Tampereen yliopisto

Mohammed Moursad

HIILIKUIDUN KIERRÄTYS JA UUDELLEENVALMISTUS

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Joe David
Toukokuu 2025

TIIVISTELMÄ

Mohammed Moursad: Hiilikuidun kierrätys ja uudelleen valmistus
Kandidaatin työ
Tampereen yliopisto
Konetekniikan kandidaattiohjelma
Huhtikuu 2025

Hiilikuituvahvisteiset polymeerikomposiitit ovat materiaaleja, jotka yhdistävät lujuuden ja keveyden. Niiden kierrättämisestä on vähän julkista keskustelua, eikä hiilikuitujätteille ole Suomessa omaa lajittelua. Tässä työssä tarkastellaan, miten kierrätetty hiilikuitu vertautuu neitseelliseen hiilikuituun sekä voidaanko kierrätettyä hiilikuitua pitää varteenotettavana vaihtoehtona ominaisuuksiensa puolesta.

Kirjallisuuskatsaus alkaa hiilikuidun erilaisista kierrätysmenetelmistä, jossa pyritään johdattelemaan lukija tämänhetkisiin kierrätysprosesseihin ja niiden eroihin. Aineistona työssä on käytetty ajankohtaisia lehtiartikkeleita, alan kirjallisuutta sekä raportteja. Kierrätysprosesseista jatketaan kierrätetyn hiilikuidun valmistamiseen, hiilikuidun valmistusprosessin mukaisesti. Kierrätetyn hiilikuidun valmistus luvussa kirjoittaja on halunnut ottaa mukaan myös perinteisen valmistustavan lisäksi 3D-tulostuksen, jotta lukija ymmärtää aiheen sidosteisuuden eri kierrätysmenetelmien ja valmistusten välillä.

Mekaanisia ominaisuuksia vertailtiin eri materiaalien välillä aikaisempiin tutkimuksiin perustuen. Tulosten esittämisessä hyödynnetään fysikaalisia suureita, jotka ovat yleisessä käytössä materiaalitekniikassa ja komposiittiteollisuudessa. Työssä vertaillaan sekä ympäristö- että taloudellisia vaikutuksia neitseellisen ja kierrätetyn hiilikuidun välillä.

Tutkimusten perusteella kierrätetty hiilikuitu voi korvata neitseellisen hiilikuidun tietyissä käyttökohteissa, edellyttäen että kierrätysmenetelmä on oikein valittu ja valmistusprosessi optimoitu. 3D-tulostuksessa kierrätetty hiilikuitu on osoittautunut toimivammaksi kuin neitseellinen hiilikuitu. Yleisesti ottaen hiilikuidun uudelleenkäyttö ja -jalostus mahdollistavat merkittävästi alhaisemmat ympäristövaikutukset, ja kierrätetyn materiaalin matalammat valmistuskustannukset voivat osaltaan edistää sen käyttöönottoa teollisuudessa.

Avainsanat: hiilikuitu, kierrätys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Mohammed Moursad: Recycling and remanufacturing of carbon fiber
Bachelor's thesis
Tampere University
Bachelor's programme in mechanical engineering
April 2025

Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites are materials that combine strength and lightness. Despite their growing use, there is little public discussion about their recycling, and in Finland, carbon fiber waste is not sorted separately. This thesis examines how recycled carbon fiber compares to virgin carbon fiber and whether recycled carbon fiber can be considered a viable alternative based on its properties.

The literature review begins with an overview of different recycling methods for carbon fiber, aiming to introduce the reader to the current recycling processes and their distinctions. The material used in this thesis includes recent journal articles, industry literature, and reports. Following the recycling processes, the focus shifts to the manufacturing of recycled carbon fiber, in line with the typical carbon fiber production process. In the chapter on recycled carbon fiber manufacturing, the author has chosen to include not only traditional production methods but also 3D printing, to demonstrate the interconnection between recycling methods and manufacturing technologies.

Mechanical properties are compared between materials based on previous studies. The results are presented using physical quantities commonly applied in materials engineering and the composites industry. The thesis also compares the environmental and economic impacts of virgin and recycled carbon fiber.

Based on the research, recycled carbon fiber can replace virgin carbon fiber in certain applications, provided that the recycling method is appropriately chosen, and the manufacturing process is optimized. In 3D printing, recycled carbon fiber has proven to perform better than virgin carbon fiber. Overall, the reuse and reprocessing of carbon fiber allow for significantly lower environmental impacts, and the lower production costs of recycled material may encourage its wider adoption in industry.

Keywords: carbon fiber, carbon fibre, recycle

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei
☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: ChatGPT

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: ChatGPT 4.0

Käyttötarkoitus: Oikoluku, lähdetekstien kääntäminen sekä tiivistelmän kääntäminen

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: 2, 3, 4, 5, abstract

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1

2. HIILIKUIDUN KIERRÄTYS 2

2.1 Mekaaninen kierrätys 2

2.2 Kemiallinen prosessi 2

2.3 Lämpöhajoamisprosessi 3

2.3.1 Pyrolyysi 3

2.3.2 Leijupeti 3

3. KIERRÄTETYN HIILIKUIDUN VALMISTUS 5

3.1 Perinteinen valmistustapa 5

3.2 3D-Tulostus 6

3.3 Automatisoitu valmistustapa 6

4. KIERRÄTETYN HIILIKUIDUN MEKAANISET OMINAISUUDET 8

4.1 Vetolujuus ja myötölujuus 8

4.2 Taivutusominaisuudet 10

4.2.1 Hiilikuitu kestomuovissa 10

4.2.2 Uudelleenvalmistettu hiilikuitu 11

4.3 Iskulujuus 12

5. KIERTOTALOUS 14

5.1 Taloudelliset vaikutukset 14

5.2 Ympäristövaikutukset 15

6. YHTEENVETO 18

LÄHTEET 19

1. JOHDANTO

Hiilikuituvahvistetut polymeerikomposiitit ovat olleet jo useita vuosikymmeniä käytössä ilmailu-, puolustus- ja korkean suorituskyvyn autosektoreissa, mutta viime vuosina niiden käyttö on myös lisääntynyt kuluttajamarkkinoilla erityisesti autoteollisuudessa. Hiilikuitu komposiitit ovat osoittautuneet mielenkiintoiseksi vaihtoehdoksi autoteollisuudessa niiden erinomaisten mekaanisten ominaisuuksien, jäykkyyden, alhaisen tiheyden, keveyden sekä korroosionkestävyyden vuoksi. (Colledani & Turri 2022; Montagna et al. 2024)

Komposiittimateriaalit koostuvat hartsimatriisissa vahvikkeina olevista kuiduista. Yleisimpiä käytössä olevia komposiitteja ovat lasikuituvahvisteiset muovit sekä hiilikuituvahvisteiset muovit. Komposiittien jälkikäsittely on edelleen avoin haaste. Nykyisin ne joko päätyvät kaatopaikoille tai poltettavaksi. Kiertotalouden periaatteiden soveltaminen voi mahdollistaa uusien arvoketjujen kehittämisen, joissa käytönjälkeisten komposiittituotteiden materiaaleja hyödynnettäisiin uudelleen korkean lisäarvon tuotteissa. Tämä edistäisi hiilikuituteollisuuden kestävää kehitystä. (Colledani & Turri 2022)

Tässä työssä tarkastellaan, miten hiilikuitua kierrätetään ja millaisia menetelmiä hiilikuituvahvisteisten polymeerikomposiittien kierrätyksessä hyödynnetään. Erityisesti keskitytään kierrätetyn hiilikuidun valmistustapoihin sekä näiden materiaalien mekaanisiin ominaisuuksiin verrattuna neitseelliseen hiilikuituun. Työssä arvioidaan, kuinka hyvin kierrätetty hiilikuitu pystyy korvaamaan neitseellisen hiilikuidun niin suorituskyvyn, ekologisuuden kuin taloudellisuuden näkökulmista. Näitä kolmea osa-aluetta vertaillaan kirjallisuuteen perustuen, jotta voidaan muodostaa kokonaiskuva kierrätetyn hiilikuidun potentiaalista kestävänä ja kilpailukykyisenä vaihtoehtona.

Tutkielman kirjallisuuskatsauksen aineisto haettiin Andor-tietokannan kautta. Hakusanoina käytettiin englanninkielisiä termejä kuten *carbon fiber/fibre*, *manufacturing*, *recycle* ja *economy*. Haku toteutettiin pääasiassa yhdistämällä termejä, esimerkiksi muodossa ”*recycle AND carbon fiber*”, ja tarvittaessa hakua täsmennettiin lisäämällä kolmas avainsana, jotta kirjallisuus saatiin kohdistettua tutkielman eri lukujen teemoihin.

Tutkielman luvussa 2 käydään läpi erilaisia kierrätysprosesseja. Luvussa 3 esitellään kierrätetyn hiilikuidun valmistusmenetelmät, eri menetelmien käyttökohteet ja 3D-tulostuksen hyödyntäminen. Luvussa 4 vertaillaan valmiiden komposiittien mekaanisia ominaisuuksia. Luvussa 5 käsitellään hiilikuidun käytön ympäristövaikutuksia ja taloudellisuutta kestävän kehityksen näkökulmasta.

2. HIILIKUIDUN KIERRÄTYS

Hiilikuitujen kierrätys perustuu kuitujen talteenottoon komposiitista (Karuppannan Gopalraj & Kärki 2020, s. 3). Hiilikuituvahvisteisten polymeerien kierrätykseen on kolme erilaista menetelmää. Mekaaninen kierrätys, kemiallinen prosessi sekä lämpöhajoamisprosessi. Kierrätetyn hiilikuidun käytön osalta voi ilmetä useita eri ongelmia, kuten lujuuden heikkeneminen, kuituvauriot, vaihtelut kuitujen pituudessa, hiilijäämien kertyminen sekä kuitujen kontaminaatio. (Butenegro et al. 2021)

2.1 Mekaaninen kierrätys

Mekaaninen kierrätys perustuu komposiittimateriaalin pilkkomiseen esimerkiksi silppuamalla, murskaamalla tai jyrsimällä. Tämän prosessin lopputuotteena syntyvät palaset voidaan seuloa jauhemaisiin kappaleisiin, jotka ovat hartsipitoisia, tai kuitupitoisiin kappaleisiin. (Pimenta & Pinho 2011)

Prosessissa komposiittijäte pilkotaan 50–100 *mm*:n kokoisiksi paloiksi. Jätteen ollessa homogeenistä, voidaan käyttää suurinopeuksista jyrsintää, jolla voidaan pienentää materiaali suoraan 50 *µm* – 10 *mm*:n suuruiseksi. (Karuppannan Gopalraj & Kärki 2020)

Mekaaninen kierrätys vaurioittaa kuituja ja lyhentää niiden pituutta, minkä vuoksi sitä hyödynnetään usein esikäsittelynä ennen lämpöhajoamis- tai kemiallista prosessia. Hiilikuitujen muuttuminen epäjatkuvaksi on pääasiallinen syy siihen, että mekaanisesti kierrätettyjen komposiittien mekaaniset ominaisuudet heikkenevät. (Butenegro et al. 2021) Epäjatkuvia tai hajonneita kuituja voidaan kuitenkin edelleen käyttää täyteaineena lyhytkuitukomposiiteissa, kuten puristemassalevyissä (Zhang et al. 2020, s. 4).

2.2 Kemiallinen prosessi

Kemiallisessa kierrätysprosessissa komposiittien matriisi hajotetaan liuottamalla se kemiallisessa liuoksessa. Kun polymeerimatriisi on liuennut, kerätään huuhdellut kuidut talteen. Prosessissa käytetään joko liuotinta (solvolyysi) tai vettä (hydrolyysi). (Karuppannan Gopalraj & Kärki 2020)

Solvolyysissä komposiitti materiaali liuotetaan veden ja esimerkiksi etanolin sekoitukseen 25 *MPa:*n paineessa, jonka jälkeen se kuumennetaan tyypillisesti 350–400 °C asteiseksi (Henry et al. 2016, s. 265). Hydrolyysissä hartsin hajoamien tapahtuu veden

vaikutuksesta, eli vesi hajottaa polymeerimatriisin toimien reaktioaineena (Karuppannan Gopalraj & Kärki 2020, s. 8).

2.3 Lämpöhajoamisprosessi

Lämpöhajoamisprosessissa kuidut erotetaan polymeerimatriisista lämpökäsittelyn avulla, joka hajottaa polymeerikomponentin. Kaksi pääasiallista kuitujen talteenottomenetelmää ovat pyrolyysi ja oksidaatio leijupedissä. (Pakdel et al. 2021)

Prosessissa hyödynnetään korkeita lämpötiloja, jotka hajottavat orgaaniset komponentit joko hapettomassa tai hapellisessa ympäristössä kuitujen vaurioitumatta merkittävästi. Menetelmä soveltuu erityisesti kertamuovipohjaisten komposiittien kierrätykseen, sillä niiden polymeerimatriisi ei sula, vaan vaatii hajoamista korkeassa lämpötilassa kuitujen vapauttamiseksi. (Pakdel et al. 2021)

2.3.1 Pyrolyysi

Pyrolyysiprosessi koostuu kahdesta vaiheesta: ensimmäisessä vaiheessa polymeerikomposiitti kuumennetaan, ja toisessa vaiheessa tätä lämpötilaa ylläpidetään inertissä ilmatilassa. Inertti ilmatila saadaan virtaamalla esimerkiksi typpeä säiliöön, joka estää kuitujen hapettumisen prosessin aikana. (Hadigheh et al. 2021) Polymeerikomposiitti hajotessaan muodostaa kaasuja, bioöljyä, kuituja, täyteaineita sekä hiilijäämää (Butenegro et al. 2021, s. 5).

Pyrolyysin jälkeen tarvitaan jälkikäsittely, jossa kuidut hapetetaan ilmassa kontaminaation poistamiseksi. Oikean lämpötilan valitseminen pyrolyysissä on keskeistä lopputuloksen kannalta. Liian alhainen lämpötila jättää nokea kuitujen pinnalle ja liian korkea lämpötila heikentää kuitujen lujuutta. Pyrolyysi säilyttää kuitujen ominaisuudet kohtalaisen hyvin. (Butenegro et al. 2021)

2.3.2 Leijupeti

Leijupeti-prosessissa kuuma ilmavirta puhalletaan kvartsihiekkakerroksen läpi, johon komposiittijäte on ohjattu. Kuuma ilmavirta hajottaa komposiitin kuiduiksi ja täyteaineiksi.

Ilmavirta kuljettaa molekyylit ja kuitufilamentit ylöspäin samalla kun raskaat metalliset komponentit uppoavat pedille. Prosessin lopussa on jälkikäsittely, jossa kuitupartikkelit hapetetaan vielä korkeammassa lämpötilassa. Mukana olleet yhdisteet haihtuvat hapettuessa, jättäen jäljellä vain kuidut, jotka talteen otetaan. (Karuppannan Gopalraj & Kärki 2020)

Mekaanista prosessia käytetään esivalmisteluna komposiittijätteen koon pienentämiseksi. Yleisesti palat ovat käsittelyn jälkeen noin 25 *mm*:n kokoisia. Leijupetiprosessia hyödynnetään heterogeenisten komposiittijätteiden sekä muiden käyttöiän loppuun tulleiden osien kierrätyksessä. (Pimenta & Pinho 2011)

3. KIERRÄTETYN HIILIKUIDUN VALMISTUS

Hiilikuitujen valmistustekniikka on hyvin samanlainen kaikilla lähtöaineilla. Vaiheet ovat stabilointi, karbonisointi ja grafitisointi. Stabiloinnissa kuidut kuumennetaan 200–300 °*C* lämpötilassa. Stabilointia voidaan kutsua myös hapettumisprosessiksi, jonka kesto vaihtelee puolesta tunnista kolmeen tuntiin. Karbonisointi on korkean lämpötilan (1 000–1 500 °*C*) lämpökäsittely, jossa kuidut puhdistetaan hiilettömistä alkuaineista. Karbonisointi kestää yleensä muutamia minuutteja ja se suoritetaan inertissä ilmassa. Grafitoinnissa kuidut altistetaan muutamaksi sekunniksi 2 000–3 000 °*C*:n lämpötilalle. Tämän aikana hiilen rakenne muuttuu järjestäytyneeksi kolmiulotteiseksi grafiittirakenteeksi. (Wise & Girard 2016)

Talteenotettuja kierrätettyjä hiilikuituja voidaan hyödyntää uudelleen valmistuksessa. Kierrätysmenetelmä ratkaisee, minkälaista valmistustapaa käytetään uudelleen valmistuksessa. Hiilikuituvahvisteisen polymeerikomposiitin valmistaminen voidaan jakaa kolmeen eri menetelmään: perinteinen valmistustapa, 3D-tulostus ja automatisoitu. (Almushaikeh et al. 2023, s. 3–7)

3.1 Perinteinen valmistustapa

Perinteiset menetelmät koostuvat kahdesta vaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa polymeeri sulatetaan, minkä jälkeen siihen lisätään vahvike (hiilikuidut). Toisessa vaiheessa sulatettu komposiitti muotoillaan ennalta suunniteltuun muottiin. Komposiitti saa jäähdyttyään muotin määrittelemän muodon. Perinteisenä polymeerikomposiittien valmistustapana pidetään sulaseosmenetelmää, jonka variaatioita ovat puristus-, injektio- sekä autoklaavimuokkaus. (Almushaikeh et al. 2023)

Puristusmuokkauksessa komposiittimateriaali puristetaan muotin sisällä korkeassa lämpötilassa ja paineessa, mikä mahdollistaa tasalaatuisen lopputuotteen. Injektiomuovauksessa sula polymeeriseos ruiskutetaan muottiin, ja menetelmä soveltuu erityisesti monimutkaisten ja tarkkojen muotojen valmistukseen. Autoklaavimuokkauksessa komposiitti kovetetaan paineistetussa säiliössä, jolloin saavutetaan erinomainen kuitujen ja hartsin välinen tiiviys sekä mekaaninen lujuus. (Almushaikeh et al. 2023)

3.2 3D-Tulostus

3D-tulostus sai alkunsa 1980-luvulla, ja silloin ajatus henkilökohtaisesta 3D-tulostimesta oli haave. Vielä muutama vuosi sitten 3D-tekniikkaa hyödynsivät vain harvat ammattisuunnittelijat, ja sen käyttö rajoittui lähinnä konseptimallien ja yksinkertaisten prototyyppien luomiseen. Nykyään 3D-tulostus on tuonut pitkäaikaista strategista arvoa parantamalla suunnittelun ja valmistuksen välistä yhteistyötä sekä nopeuttamalla tuotteiden markkinoille tuloa. Suurten valmistusyritysten käyttöönottama 3D-tekniikka on mahdollistanut useiden konseptien arvioinnin lyhyessä ajassa, mikä parantaa päätöksentekoa ja suunnitteluprosessia. (Noorani 2017)

3D-tulostus toimii rakentamalla esineitä kerros kerrokselta kolmiulotteisten tietokoneavusteisten suunnitelmien (CAD) perusteella. Prosessi alkaa suunnitteluvaiheesta, jossa luodaan digitaalinen malli, joka ohjaa tulostusprosessia. Tulostin käyttää erilaisia materiaaleja, kuten muovia tai komposiitteja, ja kerää ne yhteen muodostaen halutun esineen. Materiaalit valitaan sen mukaan, mitä ominaisuuksia lopputuotteelta vaaditaan, ja ne voidaan räätälöidä käyttötarkoituksen mukaan. (Noorani 2017)

3D-tulostuksessa voidaan hyödyntää kierrätettyä hiilikuitua. 3D-tulostetut hiilikuituvahvisteiset komposiitit soveltuvat erinomaisesti monimutkaisille rakenteille. Jauhotettu hiilikuitu ja polymeeripelletit yhdistetään kaksoisruuvipuristimella, joka varmistaa hiilikuitujen tasaisen jakaantumisen polymeeri filamentin valmistuksessa. Kierrätetyt hiilikuidut ovat tyypillisesti pilkottuja ja lyhyitä johtuen kierrätysprosesseista. (Ateeq et al. 2023)

Kuitujen lisääminen termoplastiseen matriisiin voi parantaa mekaanisia ominaisuuksia merkittävästi, mutta se voi myös aiheuttaa ongelmia, kuten suuttimen tukkeutumista ja tulosteiden huokoisuutta. Näiden ongelmien minimoimiseksi on tärkeää optimoida kuidun hiukkaskoko ja painopitoisuus filamentissa. Vaikka haasteita esiintyy, kierrätettyjen hiilikuitujen käyttö tarjoaa lupaavia mahdollisuuksia, ja lisätutkimusta tarvitaan erityisesti kuitu-matriisirajapinnan vaikutuksesta filamentin ja lopputuotteen suorituskykyyn. (Omar et al. 2021)

3.3 Automatisoitu valmistustapa

Automatisoidut valmistusmenetelmät, kuten filamenttikäämitys (FW), automaattinen teipinlevitys (ATL) ja automaattinen kuitujen asettelu (AFP), ovat keskeisiä tekniikoita hiili-

kuituvahvisteisten lämpömuovikomposiittien (CFRTP) tehokkaassa tuotannossa. Näiden prosessien etuna on tarkka kuitujen sijoittelu, lyhyet konsolidointiajat sekä mahdollisuus vähentää manuaalista työtä ja valmistuskustannuksia. FW-tekniikassa kierrätettyhiilikuitunauha yhdistetään polymeerimatriisiin joko kuivana tai märkänä, ja se kelataan pyörivän muotin ympärille. Menetelmä mahdollistaa korkean mekaanisen suorituskyvyn ja tasalaatuiset osat esimerkiksi sylinterimäisissä rakenteissa. Esimerkiksi Almajid et al. (2021) kehittivät CF/PEEK-järjestelmän, jolla saavutettiin hyvä kulutuskestävyys FW-prosessilla. Lisäksi in-situ konsolidointi, jossa lämpö ja paine yhdistetään heti kuitujen asettelun aikana, eliminoi jälkikonsolidoinnin tarpeen ja nopeuttaa tuotantoa. (Boon et al. 2020)

ATL- ja AFP-menetelmät ovat kehittyneet entisestään, ja ne tarjoavat erinomaiset mahdollisuudet kierrätettyjen hiilikuitujen hyödyntämiseen. Näissä prosesseissa robotiikka mahdollistaa kuitunauhojen tai -teippien tarkan sijoittamisen ennalta määriteltyjen reittien mukaan. Vaikka automaattiset valmistustekniikat tarjoavat potentiaalia kierrätetyn hiilikuidun laajamittaiseen käyttöön, tuotantoprosessit vaativat edelleen kehittämistä, erityisesti kuitujen tarkan sijoittelun ja toistettavuuden osalta. Nykyiset tutkimukset osoittavat, että kierrätettyjen hiilikuitujen käyttö automatisoiduissa prosesseissa on lupaava vaihtoehto, mutta massatuotannon luotettavuuden ja skaalautuvuuden saavuttamiseksi tarvitaan vielä lisää tutkimusta ja prosessien optimointia. (Almushaikeh et al. 2020)

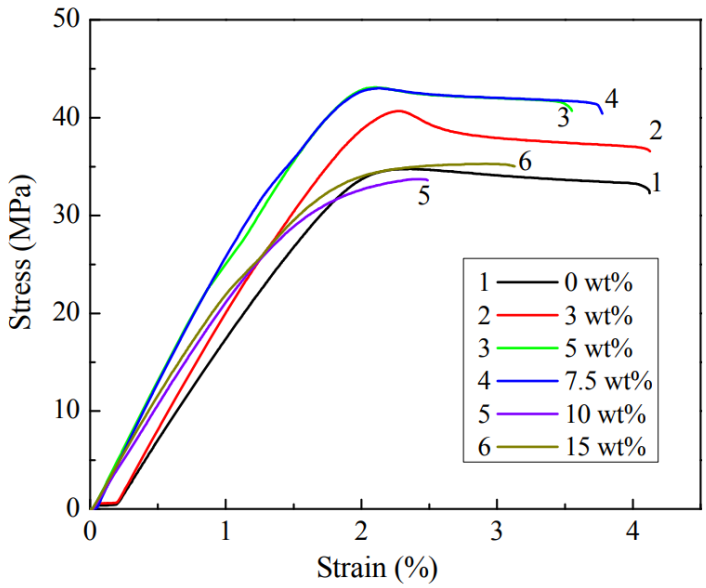
4. KIERRÄTETYN HIILIKUIDUN MEKAANISET OMINAISUUDET

Hiilikuidun ja kierrätetyn hiilikuidun ominaisuuksia on tutkittu ja verrattu laboratorio-olosuhteissa jo useiden vuosikymmenien ajan. Tänä aikana on kehitetty monia erilaisia mittaus- ja koemenetelmiä, jotka vaihtelevat sen mukaan, millaisia yksikköarvoja halutaan tarkastella ja mitä erityisiä ominaisuuksia pyritään arvioimaan. Esimerkiksi valmistetuista komposiittikappaleista voidaan suorittaa lujuus- ja murtotestejä, joiden avulla arvioidaan materiaalin kykyä kestää kuormitusta ja murtumista tietyissä olosuhteissa (Ning et al. 2015). Tällaiset testit antavat tietoa materiaalin mekaanisista ominaisuuksista, kuten vetolujuudesta, taivutuslujuudesta ja iskuenergian imeytymisestä.

Toisaalta kierrätysprosessinkin aikana voidaan tutkia hiilikuidun pintarakennetta ja sen muutoksia, jotka voivat vaikuttaa materiaalin lopullisiin ominaisuuksiin. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi skannaavalla elektronimikroskoopilla (SEM), joka mahdollistaa materiaalin pinnan rakenteen tarkastelun (Omar et al. 2018, s. 3). SEM-tekniikka on erityisen hyödyllinen kierrätetyn hiilikuidun tutkimuksessa, sillä se voi paljastaa, kuinka kierrätysprosessi vaikuttaa kuidun mikrorakenteeseen ja pintakemiallisiin ominaisuuksiin, jotka puolestaan vaikuttavat komposiitin lujuusominaisuuksiin ja kestävyyteen.

4.1 Vetolujuus ja myötölujuus

Omar et al. (2022) valmisti hiilikuituvahvisteisia säikeitä eri paino- ja pituussuhteilla tutkiakseen näytteiden mekaanisia ominaisuuksia. Tutkimuksessa havaittiin, että hiilikuitujen painoprosentilla on merkittävä vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin, ja vaikutus vaihtelee kuitujen pituuden mukaan. Hiilikuitujen pituudet filamenttien valmistuksessa olivat 63, 75 ja 150 *µm*, ja hiilikuidun painoprosentti matriisista oli 10, 20 ja 30 %. Tuloksista ilmeni, että neitsytkuidulla oli yleisesti suurempi vetolujuus verrattuna kierrätettyyn hiilikuituun. Kuitenkin filamentilla, jonka kuitujen pituus oli 63 *µm* ja hiilikuidun painoprosentti oli 10 %, saavutettiin neitsytkuitua suurempi vetolujuus.



Kuva 1. Jännitys-venymäkäyrä eri hiilikuidun painoprosenteilla (Ning et al. 2015)

Ning et al. (2015) tutkivat kierrätetyn hiilikuidun käyttöä 3D-tulostuksessa komposiittimateriaalien vahvikkeena. Tutkimuksessa havaittiin, että noin 150 *μm*:n pituisilla kierrätetyillä hiilikuiduilla voidaan saavuttaa sekä vetolujuuden että myötölujuuden osalta parempia tuloksia kuin neitseellisellä hiilikuidulla (kuva 1). Tämä osoittaa, että kierrätetty hiilikuitu voi toimia tehokkaana vahvikemateriaalina additiivisessa valmistuksessa, kun kuidun pituus ja jakautuminen ovat optimaaliset. Kuitujen lyhyt mutta riittävä pituus mahdollistaa tehokkaan jännityksen siirtymisen matriisista kuituun ilman merkittävää agglomeraatiota, mikä edesauttaa lujuusominaisuuksien paranemista.

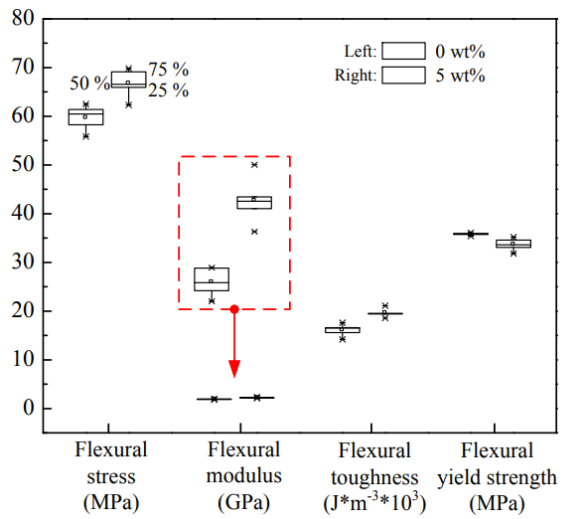
4.2 Taivutusominaisuudet

Taivutustesti mittaa materiaalin käyttäytymistä yksinkertaisessa palkkikuormituksessa, ja sitä kutsutaan myös poikittaistestiksi joillekin materiaaleille. Testissä lasketaan suurin kuitujännitys ja venymä eri kuormitusvaiheissa, ja tulokset esitetään jännitys–venymä -diagrammissa. Taivutuslujuus määritellään suurimpana jännityksenä, joka syntyy koekappaleen uloimmassa, vetojännitystä kokevassa kuidussa. Taivutusmoduuli taas lasketaan jännitys–siirtymäkäyrän kulmakertoimen perusteella. (Al-Mosawi et al. 2013)

Tässä alaluvussa tarkastellaan erilaisten materiaalikokoonpanojen vaikutuksia taivutusominaisuuksiin. Alaluvussa 4.2.1 vertaillaan hiilikuidulla vahvistetun ja perinteisen kestomuovin taivutusominaisuuksia, kun taas alaluvussa 4.2.2 keskitytään kierrätetyn ja neitseellisen hiilikuidun vaikutuksiin komposiitin taivutuskäyttäytymiseen.

4.2.1 Hiilikuitu kestomuovissa

Taivutuskokeessa mitataan testinäytteiden taivutusominaisuuksia taivuttamalla testikappaletta, kunnes näytteen ulkopinnan maksimivenymä saavuttaa 5 % tai jos murtuma tapahtuu ennen sitä (Ning et al. 2015).

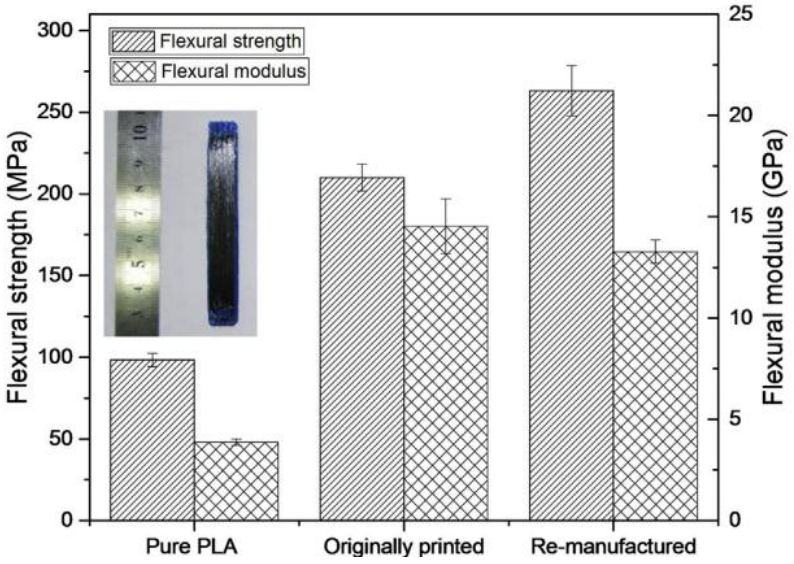


Kuva 2. Taivutuskokeessa saatujen taivutusominaisuuksien vertailua hiilikuiduttoman ja hiilikuidullisen kestomuovi matriisin välillä (Ning et al. 2015)

Lähes kaikki filamentin taivutusominaisuudet (taivutusjännitys, taivutusmoduuli, taivutuskestävyys) parantuvat, lukuun ottamatta taivutuslujuutta, kun hiilikuitua lisätään 5 paino-% filamenttiin (kuva 2). 3D-tulostuksessa saavutetaan tällöin huomattavaa hyötyä hiilikuitujen lisäyksestä. (Ning et al. 2015)

4.2.2 Uudelleenvalmistettu hiilikuitu

Kierrätetyn hiilikuidun lisääminen polymeeri- tai kestomuovimatriisiin parantaa selvästi komposiitin taivutuslujuutta. Tämä parannus johtuu siitä, että hiilikuitu toimii tehokkaana kuormankantajana, jolloin kuormituksen aikana syntyvä jännitys siirtyy muovimatriisista suoraan vahvikekuituun. Tämä jännityksen siirtyminen mahdollistaa tasaisemman kuormanjakauman komposiitin rakenteessa, mikä parantaa sen mekaanista suorituskykyä taivutustilanteissa. Mitä suurempi kuitupitoisuus materiaalissa on, sitä merkittävämpi vaikutus on komposiitin jäykkyyteen, kunhan kuitujen jakautuminen säilyy tasaisena. Tutkimuksissa on havaittu, että suuremmilla kierrätyskuitupitoisuuksilla komposiitin taivutusmoduuli kasvaa huomattavasti, mikä osoittaa kierrätetyn hiilikuidun tehokkuuden jäykkyyden lisäämisessä. (Altay et al. 2018)



Kuva 3. 3D-tulostettujen osien taivutusominaisuuksia (Tian et al. 2017)

Hiilikuituvahvisteisten 3D-tulostettujen komposiittien uudelleenvalmistuksella saavutettiin noin 25 %:n parannus taivutuslujuudessa verrattuna alkuperäisiin tulostettuihin kappaleisiin (kuva 3). Taivutuslujuuden paraneminen voidaan liittää prosessien aikana tapahtuneeseen rajapintojen parantumiseen, erityisesti kuitujen ja matriisin välisissä liitoksissa. Kierrätys- ja valmistusprosessit mahdollistivat paremman sulatus- ja kyllästystoiminnon, mikä edisti näytteiden mekaanisten ominaisuuksien paranemista. (Tian et al. 2017)

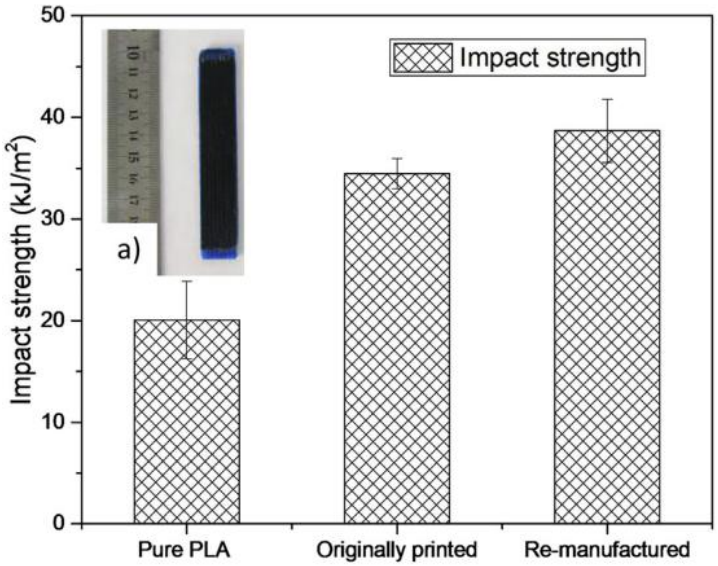
Vaikka taivutuslujuus koheni, valmistettujen komposiittien taivutusmoduuli koki pienen laskun, joka voidaan todennäköisesti selittää PLA-matriisin hajoamisella kierrätys- ja valmistusprosessien aikana. Tämä viittaa siihen, että vaikka valmistusprosessit parantavat komposiittien lujuusominaisuuksia, ne voivat samalla heikentää materiaalin jäykkyyttä, mikä vaikuttaa kokonaistuloksiin. (Tian et al. 2017)

Tuloksista voidaan päätellä, että hiilikuidun lisäämisellä kestomuovimatriisiin on selvästi positiivinen vaikutus komposiittimateriaalin taivutusominaisuuksiin. Hiilikuituvahvisteiset kestomuovit osoittavat merkittävästi parempaa taivutuslujuutta ja -jäykkyyttä verrattuna hiilikuiduttomiin kestomuoveihin, mikä johtuu hiilikuidun erinomaisista mekaanisista ominaisuuksista, kuten suuresta vetolujuudesta ja jäykkyydestä suhteessa sen matalaan tiheyteen. Tietyissä testausolosuhteissa myös uudelleenvalmistetut eli kierrätetyt hiilikuitukomposiitit voivat osoittaa taivutusominaisuuksiltaan jopa parempia tuloksia kuin neitseellisestä hiilikuidusta valmistetut vastaavat materiaalit.

4.3 Iskulujuus

Iskulujuus määritellään materiaalin kyvyksi kestää äkillisiä ja voimakkaita voimia, kuten iskuja, ilman merkittävää vaurioitumista. Se on tärkeä ominaisuus, erityisesti turvallisuuskriittisissä komponenteissa, joissa pienetkin vauriot voivat vaikuttaa tuotteen elinikään ja luotettavuuteen. (Gerdes & Walther 2025)

Kierrätetyn hiilikuidun käyttö parantaa komposiittien iskunkestävyyttä, koska se muuttaa murtomekanismin. Alkuperäisissä komposiiteissa havaittiin kuitujen vetäytymistä ja murtumista, mutta kierrätetyillä kuiduilla tapahtui vain kuitujen murtumista, mikä paransi iskulujuutta noin 12 %. Kierrätyksen myötä parantuneet kuitu-matriisirajapinnat vähentävät kuitujen vetäytymistä ja parantavat energian imeytymistä, mikä lisää materiaalin iskunkestävyyttä. (Tian et al. 2017)



Kuva 4. 3D-tulostettujen kappaleiden iskulujuuden testituloksia (Tian et al. 2017)

Kokeelliset tulokset osoittavat, että myös 3D-tulostuksessa voidaan saavuttaa merkittäviä parannuksia materiaalin iskulujuudessa, kun hyödynnetään kierrätettyä hiilikuitua (kuva 4). Kierrätetyn hiilikuidun uudelleenvalmistus ja sen integrointi polymeerimatriisiin vaikuttavat positiivisesti komposiitin iskunkestävyyteen. Tulosten perusteella voidaan todeta, että oikein käsitellyllä ja uudelleenhyödynnetyllä hiilikuidulla saavutetaan iskulujuusarvot, jotka ovat verrattavissa neitseellisen hiilikuidun tuloksiin, ja joissain tapauksissa jopa ylittävät ne.

5. KIERTOTALOUS

Hiilikuituvahvisteisten polymeerien käytön maailmanlaajuinen lisääntyminen on johtanut tuotantojätteiden sekä elinkaarien loppuun tulleiden komponenttien kasvuun. Käsiteltävä vuosittainen jäte saavuttaa arviolta 34.2 *kt* vuonna 2050, josta suurin kumulatiivinen kasvu keskittyy Eurooppaan, Pohjois-Amerikkaan ja Aasiaan. Iso-Britanniassa lähes 98 % elinkaaren loppuun tulleista komponenteista ja komposiittien valmistusjätteestä haudattiin kaatopaikoille vuonna 2015. (Zhang et al. 2020) Tällainen kehitys nostaa esiin tarpeen kehittää kestäviä kierrätysratkaisuja hiilikuitukomposiiteille.

Tässä luvussa perehdytään hiilikuidun kierrätyksen ympäristö- ja taloudellisiin vaikutuksiin verrattuna neitseellisen hiilikuidun valmistamiseen. Tarkastelu pohjautuu elinkaariajatteluun, jossa huomioidaan hiilikuidun koko elinkaari. Kiertotaloutta arvioidaan muun muassa energiankulutuksen, hiilidioksidipäästöjen sekä kustannusten näkökulmista.

5.1 Taloudelliset vaikutukset

Meng et al. (2017) tarkastelivat kierrätetyn hiilikuidun käyttöä erityisesti ajoneuvoteollisuudessa ja vertasivat sitä neitseelliseen hiilikuituun taloudellisesta näkökulmasta. Heidän tutkimuksessaan todettiin, että kierrätetty hiilikuitu voi merkittävästi alentaa materiaalikustannuksia erityisesti suurivolyymisissa tuotantoprosesseissa. Neitseellisen hiilikuidun valmistus vaatii korkeaa energiankulutusta ja kallista raaka-ainetta, mikä nostaa sen markkinahintaa. Kierrätetty kuitu tarjoaa kustannustehokkaan vaihtoehdon erityisesti silloin, kun tuotannossa voidaan hyödyntää valmiiksi saatavilla olevaa kuitumateriaalia ja minimoida jätteiden käsittelykulut. Kierrätys voi myös vähentää riippuvuutta uusista raaka-aineista, mikä lisää varmuutta toimitusketjuihin.

Vertailtaessa hiilikuitujen kustannuksia (Meng et al. 2017; Colledani & Turri 2022) havaitsivat, että kierrätetty hiilikuitu voi tuottaa huomattavia säästöjä tuotantokustannuksissa, Erityisesti ajoneuvoteollisuuden tietyissä osakokonaisuuksissa, kuten ovien sisärakenteissa ja muissa ei-kantavissa komponenteissa. Tutkimuksessa esitettiin laskelmia, joiden mukaan kierrätetyn hiilikuidun käyttö voi alentaa yksittäisen osan valmistuskustannuksia jopa kymmeniä prosentteja verrattuna neitseelliseen kuituun. Lisäksi hiilikuidun uusiokäytön hyödyntäminen voi vähentää materiaalihukkaa ja tehostaa valmistusprosesseja, mikä parantaa kierrätyksen taloudellista kannattavuutta. Kokonaisuudessaan Meng et al. (2017) esittävät, että kierrätetyn hiilikuidun käyttö voi olla merkittävä

kustannustehokkuutta parantava tekijä, kunhan tuotantoketju on optimoitu hyödyntämään kierrätysmateriaalia tehokkaasti.

Tutkimuksessa, jossa vertailtiin eri hiilikuidun kierrätysmenetelmien kustannuksia, havaittiin selkeä ero neitseellisen ja kierrätetyn hiilikuidun välillä. Neitseellisen hiilikuidun valmistus maksaa noin 211 euroa kilogrammalta, mikä tekee siitä huomattavan kallista. Kierrätysmenetelmät osoittautuivat taloudellisesti merkittävästi edullisemmiksi: mekaanisen kierrätyksen kustannus oli vain noin 0,11 *€/kg* ja pyrolyysin noin 4,66 *€/kg*. Kalliimpia olivat kemialliset menetelmät, kuten solvolyysi, joiden kustannukset nousivat yli 50 euroon kilogrammalta. Korkean jännitteen fragmentointi oli kaikkein kallein, noin 155 *€/kg*. Suurimmat kustannustekijät liittyivät energiankulutukseen, prosessikemikaaleihin ja laitteiston vaatimuksiin. (Vogiantzi & Tserpes 2025)

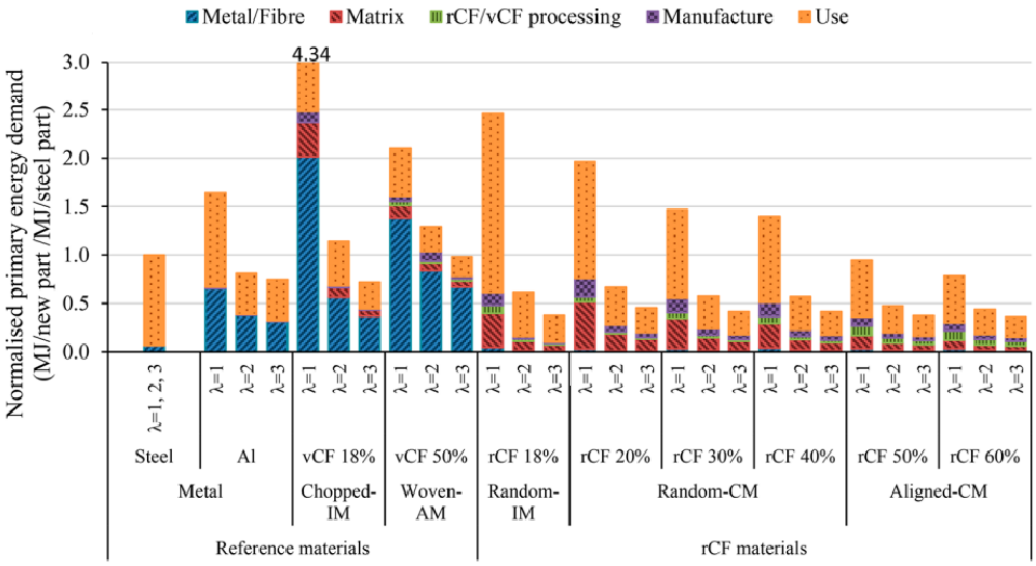
Karuppannan Gopalraj ja Kärki (2020) tarkastelevat hiilikuitukomposiittien kierrätyksen taloudellista kannattavuutta osana laajempaa kiertotalouden kokonaisuutta. Heidän mukaansa yksi keskeisistä esteistä kierrätyksen yleistymiselle on ollut prosessoinnin korkea kustannustaso sekä teollisen mittakaavan kierrätysjärjestelmien puute. Viime vuosina tilanne on kuitenkin alkanut muuttua, kun kiertotalouden periaatteita on alettu korostaa entistä enemmän niin EU-tasolla kuin kansallisessa päätöksenteossakin. Poliittiset toimet, kuten EU:n Green Deal ja Circular Economy Action Plan, ohjaavat lainsäädäntöä kohti uusiutuvien ja kierrätettyjen materiaalien suosimista.

Tällaiset politiikkatoimet voivat luoda taloudellisia kannustimia, jotka parantavat kierrätettyjen hiilikuitujen kilpailukykyä markkinoilla. Kierrätyksen kannattavuus voi parantua merkittävästi, jos poliittiset toimet lisäävät kysyntää ja samanaikaisesti kehittyvät materiaalien saatavuus, logistiikka ja teollinen jalostuskapasiteetti. Kiertotalouden edistäminen ei näin ollen ainoastaan tue ympäristötavoitteita, vaan sillä voi olla myös merkittävä vaikutus kierrätysmateriaalien taloudelliseen elinkelpoisuuteen. (Karupannan Gopalraj & Kärki 2020)

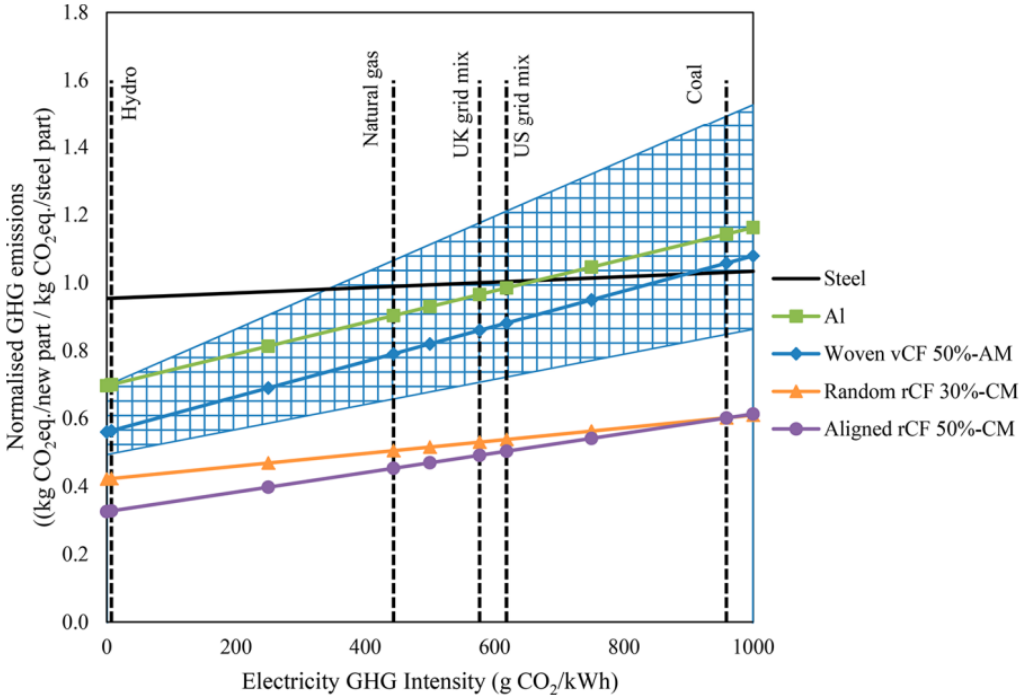
5.2 Ympäristövaikutukset

Ympäristövaikutukset ovat keskeinen osa hiilikuidun kierrätyksen arviointia, sillä neitseellisen hiilikuidun valmistusprosessi kuluttaa paljon energiaa ja aiheuttaa huomattavia kasvihuonekaasupäästöjä. Kuvissa 5 ja 6 on esitetty vertailua eri kierrätysmenetelmien ja neitseellisen tuotannon energiankulutuksesta sekä CO_2 -päästöistä. Kierrätettyjen hiilikuitujen käyttö voi vähentää merkittävästi tuotannon ympäristökuormaa erityisesti teollisuudenaloilla, joilla materiaalien käyttömäärät ovat suuria. Karuppanan Gopalraj ja Kärki (2020) korostavat, että kierrätyksen rooli osana kiertotaloutta perustuu juuri näihin

ympäristöhyötyihin: kun materiaalien elinkaarta pidennetään, luonnonvarojen kulutus ja päästöt vähenevät. Seuraavaksi tarkastellaan, mitä yksittäiset tutkimukset osoittavat näiden vaikutusten suuruudesta ja kierrätysmenetelmien keskinäisistä eroista.



Kuva 5. Erilaisten materiaalien energiankulutus elinkaaren eri vaiheissa (Meng et al. 2017)



Kuva 6. Kasvihuonekaasupäästöt eri materiaalien valmistuksessa verrattuna sähkönkulutuksesta aiheutuviin päästöihin (Meng et al. 2017)

Meng et al. (2017) tarkastelevat hiilikuitukomposiittien ympäristövaikutuksia elinkaari-analyysin avulla ja vertaavat kierrätettyjen ja neitseellisten hiilikuitujen vaikutuksia tuotteen koko elinkaaren aikana. Tutkimuksessa havaittiin, että kierrätettyjen hiilikuitujen käyttö voi merkittävästi vähentää energiankulutusta (kuva 5) ja kasvihuonekaasupäästöjä (kuva 6) verrattuna neitseelliseen kuituun, jonka valmistus on erittäin energiaintensiivistä. Erityisesti auto- ja ilmailuteollisuudessa kierrätetty materiaali voi tuoda lisähyötyjä, kun kevyempien rakenteiden avulla saavutetaan säästöjä käytön aikana tulleista päästöistä.

Hiilikuitukomposiittien kierrätys tarjoaa selkeitä ympäristöhyötyjä verrattuna neitseellisen hiilikuidun valmistukseen. Erityisesti tuotantovaiheessa syntyy runsaasti kasvihuonekaasupäästöjä ja energiankulutus on huomattavaa, mikä tekee kierrätyksestä ympäristön kannalta perustellun vaihtoehdon. Mekaaninen kierrätys ja pyrolyysi voivat merkittävästi vähentää päästöjä ja raaka-aineiden kulutusta. Vaikka kierrätyskuitujen ominaisuudet eivät aina vastaa täysin neitseellistä laatua, ne soveltuvat hyvin moniin käyttökohteisiin, joissa materiaalin suorituskykyvaatimukset ovat maltillisemmat. Nämä havainnot tukevat aiempien tutkimusten tuloksia ja täydentävät kokonaiskuvaa kierrätyksen ympäristövaikutuksista (Pimenta & Pinho 2021). Ne osoittavat myös, kuinka materiaalikierrätys voi edistää kestävän kehityksen tavoitteita hiilikuituteollisuudessa.

6. YHTEENVETO

Hiilikuituvahvisteisten polymeerikomposiittien kierrätys tarjoaa kestäviä ratkaisuja erityisesti ajoneuvo- ja ilmailuteollisuuden tarpeisiin. Vaikka hiilikuitujen kierrätys on yhä haastavaa, kierrätysmenetelmien kehittyessä kierrätettyjen kuitujen ominaisuudet voivat lähestyä – ja tietyissä tapauksissa jopa ylittää – neitseellisen hiilikuidun suorituskyvyn.

Tutkielmassa käsiteltiin kolmea keskeistä kierrätysmenetelmää: mekaaninen kierrätys, kemiallinen prosessi ja lämpöhajoamisprosessi. Menetelmien välillä esiintyy merkittäviä eroja kuitujen laadun, kustannusten ja ympäristövaikutusten suhteen. Mekaanista kierrätystä hyödynnetään usein esikäsittelynä kuitujen koon pienentämiseksi ennen muita prosesseja. Pyrolyysi puolestaan säilyttää kuitujen mekaaniset ominaisuudet melko hyvin ja onkin yksi yleisimmin käytetyistä kierrätysmenetelmistä.

Kierrätyksen jälkeen talteen otetut kuidut käytetään uusien polymeerikomposiittien valmistukseen, ja valmistusmenetelmä valitaan usein kierrätystavan perusteella. Vaikka kierrätetyn hiilikuidun vetolujuus ja taivutuslujuus eivät aina saavuta neitseellisen kuidun tasoa, tietyissä käyttökohteissa – kuten 3D-tulostuksessa – on saavutettu jopa 25 % parempi taivutuslujuus. Kuitujen pituuden ja painoprosentin optimoinnilla voidaan myös päästä lähelle neitseellisen kuidun ominaisuuksia.

Kierrätetyn hiilikuidun valmistus kuluttaa huomattavasti vähemmän energiaa ja aiheuttaa vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna neitseelliseen hiilikuituun. Esimerkiksi neitseellisen hiilikuidun valmistuksen hinta on noin 211 *€/kg*, kun taas pyrolyysillä kierrätetyn kuidun kustannus voi olla vain noin 4,66 *€/kg*. Tämä kustannusetu tekee kierrätetystä hiilikuidusta houkuttelevan vaihtoehdon kilpailukykyisillä markkinoilla.

Tulevaisuudessa kierrätysmenetelmien kehittäminen ja optimointi ovat avainasemassa, jotta kierrätetyn hiilikuidun potentiaali voidaan hyödyntää täysimääräisesti. Hiilikuitujen kierrätys ei ainoastaan edistä ympäristötavoitteita, vaan mahdollistaa myös kustannustehokkaita ja suorituskykyisiä ratkaisuja nopeasti kasvavalla teollisuudenalalla.

LÄHTEET

Colledani, M., Turri, S. (Eds.), 2022. Systemic Circular Economy Solutions for Fiber Reinforced Composites, Digital Innovations in Architecture, Engineering and Construction. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22352-5

Montagna, L.S., De Almeida, F.A.P., Batista, L.A.P.D.S., Dos Anjos, E.G.R., Brazil, T.R., Morgado, G.F.D.M., Baldan, M.R., Passador, F.R., 2024. A viable strategy to recycle post-used carbon fiber thermoset composites as a multi-functional filler for PP composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials 37, 445–465. https://doi.org/10.1177/08927057231176425

Karuppannan Gopalraj, S., Kärki, T., 2020. A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. SN Appl. Sci. 2, 433. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2195-4

Butenegro, J.A., Bahrami, M., Abenojar, J., Martínez, M.Á., 2021. Recent Progress in Carbon Fiber Reinforced Polymers Recycling: A Review of Recycling Methods and Reuse of Carbon Fibers. Materials 14, 6401. https://doi.org/10.3390/ma14216401

Pimenta, S., Pinho, S.T., 2011. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. Waste Management 31, 378–392. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.019

Zhang, J., Chevali, V.S., Wang, H., Wang, C.-H., 2020. Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling. Composites Part B: Engineering 193, 108053. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108053

Pakdel, E., Kashi, S., Varley, R., Wang, X., 2021. Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes. Resources, Conservation and Recycling 166, 105340. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105340

Hadigheh, S.A., Wei, Y., Kashi, S., 2021. Optimisation of CFRP composite recycling process based on energy consumption, kinetic behaviour and thermal degradation mechanism of recycled carbon fibre. Journal of Cleaner Production 292, 125994. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125994

Wise, E., Girard, P. 2016 , 'Carbon Fibres: a Review of Technology and Current Market Trends', Knowledge Transfer Network (KTN). Available at: https://compositesuk.co.uk/wp-content/uploads/2021/12/Carbon_Fibre_Report_2016.pdf

Almushaikeh, A.M., Alaswad, S.O., Alsuhybani, M.S., AlOtaibi, B.M., Alarifi, I.M., Alqahtani, N.B., Aldosari, S.M., Alsaleh, S.S., Haidyrah, A.S., Alolyan, A.A., Alshammari, B.A., 2023. Manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastics and its recovery of carbon fiber: A review. Polymer Testing 122, 108029. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108029

Noorani, R. 2017. '3D Printing : Technology, Applications, and selection', Taylor & Francis Group. Available at: http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4986151. Viitattu 27.3.2025

Ateeq, M., Shafique, M., Azam, A., Rafiq, M., 2023. A review of 3D printing of the recycled carbon fiber reinforced polymer composites: Processing, potential, and perspectives. Journal of Materials Research and Technology 26, 2291–2309. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.171

Omar, N.W.Y., Shuaib, N.A., Hadi, M.H.J.A., Azmi, A.I., Misbah, M.N., 2021. Mechanical and Physical Properties of Recycled-Carbon-Fiber-Reinforced Polylactide Fused Deposition Modelling Filament. Materials 15, 190. https://doi.org/10.3390/ma15010190

Almajid, K., Friedrich, J., Floeck, T., Burkhart, 2011. Surface damage characteristics and specific wear rates of a new continuous carbon fiber (CF)/polyetheretherketone (PEEK) composite under sliding and rolling contact conditions. *Applied Composites Materials*, 18(3), 211–230. https://doi.org/10.1007/s10443-010-9147-x.

Boon, A., Tan, M. J., Tay, T. E., 2020. In-situ consolidation in automated composite manufacturing: A review on techniques and process parameters. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107703. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107703.

Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., Wang, S., 2015. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. Composites Part B: Engineering 80, 369–378. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013

Al-Mosawi, A.I., Rijab, D.M.A., Abdullah, N., Mahdi, S., 2013. Flexural strength of fiber reinforced composite. international journal of enhanced research in science technology & engineering, 2319–7463. Available at: https://www.researchgate.net/publication/235769295_Flexural_strength_of_fiber_reinforced_composite

Altay, L., Atagur, M., Akyuz, O., Seki, Y., Sen, I., Sarikanat, M., Sever, K., 2018. Manufacturing of recycled carbon fiber reinforced polypropylene composites by high speed thermo-kinetic mixing for lightweight applications. Polymer Composites 39, 3656–3665. https://doi.org/10.1002/pc.24394

Tian, X., Liu, T., Wang, Q., Dilmurat, A., Li, D., Ziegmann, G., 2017. Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. Journal of Cleaner Production 142, 1609–1618. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.139

Gerdes, L., Walther, F., 2025. Impact damage detection for carbon fiber-reinforced polyurethane by means of active thermography and computed tomography. Engineering Failure Analysis 170, 109306. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109306

Meng, F., McKechnie, J., Turner, T., Wong, K.H., Pickering, S.J., 2017. Environmental Aspects of Use of Recycled Carbon Fiber Composites in Automotive Applications. Environ. Sci. Technol. 51, 12727–12736. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04069

Vogiatzis, C., Tserpes, K., 2025. A comparative environmental and economic analysis of carbon fiber-reinforced polymer recycling processes using life cycle assessment and life cycle costing. *Journal of Composites Science*, 9(1), 39. https://doi.org/10.3390/jcs9010039.