



PUUMUOVIKOMPOSITIT RAKENNUSTEOLLISUUDEN SOVELLUKSISSA

WOOD-PLASTIC COMPOSITES IN CONSTRUCTION INDUSTRY APPLICATIONS

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Anton Heilä

Tarkastaja: Prof. Timo Kärki

Ohjaaja: TkT Marko Hyvärinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Anton Heilä

Puumuovikomposiitit rakennusteollisuuden sovelluksissa

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

35 sivua, 12 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastaja: Prof. Timo Kärki

Ohjaaja: TkT Marko Hyvärinen

Avainsanat: puumuovikomposiitti, rakennusteollisuus, lujitekuitu, muovimatriisi

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan puumuovikomposiittien sovelluskohteita rakennusteollisuudessa, puumuovikomposiittien ominaisuuksia sekä tulevaisuuden kehitystrendejä. Ensiksi esitellään yleisteoraa komposiiteista sekä puumuovikomposiittien ominaisuuksia. Tämän jälkeen esitellään puumuovikomposiittituotteita rakennusteollisuudessa ja lopuksi pohditaan puumuovikomposiitin kehitystrendejä. Kandidaatintyö toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Puumuovikomposiitin etuna perinteiseen puutavaraan verrattuna painoon nähden hyvät mekaaniset ominaisuudet sekä säänkestokyky. Hydrofiilisen lujitekuidun ja hydrofobisen muovimatriisin välinen yhdistyvyys voi muodostua ongelmaksi, mikä voi heikentää mekaanisia ominaisuuksia. Rakennusteollisuuden sovelluskohteita ovat muun muassa terassilaudat, ikkunoiden ja ovien karmit, sisä- ja ulkoverhoilu, eristemateriaali sekä kattolaatat. Kehitystrendit ovat vahvasti suuntautuneet ympäristöystävällisyyteen, kun kasvavia tutkimuksen aiheita ovat kierrätysraaka-aineiden käyttö, biomuovit sekä selluloosasta valmistetut nanotäyteaineet. Kierrätysraaka-aineet saattavat aiheuttaa mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä, ja biomuovit sekä selluloosanantäyteaineet ovat vielä kalliita, joten tulevaisuudessa ne kaipaavat vielä jatkotutkimuksia.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Anton Heilä

Wood-plastic composites in construction industry applications

Bachelor's thesis

2022

35 pages, 12 figures and 3 tables

Examiner: Prof. Timo Kärki

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

Keywords: wood-plastic composite, construction industry, reinforcing fiber, plastic matrix

In this bachelor's thesis, the applications of wood-plastic composites in the construction industry, the properties of wood-plastic composites and future development trends are studied. First, the general theory of composites and the properties of wood-plastic composites are presented. This is followed by a presentation of wood-plastic composite products in the construction industry and finally the development trends of wood-plastic composite. The bachelor's thesis is done as a literature review.

The advantage of wood-plastic composite compared to traditional timber is its good mechanical properties and weather resistance. The combination of hydrophilic reinforcing fiber and hydrophobic plastic matrix can become a problem, which can decrease mechanical properties. Applications in the construction industry include terrace boards, window and door frames, interior and exterior cladding, insulation material and roof tiles. Development trends have been strongly oriented towards environmental friendliness, with the growing research topics being the use of recycled raw materials, bioplastics and nanofillers made from cellulose. Recycled raw materials may cause deterioration in mechanical properties, and bioplastics and cellulose nanofillers are still expensive, so they will need further research in the future.

LYHENNELUETTELO

FSI	liekin leviämisen indeksi (Flame Spread Index)
HDPE	suuritiheksinen polyeteeni (high-density polyethylene)
LDPE	pienitiheksinen polyeteeni (low-density polyethylene)
PA	polyamidi (polyamide)
PE	polyeteeni (polyethylene)
PP	polypropeeni (polypropylene)
PHA	polyhydroksialkanoaatti (polyhydroxyalkanoate)
PLA	polylaktidi (polylactic acid)
PVC	polyvinylikloridi (polyvinyl chloride)
VOC	haihtuva orgaaninen yhdiste (volatile organic compound)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Tutkimusmenetelmät	8
3	Yleiskatsaus komposiiteista.....	9
3.1	Komposiittien rakenne	9
3.2	Komposiittien valmistusmenetelmät.....	10
3.3	Puumuovikomposiittien ominaisuudet.....	11
3.3.1	Syttyvyys	13
3.3.2	Veden absorptio	14
4	Puumuovikomposiitit rakennusteollisuudessa.....	16
4.1	Piharakentaminen	17
4.2	Ikkunat ja ovet.....	21
4.3	Sisä- ja ulkoverhoilu	21
4.4	Seinät.....	23
4.5	Kattolaatat	23
5	Pohdinta.....	25
5.1	Kierrätysraaka-aineiden käyttö puumuovikomposiiteissa	25
5.2	Biomuovit.....	26
5.3	Nanotäyteaineet.....	27
5.4	Tulevaisuudennäkymät	28
6	Yhteenveto.....	30
	Lähteet	31

1 Johdanto

Viimeisten 20 vuoden aikana ympäristöasioiden sekä energiankulutuksen huomioiminen on lisääntynyt huomattavasti. Tähän on syynä ilmastonmuutos, joka on saanut ihmiset kehittämään uudenlaisia ympäristöystävällisiä sekä kierrätettäviä materiaaleja. Komposiittiteollisuudessa kiinnostus luonnonkuitulujitettuihin komposiitteihin on kasvanut, kun yritetään löytää vaihtoehtoisia lujitekuituja korvaamaan esimerkiksi valta-asemassa olevaa lasikuitua. Luonnonkuitulujitettujen komposiittien onkin tutkittu olevan ympäristöystävällisempi vaihtoehto verrattuna perinteisiin lujitekuituihin. Luonnonkuitukomposiittien markkinat ovat kasvaneet viime vuosina merkittävästi. Vuonna 2016 luonnonkuitukomposiittien markkinakoko oli 4,46 miljardia dollaria ja sen on odotettu kasvavan vuoteen 2024 mennessä 10,89 miljardiin dollariin. (Li et al. 2020, 1–2.)

Rakennusteollisuus on heti ruuantuotannon jälkeen suurin raaka-aineiden kuluttaja maailmassa. On arvioitu, että kaikista ihmisten käyttämistä luonnon raaka-aineista rakennusteollisuuden osuus on 20–50 %. Rakennusteollisuudella on siis suuri vaikutus talouteen tuottamalla pääomaa ja työpaikkoja. Euroopassa rakennusteollisuus luo 18 miljoonaa suoraa työpaikkaa sekä lisäksi valtavasti välillisiä työpaikkoja. Rakennusteollisuudessa on käytössä lukematon määrä erilaisia materiaaleja. Niistä tärkeimpiä ovat sementti, betonin valmistuksessa käytettävät täyteaineet, teräs, puu ja polymeerit. Vuosittain rakennusteollisuus käyttää materiaaleja yli 10 miljardia tonnia. Eniten maailmassa tuotetaan täyteaineita ja sementtiä, joista lähes kaikki menevät rakennusteollisuuden käyttöön, kuten voidaan huomata taulukosta 1. (Bustillo Revuelta 2021, 2–6.) Taulukossa 1 on esitetty yleisten materiaalien vuosittaisia tuotantomäärät ja niiden osuudet, jotka menevät rakennusteollisuuden käyttöön.

Taulukko 1. Rakennusteollisuuden käyttämien materiaalien vuosittaiset tuotantomäärät ja osuudet rakennusteollisuuden käyttöön (Bustillo Revuelta 2021, 5, muokattu).

Materiaali	Vuosittainen tuotantomäärä maailmalla (tonneja)	Rakennusteollisuuden käyttämä osuus tuotetusta materiaalista [%]
Sementti	2 400 000 000	95–100
Täyteaineet	12 000 000 000	95–100
Teräs	1 450 000 000	50
Puutavara	1 000 000 000	noin 60
Polymeerit	150 000 000	noin 20–25
Yhteensä	17 000 000 000	

Kandidaatintyössä tutustutaan puumuovikomposiittien käyttöön rakennusteollisuudessa, käytettyihin matriiseihin, lujitteisiin ja sovelluskohteisiin sekä selvitetään niiden kehitystrendejä. Työ rajataan käsittelemään pääasiallisesti puumuovikomposiitteja eikä siinä käsitellä harvinaisempia luonnonkuituja, koska Suomessa kuidun lähde on tyypillisesti puu. Yleisimpiä luonnonkuituja, muita kuin puukuituja, mainitaan rakennusteollisuuden sovelluksista kerrottaessa. Tulevaisuuden kehitystrendien selvittämisen avulla etsitään tietoa, jota voidaan hyödyntää tulevaisuudessa puumuovikomposiittien tutkimuksissa. Kandidaatintyössä kerrotaan aluksi komposiittien yleistä teoriaa, minkä jälkeen tutustutaan tarkemmin puumuovikomposiitteihin. Lopuksi tutkitaan puumuovikomposiittien kehitystrendejä. Kandidaatintyön tarkoituksena on vastata seuraaviin kysymyksiin:

- Millaisia ominaisuuksia puumuovikomposiiteilla on?
- Mihin puumuovikomposiitteja tällä hetkellä käytetään rakennusteollisuudessa?
- Miten puumuovikomposiittien trendit kehittyvät tulevaisuudessa?

2 Tutkimusmenetelmät

Kandidaatintyö toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, joten tietoa etsittiin pääosin tieteellisistä artikkeleista ja kirjoista. Tieteellisistä artikkeleista ja kirjoista etsittiin yleistietoa komposiiteista, tarkempia ominaisuuksia puumuovikomposiiteista sekä tulevaisuuden kehitystrendejä. Puumuovikomposiittien rakennusteollisuuden sovelluksia tutkittiin yritysten internet-sivuilta. Työ tehdään objektiivisesti eli kirjoittajan omia mielipiteitä ei esitetä.

Kandidaatintyön luotettavuuden ja uskottavuuden varmistamiseksi kiinnitettiin huomiota lähteiden laatuun. Tieteellisiä artikkeleita etsittiin LUT-tiedekirjaston aineistotietokanta Primosta sekä Google Scholar-hakupalvelusta. Lähteiden enimmäisiäksi asetettiin 20 vuotta, jotta tieto olisi mahdollisimman ajan tasalla. Lisäksi työssä pyrittiin mahdollisimman paljon vertaisarvioituja artikkeleita. Yritysten internet-sivuilta etsittiin tietoa tuotteista ja niiden ominaisuuksista, mutta kaikenlainen markkinointiin liittyvä materiaali suodatettiin pois. Lähteiden hakemisessa käytettiin hakusanoina muun muassa puumuovikomposiitti, puukuitu, luonnonkuitu, muovi, rakennusteollisuus ja kierrätys.

3 Yleiskatsaus komposiiteista

Tässä kappaleessa kerrotaan yleisellä tasolla komposiittien rakenteesta sekä puumuovikomposiittien ominaisuuksista.

3.1 Komposiittien rakenne

Komposiitti koostuu kahdesta ominaisuuksiltaan erilaisesta materiaalista, jotka eivät ole sekoittuneet toisiinsa (Muoviteollisuus ry 2022). Nämä materiaalit ovat matriisi ja lujite. Matriisi toimii komposiitin sidosmateriaalina, joka liittää lujitteet yhteen. Lujitteet tarkoittavat matriisin sitomia kuituja tai partikkeleita, jotka nimensä mukaisesti vaikuttavat komposiitin lujuuteen. Niitä voidaan myös käyttää muuttamaan muun muassa jäykkyyttä, sähkönjohtavuutta ja lämmönjohtavuutta. (Vuorinen et al. 2016, 3)

Yksi yleisimmistä matriisimateriaaleista on muovi. Tällöin voidaan puhua muovikomposiiteista tai polymeerikomposiiteista. Muovit voidaan jakaa muovattavuusominaisuuksien perusteella kertamuoveihin ja kestumuoveihin. Kertamuovien perusraaka-aineena toimii hartsi, joka kovettuu kovettumisreaktiossa nestemäisestä muodosta kiinteäksi aineeksi. Hartsin kovettumisen jälkeen kertamuovia ei voida enää muovata uudelleen lämmön avulla. Yleisiä käytettyjä kertamuoveja ovat polyesterit, vinyyliesterit ja epoksit. Kertamuoveilla on usein hyvät mekaaniset, fysikaaliset ja termiset ominaisuudet sekä ne kestävät hyvin korroosiota. Lisäksi kertamuovien työstäminen on helppoa työstää. Huonoina ominaisuuksina kertamuoveilla ovat muun muassa heikko iskunkestävyys. (Saarela et al. 2003, 35.)

Kestumuovit ovat muoveja, joita voidaan muovata uudelleen lämmön avulla ilman, että rakenne muuttuu. Yleisimpiä kestumuoveja ovat esimerkiksi polyeteeni (PE), polypropeeni (PP) ja polyvinyylidikloridi (PVC). Komposiittien matriiseissa käytetään eniten polypropeenaa ja polyamidia (PA). Kestumuovit kestävät suhteellisen heikosti lämpöä.

Kuten aiemmin todettiin, lujitteita voidaan käyttää lujuuden ja muiden mekaanisten ominaisuuksien muuttamiseen. Lujitteiden tärkein tehtävä on ottaa vastaan komposiittiin kohdistuvat kuormitukset. Yleisimmin käytettyjä lujitteita ovat lasikuitu, hiilikuitu ja aramidikuitu. Näistä merkittävimpänä voidaan pitää lasikuitua, joka on mekaanisilta ominaisuuksiltaan ja hinnaltaan muita yleisiä lujitteita parempi. Lisäksi luonnonkuidut ovat alkaneet yleistymään lujitteina. Luonnonkuituja ovat puu-, kasvi ja eläinkuidut. Kasvikuituja saadaan muun muassa kasvien rungosta, lehdistä ja siemenistä. Esimerkkejä käytetyistä kasvikuiduista on hamppu, pellava ja puuvilla. (Saarela et al. 2003, 74–99.) Eläinkuituja ovat esimerkiksi eläinten karvat, villa, höyhenet ja hämähäkinseitit, jotka koostuvat proteiineista (Vuorinen et al. 2016, 7). Luonnonkuiduista kerrotaan tarkemmin luvussa 3.3.

Komposiitit sisältävät matriisin ja lujitteen lisäksi myös täyteaineita. Täyteaineita käytetään muun muassa alentamaan komposiitin tiheyttä eli keventämään rakennetta, alentamaan raaka-ainekustannuksia, nopeuttamaan valmistusta ja vaikuttamaan pinnan laatuun. Lisäksi täyteaineilla voidaan vaikuttaa hieman esimerkiksi jäykkyyteen, mutta se ei kuitenkaan ole niiden pääasiallinen käyttötarkoitus, koska lujitteiden käytöllä on saavutettavissa paremmat mekaaniset ominaisuudet. Täyteaineet voidaan jakaa mineraalitäyteaineisiin, lasiin, metalleihin, hiilimustaan ja orgaanisiin täyteaineisiin. Selkeästi eniten käytetty täyteaine on kalsiumkarbonaatti, jonka osuus täyteaineiden kokonaiskulutuksesta on yli puolet. (Saarela et al. 2003, 57–58.)

3.2 Komposiittien valmistusmenetelmät

Komposiitteja voidaan valmistaa usealla eri menetelmällä. Valmistusmenetelmät voidaan jakaa neljään päämenetelmään, jotka voidaan vielä jakaa useaan eri muunnokseen. Valmistusmenetelmien pääryhmät ovat laminointi-, puristus-, injektio ja jatkuvatoimisiin menetelmiin. Laminointimenetelmässä laminaatti valmistetaan viemällä matriisi ja lujite kerroksittain avomuottiin, jossa se kovetetaan joko ilman painetta tai paineen avulla puristaen. Puristusmenetelmässä raaka-aine viedään muottipuoliskoihin, jonka jälkeen ne puristetaan yhteen ja rakenne saa muotonsa. Injektio menetelmässä muovimatriisi tai matriisin ja lujitteen seos syötetään muottiin paineen avulla tai valamalla. Jatkuvatoimisessa menetelmässä materiaali

kulkee suulakkeiden tai valssien läpi, joiden avulla se saa muotonsa. Materiaalia voidaan joko vetää tai työntää suulakkeen läpi. (Saarela et al. 2003, 153–154.)

3.3 Puumuovikomposiittien ominaisuudet

Puumuovikomposiitit ovat luonnonkuitulujitettujen muovikomposiittien yksi iso alaryhmä. Puumuovikomposiiteissa käytetään matriisimuovina yleensä kestumuovia, kuten esimerkiksi polypropeenaa, polyeteeniä, polyvinyylidikloridia (PVC, polyvinyl chloride) ja polystyreeniä (PS). Polyeteenistä on käytössä sekä pienitiheyksistä polyeteeniä (LDPE, low-density polyethylene) sekä suuritiheyksistä polyeteeniä (HDPE, high-density polyethylene) (Mansor et al. 2014, 441.) Lujitekuituina voidaan käyttää puu-, kasvi- ja eläinkuituja. Kuidun lähteitä on valtavasti, ja suurin osa kuiduista saadaan puista, joita on yli 10 000 erilaista lajia. Puu itsessään on jo komposiitti, sillä puun sisältämää selluloosaa voidaan pitää puun lujitteena ja matriisina ligniini sitoo lujitteet yhteen. Kaikki kasv kuidut muodostuvat selluloosasta, kun taas eläinkuidut muodostuvat proteiinista. (Ashori et al. 2008, 4662.) Taulukossa 2 on esitetty tyypillisempiä luonnonkuitukomposiiteissa käytettyjen kestumuovien ominaisuuksia. Taulukossa mainittu nylon tarkoittaa polyamidia.

Taulukko 2. Tyypillisten kestumuovien ominaisuuksia luonnonkuitukomposiiteissa (Mansor et al. 2014, 441).

Matrix	Performance			Weight	Service Condition	Cost	
	Tensile strength [Mpa]	Young Modulus [Gpa]	Impact Strength [J/m]	Density [g/cm ³]	Water absorption – 24 hours [%]	Melting temperature [°C]	Raw material cost [USD/lb]
PP	26-41.4	0.95-1.77	21.4-267	0.899-0.920	0.01-0.02	160-176	0.95-0.98
LDPE	40-78	0.055-0.38	>854	0.910-0.925	<0.015	105-116	1.05-1.07
HDPE	14.5-38	0.4-1.5	26.7-1068	0.94-0.96	0.01-0.2	120-140	0.89-0.91
PS	25-69	4-5	1.1	1.04-1.06	0.03-0.10	110-135	1.18-1.22
Nylon 6	43-79	2.9	42.7-160	1.12-1.14	1.3-1.8	215	2.08-2.12
Nylon 6,6	12.4-94	2.5-3.9	16-654	1.13-1.15	1.0-1.6	250-269	1.98-2.09

Jos puumuovikomposiitteja verrataan perinteisiin lasikuitulujitettuihin komposiitteihin, on puumuovikomposiiteilla paljon etuja, mutta myös haittapuolia. Nykyään materiaalien

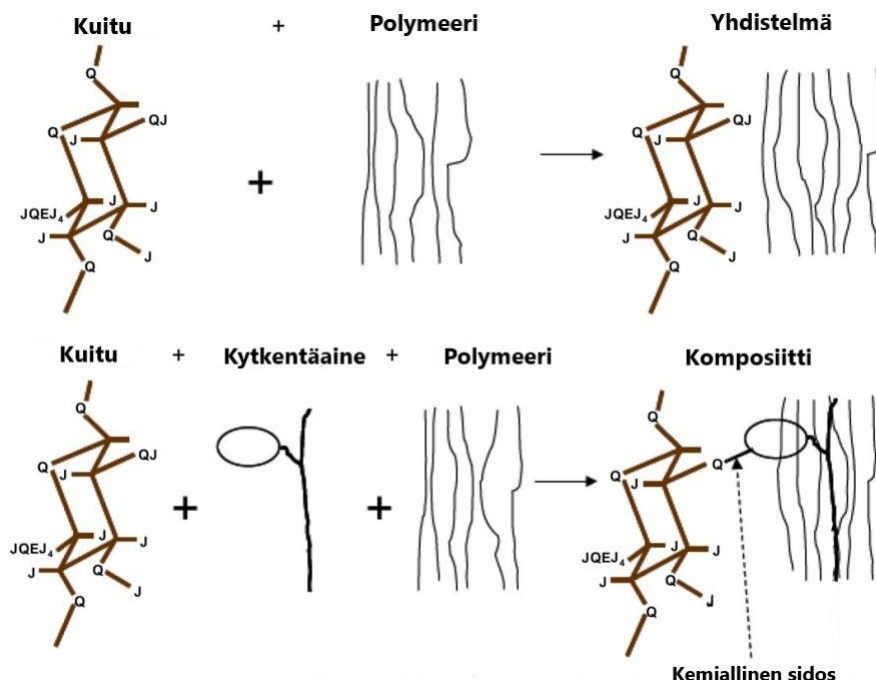
ympäristöystävällisyys otetaan suuresti huomioon ja luonnonkuitujen etu on niiden ekologisuus ja biohajoavuus. Luonnonkuitulujitetuista komposiiteista on tehty elinkaariarvioita ja niiden tuloksista on havaittu, että ne ovat huomattavasti ympäristöystävällisempiä kuin lasikuitulujitetut komposiitit (Li et al. 2020, 1–2.) Lisäksi korostuu puumuovikomposiittien edullisuus ja pieni energiankulutus, jolloin ne ovat myös kustannusten näkökulmasta hyviä vaihtoehtoja. Mekaanisilta ominaisuuksiltaan luonnonkuidut sopivat hyvin lujitteiksi. Suhteellisen korkean lujuuden ja jäykkyyden sekä pienen tiheyden ansiosta puumuovikomposiiteista saadaan valmistettua mekaanisilta ominaisuuksiltaan ja keveydeltään varteenotettavia vaihtoehtoja lasikuitulujitetuille komposiiteille. Luonnonkuitujen mekaanisissa ominaisuuksissa on kuitenkin ongelmana niiden vaihtelu, sillä eri luonnonkuitujen ominaisuudet eroavat toisistaan kuitukohtaisesti. Tämän takia täytyy aina tarkastella näitä ominaisuuksia jokaiselle kuidulle erikseen. (Ashori 2008, 4662–4664.) Taulukossa 3 on esitetty Mochane et al. (2019) tekemä jaottelu luonnonkuitujen hyvistä ja huonoista ominaisuuksista.

Taulukko 3. Luonnonkuitujen hyviä ja huonoja ominaisuuksia (Mochane et al. 2019, 163).

Advantages	Disadvantages
Recyclable	High moisture absorption
Low density i.e. lightweight	Dimensional instability
Zero finger print CO ₂	Flammable
High specific mechanical properties than glass	Low strength and thermal resistance than glass fibres
Non-abrasive to processing equipment	Anisotropic behavior
Generate non-harmful gases during processing and no skin irritation	Odour generation during degradation
Production energy is less than that of glass fibres i.e. one third	Limited processing temperatures as compared to glass
	Sensitive to UV, microbial and fungus attack
Good thermal and acoustic properties	Variability of properties and price depending on the location

Yksi suurimmista haittapuolista puukuiduilla on niiden huono yhdistyvyys matriisimuoveihin. Puukuidut ovat poolisia eli ne absorboivat vettä, jolloin niitä voidaan kutsua hydrofiiliseksi. Polymeerit eli muovit ovat poolittomia eli ne hylkivät vettä, jolloin niitä voidaan kutsua hydrofobiseksi. Hydrofiiliset ja hydrofobiset aineet eivät sekoitu helposti keskenään huonon adheesion takia eli puukuidut ja matriisimuovit eivät sekoitu toisiinsa niin kuin niiden pitäisi. Jotta kuidun ja muovin välistä adheesiota eli vetovoimaa voitaisiin lisätä, täytyy hyödyntää kemiallista yhdistämistä. Tämä toteutetaan kytkentäaineilla, jolloin se käsittelee pintaa siten, että kytkentäaineen sekä kuidun ja muovin välille muodostuu kovalenttisia sidoksia

ja vetysidoksia. Kuvassa 1 on esitetty kytKentäaineen toimintaperiaate kuidun ja muovin yhdistämisessä. (Ashori 2008, 4663, muokattu)



Kuva 1. KytKentäaineen toimintaperiaate kuidun ja muovin yhdistämisessä (Ashori 2008, 4663, muokattu).

3.3.1 Syttyvyys

Puussa ja muovissa on molemmissa orgaanisia yhdisteitä, jolloin ne ovat palavia materiaaleja. Tästä syystä myös puumuovikomposiitit ovat herkästi syttyviä, joka on suuri ongelma. On materiaalikohtaista, kuinka herkästi materiaali syttyy. Yksi tapa luokitella materiaalien syttyvyyttä on liekin leviämisen indeksi FSI (Flame Spread Index). FSI käytännössä ilmaisee, kuinka nopeasti liekki liikkuu materiaalissa. FSI ja sen testaaminen määritellään standardissa ASTM E 84. FSI jaetaan kolmeen kategoriaan: luokat A, B ja C. Lisäksi yhtenä luokkana voidaan pitää niitä, jotka eivät mene luokkiin A, B tai C. A-luokassa FSI on 0–25, B-luokassa 26–75 ja C-luokassa 76–200. Tyypillisesti puulla FSI on välillä 100–200, mutta on myös puulajeja, jossa FSI on alle 100. Esimerkiksi koivulla FSI on 105–110 ja kuusella 74–100. (Klyosov 2007, 462–464.)

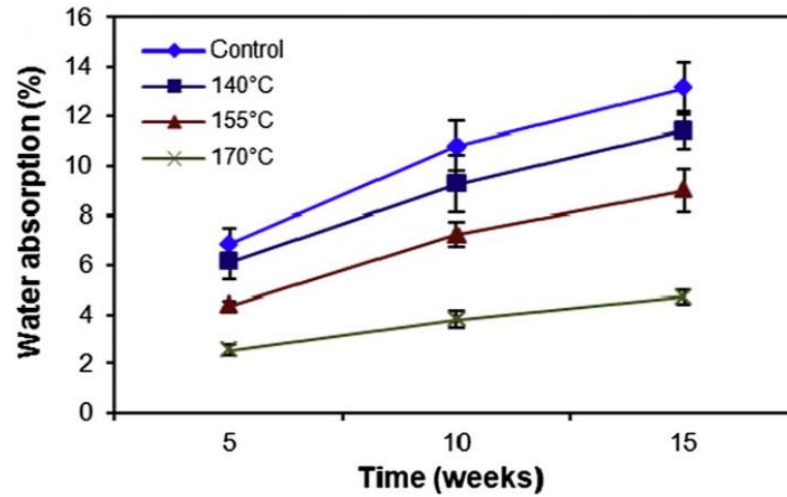
Puumuovikomposiittien syttyvyyttä voidaan vähentää eri tavoilla. Helpoin ja halvin tapa on lisätä komposiittiin polyvinylikloridia, jonka syttyvyys on pienempi kuin polyeteenillä tai polypropeenilla. PVC on kuitenkin mahdollisessa syttymistilanteessa huono vaihtoehto, sillä palaessa PVC:stä vapautuu myrkyllistä vetykloridia. Yleinen keino vaikuttaa syttyvyyteen on käyttää palonestoaineita. Palonestoainetta voidaan lisätä joko komposiittimassaan valmistusprosessin aikana tai lisätä aine komposiitin pintaan. Palonestoaine voi reagoida niin kemiallisesti kuin fysikaalisesti. Palonestoaine voi vaikuttaa kaasumaisiin reaktioihin vähentämällä syttyviä kaasuja. Lisäksi palonestoaine voi muodostaa hiilipitoisen kerroksen suojaamaan materiaalin pintaa hapen ja korkean lämpötilan vaikutukselta. Palonestoaine voi myös toimia viilentäjänä absorboiden energiaa endotermisen reaktion avulla. Tyypillisiä palonestoaineita ovat muun muassa alumiini- ja magnesiumhydroksidi, sinkkiboraatti sekä ammonium-polyfosfaatti. (Nikolaeva 2015, 23–24; Rangappa 2021, 173.)

3.3.2 Veden absorptio

Puumuovikomposiiteissa puun hydrofiilisen luonteen takia ongelmaksi voi muodostua veden absorptio. Puu koostuu selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä, jotka edistävät veden absorptiota. Tutkimukset ovat osoittaneet, että puumuovikomposiittien veden absorptio vaikuttaa komposiitin ominaisuuksiin. Se vaikuttaa haitallisesti puun ja muovin adheesioon sekä antaa mikro-organismeille kasvu ympäristön, jolloin komposiittiin voi syntyä sienikasvustoa. Tämän johdosta komposiitteihin voi joutua lisäämään erilaisia sienimyrkkyjä. (Rangappa 2021, 196–197.)

Hemiselluloosaa voidaan pitää suurena syynä puun korkeaan veden absorptioon. Hemiselluloosan poistamisella puusta parannetaan puun hydrofobisuutta, jolloin se kytkeytyy paremmin muovimatriisiin. Hemiselluloosan poistamiseen puusta on kehitetty erilaisia tekniikoita, jotta veden absorptio vähenisi. Natriumhydroksidi käsittelyllä on pystytty poistamaan hemiselluloosaa puun pinnalta, joka on vähentänyt veden absorptiota, kun hemiselluloosan määrä on vähentynyt. Lisäksi Hosseinaei et al. (2012) tutkivat uuttamista kuumalla vedellä, jolloin hemiselluloosaa saatiin poistettua puun pinnalta. Tutkimuksessa kävi ilmi, että käsittelyssä käytettävällä lämpötilalla oli suuri merkitys veden absorptioon. Lämpötilan

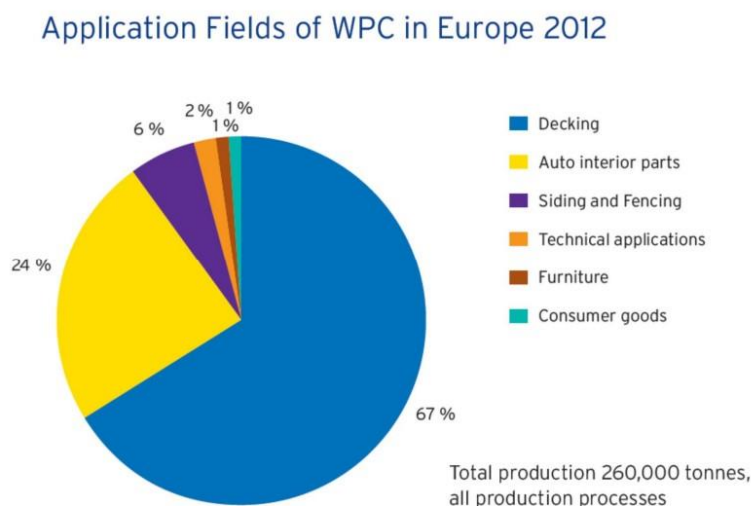
nousteissa 170 °C veden absorptio oli selkeästi vähäisempää kuin pienemmillä lämpötiloilla. (Hosseinaei et al. 2012, 31; Rangappa 2021, 197.) Kuvassa 2 on havainnollistettu lämpötilan vaikutusta veden absorptioon kuumalla vedellä uuttamisessa.



Kuva 2. Lämpötilan vaikutus veden absorptioon puumuovikomposiitissa (Hosseinaei et al. 2012, 31, muokattu).

4 Puumuovikomposiitit rakennusteollisuudessa

Komposiitteja käytetään rakennusteollisuudessa muun muassa keveyden, säänkestävyyden, kemiallisen kestävyys ja lämmöneristysominaisuuksien takia (Saarela et al. 2003, 439). Nämä ominaisuudet sopivat hyvin puumuovikomposiitteihin. Puumuovikomposiiteilla on keveyteensä nähden hyvät lujuusominaisuudet sekä kosteuden kesto verrattuna perinteisiin puumateriaaleihin. Lisäksi puumuovikomposiittien valmistus on helppoa, jolloin voidaan valmistaa monimutkaisiakin profiileja. (Askadski 2019, 10.) Suurin osa puumuovikomposiiteista menee rakennusteollisuuden käyttöön. Kuvassa 3 on esitetty puumuovikomposiittien sovelluskohteita ja niiden osuuksia Euroopassa vuonna 2012.



Kuva 3. Puumuovikomposiittien sovelluskohteita Euroopassa vuonna 2012 (Carus et al. 2015, 4).

Perinteiseen puumateriaaliin verrattu puumuovikomposiiteilla on heikko kuormankantokyky. Lehtipuilla vetolujuus on tyypillisesti 50–120 MPa ja havupuilla 45–110 MPa. HDPE-pohjaiselle puumuovikomposiitille on yleensä 10–30 MPa, joten puumuovikomposiiteilla on selvästi pienempi vetolujuus kuin puulla. Lisäksi puumuovikomposiitilla on heikompi virumiskestävyys johtuen sitkeästi käyttäytyvästä kestopuuvimatriisista. Näistä syistä puumuovikomposiitteja käytetään eniten kuormaa kantamattomissa tai vähän kuormaa kantavissa rakenteissa. On kuitenkin tehty tutkimuksia puumuovikomposiiteista kuormaa

kantavina rakenteina, jolloin niitä voisi kuormittaa myös huomattavasti enemmän. (Deng & Tang 2010, 3134.)

Ulkorakentaminen tuottaa puumuovikomposiiteille tiettyjä ominaisuusvaatimuksia. Täytyy pystyä huomioimaan sekä kestävyysominaisuudet sekä säänkeston. Ulkona puumuovikomposiitit altistuvat muun muassa vedelle, lämmölle ja ultravioletisäteilylle (UV). Puuhun verrattuna puumuovikomposiitit kestävät paremmin kosteutta, vaativat vähemmän kunnossapitoa sekä muodostavat pienempiä muodonmuutoksia lämmön vaikutuksesta. Lisäksi puumuovikomposiittien värissä ei tapahdu suuria muutoksia pitkälläkään aikavälillä. Toisaalta puumuovikomposiiteilla on korkeampi hinta ja huonommat lujuusominaisuudet. (Defoirdt et al. 2010, 65.)

Puumuovikomposiitteja käytetään myös sisätiloissa. Tyypillisesti samoja puumuovikomposiittituotteita voidaan käyttää sekä ulko- että sisätiloissa. Sisätilat kuitenkin tuovat komposiitille oman erityisen ominaisuusvaatimuksen, joka liittyy haihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet eli VOC-yhdisteet (volatile organic compounds) voivat olla ihmisille haitallisia, joten nämä yhdisteet täytyy ottaa huomioon osana tuoteturvallisuutta. Väisänen et al. (2018) tutkivat puumuovikomposiittien VOC-päästöjä. Suurin osa haihtuvista VOC-yhdisteistä väheni 41 päivän tutkimuksen aikana 75–95 %. Sykloheksenin määrä sen sijaan kolminkertaistui. (Väisänen et al. 2018, 194–195.) VOC-päästöjä on siis tärkeää tutkia, jotta puumuovikomposiittituotteet eivät huononna sisäilman laatua.

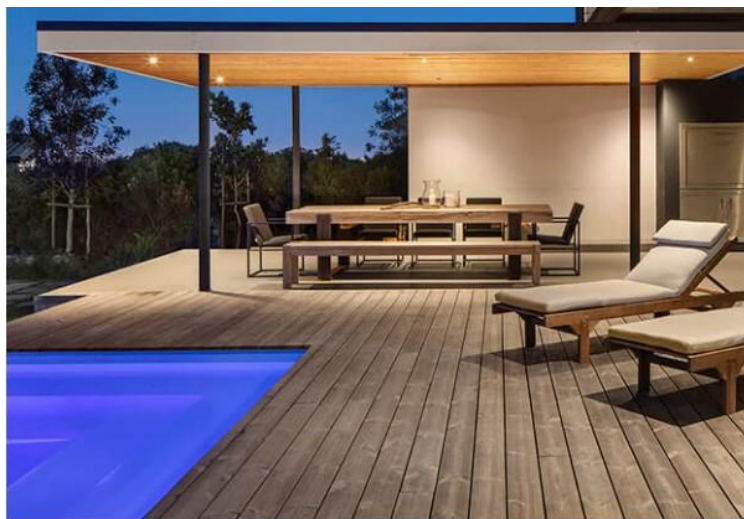
4.1 Piharakentaminen

Rakennusteollisuuden sovelluksista puumuovikomposiitteja käytetään selkeästi eniten terassimateriaaleina, kuten kuvasta 3 voidaan huomata. Terassilaidoissa korostuu säänkeston lisäksi myös mekaaniset ominaisuudet, koska ne ovat usein rasituksen kohteena. Muun muassa taivutuslujuus ja jäykkyys ovat tärkeitä ominaisuuksia terassilaidoissa. Lisäksi täytyy huomioida vedenpoisto ja ilmavirtaus, jotta materiaali pysyisi mahdollisimman kuivana ja pinta hyvännäköisenä. (Wang et al. 2012, 3175.)

Suomalaisista yrityksistä puumuovikomposiitti terassilautoja tekevät muun muassa UPM ja Lunawood. UPM:n ProFi terassilaudat valmistetaan kuitenkin Saksassa, Lunawoodin terassilaudat tehdään Iisalmessa. Molemmat terassilaudat ovat säänkestäviä ja mittapysyviä. Lisäksi molemmat laudat hieman harmaantuvat ajan kuluessa, kuten puumuovikomposiiteilla on tapana. UPM:n ProFi terassilaudat sisältävät 75 % kierrätettäviä materiaaleja ja ovat täysin kierrätettävä. ProFI-terassilaudat valmistetaan UPM:n omilta tehtailtaan saatavasta selluloosasta ja tarralaminaattitehtaalta saatavasta muovista. Lunawoodin terassilaudat ovat myös täysin kierrätettävät. (UPM ProFi 2022a; Lunawood 2022). Kuvissa 4 ja 5 on esitetty UPM:n sekä Lunawoodin puumuovikomposiitti terassilaudat.



Kuva 4. UPM ProFi Piazza Pro puumuovikomposiitti terassilauta (UPM ProFi 2022a).



Kuva 5. Lunawoodin puumuovikomposiitti terassilauta (Lunawood 2022).

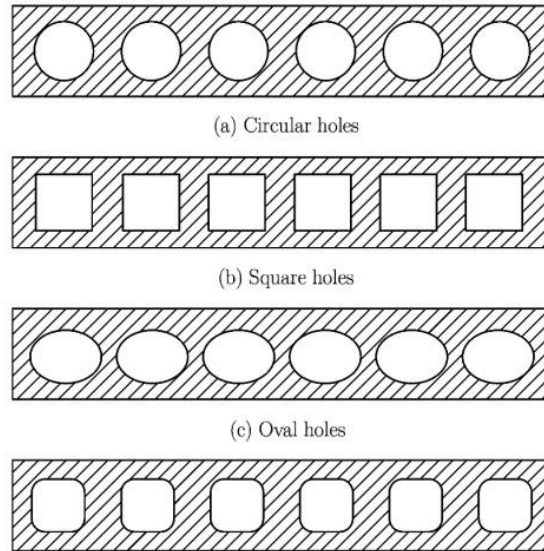
Terassilautoille tarvitaan alusta, joka voidaan valmistaa esimerkiksi alumiinista tai komposiitista. Aluslautojen avulla terassilaudat voidaan asentaa tasaiselle maalle, mutta niihin asennettavien koolaustassujen avulla on myös mahdollista huomioida pienen maan kaltevuudesta johtuvat epätasaisuudet. Koolaustassut myös helpottavat veden virtaamista pois aluslautojen alta. Terassirakenteisiin voidaan lisätä myös erilaisia lisäosia, joiden avulla asennus onnistuu helpommin ja nopeammin. Lisäksi erilaisten väriaineiden avulla voidaan valmistaa monia erivärisiä terassilautoja. (UPM ProFi 2022b.) Kuvassa 6 on esitetty UPM ProFi-aluslauta terassilautoille.



Kuva 6. UPM ProFi-aluslauta yhdistettynä terassilautaan (UPM ProFi 2022b).

Terassi- ja lattiaprofiilit voivat olla umpinaisia tai onttoja. Ontoilla profiileilla voidaan pienentää tuotteen painoa, mutta tällöin sillä on vaikutusta mekaaniisiin ominaisuuksiin. Ontoissa profiileissa ontelot tavallisesti sijoitetaan tasaisesti leveyden yli. Ontelot voivat olla pyöreitä, suorakulmioita, ovaaleja tai suorakulmioita pyöristetyillä kulmilla. Pyöreät ontelot ovat yleisimmät ja ovaalit ontelot harvinaisimmat. Kuvassa 7 on esitetty erilaisia onttoja profiileita puumuovikomposiittilautoille. Zhang et al. (2016) tutkivat onttoprofiilisten puumuovikomposiittilautojen mekaanisia ominaisuuksia verrattuna onteloiden kokoon ja lukumäärään. Tuloksista selvisi, että onteloiden lukumäärän ollessa vakiona puumuovikomposiitin jäykkyys ja lujuus heikentyivät, kun onteloiden koko kasvoi. Lisäksi onteloiden koon ollessa vakiona jäykkyys ja lujuus kasvoivat, kun onteloiden lukumäärä kasvoi. Mekaaniset ominaisuudet olivat paremmat pyöreillä onteloilla verrattuna suorakulmaisiin onteloihin.

Puumuovikomposiittilaudan valintaan vaikuttaa siis vaadittava jäykkyys ja lujuus sekä ha-
luttu paino. (Zhang et al. 2016, 445–453.)



Kuva 7. Erilaisia puumuovikomposiittilautojen profiileita (Zhang et al. 2016, 446).

Toinen yleinen piharakentamisen puumuovikomposiittituote on aidat. Yleensä aidan tolpat valmistetaan esimerkiksi alumiinista ja aidan laudat ovat puumuovikomposiittia. Aitalaudat altistuvat samanlaisille sääolosuhteille kuin terassilaudatkin, joten komposiitin täytyy kestää vettä ja UV-säteilyä. Kuvassa 8 on esitetty puumuovikomposiitista valmistettu aita.



Kuva 8. Puumuovikomposiitista valmistettu aita (Seven Trust 2021).

4.2 Ikkunat ja ovet

Tyypillisesti ikkunoiden ja ovien kehykset valmistetaan umpinaisista puukappaleista. Puumuovikomposiiteista voidaan tehdä onttoja profiileja, jolloin kehysten painoa voidaan vähentää. Usein myös puumuovikomposiiteilla on suurempi jäykkyys kuin puulla. (Moritzer & Hopp 2017, 1030.) Puumuovikomposiittia voidaan käyttää myös ovissa, mutta tällöin täytyy kiinnittää erityistä huomioita oveen kohdistuviin kuormituksiin. Useimmissa ovissa päällyskerroksen pinnan lujuus on oven heikoin kohta. Siksi on tärkeää tutkia, millaisia kuormituksia puumuovikomposiitti kestä. (Moritzer & Hopp 2017, 1037.)

Yhdysvaltalainen Andersen Corporation valmistaa Fibrex-komposiitista ikkunakehyksiä ja ovia, joissa on 40 % puukuituja ja 60 % kestumuovia. Ikkunakehyksiltä ja ovilta vaaditaan samanlaisia säänkesto-ominaisuuksia kuin terassilaudoiltakin, kuten muun muassa kosteuden ja UV-säteilyn kesto. (Andersen Corporation 2022.) Kuvassa 9 on esitetty Andersen Corporationin Fibrex-komposiitista valmistetut ikkunakehykset ja patio-ovi.



Kuva 9. Puumuovikomposiitista valmistetut ikkunakehykset (vas.) ja patio-ovi (oik.) (Andersen Corporation 2022).

4.3 Sisä- ja ulkoverhoilu

Useista tutkimuksista on selvinnyt, että puumuovikomposiiteista ja luonnonkuitulujitetuista komposiiteista voidaan valmistaa potentiaalisia eristysmateriaaleja. Tällöin niitä voidaan

myös hyödyntää ulko- ja sisäverhoilussa. Hyvän eristysmateriaalin tunnusmerkkejä ovat muun muassa ääneneristyskyky, lämmöneristyskyky, vähäinen ympäristön kuormittavuus ja pienet valmistuskustannukset. Aly et al. (2021) tutkivat juutti-polyesteri komposiitin ääneneristyskykyä. Komposiitti eristi hyvin matalataajuuksista ääntä. Lisäksi huomattiin matriisimuovin lisäämisellä olevan positiivinen vaikutus korkeataajuisien äänien eristyksessä. (Aly et al. 2021, 11.) Mussa ja Salih (2021) tutkivat puumuovikomposiitin lämmöneristyskykyä. Tutkimuksessa huomattiin puun määrän komposiitissa vaikuttavan positiivisesti lämmöneristyskykyyn. Lämpötilan noustessa lämmöneristyskyky heikentyi puussa olevan veden haihtumisen seurauksena. (Mussa & Salih 2021, 60.)

Rakennusten verhoilun tarkoituksena on suojata muita rakenteita, mutta myös vaikuttaa rakennuksen visuaaliseen ilmeeseen. Puumuovikomposiitista voidaan valmistaa monimutkaisia ja erivärisiä komponentteja, jolloin rakennuksen visuaaliseen ilmeeseen voidaan vaikuttaa niin verhoilumateriaalin muotoilulla ja värillä. Puumuovikomposiitti suojaa hyvin sään vaikutuksilta, kuten esimerkiksi vedeltä ja UV-säteilyltä. Lisäksi se vähentää rakennuksen lämpöhäviöitä. Sisäverhoilulla voidaan parantaa huoneiden akustiikka, johon puumuovikomposiitti soveltuu hyvin. Kuvassa 9 on esitetty puumuovikomposiittien käyttöä ulko- ja sisäverhoilussa.



Kuva 10. Puumuovikomposiittilauta ulkoverhoilussa (vas.) ja sisäverhoilussa (oik.) (Seven Trust 2021).

4.4 Seinät

Puumuovikomposiitteja on tutkittu rakennuksen seinissä, muun muassa niin sanotuissa leikkausseinissä (shear wall), jotka vastustavat sivuttaissuuntaisia voimia, kuten esimerkiksi tuulikuormaa. Leikkausseinä koostuu maahan pystytetyistä pystytolpista, jotka ovat tyypillisesti puuta. Niiden välillä on vaakatasossa levykiskoja (sheeting rail), jotka tukevat rakennetta. Usein lähellä maata olevissa levykiskoissa on käytetty materiaalina painekyllästettyä puuta mahdollisen kosteuden takia. Kyllästeessä käytetään kuparia, joka voi nopeuttaa korroosiota teräspaneelissa ja kiinnikkeissä. (Ross 2008, 1–2.) Ross (2008) tutki painekyllästetyn puun ja puumuovikomposiitin eroja, kun niitä käytettiin leikkausseinän levykiskoina. Puumuovikomposiitilla saadut tulokset, kuten esimerkiksi leikkauskestävyys, olivat samansuuruisia kuin painekyllästetyllä puulla. Levykiskojen välimatkalla huomattiin olevan enemmän merkitystä kestävyuden kannalta. (Ross 2008, 12.)

4.5 Kattolaatat

Puumuovikomposiittien käyttäminen kattolaattoina asettaa materiaalille samanlaisia vaatimuksia kuin ulkoverhoilulle. Säänkesto-ominaisuudet sekä lämmöneristyskyky korostuu ulkona käytettävissä materiaaleissa. Winandy ja Hatfield (2007) tutkivat puusta, puumuovikomposiitista ja lasikuidusta valmistettujen kattolaattojen alapuolella olevaa lämpötilaa. Tuloksista huomattiin, että puulla ja puumuovikomposiitilla kattolaattojen alapuolinen lämpötila oli huomattavasti pienempi kuin lasikuidulla, eli puumuovikomposiitilla voidaan todeta olevan hyvä lämmöneristysominaisuudet tällaiseen käyttötarkoitukseen. (Winandy & Hatfield 2007, 96.)

Puumuovikomposiittiprofiileihin voidaan valmistaa onkaloita, joita voidaan hyödyntää kattolaatoissa. On kehitelty niin sanottuja faasimuutosmateriaaleja (PCM, phase-change material), jotka toimivat lämpövarastoina. Faasimuutosmateriaalit voivat absorboida tai vapauttaa lämpöä riippuen siitä, nesteytyykö vai jähmettyykö materiaali. Ne auttavat pitämään lämmön melko tasaisena. Faasimuutosmateriaalit pakataan pusseihin, jotka asetetaan puumuovikomposiittiprofiilin onkaloihin kuvan 11 mukaisesti. Tutkimuksessa selvisi, että

faasimuutosmateriaaleja käytettäessä pintalämpötila oli selvästi matalampi kuin ilman faasimuutosmateriaaleja. (Chung & Park 2017, 1.) Puumuovikomposiitilla on valmiiksi suhteellisen hyvät lämmöneristysominaisuudet ja kun siihen lisää vielä faasimuutosmateriaalin niin tällaisilla kattomateriaaleilla on mahdollisuudet kasvaa suuremmiksi markkinoiksi tulevaisuudessa.



Kuva 11. Puumuovikomposiitista valmistettu kattolaatta, jonka sisällä on faasimuutosmateriaalia (Chung & Park 2017, 3).

5 Pohdinta

Tässä kappaleessa kerrotaan puumuovikomposiittien kehitystrendeistä kierrätysraaka-aineiden, muovien ja lujitekuitujen osalta. Tutkimuksia on paljon muistakin erilaisista materiaaleista ja valmistustekniikoista, mutta tässä keskitytään kehitystrendeihin ympäristön ja matrisin sekä lujitteen näkökulmasta.

5.1 Kierrätysraaka-aineiden käyttö puumuovikomposiiteissa

Viime vuosikymmeninä jätteen tuottaminen on kasvanut merkittävästi, eikä kasvun hidastumista arvioiden mukaan ole luvassa lähitulevaisuudessa. Jätteen tuottamisen määrään kohdistuu kuitenkin paljon huomiota, koska jätteen määrällä on merkittävä vaikutus ympäristöön. Euroopan Unionin (EU) alueella rakennus- ja purkujätteen osuus kaikesta jätteen tuottamisesta on noin 30 %, joka tarkoittaa vuosittain 800 miljoonaa tonnia jätettä. On selvää, että rakennus- ja purkujätteen kierrätyksellä jätteen määrää voidaan vähentää. Rakennus- ja purkujäte sisältää paljon arvokkaita materiaaleja, kuten muun muassa mineraaleja, puuta, muovia ja metallia. Suomessa etenkin puujätteen määrä on selvästi korkeampi kuin muissa EU-maissa. EU:n tavoitteena oli vaarattoman rakennus- ja purkumateriaalin uudelleenhyödyntämisen asteeksi 70 % vuoteen 2020 mennessä, mutta esimerkiksi Suomessa tämä luku on vieläkin alle 60 %. (Liikanen et al. 2019, 716–717.)

Rakennus- ja purkujäte on osoittautunut varteenotettavaksi vaihtoehdoksi puumuovikomposiittien raaka-aineeksi. Tällöin rakennus- ja purkujätettä ei päätyisi niin paljon kaatopaikalle tai polttoon (Liikanen et al. 2019, 717.) Viime vuosina kierrätettyjen raaka-aineiden käyttämisestä puumuovikomposiiteissa on tutkittu paljon. Keskiäari et al. (2016) tutkivat, kuinka rakennus- ja purkujätteen käyttäminen puumuovikomposiittien raaka-aineina vaikuttivat materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin ja veden absorptioon. Tutkimuksessa huomattiin, että rakennus- ja purkujätettä sisältävällä puumuovikomposiitilla oli pienempi taivutuslujuus, mutta suurempi iskulujuus. Tutkimuksessa tutkittiin myös jätteeksi päätyneitä mineraalivillaa ja kipsilevyä, joita syntyy paljon rakennusteollisuuden jätteinä. Mineraalivillan ja

kipsilevyn sekoitusta sisältäneen puumuovikomposiitin veden absorptio oli selkeästi vähäisempää kuin perinteisellä tai rakennus- ja purkujätettä sisältävillä komposiiteilla (Keskisaari et al. 2016, 1.) Hyvärinen et al. (2019) tutkimuksessa tutkittiin rakennus- ja purkujätettä sisältävää puumuovikomposiittia ja verrattiin sitä kierrättämättömään puumuovikomposiittiin. Tutkimuksessa taiputus- ja veto-ominaisuudet sekä komposiitin kovuus heikkenivät, mutta iskulujuus parani käytettäessä kierrätettyjä raaka-aineita. Veden absorption huomattiin pienenevän kierrätetyillä raaka-aineilla. (Hyvärinen et al. 2019, 325.)

Kierrätettyjä raaka-aineita käytettäessä täytyy kuitenkin huomioida, että nämä komposiitit eivät välttämättä sovellu sellaisiin sovelluksiin, joissa vaaditaan niitä mekaanista ominaisuutta, jotka heikentyivät käytettäessä kierrätettyjä raaka-aineita. Toisaalta parantunutta veden ja kosteuden kestoa voidaan hyödyntää puumuovikomposiittien ulkoilmasovelluksissa. Lisäksi kierrätettyjen raaka-aineiden käyttö voi vaikuttaa komposiitin sisältämän roskan määrään, joka saattaa matriisiin ja lujitteen yhteensopivuutta. Ympäristövaikutusten on tutkittu pienenevän, kun on käytetty kierrätettyjä raaka-aineita neitseellisten raaka-aineiden sijaan. Esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden kulutus pieneni käytettäessä kierrätettyjä raaka-aineita. Lisäksi sillä on huomattu olevan mahdollisia vaikutuksia ilmaston lämpenemisen pienentämiselle. (Liikanen et al. 2019, 717).

5.2 Biomuovit

Muovien tuotanto kasvaa vuosittain. Muoveista tekee suosituksen niiden hyvä valmistettavuus, halpa hinta, keveys ja hyvät mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet. Rakennusteollisuuden osuus muovin tuotannosta on noin 20 %. Muoveja on tyypillisesti valmistettu fossiilisista raaka-aineista, jotka ovat ympäristöllä haitallisia. Ilmastonmuutoksen johdosta on alettu kiinnittämään enemmän huomioita ympäristöystävällisiin materiaaleihin, jolloin on alettu kehittämään perinteisten fossiilipohjaisten muovien korvaajaksi biopohjaisia muoveja. (Kamau-Devers & Miller 2020, 1146.)

Yleisiä biomuoveja ovat muun muassa polylaktidi eli PLA (polylactic acid) ja polyhydroksialkanoaatit eli PHA:t (polyhydroxyalkanoates). PLA on kestomuovi, joka syntyy maitohapon kondensoitumisesta eli tiivistymisestä tai vaihtoehtoisesti laktidin renkaan avaavalla polymerisaatiolla. PLA:lla on hyvät mekaaniset ominaisuudet, kuten esimerkiksi korkea lujuus ja kimmokerroin. (Spiridon et al. 2015, 342–343.) Vaikka PLA:lla on monia hyviä ominaisuuksia, on sillä myös sellaisia ominaisuuksia, joiden takia se ei sovellu kaikkiin rakennustuotteisiin. Tutkimuksissa on selvitetty, että rapautuminen heikentää PLA-komposiitin iskua ja vetolujuutta sekä lisää veden absorptiota. (Spiridon et al. 2015, 348.) Vaikka PLA on lupaava tulevaisuuden biomuovi hyvien mekaanisten ominaisuuksien ja ympäristöystävällisyyden takia, silti sen valmistuskustannukset nousevat vielä sen verran korkealle, ettei sitä ole kannattavaa tuottaa suuria määriä (Spiridon et al. 2015, 343).

PHA:t ovat biopolymeerejä, jotka syntetisoituvat mikro-organismien solurakenteiden sisällä. PHA-muoveilla on vaihtelevat ominaisuudet, jolloin niitä voidaan muokata käyttökohteeseen soveltuviksi. Ympäristön näkökulmasta PHA:t ovat kompostoitavuudellaan ja biohajoavuudeltaan parempi vaihtoehto PLA:han verrattuna, joka on myös biohajoava, mutta voi pysyä meressä jopa useita satoja vuosia. (Vandi et al. 2018, 2.) Puu-PHA-komposiitilla on tutkittu olevan samankaltaisia mekaanisia ominaisuuksia kuin perinteisillä PP- tai PE-pohjaisilla puumuovikomposiiteilla. Sekä vetolujuus että kimmokerroin ovat samansuuruisia kuin perinteisillä puumuovikomposiiteilla. Iskulujuus on selvästi pienempi ja murtovenymä suurempi kuin PP- tai PE-pohjaisilla puumuovikomposiiteilla. (Vandi et al. 2018, 5.) Kuten PLA:lla, myös PHA:n tuotantomäärät ovat vielä pieniä korkeiden kustannusten vuoksi eikä sitä voida vielä hyödyntää suurissa määrin rakennusteollisuuden sovelluksissa (Vandi et al. 2018, 1).

5.3 Nanotäyteaineet

Puukuitujen hydrofiilisen luonteen vuoksi ne yhdistyvät huonosti hydrofobiseen muovimatriisiin. Huono yhdistyvyys voi johtaa puumuovikomposiitin heikkoihin mekaanisiin ominaisuuksiin. Mekaanisten ominaisuuksien parantamiseksi on tutkittu nanotäyteaineiden käyttöä puumuovikomposiiteissa. Perinteisten täyteaineiden kokoluokka on 10 mikrometristä yhteen

senttimetriin. Nanotäyteaineiden koko on 1–500 nanometriä, joten kyseessä on selvästi pienemmän kokoluokan aine. Yleisimpiä nanotäyteaineita ovat muun muassa nanosavi ja hiilinanoputket. Nykyajan ympäristötietoisuus on saanut tutkijat tutkimaan myös uusia ympäristöystävällisiä nanotäyteaineita. Selluloosakuiduilla on hyvät lujuus- ja jäykkyysominaisuudet, pieni tiheys ja hinta sekä ne ovat biohajoavia, jolloin niitä on alettu tutkimaan mahdollisina nanotäyteaineina. (Turku & Kärki 2014, 181.)

Tutkimuksissa on selvinnyt, että selluloosanantäyteaineiden avulla voidaan saavuttaa paremmat lämpö- ja mekaaniset ominaisuudet. Lisäksi ne parantavat läpäisemättömyyttä kuvastavia barrier-ominaisuuksia. Nämä parannukset voidaan saavuttaa täyteaineen alle 10 % painoprosentilla. Komposiitin maksimilujuuksia on saatu jopa vain 0,75 % painoprosentilla. (Li et al. 2020, 8.) Lisäksi syttyvyyttä voidaan laskea huomattavasti. Nanotäyteaineita ei kuitenkaan ole vielä pystytty käyttämään suuressa mittakaavassa eri sovelluskohteissa. Yksi ongelma on saada nanotäyteaineista tasainen seos. Nanolisäaineita täytyy siis tutkia tulevaisuudessa lisää. (Turku et al. 2014, 201.)

5.4 Tulevaisuudennäkymät

Puumuovikomposiiteilla on paljon erilaisia käyttökohteita, ja kaikkia niitä ei edes voitu esitellä kandidaatintyön rajallisen pituuden vuoksi. Puumuovikomposiitteja tutkitaan paljon ja sovelluskohteita tulee lisää tulevaisuudessa, kun materiaalit kehittyvät. Puumuovikomposiitti alkoi saamaan suosiota vasta 1990-luvulla Pohjois-Amerikassa ja levisi 2000-luvulla laajasti ympäri maailmaa (Ashori 2008, 4661). Materiaalina puumuovikomposiitti on suhteellisen uusi ja se on lyhyessä ajassa monia sovelluskohteita.

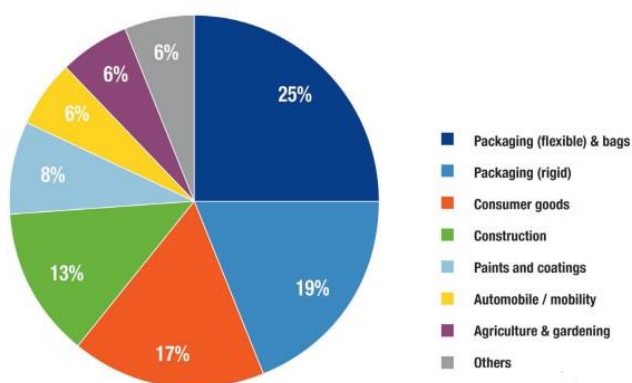
Puumuovikomposiitilla on vielä paljon kehityskohteita. Lujitekuidun ja muovimatriisin välistä adheesiota tulee kehittää, joka mahdollistaisi materiaalin paremmat mekaaniset ominaisuudet. Lisäksi sääolosuhteiden vaikutusta mekaanisiin ominaisuuksiin on tärkeää tutkia, jotta puumuovikomposiittituotteiden käyttöikää voitaisiin pidentää ja tuotteiden käyttöturvallisuus parantuisi. Turvallisuusnäkökulmasta tärkeitä tutkimuskohteita ovat haihtuvat

VOC-yhdisteet ja syttyvyys, jotka ovat etenkin rakennusteollisuudessa tärkeitä huomion kohteita.

Yksi potentiaalisista puumuovikomposiittien sovelluskohteista voisivat olla kantavat rakenteet, joista ei löydy suurissa määrin tutkimuksia tai tuotesovelluksia. Tällaisissa sovelluskohteissa korostuu puumuovikomposiitin mekaaniset ominaisuudet, kuten esimerkiksi lujuus. Lisäksi puumuovikomposiittirakenteiden kiinnitys muihin rakenteisiin vaatii tutkimustyötä. Rakenteiden stabiiliuteen vaikuttaa suuresti kiinnikkeiden suorituskyky. Perinteiseen puuhun verrattuna puumuovikomposiitti on kovempaa materiaalia, joten kiinnitykset vaativat erityistä huomiota. Lujitekuidun määrällä ja valmistustekniikalla on todettu olevan vaikutusta esimerkiksi naulan tai ruuvin ulosvetolujuuteen puumuovikomposiitissa. (Ghanbari et al. 2013, 265.)

Biomuovit ovat potentiaalinen vaihtoehto fossiilisten muovimatriisien korvaajaksi, mutta tällä hetkellä niiden ominaisuudet eivät vielä sovellu laajasti eri rakennusteollisuuden sovelluksiin. Ongelmana on biomuovien valmistus, jonka hinnat ovat vielä liian suuret suurille tuotantomäärille. Sama ongelma on vielä myös nanotäyteaineilla. Ympäristön näkökulmasta eri biopohjaiset puumuovikomposiitin raaka-aineet ovat lupaavia ja siitä syystä niiden tutkiminen on tärkeää. Vuonna 2017 rakennusteollisuuden osuus käytetyistä biopohjaisista tuotteista oli 13 % kuvan 12 mukaisesti ja tämä osuus tulee tulevaisuudessa kasvamaan.

Application sectors of the bio-based products in 2017



Kuva 12. Biopohjaisten tuotteiden sovellusalueet vuonna 2017 (Partanen et al 2020, 7).

6 Yhteenveto

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin puumuovikomposiittien käyttöä rakennusteollisuuden sovelluksissa. Työn tavoitteena oli etsiä tietoa puumuovikomposiittien ominaisuuksista, rakennusteollisuuden sovelluskohteista ja tulevaisuuden kehitystrendeistä. Puumuovikomposiitin tärkeimmiksi ominaisuuksiksi todettiin painoon nähden hyvät mekaaniset ominaisuudet sekä säänkesto-ominaisuudet verrattuna perinteiseen puutavaraan. Puumuovikomposiitin heikkouksiksi selvisivät hydrofiilisen lujitekuidun ja hydrofobisen muovimatriisin välinen huono yhdistyvyys sekä puumuovikomposiitin syttyvyys. Huonoon yhdistyvyyteen on kehitelty kytkentäaineita, jotta adheesio kuidun ja muovin välillä paranisivat ja tällä olisi myös vaikutusta komposiitin mekaanisiin ominaisuuksiin. Syttyvyyteen voidaan vaikuttaa palonestoaineilla. Puumuovikomposiittien rakennusteollisuuden sovelluskohteiksi löydettiin muun muassa terassilaudat, verhoilu, ikkunoiden ja ovien karmit, eristemateriaali sekä kattolaatat. Kehitystrendeinä korostuivat ympäristön kuormitusta vähentävät kierrätysraaka-aineet, biomuovit ja selluloosasta valmistetut nanotäyteaineet. Kierrätysraaka-aineiden käytössä ongelmana on heikommät mekaaniset ominaisuudet kierrättämättömiin raaka-aineisiin verrattuna. Biomuovit ja selluloosananotäyteaineet ovat vielä suuriin tuotantomääriin liian kalliita.

Tämä kandidaatintyö toi esille tyypillisiä puumuovikomposiitin rakennusteollisuuden sovelluskohteita sekä niiden kehitystrendejä. Jatkotutkimuksissa olisi hyvä selvittää mahdollisia muita rakennusteollisuuden sovelluskohteita ja tutkia lisää kierrätysraaka-aineiden käyttöä ja niiden vaikutuksia komposiitin ominaisuuksiin. Lisäksi biomuoveille ja nanotäyteaineille täytyisi löytyä ratkaisut, kuinka niitä voisi valmistaa kustannustehokkaasti.

Lähteet

Aly NM, Seddeq HS, Elnagar K ja Hamouda T (2021) Acoustic and thermal performance of sustainable fiber reinforced thermoplastic composite panels for insulation in buildings. *Journal of Building Engineering* 40: 102747.

Andersen Corporation (2022) *Composite Windows & Doors*. [viitattu 02.04.2022]. Saatavissa: <https://www.andersenwindows.com/windows-and-doors/materials/composite-windows-doors/>.

Ashori A (2008) Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries. *Bioresource Technology; Bioresour Technol* 99(11): 4661-4667.

Askadski A (2019) *Structure and Properties of Wood-Polymer Composites (WPC)*. Newcastle-upon-Tyne, UK: Cambridge Scholars Publishing.

Bustillo Revuelta M (2021) *Construction Materials: Geology, Production and Applications*. Cham, Switzerland: Springer.

Carus M, Eder A, Dammer L, Korte H, Scholz L, Essel R, Breitmayer E ja Barth M (2014) Wood-Plastic Composites (WPC) and Natural Fibre Composites (NFC): European and Global Markets 2012 and Future Trends in Automotive and Construction. 16.

Chung Mja Park J (2017) An Experimental Study on the Thermal Performance of Phase-Change Material and Wood-Plastic Composites for Building Roofs. *Energies (Basel)* 10(2): 195.

Defoirdt N, Gardin S, Van den Bulcke J ja Van Acker J (2010) Moisture dynamics of WPC and the impact on fungal testing. *International Biodeterioration & Biodegradation* 64(1): 65-72.

Deng Sja Tang Y (2010) Increasing load-bearing capacity of wood-plastic composites by sandwiching natural and glass fabrics. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 29(20): 3133-3148.

Ghanbari A, Madhoushi M ja Ashori A (2013) Wood Plastic Composite Panels: Influence of the Species, Formulation Variables and Blending Process on the Density and Withdrawal Strength of Fasteners. *Journal of Polymers and the Environment* 22(2): 260-266.

Hosseinaei O, Wang S, Taylor AM ja Kim J (2012) Effect of hemicellulose extraction on water absorption and mold susceptibility of wood-plastic composites. *International Biodeterioration & Biodegradation* 71: 29-35.

Hyvärinen M, Ronkanen M ja Kärki T (2019) The effect of the use of construction and demolition waste on the mechanical and moisture properties of a wood-plastic composite. *Composite Structures* 210: 321-326.

Kamau-Devers Kja Miller SA (2020) The environmental attributes of wood fiber composites with bio-based or petroleum-based plastics. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 25(6): 1145-1159.

Keskisaari A, Butylina S ja Kärki T (2016) Use of construction and demolition wastes as mineral fillers in hybrid wood-polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science; J.Appl.Polym.Sci* 133(19): n/a.

Klyosov AA (2007) *Wood-Plastic Composites*. A John Wiley & Sons, Inc.

Li M, Pu Y, Thomas VM, Yoo CG, Ozcan S, Deng Y, Nelson K ja Ragauskas AJ (2020) Recent advancements of plant-based natural fiber–reinforced composites and their applications. *Composites.Part B, Engineering* 200(1): 108254.

Liikanen M, Grönman K, Deviatkin I, Havukainen J, Hyvärinen M, Kärki T, Varis J, Soukka R ja Horttanainen M (2019) Construction and demolition waste as a raw material for wood polymer composites – Assessment of environmental impacts. *Journal of Cleaner Production* 225: 716-727.

Lunawood (2022) *Piharakentaminen*. [viitattu 29.03.2022]. Saatavissa: <https://lunawood.com/fi/kayttokohteet/piharakentaminen/>.

Mansor MR, Sapuan SM, Zainudin ES, Nuraini AA ja Hambali AA (2014) Thermoplastic Matrix Material Selection Using Multi Criteria Decision Making Method for Hybrid Polymer Composites. *Applied Mechanics and Materials* 564: 439-443.

Mochane MJ, Mokhena TC, Mokhothu TH, Mtibe A, Sadiku ER, Ray SS, Ibrahim ID ja Daramola OO (2019) Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review. *Express Polymer Letters* 13(2): 159-198.

Moritzer Eja Hopp M (2017) Bonding of wood-plastic composites (WPC)—material and surface modification for special applications. *Welding in the World* 61(5): 1029-1038.

Muoviteollisuus ry (2022) *Komposiitit*. [viitattu 09.02.2022]. Saatavissa: <https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/komposiitit/>.

Mussa HM ja Salih TWM (2021) Thermal conductivity of wood-plastic composites as insulation panels: theoretical and experimental analysis. *Épitőanyag* 73(2): 54-62.

Nikolaeva M (2015) Improving the Fire Retardancy of Extruded/Coextruded Wood-Plastic Composites. Lappeenranta University of Technology.

Partanen A, Carus M, Piotrowski S, Dammer L, Küppers M, (2020) *Bio-Based Products: Green Premium Prices and Consumer Perception of Different Biomass Feedstocks*. nova-Institute. 36.

Rangappa SM (2021) *Wood Polymer Composites: Recent Advancements and Applications*. Singapore: Springer.

Ross LA (2008) *Performance of Wood Plastic Composite Foundation Elements in Post-Frame and Light-Frame Shear Walls*. Washington State University.

Saarela O, Airasmaa I, Kokko J, Skrifvars M ja Komppa V, (2003) *Komposiittirakenteet*. Helsinki: Muoviyhdistys ry.

Seven Trust (2021) *Products*. [viitattu 04.04.2022]. Saatavissa: <https://7trust.com/products>.

Spiridon I, Leluk K, Resmerita AM ja Darie RN (2015) Evaluation of PLA–lignin bioplastics properties before and after accelerated weathering. *Composites.Part B, Engineering* 69: 342-349.

Turku I, Kärki T (2014) Research progress in wood-plastic nanocomposites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 27(2): 180-204.

UPM ProFi (2022a) *UPM ProFi Click -Asennus on Jopa 2,5 Kertaa Perinteistä Asennustapaa Nopeampi*. [viitattu 30.03.2022]. Saatavissa: <https://www.upmprofi.com/fi/terassin-asennus/click-asennus/>.

UPM ProFi (2022b) *UPM ProFi Piazza One Ja Pro - Luokkansa Paras Terassi, Puunomainen Pinta*. [viitattu 29.03.2022]. Saatavissa: <https://www.upmprofi.com/fi/terassilauta-komposiitti/upm-profi-piazza/>.

Väisänen T, Laitinen K, Tomppo L, Joutsensaari J, Raatikainen O, Lappalainen R ja Yli-Pirilä P (2018) A rapid technique for monitoring volatile organic compound emissions from wood-plastic composites. *Indoor + Built Environment* 27(2): 194-204.

Vandi L, Chan CM, Werker A, Richardson D, Laycock B ja Pratt S (2018) Wood-PHA Composites: Mapping Opportunities. *Polymers; Polymers (Basel)* 10(7): 751.

Vuorinen, J, Mustakangas, M, Annala M, (2016) *Komposiitit - Loputtomasti Mahdollisuuksia*. Muoviteollisuus ry.

Wang HY, Lin DL, Wang YM ja Li DG (2012) Cross-Sectional Stiffness Analysis and Support Span Calculation of WPC Decking. *Applied Mechanics and Materials* 170-173: 3175-3180.

Winandy ja Hatfield CA (2007) Analysis of three-year Wisconsin temperature histories for roof systems using wood, wood-thermoplastic composite, and fiberglass shingles. *Forest Products Journal* 57(9): 87-96.

Zhang Y, Xue P, Ding Y, Jia M, Cai J ja Jin X (2016) Improvement of Mechanical Properties of Wood-Plastic Composite Floors Based on the Optimum Structural Design. *Acta Mechanica Solida Sinica; Acta Mechanica Solida Sinica* 29(4): 444-454.