

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

### Sotilaan toiminnalliset suojarusteet

Pertti Nousiainen<sup>1</sup>, Markku Honkala<sup>1</sup>, Tomi Lindroos<sup>2</sup>, Marjaana Karhu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) TTY säätiö, Materiaaliopin laitos, Korkeakoulunkatu 6, 33720 Tampere

<sup>2</sup>) VTT, Sinitaival 6 PL 1300 33101 TAMPERE

#### Tiivistelmä

Projektissa on tutkittu faasimuutosmateriaalien (*Phase Change Materials, PCM*) ja leikkauspaksunevien nesteiden (*Shear Thickening Fluids, STF*) sovellettavuutta sotilaan vaatetukseen ja suojarusteisiin, lähtökohtana varusteiden toiminnallisuus sotilaan liikkumisen ja lämpökuormittumisriskin näkökulmasta. Projektin materiaalitutkimuksella on pyritty selvittämään voisiko lämpöä varastoivia faasimuutosmateriaaleja hyödyntää sotilaan kehon lämpötasapainon taasaamisessa ja säätelyssä, ja toisaalla voisiko leikkauspaksunevilla nesteillä parantaa aramidikankaan ballistista suorituskykyä niin paljon, että ballistista suojaliiviä voisi suojaustasosta tinkimättä keventää kangaskerroksia vähentämällä. Myös raajojen suojauksessa keveämmät ja taipuisimmat suojapaneelirakenteet antaisivat toiminnallisuusetua.

Kaksivuotiseksi suunnitellun projektin ensimmäisen vuoden alkupuoli keskittyi kirjallisuusselvityksiin, joilla haettiin laajemmin tietoa aihepiirin tutkimuksesta ja niiden tuloksista sekä vaihtoehtoisten materiaalikomponenttien perusominaisuuksista sovelluksen näkökulmasta. Lisäksi selvitettiin ja priorisoitiin näiden materiaalien toiminnallisuusominaisuuksien mittaamiseen parhaiten soveltuvia testimenetelmiä. Faasimuutosmateriaalien lisäksi kartoitettiin nykytilannetta muista tekstiileihin/vaatetukseen liitettävistä viilennystekniikoista. Eri selvitysten perusteella valittiin ja hankittiin materiaalikomponentit kokeelliseen tutkimukseen. Projektin kokeellisen tutkimuksen näytteisiin valittu aramidikangas oli ballistisissa suojaliiveissä yleisesti käytetty kaupallinen laatu.

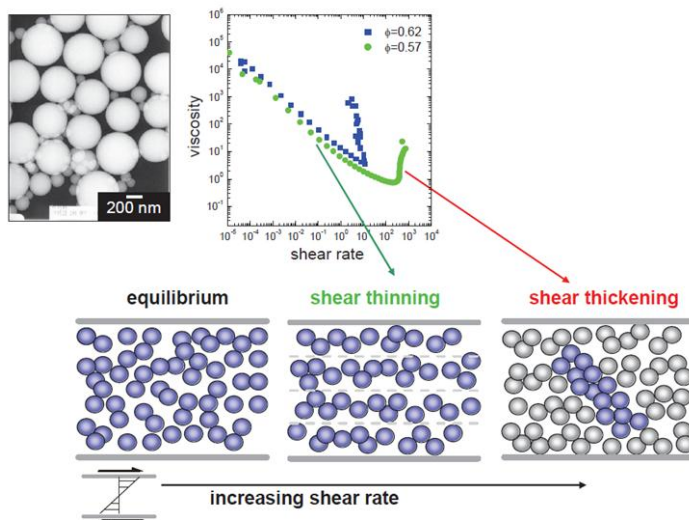
Projektin ensimmäisen vuoden kokeellisessa osuudessa valmistettiin STF-nesteitä eri koostumuksina seostamalla kantaja-aineksi valittuun polyetyleeniglykoliin pääasiassa SiO<sub>2</sub> nanopartikkeleita. Valmistettujen nesteiden viskositeettiominaisuudet mitattiin reometrillä ja tuloksia vertailtiin muissa aihepiirin tutkimuksissa esiteltyjen arvoihin. Impregnoititutkimuksella haettiin optimaalisia tapoja imeyttää STF-neste mahdollisimman tasaisesti aramidikankaisiin. Käsiteltyjen ja käsittelemättömien kankaiden testauksissa ja karakterisoinnissa käytettiin elektronimikroskopiaa sekä lankojen pull-out testausta rakenteen kitkaominaisuuksien määrittämiseksi. STF-impregnoitujen kerrosrakenteiden perusballistiikan selvittäminen aloitettiin alustavilla pistotestauksilla. Niiden perusteella voidaan todeta STF-impregnoinin kasvattavan pistosuojauskykyä parhaimmillaan 40 %, mikä mahdollistaa 25 % kevyemmän suojarakenteen.

Faasimuutosmateriaaleihin liittyvää kokeellista työtä ja mittauksia varten hankittiin kaupallisia PCM-materiaaleja, ja myös itse valmistettiin joitakin koe-eriä. Materiaaleista mitattiin faasimuutokseen liittyvää latenttilämmön varastoimis- ja vapauttamiskapasiteettia DSC-mittauksin. Mittauksia tehtiin myös kaupallisille PCM-tekstiileille. Suunnitelmissa projektin kokeellinen PCM-tutkimus painottuu vasta toiselle projektivuodelle. PCM-materiaalien ja niitä sisältävien tekstiilien ja tekstiilituotteiden testimenetelmiin liittyvä standardointityö on käynnissä CEN/TC 248/WG 31 työryhmässä, missä TTY on edustettuna. Standardoinnin seurannan kautta projektin PCM testaussuunnitelmaa ollaan tarkentamassa, ja testaus pyritään toteuttamaan työryhmän jatkossa tuottamien menetelmäkuvausten mukaisina.

## 1. Johdanto

Kriisinhallinnan ja rauhanturvatyön operatiivinen toiminta tapahtuu kaukana Suomen ympäristöstä, usein kuumissa olosuhteissa. Kuumassa sotilaan lämmönsäätelykoneiston tehokkuus on avainasemassa pyrittäessä estämään liiallinen lämpökuormittuminen. Erityisen ongelman muodostavat suojarusteet, kuten suojelevarusteet sekä sirpale- ja luotiliivit, jotka aiheuttavat huomattavaa lämpökuormaa. Lämpökuormittumisriskin näkökulmasta suojaliivien painoa pitäisi alentaa, mutta kriisialueiden yhä pahemmiksi muuttuneiden uhkakuvien näkökulmasta (mm. tienvarsipommit) tarve olisi lisätä ballistista suojaa kattamaan laajemmin kehoa myös käsivarsien ja jalkojen alueella. Nykyratkaisuilla tämä lisäisi suojan kokonaisuutta, heikentäisi mahdollisesti sotilaan liikkuvuutta ja entisestään nostaisi vaatetuksen kuormittavuutta. Toiminnallisten materiaalien hyödyntäminen voisi tuoda osaratkaisuja lämpökuormittumisriskien vähentämiseen ja samalla jopa tehostaa ballistista suorituskykyä.

Ballistisen suojauksen keventämiseen on viime aikoina ryhdytty tutkimaan muitakin vaihtoehtoja kuin vain materiaalien mekaanisten ominaisuuksien tai kuitujen valmistustekniikoiden kehittämistä. Mielenkiinnon kohteeksi ovat tulleet ballistisen iskun vaikutuksesta ominaisuuksiaan muuttavat materiaalit. Tällaisia ovat mm. leikkauspaksunevat nesteet (*Shear Thickening Fluids, STF*), joiden viskositeetti kasvaa iskun seurauksena leikkausjännityksen kasvaessa. STF-nesteet ovat kolloidisia partikkelisuspensioita, joissa partikkelien väliset vuorovaikutukset muuttuvat leikkausnopeuden funktiona. Kuvassa (kuva 1) on esitetty STF-nesteen toimintaperiaate: Lepotilassa partikkelit ovat jakautuneet homogeenisesti kantaanesteeseen partikkelien välisten hylkimisvoimien pitäessä ne erillään toisistaan. Leikkausnopeuden kasvaessa partikkelit muodostavat virtauksen suuntaisia ketjumaisia rakenteita, minkä seurauksena viskositeetti laskee. Leikkausnopeuden kasvaessa edelleen partikkelien väliset hydrodynaamiset voimat kasvavat partikkelien välisiä hylkimisvoimia suuremmiksi, minkä seurauksesta partikkelit muodostavat klustereita ja viskositeetti nousee jyrkästi.

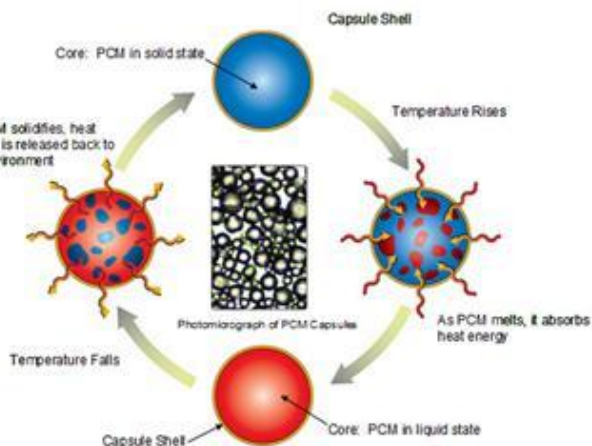


Kuva 1. STF-nesteen toimintaperiaate.

Delawaren yliopiston ja U.S. Army Research Laboratoryn kehittämä "Liquid Armor" perustuu kolloidisella leikkauspaksunevalla nesteellä impregnoituihin ballistisiin kankaisiin. Siinä leikkauspaksunevana nesteenä toimii SiO<sub>2</sub> nanopartikkeleilla seostettu polyetyleeniglykoli. Kun

STF-nesteellä impregnoituun kankaaseen kohdistuva leikkausvoima on pieni, nestefaasi kankaan sisällä käyttäytyy normaalien nesteitten tapaan leikkausohenevasti, eikä kankaan ominaisuudet juuri poikkea tavanomaisesta. Iskun tapahtuessa kasvava leikkausvoima muuttaa impregnoitua kankaan makroskooppisesti kiinteäksi. Ballistisen iskun aiheuttama leikkausvoiman kasvu muuttaa siis monikerroksisen kangasrakenteen hetkellisesti jäykäksi, jolloin myös lankojen "liukuminen" kankaissa estyy. STF-impregnointi ei kehittäjiensä mukaan lisää kankaiden paksuutta eikä tee niistä jäykempiä. STF-teknologiaa käyttäen sama ballistinen suojaustaso voidaan kuitenkin saavuttaa pienemmällä ballististen kankaiden kerrosmäärillä kuin jos käytettäisiin käsittelemättömiä kankaita. Erityisesti pistosuojaukseen, varsinkin piikkimäisiä teriä vastaan, saadaan STF:n avulla parempi suojaustaso kuin mitä vastaavan neliöpainon käsittelemättömällä kangaskerroksella saavutetaan. [Wetzel E.D., Wagner N.J., 4th International Conference on Safety and Protective Fabrics, Pittsburg, 27 Oct 2004].

Vaatetuksen kuumakuormittumisen torjuntaan on puolestaan jo käytössä erilaisia aktiivisia tai passiivisia jäähdytysmenetelmiä. Aktiivisissa menetelmissä käytetään yleensä sähköllä (akku) nestettä kierrättäviä tai ilman virtausta lisääviä järjestelmiä. Passiivisia ovat esimerkiksi tekstiilit, joissa kuiturakenteiden muodoilla tai tekstiilin 3D-rakenteilla lisätään hengittävyttä. Passiivisia menetelmiä ovat myös vaatteisiin liitettävät kylmäpakkaukset tai lämpöä sitovat/vapauttavat faasimuutosmateriaalit erilaisina ratkaisuuina.



Kuva 2. Faasimuutosmateriaalin toimintaperiaate.

Faasimuutosmateriaalit muuttavat tietyssä lämpötilassa olomuotoaan kiinteästä nestemäiseksi ja päinvastoin. Ne voidaan säätää toimimaan tietyillä lämpötila-alueilla. Ne pystyvät varastoimaan tietyn lämpömäärän faasin muuttuessa kiinteästä nestemäiseksi ja luovuttamaan tietyn lämpömäärän faasin muuttuessa taas nestemäisestä kiinteäksi (kuva 2). Varastoidessaan lämpöä ne samanaikaisesti viilentävät, ja luovuttaessaan lämpöä lämmittävät.

Tekstiileihin integroituja faasimuutosmateriaaleja on ollut kaupallisesti saatavilla pitkään. Useimmiten ne perustuvat tekstiilirakenteeseen integroituihin orgaanisiin faasimuutosaineisiin kuten parafiini. PCM -materiaali voidaan lisätä suoraan kuituun ja lankaan tai yhdistää kankaan ja neuloksen pinnalle esimerkiksi vaahtoviimeistykseenä. Tekstiileissä PCM-materiaalit sopivat parhaiten tasaamaan jaksottaisia lämpötilavaihteluja. Niiden lämmitys-/viilennysvaikutus yhdessä kangaskerroksessa on ollut melko marginaalinen johtuen käytetystä faasimuutosaineista ja niiden vähäisistä määristä. Tehokkaampia, epäorgaanisiin faa-

simuutosaineisiin perustuvia menetelmiä tekstiileihin integroituna tutkitaan ja kehitetään kuitenkin aktiivisesti, ja oletettavaa on, että tulevaisuudessa viilennysvaikutusta saadaan parannettua. Luoti- tai sirpaleliivin monikerrosrakenteeseen integroituna viilennysvaikutuksen voi olettaa olevan paljon suurempi kuin vähän kangaskerroksia sisältävissä vaatteissa. PCM teknologiaa käytetään jo suojaliivien päälliskankaissa, mm. Outlast Europe GmbH [<http://www.armedforces-int.com/suppliers/climate-control-clothing.html>]. Intialainen Defence Laboratory Jodhpur (DLJ) tutkii faasimuutosmateriaalien hyödyntämistä sotilassoveluksissa. Viitteen perusteella PCM-materiaaleilla nähdään potentiaalia myös sotilaan vaateusratkaisuissa. [*Phase Change Materials: Technology Status and Potential Defence Applications, Kumar et al, Defence Science Journal, Vol. 61, No. 6, November 2011, pp. 576–582*].

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Projektin ensisijaisena päämääränä on materiaalitutkimuksen kautta selvittää miten toiminnallisia materiaaleja hyödyntämällä voisi parantaa sotilaan ballistista suojausta ja samalla pienentää sotilaan lämpökuormittumisen riskiä. Suojavarusteiden käytettävyys, paino, joustavuus, suojauksen kattavuus ja kehon lämmönhallinta ovat tutkimusta ohjaavia näkökohtia. Toiminnallisissa materiaaleissa tutkimus kohdistuu kahteen materiaaliryhmään: faasimuutosmateriaalit sotilaan kehon tuottaman lämmön varastoimisessa ja toisaalla leikkauspaksunevat nesteet ballistisen aramidikankaan suorituskyvyn kasvattamisessa. Projektin osatavoitteita ovat:

- Selvittää faasimuutosmateriaalien (PCM) käyttö ja leikkauspaksunevien nesteiden (STF) mahdollisuudet; tarkastelunäkökulmina varusteiden käytettävyys, paino, joustavuus ja lämmönhallinta.
- Valmistaa iskusta kovettuvilla nesteillä (STF) impregnoituja ballistisia tekstiilirakenteita suojaliiveissä käytettävästä kaupallisesta aramidikankaasta. Muita mahdollisia ei-puettavia ratkaisuja (teltat yms.) ajatellen kokeita tehdään myös aiempien MATINE-hankkeiden tutkimuskohteena olleilla polypropeenikankailla.
- Selvittää koeammunnoilla STF -koerakenteiden ballistinen suojaustaso sekä vaikutus pistosuojaominaisuuksiin.
- Selvittää faasimuutosmateriaalia sisältävien monikerrostekstiilien jäähdytystehokkuutta. Tutkimuksia tehdään mm. säähuoneympäristössä hikoilevalla sylinterillä, joka simuloi ihmisen lämmön- ja vesihöyryntuotantoa ja mittaa vaatetusmateriaalien vaikutusta lämmönluovutukseen.
- Kartoittaa muita passiiviseen jäähdytykseen soveltuvia materiaaliratkaisuja ja soveltuvin osin testata eri ratkaisujen tehokkuutta hikoilevalla sylinterillä säähuonemittauksissa ja alustavasti koehenkilöillä.

Projektin ensimmäisenä vuonna keskityttiin STF- ja PCM-materiaalien perusominaisuuksien selvittämiseen ja kehittämiseen sovelluksen näkökulmasta. Toinen vuosi keskittyy enemmän rakenteiden kehittämiseen ja testaukseen. Tutkimustyön teema-alueita ovat:

- Kaupallisten PCM- ja STF-materiaalien termiset ja mekaaniset ominaisuudet.

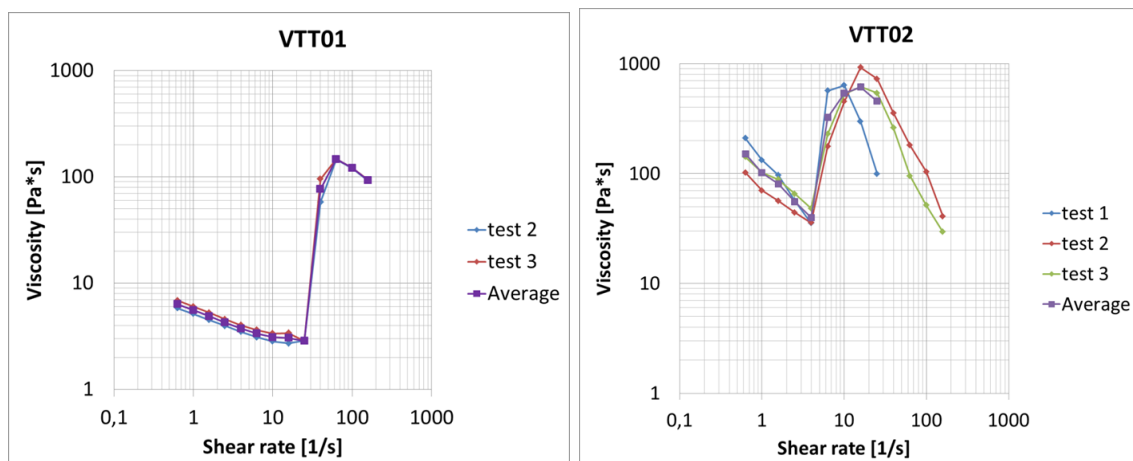
- PCM- ja STF-rakenteiden valmistus ja kiinnitys kankaisiin.
- STF-rakenteiden perusballistiikka, pistosuojaominaisuudet sekä muotoutuvuus puettavuuden kannalta.
- PCM-rakenteiden viilennysominaisuudet ja soveltuvuus suojaliiveihin ym. kohteisiin.

### 3. Tulokset ja pohdinta

Kaksivuotiseksi suunnitellun projektin ensimmäisen vuoden työ painottui aluksi tutkimuskohteiksi valittujen funktionaalisten materiaalien perustiedon kartoitukseen. Kirjallisuusselvityksillä kartoitettiin sovelluksen kannalta potentiaalisimmat PCM- ja STF-materiaalivaihtoehdot, sekä niiden perusominaisuudet ja liittämistekniikat erityisesti tekstiilirakenteisiin. Myös potentiaalisimpia testimenetelmiä selvitettiin.

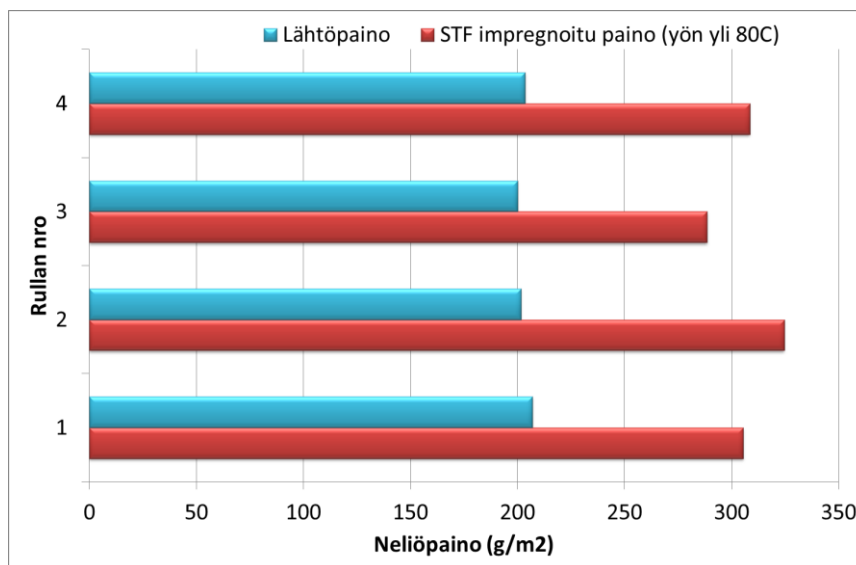
Materiaaliselvitysten pohjalta suunniteltiin ensimmäisen kokeelliseen testivaiheeseen tarvittavat koejärjestelyt, sekä hankittiin koemateriaalit ensimmäisiin STF-nesteiden valmistuskohteisiin. STF-nesteen kantaja-aineeksi valittiin kirjallisuustarkastelujen perusteella polyetyleeniglykoli (PEG), jonka on osoitettu pysyvän stabiilina pitkiäkin aikoja. Ensimmäiset koe-erät valmistettiin 150 nm keskimääräisen partikkelikoon omaavasta SiO<sub>2</sub>-nanojauheesta. Koemateriaaleja valmistettiin useilla eri sekoitusmenetelmillä ja seossuhteilla. Tasaisen dispersiön aikaansaaminen edellyttää riittävän tehokasta sekoitusta ja pitkää sekoitusaikaa. Parhaaseen lopputulokseen päästään kasvattamalla täyttöastetta asteittain sekoituksen edetessä. Kirjallisuudessa esitetyt partikkelipitoisuudet, jopa 65 p-% osoittautuivat testeissä erittäin korkeiksi. Täyttöasteen kasvaessa yli 30 p-% ei tutkittujen materiaalien kohdalla voida enää puhua nesteistä, vaan pikemminkin vahatyypisistä materiaaleista.

Valmistettujen STF-nesteiden käyttäytymistä tutkittiin rotaatioreometrillä. Tutkitut SiO<sub>2</sub>-PEG-koostumukset (VTT01 20 p-% ja VTT02 30p-%) osoittautuivat voimakkaasti leikkauspak-suneviksi. Molemmissa tapauksissa viskositeetti kasvoi noin kymmenkertaiseksi mittausalueella, tietyn raja-arvon jälkeen materiaali menettää kontaktinsa näytteenpitimeen, joka näkyy viskositeetin laskuna (kuva 3). Pitkäaikaiskestävyyden tutkimiseksi osaa valmistetuista näytteistä varastoitettiin kaksi kuukautta. Seoksissa ei ollut havaittavissa partikkelien erkautumista tms. vanhennuksen jälkeen.



Kuva 3. Rotaatioreometrilla määritetty viskositeetin riippuvuus leikkausnopeudesta materiaaleilla VTT01 20 p-% SiO<sub>2</sub> ja VTT02 30 p-% SiO<sub>2</sub>.

STF-nesteellä impregnoitujen ballististen aramidikankaiden valmistettavuuden ja toiminnan selvittämiseksi tutkittiin erilaisia tapoja impregnoida STF-neste kankaaseen. Kasvaneen suojauskyvyn edellytyksenä on, että STF-nestettä pystytään imeyttämään kankaaseen haluttu määrä ja että partikkeli-nestesuspensio jakautuu tasaisesti kangasrakenteeseen. SiO<sub>2</sub>-PEG-seoksen kohtuullisen korkeasta viskositeetista johtuen seosta ei voida impregnoida kankaaseen suoraan, vaan viskositeettia tulee alentaa. Impregnointikokeissa STF-nesteen viskositeettia laskettiin lisäämällä seokseen etanolia. Lisäyksen vaikutuksesta aramidikankaan ja STF-nesteen välinen kostutus parani merkittävästi ja halutun nestemäärän annostelu muodostui helpommaksi. Impregnoinnin jälkeen liuottimena toiminut etanoli haihdutettiin pois rakenteesta. Sovelluksen kannalta on ensiarvoisen tärkeää hallita kankaiden neliöpainoa ja tätä kautta tuottaa tasalaatuiset ominaisuudet omaavia suojarakenteita. Impregnoinnin toistettavuuden ja tasalaatuisuuden arvioimiseksi suoritettiin neljä rinnakkaista koesarjaa samoilla valmistusparametreilla. Kokeen tulosten perusteella voidaan todeta, että neliöpainon vaihtelu (kuva 4) eri valmistuserien välillä oli noin 5 %. Tulosta voidaan pitää erittäin hyvänä tuloksena kun huomioidaan, että kyseessä oli ensimmäinen koesarja.

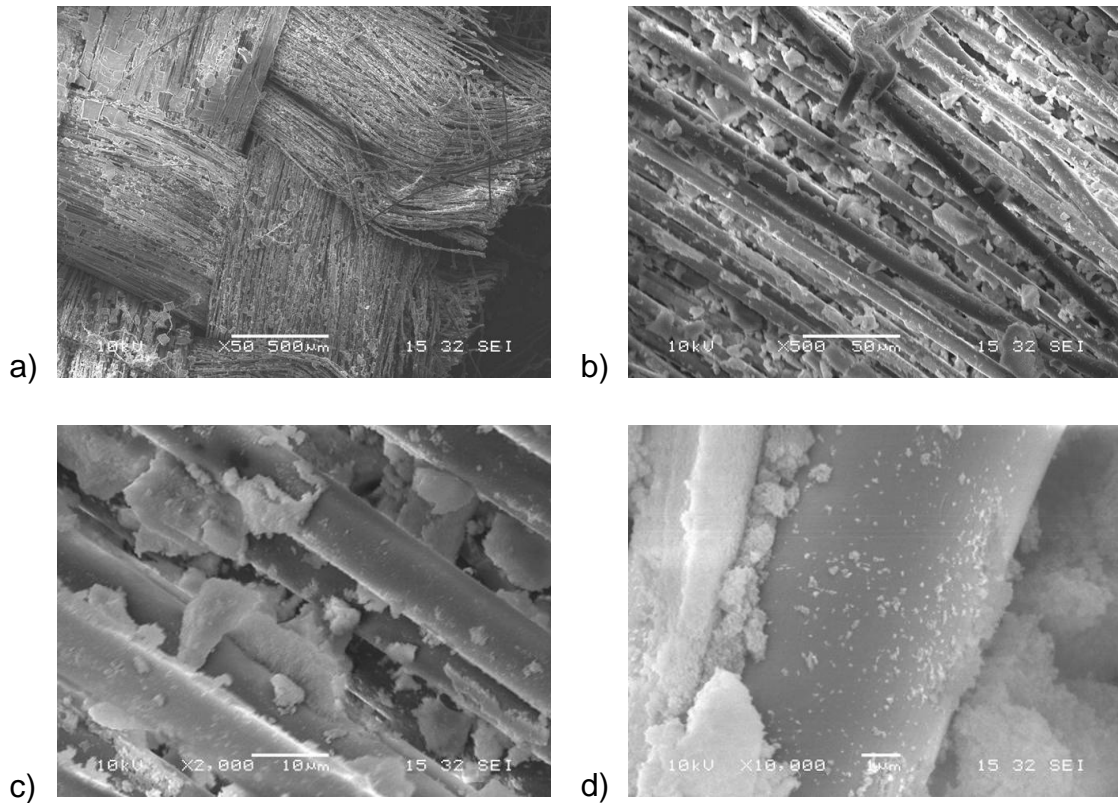


Kuva 4. Eri valmistuserissä impregnoitujen aramidikankaiden neliöpainot.

Kohtuullisen tasainen neliöpainojakauma antaa viitteitä siitä, että impregnoitu STF-neste on todennäköisesti jakautunut tasaisesti myös aramidinkankaan sisällä. Asian selvittämiseksi impregnoidusta aramidinkankaasta valmistettiin näytteet SEM-tarkasteluihin (*Scanning Electron Microscope*). Ballistisen suorituskyvyn kannalta on oleellista, että STF-nesteen partikkelit ovat tunkeutuneet yksittäisten kuitujen väliin. Puutteet impregnointimenetelmässä voivat johtaa tilanteeseen, jossa STF-nesteen partikkelit jäävät kuitutouvien pinnalle, ja näin ollen touvien sisällä kuitujen väliset liikkeet eivät välity STF-nesteeseen, eikä positiivista vaikutusta suojauskykyyn saavuteta.

Mikroskooppitarkasteluja varten alipaineessa höyrystyvä PEG-nestefaasi jouduttiin haihduttamaan rakenteesta, mikä saattaa vääristää jonkin verran havaintoja mikrorakenteista mm. SiO<sub>2</sub>-partikkelien jakautumisen osalta. Mikroskooppitarkasteluissa

havaittiin (kuva 5 a) että osa STF-nesteen partikkeleista on jäänyt kuitutouvien pintaan kalvomaiseksi rakenteeksi.

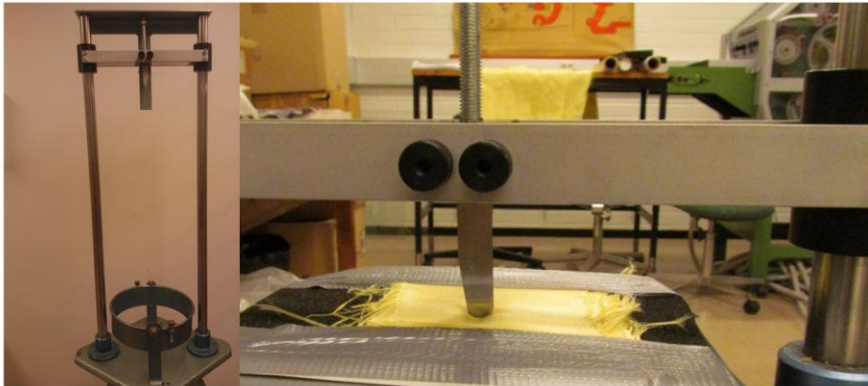


Kuva 5. STF-nesteen tunkeutuminen kuiturakenteeseen.

Tarkasteltaessa kuitujen välisiä rakenteita suuremmilla suurennoksilla havaitaan kuitenkin, että STF-neste ja sen sisältämät SiO<sub>2</sub>-partikkelit ovat tunkeutuneet syväälle yksittäisten kuitujen väliin (kuva 5 b). Tutkittaessa yksittäisten kuitujen pintoja voidaan kuitenkin havaita, että SiO<sub>2</sub>-partikkelit muodostavat useiden mikrometrien kokoisia agglomeraatteja rakenteeseen. Kuitujen pinnalla on havaittavissa myös alle mikrometriluokan kokoisia partikkeleita, mutta näiden osuus kokonaismäärästä on murto-osa. Suojauskyvyn kannalta voidaan olettaa, että STF-nesteen tulisi muodostaa ohut tasainen kalvo kuidun pinnalle. Mikroskooppitarkasteluissa havaittu agglomeraattien muodostuminen saattaa kuitenkin olla seurasta PEG-faasin höyrystämisestä, minkä yhteydessä partikkelit ovat hakeutuneet yhteen muodostaen agglomeraatteja.

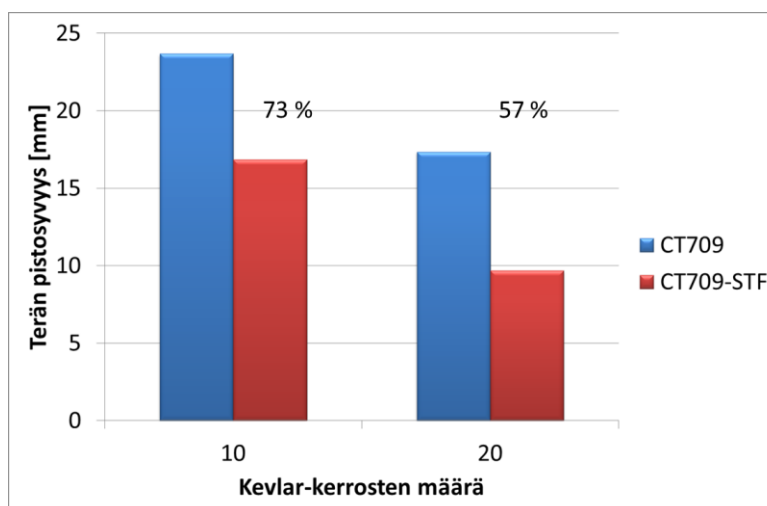
Suojauskyvyn arvioimiseksi tehtiin alustavia pistosuojauskokeita. Testeissä käytettiin standardin NIJ 0115.00 mukaista terää P1. Koelaitteisto on esitetty kuvassa (kuva 6) vasemmalla, oikeanpuoleisessa kuvassa näkyy pudotuskelkassa kiinni oleva terä tunkeutuneena aramidinäytteeseen. Pudotuskelkan kuorma sekä taustan polymeerivaahdotkerrokset eivät olleet standardin mukaisia, joten standardin määrittelemää suojausluokkaa tulosten perusteella ei voi määrittää. Ensimmäisten testien tavoitteena olikin määrittää minkä suuruisia suhteellisia muutoksia STF -nesteen impregnointi aramidikankaaseen aikaansaa. Pudotuskelkan massa ja pudotuskorkeus määritettiin siten, että terän tunkeutumissyvyys oli järkevällä tasolla vertailujen tekemiseksi. Testijärjestelyn toistettavuuden selvittämiseksi suoritettiin useita pudotuksia samoilla asetuksilla ja materiaaleilla. Tutkittavan näytteen taustalle asetettavalla

vaahtokerroksella on oleellinen vaikutus saavutettaviin tuloksiin, näin ollen verrattaessa eri näytteitä keskenään tulee varmistua, että tulokset on määritetty täsmälleen samanlaisella mittausjärjestelyllä.



Kuva 6. Testijärjestely pistosuojauskyvyn määrittämiseksi.

Alustavat pistosuojaustestit suoritettiin kahdella eri aramidikangaskerrosten lukumäärällä, 10 ja 20 kerrosta STF -nesteellä impregnoituna ja ilman impregnointia. Lisäksi suoritettiin testausta siitä, miten pudotuskorkeus vaikuttaa terän tunkeutumissyvyyteen eri tapauksissa. Kuvassa (kuva 7) on esitetty vertailu STF-impregnoinnin vaikutuksesta 10- ja 20-kerrosrakenteella, kun pudotuskorkeus on pidetty vakiona. Esitetyt tunkeutumissyvyydet ovat kolmen pudotuksen keskiarvoja.



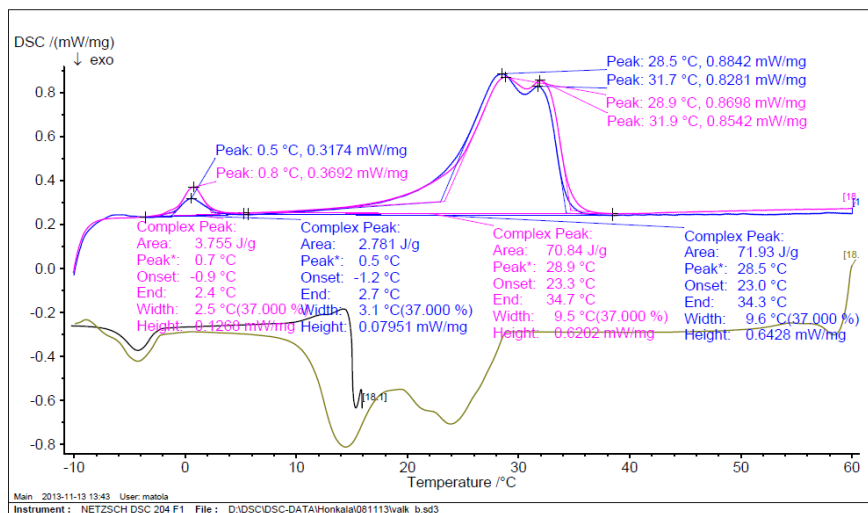
Kuva 7. STF -impregnoinnin vaikutus pistosuojauskykyyn 10- ja 20-kerrosrakenteella.

STF -impregnoinnin seurauksesta terän tunkeutumissyvyys on 73 % 10-kerrosrakenteen kohdalla ja vastaavasti 57 % 20-kerrosrakenteen kohdalla. Impregnoitu 10-kerrosrakenteen johtaa käytännössä samaan suojaukseen kuin referenssinä käytetty 20-kerroksinen aramidirakenne. Kun huomioidaan STF -nesteeseen impregnoinnista aiheutunut neliöpainon koostuminen, niin voidaan todeta, että STF -impregnoinnin seurauksena rakennetta voidaan



keventää 25 %. Pienemmästä aramidikerrosten määrästä johtuen suojarakenne on merkittävästi joustavampi käytössä.

Faasimuutosmateriaaleihin liittyvä kokeellinen tutkimus aloitettiin vasta ensimmäisen projektivuoden lopulla. Projektin kannalta huomionarvoista on se, että faasimuutosmateriaaleja sisältävien tekstiilientestaukseen liittyvä standardointityö on aloitettu CEN/TC 248/WG 31 työryhmässä. TTY on edustettuna tässä työryhmässä, joten standardoinnin seurannan kautta projektin PCM testaus pyritään toteuttamaan mahdollisuuksien mukaan niillä menetelmillä, jotka tuleviin standardeihin jatkossa valitaan. Kaupallisista PCM-tekstiileistä on haettu DSC-mittausten kautta (Kuva 8) vertailuarvoja projektin jatkovaiheessa tehtävien omien kokeellisten rakenteiden arviointeja varten.



Kuva 8. Kaupallisen PCM-tekstiilin DSC-käyrä.

Differentiaalisessa pyyhkäisykalorimetriassa (DSC) mitataan näytteessä tapahtuvien reaktioiden sitomaa tai vapauttamaa lämpöenergian määrää ja tällä tavalla pyritään tulkitsemaan näytteessä tapahtuvia muutoksia.

#### 4. Loppupäätelmät

Projektissa selvitettiin leikkauspaksunevien STF -nesteiden sekä lämmönhallintaan käytettävien faasimuutosmateriaalien (PCM) perusominaisuudet ja hyödynnettävyys ballististen suojarusteiden näkökulmasta. Kirjallisuusselvitysten lisäksi materiaaleille suoritettiin valmistuskokeita käytännön kokemuksen kasvattamiseksi sekä sovellettavuustuntuman aikaansaamiseksi.

PCM-tekstiilien testauksen standardointityö on käynnissä, mikä tulee jatkossa helpottamaan vertailuja eri materiaalien ja eri tavoin valmistettujen koerakenteiden suorituskyvyn määrittämisessä sekä tulosten keskinäisessä vertailussa. Kaupallisten materiaalien karakterisointi suoritettiin standardiluonnosten mukaisesti. Jatkossa hyödynnetään TTY:n hikoilevaa synteriä ja mahdollisesti myös hikoilevaa nukkea PCM-materiaalien lämmönsäätelyominaisuuksien tarkasteluissa.

Kirjallisuuteen pohjautuen valittiin raaka-aineet STF-nesteiden valmistamiseksi ja testaami-

seksi. Suoritettujen koesarjojen perusteella kehitettiin menetelmä nanokokoisien SiO<sub>2</sub>-jauheen dispergoimiseksi PEG-matriisiin. Tutkitut täyttöasteet olivat merkittävästi kirjallisuusviitteissä esitettyjä pienempiä, tästä huolimatta tutkittujen näyttemateriaalien leikkauspaksuneminen osoittautui erittäin voimakkaaksi. Tutkimuksen tässä vaiheessa on vielä epäselvää mistä kirjallisuudesta poikkeavat havainnot johtuvat, todennäköisenä syynä ovat pienet poikkeamat lähtöaineissa tai vaihtoehtoisesti se ettei kirjallisuusviitteissä ole esitetty tietoja yksityiskohtaisesti.

Ballistisen suojauskyvyn kasvattamiseksi STF-nesteitä hyödyntäen tutkittiin eri menetelmiä impregnoida leikkauspaksuneva neste aramidikankaan sisään. Kehitetyllä impregnointimenetelmällä voidaan toteuttaa tasaisen neliöpainon omaavia suojakankaita. Mikroskooppitarkastelujen perusteella STF-neste on tunkeutunut yksittäisten kuitujen väliin ja mahdollistaa näin maksimaalisen suorituskyvyn. Suojarakenteille suoritettavat alustavat pistosuojaustestit osoittavat, että aramidikangaskerrostojen impregnointi STF-nesteellä kasvattaa parhaimmillaan suojauskykyä 40 % tai vaihtoehtoisesti mahdollistaa 25 % kevyemmän suojarakenteen.

Alustavien koesarjojen perusteella voidaan todeta, että kohtuullisen yksinkertaisilla valmistusmenetelmillä on mahdollista valmistaa leikkauspaksunevia nesteitä ja niillä impregnoituja kankaita. Esikokeet osoittivat, että kuiturakenteen suorituskykyä voidaan kasvattaa merkittävästi STF-nesteellä.

Tutkimuksen jatkoon kannalta oleellisia ohjaavia kysymyksiä ovat STF-nesteen koostumuksen ja kankaaseen impregnoitavan nestemäärän optimointi, sekä miten STF-impregnoitunut aramidikankaan suojakyky riippuu uhkakuvasta (terägeometria, sirpaleet, luodit).

Suoritettavat tutkimukset luovat hyvän pohjan tutkimuksen toiselle projektivuodelle, jonka aikana PCM- ja STF-materiaalien ympärillä tehty kehitystyö on tarkoitus integroida samaan sovelluskohteeseen ja tehostaa tätä kautta samanaikaisesti ballistista suojauskykyä ja lämmönhallintaa.

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

Tutkimuksen seurauksena on syntynyt idea, jonka avulla voidaan tehostaa samanaikaisesti ballistista suojauskykyä ja lämmönsäätelyä. Innovaation pohjalta on tehty keksintöilmoitukset VTT:n ja TTY:n toimesta. Projektin ohjausryhmää on informoitu syntyneestä keksinnöstä. Keksinnön uutuusarvoon liittyen tehtiin patenttihakua kolmessa eri tietokannassa: Espacenet, USPTO Patent Full-Text and Image Database sekä LexisNexis®:n TotalPatent®-tietokannassa. Alustavien patenttikatsausten perusteella mahdolliselle patentoinnille ei nähdä esteitä. Keksinnön taustalla oleva idea todennetaan projektin toisena suoritusvuotena.

## 7. Hankkeen seuraajan lausunto raportista

Vuoden 2013 tutkimuksissa todettiin, että valmistetut STF-nesteet olivat voimakkaasti leikkauspaksunevia. Nesteet saatiin myös impregnoitua aramidikankaaseen riittävän tasaisesti, että voidaan olettaa impregnoinnin onnistuvan myös teollisessa valmistuksessa. Alustavissa puukotustesteissä saatiin lupaavia tuloksia siitä, että STF-nesteellä impregnoitujen aramidikankaiden tunkeutumissyvyydet ovat huomattavasti pienempiä kuin impregnoimattomien. Tästä voidaan päätellä, että tällä menetelmällä ballististen suojapaneelien painoa voidaan keventää ja rakennetta saada joustavammaksi, koska aramidikerroksia voidaan vähentää.

---

Kaupallisista faasimuutosmateriaaleista on saatu tuntumaa, että oikein materiaalikerroksia sijoittamalla voidaan saada jonkin asteista lämpösäätelyä ballistisiin suojarusteisiin. Koska ballistiset suojarusteet aiheuttavat liiallista paino- ja lämpökuormaa sekä rajoittavat taistelijan liikkuvuutta, tätä tutkimusta on syytä jatkaa. Ensimmäinen vuosi osoittaa, että tutkimuksessa ollaan oikeilla jäljillä.