

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

KOMPOSIITIT PUOLUSTUSVÄLINETEOLLISUUDEN RATKAISUISSA

COMPOSITE MATERIALS IN DEFENCE INDUTRY APPLICATIONS

Lappeenrannassa 2.11.2017

Arimo Åberg

Tarkastaja Prof. Timo Kärki

Ohjaaja TkT Marko Hyvärinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Arimo Åberg

Komposiitit puolustusvälineteollisuuden ratkaisuihin

Kandidaatintyö

2017

33 sivua, 13 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: Prof. Timo Kärki

Ohjaaja: TkT Marko Hyvärinen

Hakusanat: komposiitit, puolustusvälineteollisuus, aramidi ja keraami

Tämä kandidaatintyö tutkii komposiittimateriaalien käyttökohteita, materiaalin ominaisuuksia ja hyödyntämistä puolustusvälineteollisuuden sovelluksissa. Tutkimuksessa esitellään yleisimpiä puolustusvälineteollisuuden käyttämiä komposiittimateriaaleja ja näiden materiaalin ominaisuuksia.

Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Lähdekirjallisuutena käytetään painettua kirjallisuutta, sekä julkisia internetistä löytyviä tutkimusraportteja, artikkeleita ja tuotekatalogeja.

Työn tuloksena löydettiin puolustusvälineteollisuuteen soveltuvien komposiittimateriaalien tärkeitä materiaalin ominaisuuksia, sekä materiaalien käyttökohteita. Vaadittavat materiaalin ominaisuudet riippuvat aina käyttökohteesta, mutta yleisesti puolustusvälineteollisuuteen soveltuvat materiaalit ovat kevyitä, kestäviä ja lujia.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Arimo Åberg

Composite materials in defense industry applications

Bachelor's thesis

2017

33 pages, 13 figures and 2 tables

Examiner: Prof, D. Sc. (Tech.) Timo Kärki

Supervisor: D. Sc. (Tech.) Marko Hyvärinen

Keywords: composites, defence industry, aramid and ceramic

This bachelor's thesis is researching of using composites in defense industry applications. Research discovers the most common used composite materials in defense industry applications, where these materials are used and properties of those materials.

This study is based on a literature review. Books, public research papers, articles and product catalogs are used as sources.

As a result, this research finds composite materials and material properties which makes those suitable for defense industry applications. Needed material properties always depend on where those are used for but generally suitable materials are light, durable and strong.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	6
2	TUTKIMUSMENETELMÄT	7
3	YLEISKATSAUS KOMPOSIITEISTA	8
	3.1 Komposiittien rakenne	8
	3.2 Komposiittien rakenneaineet	9
	3.3 Komposiittien valmistus ja työstö.....	11
4	KOMPOSIITTIMATERIAALIT PUOLUSTUSVÄLINETEOLLISUUDESSA 12	
	4.1 Puolustusvälineteollisuuden vaatimukset	12
	4.2 Materiaalit.....	12
	4.2.1 Metallimatriisikomposiitit	12
	4.2.2 Polymeerikomposiitit.....	13
	4.2.3 Keraamit.....	13
	4.3 Käyttökohteet.....	14
	4.3.1 Ballistinen henkilösuojaus	14
	4.3.2 Ajoneuvot.....	17
	4.3.3 Maakohteiden suojaus.....	19
	4.3.4 Ilmailu	21
	4.3.5 Laivat	22
	4.3.6 Asejärjestelmät.....	24
	4.3.7 Funktionaalisia ja älykkäitä ominaisuuksia vaativat käyttökohteet.....	24
5	POHDINTA	26
6	YHTEENVETO	29
	LÄHTEET	30

SYMBOLILUETTELO

E_1	Kimmokerroin kuitujen suunnassa [Gpa]
E_2	Kimmokerroin kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa [Gpa]
ρ	Tiheys [g/cm^3]
σ_1	Jännitys kuitujen suunnassa [Mpa]
σ_2	Jännitys kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa [Mpa]
HM	Suuren moduulin kuidut
IM	Keskinkertaisen moduulin kuidut
P	Puristus
UHM	Erittäin suuren moduulin kuidut
V	Veto

1 JOHDANTO

Puolustusvälineteollisuus tarvitsee lujia, jäykkiä, kevyitä, kestäviä ja lämmönkestäviä konstruktio materiaaleja. Näihin tarpeisiin komposiittimateriaalit tarjoavat hyviä ratkaisuita. (Kari et al. 2008a, s. 408.) Komposiittimateriaali koostuu kahdesta tai useammasta materiaalista, mutta materiaalit eivät ole lienneet tai sulautuneet yhteen (Komposiitit 2017). Ensimmäiset viitteet komposiittimateriaalien käytöstä puolustusvälineteollisuudessa ovat 1960-luvulta. Komposiittimateriaaleja koskeva kehitystilanneselvitys osoittaa, että monien komposiittimateriaalien kehitys on tapahtunut puolustusvälineteollisuuden tarpeisiin ja useita komposiittimateriaaleja pidetään valmistuksessa puolustusvälineteollisuuden tarpeita varten. Tärkeitä puolustusvälineteollisuuden komposiittimateriaaleja ovat muun muassa aramidikuiduista valmistettava Kevlar, erilaiset metallimatriisikomposiitit, sekä keraamit. (Saarela et al. 2003, s. 442.)

Kandidaatintyössä kartoitetaan aluksi teoriakatsauksessa komposiittien yleisiä ominaisuuksia. Teoriakatsauksessa esitellään komposiittimateriaalien rakennetta ja luodaan ero homogeenisiin materiaaleihin verrattuna. Komposiitit ovat rakenteeltaan aina epähomogeenisia. Epähomogeenisuus tarkoittaa, että materiaalin ominaisuudet eivät ole kaikkialla samanlaiset. Esimerkki homogeenisestä materiaalista on teräs, jota puolustusvälineteollisuus käyttää paljon. Puolustusvälineteollisuutta käsittelevässä osassa työ rajataan käsittelemään puolustusvälineteollisuuden käyttämien komposiittimateriaalien materiaalikirjoa ja käyttökohteita. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Tutkimusongelmana tässä tutkimuksessa on, kuinka puolustusvälineteollisuus käyttää komposiittimateriaaleja ja millaisissa sovelluskohteissa. (Saarela et al. 2013, s. 26.)

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on vastata seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Mitä komposiittimateriaaleja puolustusvälineteollisuus hyödyntää?
- Miksi komposiittien materiaalinominaisuudet tekevät komposiittimateriaaleista puolustusvälineteollisuuteen sopivia?
- Minkälainen rakenne ja koostumus komposiittimateriaaleilla tulee olla, jotta ne täyttävät puolustusvälineteollisuuden vaatimukset?

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tämän tutkimuksen tiedonhaku pyrkii vastaamaan edellisessä luvussa esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Tutkimus toteutetaan induktiivisena lähdekirjallisuuden perustuvana pääasiassa kvalitatiivisena tutkimuksena. Tämä tutkimus on deskriptiivistä eli toteavaa kirjallisuustutkimusta ja tutkimus suoritetaan objektiivisena, eikä kirjoittajan omia mielipiteitä tuoda julki tekstissä. Työn taustalla ei ole myöskään mitään instituutioita tai yritystä, joiden valmistamia materiaaleja erityisesti tutkitaan, vaan työssä käsitellään yleisimpiä puolustusvälineiteollisuuden materiaaleja mahdollisimman kattavasti.

Tutkimuksessa kvantitatiivista aineistoa on taulukoissa muun muassa eri materiaalien mekaaniset ominaisuudet. Tämän kvantitatiivisen aineiston tarkoituksena on pyrkiä selventämään ja perustelemaan lukijalle tutkimuksen väitteitä. Pääpaino tutkimuksessa on kuitenkin kvalitatiivisessa tutkimuksessa, jossa asioiden laatu ja ominaisuudet ovat tärkeitä.

Kvalitatiivisessa tutkimuksessa lähteiden uskottavuuden, luotettavuuden ja vahvistettavuuden varmistaminen on tärkeää. Tutkimusta tehdessä pyrittiin vertailemaan eri lähteiden tarjoamaa tietoa aiheesta ja hyödyntämään mahdollisimman montaa lähdettä, jos mahdollista. Näin saadaan parannettua tutkimuksen luotettavuutta. Tämän työn tärkeimmän lähteet ovat pääasiassa painettua kirjallisuutta. Kirjallisuudeksi pyrittiin valitsemaan mahdollisimman uusia ja kattavia teoksia, joiden kirjoittajat ja kustantajat ovat tunnettuja ja luotettavia. Kirjallisuuden lisäksi tutkimukseen etsittiin internetistä löytyviä raportteja ja tutkimuksia muun muassa LUT Finna-tietokannan kautta. Myös tuotekatalogeja käytetään lähteenä. Tuotekatalogeista täytyy osata erottaa markkinointimateriaali ja faktat, joten niihin täytyy suhtautua kriittisesti.

Tutkimuksessa ei ole hyödynnetty minkäänlaista hiljaista tietoa tai salassa pidettävää materiaalia. Puolustusvälineiteollisuudella on kuitenkin paljon salaista tietoa, jonka salaamiseen on perustellut syyt. Salaisesta tiedosta on haittaa tietyissä vaiheissa tätä tutkimusta, koska puolustusvälineiden kaikkia ominaisuuksia ei haluta tuoda julki.

3 YLEISKATSAUS KOMPOSIITEISTA

Komposiitti on nimitys materiaalien yhdistelmälle, joka koostuu kahdesta tai useammasta materiaalista, mutta materiaalit eivät ole lienneet tai sulautuneet yhteen. (Muovitieto 2017).

3.1 Komposiittien rakenne

Eri materiaaleja yhdistävä ainesosa komposiiteissa on matriisi eli komposiitin runko. Matriisimateriaaleja komposiiteissa ovat esimerkiksi polymeerit eli muovit, metallit ja keraamit. (Vuorinen & Mustakangas & Annala 2016, s. 3-5.) Keraamilla tarkoitetaan epäorgaanisia ei epämetallisia yhdisteitä (Vuoristo & Nykänen 2005). Matriisiin lisäksi komposiitit sisältävät erilaisia lujitteita. Lujitteet voivat olla erilaisia kuituja, partikkeleita tai hiukkasia. Lujitteet vaikuttavat komposiittien ominaisuuksiin esimerkiksi lujuuteen, jäykkyyteen, säänkestävyyteen ja lämmönjohtavuuteen. Lujitteiden lisäksi komposiiteissa voi olla täyte- ja lisäaineita. (Vuorinen et al. 2016, s. 3.)

Johdanto luvussa kerrottiin, että komposiitit ovat rakenteeltaan aina epähomogeenisia. Saarela et al. mukaan (2013, s. 26), ”yksinkertainen komposiitti voidaan kuitenkin ajatella makroskooppisesti homogeenisesti eli makroskaalassa samanlaiseksi eri tarkastelupisteissä.” Tämä tarkoittaa, että yksittäisiä kerroksia tutkittaessa kerroksen ominaisuudet ovat kaikkialla samanlaiset. Valmistettaessa komposiittimateriaaleja käyttämällä lujitekuituja, jotka ovat anisotrooppisia eli ominaisuudet vaihtelevat eri tarkastelusuunnissa, komposiittirakenteeseen muodostuu erilaisia ominaisuuksia eri tarkastelusuunnissa. (Saarela et al. 2013, s. 26.)

Komposiiteilla on monia eri rakennetyyppejä. Yleisimpiä rakennetyyppejä ovat levymäiset laminaattikomposiitit ja kuitulujitetut komposiittirakenteet. Laminaattikomposiitit sisältävät alaluokkia kuten kudosis- tai mattolaminaatit, kulmalaminoidut laminaatit ja monoliittiset laminaatit. Yhteistä näille laminaattirakenteille on levytasoon pinottu rakenne. Kudosis- ja mattolaminaatit sisältävät pinottuja kudoksia ja mattoja, jotka lujittavat rakennetta. Laminaatit voidaan vielä jakaa kuitujen suunnan mukaan eli yhdensuuntaislaminaatteihin ja ristikkäislaminaatteihin. Toinen tärkeä laminaattirakenne on kerroslevyrakenne, joka koostuu kahden pintalevyn väliin liimatusta ydinaineesta. Kerroslevyille saadaan näin kevyt

ja jäykkä rakenne, sekä äänen- ja lämmöneristys ominaisuuksia. (Saarela et al. 2003, s. 22-23.)

3.2 Komposiittien rakenneaineet

Tärkein matriisimateriaali komposiittien raaka-aineena ovat muovit eli polymeerit. Tällöin puhutaan lujitemuoveista tai muovi- ja polymeerikomposiiteista. Muovit voivat olla kertatai kestonuoveja. Kertamuovia ei voi muotoilla uudelleen sen valmistamisen jälkeen esimerkiksi lämmön avulla johtuen kertamuovien verkkomaisesta rakenteesta, mutta kestonuovia voi. Kertamuoveja ovat esimerkiksi polyesteri, vinyyliesteri, polyimidit ja epoksit. Yleisiä matriisina käytettäviä kestonuoveista polymeerikomposiiteissa ovat polypropeeni ja polyamidi. Matriisina voivat toimia myös eri metallit ja keraamit. (Vuorinen et al. 2016, s. 3-4.)

Komposiittimateriaaleissa käytettäviä lujiteaineita ovat pääasiassa kuitumaiset lasi-, hiili- ja aramidikuidut, mutta myös luonnonkuituja käytetään (Vuorinen et al. 2016, s. 5). Merkittävin näistä kuiduista määrällisesti on lasikuitu, jonka osuus koko lujitemateriaalien käytöstä on yli 95 % (Saarela et al. 2013, s. 7). Vuorisen, Mustakankaan ja Annalan (2016, s. 6) mukaan ”Lasikuiduilla on suuri lujuus ja sen jäykkyys on samaa luokkaa alumiinin kanssa.” Lasikuitu on väriltään valkoista ja läpinäkyvää ja sillä on hyvät sähkön eristysominaisuudet. Lasikuiduista on olemassa peruslasikuitua E, suorituskykyisempää S-lasia ja kemiallisesti kestävä C-lasia. (Vuorinen et al. 2016, s. 6.)

Hiilikuidulla tarkoitetaan noin 95-99 % hiiltä sisältäviä kuituja. Näiden kuitujen ominaisuuksia on korkea kimmomoduuli ja korkea lujuus. (Saarela et al. 2013, s. 80-81.) Hiilikuidut on jaettu lasikuitujen tapaan ryhmiin. Vuorinen et al. (2016, s.6) mukaan ryhmiä ovat: ”suuren lujuuden tai standardimoduulin kuidut (SM), keskinkertaisen moduulin kuidut (IM), suuren moduulin kuidut (HM) sekä erittäin suuren moduulin kuidut (UHM).” (Vuorinen et al. 2016, s. 6.)

Aramidi on kolmas tärkeä kuitumateriaali. Lasikuidun tapaan aramidikuidut ovat lujia. Lisäksi aramidikuidut ovat joustavia ja niillä on hyvä leikkauskestävyys. (Vuorinen et al. 2016, s. 6). Komposiiteissa käytettäviä lujitekuituja ovat myös luonnonkuidut, kuten

kasvi-, eläin- ja mineraalikuidut. Kasvikuituja ovat esimerkiksi runko-, puu ja lehtikuidut. Eläinkuituja ovat muun muassa eläinten karvat ja silkki. (Vuorinen et al. 2016, s. 7.)

Taulukkoon 1 on koottu edellä esitettyjen yleisesti käytettyjen yhdensuuntaislujitettujen komposiittimateriaalien mekaanisista ominaisuuksista. Taulukon materiaalien lujuusarvoja käytetään tulevissa luvuissa tukena väitteille, kun eri materiaalien soveltuvuutta esitellään käyttökohteiden mukaan. Taulukossa on myös vertailun vuoksi homogeeniset materiaalit teräs ja alumiini omilla riveillä. Teräs ja alumiini ovat tärkeitä tässä tutkimuksessa, koska ne ovat perinteisesti käytettyjä materiaaleja puolustusvälineiteollisuudessa. Koska teräs ja alumiini ovat homogeenisia materiaaleja niiden ominaisuuden eivät eroa tarkastelusuunnan mukaan. Komposiittimateriaaleilla ominaisuuden vaihtelevat tarkastelusuunnan mukaan. Taulukossa E_1 on kimmokerroin kuitujen suunnassa ja E_2 kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa. σ_1 on jännitys kuitujen suunnassa ja σ_2 kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa. Taulukossa lyhenne V tarkoittaa vedossa ja P puristuksessa. (Vuorinen et al. 2016, s. 11)

Taulukko 1. Kuitulujitettujen komposiittien ominaisuudet, kuitujen tilavuusosuuden ollessa 60 % (Vuorinen et al. 2016, s. 11).

	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_1/ρ	σ_1 V (MPa)	σ_2 V (MPa)	σ_1 P (MPa)	σ_2 P (MPa)	ρ (g/cm ³)
E-LASI-EPOKSI	43	9.7	21.5	1070	38	870	185	2.00
S-LASI-EPOKSI	52	11.7	26	1590	41	1050	234	2.00
ARAMIDIEPOKSI	76	5.5	55	1380	30	275	138	1.38
HIILIKUITU (SM)-EPOKSI	138	10.3	89	2275	52	1590	207	1.55
HIILIKUITU (IM)-EPOKSI	172	10	108	2760	50	1540	152	1.60
HIILIKUITU (UHM)-EPOKSI	325	6.2	204	760	26	705	70	1.59
HIILIKUITU (SM)-PEEK	134	10.1	85	2140	80	1105	200	1.57
TERÄS (S355)	210		27	510		510		7.38
ALUMIINI (2024-T4)	73.1		26	470		470		2.78

Komposiiteissa käytetään täyte- ja apuaineita tilavuuden kasvattamiseen ja kalliimpien aineiden korvaamiseen. Täyteaineilla voidaan myös muuttaa komposiittien mekaanisia ja fysikaalisia ominaisuuksia. Täyteaineita komposiiteissa ovat esimerkiksi mineraalit, kuten kalsium- ja magnesiumkarbonaatit, lasi, metallit, hiilimusta ja orgaaniset täyteaineet. (Saarela et al. 2013, s. 58.)

3.3 Komposiittien valmistus ja työstö

Komposiittien valmistusmenetelmät voidaan jakaa neljään ryhmään: laminointimenetelmät, injektiomenetelmät, puristusmenetelmät ja jatkuvatoimiset menetelmät. Laminointimenetelmiä ovat käsi- ja ruiskulaminointi, käärintä ja kuitukelaus. Näissä laminointimenetelmissä lujite ja matriisi levitetään muottiin kerroksittain. Injektiomenetelmiä ovat paine- ja alipaineinjektio, keskipakovalu, reaktiovalu ja ruiskuvalu. Näille eri injektiomenetelmille yhteistä on materiaalin syöttäminen muottiin paineen avulla. Puristusmenetelmiä on kaksi: ahto- ja siirtopuristus. Näissä menetelmissä raaka-aine levitetään muottiin ja muotti suljetaan, jolloin kappale muotoutuu muotin mukaisesti. Jatkuvatoimisia menetelmiä ovat pultrusio, ekstruusio ja valssaus. Näissä menetelmissä erilaisia profiileja valmistetaan suulakkeita ja valsseja käyttämällä. (Saarela et al. 2013, s. 21.)

Komposiittimateriaaleja voidaan pääasiassa työstää samoilla menetelmillä kuin esimerkiksi metallisia materiaaleja. Näitä menetelmiä ovat esimerkiksi poraus, jyrshintä ja sahaus. Ongelmia komposiittimateriaalien työstämisessä aiheuttavat lujitekuidut. Erityisesti lujat lasi- ja hiilikuidut ovat kuluttavia koneiden työkaluille. Delaminaation eli materiaalin irtoamisen estämiseksi, kerrosmaisat materiaalit tulee tukea hyvin ja käyttää juuri tietyille materiaalille soveltuvia leikkausnopeuksia. (Saarela et al. 2013, s. 214.)

4 KOMPOSIITTIMATERIAALIT PUOLUSTUSVÄLINETEOLLISUUDESSA

Ensimmäiset viitteet komposiittimateriaalien hyödyntämisestä puolustusvälineteollisuudessa ovat 1935-luvulta, jolloin Yhdysvaltain armeija otti ensimmäistä kertaa käyttöön lasikuiduilla lujitettuja polymeerimateriaaleja. 1960- ja 1970-luvun vaihteessa aramidi-, lasi- ja hiilikuidun kehitys pääsi vauhtiin ja niitä alettiin hyödyntää puolustusvälineteollisuudessa. (Kombink et al. 1998.)

4.1 Puolustusvälineteollisuuden vaatimukset

Komposiittimateriaalien käytölle puolustusvälineteollisuudessa on asetettu kahdenlaisia vaatimuksia. Puolustusvälineteollisuudella on tarpeita keveille ja kuormitusta kantaville rakenteille, joilta vaaditaan myös tiettyjä fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Nämä vaatimukset täyttävät usein erilaiset suuren lujuuden ja suuren kimmomoduulin materiaalit. Tällöin voidaan puhua rakenteellisista vaatimuksista. Toisenlaiset vaatimukset asettaa tarve suojata ihmiskehoa tai ajoneuvoa. Saarela et al. (2003, s. 442) mukaan näiltä materiaaleilta vaaditaan ”tietynlaista rakenteellisen lujuuden huonoutta, ts. niiden on delaminoiduttava iskuenergian vaikutuksesta.” Suojaavilta materiaaleilta vaaditaan siis ominaisuutta absorboida kineettistä energiaa. Tietyissä käyttökohteissa materiaalit voivat täyttää sekä rakenteelliset, että suojaavat vaatimukset. Puolustusvälineteollisuuteen soveltuvien materiaalien mekaanisia vaatimuksia ovat siis usein korkea lujuus, keveys ja suuri kimmomoduuli. (Saarela et al. 2003 s. 442.)

4.2 Materiaalit

Tässä luvussa esitellään alaluvuittain yleisimpien puolustusvälineteollisuudessa käytettävien komposiittimateriaalityyppien ominaisuuksia ja rakennetta. Näiden materiaalien käyttökohteista kerrotaan luvussa 4.3.

4.2.1 Metallimatriisikomposiitit

Metallimatriisikomposiitissa on nimensä mukaisesti metallinen matriisi. Matriisina puolustusvälineteollisuudessa käytettäviä materiaaleja ovat alumiini, titaani ja teräs. Lujitemateriaalina metallimatriisikomposiiteissa käytetään partikkeleita ja erityisesti keraamisia lujitekuituja. Metallimatriisikomposiittien käytön tavoitteena on lisätä

metallimatriisin kimmomoduulia ja lujuutta. Kari et al. (2008a, s. 415) mukaan ”Muita tavoiteltavia ominaisuuksia voivat olla kovuus, kulumiskestävyys, lämmönjohtavuus ja mahdollisuus lämpölaajenemiskertoimen säätelyyn.” Lujittaminen vaikuttaa kuitenkin negatiivisesti matriisimateriaalin murtovenymään ja sitkeyteen. Lujittaminen vaikuttaa myös lujuuden hajontaan materiaalissa ja jatkuvakuituisissa materiaaleissa lujuusarvot muuttuvat kuitujen suunnan mukaan. Metallimatriisikomposiiteissa ongelmana on myös, että teräksen käytössä komposiitin matriisina lujitemateriaalit laskevat komposiitin lujuutta. Metallimatriisikomposiiteista puolustusvälineteollisuus käyttää eniten alumiinikomposiitteja. (Kari et al. 2008a, s. 415-416.)

4.2.2 Polymeerikomposiitit

Polymeerimateriaalit toimivat matriisina monien eri kuitumateriaalien kanssa ja näin ollen materiaalikirjo on laaja. Polymeerikomposiitti tarkoittaa materiaalia, jossa matriisi materiaalina on materiaalin nimensä mukaisesti polymeeri. Polymeerikomposiiteilla on mahdollista korvata metallisia materiaaleja ja näin keventää muutoin metallisista materiaaleista valmistettavia rakenteita. Polymeerikomposiiteilla on metalleja parempi korroosio- ja väsymiskestävyys. Tärkeimpiä puolustusvälineteollisuuden polymeerikomposiittiryhmiä ovat hiili- ja aramidikuiduilla lujitetut komposiittimateriaalit. (Kari et al. 2008a, s. 424.)

Polymeerikomposiittien hyvät ominaisuudet perustuvat Kari et al. (2008a, s. 432) mukaan ”monifunktionaalisuuteen sekä hyvään massatehokkuuslukuun.” Monifunktionaalisuus polymeerikomposiiteissa tarkoittaa mahdollisuutta lisätä niihin toiminnallisia ominaisuuksia kuten magneettisuutta tai sähköä eristäviä ja johtavia kerroksia. Tämä toteutetaan matriisin ja kuitujen kemiallisia ja fysikaalisia vuorovaikutuksia muuttamalla. Massatehokkuusluvulla tarkoitetaan käytetyn materiaalin massan suhdetta saavutettaviin ominaisuuksiin. (Kari et al. 2008a, s. 432.)

4.2.3 Keraamit

Keraami ei itsessään ole komposiittimateriaali. Keraameja kuitenkin käytetään puolustusvälineteollisuudessa komposiittirakenteiden kanssa ja osana niitä, joten ne ovat tärkeitä tämän tutkimuksen kannalta. Keraameilla on korkea kovuus ja hyvä väsymiskestävyys, korroosiokestävyys, sekä lämpötilankesto. Keraameilla on kuitenkin

huono sitkeys, joka rajoittaa niiden käyttökohteita. Tärkeimpiä puolustusvälineiteollisuudessa käytettäviä keraameja ovat alumiinioksidi ja boorikarbidi. (Kari et al. 2008a, s. 433; Kari et al. 2008b, s. 194.)

4.3 Käyttökohteet

Seuraavissa alaluvuissa on esitetty komposiittien käyttökohteita. Käyttökohteiden yhteydessä kerrotaan niistä materiaalin ominaisuuksista, jotka tekevät juuri näistä materiaaleista soveltuvia kyseisiin käyttötarkoituksiin.

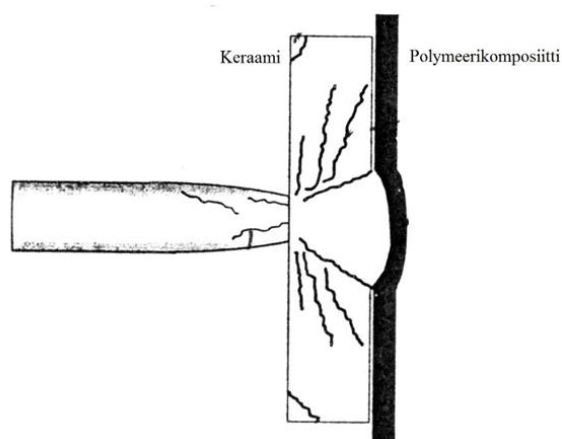
4.3.1 Ballistinen henkilösuojaus

Polymeerikomposiitteja käytetään suojaamaan ihmiskehoa, rakenteita ja ajoneuvoja ammuksilta ja sirpaleilta. Polymeerikomposiittien suojausominaisuudet perustuvat korkean vetolujuuden kuitujen venymiseen iskun vaikutuksesta, jolloin kuitujen venyminen absorboi iskun kineettistä energiaa. (Cheeseman & Bogetti 2003.) Ero polymeerikomposiittien ja erittäin kovien suojamateriaalien esimerkiksi keraamien toimintaan on Kari et al. (2008a, s. 430) mukaan, että keraamit ”--pyrkivät muuttamaan ammuksen suuntaa ja hajottamaan itse ammusta.” Pehmeämmillä energiaa absorboivilla materiaaleilla esimerkiksi polymeerimateriaaleilla on tavoitteena hidastaa ammusta ja levittää ammuksen kineettinen energia laajalle alueelle. Esimerkiksi aramidikuitujen käytössä tavoitteena on luoda erittäin hyvin venymistä kestävästä kuiduista vahva verkko, jolloin kuitujen venyminen ja lopulta repeytyminen vaatii paljon energiaa ja näin ammuksen kineettistä energiaa saadaan vähennettyä. Tämä vahva verkko hyödyntää aramidin korkeaa lujuutta kuitujen suunnassa vedossa. Tämä on havaittavissa taulukosta 1 tarkastelemalla aramidiepoxin ominaisuuksia. Kuvassa 1 on esitetty polymeerimateriaaliin esimerkiksi aramidiverkkoon osuvan ammuksen vaikutus, jossa näkyy selkeästi materiaalin venyminen. Tämä aramidiverkko voisi olla esimerkiksi Kevlar tuotenimellä tunnettua materiaalia. (Cheeseman & Bogetti 2003; Kari et al. 2008a, s. 430.)



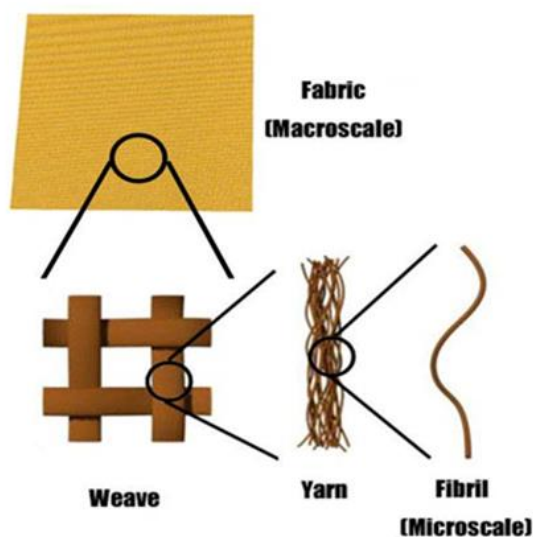
Kuva 1. Polymeerikudoksen rakenne ja simulaatio iskusta (Farhat research group).

Kevlar voi toimia myös keraamin kanssa yhdessä. Kuvassa 2. on esitetty periaatteellinen keraami- ja polymeeripanssarin toiminta, jossa polymeerikomposiitti on keraamin takana. Tämänkaltainen rakenne on esimerkiksi kovalla keraamilevyllä vahvistetussa polymeerikomposiittipanssarissa. Koska keraameilla on luja rakenne ne kykenevät vastustamaan iskun aiheuttamaa muodonmuutosta tehokkaasti. Luodin osuessa kovaan keraamilevyyn, levy alkaa kuluttaa luodin kärkeä ja luoti alkaa murtua. Samalla osa luodin kineettisestä energiasta absorboituu takana olevaan joustavaan polymeerikomposiittiin samalla tavalla kuin kuvan 1 esimerkissä. Keraamilevyt ovat yleensä alumiinioksidista tai boorikarbidista valmistettuja. Keraamin tilalla voi olla myös teräslevy. Polyeteenikomposiitista valmistettuja levyjä on myös käytetty. Polyeteenilevyt kestävät keraameja paremmin moniosumia. Keraamilevyt kestävät huonosti moniosumia, niiden huonosta sitkeydestä johtuvan hauraan rakenteen vuoksi. (Kari et al. 2008a, s. 430; Kari et al. 2008b s. 194.)



Kuva 2. Periaatekuva panssarin toiminnasta (Saraswat, s. 14).

Tässä luvussa mainittu aramidikuiduista valmistettava Kevlar on tunnetuin yksittäinen puolustusvälineteollisuuden käyttämä polymeerikomposiittimateriaali. Kevlaria valmistaa yhdysvaltalainen Dupont. Markkinoilla on myös muita aramidikuiduista valmistettuja Kevlarin kaltaisia materiaaleja. Kevlar on hyvin lujaa materiaalia, mutta kevyttä. Kevlarilla on myös hyvä sitkeys ja hyvä lämmönkesto. Kuvassa 3 on Kevlarin rakennekuva. Kuvassa yksittäiset kuidut muodostavat lankoja ja limittäin kulkevat langat muodostavat punokset joista rakentuu itse kangas. Hyvän leikkauslujuuden ansiosta Kevlar sopii myös viiltosuojaliiveihin. (DuPont 2014.)



Kuva 3. Kevlar materiaalin rakenne (Farhat research group).

Henkilösuojaimissa polymeerikomposiitteja käytetään sirpalesuoja- ja luotisuojaliiveissä. Sirpalesuojaliiveillä pyritään ainoastaan sotilaan henkilökohtaisen sirpalesuojan parantamiseen. Luoteja vastaan sirpalesuojaliivit eivät tarjoa suojaa, ilman lisäsuojalevyjä. Luoteja vastaan käytetään yleensä erityisiä luotisuojaliivejä. Perusrakenne on sirpalesuojaliivin kaltainen eli monikerroksista kangaspaneeleista koostuva. Pienikaliiperisia luoteja varten riittää pehmeät suojaliivit, mutta suurempia sotilaskaliipereja varten luotisuojaliiveihinkin asennetaan keraamilevyjä kuten alumiinioksidilevyjä tai metallisia esimerkiksi teräksisiä ja titaania levyjä. Polyeteenikomposiitti- ja boorikarbidilevyjä käytetään myös. Kuvassa 4 tyypillinen suojaliivi. Kypärissä, suojalaseissa ja visiireissä käytetään myös polymeerikomposiitteja. Kypärät ovat

käytännössä täysin komposiittirakenteisia, esimerkiksi juuri Kevlarista valmistettuja. (Kari et al. 2008b, s. 193-194.)



Kuva 4. Kevlar suojaliivi (DuPont 2014).

Kevyissä taistelijoita suojaavissa komposiittirakenteisissahenkilösuojaimissa on käytetty myös nanomateriaaleja pääasiassa suojaamaan taistelijoiden raajoja. Näissä komposiittirakenteissa on käytetty nanohiiliputkia. Näillä hiilinanoputkilla lujitetuilla komposiittimateriaaleilla on erittäin korkea lujuus. Nanomateriaalien hyödyntäminen komposiiteissa on kuitenkin vielä testi- ja prototyypivaiheessa. Esimerkki uudesta käyttökohteesta on pallohiili materiaalista valmistettu ballistinen suojapanssari, jolla on viisi kertaa terästä suurempi lujuus. Nanopartikkeleita tullaan tulevaisuudessa hyödyntämään myös polymeerikomposiittien häiveominaisuuksien parantamiseen, koska nanomateriaaleilla voidaan muokata polymeerikomposiittien optisia ja magneettisia ominaisuuksia. Nämä ominaisuudet ovat funktionaalisia ominaisuuksia. Komposiittimateriaalien funktionaalisista ominaisuuksista lisää luvussa 4.3.7. Kehitystyö on hidasta, joten vielä ei ole näköpiirissä nanomateriaalien laajaa käyttöönottoa. (Kari et al. 2008a, s. 433-435.)

4.3.2 Ajoneuvot

Pääasiallinen panssarointimateriaali sotilasajoneuvoissa, kuten panssaroiduissa miehistönkuljetus- ja maastoajoneuvoissa on panssariteräs tai -alumiini, mutta komposiittimateriaalien käyttö lisääntyy. Komposiittien käyttökohteet ovat pääasiassa eikantavissa rakenteissa. Kantavissa rakenteissa teräkset ovat tärkein materiaali vielä pitkään

tulevaisuudessakin. Ballistisissa suojaavissa rakenteissa käytetään metallimatriisikomposiittimateriaaleja. Näiden metallimatriisikomposiittien kanssa voidaan käyttää myös keraameja ajoneuvojen lisäsuojauksessa ballistisissa paneeleissa. Metallimatriisikomposiiteista voidaan valmistaa yksinään myös kevyiden ajoneuvojen miehistötiloja. Nämä miehistötilat ovat tällöin erillään varsinaisesta ajoneuvon rungosta. Kuvassa 5 on esimerkki panssariajoneuvon metallimatriisikomposiitista valmistetusta miehistötilasta. Verrattuna teräksestä valmistettuun miehistötilaan, komposiittimateriaalista valmistetulla voidaan saavuttaa jopa 50 % säästö miehistötilan massassa. Näin saadaan parannettua ajoneuvon massatehokkuutta. (Kari et al. 2008a, s.284; Morgan advanced materials 2015, s. 6.)



Kuva 5. Composite Survivability Capsule (Morgan advanced materials 2015, s. 6).

Keraamimateriaalit vaativat aina jonkin muun materiaalin parikseen, koska keraameilla on huono sitkeys, jolloin ne eivät yksinään sovi panssarointimateriaaliksi ajoneuvoihin. Keraamien parina komposiittien tilalla voidaan käyttää myös terästä panssarielementeissä. Panssarielementeissä käytetty keraamimateriaali on yleensä alumiinioksidi. Kuvassa 6 on esitetty sotilasajoneuvo, jonka panssaroinnissa käytetään metallimatriisikomposiitteja. Kuvan 5 komposiitista valmistettu miehistötilaa käytetään tämänkaltaisissa ajoneuvoissa. Telapyörillä kulkevissa raskaissa ajoneuvoissa kuten panssarivaunuissa alumiinikomposiitteja Kari et al. (2008a, s. 416) mukaan ”on suunniteltu käytettäväksi telapyörästä osissa.” Näissä erittäin raskaissa taisteluajoneuvoissa panssariteräs on edelleen pääasiallinen materiaali. (Kari et al. 2008a, s. 416, 433.)



Kuva 6. SandCat komposiittipansaroitu ajoneuvo (Plasan 2017).

Protolabin PMPV 6x6 eli Misu on suomalaisvalmisteinen miehistönkuljetusajoneuvo. Misun kehitys on vielä kesken, mutta ajoneuvon on tarkoitus olla edullinen ja yksinkertainen miehistönkuljetusajoneuvo. Misussa käytetään ballistiseen suojaukseen Exote metallikeraami komposiittia. Exote materiaali on myös suomalaisvalmisteita. Exote kestää moniosumia ja se on pelkkiä keraamimateriaaleja kestävämpää. Tärkein syy Exote materiaalin käyttämiseen on säästö massassa verrattuna teräksen käyttämiseen. Exote materiaalia valmistetaan levyinä ja näitä levyjä voidaan valmistaa lähes minkä kokoisena ja muotoisena tahansa. Paksuudeltaan Exote-levyt ovat 6 – 30 mm. Exoten sulamispiste on erittäin korkea. Materiaali on palamatonta eikä se ruostu. (Protolab; Exote 2017.)

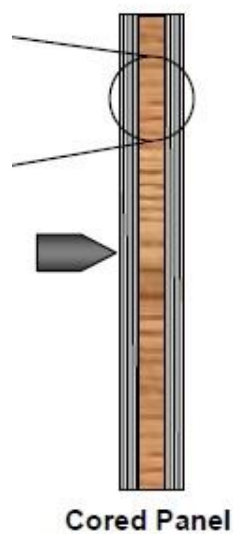
4.3.3 Maakohteiden suojaus

Suomalainen FY-Composites Oy on polymeerikomposiittituotteiden valmistaja. FY-Composites valmistaa monisuojaajärjestelmiä (Rapid Armor Shelter System®, RASS). RASS-monisuojaajärjestelmiä käytetään maakohteiden suojaamiseen. Kuvassa 7 on esimerkki RASS-monisuojaajärjestelmän käytöstä strategisesti tärkeän kohteen maakohteen suojauksessa. Monisuojaajärjestelmän suojalevyt on suunniteltu suojaamaan sirpaleilta. Tarvittaessa levyjä voidaan laittaa peräkkäin, jolloin saavutetaan suoja luoteja vastaan. Polymeerikomposiittien ominaisuuksien mukaan monisuojaajärjestelmän suojalevyt ovat fysikaalisesti- ja kemiallisesti kestäviä eli ne kestävät lämpötilanvaihteita, UV-säteilyä, eivätkä ne absorboi kosteutta. (FY-Composites a)



Kuva 7. RASS-monisuojajärjestelmä strategisesti tärkeän kohteen suojauksessa (FY-Composites b).

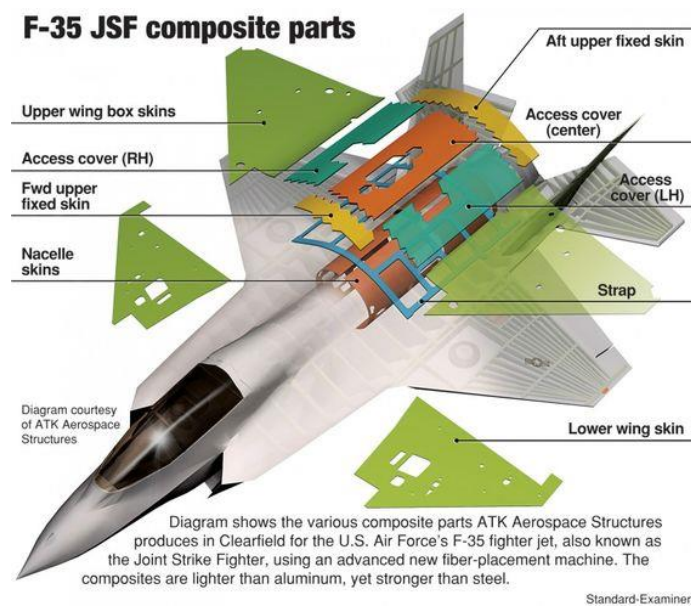
RASS-levyjen kaltaiset yhdysvaltalaisen MBPS:n (Modular Ballistic Protection Systems) valmistamat suojalevyt ovat myös komposiittituotteita. Näissä levyissä käytetään luonnon omaa kuitumateriaalia, puuta. RASS-levyjä käytetään rakennusten, komentopaikkojen ja telttojen suojaamiseen kranaattitulelta ja sirpaleilta. Levyissä on kerroslevyrakenne. Puuta käytetään suojapaneelien ydinaineena, erottamaan ballistisen suojauksen aikaan saavat levyjen ulko- ja sisäkerrokset. Kuvassa 8 on esitetty MBPS paneelin rakenne, jossa ydinaineena balsapuu ja paneelin ulkokerroksina komposiittimateriaali. (Quigley et al. 2006, s. 2.)



Kuva 8. MBPS-levyn rakenne (Quigley et al. 2006, s. 2).

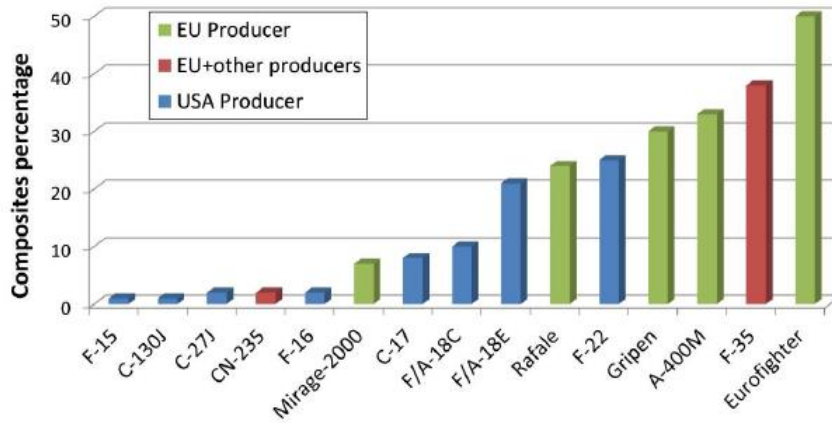
4.3.4 Ilmailu

Kuitulujitettujen polymeerikomposiittien määrä sotilasilmailussa on merkittävä ja osuus kasvaa edelleen. Tärkeimmät komposiittimateriaalit ilmailussa ovat hiili- ja aramidikuiduista valmistetut polymeerikomposiitit. Hiili- ja aramidikuitujen käytöllä saadaan kevennettyä rakenteita verrattuna esimerkiksi alumiinin käyttöön. Hiilikuidun avulla saadaan myös sileämpiä pintarakenteita esimerkiksi lentokoneiden siipiin, kuin alumiinirakenteella, jolloin ilmanvastus pienenee. Hiilikuitukomposiitit kestävät väsymistä alumiinia paremmin, ja niillä on polymeerikomposiittien ominaisuuksien mukaisesti myös parempi korroosionkesto. Matriisimuoveina hiilikudun ja aramidin kanssa käytetään kertamuoveja, erityisesti epokseja. Kuvasta 9 on esitetty komposiittiosien määrä ja niiden sijoittautuminen nykyaikaisessa hävittäjässä. F-35 hävittäjässä komposiittiosien määrä on noin 35 % sen kokonaispainosta. Eurooppalaisessa Eurofighter hävittäjissä komposiittiosien määrä kasvaa jopa tätäkin suuremmaksi. Eurofighter hävittäjässä komposiittiosien osuus kokonaispainosta on jo lähes puolet. Taulukko 2 kuvaa komposiittiosien määrää eri hävittäjissä. Taulukko kuvaa 40-vuoden aikajaksoa, alkaen F-15 hävittäjästä, joka on julkaistu 70-luvulla. (Kari et al. 2008a, s. 313-314, s. 433-435; Pavel & Tzimas 2016, s. 23, s. 63, s. 65.)



Kuva 9. F-35 hävittäjän komposiittiosat (Standard-Examiner).

Taulukko 2. Komposiittiosien prosentuaalinen osuus hävittäjän kokonaispainosta (Pavel et al. 2016, s. 66).



Helikoptereissa komposiittiosia käytetään roottoreissa, voimansiirrossa ja rungon osissa. Sotilashelikoptereiden pansaroinnissa käytetään keraamilevyjä. Kuvassa 10 on esitetty Puolustusvoimienkin käyttämän NH-90 helikopterin komposiittiosat. (Airbus Group Australia Pacific 2015.) Koska keraamit kestävät hyvin korkeita lämpötiloja niitä käytetään sotilasilmailussa myös turbiinien termisissä suoja-pinnoitteissa. Suoja-pinnoitteiden tulee kestää jopa 1650 asteen lämpötilassa. Verrattuna metallisten materiaalien käyttämiseen suoja-pinnoitteissa keraameilla saadaan pienennettyä turbiinien massaa. (The American Ceramic Society 2014.)



Kuva 10. NH-90 helikopterin komposiittiosat (Airbus 2015).

4.3.5 Laivat

Laivoissa polymeerikomposiittimateriaalit ovat olleet käytössä jo kymmenien vuosien ajan. Teräs tulee olemaan kuitenkin hallitseva materiaali vielä pitkään, kuten sotilasajoneuvoissakin. Suurin komposiiteista saatava etu perinteisen laivanrakennusmateriaalin eli teräksen käyttöön on rakenteiden keveys. Laivoissa

komposiittirakenteita käytetään pääasiassa painokriittisissä pienissä aluksissa, joissa rakenteiden keventäminen on tärkeämpää kuin suurissa aluksissa, joissa painotetaan enemmän kestävyysominaisuuksia. Kari et al. (2008a, s. 426) mukaan ”Merenkulkukalustossa polymeerikomposiittisia sandwich-rakenteita käytetään mm. kansirakenteissa ilmatyynyaluksissa, miinanraivaaja-aluksissa ja ohjusveneissä.” Myös itse runko osissa voidaan hyödyntää polymeerikomposiitteja. (Kari et al. 2008a, s. 426, s.358-359.)

Panssarointia vaativissa laivojen osissa käytetään aramidikuiduilla vahvistettuja komposiitteja, keraameja ja metallimatriisikomposiitteja. Suurissa aluksissa panssarointi on yleensä ballistisiin uhkakuviin varautumista, mutta pienissä aluksissa keskitytään yleensä vain sirpalesuojaukseen, koska muuten aluksen massa kasvaisi liian suureksi. Komposiitteja käyttämällä sirpalesuojaus voidaan integroida aluksen pintarakenteisiin. (Kari et al. 2008a, s. 358-359, s.363.) Kuvassa 11 on esimerkki polymeerikomposiittien käytöstä ohjusveneissä. Ohjusveneessä on käytetty hiilikuitumateriaalia kansirakenteissa (Merivoimat).



Kuva 11. Hamina-luokan ohjusvene (Lentoposti 2012).

Komposiittimateriaalit tarjoavat mahdollisuuden yhdistää funktionaalisia ominaisuuksia laivan kansirakenteisiin. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi häiveominaisuudet, lämpö- ja äänieristykset, pintojen jäähditys ja lämmitys, sekä antennien ja tutkien integrointi aluksen kansirakenteisiin. Näitä funktionaalisia ominaisuuksia olisi vaikea saavuttaa

perinteistä laivanrakennusmateriaalia eli terästä käyttämällä. Palontorjuntaan varautuminen on tärkeää laivoja suunnitellessa. Komposiittirakenteisissa laivoissa paljontorjuntaan tulee kiinnittää entistä suurempaa huomiota verrattuna teräsrakenteisiin laivoihin. Komposiittimateriaaleihin on kuitenkin mahdollista integroida palontorjunta-aineita lisäaineeksi. (Kari et al. 2008a, s. 359, s.363, s.427)

4.3.6 Asejärjestelmät

Kari et al. (2008a, s. 416) mukaan alumiinikomposiitteja käytetään ”nuoliammusten saboteissa ja ohjusten rakenteellisissa osissa.” Sabotti tarkoittaa ammuksen kuorta, mutta eroaa kuitenkin käyttötarkoitukseltaan hylsystä. Alumiinikomposiittien käytöllä on mahdollista vähentää ohjuksien rakenteellista massaa jopa 20-35 %. Kun rakenteellista massaa saadaan pienennettyä, on mahdollista kasvattaa ohjuksen hyötykuormaa eli taistelukärkien määrää ja massaa. (Kari et al. 2008a, s. 416.)

Komposiittimateriaaleja hyödynnetään myös taistelijoiden henkilökohtaisessa aseistuksessa. Komposiittimateriaaleista valmistettuja aseiden runkoja ja kiväärien tukkeja on käytössä. Esimerkkinä tästä suomalaisvalmisteinen Sako TRG 22 / 42 tarkkuuskivääri, jossa on alumiinivahvistettu polymeerikomposiitista valmistettu takatukki. Sako TRG kivääreitä on käytössä Puolustusvoimilla. (Sako)

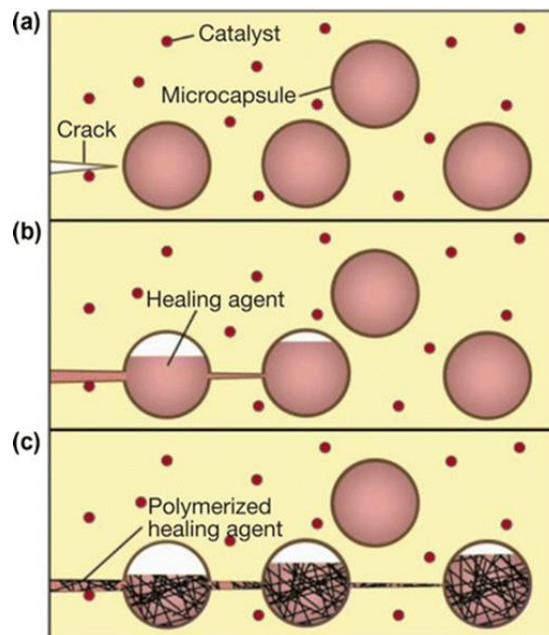
Komposiittimateriaalien käyttöä aseiden piippumateriaalina on myös tutkittu. Aseiden piipuissa potentiaalinen tulevaisuuden materiaali olisi keraami- ja metallimatriisikomposiittien sekoitus eli hybridimateriaali. Piipulta vaaditaan korkeaa lujuutta, koska luodin lähtö aiheuttaa suuren paineen piipun sisällä. Näillä materiaaleilla on saavutettu piipulle vaadittavat lujuusominaisuudet, mutta materiaalien lämmönkeston parantamisessa on vielä haasteita. (Katz et al. 2006.)

4.3.7 Funktionaalisia ja älykkäitä ominaisuuksia vaativat käyttökohteet

Älykäs materiaali tarkoittaa materiaalia, joka pystyy reagoimaan ulkoiseen ärsykkeeseen ja toimimaan ennalta määrättyllä tavalla. Ulkoisia ärsykejä voi olla esimerkiksi olosuhteista johtuva ärsyke tai välillisesti ohjausjärjestelmästä tuleva ärsyke. Älykkäille materiaaleilla sovelluskohteita puolustusväliteollisuudessa voisi löytyä tulevaisuudessa taistelukoneissa ja lennokeissa. Näitä älykkäitä materiaaleja voidaan käyttää muotojen hallintaan muuttamaan

aerodynamiikkaa, juuri sillä hetkellä optimaaliseen suuntaan. Näin saadaan pidennettyä lentoaikaa ja toimintaetäisyyttä. Näille älykkäille materiaaleille voisi löytyä tulevaisuudessa käyttökohteita myös ampumatarvikkeissa, kuten ohjuksissa. (Kari et al. 2008a, s.428, s.434.)

Puolustusvälineteollisuudelle erityisen mielenkiintoinen komposiittien laji ovat itsekorjautuvat komposiitit. Kuvassa 12 itsekorjautuvan komposiitin periaatteellinen toiminta. Näiden itsekorjautuvien komposiittien toiminta perustuu Vuorinen et al. (2016, s. 17) mukaan ”matriisiin lisättyihin onttoihin mikropalloihin tai onttoihin kuituihin.” Kun nämä partikkelit rikkoutuvat ulkoisen kuormituksen tai iskun vaikutuksesta, niistä leviää kertamuovihartsia komposiittimateriaalissa olevien kovetinpartikkeleiden joukkoon ja komposiittirakenne kovettuu ja korjautuu. Näin esimerkiksi osuman saanut ajoneuvo, jossa olisi käytössä itsekorjautuvia komposiittirakenteita, voisi teoriassa olla taistelukykyinen osuman saatuaan. (Vuorinen et al. 2016, s. 17.)



Kuva 12. Itsekorjautuva komposiittimateriaali (White et al. 2001).

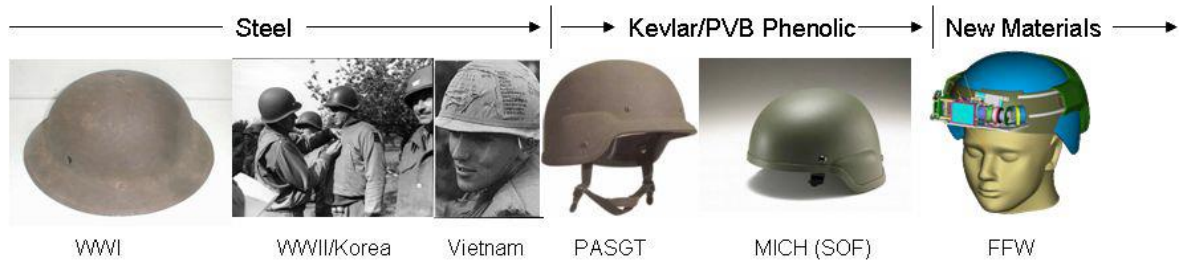
5 POHDINTA

Komposiittimateriaalien käyttökohteita puolustusvälineteollisuudessa löytyi valtavasti. Pääasialliset syyt komposiittimateriaalien käytölle ovat komposiittimateriaalien poikkeukselliset lujuus ja sitkeys ominaisuudet suhteessa niiden massaan. Komposiittimateriaalien kehitys näyttää jatkuvat vauhdilla myös tulevaisuudessa ja uusia käyttökohteita löytyy jatkuvasti. Rajoitteena uusille innovaatioille ja käyttökohteille ovat kuitenkin korkeat tutkimus- ja valmistuskustannukset. Haasteita komposiittien käytölle asettaa myös komposiittituotteiden vaikea korjaaminen. Esimerkiksi hajonneiden hiilikuitu- ja aramidikappaleiden korjaaminen voi olla kertamuovien muovaamattomuuden takia mahdotonta, jolloin ainoa vaihtoehto on rikkinäisten osien korvaaminen uusilla. Tämä koskee erityisesti suuria pintoja ja tarvetta huoltaa ja korjata kalustoa kenttäolosuhteissa. Komposiittien kierrättäminen käytön jälkeen aiheuttaa myös suuria haasteita. (Vuorinen et al. 2016, s. 19)

Komposiittimateriaaleilla on paljon kehityspotentiaalia tulevaisuudessa. Uusia materiaaleja ja materiaaliyhdistelmiä kehitetään jatkuvasti. Erityisesti komposiittimateriaaleihin liitettävät funktionaaliset ominaisuudet, kuten edellisen luvun itsekorjautuvat komposiittimateriaalit ja sähkönjohtavuus ominaisuuksia omaavat materiaalit ovat tulevaisuuden materiaaleja. (Kari et al. 2008a, s. 434.)

On selvää, että puolustusvälineteollisuus tulee kulkemaan materiaalitekniikan kärjessä tulevaisuudessakin ja puolustusvälineteollisuuden uusia innovaatioita saadaan tulevaisuudessakin siviilikäyttöön. Esimerkki puolustusvälineteollisuuden kehittämästä komposiittituotteesta on työssä käsitelty Kevlar, jota hyödynnetään nykyään myös siviilikäytössä olevissa tuotteissa. Kuvassa 13 on esitetty sotilaskäytössä olevan kypärän kehityskulkua. Tämä kuva kuvastaa hyvin puolustusvälineteollisuuden välineiden kehitystä, vaikka välineiden pääasiallinen toimintaperiaate pysyisikin samana. Tällä hetkellä kypärän kehitys on keskimmaisessä vaiheessa, jossa pääasiallinen materiaali on Kevlar. Kehitys ei kuitenkaan lopu tähän, vaan pian ollaan kuvan mukaisessa kolmannessa vaiheessa. Tässä vaiheessa Kevlarin kanssa tai Kevlarin tilalla toimii jokin muu materiaali tai

materiaaliyhdistelmä. Esimerkiksi jokin luonnonkuituihin pohjautuva hybridimateriaali. (Walsh, Scott & Spangnuolo 2005, s. 13.)



Kuva 13. Kypärän kehityskulttu (Walsh et al. 2005, s. 10).

Samankaltaisia tutkimuksia kandidaatintyönä on tehty muun muassa komposiittimateriaalien hyödyntämisestä autoteollisuudessa ja lentokoneiteollisuudessa. Tämä tutkimus olisi toistettavissa tutkimalla komposiittien käyttökohteita ja mahdollisuuksia muilla aloilla, esimerkiksi lääke- tai elektroniikkateollisuudessa.

Jokaisen komposiittimateriaalityypin kohdalla oli tärkeää tarkastella sen edullisia ominaisuuksia verrattuna perinteisimpiin materiaaleihin ja syitä juuri näiden komposiittien hyödyntämiselle. Tämän kandidaatintyön voidaan katsoa olevan luotettava, koska pääasiallisena lähteenä käytettiin luotettavaa kirjallisuutta. Kirjallisuuslähteet eivät olleet aivan tuoreita, mutta kirjallisuuslähteet antoivat silti luotettavan kokonaiskuvan komposiittimateriaalien tilanteesta. Uutta tietoa etsittiin internet-lähteitä. Lähteissä käytettiin myös muutamia tuotekatalogeja, joista pääasiassa poimittiin kuvia. Tärkeää tuotekatalogeissa on erottaa mainosmateriaali ja faktat. Paremmiin lähdemateriaaleihin tutkimukseen olisi löytynyt hyödyntämällä enemmän englanninkielistä kirjallisuutta ja englanninkielisiä julkaisuja. Tiedonhaku vaikeutti se, että esimerkiksi puolustusvälineiteollisuuden valmistamista ajoneuvoista on melko vähän julkista tietoa saatavilla. Esimerkiksi Patrian valmistamasta AMV panssariajoneuvon panssaroinnista ei löytynyt tarkkaa julkista tietoa.

Vaikka tutkimuksessa ei varsinaista uutta tietoa luotukaan, saatiin komposiittimateriaalien käyttökohteita puolustusvälineiteollisuudessa koottua yhteen selkeäksi kokonaisuudeksi. Tässä tutkimuksessa komposiittimateriaalien valtava määrä ja niiden monet käyttökohteet aiheuttivat haasteita. Komposiittimateriaalit edustavat pientä osaa koko puolustusväline-

teollisuuden käyttämästä materiaalikirjosta, joten tutkimusaihe täytyi pitää kapeana ja keskittyä vain komposiittimateriaaleihin. Tutkimus oli kandidaatintyön laajuuteen jopa liian laaja, eikä materiaalien ominaisuuksia päässyt esittelemään tarkasti. Jotta tutkimuksessa olisi päästy haluttuun käsittelytarkkuuteen tutkimus olisi voitu rajata käsittelemään vain yhtä käyttökohteisiin jaotelluista alaluvuista tarkemmin.

Tämä tutkimus saavutti tavoitteensa ja pysyi viitekehyksessä. Tutkimus onnistui vastaamaan tutkimuskysymyksiin. Tutkimuksessa saatiin koottua yhteen uutuusarvoltaan tärkeimpiä materiaaleja. Kvalitatiivista virhetarkastelua on vaikea tehdä tämän tutkimuksen tulosten perusteella. Kirjallisuustutkimuksen perusteella tärkeitä tätä tutkimusaihetta koskevia lisätutkimusaiheita ovat uutuusarvoltaan tärkeimmät materiaalit eli älykkäät ja funktionaaliset komposiittimateriaalit. Näiden materiaalien hyödyntämisestä, niin puolustusvälineteollisuudessa kuin muunkin teollisuuden käyttökohteissa, saisi paljon jatkotutkimusaiheita. Myös yksittäisten komposiittimateriaalien käyttökohteista puolustusvälineteollisuuden sovelluksissa saisi useita lisätutkimuksia.

6 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia komposiittimateriaalien käyttökohteita ja hyödyntämistä puolustusvälineiteollisuuden sovelluksissa. Tämä tutkimus luettelee näitä käyttökohteita, joita on muun muassa puolustusvälineiteollisuuden tuottamissa ajoneuvoissa, lentokoneissa, laivoissa, suojaimissa ja aseissa. Tutkimus on jaoteltu lukuihin käyttökohteiden perusteella. Tutkimus kertoo näissä sovelluskohteissa käytettävistä komposiittimateriaaleista ja niiden ominaisuuksista. Nämä ominaisuudet ovat aina riippuvaisia käyttökohteesta. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että puolustusvälineiteollisuuteen soveltuvat materiaalit ovat kevyitä, kestäviä ja lujia. Tärkeitä puolustusvälineiteollisuuden komposiittimateriaaleja ovat muun muassa aramidikuiduista valmistettava Kevlar, erilaiset metallimatriisikomposiitit, sekä keraamit. Tutkimus myös vertailee komposiittimateriaaleja puolustusvälineiteollisuuden perinteisesti käyttämiin konstruktiomateriaaleihin esimerkiksi teräksiin. (Saarela et al. 2003, s. 442.)

Tutkimus toteutettiin induktiivisena lähdekirjallisuuteen perustuvana, pääasiassa kvalitatiivisena tutkimuksena. Lähteinä tutkimuksessa oli pääasiassa painettua kirjallisuutta, mutta myös julkisia internetistä löytyviä tutkimusraportteja, artikkeleita ja tuotekatalogeja käytettiin. Lähteiksi pyrittiin etsimään mahdollisimman luotettavia teoksia ja julkaisuja.

Komposiittimateriaalit edustavat pientä osaa koko puolustusvälineiteollisuuden käyttämästä materiaalikirjosta. Materiaalikirjo puolustusvälineissä on laaja. Tutkimusaihe tarjoaisi paljon jatkotutkimusaiheita. Paljon jatkotutkimusaiheita tarjoaisivat uutuusarvoltaan tärkeimmät komposiittimateriaalit eli esimerkiksi funktionaaliset ja älykkäät komposiitit.

LÄHTEET

Airbus Group Australia Pacific. 2015. Airbus composites. [Airbus Australian www-sivuilla]. [viitattu 23.9.2017]. Saatavissa: http://www.airbusgroupap.com.au/website/en/ref/Composites_107.html

Cheeseman, B. A & Bogetti, T. A. 2003. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. Teoksessa: Composite Structures. Volume 61. S. 161-173.

DuPont. 2014. DuPont™ Kevlar® XP™ Vest. [DuPont:in www-sivuilla]. Päivitetty: 18.6.2014. [viitattu 13.4.2017]. Saatavissa: <http://www.dupont.com/corporate-functions/media-center/press-releases/dupont-announces-millionth-vest-made-with-dupont-kevlar--xp.html>

Exote. 2017. Material. [Exoten www-sivuilla]. Saatavissa: <http://www.exote-armour.com/en/Exote-Armour/Material/>

Farhat research group. Lightweight Ballistic Fabric Shielding. [Stanfordin www-sivuilla]. [viitattu 14.9.2017]. Saatavissa: https://web.stanford.edu/group/frg/active_research_themes/fabric.html

FY-Composites. a. Monisuojajärjestelmä, ”RASS”. [FY-Compositesin www-sivuilla]. [Viitattu 5.4.2017]. Saatavissa: <http://www.fy-composites.com/fi/products05.html>

FY-Composites. b. RASS käytössä. [FY-Compositesin www-sivuilla]. [Viitattu 5.4.2017]. Saatavissa: <http://www.fy-composites.com/fi/products051.html>

Kari, M., Hakala, A., Pääkkönen, E. & Pitkänen, M. V. 2008a. Sotatekninen arvio ja ennuste 2025 STAE 2025, osa 1 Teknologian kehitys. Ylöjärvi: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos. 564 s.

Kari, M., Hakala, A., Pääkkönen, E. & Pitkänen, M. V. 2008b. Sotatekninen arvio ja ennuste 2025 STAE 2025, osa 2 Puolustusjärjestelmien kehitys. Ylöjärvi: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos. 279 s.

Katz, R. N., Bracamonte, L. A., Withers, J. C. & Chaudhury, S. 2006. Hybrid Ceramic Matrix/Metal Matrix Composite Gun Barrels. Teoksessa: Sudarshan, T. S. & Srivatsan, T. S. Materials and Manufacturing Processes. 21 painos. USA: Taylor & Francis Group. 2006. S. 579-583.

Kombink, K., Pieprzyca, T., Sens, J. & Wold, R. 1998. Chemistry and material science Composites [verkkodokumentti]. [viitattu 11.3.2017]. Opetusmateriaali. Saatavissa: <http://www.ciar.org/~ttk/mbt/armor.composites.2.html>

Lentoposti. 2012. Rajavartiolaitokselle uusi tutkajärjestelmä merellä tapahtuvan helikopteritoiminnan johtamiseen. [Lentopostin www-sivuilla]. Päivitetty: 16.8.2012. [viitattu 29.3.2017]. Saatavissa: http://www.lentoposti.fi/uutiset/rajavartiolaitokselle_uusi_tutkajarjestelma_merella_tapahtuvan_helikopteritoiminnan_johtamis

Merivoimat. Hamina-luokka. [Merivoimien www-sivuilla]. (Julkaisupaikka tuntematon): Merivoimat. [viitattu 4.4.2017]. Saatavissa: <http://merivoimat.fi/documents/1951215/2015876/Hamina-luokka/382e53b8-0ac0-4bfd-8031-f9cf4c65a620>

Morgan Advanced Materials. 2015. Camac platform armour. [verkkodokumentti]. Päivitetty: 9.2015. [viitattu 28.9.2017]. 8 s. Saatavissa: http://www.morgandefencesystems.com/sites/default/files/camac_brochure.pdf

Pavel, P. P. & Tzimas, E. 2016. Raw materials in the European defense industry. Luxemburg: Join Research Centre. 126 s.

Plasan. 2017. Sandcat. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.9.2017]. Saatavissa: <http://www.plasan.com/sandcat/>

Protolab. Ballistic Protection. [Protolabin www-sivuilla]. [viitattu 19.10.2017]. Saatavissa: http://www.protolab.fi/index_tiedostot/Prod_Ballistic.htm

Quigley, C., Horak, K., Devine, R., Dagher, H., Parent, L., Landis, E., Goslin, K. & Cassidy, E. 2006. The development and evaluation of modular ballistic panels for fibric shelters. Massachusetts: U.S. Army Natick Soldier Center Natick. 46 s.

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. 2003. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys ry. 494 s.

Sako. Technical specification Sako TRG 22 / 42. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.9.2017]. Saatavissa: http://cdn1.sako.fi/sites/default/files/TRG-42_Tech_specs.pdf

Saraswat, V. Advanced Composite Materials & Technologies for Defence. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.4.2017]. Opetusmateriaali. Department of Defence Research and Development. 31s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://civil.iisc.ernet.in/nsglec2013.pdf>

Standard-Examiner. F-35 JSF composite parts. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.3.2017]. Saatavissa: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/564x/19/2c/70/192c703dba2ab4ba61aa63afed6edf0d.jpg>

The American Ceramic Society. 2014. Ceramics & the Military. [The American Ceramic Society:n www-sivuilla]. [Viitattu 29.9.2017]. Saatavissa: <http://ceramics.org/learn-about-ceramics/ceramics-the-military>

Vuorinen, J., Mustakangas, M. & Annala, M. 2016. Komposiitit loputtomasti mahdollisuuksia. [verkkodokumentti]. [viitattu 4.2.2017] Tampereen teknillinen yliopisto, Patria, Muoviteollisuus Ry. 20 s. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.muoviteollisuus.fi/document.php/1/252/komposiitit_-_loputtomasti_mahdollisuuksi/9e832437f8e4e6f3e76e45b5d93d6bf1

Vuoristo, T. & Nykänen, J. 2005. Keraamit. [verkkodokumentti]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto Materiaaliopin laitos. [viitattu 1.3.2017]. Saatavissa: http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_3.php

Walsh, S., Scott, B. & Spangnuolo, D. 2005. The development of a Hybrid Thermoplastic ballistic materials with application to helmets. Aberdeen: Army research laboratory. 39 s.

White, S., Sottos, N., Geubelle, P., Moore, J., Kessler, M., Sriram, S. & Viswanathan, S. 2001. Autonomic healing of polymer composites. Teoksessa: Nature. 409. S. 794–797.