltuvan myös kertaluokkaa kevyempi polymeeripallo. Tämä loi hyvän lähtökohdan erittäin kevyen, häviöllisen sovitekerroksen valmistamiseksi. Pinnoitekerroksen koostumuksen varioinnissa onnistuttiin kasvattamaan Fe-pitoisuutta 40 p-%:iin saakka, mikä luo erittäin mielenkiintoisen mahdollisuuden säätää vaimennuksen suorituskykyä. Pinnoitettujen sekä pinnoittamattomien polymeeripallojen dispergointi epoksiin onnistui eri täyteainepitoisuuksilla ja





---

näin valmistetuista sovitekerrosmateriaaliksi soveltuvista komposiittimateriaaleista mitattiin häviöt taajuuden funktiona RF-taajuusalueella. Monikerrosrakenteiden suunnittelussa simulointi- ja optimointityökalujen avulla tehty laskenta on merkittävä työvaihe optimaalisen monikerrosrakenteen löytämiseksi. Simuloinnissa haettiin optimaaliset kerrospaksuudet sovite- ja häviökerrokselle vaimennuskyvyn optimoimiseksi koko X ja  $K_u$  taajuuskaistalle. Parhailla sovite-/häviökerrosten koostumusyhdistelmällä saavutettiin -10dB vaimennus lähes koko 8–18 GHz taajuuskaistalle. Kaksikerrosrakenteen laskennallisen neliöpainon pysyessä samanaikaisesti noin  $4,5 \text{ kg/m}^2$  suuruusluokassa, jonka arvioidaan oleva noin 50 % kevyempi nykyisin käytössä olevaan yhdistelmään verrattuna. Jatkoa ajatellen olisi mielenkiintoista tutkia keinoja vaikuttaa CoFe pinnoitteen kiteisyyteen ja sitä kautta vaikuttaa magneettisiin arvoihin. Lisäksi olisi ensiarvoisen tärkeää todentaa nyt simuloinnin tuloksena lasketun kaksikerrosrakenteen suorituskyky vapaan mittaradan mittauksin valmistetusta kerrosrakenteesta.

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

Projektin aikana ei syntynyt tieteellisiä julkaisuja tai muita raportteja.

---