



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

KONETEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

HIILIKUITUKOMPOSIITIT ILMAILUTEKNIIKASSA

Jyri Johannes Törn

KANDIDAATINTYÖ

2017

Ohjaaja: Hannu Lahtinen

TIIVISTELMÄ

Hiilikuitukomposiitit ilmailutekniikassa

Jyri Johannes Törn

Oulun yliopisto, Konetekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2017, 20 s.

Työn ohjaaja(t): Hannu Lahtinen

Työn aiheena ovat hiilikuitukomposiitit ja niiden sovellukset ilmailutekniikassa. Työ tutkii perinpohjaisesti hiilikuitukomposiitteja, niiden valmistusta ja ominaisuuksia. Työ perehtyy lopuksi ilmailun haasteisiin niin teknisestä kuin kaupallisesta näkökulmasta ja tämän pohjalta hiilikuitukomposiittien sovelluskohteisiin ilmailutekniikassa.

Tämän työn pohjalta lukija saa käsityksen hiilikuitukomposiiteista kokonaisuutena ja ymmärtää ilmailutekniikan käyttökohteiden pohjalta niiden vahvuuksista ja heikkouksista.

Asiasanat: hiilikuitu, komposiitti, ilmailu

ABSTRACT

Carbon fiber composites in aeronautics

Jyri Johannes Törn

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2017, 29 p.

Supervisor(s): Hannu Lahtinen

This thesis goes through carbon fiber composites and their applications in aeronautics. Firstly, this thesis covers carbon fiber composites through their production and properties. Secondly the thesis familiarizes oneself with challenges faced in aeronautics from a commercial and a technical perspective and goes on to demonstrate their applications in it.

From this thesis the reader will get a perception of carbon fiber composites as a whole and understands their strengths and weaknesses through examples of applications in aeronautics.

Keywords: carbon fiber, composite, aeronautics

ALKUSANAT

Tämä kandidaatin työ on tehty Oulun yliopiston konetekniikan koulutusohjelmalle. Työn taustalla toimii kipinäni isäni pitkä ura lentomekaanikkona Finnairilla ja aiheesta onkin keskusteltu vuosien varrella melkein joka viikko. Työn ohjasi Oulun yliopiston yliopisto-opettaja Hannu Lahtinen. Suuri kiitos hänelle ohjeistaan ja työn tarkastamisesta.

Oulu, 30.03.2017

A handwritten signature in black ink, consisting of several stylized, overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Työn tekijä

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
SISÄLLYSLUETTELO.....	5
1 JOHDANTO	6
2 Hiilikuidut	7
2.1 Hiilikuitujen valmistus	8
2.1.1 Piki-pohjaisten hiilikuitujen valmistus	8
2.1.2 Polymeeri-pohjaisten hiilikuitujen valmistus	9
2.1.3 Hiilipitoisiin kaasuihin pohjautuvien hiilikuitujen valmistus.....	10
2.2 Hiilikuitujen ominaisuudet	11
3 Komposiitit.....	14
3.1 Polymeeripohjaiset hiilikuitukomposiitit	14
3.2 Hiilipohjaiset hiilikuitukomposiitit	19
4 Ilmailualan tämän hetkiset haasteet	22
4.1 Hiilikuitukomposiittien käyttökohteet ilmailutekniikassa	22
5 YHTEENVETO	26
6 LÄHDELUETTELO.....	27

1 JOHDANTO

Tämän työn aiheena on hiilikuitukomposiitit ilmailutekniikassa. Ilmailu, niin kaupallisessa kuin muussakin mielessä, on ottanut huomattavia harppauksia eteenpäin viimeisen kahden vuosikymmenen aikana. Lentäminen on muuttunut miltei kaikille mahdolliseksi tavaksi matkustaa nopeasti pitkiä matkoja. Samaan aikaan kaupallisen ilmailun haasteeksi ovat nousseet kustannukset ja alan matalan katteen haasteet. Kaupallisen ilmailun ulkopuolella, esimerkiksi asevoimissa, ovat ongelmaksi nousseet tekniset rajoitteet samaan aikaan, kun rasitukset suunnitelluissa koneissa ovat kasvaneet uudelle tasolle.

Näihin ongelmiin on haettu ratkaisua monelta suunnalta ja yksi näistä mahdollisista ratkaisuista on ollut materiaalivalinta. Kun hiilikuitujen saatavuus ja kustannukset ovat laskeneet, on niiden käyttö mahdollistunut uudella tavalla.

Työ käsittelee aluksi hiilikuituja, hiilikuitujen ominaisuuksia ja valmistusta. Tämän jälkeen tutkitaan komposiittien rakennetta, ominaisuuksia, materiaaleja sekä valmistusta. Lopuksi perehdytään vielä hiilikuitukomposiittien sovelluksiin ilmailutekniikassa nyt.

2 HIILIKUIDUT

Chung (1994:3) ilmaisee kirjassaan hiilikuitujen viittaavan kuituihin, jotka ovat painoprosenttiltaan vähintään 92 prosenttisesti hiiltä. Hiilikuidut voivat olla lyhyitä tai jatkuvia ja niiden rakenne voi olla kiteinen, amorfinen tai osittain kiteinen. Hiilikuitujen halkaisija vaihtelee viidestä neljääntoista ja puoleen mikrometriin (Chung 1994:8). Amorfinen tarkoittaa epäkideistä kiinteän aineen olomuotoa. Kiteinen muoto viittaa grafiittiin, joka johtaa sähköä erinomaisesti ja on erittäin hyvä lämmönjohdin kuidun suunnassa. Grafiitti on muodoltaan tasomainen ja tasoja sitoo toisiinsa niin sanottu van der Waals-side, joten hiilitasot voivat helposti liukua toisiinsa nähden.

Hiilikuidussa voi olla Chungin (1994:4) mukaan grafiittia nolhasta prosentista aina sataan prosenttiin. Kun grafiitin osuus hiilikuidussa on korkea, kutsutaan sitä grafiittiseksi ja grafiittikuiduksi. Grafiittikuitu on useakiteinen, kun taas grafiittiviiksi koostuu yhdestä kiteestä, jossa hiilikerros on kiertynyt rullalle. Koska grafiittikuitu koostuu vain yhdestä kiteestä, on se periaatteessa virheetön ja omaa poikkeuksellisen korkeat lujuusominaisuudet.

Chungin (1994:6) mukaan hiilikuidut voidaan luokitella kolmeen eri kategoriaan niiden käyttökohteiden mukaan. Nämä kategoriat ovat General Purpose (GP), High-Performance (HP) ja activated carbon fibers (ACF). GP-kategorian hiilikuitujen karakteristisia ominaisuuksia ovat amorfinen ja isotrooppinen luonne, matala vetolujuus, matala kimmomoduli ja matala hinta. HP-kategorian hiilikuidut taas omaavat korkean vetolujuuden sekä kimmomodulin. Näissä hiilikuiduissa on myös usein korkeampi määrä grafiittia, joten niiden anisotroopiset materiaaliominaisuudet korostuvat enemmän. ACF-kategorian hiilikuidut ovat huokoisempia, joten niiden muihin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa huomattavasti enemmän valmistuksen jälkeen erilaisten lisäaineiden avulla.

2.1 Hiilikuitujen valmistus

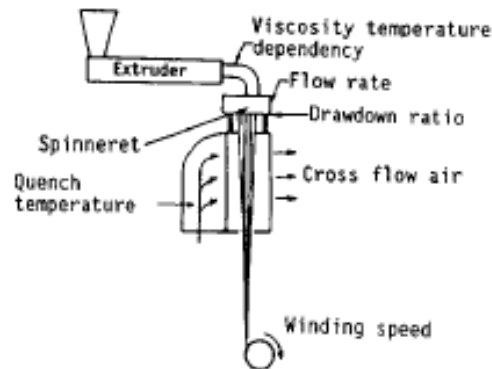
Hiilikuitujen valmistamiseen käytetään Chungin (1994:13) mukaan pääasiassa kolmea eri tekniikkaa. Nämä valmistustekniikat erotetaan toisistaan valmistusmateriaalin ja valmistustavan perusteella. Kyseiset valmistusmateriaalit ovat polymeeri, piki ja hiilipitoiset kaasut. Valmistusmateriaaleista piki ja polymeerit ovat kaupallisessa käytössä, kun taas hiilipitoisiin kaasuihin perustuva valmistusmenetelmä ei ole. Etuna kaasuihin ja pikeen liittyvissä menetelmissä on, että niitä käytettäessä on mahdollista saavuttaa korkeampi osuus grafiittia hiilikuituihin. On myös hyvä ottaa huomioon, että korkean grafiittipitoisuuden omaavat piki-pohjaiset hiilikuidut ovat hyvin kalliita.

Polymeeri- ja piki-pohjainen valmistus perustuu materiaalin kuumentamiseen, jota kutsututaan pyrolyysiksi. Pyrolyysi on kemiallinen reaktio, jonka aikana orgaanisia kiinteitä aineita puretaan kuumentamalla ilman, että happi pääsee vaikuttamaan prosessiin. Chung (1994:13) toteaa, että pyrolyysia voi verrata puun hiilletämiseen, koska kummassakin materiaali muodostaa hiiltä. Hiilipitoisten kaasujen kohdalla taas valmistuksessa syntyy hiilikuitua hiilen katalyyttisen kasvun pohjalta. Seuraavissa kappaleissa käsitellään hiilikuitujen valmistusta kolmesta eri materiaalista.

2.1.1 Piki-pohjaisten hiilikuitujen valmistus

Piki-pohjaisessa hiilikuidun valmistuksessa voidaan käyttää hiilikuidun siemenenä seuraavia piki-tyyppejä: raakaöljyn tislauksen sivuaineena syntyvää pikeä, hiili-terva-pikeä tai muita pikityyppejä. Chung (1994:14) toteaa, että raakaöljy-pohjainen piki on suositumpaa kuin esimerkiksi hiili-terva-piki, koska muissa pikityypeissä on enemmän kiinteää hiiliainesta. Tämä kiinteä hiiliaines muodostaa enemmän koksia hiilikuitua muodostettaessa, joka johtaa siihen, että kuiduilla on taipumusta katkeilla. (Chung 1994:14)

Chungin (1994) mukaan hiilikuidun muodostaminen perustuu siihen, että piki on termoplastinen materiaali eli se pehmenee kuumennettaessa. Tämä pehmenyt piki ajetaan puristimen läpi, jäädytetään suuttimessa ja ajetaan rullalle. Kuva 1 esittää tätä piki-pohjaisen hiilikuidun valmistusperiaatetta. Kuvassa nähdään puristin (extruder), suutin sekä rulla, johon hiilikuitu kerätään.



Kuva 1 Laitteisto piki-pohjaisen hiilikuidun valmistukseen (Chung 1994:16)

2.1.2 Polymeeri-pohjaisten hiilikuitujen valmistus

Chung (2006:23) toteaa, että yleisin tapa valmistaa hiilikuituja on polymeeri-pohjainen siemen, joka on tekstiiliä ja joka eivät sula pyrolyysin aikana, mutta synnyttävät pyrolyysin aikana hiiltä. Tällaisia polymeerejä ovat esimerkiksi viskoosi, PVDC eli polyvinyliini kloriitti, PVA ja yleisimpänä PAN. PAN, PVA sekä PVDC ovat muoveja, jotka eivät sula vaan hiljalleen hajoavat kuumennettaessa. PAN on yleisin siemenmateriaali, koska se tuottaa hiilikuituprosessissa kaksi kertaa enemmän hiiltä kuin esimerkiksi viskoosi ja näin johtaa korkeampaan grafiittimäärään hiilikuidussa (Chung 1994:24).

Chung (1994:24) käyttää polymeeri-pohjaisten hiilikuitujen valmistusprosessin esimerkkinä PAN-pohjaisen hiilikuidun valmistusprosessia. Ensimmäinen vaihe on muovin polymerisaatio liuottimen avulla. Polymerisaatiossa voidaan käyttää liuottimena esimerkiksi dimetyyliformadidia, joka purkaa kuitujen väliset sidokset. Chung (1994:25) esittää itse polymeeri-pohjaisen hiilikuidun valmistamiseen viisi erilaista tekniikkaa:

1. Sulakehruu, jossa sula polymeeri puristetaan ekstruuderin läpi ja kehrätään

2. Sula-avustettu kehruu, jossa sula homogeeninen polymeeri-liuote-seos puristetaan läpi ekstruuderista
3. Kuivakehruu, jossa polymeeri-liuote-seos puristetaan ekstruuderin läpi tilaan, jossa kuuma kaasuhaihduttaa liuotteen
4. Märkäkehruu, jossa polymeeri seos puristetaan ekstruuderin läpi orgaanisesta liuottimesta hyydytysnesteeseen, jossa polymeeri saostuu ja vedetään ulos kuituna
5. Kuiva-suihku märkäkehruu, jossa polymeeri seos puristetaan ekstruuderin läpi ilmarakoon, jonka jälkeen se kuljetetaan hyydytysnestekylpyyn ja vedetään ulos kuituna

Eri menetelmillä saadaan erilaisia kuitulaatuja ja pystytään käsittelemään erilaisia määriä kuituja kerralla. Esimerkiksi märkäkehruun avulla voidaan käsitellä yli 50 000 kuitua kerralla, mutta sama ei ole mahdollista muilla menetelmillä (Chung 1994:27).

2.1.3 Hiilipitoisiin kaasuihin pohjautuvien hiilikuitujen valmistus

Hiilikuituja voidaan valmistaa myös käyttämällä hiilipitoista kaasua. Chung esittää toimintaperiaatteen seuraavasti: Hiilisäikeet, jotka ovat eri asia kuin hiilikuidut, kasvavat katalyyttisesti, kun hiilipitoinen kaasuhaihduttaa kaasua pienen metallikappaleen kanssa kohonneessa lämpötilassa. Metallikappale toimii tässä menetelmässä katalyyttinä, jonka koko määrittää siitä kasvavan hiilisäikeen halkaisijan. Tästä syntyy niin kutsuttu vapor grown carbon fiber eli VGCF. Katalyyttinä käytetään usein rautaa, mutta myös nikkeliä, kuparia ja palladiumia käytetään. Hiilipitoisena kaasuna voidaan käyttää esimerkiksi eteenä, asetyleeniä tai metaania. Hiilipitoisen kaasun sekaan sekoitetaan usein myös hiilidioksidia hiilikuitu-saannin parantamiseksi (Chung 1994:40-42).

2.2 Hiilikuitujen ominaisuudet

Hiilikuitu on mielenkiintoinen materiaali sen erityisten ominaisuuksien vuoksi, niin lujuutensa kuin muidenkin ominaisuuksien puolesta. Ensinnäkin on hyvä huomioida, että hiilikuitu on anisotrooppinen materiaali, jonka ominaisuudet muuttuvat tarkastelusuunnan mukaan. Hiilikuidut ovat esimerkiksi erittäin hyvin sähköä ja lämpöä johtavia rakenteensa hiilitasojen suunnassa, mutta kohtisuoraan näitä tasoja vastaan se on yhtä erinomainen lämmön- ja sähköneriste (Chung 1994:3). Tämä sama anisotrooppisuus pätee myös hiilikuitujen lujuusominaisuuksiin ja tätä anisotrooppisuuden vaikutusta tarkastellaankin myöhemmin tarkemmin. Morgan (2005:801) esittää hyödyllisen taulukon, jossa on erilaisten kuitujen ominaisuuksia. Näitä ominaisuuksia on esitetty alla Taulukko 1.

Taulukko 1 Erilaisten hiilikuitujen materiaaliominaisuuksia Morgania mukailten (Morgan 2005:801)

Materiaali	Valmistaja	Tyyppi	Lujuus (GPa)	Kimmoduli (GPa)	Tiheys (g/cm ³)
Hiilikuitu	Toray	T300 (SM)	3,53	230	1,76
	Toray	T1000 (HT)	7,06	294	1,82
	Hercules	IM8 (IM)	5,45	303	1,8
	Hercules	UHM (HM)	3,45	441	1,87
	Amoco	P75 (UHM)	2,1	517	2
	Mitsubishi	K137 (UHM)	2,65	637	2,12
Boronkuitu	Avco	Tungsten	3,52	400	2,57
Aramidikuitu	Dupont	KEVLAR 29	3,62	58	1,44
	Akzo nobel	TWARON 80	2,8	80	1,44
	DuPont	KEVLAR 49	0,276	120	1,45
	DuPont	KEVLAR HM	2,4	160	1,47
Keraaminen kuitu					
Piikarbidi	Nippon Carbon	Nical;on	2,7	193	2,55
Alumina	ICI	SAFFIMAX SD	2	300	3,3
Lasikuitu					
E-lasi	Vetrotex	E Glass	3,4	73	2,6
R-lasi	Owens	R Glass	4,4	86	2,55
S-lasi	Owens	S 2	4,5	86	2,49
Metallikuitu					
Alumiini		7075-T6	0,5	71	2
Titaani		6AL-4V	1,15	110	4,46
Teräs		Korkea lujuus	0,8	207	7,86

Kuten kuvasta huomataan, on hiilikuiduilla mielenkiintoisia ominaisuuksia. Ensinnäkin ennätysellisen korkeat lujuusominaisuudet suhteutettuna tiheyteen ja näin massaan. Taulukossa on myös huomattavissa miten lujuusominaisuudet vaihtelevat eri kuitumateriaalien välillä. Hiilikuidut omaavat hyvin korkeat kimmokertoimet eli ne vastustavat muodonmuutosta erittäin hyvin. Hiilikuitujen ominaisuudet samassa ominaisuuskategoriassa myös vaihtelevat hyvin paljon valmistajien välillä. Chung (1994:65) listaa seuraavia vahvuuksia ja heikkouksia hiilikuiduille:

- Vahvuudet
 - Matala tiheys
 - Erinomaiset lujuusominaisuudet
 - Matala lämpölaajenemiskerroin
 - Ei kärsi virumisesta
 - Erinomainen lämmönjohtavuus
 - Bioyhteensopivuus
- Heikkoudet
 - Anisotropia
 - Matala murtumisvenymä
 - Matalat lujuusominaisuudet puristuksessa verrattuna vetoon
 - Alttiita hapettumiselle

Hiilikuidut voidaan luokitella Kopeliovichin (2012) mukaan seuraavien kategorioiden mukaisesti niiden lujuusominaisuuksien perusteella.

- UHM (Ultra High Modulus): Hiilikuidut, joiden kimmomoduli on yli 450GPa
- HM (High Modulus): Hiilikuidut, joiden kimmomoduli on välillä 350-450 GPa

- IM (Intermediate Modulus): Hiilikuidut, joiden kimmomoduli on välillä 200-350 GPa
- HT (High Tensile, Low Modulus): Hiilikuidut, joiden vetolujuus on yli 3GPa ja kimmomoduli alle 100 GPa
- SHT (Super High Tensile): Vetolujuus yli 4.5 GPa

3 KOMPOSIITIT

Komposiitit koostuvat kahdesta tai useammasta faasista eli olomuodosta. Keinonen (2010) määrittelee nämä faasit seuraavasti: ensinnäkin yksi faasi on jatkuva, joka ympäröi toisistaan erillään olevia faaseja. Tätä faasia kutsutaan matriisiksi tai sidosaineeksi, joka sitoo muut faasit yhteen. Seuraavia faaseja kutsutaan disperseiksi faaseiksi, niitä voi olla yksi tai useampi. Nämä faasit tuovat komposiitille lisäominaisuuksia. On otettava huomioon, että näihin lisäominaisuuksiin vaikuttaa dispersin faasin konsentraatio, koko, muoto, jakauma ja suuntautuminen. Komposiiteilla on esimerkiksi hyvin usein anisotrooppiset materiaaliominaisuudet dispersin suuntautumisen ja jakauman vuoksi. Keinonen (2010) toteaa komposiitin faaseille seuraavat tehtävät puhuttaessa kuituvahvisteisesta matriisista: matriisin tehtävä on siirtää rasitukset dispersiin sekä vastustaa niin lämpö- kuin kemiallista rasitusta. Dispersin tehtävät taas on parantaa materiaaliominaisuuksia, kuten jäykkyyttä ja lujuutta sekä korottaa iskunkestävyyttä. Keinonen (2010) luokittelee komposiitit seuraaviin luokkiin: kuitu-, hiukkanen-, laminaari-, hiutale- sekä täytetyt komposiitit. Toinen luokittelualue on dispersin tyyppi, jossa yleisimpiä luokitteluja ovat metalli-, keraami- ja polymeerikomposiitti. Hyvä esimerkki keraami-keraamikomposiittimateriaalista on betoni, jossa sementti on keraaminen sidosaine eli matriisi ja kiviaines keraaminen dispersi, joka tuo sille kohonneet lujuusominaisuudet. Tässä työssä pääroolissa olevat hiilikuitukomposiitit taas koostuvat dispersistä, joka on hiilikuitu ja sidosaineesta, joka voi olla polymeeri, metalli tai hiili (Keinonen 2010).

3.1 Polymeeripohjaiset hiilikuitukomposiitit

Polymeeripohjaisten hiilikuitukomposiittien valmistukseen käytettävät sidosaineet voidaan jakaa kahteen luokkaan, jotka ovat kertamuovit ja kestopuovat. Kertamuovit ovat alkumuodossaan nestemäistä hartsia, joka kovetetaan asteittain joko lämmön ja kemikaalin tai vain toisen kemikaalin avulla, jota kutsutaan kovettimeksi. Kertamuovia ei voi enää kovettumisensa jälkeen muovata ja esimerkiksi tarpeeksi kuumennettaessa se hajoaa. Hiilikuitukomposiiteissa käytetään kertamuovi-sidosaineena muun muassa epoksia ja fenolimuvia. Ylivoimaisesti käytetyin kertamuovi hiilikuitukomposiitti-

ratkaisuissa on epoksi. Epoksilla on erinomainen yhdistelmä mekaanisia ominaisuuksia, hapettumisen vastustuskykyä, se tarttuu hyvin kuituihin sekä on suhteellisen halpaa (Chung 1994:85).

Epoksi on hauras materiaali, joten se on herkkä iskujen aiheuttamille vaurioille. Epoksin ominaisuuksia voidaan kuitenkin muokata lisäämällä siihen esimerkiksi kumia parantamaan sen säröytymisominaisuuksia. Sitä voidaan myös muokata kovemaksi tai joustavammaksi lisäämällä siihen muita polymeeripohjaisia lisäaineita (Morgan 2005:531).

Kestomuovit pehmenevät kuumennettaessa, joten niitä voidaan muokata vaivattomasti. Erilaiset muodot valmistetaan kuumentamalla kestomuovi, sitten muovaamalla se haluttuun muotoon ja tämän jälkeen jäähdyttämällä. Kestomuovi on amorfinen materiaali, joten sillä ei ole spesifiä sulamispistettä vaan se pehmenee asteittain lämpötilan kohotessa. Hiilikuitukomposiittien sidosaineena käytettäviä kestomuveja ovat esimerkiksi polyimidi (PI), polyeetterisulfoni (PES) ja polyeetterieetteriketoni (PEEK). Kestomuovien erityisiä ominaisuuksia on niiden muovattavuus sekä käsittelyn helppous verrattuna kertamuveihin. Muovattavuus ilmenee parhaiten siten, että kestomuovien yhteydessä voidaan käyttää ruiskuvalu-tekniikkaa komposiittien valmistukseen. On myös hyvä ottaa huomioon, että kestomuvia käsitellään 300-400 °C ja kertamuvia 200 °C lämpötilassa (Chung 1994:85).

Chung (1994:95) esittää seuraavat huomiot kestomuovi-sidosaineiden eduksi verrattuna kertamuovi-pohjaisiin sidosaineisiin:

- Alhaisemmat valmistuskustannukset, jotka johtuvat muunmuassa kovetusprosessin puuttumisesta, loputtomasta materiaalien säilytysajasta, mahdollisuus kierrätykseen, kuumamuovauksen sekä kestomuovikappaleiden toisiinsa liittämisen mahdollisuus.
- Parempi toimintakyky johtuen korkeammasta vahingonsietokyvystä ja kyvystä vastustaa ympäristön ominaisuuksia, kuten hapettumista.

Heikkouksiksi Chung esittää rajalliset valmistustekniikat ja korkeat valmistuslämpötilat sekä vielä kehittymättömät jatkokäsittelymenetelmät (Chung 1994:95).

Polymeeripohjaisten hiilikuitukomposiittien valmistukseen on useita erilaisia menetelmiä. Lyhyitä kuituja käytettäessä sekoitetaan ne yleensä sidosaineeseen, jolloin muodostuu suhteellisen homogeeninen seos. Tämä seos muovataan haluttuun muotoon ja kovetetaan materiaalia vastaavalla menetelmällä. Kestomuovien kohdalla on useita vaihtoehtoja miten lyhyistä kuiduista koostuvasta seoksesta saadaan eri muotoisia komposiitteja. Kestomuovikomposiitteja voidaan valmistaa ruuvivalun, muotin ja ekstruuderin, kalanteroinnin eli telojen avulla sekä muotin avulla, jossa käytetään hyödyksi joko tyhjiötä, painetta tai kiinteätä muottia. Kertamuovien kohdalla valmistus tapahtuu yleisesti muottien tai painemuovauksen avulla. Muottien käytössä on kuitenkin kummankin materiaalin kohdalla otettava huomioon, että kuidut saattavat pakkautua sidosaineessa epätasaisesti ja näin vaikuttaa voimakkaasti komposiitin lopullisiin ominaisuuksiin (Chung 1994:95-97).

Pitkät hiilikuidut on usein punottu eräänlaiseksi matoksi kyllästysvaiheessa niiden ominaisuuksien hallitsemiseksi sekä komposiitin valmistamisen sekä lopullisen muodon hallitsemisen helpottamiseksi. Morgan (2005:862) esittää erilaisia punonta-arkkitehtuureja, joilla kaikilla on erilaiset lujuusominaisuudet.

Näitä mattoja pinotaan usein käsin muottiin, johon laitetaan myös sidosainetta. Tämän jälkeen joko tyhjiön tai paineen avulla pakotetaan matot ja sidosaine haluttuun muotoon, joka kovetetaan samanaikaisesti. Kertamuovien kohdalla voidaan valmistaa myös niin kutsuttuja prepreg-mattoja, joissa kuitumatto on käsitelty kertamuovi-sidosaineella etukäteen ja ne voidaan asettaa muotoon suoraan. Kovetus voidaan tehdä paineen ja lämmön alaisena paremman lopputuloksen saamiseksi tai suoraan mallinnettavan kappaleen pintaan.

Erilaisia punontoja voidaan tehdä myös suoraan erilaisten kappaleiden pinnoille suurten automatisoitujen punontakoneiden avulla. Näiden punontakoneiden avulla voidaan päällystää esimerkiksi akseleita hiilikuituverkolla, jotka myöhemmin kovetetaan komposiitiksi. Tällöin voidaan toteuttaa monimutkaisia muotoja helpommin ja soveltaa

hiilikuitukomposiitteja hyvin erilaisissakin ratkaisuissa. Edellämainittua punontatekniikkaa on hyödynnetty esimerkiksi erityisen jäykkien paperikoneen päätelojen valmistuksessa, jolloin tela päällystetään hiilikuitukomposiitilla punontakoneen avulla (Chung 1994:95-100).

Chung (1994:192) listaa polymeeripohjaisten hiilikuitujen komposiiteille seuraavat houkuttelevat ominaisuudet:

- Matala tiheys, joka on jopa 40% matalampi kuin alumiinilla
- Korkea lujuus, joka vastaa korkean lujuusluokan teräksiä
- Korkea jäykkyys, joka on korkeampi kuin titaanilla
- Lähes loputon kestoikä väsytyksen alaisena
- Hyvä virumisen kesto
- Matala kitkakerroin sekä hyvä kulumisen kesto
- Korkea kovuus sekä vahingonsietokyky, jotka saavutetaan laminaattikomposiiteissa suunnitellulla kuituorientaatiolla
- Erinomainen korroosionsietokyky
- Lähes olematon lämpölaajeneminen
- Kyky vaimentaa värähtelyä

Chung (1994:103) vertaa anisotrooppista epoksi-pohjaista hiilikuitukomposiittia muihin metallimateriaaleihin Taulukko 2.

Taulukko 2 Polymeeripohjaisten hiilikuitukomposiittien ja useiden metallien materiaaliominaisuuksia Chungia mukaillen (Chung 1994:103)

<i>Lujuus (MPa)</i>				
<i>Materiaali</i>	<i>Veto</i>	<i>Puristus</i>	<i>Kimmomoduli (GPa)</i>	<i>Tiheys (g/cm³)</i>
Epoksi/Hiilikuidut AS-4	1482	1227	145	1,55
Epoksi/Hiilikuidut HMS	1276	1020	207	1,63
Epoksi/Kevlar 49	1310	290	83	1,39
Alumiini (7075-T6)	572	-	69	2,76
Titaani (6Al-4V)	1103	-	114	4,43
Teräs (4130)	1241-1379	-	207	8,01

Yksi tärkeä aihealue liittyen polymeeripohjaisiin hiilikuitukomposiitteihin on niiden liittäminen toisiinsa sekä komposiittien korjaaminen. Kertamuovi- sekä kestopuovikomposiittien liittämistekniikat poikkeavat toisistaan huomattavasti. Kertamuovien liittäminen toisiinsa tapahtuu yleisesti ottaen käyttäen liimankaltaisia materiaaleja kuten sidosaineena usein käytettävää epoksia. Tällöin on kuitenkin otettava huomioon, ettei liitoksen lujuus ole kuin murto-osa itse komposiitin lujuudesta. Mekaanista liitosta, kuten pultteja, voidaan käyttää, mutta hauraan kertamuovisidosaineen poraaminen aiheuttaa vahinkoa sidosaineeseen ja heikon kohdan komposiitissa. On myös otettava huomioon metallisten kiinnikkeiden käytössä, että hiilikuitu aiheuttaa osassa näistä materiaaleista galvaanista korroosiota ja että useimpien

metallien lämpölaajeneminen on huomattavasti suurempaa kuin komposiittien (Chung 1994:115).

Kestomuovien liittämiseen voidaan käyttää hitsaamista, jossa kaksi materiaalia liitetään toisiinsa sulattamalla joko toisiinsa liitettäviä materiaaleja tai lisäämällä kappaleiden välille uutta sulaa ainesta. Koska kestumuovi-pohjaisten komposiittien yhteenhitsaaminen sulattamalla vaatii huomattavasti matalamman lämpötilan kuin useiden metallien, voidaan hitsaamiseen käyttää esimerkiksi sähkövirran resistanssia, infrapunakuumennusta, ultraäänihitsausta tai kuumaprässihitsausta. Lopputulos ei kuitenkaan vastaa komposiitin muiden alueiden lujuutta, koska yleisesti ottaen on oletettavissa, että hiilikuituja on katkennut liitoksen seurauksena tai liitoskohdassa ei ole samaa hiilikuitujakaumaa kuin muissa alueissa (Chung 1994:115-116).

Vahinkojen tai heikkouksien löytämiseen polymeeripohjaisista hiilikuitukomposiiteista käytetään muunmuassa metallografia, matalataajuus röntgenkuvausta ja infrapunälämpökuvasuta. Näillä tekniikoilla yritetään löytää virheitä komposiitissa, kuten halkeamia, huokoisuutta tai ilmataskuja, katkenneita tai haljenneita hiilikuituja, sidosaineen ja hiilikuidun välisten sidosten halkeamisia, laminaattien välistä irtoamista toisistaan ja komposiittiin joutuneita vieraita aineita. Koska komposiittien ominaisuudet tulevat täysin sen rakenteesta, ovat nämä virheet hyvin kriittisiä komposiittien suhteen (Chung 1994:116).

3.2 Hiilipohjaiset hiilikuitukomposiitit

Hiilipohjaiset hiilikuitukomposiitit, joita tästä eteenpäin kutsutaan hiili-hiilikomposiiteiksi, koostuvat hiilipohjaisesta sidosaineesta ja hiilikuitu dispersista, jonka vuoksi ne ovat perinteistä grafiittia kovempia, lujempia ja vastustavat lämpöshokkia paremmin. Koska hiilellä on matala tiheys, on hiili-hiilikomposiiteilla paremmat massaan suhteutetut materiaaliominaisuudet kuin millään muulla komposiitilla (Chung 1994:145).

Sidosaine hiili-hiilikomposiiteissa on tervasta, hartsista tai hiilipitoisesta kaasusta jalostettu ja sen muoto vaihtelee amorfisesta grafiittiseen riippuen jalostuslämpötilasta.

Mitä enemmän hiilisidosaineessa on grafiittia, sitä paremmin sidosaine vastustaa hapettumista ja paremmin se johtaa lämpöä, mutta vastapainona se muuttuu hauraammaksi. Tämä on otettava huomioon, koska yleisesti ottaen käytettävät hiilikuidut ovat koostumukseltaan erittäin grafiittisia, joten sidosaineella on tärkeä tehtävä vastustaa hapettumista (Chung 1994:145).

Hiili-hiilikomposiittien valmistukseen on neljä menetelmää; liquid phase impregnation (LPI), hot isostatic pressure carbonization (HIPIC), hot pressing ja chemical vapor infiltration (CVI). Kaikki menetelmät, paitsi CVI, alkavat prepregin valmistamisella. Prepreg on hiilikuidusta valmistettu matto, joka on kyllästetty sidosaineella, jota ei kuitenkaan vielä ole kovetettu. Tämän jälkeen käytetään erilaisia menetelmiä, joissa prepregin ympärille lisätty hartsi-sidosaine muutetaan pyrolyysin avulla hiileksi, jossa on haluttu määrä grafiittia. Tätä vaihetta kutsutaan tihennykseksi ja se suoritetaan korkeassa paineessa, jotta hiili-hiilikomposiitti saadaan haluttuun muotoon (Chung 1994:146-150).

Hapettuminen on ongelma hiili-hiilikomposiittien käytössä. Hapettomassa tilassa hiili-hiilikomposiiteilla on erinomaiset ominaisuudet, mutta ilmakehässä jo 320 °C asteen lämpötilassa hiili-hiilikomposiitit ovat alttiita hapettumiselle (Chung 1994:158). Hapettuminen suosii kuidun ja sidosaineen rajapintaa ja näin heikentää kuitujen ja sidosaineen sitoutumista toisiinsa. Tämä johtaa ei-hapettuneen materiaalin laminaattikerrosten erkaantumiseen ja askel kerrallaan komposiitin rakenteen hajoamiseen. Hiili-hiilikomposiitin kymmenen prosentin painonmenetykset johtaa kimmomodulin laskemiseen 30 prosentilla ja taivutuslujuuden laskuun 50 prosentilla. Hapettumisen estoon on kehitetty seuraavat menetelmät, joilla hapettumislämpötila on saatu nostettua jopa 1700 °C asteeseen:

- Piikarbidipäällyste, joka levitetään komposiitin ulkopinnalle esimerkiksi reaktiosintrauksen avulla
- Hapettumisen estäjät, joita syötetään sidosaineeseen tihennyksen yhteydessä
- Lasimaisen tiivistysmateriaalin lisääminen piikarbidi-pinnoitteen päälle, jonka avulla suljetaan pinnoitteesta mahdolliset huokokset

- Lasimaisen tiivistysmateriaalin päälle lisätään vielä tiheä piikarbidi- tai piinitridi-kerros kemiallisen kaasufaasipinnoituksen (CVD) avulla

Hiili-hiilikomposiittien mekaaniset ominaisuudet ovat hyvin riippuvaisia ympäröivän hiili-sidosaineen tiheydestä. Esimerkiksi taivutusjäykkyys kasvaa hiili-hiilikomposiiteissa eksponentiaalisesti sidosaineen tiheyden kasvaessa aina 500 megapascaliin asti. Tämä taivutusjäykkyys on yli kaksinkertainen verrattuna polymeeripohjaisiin hiilikuitukomposiitteihin. Muut mekaaniset ominaisuudet ovat hiili-hiilikomposiiteissa huomattavasti paremmat kuin grafiitissa (Chung 1994:158-159).

Hiili-hiilikomposiiteissa mielenkiintoinen mekaaninen ominaisuus on niiden erinomainen värähtelyn vaimennuskyky, jolla on käyttöä monissa sovelluksissa. Hiili-hiilikomposiiteilla on muihin komposiitteihin verrattuna korkeampi värähtelyn vaimennuskyky, mutta matalampi ominaisvärähtelytaajuus. Tämä johtuu sidosaineeseen tihennyksen aikana syntyvistä halkeamista ja huokoisuudesta (Chung 1994:171).

Vaikka hiili-hiilikomposiiteilla on pitkä lista houkuttelevia ominaisuuksia, on niiden käyttö vähäistä johtuen monimutkaisesta ja kalliista valmistusprosessista, helposta hapettuvuudesta, hauraudesta ja liitosten muodostamisen vaikeudesta (Chung 1994:145).

4 ILMAILUALAN TÄMÄN HETKISET HAASTEET

Ilmailuala on muuttunut rajoituksiltaan ja toimintamalliltaan hyvin paljon vuosikymmenten saatossa. Kaupallisten lentokoneiden kantamat ovat kasvaneet huomattavasti ja asiakasmäärät ovat kasvaneet voimakkaasti, kun samaan aikaan lentojen hinnat ovat laskeneet ja katteet ovat pienentyneet. Kilpailu on voimistunut ja koska ala on tasapainottelua pienien katteiden ja korkeiden kustannuksien kanssa, ovat lentoyhtiöt kasvattaneet panostustaan polttoaine kustannusten vähentämiseen. Polttoaine on lentoyhtiön kokonaistoimintakustannuksista noin 12-17 prosenttia. Se jää toiseksi vain henkilökuntakustannuksille (Capehart 2007:63).

Lentokoneen polttoaineen kulutukseen vaikuttavat useat tekijät. Ensimmäinen lentokoneen massa vaikuttaa hyvin voimakkaasti polttoaineen kulutukseen. Yhden prosentin vähennys lentokoneen painossa vähentää 0.75-1 %:n verran polttoainekustannuksia. Toinen suuresti vaikuttava tekijä on lentokoneen rakenne ja aerodynamiikka. Tämä aspekti vaikuttaa lentokoneen tuottamaan ilmanvastukseen, joka sen täytyy voittaa pysyäkseen ilmassa. On otettava huomioon, että erilaiset materiaalit ja niiden ominaisuudet rajaavat minkälaisia muotoja ja rakenteita voidaan lentokoneen suunnittelussa käyttää. Jos materiaalin rajaehdot kuten jäykkyys, värähtelyherkkyys ja lujuus eivät ole riittäviä toivottuun ratkaisuun, joudutaan tekemään kompromisseja kriittisten rakenteiden muotoilussa, jolla on vaikutusta niiden ominaisuuksiin. Tämä sama materiaalien rajaehto on huomattavissa myös käyttölaitteiden, kuten moottoreiden suunnittelussa, jossa materiaalin ominaisuudet ovat rajoittava tekijä siinä, kuinka paljon näistä komponenteista saadaan irti (Capehart 2007: 63).

4.1 Hiilikuitukomposiittien käyttökohteet ilmailutekniikassa

Hiilikuitukomposiiteille on löydetty lukemattomia käyttökohteita ilmailutekniikassa. Suurin syy tähän on, että hiilikuitukomposiittien ominaisuudet ratkaisevat kaupallisen ilmailun haasteita, joita ovat aikaisemmin mainittu paino sekä aerodynamiikka ja materiaalin aiheuttamat rajoitukset. Historiallisesti merkittävimpiä ensimmäisiä kehitysaskelaiteita ovat vuonna 1968 McDonnell Douglas DC-10 lentokoneen täysin

hiilikuidusta valmistettu sivuperäsin, vuonna 1979 Airbus A310 lentokoneen hiilikuidusta valmistettu peräsin sekä vuonna 1984 A320 lentokoneen hiilikuidusta valmistetut perävakaajat. Kaikissa ratkaisuissa käytettiin hiilikuitukomposiitteja, joissa sidosaineena toimi epoksi. DC-10 oli aikanaan yksi käytetyimmistä lentokoneista eikä sen täysin hiilikuidusta valmistettu sivuperäsin kärsinyt 15 vuoden käytön aikana merkittäviä vaurioita. Hiilikuituinen ratkaisu kevensi sivuperäsintä 38 prosenttia aikaisempaan ratkaisuun verrattuna. Kaikki edellämainitut ratkaisut todettiin myöhemmin kannattaviksi, kun tarkasteltiin niiden kevyempiä rakenteita suhteessa kustannuksiin koko lentokoneen elinkaaren aikana. 1980-luvulla hiilikuidun käyttö hiljalleen väheni, koska valmistuskustannuksista tuli lentokonesuunnittelua rajoittava tekijä ja hiilikuituisten osien valmistuskustannukset olivat vielä korkeat. Kun valmistustekniikat kehittyivät ja kustannukset laskivat alkoivat hiilikuitukomposiitista valmistetut osat tehdä paluuta (Morgan 2005:973).

Ensimmäinen lentokonemalli, jossa sovellettiin hiilikuitukomposiitteja hyvin laajasti, on vuonna 2009 ensilentonsa lentänyt Boeing 787 Dreamliner. Boeing käyttää Dreamlinerin rakenteissa 50 prosenttia hiilikuitukomposiitteja, 20 prosenttia alumiinia, 15 prosenttia titaania, 10 prosenttia terästä ja 5 prosenttia muita materiaaleja. Boeing muokkasi ajattelunsa erilaisten materiaalien käytössä ja alkoi hyödyntää hiilikuitukomposiitteja uudella tavalla. Aikaisemmin alumiinia käytettiin hyvin paljon lentokoneen rakenteissa, mutta koska hiilikuidun ominaisuudet vedossa ovat paremmat kuin alumiinin, päätettiin hieman alle 50 prosenttia koko Dreamlinerin rungosta tehdä hiilikuidusta. Alumiinia sovellettiin enemmän rakenteissa, jotka olivat puristuksen alaisia. Tämä uudenlainen ajattelu lentokoneen elinkaaresta johti kokonaispainoltaan 20 prosenttia kevyempään lentokoneeseen kuin edeltäjänsä. Dreamlinerin kohdalla huomattiin myös, että komposiittien käyttö johti pienempään huollon tarpeeseen ja huoltoon liittyviin kustannuksiin. Esimerkiksi Dreamlinerin edeltäjä Boeing 777, jonka matkustamon lattia ja sitä kannattelevat rakenteet ovat täysin hiilikuidusta, ei ole tarvinnut yli kymmenen vuoden aikana yhtään lattiaa kannattelevan hiilikuiturakenteen korjaamista tai vaihtoa (Hale, 2008).

Lentokoneissa yleisiä hiilikuidun käyttökohteita ovat siipien kannattimet, ohjauspinnat, kuten vakaajat, trimmerit sekä laipat, laskeutumisrenkaiden kotelot sekä luukut ja

yleisesti ottaen lentokoneen ulkopinnat. Usein myös moottoreiden kotelot ja aerodynaamiset ohjauspinnat on valmistettu hiilikuidusta (Morgan 2005:975).

Hiilikuitukomposiitteja sovelletaan myös laajasti helikoptereissa. Hiilikuitukomposiitteja käytetään helikoptereissa roottorin lavoissa, roottorin navassa, moottorin kotelossa ja kiinnityksissä, rungossa, ovissa, pyrstössä ja peräsimessä, perävakaajissa ja rungon paneeleissa. Hiilikuitukomposiitista on myös valmistettu helikoptereihin pyrstöroottoreiden käyttöakseleita (Morgan 2005:977).

Suurimpia edistysaskelia on kuitenkin otettu helikopterin roottorin lavoissa. Ensimmäisten helikopterien roottorien lavat tehtiin puusta ja kankaasta, kuten lentokoneissa aikanaan. Kaikki lavat olivat symmetrisia keskenään, koska tämä johti parhaisiin aerodynaamisiin ja käyttöominaisuuksiin. Puisten roottorin lapojen kanssa nousi ongelmaksi, että toisiaan vastakkain olevat lavat valmistettiin aina identtisiksi ja jos toinen vaurioitui, täytyi kummatkin vaihtaa. Puu materiaalina myös imi itseensä kosteutta, joka aiheutti värähtelyongelmia imeytyneen veden aiheuttaman epätasapainon vuoksi. Näiden ongelmien seurauksena alettiin roottorien lapoja valmistaa metallista ja tämä ratkaisikin heti puisten lapojen tuottamat ongelmat. Nyt lapoja ei tarvinnut vaihtaa pareittain vaan vain vaurioitunut lapa voitiin vaihtaa. Mutta uusia ongelmia alkoi esiintyä, sillä metalliset lavat kärsivät väsymisestä ja sen myötä lavoilla oli rajoitettu käyttöikä. Lavat täytyi siis vaihtaa tiettyjen käyttötuntien välein. Ongelmaksi nousi myös, että metallista tehdyt lavat saattoivat kärsiä kriittisen murtuman ilman suurempaa varoitusta pienimmänkin särön seurauksena (Helicopter Maintenance Magazine).

Hiilikuitukomposiiteista tehdyt lavat ovat sisältä hunajakennoa, jonka päälle on tehty hiilikuidusta kuori ja jonka ulkoreunoilla ovat hiilikuidusta tehdyt mastot. Kuori sijoitetaan siten, että sen hiilikuidut ovat 45 asteen kulmassa lavan keskiakselin suhteen. Rakenne antaa lavalle optimaaliset lujuusominaisuudet ja poistaa kriittisen vahingon riskin, koska lapaan kohdistuneen iskun aiheuttama repeämisriski on minimoitu kuitujen sijoittelulla (Morgan 2005:977). Lapoihin laitetaan myös alumiinista tehty punos, joka johtaa salamaniskut pois hiilikuidusta. Hiilikuitu on vapauttanut lapojen muotoilua, koska sen jäykkyys säilyttää lavan muodon paremmin kuin esimerkiksi

alumiini. Näin saadaan aikaiseksi aerodynaamisilta ominaisuuksiltaan tasalaatuisempia lapoja, joilla on periaatteessa loputon elinikä (Helicopter Maintenance Magazine).

Samanlaista laparakennetta on käytetty Yhdysvaltojen armeijan Hercules C130J-kuljetuskoneissa. Näitä lapoja on käytetty yli 20 vuotta ja 75 miljoonaa lentotuntia ilman yhdenkään lavan katastrofaalista pettämistä (Morgan 2005:978).

Hiili-hiilikomposiiteille on löydetty sovelluskohteita ilmailutekniikassa. Hiili-hiilikuitukomposiittien valmistuksesta yli 60 %:a käytetään jarrulevyjen valmistamiseen. Lentokoneessa jarrut koostuvat useasta hiili-hiilikuitukomposiitista valmistetusta kiekosta, joita painetaan toisiaan vasten hydraulisesti. Perinteisiin teräksestä valmistettuihin jarrukiekkoihin verrattuna hiili-hiilikomposiitista valmistetut jarrukiekot ovat 40 prosenttia kevyemmät ja niillä on 2.5-kertainen lämpökapasiteetti. Jarrukiekkojen lämpötila lentokoneen laskeutuessa on noin 500 °C astetta, mutta hätäjarrutuksessa lämpötila nousee jopa 1300 °C asteeseen. Nämä lämpötilat imeytyvät suhteellisen helposti hiili-hiilikuidusta valmistettuun lämpönieluun. Jarrulevyn kitka kasvaa lämpötilan noustessa ja alkaa menettää tehoaan vasta erittäin korkeissa lämpötiloissa, joissa muista materiaaleista valmistetut jarrulevyt jo pettäisivät. Pysäyttääkseen Airbus matkustajalentokoneen jarrujärjestelmän täytyy absorboida 70 megajoulea energiaa (Morgan 2005:1011).

Vaikka hiilikuitukomposiittien käyttö ilmailutekniikassa vaikuttaakin hyvin onnistuneelta ratkaisulta, ei tätä ole saavutettu ilman vaikeuksia. Airbus A380-lentokoneiden siiven sisässä on runko, joka kannattelee koko siipeä. Tähän runkoon on kiinnitetty hiilikuidusta tehty kuori, joka on kiinni erityisillä kiinnikkeillä. Kiinnittämiseen käytettiin metallisia pultteja, jotka lämmönvaihtelun seurauksena elivät rakenteessa. Vuosien käytön jälkeen alkoi näistä kiinnikkeistä ja kannattimista löytyä halkeamia. Syyksi epäiltiin lämpövaihtelua, joka aiheutti ahdistusliitoksissa ympärillä olevan hiilikuitukomposiitin halkeilua (Hepher, 2012).

5 YHTEENVETO

Tämä työ käsittelee hiilikuitukomposiitteja ilmailutekniikassa. Hiilikuitukomposiittien valmistuksessa voidaan käyttää useita eri materiaaleja ja saavuttaa komposiitille erilaisia ominaisuuksia. Hiilikuituja voidaan valmistaa käyttämällä pikeä, polymeeria tai hiilipitoisia kaasuja. Valmistusprosessit vaihtelevat hyvin paljon käytetyn materiaalin mukaan ja valmistusprosessista riippuen ovat hiilikuitujen ominaisuudet erilaisia. Hiilikuitujen ominaisuuksissa korostuvat erinomainen vetolujuus, kimmokerroin, matala tiheys, virumisen vastustuskyky ja lähes tulkoon olematon lämpölaajeneminen. Varjopuolena nähdään anisotrooppiset materiaali- ja lujuusominaisuudet sekä vetolujuuteen suhteutettuna heikot lujuusominaisuudet puristuksessa.

Komposiitit ovat yhdistelmä kahta faasia: dispersiä ja sidosainetta eli matriisia. Matriisiin tehtävä on pitää komposiitti kasassa ja siirtää rasitukset dispersiin, joka tuo komposiitille lisäominaisuuksia. Komposiittien lujuusominaisuudet voivat olla hyvin anisotrooppisia tai isotrooppisia riippuen siitä miten dispersi sijoitetaan komposiitissa. Komposiitin ominaisuuksia voidaan siis aina valmistusvaiheessa ohjata haluttuun suuntaan. Yleisimmät käytetyt hiilikuitukomposiitit ovat polymeeri- ja hiili-pohjaiset komposiitit.

Hiilikuitukomposiitit ovat löytäneet paikkansa ilmailutekniikassa, joka on törmännyt uusiin haasteisiin viime vuosikymmenten aikana. Kun lentoyhtiöiden välinen kilpailu on vaikuttanut lentolippujen hinnoitteluun, ovat kustannusrakenteet kaupallisessa ilmailussa muuttuneet jatkuvasti epäsuotuisammiksi. Kustannuksia on täytynyt lähteä karsimaan jostakin ja erityisesti polttoainekustannukset ovat korostuneet suurena menoeränä. Hiilikuitukomposiitit ovat osoittautuneet erinomaiseksi ratkaisuksi tähän ongelmaan niiden keveyden ja lujuusominaisuuksien ansiosta. Nykyään hiilikuitukomposiitteja käytetään ilmailutekniikassa varsinkin kuorirakenteissa.

6 LÄHDELUETTELO

Capehart B.L. 2007 Encyclopedia of Energy Engineering and Technology Volume 1. Boca Raton, FL. Taylor & Francis Group. ISBN 0-8493-5039-9

Chung D. 1994. Carbon Fiber Composites. Newton, MA. Butterworth-Heinemann. ISBN 0-7506-9169-7

Morgan P. 2005. Carbon Fibers and their Composites. Boca Raton, FL. Taylor & Francis Group. ISBN 0-8247-0983-7

Helicopter Maintenance Magazine. 2012. Carbon Fiber – A New Spin for Main and Tail Rotor Blades. [verkkolehti] Milton, Wisconsin. Helicopter Maintenance Magazine. Saatavissa: <http://www.helicoptermaintenancemagazine.com/article/carbon-fiber-%E2%80%93-new-spin-main-and-tail-rotor-blades> [viitattu 28.03.2017]

Hale J. 2006. Boeing 787 from the Ground Up [verkkodokumentti] Seattle, Washington. Aero Magazine. Saatavissa: http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2015_q1/archive.html [viitattu 28.03.2017]

Keinonen J. 2010. Luentomateriaali Materiaalifysiikka I [verkkodokumentti] Helsinki. Helsingin Yliopisto. Saatavissa: <https://prujut.wordpress.com/> [viitattu 28.03.2017]

Hepher T. 2012. Airbus A380 wing flaw undetected for a decade. [verkkolehti] New York, New York. Reuters. Saatavissa: <http://www.reuters.com/article/airbus-a-idUSL5E8GOFKO20120524> [viitattu 28.03.2017]

Kopeliovich D. 2012. Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites. [verkkolehti] Israel. Substech. Saatavissa: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=carbon_fiber_reinforced_polymer_composites [viitattu 28.03.2017]