

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Laajakaistainen ultrakevyt RF-taajuusalueen absorptioratkaisu

Pertti Lintunen, Tomi Lindroos, Arto Hujanen
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Visiokatu 4, PL1300, 33101 Tampere
pertti.lintunen@vtt.fi
020722 3701

Tiivistelmä

Häivetekniikalla on keskeinen rooli nykyaikaisessa puolustustoiminnassa. Elektronisen suo-
jauksen lisäksi voidaan sähkömagneettisen säteilyn synnyttämiä herätteitä hallita materiaali-
teknologian avulla. Aiemmissä tutkimuksissa on löydetty vaimennuskyvyltään riittäviä häive-
ratkaisuja, mutta tiettyihin suojauskohteisiin kyseisten häiveratkaisujen neliöpainot ovat edel-
leen olleet liian suuria. Aihepiirin tutkimuksen edetessä häiveratkaisua saatiin kevennettyä
huomattava määrä suorituskyvyn pysyessä ennallaan. Tämän jälkeen kehitystarve kohdistet-
tiin vaimennuksen taajuuskaistan leventämiseen koskemaan samanaikaisesti mikroaaltoalueen
X- ja Ku- kaistoja. Taajuuskaistan leventämistavoite ei ollut enää saavutettavissa pelkästään
yksikerrosratkaisulla. Tavoitteen saavuttamiseksi tarvittiin kaksikerrosrakenteen, jossa varsinaisen
häviökerroksen päällä on sovitekerros. Sovitekerroksen koostumusta säätämällä erilaisten
täyteaineiden avulla, voidaan aikaansaada häviöllinen ja samalla kevyt materiaaliratkaisu var-
sinaisen häviökerroksen päälle. Projektin aikana valmistettiin sovitekerrosmateriaaleja, joiden
tiheys oli luokkaa $0,50 \text{ g/cm}^3$ ja joiden sähkömagneettiset ominaisuudet mitattiin taajuuden
funktiona RF- taajuusalueella. Kaksikerrosrakenteiden simulaatiossa laskettiin yksittäisistä ker-
roksista mitattujen sähkömagneettisten ominaisuuksien pohjalta vaimennuskyky metallin pääl-
lä olevalle kerrosrakenteelle. Tavoiteltu kaksikerrosrakenteen -10 dB:n vaimennustaso ylisi
simulaatiolaskennan perusteella X- ja Ku -taajuuskaistojen leveydelle yhdistelmän neliöpainon
ollessa luokkaa $4,4 \text{ kg/m}^2$, mikä merkitsee noin 50 % kevennystä vertailurakenteeseen näh-
den.

1. Johdanto

Tämä on kaksivuotisen (2017–18) ABSOWIDE-projektin tulosaineiston tiivistelmäraportti. Sähkömagneettisen spektrin käyttö ja samalla riippuvuus sen häiriöttömästä toiminnasta on lisääntynyt viime aikoina sodankäynnissä. Lainaus Puolustusvoimien tutkimusagendasta 2015: "Kuvantavan tutkateknologian pienentyminen ja tarkkuuden kasvaminen sekä laser- ja moni- sekä hyperspektritekniologiat edellyttävät joukkojen häiveteknisen suojan parantamista. Vastasensoritekniologioita kehittämällä sekä uusien materiaali- ja rakenneteknologioiden 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 lähettäjistä poispäin. Muotoilun ja elektronisen suojausjärjestelmän lisäksi voidaan sähkömagneettisen säteilyn synnyttämiä herätteitä hallita materiaalitekniologian avulla.

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			

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 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 aergeelipartikkelit. 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 2010–2016 toteutetuille, häivemateriaalien tutkimukseen keskittyneille MATINE-projekteille. Tässä projektissa keskitytään löytämään keinoja kaksikerroksisen häiveratkaisun keventämiseksi sekä vaimennuskaistan leventämiseksi muun suorituskyvyn pysyessä ennallaan. Aiempien MATINE-projektien puitteissa on vaimennuskaistan leventämisen 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 uuden tyyppistä 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:

- 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
- Hyödyntämällä kehittyneitä simulointityökaluja optimoida suorituskykyinen ja kevyt vaimennusrakenne mitattujen materiaaliparametrien pohjalta.
- Tavoiteltava vaimennus -10dB yhtäaikaaisesti X ja Ku taajuuskaistalla, 50% nykyistä ke-

vyemmällä 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 tai grafiittihiutaleita voidaan magneettisia -ja sähköisiä häviöitä kasvattaa ilman merkittävää painon lisäystä.

Koostumusta suunniteltaessa ja säädettäessä pidetään tavoitteena säilyttää häviöllisen sovitekerroksen tiheys reilusti alle 1 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.

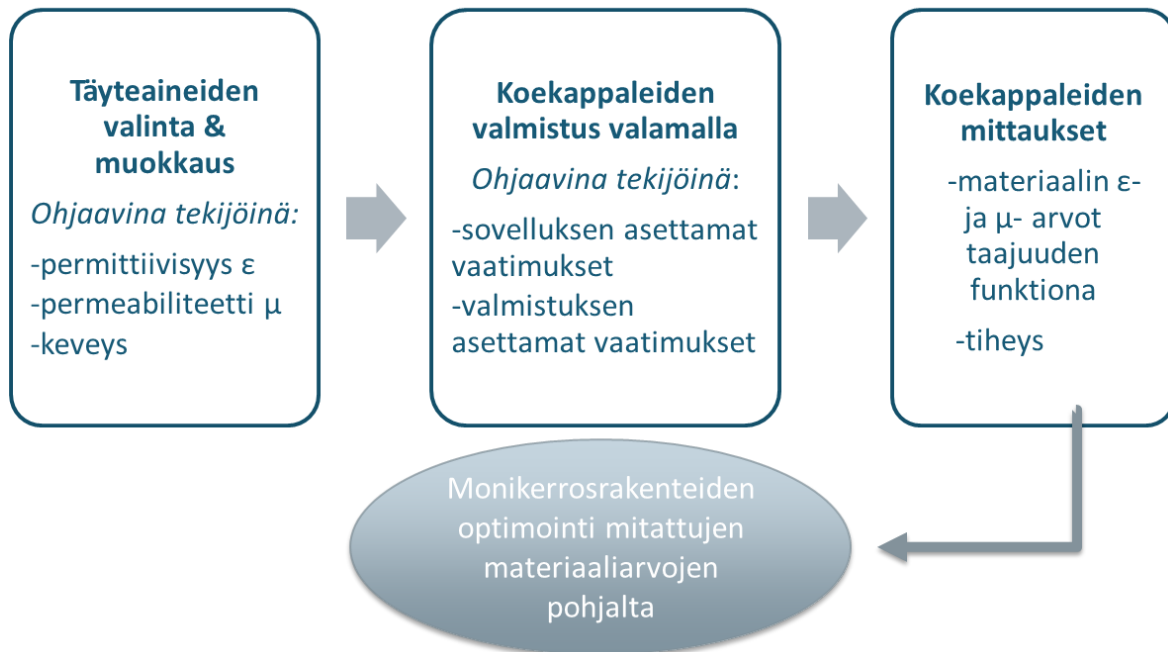
3. Aineisto ja menetelmät

Mikroaaltoja absorboivat materiaalityratkaisut 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. karbonyyliirautaa, koboltti-rautaseosta jauhemaisena lisäyksenä. Kun nämä metalliset tehoaineet saadaan pinnoitteena ontton 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 suorituskkyä häviöiden suhteen.

Tutkimustyön teema-alueita ovat:

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

Kuvassa 1 on esitetty kaaviokuvana työn eri vaiheet ja kutakin työvaihetta ohjaavat tärkeimmät tekijät sekä mittausarvot.



Kuva 1. Kaaviokuva työn eri vaiheista.

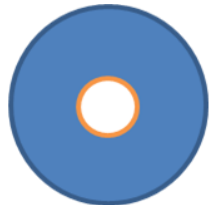
Jo aiemmissa MATINE-hankkeissa kirjallisuuden pohjalta² löytyi potentiaalinen valmistusreitti, jota sovellettiin absorboivan pinnoitekerroksen aikaansaamiseksi mikropallojen pintaan. Projektissa käytettiin pinnoitekerroksen valmistustekniikkana kemiallista pinnoitusta lähtien liikkeelle metallisuoloista (electroless plating). Menetelmä oli testattu aiemmissa MATINE-hankkeissa ja näiden aikana oli pinnoituksen prosessiolosuhteet saatu hyvin hallintaan. Siksi ABSOWIDE-projektissa päädyttiin valitsemaan mikropallojen lisäksi pinnoitusaluslaskaksi 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 määrittäminen, olivat olleet käytössä jo aiemmissa häivemateriaalitutkimukseen liittyneissä projekteissa ja siten entuudestaan tutumpia. Pinnoitettavaksi polymeeripallolaa-dukiksi valittiin tunnetun valmistajan paisutettu pallo, jonka keskimääräinen partikkelikoko oli valmistajan ilmoituksen mukaan välillä 30-50 μm . Kun koepinnoitusten prosessointiolosuhteet saatiin kohdalleen, pinnoitetut paisutetut polymeeripallot tarkasteltiin elektronimikroskopian ja energiadiispersiivisen analyysin (SEM+EDS) sekä röntgendiffraktion (XRD) avulla pinnoitekerroksen koostumuksen ja paksuuden määrittämiseksi. Projektin 1. vuoden aikana todettiin hiilinanoputkien seostamisen yhdessä mikropallojen kanssa olevan haasteellista seoksen viskositeetin kasvaessa voimakkaasti melko pienilläkin hiilinanoputkien seostusmäärillä. Tämän perusteella päädyttiin kokeilemaan grafiittihiutaleita yhdessä mikropallojen kanssa sähköisten ominaisuuksien säätämiseksi kohdalleen. Lisäksi valittuja grafiittihiutaleita pinnoitettiin samalla menetelmällä kuin mikropallojakin. Kun pinnoitusten jälkeen näytteille tehtyjen SEM+EDS -tarkastelujen jälkeen pinnoitekerros todettiin riittävän hyväksi, niin siirryttiin toteutuksessa seuraavaan vaiheeseen.

Komposiittimateriaalien ja mittauskappaleiden valmistus

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

² 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.

tiin matriisiin eri täyteainepitoisuuksilla aina 50 til.-%: iin asti, mikä osoittautui käytännössä valmistettavuuden kannalta ylärajaksi. Tämän lisäksi seostettiin grafiittihiutaleita sellaisenaan tai pinnoitettuna permittiivisyyden säätämiseksi sekä myös testattiin pinnoitettujen hiutaleiden vaikutusta permeabiliteetin arvoon. Kun seos oli saatu riittävän homogeeniseksi, niin komposiittiseos valettiin pieneen muottiin noin 3 mm paksuisena kerroksena, josta työstettiin alla oleva kuvan 2 mukainen rengas mittauksiin taulukossa mainituin mitoin.

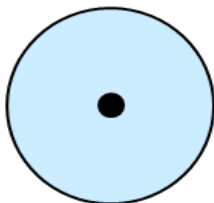
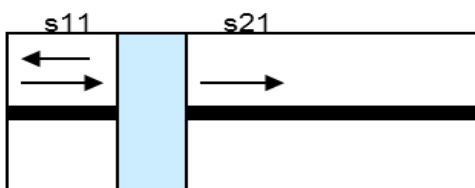


Frequency range	Outer diameter / mm	Tolerance	Inner diameter / mm	Tolerance
0.1-18 GHz	7.00	+0.0/-0.05 mm	3.04	+0.05/-0.0 mm

Kuva 2. Mikroaaltoabsorptiomittauksissa käytetyn rengasmaisen näytteen dimensiot.

Koemateriaalien mittaukset ja materiaalin vaimennusominaisuuksien määrittäminen mittausten pohjalta

VTT:llä on mittausrakenteita 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 taajuuskaistalla. Mittauksissa käytettiin ns. koaksiaalista näytteenpidintä, johon sopii kuvan 2 mukainen rengasmaisen näyte. Mittaus perustuu näytteen läpimenevän ja heijastuvan säteilyn detektointiin. Periaatekuva mittauksesta on esitetty kuvassa 3. Kun mitattavan näytteen paksuus tunnetaan, voidaan mitattujen s_{11} ja s_{21} arvojen pohjalta määrittää materiaalin kompleksinen sähköinen parametri ϵ^* ja magneettinen parametri μ^* .

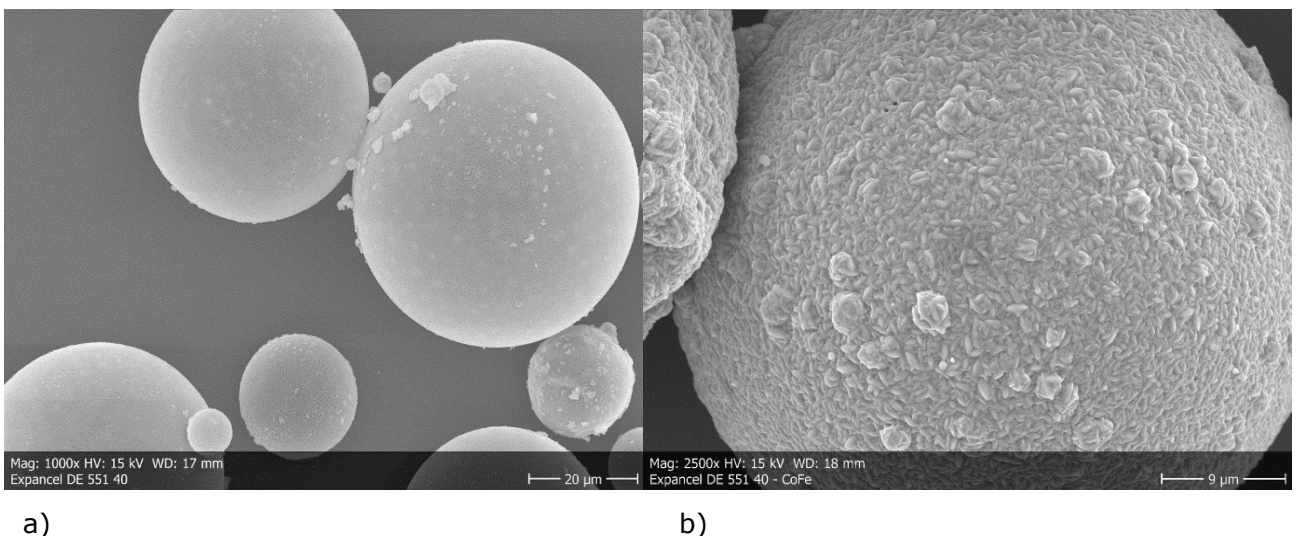


Kuva 3. Mikroaaltoabsorptiomittauksen periaatekuva, jossa näytteestä (sininen) mitataan heijastuva s_{11} -säteily ja läpimenevä s_{21} -säteily.

ABSOWIDE-projektin keskeisenä ideana oli hyödyntää mikroaaltoalueen absorptiomateriaaleissa metallisella tehoaineella pinnoitettuja paisutettuja polymeeripalloja sekä grafiittihiutaleita upotettuna sähköä eristävään matriisiin. Tarkoituksena oli aikaansaada erittäin kevyt, häviöllinen sovitekerros varsinaisen häivemateriaaliin päälle (monikerrosratkaisu), johon mikroaltoaalto säteily (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 sovitekerroksessa käytettäviin täyteaineisiin. Silica-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 käytetylle mikropallolle 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 4 on esitetty polymeeripallojen pintamorfologiaa a) pinnoittamattomasta ja b) pinnoitetusta näytteestä elektronimikroskoopiilla (SEM) kuvattuna.

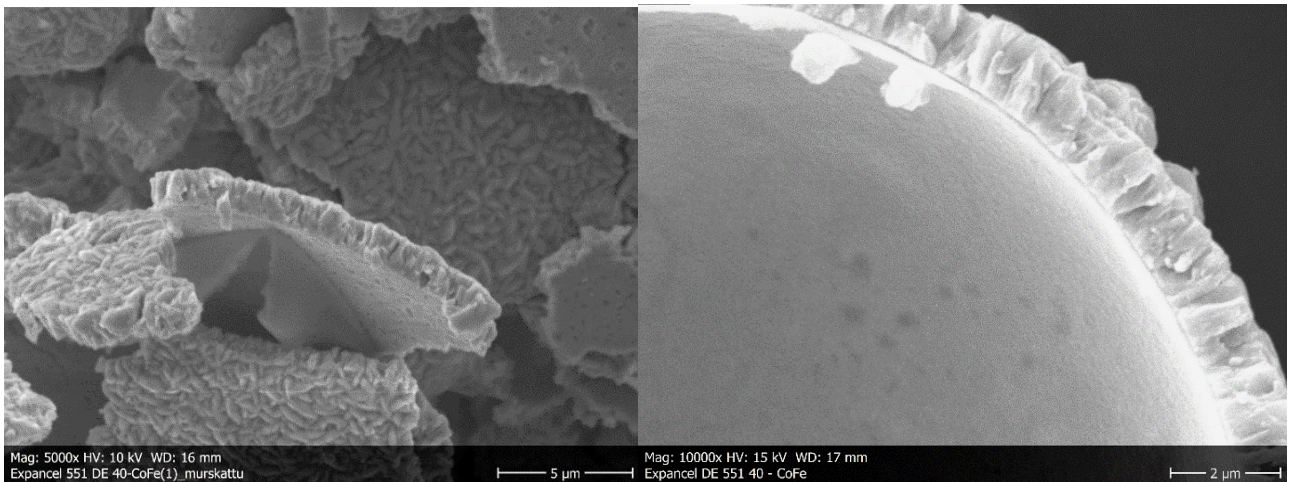


Kuva 4. Kemiallisessa pinnoituksessa käytetyt polymeeripallot a) sellaisenaan ja b) pinnoituksen jälkeen.

Pinnoitekerroksen paksuuden selvittämiseksi osa pinnoitetuista polymeeripalloista murskattiin murtopintojen synnyttämiseksi. Kuvassa 5 on esitetty SEM-kuvat pinnoitteen poikkileikkauksen 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 kynnyksar-

vot ylittyvät reaktioastiassa (pH,T). Rautapitoisuutta onnistuttiin kasvattamaan pinnoitekoostumuksessa aina 40 p-%: iin saakka magneettisten ominaisuuksien kasvattamiseksi, mutta tällöin syntynyt pinnoitekerros ei kattanut niin hyvin kaikkia pinnoitealustoja (palloja). Mittauksissa havaittiin, hieman teoreettisen oletuksen vastaisesti, etteivät koostumuksella Co-40%Fe pinnoitetut polymeeripallot tuoneet selkeää eroa komposiittimateriaalista mitattuihin permittiivisyyden ja permeabiliteetin arvoihin verrattuna Co-6%Fe koostumuksella pinnoitettuihin.

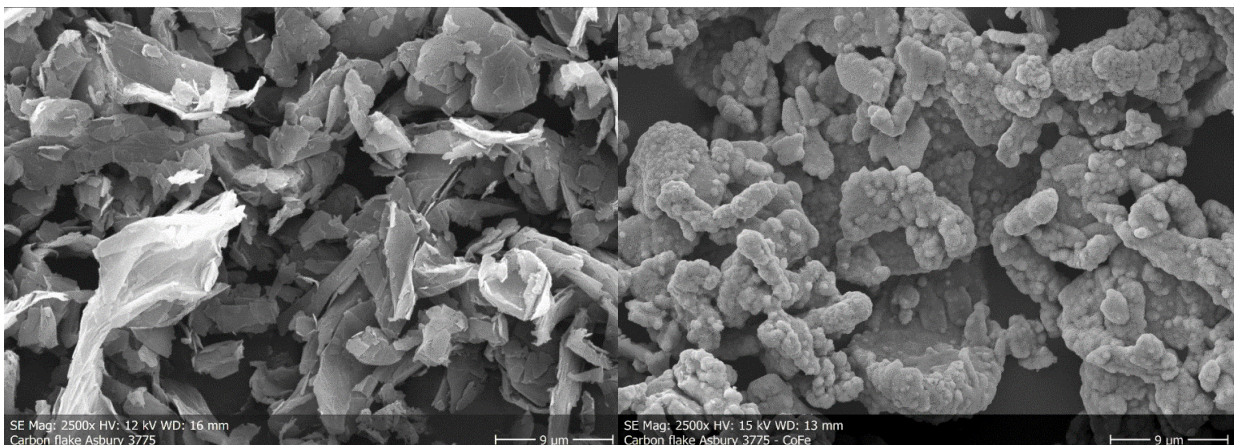


a)

b)

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

Koska suuremman Fe- pitoisuuden pinnoitekerroksen valmistus oli enemmän ulkopuolista energiaa vaativa sekä myös laadullisempi epätasaisempi, keskityttiin jatkossa autokatalyyttisen reaktion (Co-6%Fe) käyttöön grafiittihiutaleiden pinnoituksissa. Grafiittihiutaleiden pinnoitukset onnistuivat hyvin ja pinnoite saatiin kertymään kattavasti hiutaleiden pintaan, kuva 6.



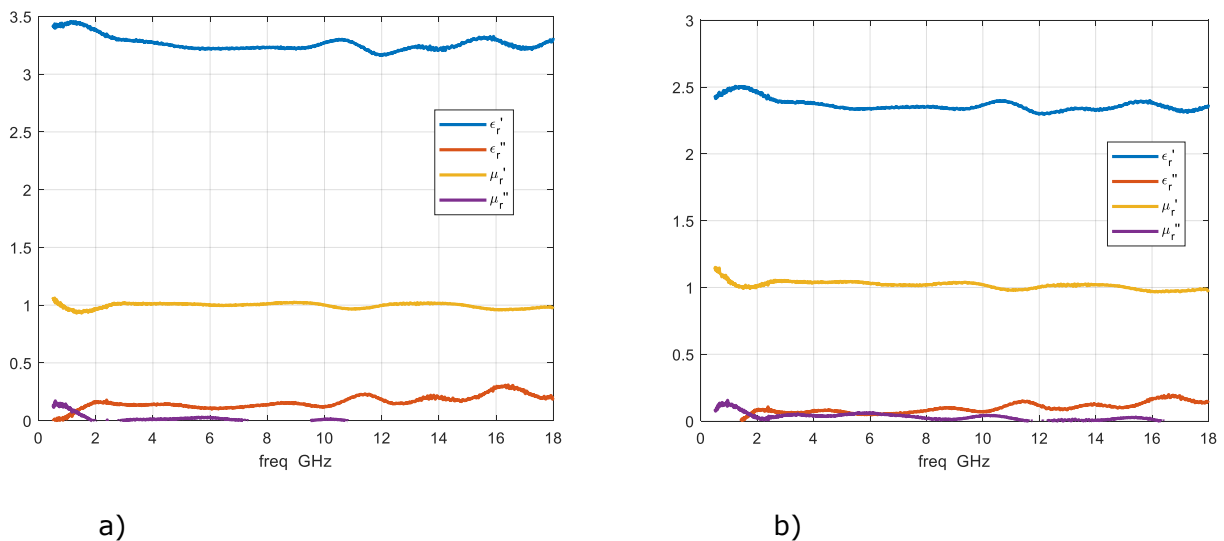
a)

b)

Kuva 6. Kemiallisessa pinnoituksessa käytetyt grafiittihiutaleet a) sellaisenaan b) pinnoituksen jälkeen.

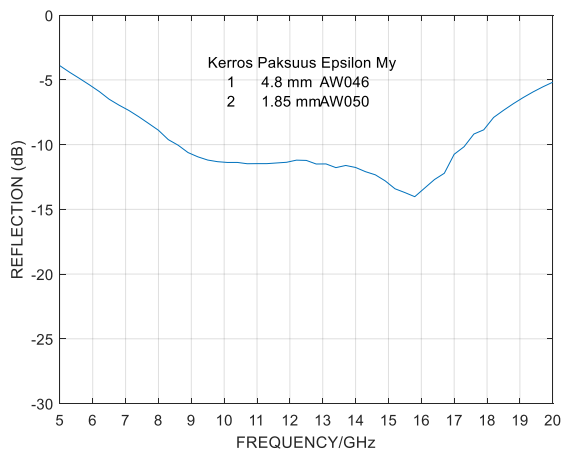
Varsinaiset mittauksiin menevät koemateriaalit valmistettiin dispergoimalla valmistetut pinnoitetut polymeeripallot tai grafiittihiutalet epoksimatriisiin yhdessä pinnoittamattomien kanssa eri kombinaatioilla. Täyteainepitoisuutta varioitiin onnistuneesti 10-50 til.-% välillä, jolloin voitiin valmistaa mittauksiin riittävä määrä erilaisia näytteitä koostumuksen ja vaimennusominaisuuksien välisen korrelaation löytämiseksi. Komposiittiseokset valettiin pieneen muottiin noin 3 mm vahvuksena kerroksena. On huomioitava, että tässä vaiheessa keskityttiin häviöllisen sovittekerrosmateriaalin valmistukseen, jolloin varsinaiset tehoainepitoisuudet eivät olleet maksimaalisia. Toinen merkittävä valmistettavaa materiaali koostumusta ohjaava tekijä oli tiheyden pitäminen reilusti alle 1 g/cm^3 .

Mittaukset suoritettiin aiemmin esitetyn kuvan 2 mukaisille rengasmaisille näytteille. Mittausarjassa oli mukana useampi valmistettu näyte, joista seuraavassa on esitetty muutamia tulosesimerkkejä. Kuvassa 7 on esitetty sovittekerrokseksi soveltuvan, eri seostuksilla täyteaineistetun epoksipohjaisen komposiitin mittausten pohjalta määritetyt sähköiset parametrit ϵ' ja ϵ'' sekä magneettiset parametrit μ' ja μ'' taajuuden funktiona. Mittaustuloksen 7a tapauksessa seostuksessa käytettiin polymeeripallojen lisäksi pinnoittamattomia grafiittihiutaletta, vastavasti 7b tapauksessa on käytetty polymeeripallojen kanssa pinnoitettua grafiittihiutaletta, joka hiukan nostaa permeabiliteetin reaaliosaa mikä olikin toivottava vaikutus tätä seosta suunniteltaessa. Muutokset ovat melko pieniä mutta 2-kerrosrakenteissa niillä on merkitystä kokonaisvaimennusta laskettaessa.

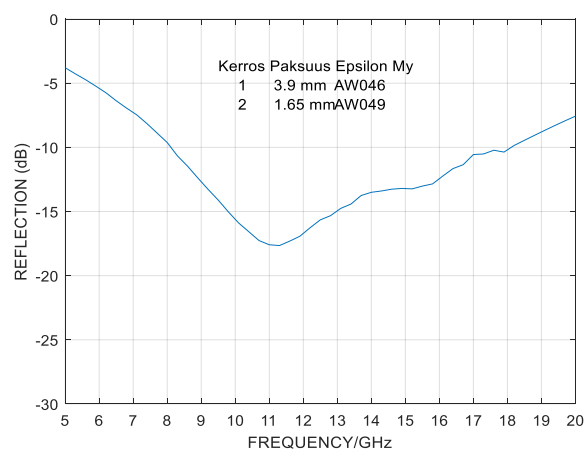


Kuva 7. Mittausten pohjalta määritetyt ϵ ja μ kompleksiset arvot taajuuden funktiona täyteaineistetulle epoksipohjaiselle, sovittekerrokseksi soveltuvalle komposiitille, kun materiaalin tiheys on a) $0,60 \text{ g/cm}^3$ (näyte AW056) ja b) $0,65 \text{ g/cm}^3$ (näyte AW059).

Monikerrosrakenteiden optimoinnissa käytettiin lähtöarvoina yksittäisistä kerroksista mitattuja materiaaliparametreja. Projektin kaksivuotisen keston aikana oli 2-kerrosrakenteiden yhdistelmiä laskennassa mukana useita kymmeniä. Kuvassa 8 on esitetty kahden erilaisen kerrosrakenteen vaimennus, joista kuvaajassa 8b on esitetty suorituskyyvyltään asetetut tavoitteet täyttävän kerrosrakenteen vaimennus.



a)



b)

Kuva 8. Lasketut heijastusvaimennukset kaksikerrosrakenteelle, jossa a) sovitekerroksen paksuus 4,8 mm ja häviökerroksen 1,85 mm b) sovitekerroksen paksuus 3,9 mm ja häviökerroksen 1,65 mm.

Monikerrosrakenteiden suunnittelussa simulointi- ja optimointityökalujen avulla tehty laskenta on merkittävä työvaihe optimaalisen monikerrosrakenteen löytämiseksi. Simulointien lähtökohdaksi oli yksittäisistä kerroksista saatu mittausdata, joka syötetään simulointimalliin, jonka avulla voidaan laskennallisesti optimoida tarvittava monikerrosrakenne. Kaksikerrosrakenteen vaimennuskyvyn laskentaa suoritettiin useammalle sovite/häviökerros-yhdistelmälle, joista potentiaalisimmat yhdistelmät ja simuloinnin laskentatulokset kaksikerrosrakenteen vaimennuskyvylle on esitetty kuvassa 8.

Simuloinnissa haettiin optimaaliset kerrospaksuudet sovite- ja häviökerrokselle vaimennuskyvyn optimoimiseksi koko X- ja K_u taajuuskaistalle. Kuvaajassa 8a esitetty vaimennuskyky saavutetaan monikerrosrakenteen kokonaispaksuudella 6,65 mm neliöpainon ollessa 4,67 kg/m². Tavoiteltu vaimennus -10 dB ei aivan toteudu koko X- ja K_u kaistanleveydellä (8–18 GHz). Vastaavasti kuvaajassa 8b esitetty vaimennuskyky saavutetaan monikerrosrakenteen kokonaispaksuudella 5,55 mm neliöpainon ollessa 4,39 kg/m². Jälkimmäisessä tapauksessa (8b) vaimennus on yli -10dB koko 8–18 GHz taajuuskaistalla.

5. Loppupäätelmät

Projektin aikana kehitettiin edelleen valmistusreittiä onttojen polymeeripallojen ja grafiittihiutaleiden pinnoittamiseksi Co-Fe pohjaisella koostumuksella: grafiittihiutaleet todettiin soveltuvan myös pinnoitusaluslueksi. Tämä loi hyvän lähtökohdan erittäin kevyen, häviöllisen sovitekerroksen valmistamiseksi. Pinnoitekerroksen koostumuksen varioinnissa onnistuttiin kasvattamaan Fe-pitoisuutta 40 p-%:iin saakka, muttei sen vaikutus permeabiliteetin arvoon ollut merkittävä ja siten vaimennuksen suorituskykyyn. Pinnoitettujen sekä pinnoittamattomien polymeeripallojen sekä grafiittihiutaleiden 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. Parhaalla sovite/häviökerrosten koostumusyhdistelmällä saavutettiin -10dB vaimennus koko 8–18 GHz taa-



juuskaistalle. Kaksikerrosrakenteen laskennallisen neliöpainon pysyessä samanaikaisesti noin $4,4 \text{ kg/m}^2$ suuruusluokassa, jonka on noin 50 % kevyempi verrattuna referenssiksi valittuun rakenteeseen. Kaksivuotisen projektin aikana valmistettiin lähes 60 koostumusta, joista kertyi huomattava määrä mittausdataa. Projektin aikana havaittiin, että jo pienet muutokset kerrosten materiaaliparametreissa, permittiivisyys ϵ ja permeabiliteetti μ , sekä kerrospaksuus vaikuttavat merkittävästi suorituskykyyn 2-kerrosrakenteissa. Jatkoa ajatellen olisi mielenkiintoista tutkia koneoppimisen käytettävyyttä tämän monimuuttujaisen optimointitehtävän ratkaisemisessa.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Projektin aikana ei syntynyt tieteellisiä julkaisuja tai muita raportteja.