

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

KOMPOSIITTIMATERIAALIEN KÄYTTÖ JA MAHDOLLISUUDET AUTOJEN JA
TYÖKONEIDEN VALMISTUKSESSA

THE USE AND POSSIBILITIES OF COMPOSITE MATERIALS IN AUTOMOTIVE AND
MACHINE MANUFACTURING

Lappeenrannassa 20.4.2017

Niko Onnila

Tarkastaja Professori, TkT Timo Kärki

Ohjaaja TkT Marko Hyvärinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Niko Onnila

Komposiittimateriaalien käyttö ja mahdollisuudet autojen ja työkoneiden valmistuksessa

Kandidaatintyö

2017

35 sivua ja 7 kuvaa

Tarkastaja: Professori, TkT Timo Kärki

Ohjaaja: TkT Marko Hyvärinen

Hakusanat: komposiittimateriaalit, autoteollisuus, työkoneiteollisuus

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia autojen ja työkoneiden valmistuksessa käytettyjä komposiittimateriaaleja ja niiden sovelluskohteita sekä syitä niiden käyttöön. Tavoitteena oli määrittää auto- ja työkoneiteollisuuden käyttämiä erilaisia komposiittimateriaaleja ja näiden materiaalien erilaisia esimerkkikäyttökohteita. Tämän lisäksi tulosten ja löydetyt tiedon perusteella pyrittiin pohtimaan komposiittimateriaalien tulevaisuutta autojen ja työkoneiden valmistuksessa.

Tutkimus suoritettiin induktiivisena lähdeaineistoon pohjautuvana kirjallisuustutkimuksena. Kyseessä oli ohjaava kirjallisuustutkimus, jossa käytettiin pääasiassa kvalitatiivista aineistoa. Lähdeaineistona käytettiin komposiittimateriaaleista sekä auto- ja työkoneiteollisuudesta kertovia erillisteoksia, joiden lisäksi erilaisia esimerkkikäyttökohteita etsittiin myös eri valmistajien esitteistä ja internet-sivustoilta.

Tutkimuksessa löydettiin monia erilaisia komposiittimateriaaleja, joita käytetään autoissa ja työkoneissa. Yleisimpiä materiaaleja ovat erilaiset kuitukomposiitit, kuten hiili- ja lasikuidut, mutta käytössä on myös monia muita materiaaleja. Sovelluskohteista yleisimpiä ovat kokonaiset runkorakenteet tai erilaiset rungon osat, kuten ovipaneelit. Näiden lisäksi komposiiteista valmistetaan myös esimerkiksi erilaisia tankkeja ja pieniä moottorin osia, kuten mäntiä. Suurimpia syitä komposiittimateriaalien käyttöön ovat tiukentuneet ympäristömääräykset, joiden takia hyödynnetään muun muassa komposiittimateriaalien tarjoamaa massan keventämistä.

Tuloksien perusteella voidaan ennustaa komposiittimateriaalien käytön ja erilaisten sovelluskohteiden lisääntyvän tulevaisuudessa. Tutkimus vastasi myös hyvin tavoitteisiin ja tutkimuskysymyksiin. Jatkotutkimuksia aiheesta voisivat olla esimerkiksi uusien materiaalien kokeelliset tutkimukset ja komposiittimateriaalien käytön lisääntymisen seuraaminen.

ABSTRACT

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

Niko Onnila

The Use and Possibilities of Composite Materials in Automotive and Machine Manufacturing

Bachelor's thesis

2017

35 pages and 7 figures

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

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

Keywords: composite materials, automotive industry, heavy machinery industry

In this research the main idea was to examine composite materials and their applications used in automotive and machine manufacturing. Aim of this research was to define the materials used in cars and different machines, example applications for these materials and reasons for using them. Also, some cogitation was done to predict future of composite materials in automotive and machine manufacturing.

Used research method was literature review based on source material. The source material used was mainly qualitative. The material used comprised composite material, automotive, and machine based literature. Some carmaker brochures and internet documents were also used to find more applications for composite materials.

As results many different composite materials used in automotive and machine manufacturing were found. Most used materials are different fiber reinforced composites, such as carbon or glass fibers, but many other materials are also widely used. Different applications of these materials cover many different parts. Most common composite material parts are bodies or body parts. Other applications comprise parts like fuel tanks and small motor parts, such as piston heads. Composite materials are mostly used for their mass conserving effects to stay within the limits of tightened environmental regulations for cars and machines.

Based on these results, some predictions for the future can be done. The main prediction is that composite materials and the use of them will most likely increase in the future due to their material properties. This research also managed to answer all the research questions, and fulfill the aim set prior the research. Further research could be done for example on tracking the use of composite materials or examining new possible composite materials and the material properties of them.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	5
2	TUTKIMUSMENETELMÄT	7
3	KOMPOSIITTIMATERIAALIT	9
	3.1 Komposiittimateriaalien rakenne.....	9
	3.2 Komposiittimateriaalien yleisimmät seosaineet	10
	3.3 Komposiittimateriaalien valmistus	10
	3.4 Komposiittimateriaalien vahvuudet ja heikkoudet	11
4	KOMPOSIITTIMATERIAALIT AUTOJEN JA TYÖKONEIDEN VALMISTUKSESSA	13
	4.1 Käytettävät materiaalit	13
	4.1.1 Polymeerimatriisikomposiitit.....	13
	4.1.2 Metallimatriisikomposiitit	14
	4.1.3 Hiili- ja lasikuidut.....	14
	4.1.4 Kestävä kehitys ja ympäristöystävälliset materiaalit.....	15
	4.1.5 Keraamiset komposiittimateriaalit	16
	4.2 Käyttökohteet autoissa	17
	4.2.1 Sovelluskohteet autojen rungoissa	17
	4.2.2 Sovelluskohteet muissa osissa	19
	4.3 Käyttökohteet työkoneissa	21
	4.4 Syyt komposiittimateriaalien käyttöön	23
5	POHDINTA	26
	5.1 Tulevaisuus.....	27
	5.2 Tutkimuksen luotettavuus ja jatkotutkimusehdotukset.....	28
6	YHTEENVETO.....	30
	LÄHTEET	32

1 JOHDANTO

Eri teollisuudenalat kehittävät jatkuvasti uusia innovaatioita niin materiaalien kuin niiden sovelluskohteidenkin kanssa. Tästä hyvänä esimerkkinä on autoteollisuus, jossa eri valmistajat joutuvat jatkuvasti kehittämään tuotteitaan varmistaakseen kilpailuasemansa säilymisen markkinoiden muita valmistajia vastaan. Näin ollen autonvalmistajat käyttävätkin paljon aikaa ja rahaa kehittääkseen uusia, toinen toistaan parempia ja kustannustehokkaampia ratkaisuja tuotteisiinsa. Samalla myös entistä tiukemmat ympäristömääräykset pakottavat valmistajat kehittämään uusia valmistusmenetelmiä sekä materiaaleja muuttaakseen tuotteensa mahdollisimman ympäristöystävällisiksi ja pystyäkseen vastaamaan näihin määräyksiin. Näiden uusien haasteiden takia autojen ja työkoneiden valmistajat ovat ruvenneet suosimaan viime aikoina varsinkin erilaisia komposiittimateriaaleja ja ne ovatkin kasvattaneet suosiotaan autoissa ja työkoneissa. (Bunzel & Ruhnau 2014, s. 137–138.)

Tämä kandidaatintyö käsittelee komposiittimateriaalien käyttöä auto- ja työkoneiteollisuudessa. Kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, mitä komposiittimateriaaleja auto- ja työkoneiteollisuus käyttää tällä hetkellä ja mihin käyttötarkoituksiin näitä materiaaleja käytetään autoissa ja työkoneissa. Samalla kartoitetaan mahdollisia käyttökohteita ja materiaaleja, joita jatkuvasti kehittyvä teollisuudenala voisi tulevaisuudessa hyödyntää ja siten selvittää nykyisistä ja mahdollisista tulevaisuudessa esiin tulevista haasteista. Tutkimusongelma on, miten komposiittimateriaaleja voidaan hyödyntää autojen ja työkoneiden valmistuksessa. Tämän ongelman ratkaisemiseksi voidaan laatia seuraavat tutkimuskysymykset:

- Mitä komposiittimateriaaleja auto- ja työkoneiteollisuus käyttävät ja miksi?
- Minkälaisissa sovelluksissa näitä komposiittimateriaaleja voidaan hyödyntää autoissa ja työkoneissa?
- Mitä mahdollisia uusia komposiittimateriaaleja tulevaisuudessa voidaan hyödyntää?
- Mitä käyttömahdollisuuksia komposiittimateriaaleille tulevaisuudessa on autoissa ja työkoneissa?

Tutkimuksessa siis selvitetään nykyiset ja tulevaisuudessa mahdolliset komposiittimateriaalit ja niiden käyttökohteet autojen ja työkoneiden valmistuksessa. Tutkimus suoritetaan kirjallisuustutkimuksena etsimällä eri lähdeaineistoista tietoa autojen ja työkoneiden valmistuksessa käytettyihin materiaaleihin ja näistä valmistettuihin sovelluskohteisiin. Tutkimuksessa keskitytään eniten erilaisiin kuitukomposiittimateriaaleihin ja niiden käyttökohteisiin ja muita autoissa ja työkoneissa käytettyjä materiaaleja käsitellään suppeammin.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

Kyseessä on kirjallisuustutkimus, joka suoritetaan pääasiassa kvalitatiiviseen lähdekirjallisuuteen perustavana. Mahdollisuuksien rajoissa ja sopivissa tapauksissa pyritään soveltamaan myös kvantitatiivista aineistoa, kuten erilaisia lukuarvoja materiaalien valinnan taustalla monimenetelmäisyyden takaamiseksi ja tutkimuksen tuloksen tarkentamiseksi. Näin ollen tutkimus on induktiivinen eli tutkimuksessa pyritään lähdeaineistoa tutkimalla tekemään erilaisia päätelmiä tutkittavasta aiheesta. Kyseisessä tutkimuksessa käytetään niin toteavaa kuin ohjaavaakin lähestymistapaa kirjallisuustutkimukseen. Toteavaa tutkimusta on erilaisten esimerkkikäyttökohteiden ja materiaalien etsiminen. Aineistoa tutkimalla pyritään siis löytämään mahdollisimman totuudenmukaisia esimerkkejä tutkimuksen aiheesta. Ohjaavassa lähestymistavassa taas aineistosta löytyvien tietojen pohjalta tehtäviä päätelmiä ovat esimerkiksi, miten tutkittavat materiaalit ja menetelmät ovat historian aikana muuttuneet ja miksi ne ovat tällä hetkellä sellaisia kuin ovat. Samalla aineiston pohjalta pystytään pohtimaan, miltä tutkimuksen aihealueen tulevaisuus mahdollisesti näyttää.

Lähdeaineistona tässä tutkimuksessa käytetään pääasiassa komposiittimateriaaleista ja autoteollisuudesta kertovaa toisistaan riippumatonta kirjallisuutta, mutta sen lisäksi hyödynnetään eri auto- ja työkonevalmistajien esitteitä ja muita dokumentteja osien valmistukseen käytetyistä materiaaleista. Aineisto on pyritty valitsemaan mahdollisimman uusista teoksista, jotta siitä saatu tieto olisi ajantasaista. Kirjallisuuden valitsemisessa on pyritty suosimaan yksityisten kirjoittajien teoksia, jotta aineistosta saatu tieto olisi mahdollisimman luotettavaa ja riippumatonta. Näin ollen aineistona käytettäviin autonvalmistajien esitteisiin on suhtauduttu melko kriittisesti, jotta mahdollisesti joitain ominaisuuksia liioittelevat markkinointilauseet eivät vaikuttaisi tuloksiin, vaan myös näistä aineistoista saatu tieto olisi totuudenmukaista ja vertailukelpoista muiden aineistojen kanssa.

Mahdollisiin ristiriitaisuuksiin lähdeaineistoissa pyritään suhtautumaan sulkematta mitään vaihtoehtoja pois, vaan näistä kerrotaan avoimesti tulososiossa ja pohditaan tämän jälkeen, mistä mahdolliset erot aineistoissa johtuvat. Näin kaikkiin lähteisiin voidaan suhtautua

kriittisesti ja tutkia niiden antamien tietojen paikkansapitävyyttä. Samalla voidaan poistaa tutkijan mahdollista subjektiivisuutta ja vaikutusta tutkimuksen tuloksiin. Tutkijan rooli pyritään myös muuten pitämään mahdollisimman objektiivisena tutkimuksen ajan, jotta tutkimuksen tulokset eivät olisi vääristyneet minkään yksittäisen mielipiteen takia.

3 KOMPOSIITTIMATERIAALIT

Komposiittimateriaalit ovat kahdesta tai useammasta eri aineesta koostuvia materiaaleja. Komposiittimateriaaleissa nämä eri ainesosat eivät ole kuitenkaan liuenneet toisiinsa, vaan ne ovat vain sekoittuneet keskenään ja muodostaneet uuden ja ominaisuuksiltaan erilaisen aineen. Eri seosaineet voivat myös olla lähes mitä tahansa aineita, joten määritelmä komposiittimateriaali käsittää erittäin suuren joukon erilaisia materiaaleja. (Strong 2008, s. 1–2, 16.)

3.1 Komposiittimateriaalien rakenne

Komposiittimateriaalin muodostavat aineet voidaan yleensä jakaa kahteen eri ryhmään. Useimmissa komposiittimateriaaleissa yksi aineista toimii sidosaineena, eli matriisina ja loput aineista ovat lujitteita, joita tämä sidosaine nimensä mukaisesti sitoo toisiinsa. (Chung 2010, s. 4.) Muita sidosaineiden tehtäviä on antaa materiaalille tai kappaleelle haluttu muoto, suojata lujitteita ympäristöltä sekä jakaa ulkoista kuormaa lujitteille. Lujitteen pääasiallinen tehtävä taas on lisätä materiaalille haluttuja mekaanisia ominaisuuksia, kuten lujuutta tai jäykkyyttä. (Strong 2008, s. 5, 16.) Matriisin ja lujitteiden suhteet voivat vaihdella suuresti haluttujen materiaaliominaisuuksien saavuttamiseksi, mutta lujitteen osuus koko materiaalista on useimmiten pienempi kuin matriisin, eikä voi ylittää 70 % koko materiaalin ainemäärästä. Tämä johtuu siitä, että mitä suurempi lujitteen osuus koko materiaalista on, sitä vähemmän löytyy sitä sitovaa matriisia. Matriisia tarvitaan kuitenkin tarpeeksi materiaalin koossa pysymiseen. (Campbell 2010, s. 1.)

Komposiittimateriaalit voidaan jakaa niiden rakenteen ja lujitteiden muodon perusteella eri luokkiin. Esimerkki tällaisesta jaottelusta on jakaminen komposiitit kuitu-, laminaatti- ja partikkelikomposiitteihin. Kuitukomposiiteissa lujitteina toimivat kuidut, jotka matriisi pitää paikallaan. Partikkelikomposiiteissa lujitteet muodostuvat partikkeleista. Laminaatit taas koostuvat kahdesta tai useammasta eri materiaalin muodostamasta kerroksesta. Eri materiaaleja voidaan jakaa kuitenkin vielä näidenkin luokkien sisällä erilaisiksi ryhmiksi, kuten esimerkiksi kuitukomposiitteja voidaan jakaa jatkuviin- ja epäjatkuviin kuitukomposiitteihin. Tämä jako tapahtuu kuitujen orientaation perusteella. Lujitteiden

orientaatio vaikuttaa myös vahvasti lopullisen materiaalin ominaisuuksiin, joten siihen kiinnitetään todella suurta huomiota materiaalien valmistuksessa. (Ye 2011, s. 2–4.)

3.2 Komposiittimateriaalien yleisimmät seosaineet

Komposiittimateriaaleja voi siis muodostaa lähes mistä tahansa aineista, mutta usein komposiitit ovat hyvin samankaltaisia koostumukseltaan. Komposiitin matriisi muodostuu usein joko jostain polymeeristä (kuten erilaisista muoveista), metallista, keraamisesta materiaalista, sementistä tai hiilestä. Näillä kaikilla on erilaisia niin hyviä kuin huonojakin ominaisuuksia, joiden takia niitä käytetään erilaisissa sovelluksissa. Esimerkiksi polymeerit ovat usein halpoja, mutta niiden lujuusominaisuudet eivät yleensä ole metallien tai keraamisten matriisien tasolla. (Campbell 2010, s. 1; Chung 2010, s. 2.)

Useimmiten komposiiteissa käytetään lujitekuituina erilaisia lasi-, hiili- tai aramidikuituja. Näillä materiaaleilla on matriisiainetta paremmat mekaaniset ominaisuudet lujuudessa ja jäykkyydessä, jolloin lopullisesta materiaalista saadaan käyttötarkoitukselleen sopivaa. Lujitekuidut ovat kuitenkin usein matriisiaineita kalliimpia, joten niiden käyttöä tulee miettiä kustannusnäkökulmastakin. (Campbell 2010, s. 1.) Partikkelilujitteina taas käytetään yleensä erilaisia metalleja, kuten volframia, kromia tai molybdeenia. Kyseisiä partikkeleita käytetään myös haluttujen materiaaliominaisuuksien takaamiseksi, mutta joitain partikkeleita voidaan käyttää myös vain lopullisen materiaalin hinnan alentamiseksi. (Berthelot 2012, s. 6.)

3.3 Komposiittimateriaalien valmistus

Komposiitteja voidaan valmistaa todella monilla eri tavoilla ja joissain tapauksissa komposiitin valmistusmenetelmä on luotu vain kyseistä materiaalia varten. Näin ollen on voitu taata halutut materiaaliominaisuudet, joita ei välttämättä millään muulla valmistustavalla olisi voitu saavuttaa. Valmistustapaan vaikuttaa myös vahvasti komposiitin materiaalit sekä halutut lujitteiden orientaatiot. Usein komposiittien valmistuksessa saavutetaan laadullisesti paras tulos valmistamalla materiaali useassa eri vaiheessa. Tämä kuitenkin lisää kustannuksia, joten valmistuksessa tulee valita, painotetaanko lopullisen materiaalin ominaisuuksissa parempaa laatua vai halvempaa hintaa. (Hoa 2009, s. 137–139.)

Yleisesti komposiittien valmistuksessa on käytetty erilaisia valamis- ja laminoointitekniikoita, joissa komposiitti valmistetaan halutun muotoiseen muottiin, joko valmiiksi sekoitettuna aineena tai kerroksittain vuorottelemalla matriisin ja lujitteiden lisäämisessä. Varsinkin autoteollisuuden vaatimassa nopeassa valmistustahdissa käytetään usein ruiskuvalun erilaisia sovelluksia, joissa sulatettuja seosaineita ruiskutetaan tai syötetään muulla tavalla halutun muotoiseen muottiin kovalla paineella, jonka jälkeen materiaalin lämpötilan laskemisen avulla saadaan materiaali jähmettymään halutun muotoiseksi. Tällä valmistusmenetelmällä pystytään valmistamaan varsinkin erilaisia paneeleja nopeassa tahdissa. (Campbell 2010, s. 297–305; Gibson 2016, s. 24–31.) Toinen laajasti käytetty menetelmä on ahtopuristus, jossa valmiiksi sekoitettu matriisi-lujiteseos sulatetaan ja muovataan halutun muotoiseksi muotilla, jossa on kaksi osaa. Muovauksessa ylätyökalu painetaan alatyökalua vasten suurella paineella, jolloin muottiin asetettu sula materiaali levittyy muottiin ja jäähdytettäessä jähmettyy haluttuun muotoon. (Campbell 2010, s. 290–295.)

Nykyään komposiittituotteiden valmistuksessa on myös yleistynyt valmistusmenetelmä, jossa hartsiin lisätään lujitteita ja tämä komposiittinauha kerätään rulliin, joista loppukäyttäjät voi muovata halutun muotoisia kappaleita erilaisilla menetelmillä. Esimerkiksi lentokoneiteollisuus käyttää usein valmiiksi valmistettua materiaalirullia, joista se muovaa erilaisilla muoteilla vaadittavissa lämpötiloissa kappaleita. Yksi hieman samankaltainen tekniikka on erilaisten pitkien ja pyöreiden kappaleiden valmistamiseen käytetty menetelmä, jossa lujitekuitua syötetään rullasta pyörivän muotin ympärillä. Samalla kun kuitu kulkee muotille, se kastetaan matriisina toimivaan aineeseen, kuten hartsiin, joka kovettuu muotin mukaiseksi ja synnyttää halutun kappaleen. Tätä menetelmää voidaan soveltaa myös muunlaisen geometrian kappaleisiin, jos matriisissa kastettu lujite vain kuljetetaan halutun muotin läpi tai itse muottiin, jossa sen annetaan jähmettyä muotoonsa. (Gibson 2016, s.24–31.)

3.4 Komposiittimateriaalien vahvuudet ja heikkoudet

Komposiittimateriaaleilla on monia vahvuuksia teollisuudessa laajasti käytettyihin materiaaleihin, kuten metalleihin tai muoveihin verrattuna. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi siitä, että komposiittimateriaaleissa voidaan yhdistää esimerkiksi juuri jonkin metallin ja

jonkin muovin hyvät ominaisuudet keskenään samalla peittäen näiden materiaalien heikkouksia, jotka tulevat esille niitä käytettäessä yksittäin. Komposiittimateriaaleilla saavutettavista hyödyistä merkittävin on sen pieni massa yhdistettynä lujaan ja jäykkään rakenteeseen. Esimerkiksi hiilikuidulla on metallin kaltaiset lujuusominaisuudet, mutta se on silti kevyempi materiaali. Muita komposiiteilla saavutettavia hyötyjä ovat esimerkiksi hyvä korroosion ja sään kesto oikealla matriisiaineen valinnalla. Samalla ne kestävät usein myös hyvin väsymistä. Monissa sovelluksissa komposiittimateriaalien valmistuskustannuksetkin ovat pienemmät kuin ne olisivat esimerkiksi metalleja käytettäessä vaaditun työstömäärän ollessa vähäisempi. (Campbell 2010, s. 14–18.)

Joissain tapauksissa komposiittimateriaalit voivat kuitenkin olla kalliimpiakin kuin muut mahdolliset käytettävät materiaalit. Tämä johtuu korkeista raaka-ainehinnoista sekä joissain tapauksissa monimutkaisista valmistusprosesseista. Esimerkiksi hiilikuitu on kallis materiaali verrattuna samat lujuusominaisuudet saavuttaviin metalleihin ja siksi sitä on käytetty lähinnä vain kalliimman hintaluokan tuotteissa. Aina komposiittimateriaaleilla ei voida myöskään taata täysin tasalaatuisia mekaanisia ominaisuuksia esimerkiksi valmistusprosessissa tapahtuvien virheiden vuoksi. Tällaisia virheitä ovat muun muassa matriisin ja lujitteen huono sidos, joka ei kestäkään niitä rasituksia, joille se on suunniteltu ja jotka se kestäisi hyvän sidoksen syntyessä. Myös lämpötilalla ja kosteudella saattaa olla paljonkin vaikutusta komposiitin ominaisuuksiin riippuen sen koostumuksesta ja raaka-aineista. Näin ollen huolimatta kaikista komposiittimateriaalien hyvistä puolista, eivät ne aina ole kuitenkaan parempi vaihtoehto metalleille tai muille mahdollisille valmistusmateriaaleille. (Campbell 2010, s. 14–18.)

4 KOMPOSIITTIMATERIAALIT AUTOJEN JA TYÖKONEIDEN VALMISTUKSESSA

Seuraavissa kappaleissa on esitelty tutkimuksen tulokset. Tulokset on jaoteltu tutkimuskysymysten mukaisesti eri kappaleiksi, jotta ne vastaisivat mahdollisimman selkeästi kyseisiin kysymyksiin.

4.1 Käytettävät materiaalit

Auto- ja työkoneteollisuudessa käytetyt komposiittimateriaalit voidaan jaotella erilaisiin luokkiin niiden rakenteen ja raaka-aineiden perusteella samalla tapaa kuin komposiitit yleisestikin. Alla on eroteltu näiden teollisuudenalojen pääasiallisesti käyttämiä erilaisia komposiittimateriaaleja.

4.1.1 Polymeerimatriisikomposiitit

Polymeerikomposiiteissa matriisina ovat erilaiset polymeerit. Polymeerit ovat pienistä rakenneosista, eli monomeereista rakennettuja materiaaleja. Polymeerit voidaan vielä jakaa kahteen eri luokkaan, jotka ovat kestopuovit sekä kertamuovit. Näihin luokkiin polymeerit jaetaan sen mukaan, voidaanko niitä muovata vain kerran vai useasti. Kestomuoveja pystytään muovaamaan useammin kuin kerran, kun taas kertamuoveja ei voida enää muotoon muovaamisen jälkeen uudelleen muotoilla. Polymeerimatriisit siis muodostuvat lähes aina erilaisista muoveista ja näitä voivat olla esimerkiksi polyamidi tai ABS. Lujitteina polymeerikomposiiteissa voi olla niin kuituja kuin partikkeleita, tai komposiitti voi olla laminaatin muodossa. Näille lujitteille ei ole myöskään olemassa rajoitteita, vaan ne voivat olla esimerkiksi erilaisia metalleja. (Elmarakbi 2013, s. 22–30; Park 2015, s. 86–96.)

Polymeerimatriisikomposiitit ovat eniten käytetty komposiittilaji autojen ja työkoneiden valmistuksessa. Erityisesti erilaisten muovien käyttö matriiseina on yleistä kyseisten teollisuudenalojen sovelluksissa. Lujitteina näissä komposiiteissa käytetään esimerkiksi kalsiumkarbonaattia, talkkia ja wollastoniittia. Polymeerikomposiittien valmistukseen ja valmistusmenetelmään vaikuttaa vahvasti niiden tuleva käyttötarkoitus. Nämä komposiitit voidaankin jakaa niihin käyttökohteessa vaikuttavien kuormien mukaan ei-rakenteellisiin,

puolirakenteellisiin ja rakenteellisiin komposiitteihin. Rakenteelliset komposiitit kantavat ja kestävät näistä eniten kuormaa ja ei-rakenteelliset vähiten. (Elmarakbi 2013, s. 22–30.)

4.1.2 Metallimatriisikomposiitit

Metallimatriisikomposiitit ovat nimensä mukaisesti komposiitteja, joissa matriisina toimii jokin metalli, kuten esimerkiksi alumiini, titaani, magnesium tai kupari. Tähän matriisimateriaaliin liitetään erilaisia lujitteita, jolloin syntyy metallimatriisikomposiitti. Nämä metallien lujitteina käytettävät materiaalit voivat olla esimerkiksi kuitujen tai partikkelien muodossa. Lujitteina voivat toimia monet eri materiaalit, kuten boori tai piikarbidit. Joskus metallimatriisikomposiittien valmistamisessa lujitteina käytetään myös esimerkiksi jotain valmista komposiittimateriaalia, joka on muokattu muodoltaan kuiduksi. (Chawla & Chawla 2013, s. 1–55.)

Autojen ja työkoneiden valmistukseen metallimatriisikomposiiteista käytetään varsinkin erilaisia alumiinimatriisisiä komposiitteja. Matriisina olevan alumiinin laatu myös vaihtelee suuresti käyttötarkoituksen ja vaatimusten mukaisesti. Näissä komposiiteissa lujitteena toimii usein pii ja tarvittaessa komposiittiin lisätään joitain muita seosaineita, kuten happioksideja tai otsonia. Muita mahdollisia lujiteaineita ovat esimerkiksi titaanidiboridi tai zirkoniumdioksidi. (Chawla et al. 2013, s. 335–339; Koli, Agnihotri & Purohit 2015, s. 3032–3033.)

4.1.3 Hiili- ja lasikuidut

Hiilikuidut ja lasikuidut ovat komposiittimateriaaleja, joissa käytetään lujitteena pieniä hiili- tai lasikuituja. Kyseiset materiaalit voitaisiin myös laskea osaksi edellä esitettyjä luokkia, koska todella usein niiden yhteydessä käytetyt matriisit lukeutuvat joko polymeereihin tai metalleihin. Niiden käyttö auto- ja työkoneteollisuudessa on kuitenkin niin laajaa, että niitä voidaan tässä yhteydessä käsitellä omana materiaaliluokkana. Sekä hiilikuitu, että lasikuitu ovat moniin metalleihin verrattuna kevyitä materiaaleja, minkä takia niitä käytetään autojen ja työkoneiden valmistuksessa. Hiili- ja lasikuiduilla on myös monia samankaltaisia ominaisuuksia, mutta hiilikuitua voidaan pitää lasikuidun parempana ja kalliimpina vaihtoehtona, koska se on lasikuituun verrattuna lujempi ja jäykempi materiaali, mutta raaka-ainekustannuksiltaan kalliimpi. Hiilikuidun onkin ennustettu valtaavan markkinoita

lasikuidulta tekniikan kehittyessä ja sen kustannusten laskiessa. Vielä tätä ei kuitenkaan ole tapahtunut. (Strong 2008, s. 203–207; Park 2015, s. 1–8.)

Lasikuitujen raaka-aineina voidaan käyttää erilaisia lasilaatuja, jotka ovat E, S, C ja kvartsi. Eniten, varsinkin sovelluksissa, joissa lasikuitua käytetään esimerkiksi hiilikuidun sijasta, näistä laaduista autoteollisuudessa käytetään S-lasia. Kaikkein vähiten kyseisistä laaduista käytetään kvartsilasia. Näillä kaikilla laaduilla on omat mekaaniset materiaaliominaisuudet, jotka määräävät usein myös lopullisen komposiittimateriaalin ominaisuudet. (Strong 2008, s. 203–207.) Myös hiilikuiduissa lopullisen materiaalin ominaisuuksiin vaikuttaa eniten kuituina käytetyn hiilen ominaisuudet. Hiilikuidussa raaka-aineena käytetään yleensä hiiltä kolmessa eri muodossa, jotka ovat polyakryylinitriili, piki tai viskoosikuitu. Näistä polyakryylinitriili on kaikista käytetyin olomuoto. Näiden eri raaka-ainemuotojen valmistuksessa käytetään korkeita lämpötiloja (1500–3000 °C), jolloin ne saavat itselleen ominaiset lujuusominaisuudet, joita hyödynnetään lopullisessa komposiitissa. Vaikka hiilikuitu on materiaaliominaisuuksiltaan houkutteleva materiaali autojen ja työkoneiden valmistajille, rajaa sen raaka-aineiden ja näin ollen lopullisen tuotteen korkea hinta mahdollisia käyttökohteita. (Chawla et al. 2013, s. 8–16; Park 2015, s. 6–16, 18–21.)

4.1.4 Kestävä kehitys ja ympäristöystävälliset materiaalit

Varsinkin autonvalmistajien tulee kehittää jatkuvasti toimintaansa uusien säädösten ja ihmisten kulutushalujen mukaisesti. Tällä hetkellä autoteollisuudessa ja osittain myös työkoneteollisuudessa suurin vallitseva trendi on lisääntyvä ympäristöystävällisyys. Erityisesti kuluttajat haluavat kiinnittää entistä enemmän huomiota ympäristöystävällisyyteen, jolloin autonvalmistajien tulee kehittää tuotteitaan tämä huomioon ottaen, jotta he pystyisivät kilpailemaan muita valmistajia vastaan. Samalla myös erilaiset säädökset pakottavat laskemaan päästöjä ja ympäristökulutusta niin lopputuotteissa kuin niiden valmistuksessakin. Näin ollen erilaiset ympäristöystävälliset materiaalit ovat lisääntyneet autoissa ja työkoneissa. (Bunzel et al. 2014, s. 137–145; Poulidikou et al. 2016, s. 321.)

Yksi mahdollisuus vastata näihin uusiin vaatimuksiin on käyttää mahdollisimman kierrätettäviä, tai jo valmiiksi kierrätettyjä materiaaleja komposiittien valmistuksessa. Vielä

tällä hetkellä tällaisten materiaalien käyttö on vähäistä, mutta niiden käyttömahdollisuuksia tutkitaan jatkuvasti. Esimerkiksi itselujittuneita polymeerikomposiitteja tutkinut ryhmä (Poulikidou, Jerpdal, Björklund ja Åkermo (2016)) sai selville, että kyseinen materiaali saavuttaa samat ja vaaditut mekaaniset materiaaliominaisuudet kuin ei-kierrätettävästäkin materiaalista valmistetut kappaleet. Samalla sen ympäristönkuormittavuus oli kuitenkin käyttöiän aikana ja sen jälkeen pienempi muihin materiaaleihin verrattuna. (Poulikidou et al. 2016, s. 321–329.)

Vielä ympäristöystävällisempi vaihtoehto on käyttää vain luonnonkuituja lujitteina. Tämä lisää ympäristöystävällisyyttä varsinkin, jos luonnonkuiduilla korvataan erilaisia metallilujitteita. Toisen tutkimusryhmän (Mastura, Sapuan, Mansor ja Nuraini (2016)) tekemässä tutkimuksessa huomattiin sokeripalmun olevan paras kuitu ominaisuuksiensa puolesta lujitteeksi. Lähes samoihin ominaisuuksiin päästiin myös kenafian kuiduilla. (Mastura et al. 2016, s. 2203–2204, 2215–2217.)

4.1.5 Keraamiset komposiittimateriaalit

Myös keraamisia komposiitteja käytetään jonkin verran erilaisissa sovelluksissa autojen ja työkoneiden valmistuksessa. Näissä tapauksissa hyödynnetään keraamisten komposiittien hyviä materiaaliominaisuuksia, kuten hyvää lämmönkestävyyttä, kulutuskestävyyttä ja kovuutta. Keraamiset komposiitit ovat kuitenkin alttiita voimien aiheuttamille rasiuksille huonon muodonmuutoskyvyn takia, joten niiden käyttötarkoitukset eroavat useimmista muista komposiittimateriaaleista. Erilaiset lujitteet tuovat keraamisiin komposiitteihin usein vain kovuutta. (Campbell 2010, s. 573–577.)

Autoteollisuudessa keraamisten komposiittien raaka-aineina käytetään muun muassa piinitridiä sekä piikarbidia. Näitä materiaaleja käytetään jo mainittujen hyvien lämpöominaisuuksien takia varsinkin autojen moottoreissa. Muita hyviä ja kyseisissä sovelluksissa vaadittavia ominaisuuksia ovat esimerkiksi hyvät voiteluominaisuudet. Keraamisilla komposiiteilla pyritään pienentämään autojen päästöjä estämällä moottorissa tapahtuvia lämpöhäviöitä. Tähän kyseiset materiaalit soveltuvat esimerkiksi metalleja paremmin, koska ne eivät sido itseensä lämpöä metallien kaltaisella tavalla. (Sivakumar et al. 2014, s. 307–308.)

4.2 Käyttökohteet autoissa

Seuraavissa luvuissa esitellään nykyisiä sovelluskohteita erilaisille komposiittimateriaaleille autojen valmistuksessa. Nämä käyttökohteet on jaoteltu selkeyden vuoksi autojen rungoissa käytettyihin kappaleisiin sekä muihin osiin.

4.2.1 Sovelluskohteet autojen rungoissa

Kaikista pisimmälle erilaisten komposiittimateriaalien käytössä autoteollisuudessa on mennyt BMW, joka on luonut sähköautomallin i3 sekä hybridimallin i8. Varsinkin i3-mallissa käytettyjen komposiittimateriaalien määrä on todella suurta verrattuna saman hintaluokan muihin autoihin. i8-mallissa on käytetty myös suurin piirtein yhtä paljon erilaisia komposiittimateriaaleja, mutta varsinkin hiilikuidun käyttö on saman hintaluokan autoissa jo yleistä. Molemmissa näissä malleissa auton perusrunko on tehty kokonaan hiilikuidusta, mikä on varsinkin i3-mallin tapauksessa merkittävää, koska se on ensimmäinen suurissa erissä valmistettava massatuotantoauto, jossa runkomateriaalina on käytetty hiilikuitua. Kuvassa 1 on esitetty tämä i3-mallin runkorakenne sisätiloineen. Kuvasta käy hyvin ilmi kuinka paljon hiilikuitu kattaa koko auton kantavista materiaaleista. Ainoastaan keulan materiaalit eivät ole hiilikuitua. (BMW 2015.) Kyseisissä BMW:n malleissa on käytetty myös muiden osien valmistamiseen komposiittimateriaaleja. Esimerkiksi i3-mallin sisätiloissa on käytetty kuitukomposiitteja, joiden lujitteina toimivat erilaiset luonnonkuidut. Näitä osia ovat ovipaneelit sekä kojelauta. (BMW 2014.)



Kuva 1. BMW i3-mallin hiilikuidusta valmistettu runko (BMW 2015).

Myös monet muut valmistajat käyttävät hiilikuitua valmistamiensa autojen rungoissa. Varsinkin urheiluautojen valmistajat valmistavat BMW:n tapaan jopa kokonaisia runkoja hiilikuidusta. Tällaisia merkkejä ovat muun muassa Koenigsegg (Koenigsegg 2015), Ferrari (Ferrari 2016) ja Lexus (Lexus 2013). Esimerkiksi Koenigsegg on Agera RS-mallissaan valmistanut sekä rungon, että myös auton alustan hiilikuidusta mahdollisimman kevyen rakenteen takaamiseksi. Auton hiilikuitualusta painaakin vain 70 kg. (Koenigsegg 2015.) Samaa tekniikkaa auton massan pienentämisessä on käyttänyt myös Mercedes Benz, joka kehitti SLR Roadster-malliinsa hiilikuituisen alustarakenteen jo vuonna 2007 (Stewart 2007, s. 41). Chevroletkin käyttää Corvette Z06-mallissaan hiilikuidusta valmistettuja paneeleita alustassaan, jonka lisäksi myös konepellissä ja lokasuojissa on hiilikuitukomposiitteja (Koniuszewska & Kaczmar 2016, s. 11–12).

Muita kuin hiilikuitukomposiittimateriaaleja käytetään myös moniin muihin rungon osiin. BMW käyttää komposiittisten ovipaneelien lisäksi termoplastisesta olefiinista valmistettuja lokasuojia esimerkiksi X5-mallissaan. Teräkseen verrattuna kyseisellä materiaalivalinnalla on saavutettu jopa 50 % säästö kokonaismassassa. Samaa materiaalia käyttää myös esimerkiksi Jeep Wrangler-mallinsa etu- ja takapuskureissa. (Stewart 2007, s. 35–36.) Komposiitista valmistettuja puskureita käyttää myös MAN valmistamissaan rekka-autoissaan (Koniuszewska et al. 2016, s. 10–11). Rekoissa voidaan käyttää lisäksi myös komposiitista valmistettuja runkopaneeleja. Esimerkiksi MAN käyttää rekoissaan komposiittisia kattopaneeleja. (Bielefeldt, Walkowiak & Papacz 2014, s. 356.) Kuvassa 2 on havainnollistettu kyseisenlaisen paneelin sijoittamista ja kokoa rekan kyljessä. Näiden paneelien raaka-aineena käytetään yleensä erilaisia lujitettuja kertamuoveja. (Poulikidou et al. 2016, s. 321–322.) Myös Citroën käyttää komposiittisia paneeleja DS3-ralliautossaan muun muassa ovissa ja konepellissä. Näillä tavoitellaan suurta auton kokonaismassan keventymistä ja joidenkin osien kohdalla tätä onkin tapahtunut jopa 90 % aikaisemmin käytettyihin materiaaleihin verrattuna. (Koniuszewska et al. 2016, s. 12.)



Kuva 2. Havainnekuva rekka-auton komposiittisesta sivupaneelistä (Poulikidou et al. 2016, s. 322).

Muita runkorakenteissa olevia sovelluskohteita komposiittimateriaaleille autoissa ovat muun muassa Skoda Octaviassa ja Volkswagen Golfissa käytetyt komposiittiset etupään kannakkeet (Koniuszewska et al. 2016, s. 11). Komposiittimateriaaleja käytetään myös autojen takakonttien erilaisissa paneeleissa, kuten pohjissa (Strong 2008, s. 544). Komposiitista voidaan valmistaa myös vanteita, kuten Smart Forvisioniin kehitetyt vanteet osoittavat. Ne on valmistettu polymeerimatriisiin ja lasikuitujen muodostamasta materiaalista ja niillä on saavutettu 3 kg säästö yhtä vannetta kohden, jolloin auton kokonaismassa on saatu vähennettyä yhteensä 12 kg. (Koniuszewska et al. 2016, s. 6–7.)

4.2.2 Sovelluskohteet muissa osissa

Autojen valmistuksessa käytetään edellä esiteltyjen suurempien rungonosien lisäksi myös muita rungosta erillisiä erilaisista komposiiteista valmistettuja komponentteja. Varsinkin tehokkaammissa autoissa käytetään usein keraamisia jarrulevyjä. Esimerkiksi jo aikaisemmin komposiittimateriaalien käyttäjänä mainittu Koenigsegg käyttää autoissaan jarrulevyissään keraamista komposiittia (Koenigsegg 2015). Muita keraamisten jarrulevyjen käyttäjiä ovat esimerkiksi Ferrari ja Porsche, jonka käyttöön valmistettu jarrulevy on esitetty kuvassa 3 (Brembo). Näiden keraamisten jarrulevyjen valmistajista esimerkiksi Brembo käyttää materiaalina piitä matriisina ja lisää tähän lujitteeksi hiilikuitua, saaden aikaan kevyen, mutta kestävän rakenteen jarrulevyille (BSCCB 2017).



Kuva 3. Porschen käyttöön valmistettu keraaminen jarrulevy (Brembo).

Muita hiilikuitusovelluksia pienemmissä osissa ovat esimerkiksi erilaiset säiliöt. Varsinkin uusien polttoaineiden, kuten erilaisten kaasujen käyttö autojen voimanlähteenä on tuonut vaatimuksen kehitellä näille omia säiliöitä. Kyseisille säiliöille on vaatimuksena kestää korkeita sisäisiä paineita, koska nämä kaasut puristetaan säilytyksessä noin 25 MPa paineeseen. Samalla säiliöiden tulee kuitenkin olla myös kevyitä, jotta ne eivät kasvata auton kokonaismassaa liikaa. Tämän takia säiliöitä on alettu valmistaa hiilikuidusta. Kuvassa 4 on esitetty kaasulle suunniteltu hiilikuitusäiliö ja yksi sen mahdollisista sijoituspaikoista auton perässä takakontin alla. (Park 2015, s. 260–262.)



Kuva 4. Hiilikuidusta valmistettu kaasusäiliö ja sen sijoitus autossa (Park 2015, s. 260).

Myös autojen moottoreissa ja voimansiirrossa voidaan käyttää erilaisia komposiittimateriaaleja. Näissä sovelluksissa materiaalina toimii yleensä erilaiset metallimatriisikomposiitit. Varsinkin alumiinimatriisisia komposiitteja käytetään monien eri moottorinosien valmistamisessa. Niistä voidaan valmistaa esimerkiksi mäntiä tai männänvarsia hyvien lämpöominaisuuksien takia. Toisaalta erilaisista alumiinimatriisikomposiiteista voidaan valmistaa myös sylinteripesiä. Tällaisia on käytetty muun muassa joissain Hondan ja Toyotan moottoreissa. Tällä materiaalinvalinnalla on

saavutettu valurautaan verrattuna jopa 50 % säästöjä massassa. Alumiinipohjaista materiaalia on käytetty myös Chevrolet Corvetten vetoakselissa sekä joidenkin rumpujarrujen rumpujen valmistuksessa. (Chawla et al. 2013, s. 335–339.)

Muita käyttökohteita komposiiteille ovat esimerkiksi polttoainetankit sekä osat iskunvaimentimissa, kuten jousien tuennassa. Näissä osissa käytetään yleensä erilaisia polymeerimatriisikomposiitteja. Esimerkiksi tankit valmistetaan usein epoksimatriisista ja siihen lisätystä lujitekuiduista. Kuiduilla lujitetusta polypropeenista taas voidaan valmistaa autoihin vöitä. Tästä komposiittimateriaalista valmistettuja vöitä on käytetty monissa automalleissa, kuten Ford Focusissa, Volkswagen Golfissa ja Audi A3:ssa. (Bielefeldt et al. 2014, s. 355–356.)

4.3 Käyttökohteet työkoneissa

Myös työkoneissa komposiittimateriaaleja käytetään pääasiassa erilaisten rungonosien, kuten paneelien valmistamiseen. Esimerkiksi Mecalac käyttää osassa koneistaan kuitukomposiitista valmistettuja paneeleja. Tällaisia koneita ovat muun muassa MCR-mallien monitoimikoneet, joita voidaan käyttää niin kaivinkoneena, kuormaajana kuin nosturinakin. (Colombo 2013, s. 43.) Volvokin käyttää komposiitista valmistettuja huolto-ovia asfalttikoneissaan. Materiaalivalintaan on syynä kestävyys sekä helpompi käytettävyys muihin materiaaleihin verrattuna. (Volvo 2014.) Muista valmistajista myös esimerkiksi Bobcat hyödyntää komposiittimateriaaleja omissa koneissaan. Bobcat käyttää komposiittia muun muassa kaivinkoneidensa ovipaneelien valmistamiseen. Näin ollen koneen massaa pystytään keventämään ilman, että koneen kestävyysominaisuudet heikkenevät. (Bobcat 2017.) Toinen sovelluskohde Bobcatilla on hyötyajoneuvojen kuljetuslavojen valmistaminen. Nämä lavat valmistetaan komposiittimateriaalista, jotta ne takaisivat kevyemmän massan metalliin nähden, mutta kestäisivät vähintään yhtä hyvin suuria kuormia. Samalla komposiitilla voidaan taata myös pitkä kestoikä kovasta kulutuksesta huolimatta. (Bobcat 2015.)

Komposiitista voidaan valmistaa polttoainetankkeja autojen lisäksi myös työkoneisiin. Esimerkiksi John Deere on päättänyt vuoden 2017 malleista alkaen valmistaa 9R-sarjansa traktoreiden tankit komposiittimateriaalista. Tällä materiaalivalinnalla traktorin tankki on

voitu muotoilla vapaammin, jolloin siitä on voitu tehdä sulavalinjaisempi paremman näkyvyyden ja ulkonäön takaamiseksi. Samalla on voitu parantaa myös tankin käytettävyyttä lisäämällä polttoaineentäyttöaukko molemmille puolille tankkia. (John Deere 2016.) Komposiitteja voidaan hyödyntää myös muunlaisissa kuin perinteisissä pyörillä kulkevissa työkoneissa rukojen materiaalina. Hinowa on esimerkiksi alkanut valmistaa henkilönostimiensa erilaisia korien osia komposiittimateriaaleista. Tähän muutokseen ovat vaikuttaneet turvallisuus ja tehokkuus. (Hinowa.)

Muista erikoisemmista sovelluskohteista voidaan mainita muun muassa Sandvikin suunnittelema kaivoksien kuljettimissa käytetty komposiittirulla. Komposiittimateriaalilla saavutetaan niin kustannussäästöjä, keveyttä, hiljaisuutta kuin kestävyttäkin muihin materiaaleihin verrattuna. Esimerkiksi teräsrulliin verrattuna massansäästöä saadaan aikaan 70 % ja myös muovirulliin verrattuna 40 %. Komposiitti materiaalina mahdollistaa myös monenlaiset käyttöympäristöt hyvän korroosionkeston ja jo mainitun hiljaisuuden ansiosta. Komposiitti kestää esimerkiksi suolaista merivettä paremmin kuin rakenneteräs. Kestävytensä, helppohoitoisuutensa ja helpon asennettavuuden takia kyseisten komposiittirullien mahdollistamat kustannussäästöt voivat olla jopa 20 %. Tämä muodostuu osaksi pienemmistä huoltokustannuksista (niin ajallisesti kuin materiaaleihin kuluvan rahan takia), mutta myös pienemmästä energiankulutuksesta muihin rullamateriaaleihin verrattuna. (Sandvik 2016.)

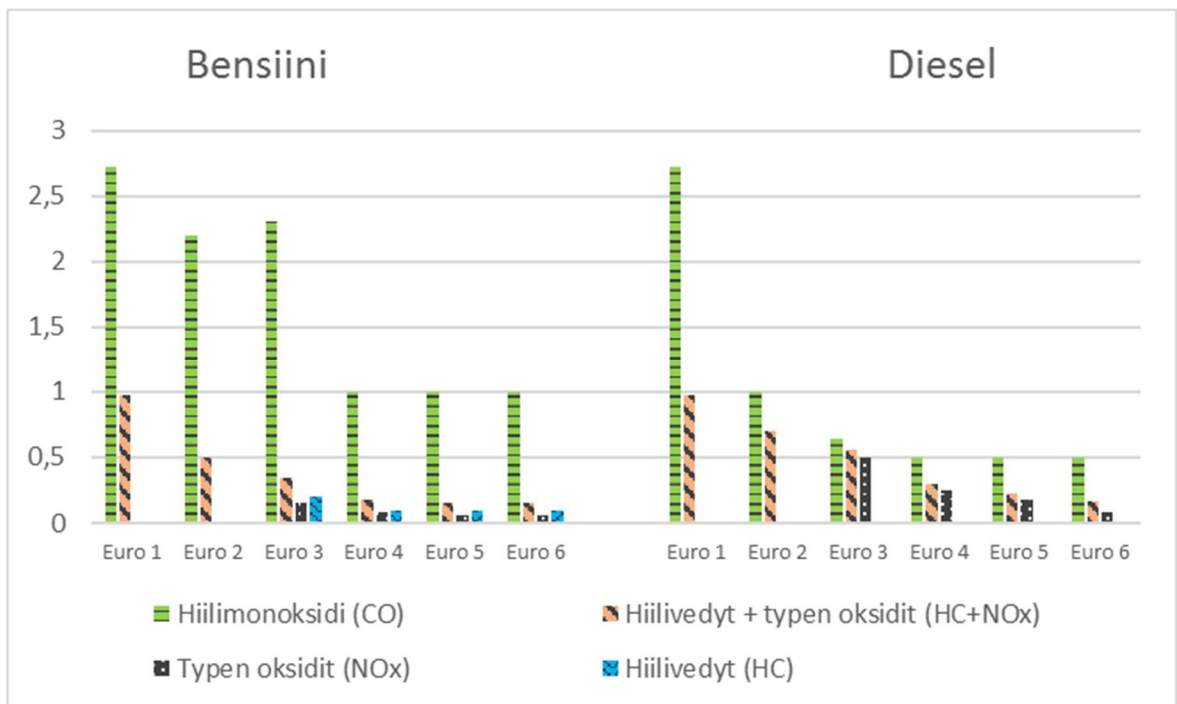
Toinen mielenkiintoinen ratkaisu komposiittimateriaalien hyödyntämiseen ovat Carbo-Linkin suunnittelemat hiilikuitua hyödyntävät kaapelit, joita käytetään varsinkin Liebherrin nostureissa erilaisten konttien tai muiden painavien kappaleiden nostamisessa. Näiden kaapeleiden tulee kestää 75–130 tonnin paino jopa kolmen miljoonan noston työsykleissä. Samalla kaapelit ovat jatkuvasti altistuneena erilaisille ilmastoille ja niillä tulee olla hyvä säänkesto. Myöskään kova tuuli ei saa aiheuttaa kaapeleihin suuria värinöitä, joten ne on päällystetty suojaavalla materiaalilla mahdollisimman pitkän kestoian ja hyvän turvallisuuden takaamiseksi. Kuvassa 5 on esitetty nosturi nostamassa tuulivoimalan lapoja. Tässä nosturissa on käytössä Carbo-Linkin valmistama komposiittimateriaalista valmistettu kaapeli. (Carbo-Link.)



Kuva 5. Komposiitista valmistettua kaapelia käyttävä nosturi nostamassa tuulivoimalan lapoja (Carbo-Link).

4.4 Syyt komposiittimateriaalien käyttöön

Pääasiallinen syy komposiittimateriaalien käytön yleistymiseen ovat tiukentuneet autojen päästörajat. Kuvassa 6 on esitetty kuvaajien muodossa vuosien aikana muuttuneet Eurostandardin mukaiset päästörajat eri päästöluokille bensiini- ja dieselmootoreihin jaoteltuna. Näistä nähdään selkeästi, miten päästörajat ovat muuttuneet tiukentuen jatkuvasti. Koska päästörajat ovat laskeneet jatkuvasti on autoteollisuuden tullut kehitellä tapoja laskea valmistamiensa autojen päästöjä. Yksi tehokas keino tähän on ollut autojen massan keventäminen. Esimerkiksi hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää jopa 13 grammaa kilometriä kohden, jos auton massa kevenee 100 kilogrammalla (Bielefeldt et al. 2014, s. 352). Tästä johtuen aikaisemmin käytetyistä materiaaleista esimerkiksi metalleja kevyemmät komposiittimateriaalit ovat olleet hyvä tapa saada pienennettyä autojen massoja ja näin ollen auttaa päästörajojen sallittujen arvojen alittamiseen (Koniuszewska et al. 2016, s. 1–2, 6–7).



Kuva 6. Euro-standardien mukaiset päästörajat bensiini- ja dieselmootoreille (yksikkönä g/km) (mukailien Automobile Association 2015).

Päästörajat ja niiden seurauksena autoissa tavoiteltu keveys rajojen ylittämisen estämiseksi on vaikuttanut runkomateriaalien lisäksi myös moottorin osissa käytettyihin materiaaleihin. Aiemmin esitellyt erilaiset materiaalit, kuten keraamiset komposiittimateriaalit on kehitetty juuri näitä päästörajoja ja päästöjen vähentämistä silmällä pitäen. Esimerkiksi dieselmootoreissa käytetyillä keraamisista komposiiteista valmistetuilla osilla on pystytty vähentämään varsinkin erilaisia hiukkaspäästöjä. Tämä johtuu keraamisten komposiittien hyvistä lämpöominaisuuksista, jolloin lämpöhäviöt ovat pienempiä kuin monilla muilla materiaaleilla. (Sivakumar et al. 2014, s. 307–308.) Samalla moottoreissa käytettävillä alumiinimatriisikomposiiteilla pystytään myös vaikuttamaan massaan keventävästi (Chawla et al. 2013, s. 335–339).

Muita syitä komposiittimateriaalien käytön lisääntymiseen ovat kuluttajien entistä ympäristöystävällisemmät valinnat ja vaatimukset hankkimiaan tuotteita kohtaan, sekä autonvalmistajien jatkuva kilpailu toisiaan vastaan. Uudet kulutustottumukset pakottavat autoteollisuutta muuttamaan materiaalejaan ympäristöystävällisemmiksi, jotta ne pärjäisivät kilpailussa muita valmistajia vastaan. (Bunzel et al. 2014, s. 137–145.)

Komposiittimateriaalit antavatkin hyvät edellytykset tähän, koska niiden raaka-aineina voidaan käyttää esimerkiksi monia erilaisia luonnonkuituja, jotka ovat ympäristöystävällisempiä kuin metallit (Mastura et al. 2016, s. 2203–2204, 2215–2217). Kilpailullisuutta autoteollisuuden sisällä lisää myös kaikkien valmistajien halu kehittää tuotteitaan jatkuvasti. Valmistajat haluavat luoda uusia innovaatioita parantaakseen tuotteitaan ja taatakseen itselleen hyvän myyntiasetelman muita valmistajia kohtaan. (Bunzel et al. 2014, s. 137–145.) Ympäristöystävällisten komposiittimateriaalien käyttöä lisää myös Euroopan unionin asettama direktiivi, jonka vaatimuksena autonvalmistajille on uusien autojen materiaalien mahdollisimman suuri kierrätettävien materiaalien osuus. Tämän direktiivi nojalla autojen kierrätettävien osien osuuden tulee olla vähintään 85 % auton kokonaismassasta. (2005/64/EY.)

5 POHDINTA

Tutkimuksella saavutettiin hyvin sille asetettu tavoite, eli erilaisten komposiittimateriaalien hyödyntämisen tutkiminen autojen ja työkoneiden valmistuksessa. Samalla pystyttiin vastaamaan hyvin ennen tutkimusta asetettuihin tutkimuskysymyksiin ja tutkimuksen aikana selvisi mitä materiaaleja käytetään ja miksi, mihin sovelluksiin näitä materiaaleja käytetään sekä mitä voisivat olla mahdolliset tulevaisuudessa käytössä olevat materiaalit ja näiden sovelluskohteet.

Tutkimuksen tuloksista havaitaan komposiittimateriaalien olevan selvästi jo merkittävä osa kaikista autoteollisuudessa käytetyistä materiaaleista. Samalla erilaisille komposiittimateriaaleille on löydetty monia erilaisia käyttökohteita ottamalla huomioon näiden materiaalien tarjoamat laajat ja toisistaan eroavat ominaisuudet. Esimerkiksi erilaisten paneelien valmistaminen on ollut yleistä jo pidemmän aikaa, mutta viime vuosina yleistyneet komposiittimateriaalien sovellukset moottorinosissa kertovat, kuinka laaja-alaisesti komposiittimateriaaleja voidaankaan autojen valmistuksessa käyttää.

Osittain tämä muutos kohti laajempaa komposiittimateriaalien käyttöä on johtunut autoteollisuudelle asetetuista säädöksistä, eli muutos on ollut pakon sanelemaa, jotta autonvalmistajat pysyisivät heille asetetuissa päästörajoissa. Monissa tapauksissa komposiittimateriaalien lisääntyminen on kuitenkin johtunut ainoastaan näiden materiaalien tarjoamista paremmista ominaisuuksista muihin materiaaleihin verrattuna. Varsinkin työkoneiden valmistuksessa tämä on suurin syy komposiittimateriaalien yleistyvään käyttöön, koska työkoneille ei ole ainakaan vielä asetettu yhtä tiukkoja ympäristömääräyksiä kuin autoille. Näistä komposiittien huomatuista hyvistä ominaisuuksista johtuen niitä on alettu kehittämään entistä enemmän ja niistä on löydetty uusia käyttökelpoisia ominaisuuksia erilaisissa sovelluksissa. Samalla komposiittimateriaalien raaka-aine ja valmistuskustannukset ovat laskeneet valmistustekniikoiden kehittyessä ja näitä materiaaleja voidaan käyttää myös halvempien hintaluokkien tuotteissa. Hyvänä esimerkkinä tästä BMW:n valmistama i3-mallin hiilikuiturunko, jollaisia on aikaisemmin voitu suurten kustannusten takia käyttää vain kalliimmissa urheiluautoissa.

Myös ympäristöystävällisyys on merkittävässä asemassa komposiittimateriaalien käyttöä tutkittaessa. Jatkuvasti tiukentuvat ympäristösäädökset vaikuttavat myös raaka-aineina käytettyihin materiaaleihin. Komposiittimateriaalit mahdollistavat erilaisten luonnonmateriaalien, kuten luonnonkuitujen käytön, jolloin näiden materiaalien kuormitus luontoa kohtaan on pienempää kuin monilla muilla materiaaleilla. Samaa aikaan komposiittimateriaaleja kehitetään jatkuvasti niin, että niitä voitaisiin valmistaa jo kierrätetyistä materiaaleista ja ne olisivat itsekin kierrätettäviä. Näin autoteollisuus pystyy vastaamaan paremmin ympäristötietoisempien kuluttajien uusiin vaatimuksiin mahdollisimman vihrein arvoin tuotetuista tuotteista.

5.1 Tulevaisuus

On helppo kuvitella komposiittimateriaalien käytön vain lisääntyvän tulevaisuudessa. Jatkuvasti kehittyvät valmistustekniikat tulevat luultavasti laskemaan edelleen komposiittimateriaalien hintoja, jolloin niitä voidaan käyttää kaikkien hintaluokkien autoissa yhtä laajasti, kuin nykyään kalliimmissa autoissa. Jatkuvasti uusia innovaatioita kehittävä teollisuudenala, kuten autoteollisuus, tulee varmasti hyödyntämään tekniikan kehittymistä parhaalla mahdollisella tavalla ja käyttää tuotteissaan vain parhaita mahdollisia materiaaleja ominaisuuksien maksimoimiseen ja kustannusten minimoimiseen. Esimerkiksi autojen kattopaneeleja voitaisiin valmistaa vielä enemmän komposiittimateriaaleista, koska niillä voidaan saavuttaa nykyisten metalleista valmistettujen paneelien ominaisuudet, mutta jopa 40 % kevyemmällä massalla (Borazjani & Belingardi 2017. S. 49–61).

Samalla erilaiset ympäristömääräykset tulevat varmasti edelleen laskemaan päästörajoja ja vaatimaan autoteollisuudelta entistä ympäristöystävällisempien ja luontoa vähemmän kuormittavien materiaalien käyttöä. Koska komposiittimateriaalit tarjoavat näihin haasteisiin hyviä ratkaisuja, ovat ne tulevaisuudessa luonnollinen valinta erilaisten auton osien valmistusmateriaaleiksi. Tulevaisuudessa hybridi- ja sähköautot tulevat myös mitä luultavimmin yleistymään ja näissä tarvitaan erilaisia ominaisuuksia esimerkiksi autojen rungon osilta, jotta autoon lisättävien akkujen massa saadaan kompensoitua kevyemmällä runkorakenteilla. Samalla tulee myös varmistaa, että akut on varastoitu autoon turvallisesti, ettei auton käyttövoimana toimiva sähkö aiheuta turvallisuusriskejä missään

tilanteissa. Näissä sovelluksissa voidaan hyödyntää sähköä kokonaan johtamattomia tai huonosti johtavia komposiitteja.

Jossain vaiheessa komposiittimateriaalien käyttö saattaa jopa kaupallisissa autoissa kasvaa niin suureksi, että lähes koko autossa ei käytetä muita kuin komposiittimateriaaleja. Tällaisia konseptiautoja on jo valmistettu ja esimerkiksi UPM valmisti yhdessä Metropolia Ammattikorkeakoulun kanssa auton, jossa on käytetty erilaisia komposiittimateriaaleja niin rungossa, ulkopaneeleissa kuin sisustan materiaaleissakin. Auto on myös Euroopassa tieliikennehyväksytty, joten se kertoo näiden materiaalien läpäisevän myös tarkat turvamääräykset. Tämä auto on esitetty kuvassa 7. (UPM 2014.)



Kuva 7. UPM Biofore-konseptiauto, joka on valmistettu suurimmaksi osaksi erilaisista komposiittimateriaaleista (Valve 2015).

5.2 Tutkimuksen luotettavuus ja jatkotutkimusehdotukset

Tutkimus voisi olla luotettavampikin, koska siinä on käytetty lähteinä vain muiden luomaa kirjallista materiaalia. Tutkimukseen olisi voinut esimerkiksi liittyä joku mekaaninen koe erilaisten komposiittimateriaalien ominaisuuksien tutkimiseen, jolloin mahdollisten sovelluskohteiden selvittäminen olisi ollut laajempaa. Nyt tämä jouduttiin tekemään muiden luoman aineiston pohjalta. Samalla on huomioitava, että monet autonvalmistajat eivät kerro

kovinkaan selkeästi autoissaan käyttämistä materiaaleista ja niiden valmistustekniikoista. Varsinkin tällä hetkellä kehityksessä olevista materiaaleista on erittäin vaikea löytää tietoa, koska valmistajat eivät halua tuoda näitä tietoja julkisuuteen, jotta nämä arkaluontoiset tiedot eivät paljastuisi heidän kilpailijoilleen. Aina myöskään nykyisistä sovelluksista ei samasta syystä kerrota usein kuin pintapuolisesti. Vaikka tässä onkin esiteltynä monia tutkimuksen luotettavuutta heikentäviä seikkoja, käytettiin tutkimuksen tekemiseen kuitenkin laajaa ja monien eri kirjoittajien teoksista ja muista lähteistä koottua aineistoa, jolloin pystyttiin vertailemaan eri lähteiden antamia tietoja keskenään varmemman tutkimustuloksen takaamiseksi. Näin ollen tutkimuksesta tuli saatavilla olevan kirjallisen tiedon puitteissa luotettava.

Tutkimusta voisi jatkaa selvittämällä vielä tarkemmin erilaisia mahdollisia käyttökohteita komposiittimateriaaleille autoteollisuudessa, sekä myös muillakin teollisuudenaloilla. Esimerkiksi joidenkin autonvalmistajien kanssa tehty yhteistyö laajentaisi tuloksia merkittävästi. Myös erilaisten komposiittimateriaalien tarkemmalla tutkimisella ja erilaisilla kokeilla voitaisiin selvittää, ovatko näiden materiaalien ominaisuudet soveltuvia myös muihin kuin jo käytössä oleviin kohteisiin. Samalla pystyttäisiin kokeilemaan myös uusien materiaalien muodostamista erilaisista raaka-aineista ja mahdollisten sovelluskohteiden löytämistä näille materiaaleille. Yksi merkittävä jatkotutkimusmahdollisuus on tietysti myös autoteollisuudessa käytössä olevan tekniikan kehittymisen ja uusien, ehkä tässä tutkimuksessa esiteltyjen mahdollisten käyttökohteiden toteutumisen seuraaminen.

6 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli selvittää kuitukomposiittien käyttöä autojen ja työkoneiden valmistuksessa. Minkälaisia komposiittimateriaaleja nykyään käytetään autoteollisuudessa ja miksi, sekä mitä osia näistä valmistetaan. Tutkimuksen tavoitteeseen pääsemiseksi asetettiin neljä tutkimuskysymystä, kuten mitä komposiittimateriaaleja tällä hetkellä käytetään ja mihin tarkoituksiin.

Tutkimus suoritettiin induktiivisena kvalitatiiviseen lähdekirjallisuuteen perustuvana kirjallisuustutkimuksena. Lähdekirjallisuutena käytettiin erilaisia erillisteoksia sekä autonvalmistajien internet-sivuja ja muita esitteitä. Lähdekirjallisuus pyrittiin valitsemaan mahdollisimman uusista teoksista ajantasaisen tiedon takaamiseksi. Samalla pyrittiin laajuuteen ja yksityisten kirjoittajien luoman kirjallisuuden suosimiseen, jotta tutkimuksen tulos olisi mahdollisimman luotettava. Tutkimuksen tekijän rooli oli mahdollisimman objektiivinen ja tutkimuksessa tuotiin esille kaikki havaitut tulokset.

Tuloksina tutkimuksessa saatiin selville monia erilaisia käytettyjä komposiittimateriaaleja, jotka voitiin jakaa viiteen eri luokkaan. Nämä luokat olivat polymeerimatriisi-, metallimatriisi-, hiili- ja lasikuitu-, luonnonkuitu- sekä keraamiset komposiitit. Näille eri komposiittimateriaaleille löydettiin myös monia erilaisia käyttökohteita, joista pääasiallisimpia olivat erilaiset rungon osat ja ulkopaneelit. Muita sovelluskohteita olivat moottorinosat kuten sylinterit, erilaiset tankit sekä jarrulevyt. Näihin kohteisiin komposiittimateriaalit soveltuvat hyvin, koska ne ovat kevyitä, mutta oikeilla lujitteilla lujia ja jäykkiä. Autojen ja työkoneiden massan keventämisen lisäksi syitä komposiittimateriaalien käyttöön ovat tiukentuneet ympäristösäädökset joiden takia käytetään aikaisempaa ympäristöystävällisempiä materiaaleja ja esimerkiksi luonnonkuiduilla lujitetut komposiitit soveltuvat erittäin hyvin tähän tarkoitukseen.

Tulevaisuuden näkymistä on vaikea sanoa mitään varmaa, mutta oletettavaa on, että ympäristösäädökset tulevat vain tiukkenemaan, jolloin komposiittimateriaalien käytön määrä lisääntyy. Samalla tekniikka tulee kehittymään jatkuvasti ja mahdollistaa

aikaisemmin liian kalliiden raaka-aineiden kuten hiilikuidun käyttämisen myös halvemman hintaluokan tuotteissa. Autojen ja työkoneiden valmistajat haluavat myös jatkuvasti parantaa tuotteitaan, joten komposiittien kehitystä tullaan varmasti jatkamaan tulevaisuudessakin mahdollisimman kehittyneiden osien takaamiseksi. Samalla myös edellä mainitut luonnonkuidut ja erilaiset kierrätysmateriaalit tulevat mitä luultavimmin lisäämään suosiotaan.

Tutkimuksen tulokset takasivat tavoitteeseen pääsyn, eli komposiittimateriaalien käytön kartoittamisen autojen ja työkoneiden valmistuksessa. Samalla pystyttiin vastaamaan kaikkiin ennen tutkimusta asetettuihin kysymyksiin. Tutkimuksen luotettavuus oli lähteiden melko suuren määrän ja riippumattomuuden takia hyvä, mutta se olisi voinut olla vielä parempi, jos autonvalmistajat kertoisivat avoimemmin käyttämistään materiaaleista. Myös jonkinlainen komposiittimateriaalien mekaaninen koe olisi voinut osoittaa lähdekirjallisuudesta löytyneitä tietoja varmemmiksi ja näin ollen lisätä luotettavuutta. Tästä päästäänkin jatkotutkimusmahdollisuuksiin, joita olisivat tällainen koe, jolla voitaisiin mahdollisesti myös tutkia mahdollisuutta kehittää uusia komposiittimateriaaleja autoteollisuuden käyttöön. Toinen jatkotutkimuskohde voisi olla tässä tutkimuksessa esiin tulleiden ja esille nostettujen tulevaisuuden materiaalien ja sovellusten toteutumisen seuraaminen.

LÄHTEET

2005/64/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 26.10.2005 moottoriajoneuvojen tyyppihyväksynnästä niiden uudelleenkäytettävyyden, kierrätettävyyden ja hyödynnettävyyden osalta sekä neuvoston direktiivin 70/156/ETY muuttamisesta. EYVL N:o L 310/10, 25. 11. 2015.

Automobile Association. 2015. Limits to improve air quality and health [verkkodokumentti]. Julkaistu 2015, päivitetty 1.10.2015. [Viitattu 19.3.2017]. Saatavissa: <https://www.theaa.com/driving-advice/fuels-environment/euro-emissions-standards>

Berthelot, J. 2012. Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis. New York: Springer-Verlag New York. 646 s. (Mechanical Engineering Series)

Bielefeldt, K., Walkowiak, J. & Papacz, W. 2014. Composites and reinforced plastics in the automotive industry. Applied Mechanics and Materials, 611. S. 352–357.

BMW. 2014. Emission-Free into the Future [verkkodokumentti]. Julkaistu 2014. [Viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: <http://www.bmw.com/com/en/insights/corporation/bmwi/sustainability.html>

BMW. 2015. The Future of Urban Mobility [verkkodokumentti]. Julkaistu 2014, päivitetty 18.3.2015. [Viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: <http://www.bmw.com/com/en/insights/corporation/bmwi/concept.html>

Bobcat. 2017. Protected Components [verkkodokumentti]. Julkaistu 2017. [Viitattu 26.3.2017]. Saatavissa: <http://www.bobcat.com/excavators/features/protected-components>

Bobcat. 2015. Bobcat Company introduces Model Year 15 3600 and 3650 utility vehicles [verkkodokumentti]. Julkaistu 2015. [Viitattu 26.3.2017]. Saatavissa:

<http://www.bobcat.com/company-info/news-media/press-release-article2?3600-3650-utility-vehicles>

Borazjani, S. & Belingardi, G. 2017. Lightweight design: detailed comparison of roof panel solutions at crash and stiffness analyses. *International Journal of Crashworthiness*, 22: 1. S. 49–62.

Brembo. Carbon Ceramic Discs [verkkodokumentti]. [Viitattu 18.3.2017]. Saatavissa: <http://www.brembo.com/en/car/original-equipment/products/carbon-ceramic-discs>

BSCCB. 2017. Material [verkkodokumentti]. Julkaistu 2017. [Viitattu 18.3.2017]. Saatavissa: <http://www.carbonceramicbrakes.com/en/technology/Pages/material.aspx>

Bunzel, W. M. & Ruhnau, T. 2014. Drivers of Sustainability in the Automotive Industry. In: Denbratt, I., Subic, A. & Wellnitz, J. *Sustainable Automotive Technologies 2014*. Cham: Springer International Publishing. S. 137–145. (Lecture Notes in Mobility 12/2015)

Campbell, F. C. 2010. *Structural Composite Materials*. Materials Park: ASM International. 612 s.

Carbo-Link. Exclusive Carbon Cable Supplier [verkkodokumentti]. [Viitattu 29.3.2017]. Saatavissa: <http://www.carbo-link.com/liebherr/>

Chawla, K. K. & Chawla, N. 2013. *Metal Matrix Composites*. Second edition. New York: Springer-Verlag. 370 s.

Chung, D. D. L. 2010. *Composite Materials: Science and Applications*. Second edition. Lontoo: Springer Science & Business Media. 371 s.

Colombo, M. 2013. Multifunctional Speed. *Costruzioni*, February 2013. S. 38–45. Kääntänyt Mecalac.

Elmarakbi, A. 2013. *Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. 472 s.

Ferrari. 2016. LaFerrari [verkkodokumentti]. Julkaistu 2016. [Viitattu 18.3.2017]. Saatavissa: http://auto.ferrari.com/en_EN/sports-cars-models/car-range/laferrari/#innovations-chassis-2

Gibson, R. F. 2016. *Principles of Composite Material Mechanics*. Fourth Edition. Boca Raton: Taylor & Francis Group. 676 s.

Hinowa. Lightlift 20.10 Mk2 [verkkodokumentti]. [Viitattu 29.3.2017]. Saatavissa: <http://www.hinowa.com/en/products/tracked-aerial-platforms/performance-15-70-17-75mk2-20-10mk2-26-14/lightlift-20-10-mk2>

Hoa, S. V. 2009. *Principles of the Manufacturing of Composite Materials*. Lancaster: DEStech Publications, Inc. 343 s.

John Deere. 2016. New Composite Fuel Tank for John Deere 9R Series Tractors [verkkodokumentti]. Julkaistu 2016. [Viitattu 29.3.2017]. Saatavissa: https://www.deere.com/en_US/corporate/our_company/news_and_media/press_releases/2016/agriculture/2016aug30-fuel-tank.page

Koenigsegg. 2015. Agera RS [verkkodokumentti]. Julkaistu 2015. [Viitattu 18.3.2017]. Saatavissa: <http://koenigsegg.com/agera-rs/>

Koli, D. K., Agnihotri, G. & Purohit, R. 2015. *Advanced Aluminium Matrix Composites: The Critical Need of Automotive and Aerospace Engineering Fields*. *Materials Today: Proceedings*, 2: 4–5. S. 3032–3041.

Koniuszewska, A. G. & Kaczmar, J. W. 2016. *Application of Polymer Based Composite Materials in Transportation*. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 32: 1. S. 1–23.

Lexus. 2013. Lexus LFA [verkkodokumentti]. Julkaistu 2013. [Viitattu 18.3.2017]. Saatavissa: <http://www.lexus.com/models/LFA/>

Mastura, M. T., Sapuan, S. M., Mansor, M. R. & Nuraini, A. A. 2016. Environmentally conscious hybrid bio-composite material selection for automotive anti-roll bar. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89: 5. S. 2203–2219.

Park, S-J. 2015. *Carbon Fibers*. Dordrecht: Springer Netherlands. 330 s. (Springer Series in Materials Science 210/2015)

Poulikidou, S., Jerpdal, L., Björklund, A. & Åkermo, M. 2016. Environmental performance of self-reinforced composites in automotive applications — Case study on a heavy truck component. *Materials & Design*, 103. S. 321–329.

Sandvik. 2016. Sandvik Launches New Generation of Composite Rollers [verkkodokumentti]. Julkaistu 2016. [Viitattu 29.3.2017]. Saatavissa: <http://mining.sandvik.com/en/news-media/sandvik-launches-new-generation-of-composite-rollers>

Sivakumar, G., Nanda Kumaran, R., Varun Kumar, M. G. & Senthil Kumar, S. 2014. Improvement of Performance and Emission Characteristics of Diesel Engines Using TBC and Emerging Techniques: A Review. In: Bajpai, R. P., Chandrasekhar, U. & Arankalle, A. R. *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering*. New Delhi: Springer India. S. 307–317. (Lecture Notes in Mechanical Engineering 14/2014)

Stewart, R. 2007. *Automotive Plastics: Innovative Applications Continue*. *Plastics Engineering*, 63: 9. S. 32–46.

Strong, A. 2008. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*. Second edition. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers. 620 s.

UPM. 2014. The Biofore Concept Car [verkkodokumentti]. Julkaistu 2014. [Viitattu 20.3.2017]. Saatavissa: http://www.upm.com/upmcc-en/Documents/Biofore_Concept_Car_Factsheet_2014.pdf

Valve. 2015. Kansainvälinen mediatapaus, Biofore Concept Car, ylitti uutiskynnykset maailmalla [verkkodokumentti]. Julkaistu 2015. [Viitattu 20.3.2017]. Saatavissa: <https://www.valve.fi/biofore-concept-car>

Volvo. 2014. P7820c ABG, P8820c ABG [verkkodokumentti]. Julkaistu 2014. [Viitattu 29.3.2017]. Saatavissa: https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global/products/asphalt-pavers/abg-tracked-pavers/brochures/brochure_p7820c_p8820c_t4i_en_21_20029045_e.pdf

Ye, J. 2011. Laminated Composite Plates and Shells: 3D Modelling. Lontoo: Springer Science & Business Media. 273 s.