



Hybridinano- komposiittien 3D-tulostus häiveratkaisuihin

Pertti Lintunen, Tomi Lindroos, Timo Kinos,
Arto Hujanen, Asta Nurmela
Teknologiantutkimuskeskus VTT Oy

Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan julkaisuja
2024:1

Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan julkaisuja 2024:1

Hybridinanokomposiittien 3D-tulostus häiveratkaisuihin

Pertti Lintunen, Tomi Lindroos, Timo Kinos, Arto Hujanen, Asta Nurmela

Teknologiantutkimuskeskus VTT Oy

Puolustusministeriö Helsinki 2024

Julkaisujen jakelu

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-
arkivet Valto

julkaisut.valtioneuvosto.fi

Puolustusministeriö

This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use.
Commercial use is prohibited.

ISBN pdf: 978-951-663-443-5

ISSN pdf: 2984-102X

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2024

Hybridinanokomposiittien 3D-tulostus häiveratkaisuihin

Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan julkaisuja 2024:1

Julkaisija Puolustusministeriö

Tekijä/t Pertti Lintunen, Tomi Lindroos, Timo Kinos, Arto Hujanen, Asta Nurmela

Toimittaja/t Pertti Lintunen

Yhteisötekijä Teknologiantutkimuskeskus VTT Oy

Kieli suomi

Sivumäärä 18

Tiivistelmä

Projektin kokonaistavoitteena oli luoda uutta osaamispohjaa uusien teknologioiden hyödyntämiseksi ja yhdistämiseksi entistä suorituskykyisempien häiveteknisten ratkaisujen toteuttamiseksi. Tutkimuksen lähtökohtana oli kysymys, miten eri teknologioita voidaan yhdistää suorituskyvyn maksimoimiseksi. Uusista valmistustekniikoista 3D-tulostus mahdollistaa häiverakenteen suunnittelun ja valmistuksen vapaammin, ilman perinteisten tekniikoiden rajoitteita. Projekti koostui tulostukseen soveltuvan materiaalin kehitystyöstä, kehitettyjen koostumusten tulostuskokeista joko filamentti- tai granulitulostusta hyödyntäen sekä häiverakenteiden suunnittelusta ja suunniteltujen rakenteiden suorituskyvyn simuloineista. Simulointien ja tulostuskokeiden antamien reunaehtojen perusteella projektin loppuvaiheessa tulostettiin kennomainen rakenne, jonka vaimennusominaisuudet voitiin mitata. Saatujen tulosten perusteella häiverakenteiden valmistuksessa 3D- tulostus on potentiaalinen teknologia, joka kuitenkin vaatii laajempaa tutkimusta etenkin käytettävissä olevien laitteistojen osalta koskien sekä tulostusmateriaalin valmistusta että tulostamista.

Klausuuli Tämä julkaisu on toteutettu osana Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan (MATINEn) tutkimusrahoituksen toimeenpanoa. (www.defmin.fi/matine) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta puolustusministeriön näkemystä.

Asiasanat 3D-tulostus, tutka-absorptiomateriaali, nanokomposiitti, maanpuolustus, tutkimus, kokonaismaanpuolustus

ISBN PDF 978-951-663-443-5

ISSN PDF 2984-102X

Julkaisun osoite <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-663-443-5>

Hybridnanokompositer 3D-utskrift för radarabsorbenter

Publikationer av försvarets vetenskapliga delegation 2024:1

Utgivare Försvarsministeriet

Författare Pertti Lintunen, Tomi Lindroos, Timo Kinos, Arto Hujanen, Asta Nurmela

Redigerare Pertti Lintunen

Utarbetad av Teknologiska forskningscentralen VTT Ab

Språk finska

Sidantal

18

Referat

Huvudmålet med projektet var att skapa en ny kunskapsbas för att utnyttja och kombinera nya tekniker för att demonstrera ännu effektivare lösningar för radarabsorberande material och strukturer. Utgångspunkten för forskningen var frågan om hur olika teknologier kan kombineras för att maximera absorptionskapacitet. Bland de nya tillverkningsteknikerna gör 3D-utskrift det möjligt att utforma och tillverka radarabsorberande strukturer på ett friare sätt, utan de begränsningar som traditionella tekniker innebär. I projektet togs fram absorptionsmaterial som lämpar sig för 3D-utskrift och utfördes utskriftsförsök med de olika utvecklade kompositionerna med antingen filament- eller granulutskrift. Här utvecklades och simulerades också de mest effektfulla radarabsorberande strukturerna. Baserat på de erhållna resultaten från simulerings- och utskriftsförsöken, var det i projektets slutfas möjligt att utskryva en cellstruktur, vars absorptionskapacitet kunde mätas. Resultaten visar att 3D-utskrift är en potentiell teknologi för tillverkning av radarabsorberande material och strukturer, men detta kräver dock ytterligare forskning, särskilt med hänsyn till tillgänglig utrustning, både för tillverkning av utskriftsmaterialet och för utskriftsprocessen.

Klausul

Den här publikation är en del i genomförandet av forskningsfinansiering av Försvarets vetenskapliga delegation. (www.defmin.fi/matine) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt.

Nyckelord

3D-utskrift, radarabsorberande material, nanokomposit, försvaret, forskning, totalförsvaret

ISBN PDF 978-951-663-443-5

ISSN PDF

2984-102X

URN-adress

<https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-663-443-5>

3D printed hybridnanocomposites for radar absorbers

Publications of the Scientific Advisory Board for Defence 2024:1

| | | | |
|---------------------|--|--------------|----|
| Publisher | Ministry of Defence | | |
| Author(s) | Pertti Lintunen, Tomi Lindroos, Timo Kinos, Arto Hujanen, Asta Nurmela | | |
| Editor(s) | Pertti Lintunen | | |
| Group author | VTT Technical Research Centre of Finland Ltd | | |
| Language | Finnish | Pages | 18 |

Abstract

The overall goal of the project was to create a basis for new know-how for utilizing and combining new technologies to implement more efficient radar absorbent solutions. The starting point of the research was the question of how different technologies can be combined to maximize performance. Among the new manufacturing techniques, 3D printing allows designing and manufacturing of the absorbent structures more freely, without the limitations of traditional techniques. The project consisted of the material development work suitable for printing, printing tests of the developed compositions using either filament or granule printing, as well as the design of absorbent structures and performance simulations of the planned structures. Based on the boundary conditions given by the simulations and printing tests, in the final phase of the project, a cellular structure was printed, whose radar absorbing properties were measured. Based on the obtained results, 3D printing is a potential technology in the production of structures, which, however, requires more extensive research, especially with regard to the available equipment, regarding both the production of the printing material and printing itself.

Provision This publication is part of the implementation of research funding of the Scientific Advisory Board for Defence (MATINE). (www.defmin.fi/matine) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Defence Ministry.

Keywords 3D-printing, radar absorbing material, nanocomposite, national defence, research, comprehensive defence approach

ISBN PDF 978-951-663-443-5 **ISSN PDF** 2984-102X

URN address <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-663-443-5>

Sisältö

| | | |
|---|--|----|
| | ESIPUHE | 7 |
| 1 | Johdanto | 8 |
| 2 | Tutkimuksen tausta ja lähtökohdat | 9 |
| 3 | Tutkimuksen osa-alueet ja työn toteutus | 12 |
| 4 | Tulokset | 14 |
| 5 | Johtopäätökset | 17 |

ESIPUHE

Kotimaisella teknologiaosaamisella on merkittävä vaikutus puolustusjärjestelmän kokonaistoimintaan sekä sotilaalliseen huoltovarmuuteen. Kehityksessä mukana pysyminen edellyttää korkeatasoista ja pitkäjänteistä teknologista tutkimusta ja kehitystä riittävän osaamispohjan luomiseksi sekä tuotanto- ja innovaatiokyvyn ylläpitämiseksi Suomessa.

Teknologiakehitys on nopeutunut viime vuosina merkittävästi digitaalisten teknologioiden hyödyntämisen seurauksena. Digitaalisuus uusien simulointi- ja mallinnusmahdollisuuksien muodossa nopeuttaa kehitystyötä tälläkin sektorilla. Tämä MATINEn rahoittama kaksivuotinen projekti on jatkumoa pitkäjänteiseen häivemateriaalien kehitystyöhön ja vastasi yllä kuvattuun tarpeeseen yhdistämällä monialaisesti eri teknologiaosa-alueita (nanomateriaalit, 3D-tulostus, simulointi ja optimointi) uusien kyvykkyyksien luomiseksi herätteiden hallintaan.

Pertti Lintunen

1 Johdanto

Häivetekniikalla on keskeinen rooli nykyaikaisessa puolustustoiminnassa. Elektronisen suojauksen lisäksi voidaan sähkömagneettisen säteilyn synnyttämiä herätteitä hallita materiaaliteknologian avulla. Aiemmissä tutkimuksissa on löydetty vaimennuskyvyltään riittäviä häiveratkaisuja, mutta tiettyihin suojauskohteisiin kyseisten häiveratkaisujen neliöpainot ovat edelleen olleet liian suuria. Teknologiakehitys on nopeutunut viime vuosina merkittävästi digitaalisten teknologioiden hyödyntämisen seurauksena. Uudet materiaali- ja rakenneteknologiat ovat perinteisesti olleet mahdollistavia teknologioita ja luoneet perustan esim. sensorien kehittymiselle sekä aiempaa kevyemmille ja tehokkaammille ratkaisuille niin herätteen hallinnan kuin ballistisen suojauksen puolellakin. Digitaalisuus uusien simulointi- ja mallinnusmahdollisuuksien muodossa nopeuttaa kehitystyötä tälläkin sektorilla. Kotimaisella teknologiaosaamisella on merkittävä vaikutus puolustusjärjestelmän kokonaistoimintaan sekä sotilaalliseen huoltovarmuuteen. Kehityksessä mukana pysyminen edellyttää korkeatasoista ja pitkäjänteistä teknologista tutkimusta ja kehitystä riittävän osaamispohjan luomiseksi sekä tuotanto- ja innovaatiokyvyn ylläpitämiseksi Suomessa [1]. Valtioneuvoston periaatepäätös Suomen puolustuksen teknologisen ja teollisen perustan turvaamisesta tarkentuu materiaali- ja rakenneteknologiassa häiveteknisen ja ballistisen suojan materiaaliratkaisuihin sekä herätteiden hallinnan teknologioihin, erikoismateriaalien teknologioihin ja vauriokorjauskykyyn, sotilaskäyttöön tarkoitettujen energieettisten materiaalien teknologioihin, itämerellisen tai Suomen pohjoisen sijainnin erityisolosuhteiden materiaali- ja rakenneteknologioihin, rakenteiden mekaniikkaan ja niihin liittyvä mallinnus- ja simulointikykyyn [2].

1 Maanpuolustuksen kansallisen osaamispohjan ja innovaatiokyvyn vahvistaminen Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja • Ministeriö • 2019:25

2 Suomen puolustuksen teknologisen ja teollisen perustan turvaaminen, Valtioneuvoston periaatepäätös, PLM 2016

2 Tutkimuksen tausta ja lähtökohdat

Tutkimus kohdistui seuraaville MATINE:n painopistealueille 1) Sähkömagneettinen heräte ja häive ja 2) Uudet materiaalit ja valmistusmenetelmät. Sähkömagneettisen spektrin hallinnan on todettu olevan välttämätön edellytys modernissa sodankäynnissä. Sensorijärjestelmien nopea kehitys on luonut tarpeen kehittää nopeasti uusia menetelmiä myös herätteiden hallintaan. Kohteen sähkömagneettisen spektrin herätteiden hallitseminen, ja sitä kautta suorituskyvyn turvaaminen, edellyttää uusien aiempaa tehokkaampien häivemateriaalien ja -rakenteiden kehittämistä. Tarve korostuu painokriittisissä kohteissa, kuten lentävä kalusto (esim. UAV/hyötykuorma). Nykyiset tutka-absorptio materiaalit (RAM Radar Absorbing Materials) on valmistettu pääasiassa yksi tai useampi kerroksisista päällekkäisistä, tasomaisista materiaalikerroksista. Yksittäisten kerrosten sähkömagneettisia ominaisuuksia säätämällä ja sovittamalla kerrosten ominaisuudet toisiinsa, voidaan säätää rakenteen vaimennuskykyä sekä taajuuskaistan laajuutta suojaustarpeen mukaan. Nykyiset valmistustekniikat rajoittavat monimutkaisempien rakenteiden valmistusta, koska yksittäisten materiaalikerrosten paksuudet pitää pystyä valmistamaan tarkoilla toleransseilla. Uudet materiaali ja valmistustekniikat, kuten nanomateriaalit ja 3D-tulostus yhdistettynä kehittyneisiin simulointimenetelmiin avaavat täysin uusia mahdollisuuksia monimutkaisiakin muotoja hyödyntävien häivemateriaalien ja rakenteiden toteutukselle.

Viimeaikaiset julkaisut antavat viitteitä että 1D- ja 2D- tyyppisillä nanorakenteilla, jotka voivat olla esim. hiilinanoputkia tai grafeenia, on saavutettu poikkeuksellisia sähkömagneettisia ominaisuuksia [3,4]. Esimerkiksi hiilinanoputkien ja grafeenin tapauksessa voidaan jo hyvinkin pienillä seostusmäärillä saavuttaa merkittäviä muutoksia polymeerikomposiitin sähköisiin ominaisuuksiin. Julkaisuissa on raportoitu hyvinkin korkeita vaimennustasoja mikroaaltoalueella, mutta vaimennuskaistan leveys on tyypillisesti hyvin kapea < 3GHz, jolloin hyödyntämispotentiaali käytännön suojauskohteissa jää heikoksi.

3 Recent progress of nanomaterials for microwave absorption, Journal of Materiomics Volume 5, Issue 4, December 2019, Pages 503-541

4 Recent Progress of 2D Nanomaterials for Application on Microwave Absorption: A Comprehensive Study Front. Mater., 01 April 2021

Uusista valmistustekniikoista 3D-tulostus mahdollistaa häiverakenteen suunnittelun ja valmistuksen vapaammin, ilman perinteisten tekniikoiden rajoitteita. Useissa kirjallisuusviitteissä mainitaan grafiittia, grafeenia tai hiilinanoputkia sisältävien polymeerikomposiittien 3D-tulostuksella aikaansaatuja nanorakenteisia, kolmedimensionaalisia häiveratkaisuja [5, 6]. Viime vuosien 3D-tulostuksen voimakas kehitys ja kasvu on tuonut markkinoille entistä edullisemmän ja monipuolisemman laitekannan, joista esimerkiksi ns. filamenttitulostus on helposti sovellettavissa häivemateriaalikoostumuksien tulostukseen [7, 8]. Halutusta koostumuksesta valmistetaan ekstruusiolla filamenttilanka, joka tulostuksessa sulatetaan ja pursotetaan suuttimen läpi alustalle. Yksinkertaisimmillaan filamenttitulostinta (suutinta) voidaan ohjata robottikäden avulla, jolloin alustat voivat olla muodoiltaan tasomaisesta poikkeavia, kaarevia pintoja tai koko komponentti voidaan rakentaa tulostamalla. Useamman tulostinsuuttimen ja eri koostumuksen omaavien filamenttilankojen samanaikaisella tulostuskäytöllä voidaan valmistaa todellisia kolmedimensionaalisia, nanohierarkisia rakenteita, jotka "resonoivat" hieman eri taajuuksilla, jolloin kokonaisrakenteen taajuuskaista laajenee. Erilaiset resonanssit voidaan toteuttaa muuttamalla rakenteen mittoja tai vastaavasti käyttämällä erilaisia materiaaleja. Nämä molemmat mahdollisuudet ovat 3D-tulostuksen etuja.

Tutkimuksen lähtökohtana on kysymys, miten eri teknologioita voidaan yhdistää suorituskyvyn maksimoimiseksi. Kehitystyötä ohjaavat seuraavat tutkimuskysymykset:

1. Kuinka paljon suorituskykyä voidaan parantaa yhtäaikaisella materiaaliominaisuuksien räätälöinnillä ja rakenteellisella 3D-optimoinnilla?
2. Voidaanko 3D-tulostuksen keinoin valmistaa riittävän tehokkaasti rakenteellisia kuormaakantavia komponentteja, joissa häiveominaisuudet ovat integroituna?

5 M. Wajahat et al. 3D printing of Fe₃O₄ functionalized graphene-polymer (FGP) composite microarchitectures, *Carbon*, 2020, 167, 278-284

6 X. Wei et al. 3D Printable Graphene Composite, *Scientific Reports*, 2015, 5, 11181.

7 X.-N. Guan et al. Electromagnetic and mechanical properties of carbonyl ironpowders-PLA composites fabricated by fused deposition modeling, *Materials Research Express*, 2018, 115303.

8 L. Yin et al. Characterizations of continuous carbon fiber-reinforced composites for electromagnetic interference shielding fabricated by 3D printing, *Applied Physics A*, 2019, 125, 266.

Eryityisesti 1D- ja 2D-nanomateriaaleilla on esitetty poikkeuksellisia sähkömagneettisia ominaisuuksia. Esim. hiilinanoputkien ja grafeenin tapauksessa jo hyvin pienillä pitoisuuksilla voidaan vaikuttaa merkittävästi polymeerikomposiittien sähköisiin ominaisuuksiin. 1D/2D-materiaalien tuomat edut perustuvat suureen ominaispinta-alaan ja partikkelien välisten etäisyyksien pienenemiseen komposiitissa, mikä saa aikaan partikkelien välisen vuorovaikutuksen kasvua sekä kasvattaa sähkömagneettisen aallon rakenteen sisäistä siroamista. Eryityisesti synergia ferromagneettisten partikkelien kanssa on omiaan kasvattamaan materiaalissa tapahtuvia häviöitä. VTT:n alustavissa kokeissa on havaittu, että seostamalla hiilipohjaisia nanomateriaaleja ferromagneettisten partikkelien joukkoon ei vaikuteta pelkästään sähköiseen permittiivisyyteen vaan voidaan myös kasvattaa rakenteessa tapahtuvia magneettisia häviöitä. Aiemmissä projekteissa (mm. MATINE / AIStealth) on kehitetty laskennallisia työkaluja nopeuttamaan kokeellista materiaalikehitystä. Kehitettävien mallien avulla tavoitellaan häivemateriaalin ja mikroalantosäteilyn vuorovaikutussuhteiden parempaa ymmärrystä, mikä mahdollistaa uudentyyppisten materiaalien systemaattisen kehittämisen kulloisenkin käyttökohteen asettamiin vaatimuksiin. Suunnittelu ja kehitystyö on aiemmissa projekteissa keskitynyt häiveratkaisuihin, jotka koostuvat päällekkäin asetetuista tasomaisista kerroksista, joiden sähkömagneettiset parametrit sekä kerrospaksuudet ovat valmistettu optimaalisesti tuottamaan tarvittava vaimennus kulloiseenkin sovelluskohteeseen. Tasomaisista kerroksista koostuvan rakenteen mallintaminen ja simulointi on ollut suhteellisen yksinkertainen simulointi/optimointitehtävä. Hybridinano-komposiittien ja 3D-tulostuksen tapauksessa rakenteen analysointi vaatii täyttää 3D-mallinnusta, siksi myös rakenteen sähkömagneettiset simuloinnit ovat monimutkaisia. Korvaamalla osa mikrokokoisesta ferromagneettisesta täyteaineesta 1D/2D-nanomateriaalilla ja optimoimalla 3D-tulostuksen mahdollistama todellinen kolmiulotteinen rakenne, on saavutettavissa perinteiseen valmistustekniikkaan verrattuna kevyemmät häiverakenteet.

Projektin kokonaistavoitteena oli luoda uutta osaamis pohjaa uusien teknologioiden hyödyntämiseksi ja yhdistämiseksi entistä suorituskykyisempien häiveteknisten ratkaisujen toteuttamiseksi. Tavoitteena oli kehittää uudentyyppinen 3D-tulostettaviin nanohybridikomposiittimateriaaleihin perustuva konsepti entistä kevyempien ja mukautuvampien häiveratkaisujen mahdollistamiseksi. 1D- ja 2D-nanomateriaalien hyödyntämisellä tavoiteltiin entistä kevyempiä häivemateriaaleja ja -rakenteita, parantaen myös komposiitin lujuusominaisuuksia sekä käyttömahdollisuuksia 3D-tulostamisessa.

3 Tutkimuksen osa-alueet ja työn toteutus

Projektiin osallistui useampi VTT:n tutkimusalue, joiden välinen yhteistyö mahdollisti näinkin laajan kehitystyön kaksivuotisen projektin aikana. Projektin tutkimustyö jakautui seuraaviin, kehitettäviin osa-alueisiin:

1. 3D-tulostamiseen soveltuvien hybridinanokomposiittien kehittäminen:
1D- ja 2D-nanomateriaalit valittiin kirjallisuudesta saatujen esitietojen ja kaupallisen saatavuuden perusteella. 1D-materiaaleista hiilinanoputket ja 2D-materiaaleista grafeenihiutaleet muodostavat perustan hybridinano-komposiittien kehitykselle yhdessä VTT:n aiemmissa projekteissa kehittämän ferromagneettisiin mikrometriä kokoluokassa oleviin partikkeleihin perustuvan häivemateriaalin kanssa. 1D/2D-nanomateriaalien vaikutusta komposiitin materiaaliparametreihin, kompleksiseen permeabiliteettiin ja permittivisyyteen (μ^* ja ϵ^*) sekä materiaalin tiheyteen tutkittiin valmistamalla koe-materiaaleja VTT:n minikompaundointilaitteistolla. Valmistetuista näytteistä määritettiin tiheysarvot sekä mitattiin materiaaliparametrit. Kokeet tuottivat myös tietoa polymeerikomposiitin sulaviskositeetista, jonka avulla voitiin arvioida nanohybridikomposiittien soveltuvuutta 3D-tulostukseen. Kehitystyön tavoitteena oli polymeerikomposiitin täyttöasteen pienentäminen 3D-tulostettavuuden parantamiseksi ja samalla häiverakenteen keventäminen 20 % menettämättä suorituskykyä häiveominaisuuksien suhteen.
2. Tulostusmateriaalien valmistus ja tulostuskokeet
Filamenttien valmistuksessa käytetty polymeeriyhdistelmän ominaisuudet ja korkein mahdollisten tehollisten aineiden täyttöaste selvitettiin filamentin valmistus- ja tulostuskokeissa. Filamentin valmistuksessa keskityttiin tasapaksuiseen ja hyvän pinnanlaadun tuottavien materiaali ja prosessiparametriyhdistelmien kehittämiseen. Samalla pidettiin vaihtoehtona mahdollisuutta käyttää granulitulostusta häiverakenteiden valmistuksessa. Tulostuskokeiden ensisijainen tehtävä oli selvittää tulostuksen reunaehdot mm. pienin mahdollinen tulostussuuttimen koko ja sitä kautta saavutettava tulostustarkkuus sekä edelleen tulostettavien kerrosten välinen adheesio. Uusien tulostusmateriaalien valmistus ja tulostuskokeet sovellettavuuden arvioimiseksi ja saavutettavan ominaisuusikkunan määrittämiseksi olivat tämän vaiheen keskeisin tavoite. Seuraavassa vaiheessa tutkittiin miten

tulostusprosessi vaikuttaa saavutettaviin sähkömagneettisiin ja mekaaniisiin ominaisuuksiin. Oletusarvona oli, että 1D- ja 2D-partikkelit suuntautuvat tulostuksessa voimakkaasti ja vahvistavat ominaisuuksia tietyssä suunnassa.

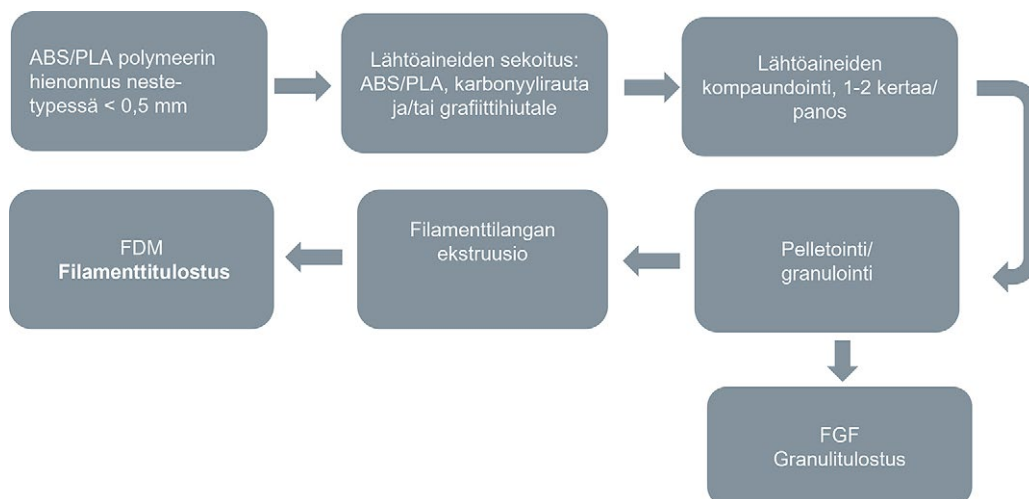
3. Rakenteiden 3D-optimointi ja suunnittelu

Projektin aikana suunniteltiin 3D-muotoiltuja rakenteita. Suunnittelussa otettiin huomioon tulostuksen asettamat rajoitukset mm. tarvittava suutinkoko, joka määritteli syntyvän rakenteen seinämävahvuuden minimin. Kun tulostuskokeista saatiin tietoa syntyvän rakenteen reunaehdoista ja tulostetun materiaalin sähköisistä ja magneettisista parametreista, niin näille rakenteille tehtiin häiveominaisuuksien simuloiteja käytettävissä olevilla sähkömagneettikasimulaattoreilla (esim. HFSS). Lähtötietoina simuloinneissa käytettiin mitattuja materiaalitietoja tulostetuista koekappaleista. Yhtenä suunnittelun tärkeänä lähtökohtana oli rakenteen keveys.

4. Tulostuskoekappaleiden valmistus

Mallinnuksen ja simuloinnin pohjalta suunniteltujen rakenteiden tulostuskokeet toteutettiin projektin toisen vuoden loppupuolella. Tutkimustyön perusteella arvioitiin simulointityökalujen tarkkuutta sekä 3D-tulostuksen kykyä tuottaa suunniteltuja rakenteita. Tämän tiedon pohjalta muodostettiin näkemys suunnittelumenetelmien tarkkuudesta ja 3D-tulostuksen mahdollisuuksista huomioida ja tuottaa eri mittakaavan piirteitä. Kuvassa 1 on esitetty tulostusmateriaalin valmistuksen eri vaiheet filamentti- ja granulitulostukseen.

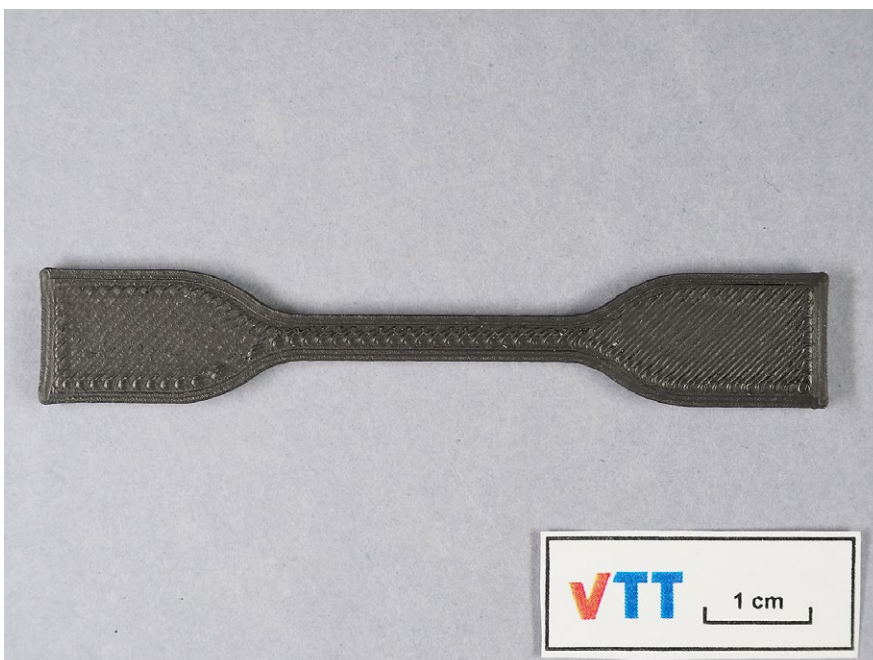
Kuva 1. Tulostusmateriaalien valmistuksen eri vaiheet joko filamenttitulostukseen tai granulitulostukseen.



4 Tulokset

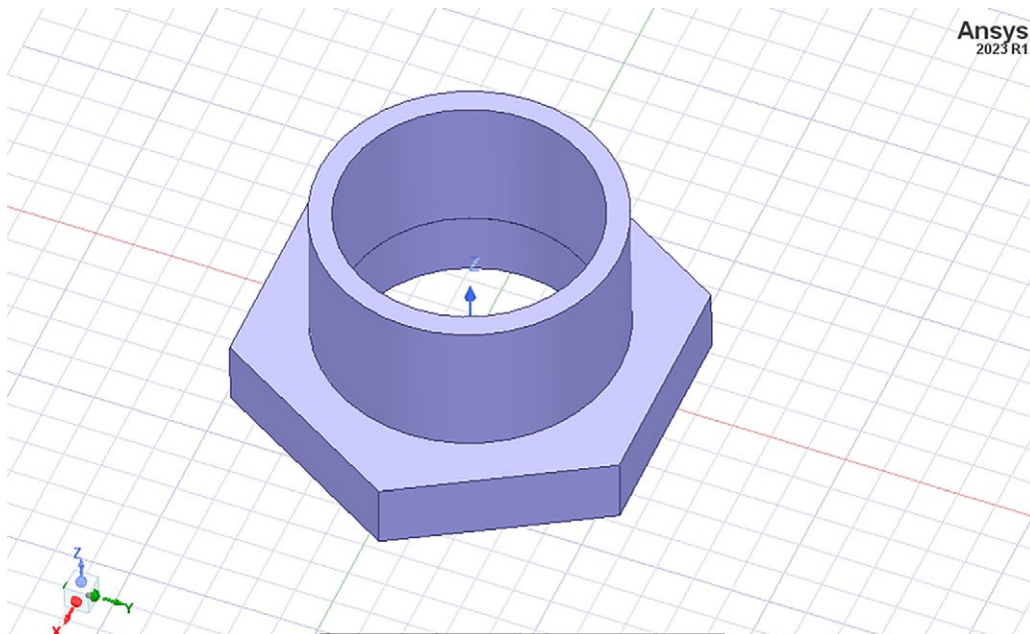
Tähän kappaleeseen on koottu yhteenvedonomaaisesti merkittävimmät tulokset ja havainnot tutkimuksen eri osa-alueilta. Tulostukseen sopivien hybridinano-komposiittien kehitystyössä havaittiin pelkän grafiittiseostuksen toimivan hyvin filamenttilangan valmistuksen yhteydessä sekä myös tulostuksen aikana. Sen sijaan rautapohjaisen seosaineen lisäykset aiheuttivat filamenttilankaan paksuusvaihtelua varsinkin suuremmilla seosainepitoisuuksilla. Paksuusvaihtelun arvioitiin olevan välillä 1,55-1,8 mm laitevalmistajan antaman tavoitepaksuuden ollessa 1,75 mm. Erityisesti liian paksut kohdat langassa aiheuttivat ongelmaa tulostuksessa. Tämän havainnon jälkeen päädyttiin valmistamaan materiaalia myös granulitulostukseen, jossa käytetään noin 2-3 mm halkaisijaltaan olevia rakeita (granuleita) raaka-aineena. Granulitulostuksen avulla voitiin tulostaa grafiitti- ja rautaseostettuja materiaaleja, joissa täyteainepitoisuudet olivat suuremmat kuin filamenttitulostuksessa oli mahdollista käyttää. Kuvassa 2 on esimerkki filamenttitulostimella valmistetusta koekappaleesta, joka oli seostettu grafiitilla. Koekappaleen pinnassa on näkyvissä tulostuskärjen ajorata.

Kuva 2. Esimerkki tulostetusta koekappaleesta. Kappaleen tulostuksessa käytettiin filamenttilankaa, jonka koostui grafiittiseosteisesta ABS polymeerista.



Kun tulostettavan materiaalin koostumusrajat rauta- ja grafiittipartikkelien osalta saatiin selville, niin valituista koostumuksista tulostettiin aihiot, joista valmistettiin rengasmaiset koekappaleet materiaalin sähköisten- ja magneettisten parametrien mittaamiseksi. Näitä tulostetun materiaalin parametrejä käytettiin lähtöarvoina 3D rakenteiden suunnittelussa ja simuloinnissa. Samalla otettiin huomioon tulostuksen asettamat rajat mm. seinämävahvuuksiin, joita ei voitu saavuttaa käytetyillä tulostuslaitteistoilla. Rakennesuunnittelussa lähdettiin liikkeelle kirjallisuudessa esitetyistä ratkaisuista, joita muokattiin tulostuksen kannalta sopivammaksi. Lähtökohtana oli yksittäisen elementin mitoitus, joka toistuu samanlaisena läpi hunajakennomaisen rakenteen. Vaimennusta optimoitiin rakenteen kautta tavoitteena mahdollisimman pieni ainetilavuus ja sen myötä mahdollisimman kevyt rakenne. Aluksi lähdettiin liikkeelle kuusikulmiomaisesta kerrosrakenteesta, joka koostui kolmesta eri mitoituksella olevasta kerroksesta. Simuloinnin perusteella tällä rakenteella oli mahdollista saavuttaa kevyt ja laajakaistainen häiveratkaisu. Tulostuskokeiden edetessä havaittiin, että simuloinnin perusteella toimivaksi osoittautunut rakenne oli haasteellista tulostaa seostetuilla materiaaleilla tarkasti, varsinkin ohutseinämäiset kulmikkaat muodot tuottivat ongelmia. Tulostuksessa havaittujen rajoitusten pohjalta rakennetta optimoitiin tulostuksen kannalta helpommaksi: kulmikas rakenne muutettiin seinämien osalta sylinterimäiseksi sekä samalla seinämävahvuutta kasvatettiin. Kuvassa 3 on esitetty kennorakenteen yksittäisen elementin muoto, joka päätettiin toteuttaa tulostamalla projektin loppuvaiheessa. Kyseisellä rakenteella simuloinnin perusteella saavutetaan yli 10dB:n vaimennus taajuuskaistalla 6-18 GHz, neliöpainon ollessa 3,5 kg/m².

Kuva 3. Simuloinnin ja tulostuskokeiden pohjalta suunniteltu kennorakenteen yksikkökoppi, joka toistuu läpi samanlaisena koko tulostettavan kennorakenteen.



Projektin lopuksi demonstroitiin rauta- ja grafiittiseostetusta materiaalista tulostettu 100x125 mm kennorakenne, jossa toistuu kuvan 3 kaltainen yksikkökoppi. Koska aiempien kokeiden perusteella tiedettiin, ettei runsaasti seostetun materiaalin valmistus filamentiksi onnistu riittävän tasalaatuisena, niin päädyttiin käyttämään granulitulostusta, jossa materiaali syötetään rakeina tulostimeen. Kennorakenteen tulostuksen demonstrointi onnistui vähintäänkin kohtuullisesti. Tulostettu kennorakenne oli kuitenkin melko hauras johtuen runsaasta seostuksesta. Lisäksi kennorakenteen lieriöiden seinämävahvuus ei pysynyt aivan mitoituksen mukaisena. Yhtenä syynä tähän voi olla rautaseosteisen materiaalin pysyminen pitkään lämpimänä tulostusalustalla: tulostusmateriaali lämmitetään noin 200 °C lämpötilaan, jotta polymeerisulan viskositeetti on riittävän alhainen tullakseen tulostussuuttimen läpi. Tulostusmateriaalissa olevat rautapartikkelit varaavat lämpöä itseensä ja pitävät tulostetun materiaalin pitempään lämpimänä, jolloin se ei pysy niin hyvin muodossaan kuin esimerkiksi nopeasti jäähtyvä pelkkä polymeerimateriaali.

Tulostettu kennorakenteen häiveominaisuudet mitattiin ja verrattiin tulosta simuloinnilla saatuun optimaalisen rakenteen tulokseen. Tulostettu kennorakenne toimi periaatteessa vaimentava ratkaisuna muttei niin hyvin kuin simuloinnin antaman tuloksen pohjalta olisi voitu olettaa. Tähän voi olla syynä isomman kennorakenteen tulostamisen haasteellisuus siten, että materiaalin mikrorakenne (materiaaliparametrit) pysyy samana kuin pienemmän näytteen materiaalin mikrorakenne, jonka materiaaliparametreja oli käytetty simuloinnin lähtöarvoina.

5 Johtopäätökset

Projektin alkuvaiheessa lähdettiin liikkeelle ajatuksella, että seostetut häive-materiaalit tulostetaan käyttäen lähtöaineena filamenttilankaa. Projektin edetessä havaittiin, että perinteisesti valmistettujen (esim. valaminen, ahtopuristus) häiveratkaisujen melko korkeat seosainepitoisuudet ovat filamenttilangan valmistuksessa haasteellisia. Tähän osaltaan vaikutti filamenttilangan valmistuksessa käytetty laite, joka oli tarkoitettu ensisijaisesti niukasti seostettujen polymeerifilamenttien valmistukseen. Vaihtoehtona filamenttitulostukselle lähdettiin projektin edetessä valmistamaan myös materiaalia granulitulostukseen, jossa käytettiin noin 2-3 mm halkaisijaltaan olevia rakeita tulostuksen raaka-aineena. Kun tulostettavien materiaalien koostumusrajat rauta- ja grafiittipartikkelien osalta saatiin selville, niin valituista koostumuksista tulostettiin aihiot, joista valmistettiin rengasmaiset koe-kappaleet materiaalin sähköisten- ja magneettisten parametrien mittaamiseksi. Näiden materiaaliparametrien pohjalta lähdettiin suunnittelemaan tulostuksella valmistettavia häiverakenteita. Suunnittelun edetessä päädyttiin kennomaiseen rakenteeseen, jossa yksittäinen yksikkökoppi toistuu samanlaisena läpi koko kennorakenteen. Tällainen ratkaisu oli tulostuksen kannalta helpompi toteuttaa kuin rakenne, joka koostuu keskenään erilaisista elementeistä. Lisäksi simulointitulosten perusteella kyseisellä, melko yksinkertaisella rakenteella saavutettiin riittävä vaimennustaso neliöpainon ollessa 3,5 kg/m². Suunniteltu kennorakenne pystyttiin tulostamaan, tosin rakenne oli melko hauras johtuen runsaasta seostuksesta eikä rakenteen seinämävahvuus pysynyt aivan mitoituksen mukaisena. Tulostettu kennorakenne toimi vaimentava ratkaisuna muttei niin hyvin kuin simuloinnin antaman tuloksen pohjalta olisi voitu olettaa.

Perinteisillä tasomaisten häiverakenteiden valmistustekniikoilla, kuten valaminen tai ahtopuristaminen ovat korkeat seosainepitoisuudet mahdollisia häive-materiaalin valmistuksessa. Tulostettaessa häiverakenteita on otettava huomioon materiaalin seostuksen rajoittuminen alhaisempiin pitoisuuksiin, jotta ne voidaan toteuttaa tulostuksen avulla. Projektin aikana kuitenkin havaittiin, että tulostetut kolmiulotteiset rakenteet mahdollistavat alhaisemman seosainepitoisuuden materiaalien käytön tehokkaissa häiverakenteissa verrattuna perinteisiin tasomaisiin häiverakenteisiin. Tulostuksen hyödyntämistä kuormaa kantavien häiverakenteiden valmistamisessa ei projektin aikana ehditty tutkia, koska tutkimusta jouduttiin suuntaamaan arvioitua enemmän tulostusmateriaalin valmistukseen

ja tulostusparametrien hakuun. Kuitenkin voidaan todeta, että saatujen tulosten perusteella häiverakenteiden valmistuksessa 3D-tulostus on potentiaalinen teknologia, joka kuitenkin vaatii laajempaa tutkimusta etenkin käytettävissä olevien laitteistojen osalta koskien sekä tulostusmateriaalin valmistusta että tulostamista.



Puolustusministeriö
Försvarsministeriet
Ministry of Defence



Puolustusministeriö

MATINE

Maanpuolustuksen tieteellinen
neuvottelukunta

Eteläinen Makasiinikatu 8, Helsinki

PL 31, 00131 Helsinki

defmin.fi

ISSN PDF: 2984-102X

ISBN PDF: 978-951-663-443-5