

Niina Flink

# PUUMUOVIKOMPOSIITIT JA NIIDEN RUISKUVALAMINEN

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Helmikuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Niina Flink: Puumuovikomposiitit ja niiden ruiskuvalaminen  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Materiaalitekniikan tutkinto-ohjelma  
Helmikuu 2024

---

Ympäristöystävällisempien ja muoveja korvaavien materiaalien kehittämisen yleistyessä puumuovikomposiittien tutkiminen ja käyttäminen on yhä yleisempää. Viime aikoina puumuovikomposiittien tutkimustyö on keskittynyt erityisesti niiden ruiskuvalamiseen. Ruiskuvalamisella on puumuovikomposiittien muodonantomenetelmänä suuri potentiaali, mutta sen yleistymistä ovat hidastaneet useat prosessointiongelmät. Tässä työssä tarkastellaan puumuovikomposiitteja ja niiden ruiskuvalamista. Työn tavoitteena on selvittää kirjallisuuden perusteella, millaisia materiaaleja puumuovikomposiitit ovat, millaisia haasteita puumuovikomposiittien ruiskuvalussa yleisimmin esiintyy, sekä miten prosessoitavan materiaalin ominaisuudet ja prosessin parametrit vaikuttavat ruiskuvalettujen puumuovikomposiittien ominaisuuksiin.

Puumuovikomposiitit ovat komposiitteja, jotka koostuvat muovimatriisista ja lujittavasta puusta. Niiden ominaisuuksissa yhdistyy puun ja muovin parhaat ominaisuudet, ja erityisesti niiden lujuuden ja jäykkyyden suhteet painoon ovat erinomaiset. Ominaisuuksiensa ansiosta puumuovikomposiiteilla korvataan monia perinteisiä materiaaleja, ja niitä käytetään paljon esimerkiksi rakennus- ja autoteollisuudessa.

Ruiskuvalamalla puumuovikomposiitteja voidaan tuottaa monimutkaisia ja mittatarkkoja esineitä tehokkaasti massatuotantona. Kuitenkin prosessin onnistumisen esteenä on usein erilaisia haasteita, jotka aiheuttavat erilaisia tuotevikoja ja heikentävät lopputuotteen ominaisuuksia, yleisimmin komposiitin lujuutta, jäykkyyttä sekä veden absorptionestokykyä. Ongelmat puumuovikomposiittien ruiskuvalamisen liittyvät pääasiassa prosessoitavan materiaalin ominaisuuksien ja prosessiparametrien optimointiin. Niiden säätäminen lopputuotteen kannalta otolliseksi on vaikeaa, sillä tutkimustietoa on niukasti, ja nämä ominaisuudet ja parametrit ovat usein toisistaan riippuvaisia ja vaihtelevat esimerkiksi eri koneen ja materiaalin mukaan.

Työssä tarkastellaan materiaaliominaisuuksista puulujitteiden ja muovimatriisin rajapintojen sitoutumisen, puun lämpötilaherkkyyden ja hydrofiilisyyden, puupitoisuuden, puulujitteiden ja matriisin sekoittumisen tasaisuuden, eli homogeenisuuden sekä puulujitteiden koon, hajoamisen ja järjestyntymisen vaikutuksia ruiskuvalettujen puumuovikomposiittien ominaisuuksiin. Prosessiparametreista tarkastellaan lämpötilan, ruiskutusnopeuden ja -paineen sekä jälkipaineen ja jälkipaineajan vaikutuksia. Lopputuotteen kannalta tärkeimmiksi materiaaliominaisuuksiksi ja prosessiparametreiksi voi nostaa lujitteiden ja matriisin rajapintojen sitoutumisen, puun lämpötilaherkkyyden ja prosessointilämpötilan, puulujitteiden hydrofiilisyyden sekä ruiskuvalettavan materiaalin kosteuspitoisuuden ja homogeenisuuden.

Puumuovikomposiiteissa lujitteen ja matriisin rajapintojen luonnostaan heikkoa sitoutumista parannetaan kytkentäaineilla. Sitoutumisen ollessa hyvä jännitys siirtyy tehokkaasti matriisilta lujitteiden kannettavaksi, jolloin esimerkiksi lujuus ja jäykkyys sekä veden absorptionestokyky paranevat. Ruiskuvaluprosessissa on tärkeää myös, ettei käsittelylämpötilat nouse niin korkeiksi, että puu alkaisivat hajoamaan, mikä heikentää lopputuotteen mekaanisia ominaisuuksia. Lisäksi ruiskuvalettavan puumuovikomposiittimateriaalin kosteuspitoisuus on tärkeä tekijä lopputuotteen laadun kannalta. Lähtötuotteen kosteuden on oltava mahdollisimman alhainen, sillä prosessin aikana höyrystyvä vesi aiheuttaa tuotteeseen huokoisuutta, joka vähentää sen lujuutta. Lopputuotteen kannalta oleellista on myös, että materiaalin sekoittuminen onnistuu, eli että kaikkia lujitteita ympäröi muovi. Homogeeninen sekoittuminen parantaa puumuovikomposiitin ominaisuuksia, kuten lujuutta ja veden absorptionestokykyä.

Avainsanat: puumuovikomposiitti, ruiskuvalu, puukuitu, biokomposiitti

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. PUUMUOVIKOMPOSIITIT .....	3
2.1 Komposiitit yleisesti .....	3
2.2 Rakenne .....	4
2.2.1 Muovimatriisi .....	4
2.2.2 Puulujitteet .....	4
2.3 Ominaisuudet .....	5
2.4 Ympäristöystävällisyys .....	7
2.5 Tuotantomäärät, sovelluskohteet ja hintataso .....	8
2.6 Muodonantomenetelmät .....	9
3. RUISKUVALU .....	11
3.1 Ruiskuvalusykli .....	11
3.2 Ruiskuvalukone .....	12
4. PUUMUOVIKOMPOSIITTIIEN RUISKUVALU .....	14
4.1 Puumuovikomposiittien ruiskuvalun haasteet .....	14
4.2 Puumuovikomposiittien ruiskuvaluprosessiin ja lopputuotteeseen vaikuttavat parametrit ja materiaaliominaisuudet .....	15
4.2.1 Puulujitteiden ja muovimatriisin rajapintojen sitoutuminen .....	15
4.2.2 Puulujitteiden lämpötilaherkkyys ja prosessointilämpötila .....	16
4.2.3 Puulujitteiden hydrofiilisyyden ja ruiskuvalettavan materiaalin kosteuspitoisuus .....	16
4.2.4 Puupitoisuus .....	17
4.2.5 Homogeenisyys .....	18
4.2.6 Puulujitteiden koko .....	18
4.2.7 Puulujitteiden hajoamisalttius .....	19
4.2.8 Puulujitteiden järjestäytyminen .....	20
4.2.9 Ruiskutusnopeus ja -paine .....	20
4.2.10 Jälkipaine ja jälkipaineaika .....	21
5. YHTEENVETO .....	23
LÄHTEET .....	25

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

PE-HD	Suurtiheyspolyeteeni
PE-LD	Pientiheyspolyeteeni
PP	Polypropeeni
PS	Polystyreeni
PVC	Polyvinyylikloridi
WPC	Puumuovikomposiitti ( <i>engl. Wood-plastic composite/ Wood-polymer composite</i> )

# 1. JOHDANTO

Kasvava ympäristötietoisuus ja kiinnostus vähentää materiaalien haitallista vaikutusta ympäristöön ovat johtaneet ympäristöystävällisempien materiaalien kehittämiseen ja yleistymiseen (Kim & Pal 2010, s. 4). Materiaaleilta on alettu vaatia entistä enemmän muun muassa uusiutuvuutta, keveyttä, energiatehokkuutta, kykyä sitoa hiilidioksidia sekä kierrätettävyyttä. Näitä tavoitteita on pyritty saavuttamaan lisäämällä uusiutuvien materiaalien käyttöä, mikä on johtanut puumuovikomposiittien laajempaan kehittämiseen sekä käyttöön. (Stokke et al. 2014) Puumuovikomposiittien yleistymiseen vaikuttaa myös öljyn hinnan nousu. Kun öljypohjaisille muoveille on etsitty uusia materiaalivaihtoehtoja, on hyvänä vaihtoehtona nähty muovien osittainen korvaaminen esimerkiksi puukuiduilla. (Carus et al. 2008; Kim & Pal 2010, s. 4; Ndiaye et al. 2012; Carus & Eder 2014)

Puumuovikomposiitit ovat komposiitteja, jotka koostuvat muovimatriisista ja lujittavasta puusta (Clemons 2008). Englannin kielessä puumuovikomposiiteista puhuttaessa käyttöön vakiintunut nimitys on wood-plastic composite tai wood-polymer composite, jotka molemmat lyhennetään usein WPC (Clemons 2008; Satov 2008). Puumuovikomposiitit ovat ympäristöystävällisiä, kevyitä ja kestäviä materiaaleja (Ye 2003, s. 1; Ashori 2008; Ndiaye et al. 2012). Niitä tutkitaan ja kehitetään ympäri maailmaa, ja niiden käyttäminen eri sovelluskohteissa yleistyy koko ajan. Tällä hetkellä puumuovikomposiitteja käytetään paljon esimerkiksi rakennus- ja autoteollisuudessa, joissa niillä on korvattu esimerkiksi muovia, puuta, epäorgaanisia lujitteita sisältäviä komposiitteja sekä metalleja. (Koto & Tiisala 2004; Ashori 2008; Kim & Pal 2010, s. 16, 77)

Puumuovikomposiitteja muovataan samoilla menetelmillä kuin puhtaita muoveja (Teuber et al. 2016). Muovien yleisin muodonantomenetelmä on ruiskuvalu muun muassa hyvän tarkkuuden, korkean tuotantonopeuden sekä monimuotoisuuden ansiosta (Lähteenmäki 2016). Mahdollisuuksistaan huolimatta ruiskuvalun yleistymisen puumuovikomposiittien muodonantomenetelmänä on ollut pitkään hidasta. Vasta viime aikoina puumuovikomposiittien ruiskuvalamista on alettu tutkimaan laajemmin (Carus & Eder 2014; Gardner et al. 2015). Hitaan yleistymisen syynä ovat erityisesti erilaiset prosessointiongelmien puumuovikomposiittien ruiskuvalamisessa, jotka aiheuttavat esimerkiksi erilaisia laatuviikoja (Kuzman et al. 2008; Wang & Lau 2013).

Työn tavoitteena on tutkia kirjallisuuden perusteella, mitä haasteita puumuovikomposiittien ruiskuvalussa yleisimmin esiintyy. Työssä selvitetään myös, millaisia materiaaleja puumuovikomposiitit ovat muun muassa niiden rakenteen ja ominaisuuksien osalta. Lisäksi kartoitetaan erilaisten suunnittelu- ja valmistustekijöiden, kuten prosessoitavan materiaalin ominaisuuksien ja prosessiparametrien vaikutusta ruiskuvalettujen puumuovikomposiittien ominaisuuksiin.

Toisessa luvussa perehdytään puumuovikomposiitteihin muun muassa rakenteen, ominaisuuksien sekä yleisimpien sovelluskohteiden kautta. Kolmannessa luvussa esitellään ruiskuvalu yleisesti muodonantomenetelmänä ja neljännessä luvussa käsitellään puumuovikomposiittien ruiskuvalua. Luvussa perehdytään puumuovikomposiitin ruiskuvalun ongelmiin sekä esitellään ruiskuvaluprosessin tärkeimpiä prosessiparametreja ja ruiskuvalettavan materiaalin ominaisuuksia tarkastelemalla, miten ne ovat yhteydessä toisiinsa ja vaikuttavat lopputuotteeseen. Viides luku kokoaa yhteen työn tärkeimmät havainnot ja johtopäätökset.

## 2. PUUMUOVIKOMPOSIITIT

Tämän luvun tarkoituksena on antaa kattava yleiskuva siitä, millainen materiaali puumuovikomposiitti on. Alkuun esitellään muutama asia komposiiteista yleisesti, minkä jälkeen tarkastellaan tarkemmin puumuovikomposiittien rakennetta ja ominaisuuksia. Luku käsittelee myös puumuovikomposiittien ympäristöystävällisyyttä tarkastelemalla eri tekijöitä, kuten kierrätettävyyttä. Lopuksi tarkastellaan, millaisia määriä puumuovikomposiitteja tuotetaan, mitä sovelluskohteita niillä on, millainen niiden hintataso on markkinoilla ja mikä siihen vaikuttaa sekä mitkä ovat niiden yleisimmät muodonantomenetelmät.

Puumuovikomposiitit määritellään eri lähteissä eri tavoilla. Erimielisyydet määritelmässä kohdistuvat materiaalien rajaukseen. Ashorin (2008) sekä Koton ja Tiisalan (2004) mukaan puumuovikomposiitteja ovat kaikki komposiitit, jotka koostuvat muovista sekä kasvikuuduista. Kasvikuituihin lukeutuvat puun rungosta saatavien puukuitujen lisäksi esimerkiksi puuvillasta, pellavasta, hampusta, bambusta, ananaksen lehdestä, vehnän oljista sekä maissin varsista saatavat kuidut (Ashori 2008). Kuitenkin suurin osa tutkijoista, kuten Carus ja Eder (2014), Gardner et al. (2015), Kim ja Pal (2010, s. 1) sekä Clemons (2008), määrittelevät puumuovikomposiitit puun ja muovin muodostamaksi komposiitiksi jättäen muut kasvikuudit rajauksen ulkopuolelle. Tätä määritelmää käytetään tässä työssä.

### 2.1 Komposiitit yleisesti

Jotta voidaan ymmärtää puumuovikomposiitteja, on hyvä ymmärtää ensin, mitä komposiitit ovat. Komposiitti on kahden tai useamman fysikaalisesti ja/tai kemiallisesti erilaisen materiaalin yhdistelmä rakenne, jossa materiaalit muodostavat toimivan kokonaisuuden, mutta eivät sekoitu toisiinsa vaan ovat eri faaseina (Kim & Pal 2010, s. 1). Tyypillisesti komposiiteissa on kaksi pääkomponenttia, joita kutsutaan matriisifaasiksi ja lujitefaasiksi (Miracle & Donaldson 2001). Lisäksi komposiiteissa on toisinaan lisäaineita ja täyteaineita parantamassa komposiittien ominaisuuksia (Satov 2008; Vuorinen et al. 2016).

Komposiiteissa matriisi sitoo lujitteet yhteen ja suojaa niitä ympäristön vaikutukselta sekä siirtää ulkoisen kuormituksen lujitteen kannettavaksi (Vuorinen et al. 2016; Callister & Rethwisch 2020, s. 608). Lujitteet ovat matriisin sisällä olevia kuituja, partikkeleja tai hiukkasia, jotka vastaavat komposiitin mekaanisista ominaisuuksista, kuten esimerkiksi lujuudesta ja jäykkyydestä (Vuorinen et al. 2016). Eri materiaaleja yhdistelemällä synty-

vän komposiitin ominaisuudet ovat usein paremmat kuin yksittäisten komponenttien erikseen, sillä valmistuksessa pyritään maksimoimaan ainesosamateriaalien hyvät ominaisuudet ja minimoimaan huonot (Ye 2003, s. 1). Tämä mahdollistaa sen, että komposiittien on mahdollista tarjota monien hyvien ominaisuuksien yhdistelmiä, jotka eivät ole perinteisille materiaaleille mahdollisia (Clyne & Hull 2019, s. 1).

## **2.2 Rakenne**

Puumuovikomposiitit ovat siis komposiitteja, joissa matriisina toimii muovi ja lujitteena puu (Clemons 2008). Usein raaka-aineena käytetään kierrätysmuovia ja -puuta, mutta toisinaan käytetään neitseellisiä raaka-aineita (Kim & Pal 2010, s. 1). Lisäksi raaka-aineena käytetään toisinaan puuta, joka on peräisin teollisuuden sivuvirroista, kuten esimerkiksi puutuoteteollisuudesta syntyvää sahanpurua (Krause et al. 2018; Kärki et al. 2019; Lima et al. 2019).

Puun ja muovin lisäksi puumuovikomposiiteissa on lisäaineita, joilla materiaali räätälöidään lopputuotetta varten parantamalla sen ominaisuuksia. Niitä ovat esimerkiksi kytkeä-, väri-, stabilointi-, vaahdotus- ja voiteluaineet sekä lujitteet (Ashori 2008).

### **2.2.1 Muovimatriisi**

Puumuovikomposiiteissa matriisina käytetään esimerkiksi kesto- tai kertamuoveja tai elastomeerejä (Kim & Pal 2010, s. 24). Yleisimmin käytettyjä ovat edulliset kesto- tai kertamuovit, joiden muotoileminen on helppoa, sillä ne saadaan kuumennettaessa helposti virtaavaan tilaan. Tämä mahdollistaa sen, että valmista muovin ja puun yhdistelmää on mahdollista muovata useilla eri menetelmillä. (Clemons 2008) Viisi yleisimmin puumuovikomposiiteissa käytettyä muovia ovat suurtiheyspolyeteeni (PE-HD), pientiheyspolyeteeni (PE-LD), polyvinyylikloridi (PVC), polypropeeni (PP) ja polystyreeni (PS) (Kim & Pal 2010, s. 24–25).

Tärkein näkökohta muovin valinnassa on sen prosessointilämpötila. Puu hajoaa jo noin 220 °C:n lämpötilassa, jolloin käytettävän muovin prosessointilämpötila ei saisi ylittää 200 °C:n lämpötilaa, tai muuten puu hajoaa termisesti. (Kim & Pal 2010, s. 24; Gardner et al. 2015)

### **2.2.2 Puulujitteet**

Lujitteena toimiva puu yhdistetään muoviin esimerkiksi viiluina, kuituina tai hienojakoisena jauhana (Gardner et al. 2015). Koska puuraaka-aineena käytetään usein puutuoteteollisuuden sivutuotteita, on puumuovikomposiittien lujite yleensä havupuuta, kuten



mäntyä tai kuusta (Krause et al. 2018). Myös vaahtera ja tammi ovat yleisiä puulajeja puumuovikomposiiteissa käytettäviksi (Šercer et al. 2009).

Puu sisältää luonnollisia polymeerejä, kuten ligniiniä, selluloosaa sekä erilaisia hemiseluloosia, mutta se on hyvin erilainen ominaisuuksiltaan kuin synteettiset polymeerit. Rakenteensa ansiosta puu on jäykkä, vahva, sitkeä ja kevyt materiaali. (Clemons 2008) Sitä on hyvin saatavissa, ja se on halpa, uusiutuva, biohajoava sekä ympäristöystävällinen materiaali. Nämä ominaisuudet tekevät puusta hyvän vaihtoehdon muovikomposiiteissa perinteisesti käytettäville epäorgaanisille lujitekuiduille, kuten hiilikuidulle tai lasikuidulle. (Koto & Tiisala 2004; Clemons 2008; Kim & Pal 2010, s. 77; Ndiaye et al. 2012)

Puun osuus vaihtelee eri puumuovikomposiiteissa, sillä sen avulla vaikutetaan käytettyjen ainesosien, lisäaineiden sekä puulujitteiden koon ja muodon kanssa lopputuotteen ominaisuuksiin (Ashori 2008). Puun määrä vaihtelee eri lähteissä. Kuzman et al. (2008) kertovat puun osuuden olevan 40–60 painoprosenttia, ja Koto sekä Tiisala (2004) noin 30–85 %.

### 2.3 Ominaisuudet

Puumuovikomposiitit ovat varteenotettavia vaihtoehtoja monille perinteisille materiaaleille (Kim & Pal 2010, s. 77). Ominaisuuksiensa ansiosta puumuovikomposiiteilla on korvattu erilaisissa sovelluskohteissa esimerkiksi muovia, puuta, epäorgaanisia lujitteita sisältäviä komposiitteja sekä metalleja, kuten terästä (Ashori 2008; Kim & Pal 2010, s. 77). Komposiittien tapaan puumuovikomposiittien ominaisuuksien kanssa on pyritty siihen, että ne ovat yhdistelmä ainesosamateriaaliensa parhaita ominaisuuksista (Ye 2003, s. 1). Ainesosakoostumuksen, eli käytettyjen materiaalien ominaisuuksien, lisäksi lopputuotteen ominaisuuksiin vaikuttaa käytetty muodonantomenetelmä (Akil & Zamri 2014). Puumuovikomposiitilla on muun muassa puun ulkonäkö ja tuntuma, ja sitä voidaan ruuvata, naulata ja sahata kuten puuta. Lisäksi sillä on muovin kestävyys, kuten kosteudenkestävyys ja muovattavuus. (Kuzman et al. 2008; Šercer et al. 2009; Kim & Pal 2010, s. 3; Ndiaye et al. 2012; Askadskii et al. 2019, s. 4)

Perinteiseen puuhun verrattuna puumuovikomposiiteilla on muun muassa parempi mitapysyvyys sekä mikrobien ja kosteudenkestävyys. Lisäksi ne vaativat vähemmän huoltoa. (Ndiaye et al. 2012) Puolestaan puhtaisiin muoveihin ja perinteisiin komposiitteihin verrattuna etuna on esimerkiksi mekaaniset ominaisuudet, kuten korkea lujuus ja jäykkyys, edullisista puulujitteista johtuvat alhaiset kustannukset, pieni tiheys, keveys sekä matala kitka valmistuksen aikana, jolloin koneet kuluvat vähemmän (Ashori 2008; Kim &

Pal 2010, s. 23, 77, 165). Erityisesti lujuuden ja jäykkyyden suhteet painoon ovat puumuovikomposiiteilla huomattavasti parempia muihin materiaaleihin verrattuna, ja niistä on hyötyä monissa sovelluksissa. Eli käytännössä puumuovikomposiitit ovat poikkeuksellisen lujia ja jäykkiä samaan aikaan ollessaan kevyitä. (Ashori 2008)

Taulukkoon 1 on koottu polypropeenin, polypropeenin ja 40 % puuta sisältävän puumuovikomposiitin sekä polypropeenin, 40 % puuta ja 3 % kytkeäainetta sisältävän puumuovikomposiitin veto-, taivutus ja iskukoe tuloksia. Taulukosta nähdään, kuinka puun lisääminen kasvattaa materiaalin lujuutta ja jäykkyyttä. Venymä, eli materiaalin sitkeys, ja iskunkestävyys puolestaan heikkenevät, kun polypropeeniin lisätään puukuituja, mutta kytkeäainetta lisääminen kasvattaa arvoja hieman. (Stark & Rowlands 2003)

**Taulukko 1.** Polypropeenin ja puumuovikomposiittien mekaaniset ominaisuudet (perustuu lähteeseen Stark & Rowlands 2003).

Materiaali	Veto-ominaisuudet			Taivutusominaisuudet		Iskunkestävyys
	Vetolujuus (MPa)	Kimmokerroin (GPa)	Venymä (%)	Taivutuslujuus (MPa)	Taivutuskerroin (GPa)	Iskulujuus <sup>a</sup> (J/m)
Polypropeeni (PP)	28,5	1,53	5,9	38,3	1,19	656
PP + 40 % puukuituja	28,2	4,20	2,0	47,9	3,25	91
PP + 40 % puukuituja + 3 % kytkeäainetta	52,3	4,23	3,2	72,5	3,22	162

<sup>a</sup> Izod-menetelmä ja loveton näyte.

Lisäksi puun matala lämmön- ja palonkesto voi aiheuttaa ongelmia puumuovikomposiittien valmistuksessa sekä rajoittaa niiden käyttöä vaativissa olosuhteissa. Tätä ominaisuutta parannetaan lisäämällä komposiittiin palonestoaineita. Riippuen lopullisesta materiaalikoostumuksesta osa puumuovikomposiiteista on syttymisherkkiä, ja osa puolestaan hyvin tulenkestäviä ja jopa itsestään sammuvia. (Koto & Tiisala 2004; Kim & Pal 2010, s. 78; Askadskii et al. 2019, s. 4) Lisäksi UV-säteily aiheuttaa ajan myötä puumuovikomposiittien haurastumista ja värimuutoksia (Koto & Tiisala 2004; Ndiaye et al. 2012).

## 2.4 Ympäristöystävällisyys

Puumuovikomposiitti on parhaimmillaan ympäristöystävällinen materiaali. Se on ominaisuuksiensa ansiosta kestävä ja pitkäikäinen materiaali. (Ndiaye et al. 2012) Koska puumuovikomposiittien valmistamiseen ei aina käytetä neitseellisiä materiaaleja, voidaan sen avulla kierrättää muovi- ja puujätettä sekä teollisuuden sivuvirtojen materiaaleja ja siten lisätä resurssien tehokasta käyttöä (Kim & Pal 2010; Teuber et al. 2016; Kärki et al. 2019). Puu lujitteena on uusiutuva luonnonvara, jonka hiilidioksidipäästöt ovat vähäisiä verrattuna fossiilisiin raaka-aineisiin perustuviin epäorgaanisiin kuituihin ja muoveihin. Lisäksi se on biohajoava materiaali. (Ashori 2008; Kim & Pal 2010, s. 77) Matriisina toimiva muovi ei myöskään ole aina synteettisesti tuotettu, vaan toisinaan käytetään uusiutuvia biohajoavia muoveja, jolloin komposiitti voi olla täysin biohajoava (Ashori 2008; Teuber et al. 2016).

Verrattuna massiivipuuhun puumuovikomposiitin ympäristökuormitus on suurempi, sillä sen prosessointi tuottaa enemmän hiilidioksidipäästöjä kuin massiivipuun käsittely. Puhdaisiin muoveihin verrattuna puumuovikomposiitti on puolestaan ympäristöystävällinen vaihtoehto, erityisesti jos käytetään kierrätettyjä materiaaleja. (Krause et al. 2018)

Halu hillitä metsäkatoa ja puute puusta markkinoilla eri puolilla maailmaa ovat lisänneet kiinnostusta puumuovikomposiitteja kohtaan puun korvaajana. Puumuovikomposiitti materiaalina, joka ei koostu pelkästä puusta, mutta jota voidaan käyttää puun korvaajana eri sovelluksissa, vähentää hakkuiden tarvetta. (Carus et al. 2008) Hakuut heikentävät hiilinielujä, lisäävät metsäkatoja ja heikentävät luonnon monimuotoisuutta (WWF pvm.).

Lisäksi puumuovikomposiitit ovat kierrätettäviä (Ndiaye et al. 2012). Materiaali voidaan kierrättää uudelleen useita kertoja ilman, että sen mekaaninen suorituskyky kärsii merkittävästi (Petchwattana et al. 2011; Rosenstock Völtz et al. 2020). Kierrätettäessä uudeksi raaka-aineeksi, puumuovikomposiittijäte murskataan pienemmäksi ja yhdistetään usein uusiin käyttämättömiin raaka-aineisiin. Kierrättäminen vähentää uuden materiaalin tarvetta ja siten säästää luonnonvaroja ja ympäristöä. (Petchwattana et al. 2011) Kuitenkin valtakunnalliset kierrätysjärjestelmät puuttuvat, eikä materiaalia saada tehokkaasti kiertoon. Puumuovikomposiittien kierrätysmahdollisuuksien uskotaan parantuvan tulevaisuudessa alan yhä kehittyessä. (Krause et al. 2018) Puumuovikomposiitit voidaan kierrättämisen sijaan myös polttaa energian saamiseksi, jolloin kuitenkin syntyy päästöjä. (Petchwattana et al. 2011)

Myös puumuovikomposiittien keveys parantaa niiden ympäristöystävällisyyttä. Kun puumuovikomposiiteilla korvataan autoissa raskaampia materiaaleja, kuten metalleja tai pe-

rinteisiä epäorgaanisia lujitteita sisältäviä komposiitteja, vähentynyt paino vähentää polttoaineen kulutusta ja siten hiilidioksidipäästöjä. (Ashori 2008; Kim & Pal 2010, s. 15–16) Myös muiden kuin autoteollisuuden sovellusten kohdalla vähentyneestä painosta on ympäristölle hyötyä, sillä kevyemmät materiaalit säästävät polttoainetta rahtiliikenteessä (Kim & Pal 2010, s. 19).

## **2.5 Tuotantomäärät, sovelluskohteet ja hintataso**

Ajankohtaista tutkittua tietoa puumuovikomposiittien markkinoista on vaikea löytää. Puumuovikomposiittien tuotantomäärät ovat olleet vuosien mittaan kasvussa ja markkinoiden odotetaan yhä vain kasvavan (Koay et al. 2018). Vuonna 2009 puumuovikomposiittia tuotettiin maailmanlaajuisesti yli 1,5 miljoonaa tonnia, kun taas vuonna 2012 tuotantomäärä oli 2,43 miljoonaa tonnia ja vuonna 2015 2,695 miljoonaa tonnia (Bledzki et al. 2010; Carus & Eder 2014; Koay et al. 2018). Vuosikymmen sitten suurimpia puumuovikomposiittintuottajamaita olivat Yhdysvallat ja Kiina (Bledzki et al. 2010; Carus & Eder 2014).

Eniten puumuovikomposiitteja hyödynnetään rakennus- ja autoteollisuuden eri sovelluskohteissa (Kim & Pal 2010, s. 16). Esimerkiksi vuonna 2012 Euroopan unionin alueella tuotetusta 260 000 tonnista puumuovikomposiittia 67 % tuotettiin pelkästään terassimateriaaliksi ja 24 % autoteollisuuden tarpeisiin (Carus & Eder 2014). Lisäksi puumuovikomposiiteilla on paljon sovelluskohteita muun muassa merenkulku-, elektroniikka- sekä ilmailu- ja avaruusteollisuuden parissa (Ashori 2008). Yleisiä puumuovikomposiittista valmistettuja tuotteita ovat esimerkiksi ulkotilojen terasseissa käytettävät laudat ja sahatavara, lattiapäällysteet, julkisivujen materiaalit, auton osat esimerkiksi sisäverhoilussa, kaiteet ja aidat, ikkunan- ja ovenkarmit, listat sekä ulko- ja sisätilojen huonekalut (Ashori 2008; Kim & Pal 2010, s. 1, 16; Carus & Eder 2014; Gardner et al. 2015). Kuvissa 1 ja 2 on esimerkit puumuovikomposiittisista tuotteista. Kuvassa 1 on ekstruusiolla valmistettuja profiileja ja kuvassa 2 autoon ruiskuvalamalla valmistettu komponentti. (JELUWERK 2010; Arsham Trading n.d.)



**Kuva 1.** Puumuovikomposiitista ekstruusiolla valmistettuja profiileja (Arsham Trading n.d.).



**Kuva 2.** Puumuovikomposiitista ruiskuvalamalla valmistettu autonosa (JELU-WERK 2010).

Puumuovikomposiiteista on valmistettu pitkään vain kalliita tuotteita, mutta hintoja laskee koko ajan markkinoiden laajentuminen ja valmistustekniikoiden kehittyminen. Silti ei osata sanoa juuri lainkaan, millaiset mahdollisuudet puumuovikomposiiteilla on halpojen tuotteiden markkinoilla. Puumuovikomposiittituotteiden hintoihin vaikuttaa esimerkiksi valmistustavat ja materiaalien koostumus, kuten käytetyt raaka-aineet. Puumuovikomposiittien hinta vertautuu sillä usein korvattavaan puuhun niin, että puumuovikomposiiteista valmistetut terassilaudat ovat usein kalliimpia kuin painekyllästetystä tai käsittelemättömästä puusta valmistetut. Epäorgaanisia lujitteita sisältäville perinteisille komposiiteille puumuovikomposiitti voi puolestaan olla merkittävästi edullisempi vaihtoehto puun edullisuuden vuoksi. (Koto & Tiisala 2004)

## 2.6 Muodonantomenetelmät

Puumuovikomposiitit käyttäytyvät lämpömuovautuvasti, joten niitä voidaan käsitellä samoilla laitteilla, kuin niiden lujittamatonta matriisia (Teuber et al. 2016). Yleensä puumuovikomposiittia valmistetaan sekoittamalla puulujitteet muovimatriisiin ja puristamalla tai

muovaamalla korkeassa paineessa ja lämpötilassa (Ashori 2008). Puumuovikomposiitien yleisimpiä muodonantomenetelmiä ovat ekstruusio, ruiskuvalu, muottipuristus sekä lämpömuovaus (Gardner et al. 2015).

Muodonantomenetelmän valitaan vaikuttaa yleensä eniten kappaleen geometria tai kovaatimukset. Esimerkiksi ekstruusio soveltuu paremmin valmistusprosessiksi puumuovikomposiitista valmistetuille laudoille, kun taas ruiskuvalu soveltuu kolmiulotteisille kappaleille. (Migneault et al. 2009) Suuri osa puumuovikomposiiteista valmistetuista tuotteista, varsinkin varhaisista, on valmistettu ekstruusiolla (Gardner et al. 2015). Sillä valmistetaan jatkuvia profiileja pakottamalla ruuvin avulla materiaalisula muodon antavan suuttimen läpi (Migneault et al. 2009). Nykyaikana myös puumuovikomposiiteista ruiskuvaletut tuotteet yleistyvät eri teollisuuden aloilla (Gardner et al. 2015).

### 3. RUISKUVALU

Tässä luvussa tarkastellaan ruiskuvalua yleisesti muodonantomenetelmänä. Ruiskuvalu, jota voidaan kutsua myös ruiskupuristukseksi, on kaupallisesti merkittävin muovituotteiden valmistusmenetelmä (Goodship & Love 2002, s. 3). Sitä käytetään erityisesti kestumuvituotteiden valmistamiseen, mutta sillä voidaan työstää myös esimerkiksi kertamuoveja, elastomeerejä, keraameja, metalleja sekä biokomposiitteja, kuten puumuovikomposiitteja (Järvelä et al. 2000, s. 11, 44–46, 182; Gardner et al. 2015; Lähteenmäki 2016).

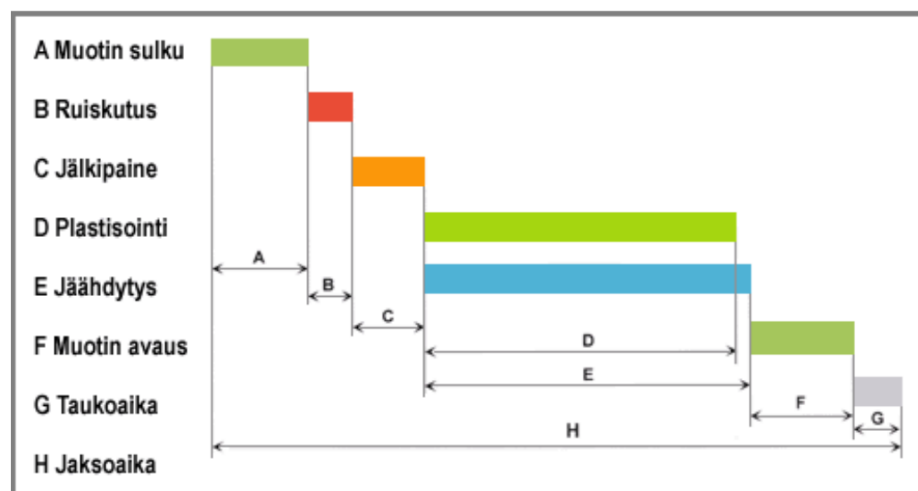
Ruiskuvalulla pystytään tuottamaan monimutkaisia, hyvin erikokoisia ja mittatarkkoja esineitä, joiden pinnanlaatu on moitteeton, ja joita eivät vaadi paljon jälkikäsittelyä (Järvelä et al. 2000, s. 275, 281-285 ; Migneault et al. 2009; Gardner et al. 2015; Lähteenmäki 2016). Menetelmä mahdollistaa suuret tuotantomäärät korkeilla tuotantonopeuksilla, ja ruiskuvalun tärkein etu onkin se, että se on erittäin taloudellinen massatuotantomenetelmä (Goodship & Love 2002, s. 3; Goodship 2017, s. 1). Ruiskuvalu on syklinen prosessi, jossa materiaali ruiskutetaan nopeasti muottiin, missä sitä jäähdytetään, kunnes se muuttuu kiinteäksi. Jäähdytymisen jälkeen muotti avataan ja valmis komponentti työnnetään ulos, jonka jälkeen muotti suljetaan, jotta uusi sykli voi alkaa. (Goodship 2017, s. 1, 4) Alaluvuissa käsitellään tarkemmin ruiskuvaluprosessin sykliä ja ruiskuvalukoneen toimintaa.

#### 3.1 Ruiskuvalusykli

Tässä alaluvussa tarkastellaan tarkemmin, mitä ruiskuvaluprosessissa tapahtuu. Prosessin alussa ruiskuvalettava materiaali plastisoidaan, eli sulatetaan homogeeniseksi sulaksi (Järvelä et al. 2000, s. 48; Goodship & Love 2002, s. 5). Sulaminen tapahtuu syöttöruuvien pyörimisen aiheuttaman kitkalämmön sekä ulkoisesta lähteestä saatavan lämmön vaikutuksesta. Plastisoinnin jälkeen sulaa materiaalia ruiskutetaan ruiskutusyksiköstä suljettuun muottiin täyttäen 95 % muottipesän tilavuudesta. (Järvelä et al. 2000, s. 48) Ruiskutusnopeus on yleensä suuri, ettei materiaali ehdi jäähtyä ruiskutuksen aikana. Se ei saa olla kuitenkaan liian suuri, tai muuten muotti ei täyty kunnolla, jolloin muodostuu pintavikoja ja lopputuotteen mekaaniset ominaisuudet kärsivät. (Järvelä et al. 2000, s. 48; Goodship 2017, s. 8)

Ruiskutusvaihetta seuraa jälkipainevaihe, jossa täytetään hitaasti ruiskutuksessa täyttämättä jäänyt tilavuus, eli noin 5 % muotin tilavuudesta, ja kompensoidaan näin materiaalin jäähtymisen aikana aiheutuvaa kutistumaa. Kun muotti on täytetty kokonaan alkaa jäähtyminen. Jäähdytysvaiheessa, joka on yleensä syklin pisin vaihe, muotissa oleva materiaali jäähdytetään riittävän matalaan lämpötilaan, jotta se on riittävästi jähmettynyt ulostyönnettäväksi muotista. Lopuksi muotti avataan ja kappale poistetaan muotista, jonka jälkeen joissain ruiskuvalujaksoissa on vielä tauko-aika. Tauko-aika voidaan tarvita esimerkiksi, jos kappale on tarttunut muottiin ja se irrottamiseen muotista tarvitaan useampi ulostyöntö, tai kappale täytyy poistaa manuaalisesti. Taukoajan jälkeen uusi ruiskuvalujakso alkaa alusta. (Järvelä et al. 2000, s. 48)

Kuvassa 3 näkyy ruiskuvalujakson, eli ruiskuvalukoneen yhden työkierron eri vaiheet, jotka seuraavat toisiaan, mutta tapahtuvat myös osittain samanaikaisesti. Kuvassa näkyy muun muassa miten seuraavassa työkierrossa muottiin ruiskutettavan materiaalin plastisointi tapahtuu todellisuudessa samaa aikaan edellisen työkierron jäähtytysvaiheen kanssa. Näin prosessin ajankäyttöä saadaan tehostettua. Lisäksi kuvassa 3 näkyy vaiheiden keston suhde koko jaksonaikaan, eli yhden ruiskuvalukoneen tuotteen valmistukseen kuluvaan aikaan. (Järvelä et al. 2000, s. 47)



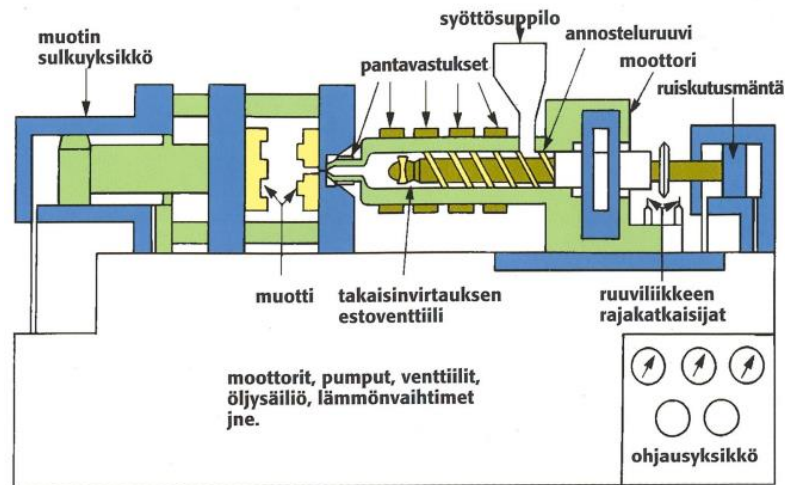
**Kuva 3.** Ruiskuvalujakson jakautuminen eri vaiheisiin (Järvelä et al. 2000, s. 47).

## 3.2 Ruiskuvalukone

Kuvan 4 mukaisen nykyaikaisen ruiskuvalukoneen tehtävänä on toteuttaa ruiskuvalusyklin vaiheet, eli tarkemmin muotin avaaminen ja sulkeminen, muottipuolikkaat kiinni pitävän sulkuvoiman muodostaminen, plastisoidun materiaalin ruiskuttaminen muottiin sekä seuraavaa muotin täyttöä varten materiaalin annostus ja plastisointi. Ruiskuvalukone



voidaan jakaa neljään toiminnalliseen yksikköön, jotka ovat sulkuyksikkö, ruiskutusyksikkö, käyttöyksikkö ja ohjausyksikkö. (Järvelä et al. 2000, s. 92; Järvinen & Viitanen 2000, s. 106–107)



**Kuva 4.** Ruiskuvalukone (Järvinen & Viitanen 2000, s. 107).

Sulkuyksikön tehtävänä on sulkea muotti, pitää se suljettuna ruiskutus- ja jälkipainevaiheen aikana, avata muotti sekä työntää valmis kappale ulos muotista (Järvelä et al. 2000, s. 94; Lähteenmäki 2016). Se koostuu sekä liikkuvasta, että kiinteästä muottipöydästä, joihin muotinpuoliskot kiinnitetään (Järvelä et al. 2000, s. 93–94).

Ruiskutusyksikön tärkeimmät osat ovat puolestaan kierukkaruuvi, sulatussylinteri ja lämpövastukset, suutin, ruuvin käyttökoneisto ja -moottori sekä suppilo (Kurri et al. 2002, s. 74). Sen päätehtävä on plastisoida suppilon kautta sylinteriin syötetty materiaali, kuljettaa sula suuttimelle ja ruiskuttaa se muottiin (Järvelä et al. 2000, s. 100–101). Materiaali syötetään siis suppilosta sylinteriin, jonka sisällä on ruuvi, joka plastisointivaiheessa liikkuu pyörien taaksepäin keräten eteensä ruiskutukseen tarvittavan määrän materiaalia. Ruiskutusvaiheessa ruuvi liikkuu eteenpäin pyörimättä toimien mäntänä ja pakottaen materiaalin muottiin. (Lähteenmäki 2016)

Ohjausyksiköllä ohjataan, säädetään ja hallitaan ruiskuvaluprosessia, kuten sulan lämpötilaa, ruiskutusnopeutta, jälkipainetta, muotin lämpötilaa sekä monia muita toimintoja (Järvelä et al. 2000, s. 111). Käyttöyksikkö puolestaan tuottaa ruiskuvalukoneen tarvitseman käyttövoiman (Järvelä et al. 2000, s. 335).

## 4. PUUMUOVIKOMPOSIITTIIEN RUISKUVALU

Pitkään puumuovikomposiittien muodonantoon kohdistunut kehitystyö keskittyi lähes ainoastaan ekstruusioon, joka on yleisin puumuovikomposiittien valmistusmenetelmä (Behravesch et al. 2010; Gardner et al. 2015). Viime aikoina myös ruiskuvalamista on tutkittu ja kehitetty eteenpäin paljon, ja ruiskuvaletut puumuovikomposiittituotteet yleistyvät voimakkaasti (Carus & Eder 2014; Gardner et al. 2015). Ruiskuvalamisessa kiinnostaa sillä saavutettavat monimutkaiset geometriset muodot, korkea prosessointinopeus, korkea mekaaninen kestävyys sekä hyvä mittapysyvyys (Migneault et al. 2009; Wang & Lau 2013). Lisäksi puumuovikomposiittien ruiskuvalun yleistymistä edesauttaa se, että prosessiin sopivia koneita on saatavilla runsaasti. Tämä johtuu siitä, että puumuovikomposiitteja, joiden matriisi on kestopuovi, voidaan ruiskuvalaa samoilla laitteilla kuin muoveja. (Carus et al. 2008; Wang & Lau 2013)

Puumuovikomposiittien ruiskuvalaminen voidaan luokitella kahteen menetelmään: ruiskuvaluun esisekoitetulla pelletoidulla materiaalilla sekä yhtä aikaa tapahtuvaan linjasekoitukseen ja ruiskuvaluun (Schwendemann 2008). Ruiskuvalussa käytettävät pelletit valmistetaan yleensä ekstruusiolla (Wang & Lau 2013).

Vaikka ala on kehittynyt kovaa vauhtia eteenpäin, puumuovikomposiittien ruiskuvalamisessa kohdataan edelleen useita haasteita, jotka ovat hidastaneet menetelmän yleistymistä (Kuzman et al. 2008; Wang & Lau 2013; Carus & Eder 2014). Niitä tarkastellaan tässä luvussa. Lisäksi esitellään ongelmien kannalta keskeisiä ruiskuvaluprosessin tärkeimpiä prosessiparametreja ja ruiskuvalettavan materiaalin ominaisuuksia, sekä tarkastellaan miten ne ovat yhteydessä toisiinsa ja vaikuttavat lopputuotteeseen.

### 4.1 Puumuovikomposiittien ruiskuvalun haasteet

Kuten sanottua, ruiskuvaletuilla puumuovikomposiiteilla on paljon etuja, kuten hyvät mekaaniset ominaisuudet. Niistä huolimatta ruiskuvaletut puumuovikomposiitit ovat menestyneet pitkään huomattavasti mahdollisia kykyjään huonommin, jonka takia niiden yleistymisen komposiittiteollisuudessa on ollut hidasta. (Kuzman et al. 2008; Wang & Lau 2013) Puumuovikomposiitteja ruiskuvalaessa on useita prosessointihaasteita, kuten erilaisten laatuviikojen syntymistä, ja niiden työstäminen on koettu vaikeammaksi kuin perinteisempien ruiskuvalumateriaalien (Kuzman et al. 2008). Tässä alaluvussa käsitellään puumuovikomposiittien ruiskuvalamisen ongelmia eli yleisimpiä syitä siihen, miksi puumuovikomposiitin ruiskuvalu epäonnistuu.

Puumuovikomposiittien ruiskuvalun haasteet liittyvät pitkälti erilaisten prosessiparametrien, eli käsittelyolosuhteiden, ja ruiskuvalettavan materiaalin ominaisuuksien optimointiin. Prosessiparametrit ja materiaalin ominaisuudet vaikuttavat paljon lopputuotteen ominaisuuksiin ja laatuun, jolloin halutun lopputuloksen saavuttamiseksi niiden säätäminen mahdollisimman hyväksi on tärkeää. (Kim & Pal 2010, s. 68; Chan et al. 2018) Tämä on kuitenkin usein vaikeaa, sillä ne ovat usein toisistaan riippuvaisia tekijöitä, ja vaihtelevat erilaisten ruiskuvalukoneiden, materiaalien ja muotin mukaan. Puumuovikomposiitin ruiskuvalun onnistumiseksi on siis oltava kattava ymmärrys siitä, miten eri prosessiparametrit ja materiaaliominaisuudet vaikuttavat toisiinsa. (Kim & Pal 2010, s. 68) Usein juuri tiedon puute on syy erilaisiin ongelmiin prosessoinnissa ja tuotevikoihin, sillä tutkimuksia puumuovikomposiittien ruiskuvalusta on tehty vasta vähän (Montanes et al. 2019). Tarkemmin näihin prosessiparametreihin ja materiaaliominaisuuksiin tutustutaan seuraavassa luvussa, jossa käsitellään niiden välisiä yhteyksiä ja vaikutuksia lopputuotteen ominaisuuksiin.

## **4.2 Puumuovikomposiittien ruiskuvaluprosessiin ja lopputuotteeseen vaikuttavat parametrit ja materiaaliominaisuudet**

Ruiskuvaluprosessiin ja lopputuotteen ominaisuuksiin vaikuttaa paljon prosessiparametrit sekä ainesosamateriaalit ja niiden ominaisuudet, eli mitä muovia ja puulajia sekä minkälaisia lisäaineita käytetään (Šercer et al. 2009; Chan et al. 2018). Eri ainesosamateriaalien vertailu jätetään kuitenkin tästä työstä pois ja keskitytään tutkimaan muiden puumuovikomposiittien materiaaliominaisuuksien vaikutusta prosessiin ja lopputuotteeseen.

Erilaisista materiaaliominaisuuksista tässä työssä tarkastellaan puulujitteiden ja muovimatriisin rajapintojen sitoutumista, puun lämpötilaherkkyyttä ja hydrofiilisyyttä, puupitoisuutta, puulujitteiden ja matriisin sekoittumisen tasaisuutta, eli homogeenisuutta sekä puulujitteiden kokoa, hajoamista ja järjestäytymistä. Prosessiparametreista tarkastellaan ruiskuvaluprosessin tärkeimpiä parametreja, eli lämpötilaa, ruiskutusnopeutta ja -painetta sekä jälkipainetta ja jälkipaineaika (Šercer et al. 2009; Behravesch et al. 2010).

### **4.2.1 Puulujitteiden ja muovimatriisin rajapintojen sitoutuminen**

Yksi merkittävimmistä lopputuotteeseen vaikuttavista puumuovikomposiitin materiaaliominaisuuksista on se, kuinka lujasti rakenteessa puulujitteet ja muovi ovat sitoutuneet toisiinsa. Muovien ollessa hydrofobinen eli vettä hylkivä, ja puun ollessa hydrofiilinen eli vettä imevä materiaali, sitoutuvat ne toisiinsa heikosti erilaisten kemiallisten luonteidensa

vuoksi, mikä johtaa huonoihin fysikaalisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin. (Ashori 2008; Kim & Pal 2010, s. 26; Ndiaye et al. 2012; Gardner et al. 2015)

Puumuovikomposiiteissa käytetään usein erilaisia kytKentäaineita parantamaan muovin ja puun välistä sitoutumista, jolloin lujitteiden mekaaniset ominaisuudet saadaan täysmääräisesti käyttöön jännityksen siirtyessä tehokkaammin matriisiin ja puulujitteiden välillä (Migneault et al. 2009; Kim & Pal 2010, s. 26; Wang & Lau 2013). KytKentäaineet kasvattavat esimerkiksi komposiitin lujuutta, jäykkyyttä eli kimmomoduulia ja iskun kestävyttä sekä vähentävät veden absorboitumista ja parantavat korkeiden lämpötilojen kestävyttä. KytKentäaineen valitseminen on tärkeää, sillä oikeanlaisena se voi parantaa komposiitin suorituskykyä jopa 30–40 % verrattuna huonosti toimivaan kytKentäaineeseen. (Kuzman et al. 2008)

#### **4.2.2 Puulujitteiden lämpötilaherkkyys ja prosessointilämpötila**

Puulujitteiden lämpötilaherkkyys toimii rajoittavana tekijänä ruiskuvaluprosessin aikana vallitseville lämpötiloille. Jos käsittelylämpötila kohoaa yli 200 °C:n lämpötilan, puu alkaa hajoamaan, mikä vaikuttaa negatiivisesti puumuovikomposiittituotteen ominaisuuksiin, kuten lujuuteen ja jäykkyyteen. (Kuzman et al. 2008; Migneault et al. 2009; Kim & Pal 2010, s. 24; Wang & Lau 2013; Gardner et al. 2015) Lisäksi liian suuri lämpötila lisää höyryjen muodostumista, mikä aiheuttaa tyhjien tilojen muodostumista materiaaliin. Tällainen huokoisuus heikentää osaltaan komposiitin lujuutta, sillä tyhjätilat toimivat kapaleen jännityskeskittiminä. (Behravesch et al. 2010)

Lämpötilarajoitus luo haasteita, sillä ruiskuvalukoneen sylinterissä, jossa plastisointi tapahtuu, käsittelylämpötilan olisi hyvä olla mahdollisimman korkea. Tämä sen takia, jotta matriisina toimivan muovin viskositeetti alenisi, eli virtaaminen helpottuisi, mikä parantaa lujitteiden sekoittumista siihen. (Chan et al. 2018) Ruiskutusyksikössä vaikuttavien lämpötilojen lisäksi muotin lämpötila on säädettävä lopputuotteen kannalta otollisimmaksi, sillä se vaikuttaa muotin täyttymiseen ja siten komponentin lujuuteen ja pinnanlaatuun (Kuzman et al. 2008; Behravesch et al. 2010).

#### **4.2.3 Puulujitteiden hydrofiilisyyden ja ruiskuvalettavan materiaalin kosteuspiitoisuus**

Puulujitteiden kyky absorboida vettä vaikuttaa monella tavalla puumuovikomposiittien ruiskuvaluprosessiin ja lopputuotteeseen (Wang & Lau 2013). Jos puu ei ole suojattuna lopputuotteessa ja puulujitteet pääsevät kosketukseen veden kanssa, tapahtuu puun turpoamista. Turpoaminen vähentää lujitteiden ja matriisin välistä adheesiota, mikä johtaa

materiaalin mekaanisten ominaisuuksien heikkenemiseen. Lisäksi materiaalin väri ja koko muuttuvat, ja lopulta voi tapahtua biologista hajoamista. (Clemons 2008; Ndiaye et al. 2012; Wang & Lau 2013) Eri prosessiparametrit ja materiaaliominaisuudet vaikuttavat siihen, ovatko puulujitteet suojattuja, eli ympäröikö kaikkia lujitteita hydrofobinen muovimatriisi, joka estää tehokkaasti kosteuden tunkeutumisen niiden luokse. Esimerkiksi puulujitteiden koko, komposiitin puupitoisuus, lujitteiden ja matriisin sidoksen vahvuus sekä sekoittumisen tasaisuus vaikuttavat siihen, altistuvatko puulujitteet lopputuotteessa kosteudelle ja kuinka paljon. (Koto & Tiisala 2004; Kuzman et al. 2008; Migneault et al. 2009; Wang & Lau 2013; Teuber et al. 2016)

Lisäksi puulujitteiden hydrofiilisyytys vaikuttaa lopputuotteen ominaisuuksiin sen mukaan, kuinka kosteuspitoista puuta ruiskuvalettava materiaali sisältää (Schwendemann 2008; Šercer et al. 2009; Behravesh et al. 2010; Wang & Lau 2013). Ruiskuvalumenetelmän ollessa ruiskuvalu esisekoitetulla pelleteidulla materiaalilla, kosteuspitoisuuden täytyy olla puumuovikomposiittipelleteissä erittäin alhainen, eli alle 0,15 % (Schwendemann 2008). Tämä johtuu siitä, että ruiskuvaluprosessissa kosteudesta aiheutuva turpoaminen ja korkean lämpötilan vaikutuksesta materiaalista vapautuva vesihöyry lisäävät valmiin tuotteen huokoisuutta ja pintavirheiden riskiä. Ne heikentävät komposiitin lujuutta ja voivat johtaa komposiitin ennenaikaiseen rikkoutumiseen kuormituksen aikana. (Schwendemann 2008; Šercer et al. 2009; Behravesh et al. 2010; Wang & Lau 2013) Lujuuden heikkenemisen lisäksi kosteus aiheuttaa komposiitin venymän heikkenemistä (Kuzman et al. 2008). Puulujitteiden kuivaaminen ja niiden kuivana pitäminen on kuitenkin vaikeaa (Koto & Tiisala 2004).

#### **4.2.4 Puupitoisuus**

Puumuovikomposiittimateriaalin parhaan mahdollisen puupitoisuuden löytäminen on tärkeää, sillä liian matala lujitepitoisuus voi heikentää lujuusominaisuuksia ja liian korkea puolestaan muovattavuutta sekä mekaanisia ominaisuuksia (Kuzman et al. 2008; Wang & Lau 2013). Ruiskuvaluprosessin aikana prosessoitavan materiaalin on kyettävä virtaamaan nestemäisesti, eli sen viskositeetti ei saa olla liian suuri. Tämän takia tavallisesti ruiskuvalettavat puumuovikomposiitit sisältävät lyhyitä lujitteita ja niiden lujitepitoisuus on suhteellisen pieni. (Wang & Lau 2013) Puupitoisuudet ruiskuvalettavissa puumuovikomposiiteissa ovat suhteellisen pieniä verrattuna puun osuuteen puumuovikomposiiteissa valmistusprosessista riippumatta. Puupitoisuudesta ruiskuvalussa on hieman eroja eri lähteiden välillä. Wang ja Lau (2013) ovat todenneet ruiskuvalussa puumuovikomposiittien puupitoisuuden olevan usein alle 20 painoprosenttia, kun taas Koto ja Tiisala (2004) ovat kertoneet vastaavan määrän olevan 30–50 %. Ala kehittyy koko ajan ja

ruiskuvalamalla on esimerkiksi onnistuttu valmistamaan puumuovikomposiittituotteita, joissa on 85 % puuta (Koto & Tiisala 2004).

Sen lisäksi että puupitoisuuden kasvaessa komposiitin viskositeetti kasvaa, myös lujuus ja jäykkyys kasvavat. Venymä puolestaan pienenee lähes lineaarisesti puun osuuden kasvaessa komposiitissa. (Kuzman et al. 2008; Šercer et al. 2009; Behraves et al. 2010; Chan et al. 2018) Lisäksi lujitepitoisuuden kasvaessa veden absorptio lisääntyy valmiissa tuotteessa komposiitin tasaisen sekoittumisen vaikeutuessa (Koto & Tiisala 2004; Wang & Lau 2013).

#### 4.2.5 Homogeenisuus

Sekä pellettien valmistuksessa että samassa vaiheessa ruiskuvalun kanssa tapahtuvassa linjasekoituksessa pyritään materiaalin tasaiseen sekoittumiseen eli homogeenisuuteen (Schwendemann 2008). Tasaisella sekoittumisella tarkoitetaan, että lujitteet ovat täysin erillään toisistaan ja jokaista niistä ympäröi matriisi (Wang & Lau 2013). Materiaalin epähomogeeniseen sekoittamista aiheuttaa lujitteiden helppo takertuminen toisiinsa, sekä puun ja muovin heikko sitoutuminen erilaisen kemiallisen luonteen takia. Epähomogeeninen sekoittuminen heikentää komposiitin mekaanisia ominaisuuksia, kuten lujuutta ja jäykkyyttä. Alueet, jotka sisältävät pelkästään matriisina toimivaa muovia ovat heikkoja, kun taas pelkkiä lujitteita sisältävät alueet ovat alttiita mikrohalkeilulle. (Wang & Lau 2013)

Komposiitin homogeenisuus vähentää myös veden imeytymistä ja siten tilavuuden turpoamista. Tämä perustuu siihen, että homogeenisessa materiaalissa yksittäisiä lujitteita ympäröi muovi, joka suojaa niitä kosteudelta. Epähomogeenisessa materiaalissa näin ei ole ja lujitekasamat ovat hyvin alttiita kosteudelle. (Migneault et al. 2009) Ekstruusiossa tai ruiskuvalussa tapahtuvaa sekoittumista voidaan helpottaa esimerkiksi erottelemalla lujitteet valmiiksi toisistaan, käyttämällä lujitteita, joilla on pieni pituus/leveys -suhde, säätämällä puupitoisuus sellaiseksi, ettei lujitteiden takertumista tapahdu, sekä parantamalla puulujitteiden ja matriisin rajapintojen yhteensopivuutta (Wang & Lau 2013; Teuber et al. 2016).

#### 4.2.6 Puulujitteiden koko

Puulujitteiden koko vaihtelee eri puumuovikomposiittisovelluksissa (Gardner et al. 2015). Puulujitteita, joiden mittasuhte, eli pituus/ leveys -suhde on suurempi kuin 5:1 kutsutaan puukuiduiksi (Kuzman et al. 2008). Mittasuhteen ollessa 1:1:stä 5:1:een puhutaan puu-

partikkeleista ja puujauhosta (Kuzman et al. 2008; Wang & Lau 2013). Puumuovikomposiiteissa käytettävien yksittäisen puulujitteen koko voi olla väliltä 0,075–2,0 mm, mutta yleensä lujitteet ovat kooltaan 0,50–1,0 mm (Kuzman et al. 2008).

Lujitteiden mittasuhteen kasvattaminen parantaa lujuutta ja jäykkyyttä, sillä sen kasvaessa kuormituksen siirtotehokkuus matriisista lujitteisiin kasvaa (Kuzman et al. 2008; Migneault et al. 2009). Suhteen pienentäminen parantaa puolestaan tuotteen sekoittumista muovimatriisiin, jolloin komposiitista saadaan homogeenisempaa ja sitä kautta esimerkiksi valmiin komposiitin kosteusalttius vähenee (Migneault et al. 2009; Teuber et al. 2016). Voidaan myös sanoa, että mitä monimutkaisempaa tuotetta ollaan valmistamassa, sitä pienempi puulujitteiden koon on oltava (Kuzman et al. 2008).

#### **4.2.7 Puulujitteiden hajoamisalttius**

Puumuovikomposiitteja ruiskuvalaessa on otettava huomioon, että puulujitteet hajoavat helposti luonnon vaikutuksesta, mikä muuttaa tuotteen ominaisuuksia. Hajoamismekanismia on erilaisia, sillä biologisen hajoamisen lisäksi hajoamista tapahtuu esimerkiksi termisen, vesipohjaisen, fotokemiallisen, kemiallisen tai mekaanisen prosessin kautta. Luonnollista hajoamisprosessia on tarpeellista hidastaa tai estää kokonaan pitkän käyttöajan puumuovikomposiittituotteilla. Hajoamista estetään esimerkiksi muokkaamalla puun soluseinää erilaisilla kemiallisilla käsittelyillä. (Wang & Lau 2013) Puumuovikomposiittien ruiskuvalua käsittelevässä kirjallisuudessa on hajoamismekanismista keskitytty käsittelemään liian korkean lämpötilan aiheuttaman lämpöhajoamisen ja puulujitteiden kosteuden imemisestä johtuvan biologisen hajoamisen lisäksi hajoaminen mekaanisen kitkan vaikutuksesta (Clemons 2008; Behravesch et al. 2010; Wang & Lau 2013).

Ekstruusiolla valmistettuja puumuovikomposiittipellettejä ruiskuvalaessa, on huomioitava ekstruusioprosessin mekaanisen kitkan aiheuttama lujitteiden hajoaminen. Hajoamisen aiheuttama lujitteiden mittasuhteiden pieneneminen heikentää komposiitin lujuutta ja jäykkyyttä. (Migneault et al. 2009; Behravesch et al. 2010; Wang & Lau 2013) Itse ruiskuvalun aiheuttama mekaaninen kitka ei ole samantasoista kuin ekstruusion, eikä se aiheuta merkittäviä lujitevaurioita, jos ruiskutusaine on onnistuttu säätämään oikeanlaiseksi (Behravesch et al. 2010; Wang & Lau 2013). Eli jos ruiskuvaletaan komposiittia niin, ettei siitä ole valmistettu pellettejä, ei lujitteiden hajoamista tarvitse juuri lainkaan huomioida (Wang & Lau 2013).

Verrattuna muovikomposiiteissa yleisesti käytettyihin synteettisiin kuituihin puu murtuu vähemmän todennäköisesti prosessoinnin aikana, eli säilyttävät mittasuhteensa paremmin. Tämä johtuu siitä, että puulujitteet ovat synteettisiä lujitteita joustavampia. (Wang & Lau 2013)

#### **4.2.8 Puulujitteiden järjestäytyminen**

Sekoitus- ja muovausprosessin aikana lujitteiden suuntautumisessa tapahtuu muutoksia, jotka johtavat lujitteiden suuntautumisjakaumaan lopullisissa komposiiteissa. Puulujitteiden järjestäytymiseen lopputuotteessa vaikuttaa monet erilaiset prosessiparametrit ja ainesosamateriaalien ominaisuudet. (Fu et al. 1999) Lujitteiden suuntautumisjakauma puolestaan vaikuttaa esimerkiksi komposiitin lujuuteen, jäykkyyteen, sitkeyteen ja kosteuden imeytymiseen (Fu et al. 1999; Migneault et al. 2009).

Kun puumuovikomposiittia ruiskuvaletaan, suuntautuvat puulujitteet kappaleen sisällä kohtisuoraan virtaukseen nähden ja pinnalla päävirtaussuuntaan suorina. Lisäksi komposiitin pintaan muodostuu sileä muovipitoinen pinta. (Migneault et al. 2009) Ruiskuvalussa lujitteiden järjestäytymiseen vaikuttaa muun muassa muotin geometria ja lämpötila, ruuvien kierrosnopeus, ruiskutusnopeus sekä lujitteiden alkuperäinen pituus ja materiaalin lujitepitoisuus. Esimerkiksi matala muotin lämpötila voi johtaa paksuun kerrokseen virtaussuuntaan suuntautuneita puulujitteita. Muotin lämpötilan nostamisen lisäksi ruuvien kiertonopeuden ja ruiskutusnopeuden nostaminen puolestaan pienentävät tämän kuorikerroksen paksuutta. (Fu et al. 1999)

Ruiskuvalamisessa syntyvä puulujitteiden järjestäytyminen parantaa puumuovikomposiittien kosteudenkestävyyttä. Hydrofobinen, muovipitoinen pinta ruiskuvaletuissa komposiiteissa estää veden diffuusiota, jonka lisäksi pintakerroksien pituussuuntaiset lujitteet eivät pysty siirtämään sitä pinnalta komposiittituotteen sisälle. Nämä parantavat materiaalin mittapysyvyyttä, sillä sen tilavuuspaisunta vähenee kosteuden absorption vähentyessä. (Migneault et al. 2009) Myös puumuovikomposiitin mekaaninen suorituskyky paranee, jos puulujitteet ovat järjestäytyneet sen sijaan, että ovat suuntautuneet satunnaisesti. Tämä johtuu siitä, että orientoidut lujitteet siirtävät satunnaisesti suuntautuneita paremmin jännityksiä muovimatriisiin ja puulujitteiden välillä, jolloin esimerkiksi lujuus ja jäykkyys paranevat komposiitissa. (Migneault et al. 2009)

#### **4.2.9 Ruiskutusnopeus ja -paine**

Ruiskutusnopeus ja -paine vaikuttavat ruiskuvaletun tuotteen pinnanlaatuun, lujuuteen sekä jäykkyyteen, jonka takia niiden säätäminen oikeanlaisiksi on tärkeää (Kuzman et



al. 2008; Behraves et al. 2010). Liian korkea ruiskutusnopeus aiheuttaa pintavirheitä (Kuzman et al. 2008). Ruiskutusnopeus ei saa olla myöskään liian matala, sillä ruiskutuksen on saavutettava nopeus, jolla muotti täyttyy kokonaan ennen kuin materiaali alkaa jähmettyä. Jos jähmettymistä ehtii tapahtua, muotti ei täyty täysin ja suuria lujuutta alentavia tyhjiä tiloja pääsee muodostumaan. (Kuzman et al. 2008; Behraves et al. 2010)

Ruiskutusnopeus on yhteydessä materiaalin puupitoisuuteen. Kun ruiskuvalettavan puumuovikomposiitin lujitepitoisuus on korkea, eli puun osuus on yli 50 painoprosenttia, on ruiskutusnopeutta nostettava, sillä muuten sula ei täyty muottia kokonaan. Tämä johtuu siitä, että puun osuuden kasvaessa komposiitin viskositeetti kasvaa. (Kuzman et al. 2008; Šercer et al. 2009)

Liian korkea ruiskutusaine ruiskuvaluprosessissa puolestaan kasvattaa mekaanista kitkaa ja siten lämpötilaa. Lujitteet hajoavat kitkan aiheuttaman mekaanisen kulutuksen, eli leikkausvoimien, sekä korkean lämpötilan vaikutuksesta, jolloin lujitteiden koon pienessä komposiitin lujuus ja jäykkyys pienenevät. Lisäksi lämpötilan noustessa höyryjen vapautumisesta aiheutuvalle huokoisuudelle on lujuutta pienentävä vaikutus. (Kuzman et al. 2008; Migneault et al. 2009; Behraves et al. 2010) Huokoisuuden muodostumista lisää osaltaan myös hidas ruiskutusnopeus, sillä silloin kosteuden höyrystymiselle on enemmän aikaa (Kuzman et al. 2008; Behraves et al. 2010). Ruiskuvalussa käytetään usein voiteluaineita vähentämään leikkausvoimia, jolloin lujitteiden hajoamista saadaan vähennettyä (Migneault et al. 2009).

Kun tarkastellaan ruiskutusaineen arvoja silloin, kun ne eivät ole niin korkeita, että leikkausvoimat olisivat huomattavia, ruiskutusaineen kasvaessa lujuus sekä materiaalin jäykkyys kasvavat ja venymä pienenee. Näistä ainoastaan jäykkyyden muutos on huomattava, jolloin lujuuden ja venymän muutokset eivät vaikuta lopputuotteen ominaisuuksiin. (Behraves et al. 2010)

#### **4.2.10 Jälkipaine ja jälkipaineaika**

Jälkipaine ja jälkipaineaika ovat tärkeitä ruiskuvaluprosessin parametreja, jotka vaikuttavat lopputuotteeseen. Ne vaikuttavat erityisesti valmistettavan kappaleen lujuuteen ja jäykkyyteen. Tavallisesti muovia ruiskuvalaessa jälkipaine on pienempi kuin ruiskutusaine, ja jälkipaineaika on ruiskutusaikaa pidempi. Kun puhtaan muovin sijaan ruiskuvataan puumuovikomposiitteja, on huomioitava prosessin aikana puusta vapautuvista kaasusta johtuva huokoisuus ja siitä seuraava lujuuden menetys. Jälkipaineen nostami-

nen ruiskutuspainetta suuremmaksi ehkäisee huokoisuuden muodostumista sekä vähentää muodostuneiden tyhjien tilojen määrää ja kokoa, jotka heikentävät lujuutta. (Behraves et al. 2010)

Jälkipaineajan pidentäminen puolestaan kasvattaa jäykkyyttä. Lisäksi se kasvattaa lujuutta ja pienentää venymää, mutta niin vähän, ettei niillä ole juuri lainkaan merkitystä lopullisten ominaisuuksien kannalta. (Behraves et al. 2010)

## 5. YHTEENVETO

Työssä tutkittiin puumuovikomposiitteja ja niiden ruiskuvalamista. Työssä tarkasteltiin, millaisia materiaaleja puumuovikomposiitit ovat, millaisia haasteita puumuovikomposiittien ruiskuvalussa on, sekä miten eri suunnittelu- ja valmistustekijät, kuten prosessoitavan materiaalin ominaisuudet ja prosessin parametrit vaikuttavat ruiskuvalettujen puumuovikomposiittien ominaisuuksiin.

Puumuovikomposiitit ovat komposiitteja, joiden matriisina toimii muovi ja lujitteena puu. Niiden ominaisuuksissa yhdistyy puun ja muovin parhaat ominaisuudet, kuten muovin kosteudenkestävyys ja muovattavuus sekä puun mekaaniset ominaisuudet. Puumuovikomposiittien etu on erityisesti se, että ne ovat poikkeuksellisen lujia ja jäykkiä ollessaan kevyitä. Puumuovikomposiitit ovat parhaimmillaan myös ympäristöystävällisiä materiaaleja, sillä ne ovat muun muassa kestäviä, pitkäikäisiä sekä kierrätettäviä, ja niiden valmistuksessa voidaan hyödyntää kierrätysmateriaaleja. Ominaisuuksiensa ansiosta puumuovikomposiitit ovat hyviä vaihtoehtoja monille perinteisille materiaaleilla ja niiden käyttäminen yleistyy koko ajan. Tällä hetkellä puumuovikomposiiteilla on eniten sovelluskohteita rakennus- ja autoteollisuudessa, esim. ulkotilojen terasseissa ja autojen sisäverhoilussa.

Viime aikoina puumuovikomposiittien muodonantomenetelmistä ruiskuvalamista on tutkittu enenevässä määrin. Ruiskuvalamisella on puumuovikomposiittien muodonantomenetelmänä suuri potentiaali, mutta sen yleistymistä ovat hidastaneet useat haasteet. Yleisimmät puumuovikomposiittien ruiskuvalun ongelmat liittyvät prosessoitavan materiaalin ominaisuuksien ja prosessiparametrien optimointiin. Jos näitä tekijöitä ei olla säädetty lopputuotteen kannalta mahdollisimman otollisiksi, aiheutuu erilaisia tuotevikoja ja lopputuotteen ominaisuudet. Yleisimmin komposiitin lujuus, jäykkyys sekä veden absorptionestokyky heikkenevät. Materiaaliominaisuuksien ja prosessiparametrien säätäminen mahdollisimman hyväksi on kuitenkin vaikeaa, sillä ne riippuvat usein toisistaan ja vaihtelevat esimerkiksi eri koneen ja materiaalin mukaan. Lisäksi aihetta ei olla tutkittu riittävästi.

Työssä tarkasteltiin materiaaliominaisuuksista puulujitteiden ja muovimatriisin rajapintojen sitoutumisen, puun lämpötilaherkkyyden ja hydrofiilisyyden, puupitoisuuden, puulujitteiden ja matriisin sekoittumisen tasaisuuden, eli homogeenisuuden sekä puulujitteiden koon, hajoamisen ja järjestäytymisen vaikutuksia ruiskuvalettujen puumuovikomposiittien ominaisuuksiin. Prosessiparametreista tarkasteltiin lämpötilan, ruiskutusnopeuden

ja -paineen sekä jälkipaineen ja jälkipaineajan vaikutuksia. Lopputuotteen kannalta tärkeimpinä materiaaliominaisuuksina ja prosessiparametreina voi nostaa esiin lujitteiden ja matriisin rajapintojen sitoutumisen, puun lämpötilaherkkyden ja prosessointilämpötilan, puulujitteiden hydrofiilisyyden ja ruiskuvalettavan materiaalin kosteuspitoisuuden sekä homogeenisuuden.

Puumuovikomposiiteissa lujitteiden ja matriisin rajapintojen luonnostaan heikkoa sitoutumista parannetaan kytkentäaineilla. Sitoutumisen ollessa hyvä jännitys siirtyy tehokkaasti matriisilta lujitteelle, jolloin esimerkiksi lujuus ja jäykkyys paranevat. Ruiskuvalu-prosessissa on tärkeää myös, ettei käsittelylämpötilat nouse niin korkeiksi, että puu alkaisivat hajoamaan, mikä heikentää lopputuotteen mekaanisia ominaisuuksia. Myös ruiskuvalettavan puumuovikomposiittimateriaalin kosteuspitoisuus on tärkeä tekijä lopputuotteen laadun kannalta. Lähtötuotteen kosteuden on oltava mahdollisimman alhainen, sillä prosessin aikana höyrystyvä vesi aiheuttaa tuotteeseen huokoisuutta, joka vähentää sen lujuutta. Lopputuotteen kannalta oleellista on myös, että materiaalin sekoittuminen onnistuu, eli että kaikkia lujitteita ympäröi muovi. Homogeeninen sekoittuminen parantaa puumuovikomposiitin ominaisuuksia, kuten lujuutta ja kosteudenkestävyyttä.

Puumuovikomposiittien ruiskuvalamisessa on edelleen paljon tutkittavaa, erityisesti sen osalta, miten prosessiparametrit ja prosessoitavan materiaalin ominaisuudet vaikutukset toisiinsa ja lopputuotteeseen, ja miten ne voitaisiin säätää mahdollisimman otollisiksi. Lisäksi tietoja esimerkiksi puumuovikomposiittien viime vuosien tuotantomääristä on vaikea löytää, mikä viittaa siihen, että puumuovikomposiittiteollisuuden ajankohtaisesta tilanteesta on tehty vain vähän tutkimusta tai se on vaikeasti saatavilla.

## LÄHTEET

- Akil, H. & Zamri, M. H. (2014). Performance of natural fiber composites under dynamic loading. In Hodzic, A., Shanks, R. (Eds.). *Natural fibre composites: Materials, processes and properties*. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 323–344.
- Arsham Trading (n.d.). WPC Profile. Saatavissa (viitattu 8.11.2023): <https://www.arshamtrading.com/wpc-profile.html>
- Ashori, A. (2008). Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries! *Bioresource Technology*. Vol.99(11), pp. 4661–4667.
- Behraves, A. H., Zohdi Aghdam, A. & Soury, E. (2010). Experimental Investigation of Injection Molding of Wood/Plastics Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. Vol.29(3), pp. 456–465.
- Bledzki, A. K., Letman-Sakiewicz, M. & Murr, M. (2010). Influence of static and cyclic climate condition on bending properties of wood plastic composites (WPC). *Express Polymer Letters*. Vol.4(6), pp. 364–372.
- Callister, W. D. & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction*. Tenth Edition. Wiley-Blackwell, Hoboken. 834 p.
- Carus, M. & Eder, A. (2014). Biocomposites: 352,000 t of wood and Natural Fibre Composites produced in the European Union in 2012 – Executive summary. In Carus, M., Eder, A., Dammer, L., Korte, H., Scholz, I., Essel, R., Breitmayer, E. & Barth, M. (Eds.). *Wood-Plastic Composites (WPC) and Natural Fibre Composites (NFC): European and Global Markets 2012 and Future Trends in Automotive and Construction*. Nova-Institute, Hürth. Saatavissa (viitattu 22.9.2023): <https://piweb.plasteurope.com/members/pdf/p231427b.PDF>
- Carus, M., Gahle, C. & Korte, H. (2008). Market and future trends for wood-polymer composites in Europe: the example of Germany. In Oksman Niska, K., & Sain, M. (Eds.). *Wood-Polymer Composites*. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 300–330.
- Chan, C. M., Vandi, L.-J., Pratt, S., Halley, P., Richardson, D., Werker, A. & Laycock, B. (2018). Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics: A Review. *Polymer Reviews*. Vol.58(3), pp. 444–494.
- Clemons, C. (2008). Raw materials for wood-polymer composites. In Oksman Niska, K., & Sain, M. (Eds.). *Wood-Polymer Composites*. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 1–22.
- Clyne, T. W. & Hull, D. (2019). *An introduction to composite materials*. Third Edition. Cambridge University Press, Cambridge. 345 p.
- Fu, S.-Y., Hu, X. & Yue, C.-Y. (1999). Effects of fiber length and orientation distributions on the mechanical properties of short-fiber-reinforced polymers. *Materials Science Research International*. Vol.5(2), pp. 74–83.
- Gardner, D. J., Han, Y. & Wang, L. (2015). Wood–Plastic Composite Technology. *Current Forestry Reports*. Vol.1(3), pp. 139–150.

- Goodship, V. (2017). *Practical guide to injection moulding*. Second Edition. Smithers Rapra, Shawbury. 380 p.
- Goodship, V. & Love, J. C. (2002). *Multi-material injection moulding*. Vol.13(1). Rapra Technology Ltd, Shawbury. 116 p.
- JELU-WERK (2010). *WPC granulate proves its performance in injection-moulding techniques*. Päivitetty 24.6.2010. Saatavissa (viitattu 8.11.2023): <https://www.jeluplast.com/en/wpc-granulate-in-injection-moulding/>
- Järvelä, P., Syrjälä, K. & Vastela, M. (2000). *Ruiskuvalu*. 3., uudistettu painos. Plastdata, Tampere. 358 s.
- Järvinen, P. & Viitanen, M. (2000). *Muovin suomalainen käsikirja*. Muovifakta, Helsinki. 173 s.
- Kim, J.-K. & Pal, K. (2010). *Recent advances in the processing of wood-plastic composites*. Vol.32. Springer, Berlin/Heidelberg. 176 p.
- Koay, S. C., Subramanian, V., Chan, M. Y., Pang, M. M., Tsai, K. Y. & Cheah, K. H. (2018). *Preparation and Characterization of Wood Plastic Composite Made Up of Durian Husk Fiber and Recycled Polystyrene Foam*. MATEC Web of Conferences 152. pp. 1–7.
- Koto, T. & Tiisala, S. (2004). *Muovi+puu: Puukuitulujitteiset muovikomposiitit*. Lahden ammattikorkeakoulu, muotoiluinstituutti, Lahti. 89 s.
- Krause, K., Sauerbier, P., Koddenberg, T. & Krause, A. (2018). *Utilization of Recycled Material Sources for Wood-Polypropylene Composites: Effect on Internal Composite Structure, Particle Characteristics and Physico-Mechanical Properties*. *Fibers*, Vol.6(4), p. 86.
- Kurri, V., Malen, T., Sandell, R. & Virtanen, M. (2002). *Muovitekniikan perusteet*. 3., uudistettu painos. Opetushallitus, Helsinki. 235 s.
- Kuzman, K., Glojek, A., Žnidarič, U. & Švab, I. (2008). *Development and Characterisation of Eco-Friendly Thermoplastics E! 2819 FACTORY ECOPLAST*. 3rd International Conference on Manufacturing Engineering. pp. 207–214.
- Kärki, T., Lahtela, V. & Mustonen, K. (2019). *The Impact of Primary Sludge on the Physical Features of High-Density Polyethylene (HDPE) Composites*. *Resources*, Vol.8(4), p. 184.
- Lima, D. C., Melo, R. R., Pimenta, A. P., Pedrosa, T. D., Souza, M. J. C. & Souza, E. C. (2019). *Physical–mechanical properties of wood panel composites produced with Qualea sp. sawdust and recycled polypropylene*. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol.27, pp. 4858–4865.
- Lähteenmäki, E. (2016). *Muovien työstö: Ruiskuvalu*. Muoviyhdistys. Päivitetty 18.7.2016. Saatavissa (viitattu 13.2.2023): <https://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/18/osa-9-muovien-tyosto-ruiskuvalu/>
- Migneault, S., Koubaa, A., Erchiqui, F., Chaala, A., Englund, K. & Wolcott, M. P. (2009). *Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood–plastic composites*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Vol.40(1), pp. 80–85.

- Miracle, D. B. & Donaldson, S. L. (2001). Introduction to Composites. In Miracle, D. B., & Donaldson, S. L. (Eds.). *ASM Handbook: Composites*. Vol.21. ASM International, Russell Township, pp. 3–17.
- Montanes, N., Quiles-Carrillo, L., Ferrandiz, S., Fenollar, O. & Boronat, T. (2019). Effects of Lignocellulosic Fillers from Waste Thyme on Melt Flow Behavior and Processability of Wood Plastic Composites (WPC) with Biobased Poly(ethylene) by Injection Molding. *Journal of Polymers and the Environment*. Vol.27(4), pp. 747–756.
- Ndiaye, D., Gueye, M. & Diop, B. (2012). Characterization, Physical and Mechanical Properties of Polypropylene/Wood-Flour Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*. Vol.38, pp. 59–68.
- Petchwattana, N., Covavisaruch, S. & Sanetuntikul, J. (2011). Recycling of wood–plastic composites prepared from poly(vinyl chloride) and wood flour. *Construction and Building Materials*. Vol.28(1), pp. 557–560.
- Rosenstock Völtz, L., Di Guiseppe, I., Geng, S. & Oksman, K. (2020). The Effect of Recycling on Wood-Fiber Thermoplastic Composites. *Polymers*. Vol.12(8), p. 1750.
- Satov, D. V. (2008). Additives for wood-polymer composites. In Oksman Niska, K., & Sain, M. (Eds.). *Wood-Polymer Composites*. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 23–40.
- Schwendemann, D. (2008). Manufacturing technologies for wood-polymer composites. In Oksman Niska, K., & Sain, M. (Eds.). *Wood-Polymer Composites*. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 72–100.
- Šercer, M., Raos, P. & Rujnić-Sokele, M. (2009). Processing of wood-thermoplastic composites. *International Journal of Material Forming*. Vol.2(S1), pp. 721–724.
- Stark, N. M. & Rowlands, R. E. (2003). Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and Fiber Science*. Vol.35(2), pp. 167–174.
- Stokke, D. D., Wu, Q. & Han, G. (2014). *Introduction to wood and natural fiber composites*. Wiley, Newark. 297 p.
- Teuber, L., Osburg, V.-S., Toporowski, W., Militz, H. & Krause, A. (2016). Wood polymer composites and their contribution to cascading utilisation. *Journal of Cleaner Production*. Vol.110, pp. 9–15.
- Vuorinen, J., Mustakangas, M. & Annala, M. (2016). Komposiitit loputtomasti mahdollisuuksia. Tampereen teknillinen yliopisto, Patria, Muoviteollisuus. 20 s. Saatavissa (viitattu 23.3.2023): [http://www.muoviteollisuus.fi/document.php/1/252/komposiitit\\_-\\_loputtomasti\\_mahdollisuuksi/9e832437f8e4e6f3e76e45b5d93d6bf1](http://www.muoviteollisuus.fi/document.php/1/252/komposiitit_-_loputtomasti_mahdollisuuksi/9e832437f8e4e6f3e76e45b5d93d6bf1)
- Wang, H. & Lau, A. K. T. (2013). Hemp and Hemp-Based Composites. In Thakur, V. K. (Eds.). *Green Composites from Natural Resources*. CRC Press, Boca Raton, pp. 63–94.
- WWF. (pvm.). Metsäkato. Saatavissa (viitattu 22.11.2023): <https://wwf.fi/uhat/metsakato/>
- Ye, J. (2003). *Laminated composite plates and shells: 3D modelling*. Springer, London. 273 p.