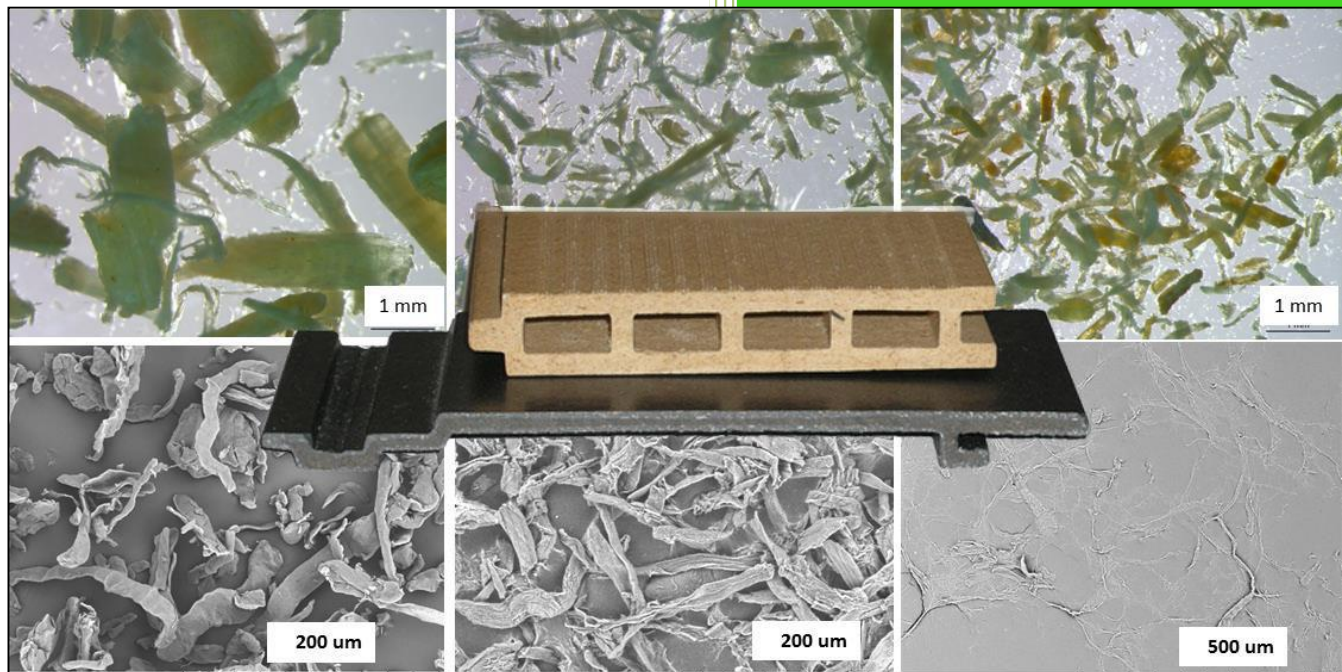


**LOPPURAPORTTI PUURIKASTAMO –OSAHANKKEESTA:
Nanoseosteisten puukuitukomposiittimateriaalien hyödyntäminen
puutuoteteollisuuden sovelluskohteissa (NANOKOMPO)**



Timo Kärki

Irina Turku

Ossi Martikka

Rauli Kinnunen



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Sisällysluettelo

1. Hankkeen tarve ja kysyntälähtöisyys	4
2. Hankkeen toteutusalue ja kohderyhmä	5
2. Hankkeen tavoitteet	5
4. Toimenpiteet ja tuotteet	6
4.1. Katsaus nanoseosteisten puumuovikomposiittien tutkimuksen tilaan (kirjallisuustutkimus)	6
4.2. Hiilikuidun, lasikuidun ja nanosaven vaikutus puu-polypropeenikomposiittien ominaisuuksiin	8
4.3. Vertailututkimus makro- ja mikrokokoisten selluloosakuitujen lujitusominaisuuksista puumuovikomposiiteissa.	10
4.4. Sivuekstruusiolla valmistettujen komposiittien lujittaminen makro- ja mikrokokoisilla selluloosapohjaisilla kuiduilla.....	14
4.5. Erityyppisten hiilipohjaisten täyteaineiden vaikutus sivuekstruusiolla valmistettujen puumuovikomposiittien mekaanisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin	17
4.6. Palosuoja-aineiden vaikutus sivuekstruusiolla valmistettujen puumuovikomposiittien syttävyyteen, mekaanisiin ominaisuuksiin ja veden absorptioon	20
4.7. Hiilipohjaisten täyteaineiden vaikutus polypropeenipohjaisten sivuekstruusiolla valmistettujen puumuovikomposiittien palo-ominaisuuksiin.	24
5. Yhteenveto.....	27

Lukijalle

Arvoisa lukija, tämä kirja on kooste Lappeenrannan teknillisen yliopiston kuitukomposiittilaboratorion Puurikastamo (PuuRi) –hankkeen puitteissa tekemästä tutkimustyöstä.

LUTin vastuulla olleessa ”Nanoseosteisten puukuitukomposiittimateriaalien hyödyntäminen puutuoteteollisuuden sovelluskohteissa (NANOKOMPO)” –osahankkeessa on tarkasteltu mahdollisuuksia puumuovikomposiittien ominaisuuksien kehittämiseen erilaisten nanomittakaavaisten täyteaineiden avulla. Tässä julkaisussa esitellään näitä hankkeen tärkeimpiä tuloksia suomenkielisenä. Kunkin osa-alueen kohdalla on esitetty myös tiedot artikkelien englanninkielisistä originaaliversioista, joissa tulokset on julkaistu kokonaisuudessaan ja syvällisemmin viitemateriaalien kanssa. Jos tässä raportissa esitettyihin tutkimustuloksiin viitataan toisessa julkaisussa, pyydämme käyttämään viittauksessa esitettyjä alkuperäisiä artikkeleita.

Tämä julkaisu antaa toivottavasti hieman käsitystä siitä meneillään olevasta tutkimuksesta eri hankkeis-

sa, jota tutkimusryhmässämme tehdään kuitukomposiittien osa-alueella.

Kiitämme hankkeeseen osallistuneita FWR Oy:n osakasyrityksiä, muita yhteistyökumppaneita sekä konsortion muiden osahankkeiden henkilöstöä rakentavasta yhteistyöstä. Hankkeen toteuttamisen on mahdollistanut julkaisena päärahoittajana Etelä-Suomen EAKR –ohjelma.

Lappeenrannassa 4.5.2014

Tekijät

1. Hankkeen tarve ja kysyntälähtöisyys

Nanomateriaalit voivat olla koostukseltaan epäorgaanisia tai orgaanisia materiaaleja. Nanokokoluokan rakenneosilla saadaan materiaaleihin uusia ominaisuuksia, materiaalit voivat olla myös useiden materiaalien seoksia eli komposiitteja. Nanopartikkelit ovat mikroskooppisen pieniä ja ne voivat olla kemiallisilta ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia riippuen materiaalista. Myös samasta materiaalista peräisin olevat nanopartikkelit voivat olla ominaisuuksiltaan erilaiset riippuen partikkelin koosta, pinta-alasta ja niiden muodosta.

Puukuitulujitetuilla muovikomposiiteilla eli puumuovikomposiiteilla tarkoitetaan yhdistelmäateriaaleja, joissa muovimatriisiin on sekoitettu lujittavia puukuitupartikkeleja. Lujittavina kuituina voidaan käyttää myös puhtaiden puukuitujen lisäksi esimerkiksi selluloosaa, hamppua, sisalia tai pellavaa. Maailmanmarkkinoilla on kysyntää puumuovikomposiittituotteille, koska useat maat ovat päättäneet rajoittaa nykyisten myrkyllisten

kyllästeiden käyttöä. Suurissa teollisuusmaissa ovat tulleet voimaan uudet puunkyllästeiden käyttörajoitukset. Puukuitutuotteet korvaavat myös vaikeasti kierrätettävää lasikuitujätettä.

Puuta on jo kauan käytetty kesto-
muovien täytteenä, mutta puumuovikomposiitit ovat kehitetty viime vuosikymmenen aikana. Kehityksen kantava voima on ollut tarve kestäville puumuovikomposiiteille. 2000-luvulla puumuovikomposiittien ominaisuudet ovat kehittyneet huomattavasti laajan tutkimuksen myötä ja siitä on tullut kilpailija monelle perinteiselle puuvalmisteelle kuten terassilaudalle. Terrassilauta on puumuovikomposiittien selkeästi suurin käyttökohde noin 50 % osuudella kaikista puumuovikomposiiteista. 2000-luvulla puumuovikomposiitteja on ryhdytty käyttämään yhä vaativimmissa sovelluksissa, kuten rakennus- ja autoteollisuudessa. Hankkeessa kehitetään nanoseosteisten puukuitumateriaalien käyttöä eri sovelluskohteissa puutuoteteollisuuden ratkaisuisissa. Nanomateriaalien hyödyntämisellä haetaan korkealuokkaisia ominaisuuksia innovatiivisiin puutuotteisiin esimerkiksi kovuuden, kosteudenkeston ja UV-kestävyyden suhteen, joi-

den avulla puutuotteiden kilpailukykyä eri tuotesovelluksissa sekä sovel-lusalueita uusiin käyttökohteisiin voi-daan merkittävästi laajentaa.

2. Hankkeen toteutusalue ja kohderyhmä

Osahankkeen toteutusalue on Etelä-Karjala ja vaikutuspiirissä on koko Etelä-Suomen EAKR -suuralue. Hankkeessa on ollut tavoitteena puu-muovikomposiitti -liiketoiminnan ke-hittäminen suomalaisessa toimin-taympäristössä.

Hanke toteutetaan kokonaisuudes-saan julkisen tutkimuksen hank-keena, jossa hyödyn saajana ei ole yksittäinen yritys (vrt. de minimis -sääntö), eli yritykset ovat välillistä kohderyhmää. Välillisenä kohderyh-mänä olevat yritykset koostuvat Etelä-Karjalan alueella toimivista pk-yrityksistä sekä *PUURIKASTAMO* -konsortion muihin osahankkeisiin osallistuvista yrityksistä. Hankkee-seen osallistuvien suuryritysten rooli hankkeessa on toimia osallistuvien pk-yritysten yhteistyökumppanina ja veturiyrityksenä eri tuotteiden tuot-teistuksessa.

3. Hankkeen tavoitteet

Hankkeessa on kehitetty nanoseos-teisten puukuitumateriaalien käyttöä eri sovelluskohteissa puutuoteteolli-suuden ratkaisuissa. Nanomateriaa-lien hyödyntämisellä haetaan korkea-luokkaisia ominaisuuksia innovatiivi-siin puutuotteisiin esimerkiksi kovuu-den, kosteudenkeston ja UV-kestävyyden suhteen, joiden avulla puutuotteiden kilpailukykyä eri tuote-sovelluksissa sekä sovellusalueita uu-siin käyttökohteisiin voidaan merkit-tävästi laajentaa.

Tehdyn tutkimuksen osatavoitteet ovat olleet:

1. Määrittää potentiaaliset nanomate-riaalit ja ratkaisut, jotka soveltuvat eri tuotesovelluksiin rakennus- ja huonekalutuoteteollisuudessa
2. Nanoseosteisten puukuitumateri-aalien sekä niistä valmistettujen tuot-teiden ominaisuuksien määrittäminen
3. Pilot -tuotteiden kehittäminen, testaus ja valmistus sekä tiedon välit-täminen toimialan käyttöön

4. Toimenpiteet ja tuotteet

Hankkeen puitteissa on tuotettu seitsemän tieteellistä artikkelia. Tässä luvussa esitellään artikkelit ja niiden keskeisin sisältö tiivistettynä. Tutkimusta varten valmistettiin erityyppisiä komposiitteja joiden sekä koostumusta että profiilia muuteltiin. Erikoisuutena tavanomaisten yksikerroksisten komposiittien lisäksi tutkittiin myös sivuekstruusion avulla valmistettuja pinnoitettuja profiileja.

4.1. Katsaus nanoseosteisten puumuovikomposiittien tutkimuksen tilaan (kirjallisuustutkimus)

Turku, Irina; Kärki, Timo. 2013. Research progress in wood-plastic nanocomposites: A review. Journal of Thermoplastic Composite Materials. Vol. 27(2). pp. 180-204.

Puumuovikomposiittien mahdollisia käyttökohteita on rajoittanut puutteet muutamissa materiaaliominaisuuksissa. Ominaisuuksia voidaan parantaa erilaisten täyteaineiden avulla. Nanokoon täyteaineilla on suuri ominaispinta-ala, joka mahdollistaa voimakkaan molekyyli-tason vuorovaikutuksen ja tuo näin materiaaleihin uusia ominaisuuksia. Tämä kirjallisuustutkimus kokoaa katsauksen nanotäyteaineiden käytöstä puumuovikomposiiteissa ja niiden vaikutuksesta mekaanisiin ominaisuuksiin, lämpöstabiiliuteen, palo-ominaisuuksiin ja kosteusominaisuuksiin.

Nanokomposiitit ovat usean materiaalin yhdistelmiä, joista ainakin yhden komponentin jokin dimensio on nanomittakaavassa. Tavanomaisesti komposiiteissa käytettyjen nanotäyteaineiden kokoluokka on 1-500 nm, tavanomaisten täyteaineiden ollessa kooltaan 10 µm – 1cm. Lisäksi nanotäyteaineilla voidaan saavuttaa jo 3-5 p-% pitoisuuksilla parempi vaikutus kuin 30 p-% mikrokokoisen täyteaineen lisäyksellä. Kuluneen vuosikymmenen aikana useat tutkijat ovat keskittyneet optimoimaan puumuovikomposiitteja hybridisoimalla niitä nanokokoisilla lujitetäyteaineilla.

Mekaaniset ominaisuudet

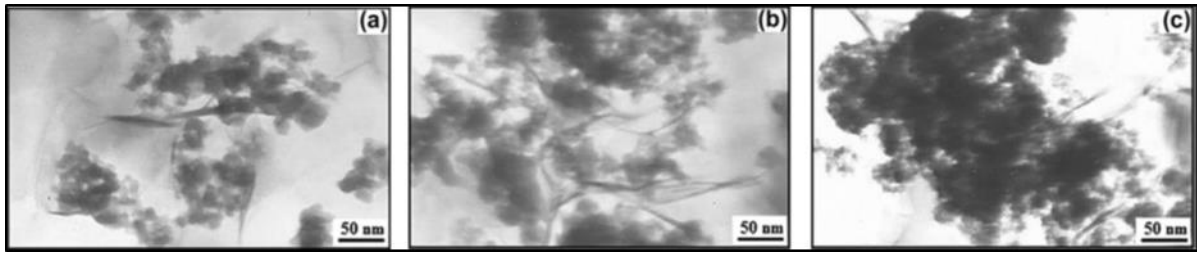
Mekaaniset ominaisuudet, kuten taivutus-, veto-, ja iskulujuus ovat yleisimmät puumuovikomposiiteista tutkitut suureet. Komposiittien veto- ja taivutusmoduulit ovat tyypillisesti alhaisemmat kuin massiivipuun johtuen muovimatriisin alhaisesta jäykkyydestä. Nanotäyteaineilla pyritään lisäämään polymeerimatriisin jäykkyyttä ja kytkentää puun kanssa ja tätä kautta parantamaan mekaanisia ja muita ominaisuuksia.

Nanosavella ja -oksidoilla on saavutettu puumuovikomposiiteissa veto- ja iskulujuuden huomattava parannus. Nanosaven jo 0,5 % lisäysmäärällä vetolujuus kasvoi 9,7 % ja iskulujuus 15,4 %. Huomattavaa on, että iskulujuus alkoi laskea, kun lisäainemäärä kasvoi yli 0,5 %:n, vastaavasti vetolujuus kasvoi hieman 1,5 % täyteainepitoisuuteen asti. Morfologinen tutkimus paljasti, että 0,5 %:n lisäainemäärällä nanosavi oli jakautunut hyvin tasaisesti läpi komposiitin, mutta korkealla, 3 %:n lisäyksellä lisäaine paakkuuntui ja heikensi komposiitin ominaisuuksia. Sama ilmiö on

esitetty kuvassa 1., josta voidaan havaita kuinka TiO_2 - nanopartikkelit alkavat paakkuuntua konsentraation noustessa heikentäen komposiitin ominaisuuksia.

Lisäämällä hiilinanoputkia (CNT) puumuovikomposiitteihin on saavutettu jopa 97,8 MPa vetolujuus ja 7,6 GPa taivutusmoduli, kun tavanomaisen, kaupallisen komposiitin vastaavat arvot ovat 19,2 MPa ja 2,5 GPa. Vastavasti on huomattu, että hiilinanoputkia lisäämällä iskulujuutta voidaan kasvattaa 2 %:n lisäykseen asti – tämän jälkeen lujuus heikkenee johtuen nanopartikkelien paakkuuntumisesta, joka edesauttaa jännityshuippujen muodostumista ja halkeamien syntyä.

Myös mikrokristallisen selluloosan (MCC) käyttöä puumuovikomposiittien lujittamisessa on tutkittu ja yhdessä kytkentäaineen käytön kanssa, 8 p-%:n lisäyksellä komposiitin vetolujuus on saatu lähes 40 MPa tasolle. Mikrokristallisen selluloosan lisäys paransi myös taivutus- ja iskulujuutta.



Kuva 1. TEM-kuvat polymeeri-puu-kytkentäaine-nanolisäaine -komposiitista. TiO_2 -nanolisäaineen osuus vasemmalta oikealle 1%, 3%, 5%.

Veden absorptio

Puumuovikomposiittien veden absorptiota on tutkittu laajasti, sillä se vaikuttaa merkittävästi komposiitista valmistettavan lopputuotteen kestävyys- ja kestävyyteen. Kohonnut kosteuspitoisuus voi aiheuttaa muodonmuutoksia, aiheuttaa mikrobien kasvua ja biologista hajoamista sekä heikentää mekaanisia ominaisuuksia. Kytkentäaineiden käytöllä veden absorptiota voidaan vähentää, mutta ilmiö on yhä olemassa ja uusia ratkaisuja sen vähentämiseksi tarvitaan. On havaittu, että alhaisilla nanosaven määrillä puumuovikomposiiteissa voidaan vähentää veden absorptiota. Jo 2...3 p-%:n lisäys on riittävä, korkeammat pitoisuudet alkavat heikentää tulosta. Oletetaan, että tasaisesti jakautuneet nanopartikkelit tukkivat veden pääsytiä komposiittiin, lisäksi hydrofiiliset nanosavipartikkelit voivat myös pysäyttää kosteuden etenemisen.

Myös muutaman prosentin hiilina-
notutkilisäyksellä on havaittu merkit-

tävää veden absorptiota ja komposiitin turpoamista. Vaikutusmekanismien uskotaan olevan samankaltaiset kuin nanosavien kanssa.

4.2. Hiilikuidun, lasikuidun ja

Veden absorption vähentäminen on tärkeää puumuovikomposiittien käytettävyyden kannalta. Sitä voidaan pienentää nanomateriaaleilla jo muutaman prosentin lisäysmäärillä. Jos nanomateriaalien määrää kasvatetaan, alkavat lisäaineet agglomeroitua heikentäen komposiittien ominaisuuksia.

nanosaven vaikutus puu-polypropeenikomposiittien ominaisuuksiin

Turku, Irina; Kärki, Timo. 2014. The effect of carbon fibers, glass fibers and nanoclay on wood flour-polypropylene composite properties. European Journal of Wood and Wood Products. Vol. 72(1). pp. 73-79.

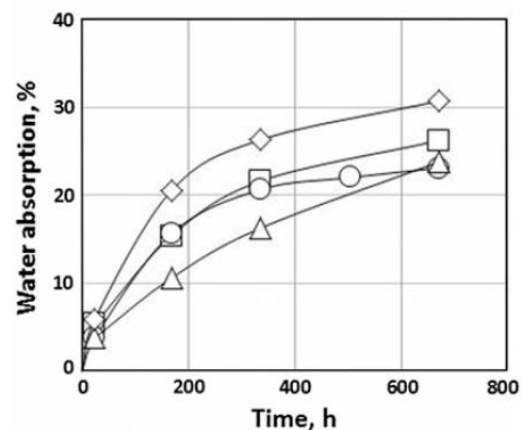
Tutkimuksessa selvitettiin mikrokokoisten hiilikuidun ja lasikuidun sekä nanosaven vaikutusta puumuovikomposiittien mekaanisiin ominaisuuksiin. Taivutuslujuus parani selvästi lasikuidun ja hiilikuidun lisäyksellä. Taivutusmoduuli kasvoi 34 % nanosavilisällä, mutta muut ominaisuudet heikkenivät. Kaikki lisäaineet pienensivät veden absorptiota.

Tutkimusta varten valmistettiin puumuovikomposiitteja, joiden koostumus oli 22 p-% polypropeenaa, 3 p-% kytkentäainetta ja 10 p-% lisäainetta. Loput komposiitista on puupurua, eli referenssissä 73 p-% ja lisäaineistetuissa 63 p-%. Kokeissa käytetty hiilikuitu oli kaupallista, 3 mm pitkää haketta, lasikuitu oli 25 mm pitkää lasikuituteollisuuden sivutuotetta ja nanosavi kaupallista, pintakäsiteltyä alle 25 µm partikkelikokoista ennen prosessointia. Komposiittien tutkitut ominaisuudet olivat vetolujuus ja -moduuli, kovuus ja veden absorptio. Komposiittien murtumapinnat tutkittiin pyyhkäisyelektronimikroskoopilla.

Lujuusominaisuudet

Hiili- ja lasikuitujen havaittiin vaikuttavan myönteisesti tutkittuihin lujuusominaisuuksiin. Hiilikuitu paransi vetomoduulia 18 % ja lasikuidun li-

säys kasvatti vetolujuutta 20 % ja vetomoduulia 29 %. Nanosavi heikensi vetolujuutta n. 12 %, mutta vetomoduuli parantui 34 %. Komposiittien iskulujuus heikkeni kaikilla lisäaineilla. Hiilikuidun tapauksessa 19 %, lasikuidulla 7 % ja nanosavella 32 %. Komposiittien kovuuden määrittäminen osoitti noin 7 % parannuksen sekä hiilikuidulla että lasikuidulla. Nanosaven kohdalla kovuus laski n. 15 % jonka voidaan olettaa johtuneen partikkelien agglomeroitumisesta korkealla täyteainepitoisuudella.



Kuva 2. Veden absorptio. Referenssi (◇), hiilikuitua sisältävä (○), lasikuitua sisältävä (□) ja nanosavea sisältävä (Δ).

Veden absorptio

Veden absorptio (kuva 2) oli kaikkien täyteaineiden kanssa selvästi täyttämätöntä referenssiä alhaisempi. Hiilikuitua sisältävän komposiitin veden absorptio laski 25 %, lasikuitua sisältävällä 15 % ja nanosavea sisältävällä

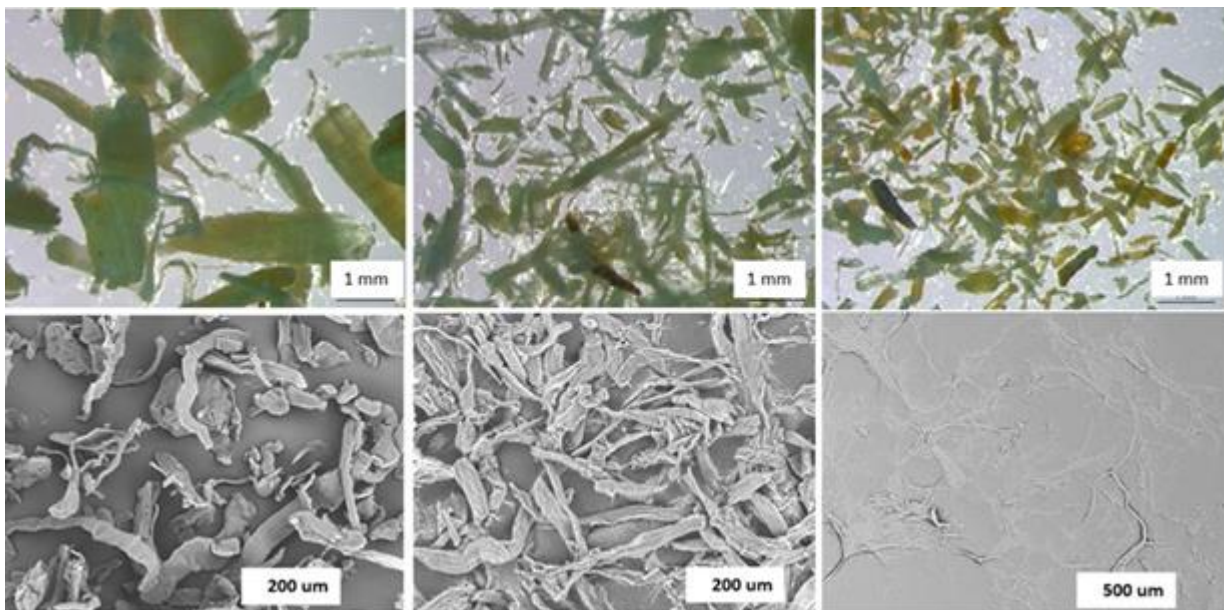
22 % referenssiin nähden. Lisäksi havaittiin, että nanosavea sisältävän komposiitin veden absorptio oli kaikkein hitainta. Tämän oletetaan liittyvän nanosaven vahvasti hydrofiiliseen luonteeseen, joka voi pysäyttää veden etenemisen.

4.3. Vertaileva tutkimus puumuovikomposiittien lujittamisesta makro- ja mikrokokoisilla selluloosakuiduilla

Turku, Irina; Kärki, Timo. 2013. Reinforcing wood-plastic composites with macro- and micro-sized cellulosic fillers: Comparative analysis. Journal of Reinforced Plastics and Composites. Vol. 32(22). pp. 1746-1756.

Tutkimuksessa selvitettiin makro- ja mikrokokoisten selluloosamateriaalien vaikutusta puumuovikomposiittien ominaisuuksiin. Paras tulos saavutettiin sekoittamalla karkeaa puupurua mikrofibrilloidun selluloosan kanssa. Puhtaasta selluloosasta valmistetuilla komposiiteilla oli kaikkein alhaisin lujuus.

Tutkimusta varten valmistettiin puumuovikomposiitteja kolmesta erityyppisestä kuusipurusta/jauhosta (referenssi, Mesh 20 ja puujauho Arbocel C320), sellusta (Arbocel B800) ja lisäksi tutkittiin mahdollisuutta käyttää kahta mikrofibrilloitua selluloosaa (P0011 ja P1011) lujitteena karkeamman puupurun lisänä. Eri materiaalit on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Komposiittien valmistuksessa käytettyjä puupohjaisia materiaaleja.

Komposiitit valmistettiin Weber CE 7.2 vastakkainpyörivällä kaksoiskartioruuviekstruuderilla. Kaikissa komposiiteissa oli 30 p-% polypropeenä, 3 p-% kytKentäainetta ja 3 p-% voiteluainetta. Puupurun tai puhtaasti selluloosapohjaisen materiaalin osuus oli kaikissa resepteissä vakio 64 p-%. Valmistettujen komposiittien taivutuslujuus ja -moduuli, vetolujuus ja -moduuli, iskulujuus, kovuus, veden absorptio ja turpoama sekä syklisen säänrasituksen kesto määritettiin. Lisäksi komposiittien rakennetta analysoitiin pyyhkäisyelektronimikroskooppilla.

Mekaaniset ominaisuudet

Tutkimuksessa havaittiin, että puupuruista valmistetuista komposiiteista korkein taivutuslujuus ja -moduuli saavutettiin MESH 20 -kokoisella puupurulla; parannusta referenssiin oli 13 % ja 5,3 %. Vastaavasti hienojakoisimmasta puupurusta valmistetun komposiitin lujuusominaisuudet olivat hieman heikommät kuin karkeasta purusta valmistetulla verrokilla. Kun osa karkeasta puupurusta 10 %:a korvattiin mikrofibrilloidulla selluloosalla, havaittiin vielä 5,5 %:n parannus taivutuslujuudessa ja n. 3 %:in parannus taivutusmoduulissa. Kun puhtaasta selluloosasta valmistetun komposiitin taivutuslujuutta ja -moduulia verrataan referenssiin, ovat sen ominaisuudet selvästi heikommät; taivutuslujuus on alentunut 20 % ja taivutusmoduuli 26 %. Tämä johtuu oletettavasti riittämättömällä kytKentäaineen määrällä suhteessa selluloosakuitujen suureen ominaispinta-alaan (verrattuna puupuruun).

Vetolujuuden ja -moduulin tapauksessa tulokset olivat samansuuntaisia kuin taivutuslujuudessa. Käytettäessä MESH 20 -kokoista puupurua, vetolujuus parani n. 14 % ja vetomoduli 3,3 %. Komposiitit, joissa oli käytetty hienojakoista puupurua, oli vetomodulistaan n. 5 % heikompaa,

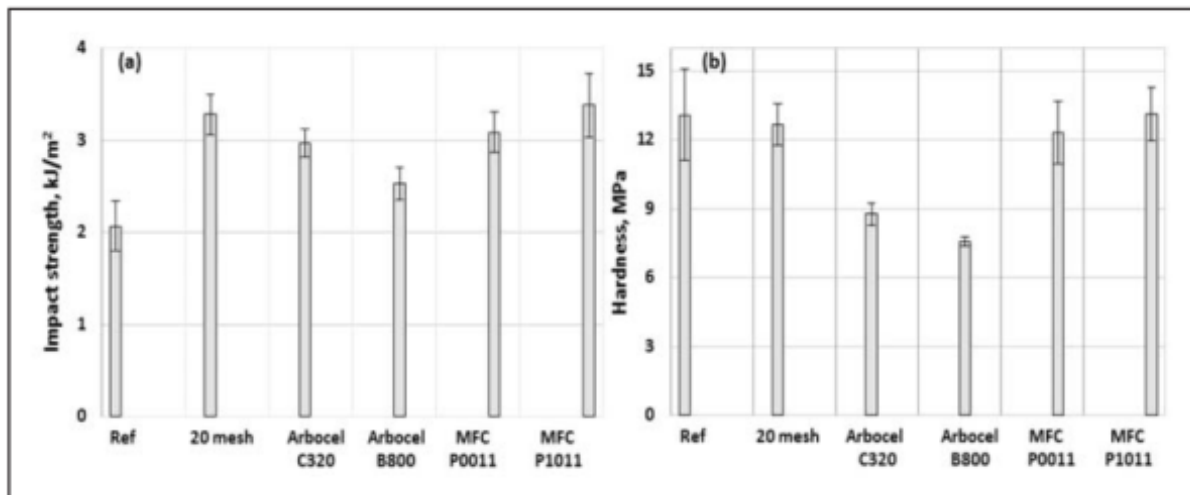
mutta vetolujuudessa ei havaittu merkittävää eroa referenssiin. Kun karkeaan puupuruun sekoitettiin 10 %:a mikrokristallista selluloosaa P1011, parani vetolujuus 15 % ja vetomoduuli 8 %. Alhaisemman muotosuhteen omaavan mikrokristallisen selluloosan P0011 tapauksessa vetolujuus parani 3 %, mutta vetomoduuli laski 2 % referenssiin nähden. Puhtaasta selluloosasta valmistetulle komposiitille mitattiin heikoimmat vetolujuuden ja moduulin arvot, jotka olivat vetolujuuden osalta 7 % alhaisemmat ja vetomoduulin osalta 24 % alemmat kuin referenssimateriaalilla.

Iskulujuus parani, kun partikkelikoko pieneni referenssiin nähden. MESH 20-purulla iskulujuus oli 58 % parempi kuin referenssillä ja hienommalla puujauholla 43 % referenssiä parempi. Yleisesti ottaen suuret partikkelit aiheuttavat iskulujuuden testauksessa korkean jännityshuipun ja

heikentävät materiaalin iskulujuutta. Myös mikrofibrilloidun sellun lisäys puupuruun paransi merkittävästi iskulujuutta. P1011 materiaalia sisältävä komposiitti oli 63 % lujempaa kuin referenssi ja alhaisemman muotosuhteen omaavaa mikrokristallista selluloosaa P0011 sisältävä komposiitti oli 49 % referenssiä vahvempaa. Myös puhtaasta selluloosasta valmistettu komposiitti oli referenssiä lujempaa, iskulujuuden ollessa 22 % korkeampi. Määritetyt iskulujuudet ja kovuudet on esitetty kuvassa 4.

Brinell-kovuuden arvoissa niin referenssin, mesh 20-purun ja mikrofibrilloitujen selluloosien tuloksissa ei ollut merkittävää eroa. Sekä hienojakoisesta puupurusta valmistetun komposiitin että puhtaasta selluloosasta valmistetun komposiitin lujuusarvot olivat selvästi heikoimmat.

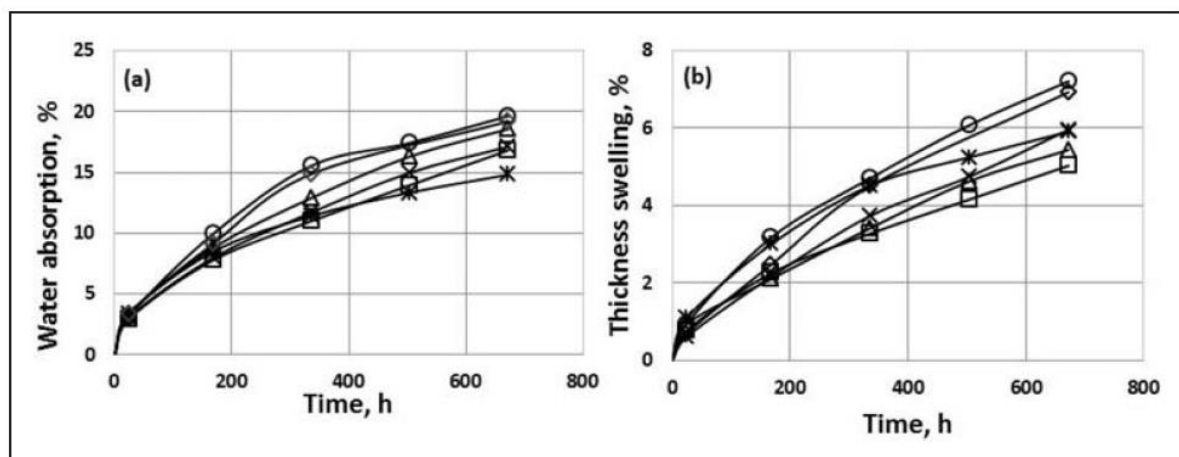
Kuva 4. Eri komposiittien iskulujuudet ja kovuudet



Kosteusominaisuudet

Korkeimmat veden absorptio ja paksuusturpoaman arvot mitattiin sekä karkeinta että hienointa puupurua sisältäville komposiiteilla, molempien loppukosteuden ollessa liki 20 %. Alhaisin veden absorptio oli puhtaasta sellusta valmistetulla komposiitilla, n.

15 %. Pienin paksuusturpoama oli mesh 20 -purusta valmistetulla komposiitilla, n. 5 % ja suurin, yli 7 % vähiten vettä absorboineella puhtaasta selluloosasta valmistetulla komposiitilla. Veden absorptiot ja paksuusturpoamat resepteittäin on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Veden absorptio ja paksuusturpoama ajan funktiona. ◇=referenssimateriaali, □=20mesh -puru, ○=Arbocel C320, * =Arbocel B800, △=MFC P0011 ja ×=MFC P1011

Säänkesto

Säänkesto-ominaisuudet määritettiin suorittamalla koekappaleille

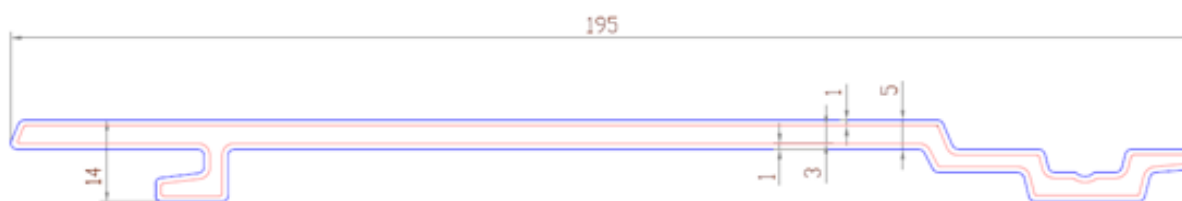
standardoitu syklinen rasiustesti, jossa materiaali altistetaan jäätymis-sulamis – syklille kolme kertaa ja määritetään tämän vaikutus taivutuslujuuteen. Puupurusta valmistetut komposiitit menettivät lujuudestaan 18 % - 25 % (Arbocel C320 ja mesh 20, referenssi 23 %). Mikrokristallista selluloosaa 10 % sisältävä komposiitti menetti rasiuskokeessa myös 18 % taivutuslujuudestaan. Heikoin tulos syklisessä testissä oli puhtaasta selluloosasta valmistetulla komposiitilla, jonka taivutuslujuus heikkeni 28 %.

Partikkelikoon mesh 20 –puupurusta valmistetuilla komposiiteilla oli paremman mekaaniset ominaisuudet kuin karkeammasta purusta valmistetulla verroilla tai hienommasta purusta valmistetulla komposiitilla. Kun karkeaa puupuruun seostettiin 10% mikrofibrilloitua selluloosaa, saavutettiin vielä paremmat mekaaniset ominaisuudet. Heikoimmat ominaisuudet saavutettiin käyttämällä puhdasta selluloosaa komposiittien raaka-aineena.

4.4. Sivuekstruusiolla valmistettujen komposiittien lujittaminen makro- ja mikrokokoisilla selluloosapohjaisilla kuiduilla

Turku, Irina; Hämäläinen, Kimmo; Kärki, Timo. 2014. Co-extrusion of wood flour/PP composites with PP-based cap layer reinforced with macro- and micro-sized cellulosic fibers. Advanced Materials Research Vols. 834-836. pp. 203-210.

Tutkimuksessa selvitettiin makro- ja mikrokokoisten selluloosamateriaalien vaikutusta sivuekstruusiolla valmistettujen, pinnoitettujen, kerrosrakenteisten puumuovikomposiittien ominaisuuksiin. Komposiiteista määritettiin vetolujuus, iskulujuus, veden absorptio ja paksuusturpoama.



Kuva 6. Sivuekstruusiolla valmistettujen komposiittien poikkileikkausprofiili.

Tutkimusta varten valmistettiin viittä erilaista pinnoitettua puumuovikomposiittia sivuekstruusion avulla. Pintamateriaalin koostumusta vaihdeltiin siten, että kahdessa komposiittissa oli kahta erilaista, eri partikkelikoon omaavaa, puupurua/jauhoa (20-mesh ja Arbocell C320) sisältävää materiaalia ja kolme muuta olivat selluloosapohjaisia materiaaleja, joista kahteen oli seostettu 10 % eri jauhatustasteen mikrofibrilloitua selluloosaa (MFC P1011 ja MFC P0011). Runkomateriaali pidettiin kaikissa komposiiteissa samana. Valmistettujen profiilien muoto on esitetty kuvassa 6.

Lujuusominaisuudet

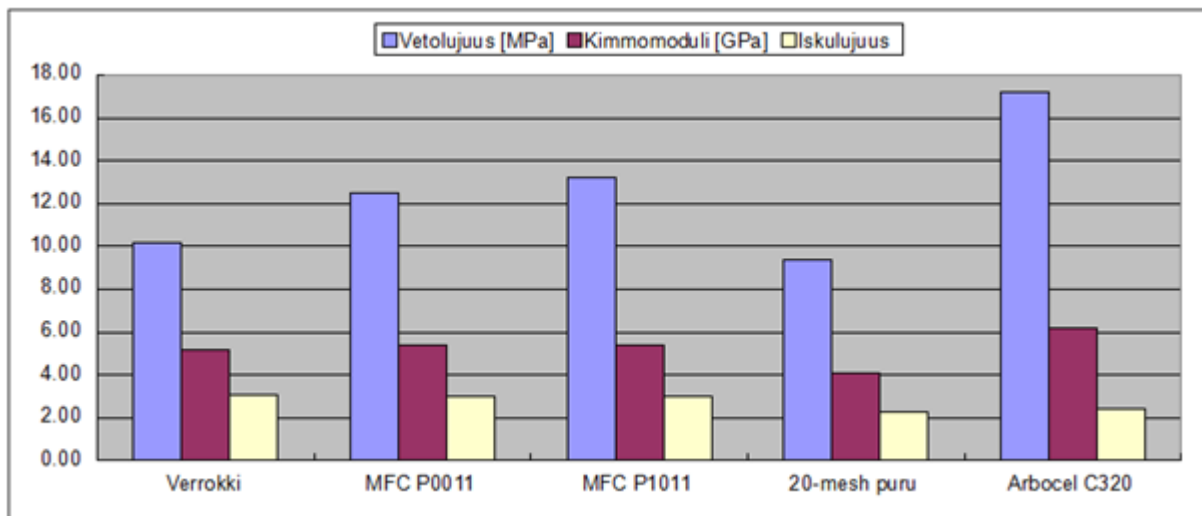
Mikrofibrilloitua selluloosaa sisältävien komposiittimateriaalien seostaminen referenssimateriaaliin paransi selvästi vetolujuutta, myös vetomoduuli kasvoi jonkin verran; selluloosan P1011 tapauksessa taivutuslujuus kasvoi 35 % ja -moduuli

4,3 % ja vastaavasti selluloosan P0011 kanssa lujuus kasvoi 22,4 % ja moduuli 5 %. Verrattaessa puupurua ja -jauhoa pintarakenteessa sisältäviä reseptejä keskenään, oli näiden välillä selvä ero vetolujuudessa sekä keskenään että referenssimateriaaliin nähden. Hienompijakoista puujauhoa sisältävän komposiitin vetolujuus oli kaksinkertainen ja -moduuli 30 % korkeampi kuin karkeampaa 20-mesh puupurua sisältävässä komposiitissa. Myös referenssiin nähden hienompaa puujauhoa sisältävän komposiitin vetolujuudet olivat selvästi korkeammat; taivutuslujuus oli 68 % ja -moduuli 20 % korkeampi.

Mikrofibrilloidun selluloosan seostuksella referenssimateriaaliin ei havaittu olevan vaikutusta iskulujuuteen. Pintamateriaalissa suurempikoista puukuitua sisältävien komposiittien iskulujuus oli alhaisempi kuin referenssimateriaalin. Komposiittien

puupurua/jauhoa (20-mesh ja Arbocell C320) pintamateriaalissa sisältäville komposiiteille, n. 15 %. Niin referenssimateriaali kuin mikrofibrilloidulla selluloosalla seostetut komposiitit absorboivat kosteutta vain alle 6 %. Paksuusturpoaman suhteen ti-

Kuva 7. Komposiittien mekaaniset ominaisuudet.



mekaaniset ominaisuudet on esitetty kuvassa 7.

Kosteusominaisuudet

Korkeimman puu / selluloosapitoisuuden omaavilla komposiiteilla oli korkein hygroskooppisuus ja veden absorptio upotuksessa. Puumuovikomposiiteissa nämä ominaisuudet ovat suhteessa materiaalin puupitoisuuteen - puupartikkelien pinnan hydroksyylioryhmät reagoivat vesimolekyyleihin vetosidoksin. Korkeimmat veden absorption arvot määritettiin

lanne oli samansuuntainen, korkeimmat paksuusturpoaman arvot mitattiin 20-mesh purua ja Arbocell C320 – puujauhoa sisältäville komposiiteille, n. 10 %. Referenssimateriaalilla oli pienin kosteusturpoama, 6 %, ja molemmilla mikrofibrilloitua selluloosaa sisältävillä komposiiteilla oli hieman tätä korkeammat paksuusturpoaman arvot, 7...8 %. Ilmiö saattaa johtua komposiitin pintaan kerääntyneistä selluloosakimpuista, sillä mikrofibrilloidut selluloosat ovat alttiita agglom-

meroituselle komposiitin valmistuksessa.

Komposiittien vetolujuus parani kun sel-lupohjaiseen pintakerrokseen seostettiin 10% mikrofibrilloitua selluloosaa. Tällä ei ollut vaikutusta iskulujuuteen eivätkä veden absorptio ja kosteusturpoama alentuneet. Hienojakoista puupuraa pintakerroksessa sisältävä komposiitti oli vetolujuudeltaan tutkituista kaikkein lujin. Korkein veden absorptio oli karkeaa puumateriaalia sisältävällä komposiitilla.

4.5. Erityyppisten hiilipohjaisten täyteaineiden vaikutus sivuekstruusiolla valmistettujen puumuovikomposiittien mekaniisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin

Turku, Irina; Kärki, Timo. 2014. The influence of different carbon type fillers on the mechanical and physical properties of co-extruded PP-based WPC. Advanced Materials Research (In press).

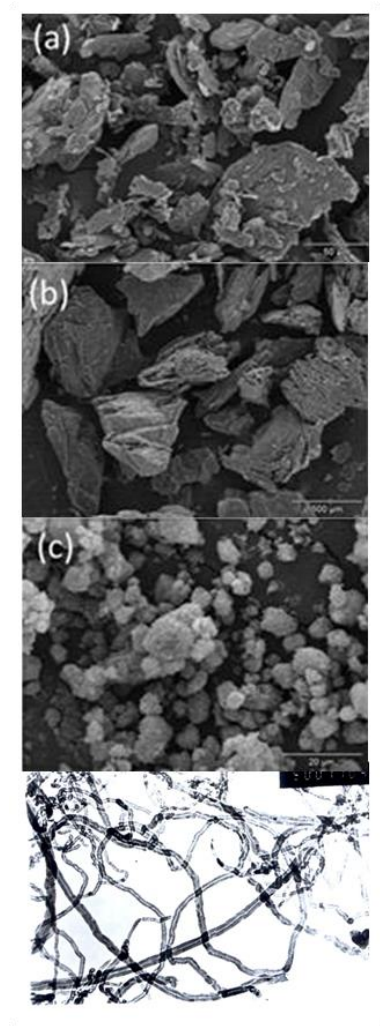
Tutkimuksessa selvitettiin mahdollisuutta parantaa sivuekstruusiolla valmistettujen, pinnoitettujen puumuovikomposiittien ominaisuuksia lisäämällä niihin hiilipohjaisia täyteaineita. Komposiittien useimmat lujuusominaisuudet paranivat selvästi, kuten myös kosteudenkesto.

Tutkimuksessa sivuekstruusiolla val-

Kuva 8. Tutkitut hiilimateriaalit SEM ja TEM kuvassa.

mistetun komposiitin pintakerrokseen saostettiin viittä erilaista mikro- ja nanokokoista hiilipohjaista täyteainetta; grafiittia, paisutettavaa grafiittia, hiilinanoputkia ja hiilimustaa. Lisättyjen täyteaineiden osuus oli kaikissa tapauksissa 3 painoprosenttia. Komposiittien mekaanisista ominaisuuksista määritettiin vetolujuudet, kovuus ja iskulujuus. Kosteudenkesto-ominaisuuksista määritettiin veden absorptio ja paksuusturpoama.

Lisäksi komposiittien mikrorakennetta analysoitiin pyyhkäisyelektronimikroskopiolla.

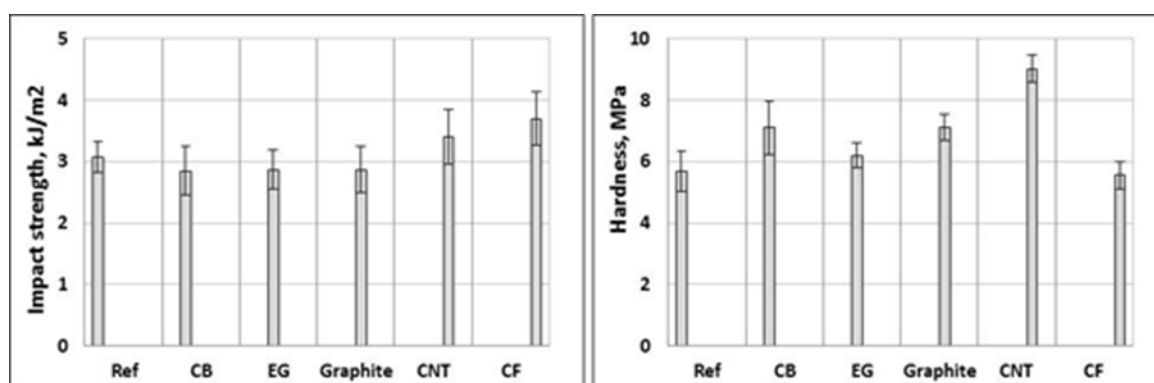


Mekaaniset ominaisuudet

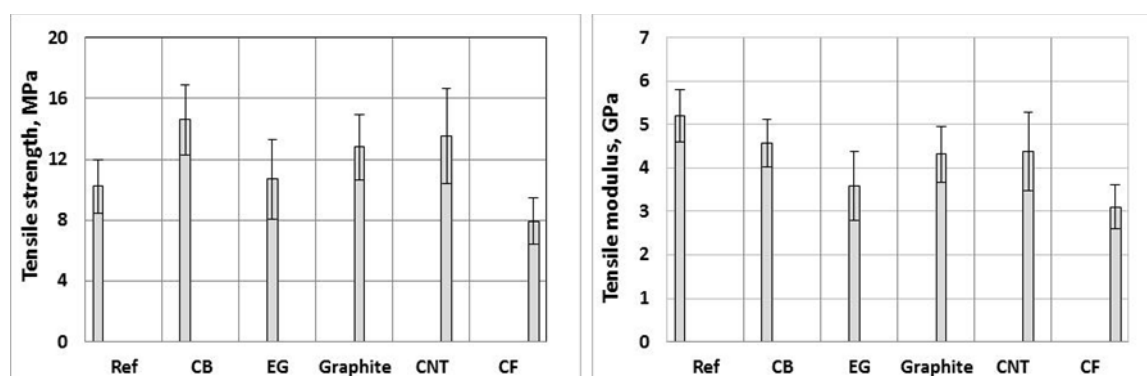
Hiilimustan, paisutettavan grafiitin, grafiitin ja hiilinanoputkien lisäys paransivat kaikki komposiittien vetolujuutta. Parannus oli 45 % hiilimustan, 25 % grafiitin ja 32 % hiilinanoput-

tus oli 12...17 %. Täyteaineista positiivinen vaikutus komposiittien iskulujuuteen oli sekä hiilinanoputkilla että hiilikuidulla, 11 % ja 21 %. Muut täyteaineet alensivat iskulujuutta hieman. Täyteaineiden vaikutus kovuu-

Kuva 10. Vetolujuudet ja vetomodulit. Ref=referenssi, CB=hiilimusta, EG=paisutettava grafiitti, Graphite=grafiitti, CNT=hiilinanoputki ja CF=hiilikuitu.



Kuva 9. Komposiittien Charpy-iskulujuus ja Brinell-kovuus.



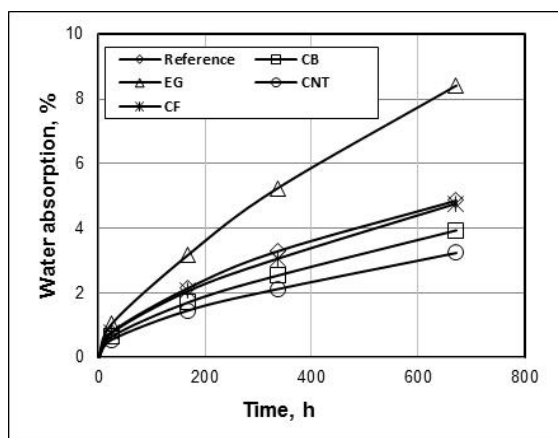
kien lisäyksellä suhteessa referenssiin. Hiilikuidun lisäys alensi hieman vetolujuutta. Tämän voidaan olettaa johtuvan kuitujen pilkkoutumisesta ekstruusioprosessissa ja heikosta kytkeytymisestä käytettyyn matriisiin. Kaikki lisätyt täyteaineet heikensivät vetomoduulia; hiilikuitu eniten, 40 % ja paisutettava grafiitti 31 %. Muiden täyteaineiden alentava vaikutus

oli 12...17 %. Täyteaineista positiivinen vaikutus komposiittien iskulujuuteen oli sekä hiilinanoputkilla että hiilikuidulla, 11 % ja 21 %. Muut täyteaineet alensivat iskulujuutta hieman. Täyteaineiden vaikutus kovuu-

teen vaihteli myös suuresti käytetystä aineesta riippuen. Hiilinanoputket lisäsivät kovuutta jopa 59 % ja sekä hiilimusta että grafiitti molemmat 25 %. Hiilikuidun lisäyksellä ei ollut merkittävää vaikutusta komposiittien kovuuteen. Määritetyt mekaaniset ominaisuudet on esitetty kuvaajina kuvissa 9 ja 10.

Kosteudenkesto

Komposiittien kosteudenkesto määritettiin mittaamalla niiden absorboima vesimäärä upotuksessa ja vastaava paksuusturpoama. Tulokset veden absorptiosta on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Veden absorptio.

Paisutettua grafiittia pintakerroksessa sisältävä komposiitti absorboi selvästi eniten vettä upotusjakson aikana, yli 8 %. Tätä voidaan selittää paisutettavan grafiitin kerrosmaisella, lehtevällä rakenteella. Sekä hiilimustaa että hiilinanoputkia sisältävät komposiitit absorboivat vettä referenssiä vähemmän, hiilinanoputkia sisältävä komposiitti vain hieman yli 3 %. Suurin paksuusturpoama määritettiin referenssimateriaalille, n. 6 %, pienimmät arvot, hieman yli 4 %, saavutettiin komposiiteilla, jotka sisälsivät hiilimustaa ja hiilinanoputkia. Muiden paksuusturpoama oli 5 %:n luokkaa.

Tutkituista hiilipohjaisista täyteaineista nanokokoisien materiaalien, hiilimustan ja hiilinanoputkien, vaikutus oli kokonaisuutena parempi verrattuna mikrokokoisiin täyteaineisiin, grafiitteihin ja hiilikui-tuun. Mikrokokoisilla täyteaineilla ominaisuuksien parannus saattaisi olla mahdollinen korkeammilla täyteainepitoisuuksilla, mutta nanomateriaaleja käytettäessä hyöty saavutetaan jo 0,5...3 % täyteainepitoisuuksilla.

4.6 Palosuoja-aineiden vaikutus si-vuekstruusiolla valmistettujen puumuovikomposiittien syttyvyy-teen, mekaanisiin ominaisuuksiin ja veden absorptioon

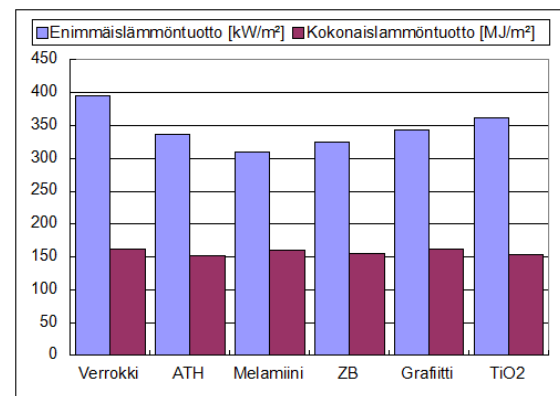
Turku, Irina; Nikolaeva, Marina; Kärki, Timo. 2014. The Effect of Fire Retardants on the Flammability, Mechanical Properties, and Wettability of Co-Extruded PP-Based Wood-Plastic Composites. BioResources. Vol. 9(1), pp. 1539-1551.

Tutkimuksessa selvitettiin, kuinka kaupalliset palosuoja-aineet ja kaksi muuta nanometristä lisäainetta vaikuttavat pinnoitettujen, kerrosrakenteisten puumuovikomposiittien mekaanisiin ja kosteudenkesto-ominaisuuksiin palonkeston lisäksi. Tutkitut ominaisuudet parantuivat yleisesti ottaen paitsi vetomoduuli ja veden absorptio sinkkiboraatin tapauksessa.

Tutkimusta varten valmistettiin siivekstruusion avulla pinnoitettuja puumuovikomposiitteja, joiden pintakerrokseen seostettiin 10 p-% viittä erilaista lisäainetta: kolmea perinteistä palosuoja-ainetta (alumiinitrihydraattia (ATH), melamiinia, sinkkiboraattia (ZB)) ja kahta nanometristä lisäainetta (grafiittia ja titaanidioksidia (TiO_2)). Komposiiteista määritettiin vetolujuus ja -moduuli, charpy -iskulujuus, veden absorptio ja paksuusturpoama sekä palo-ominaisuudet käyttäen kartiokalorimetri-palotestauslaitetta. Komposiittien mikrorakennetta tarkasteltiin pyyhkäisyelektronimikroskoopilla.

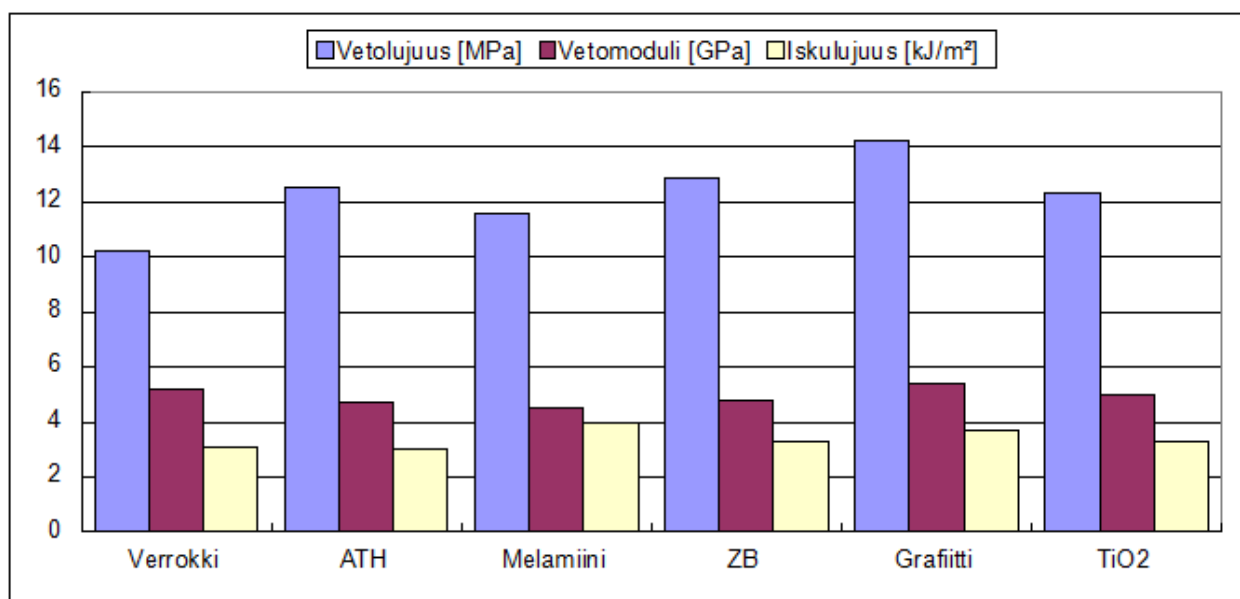
Palotestaus

Kartiokalorimetrin avulla määritettiin komposiittien syttymisaika, enimmäislämmöntuotto, kokonaislämmöntuotto, massan alenemisnopeus, materiaalin tehollinen lämpöarvo ja hiilimonoksidin muodostus palamista- ja hauman aikana. Tuloksista muutamia esitellään seuraavana.



Kuva 12. Koemateriaalien palo-ominaisuuksia.

Suoritetuissa kokeissa havaittiin, että perinteiset palosuoja-aineet (ATH, ZB ja melamiini) alensivat materiaalien enimmäislämmöntuottoa 15...22 %, melamiini kaikkein eniten. Grafiitti alensi enimmäislämmöntuottoa 13 % ja titaanidioksidi n. 8 %. Tutkittujen lisäaineiden vaikutus kokonaislämmöntuottoon oli verrattain pieni. Kartiokalorimetritestistä saatujen tulosten perusteella on mahdollista ennakoita tutkittujen materiaalien sijoitumista EU:n Euro class -paloluokkaan (SBI). Tulosten perusteella on



Kuva 13. Komposiiteille mitatut mekaaniset ominaisuudet.

odotettavissa, että kaikki tutkitut lisäaineet parantavat komposiittien palonkesto-ominaisuuksia niin paljon, että materiaalien paloluokitus koheenee yhdellä luokasta E luokkaan D.

Mekaaniset ominaisuudet

Kaikki kokeessa käytetyt lisäaineet paransivat komposiittien vetolujuutta. Suurin parannus saavutettiin grafiitilla, 37 %. Perinteisistä palosuoja-aineista alumiinitrihydraatti ja sinkkiboraatti molemmat paransivat vetolujuutta yli 20 %. Vetomoduli aleni hieman referenssiin nähden kaikilla muilla lisäaineilla paitsi grafiitilla, joka paransi moduulia 5 %. Suurin vetomodulin alenema, 13 %, havaittiin komposiitilla jonka pintaan oli seostettu melamiinia. Melamiini paransi iskulujuutta 29 % ja grafiitti 19

%. Sekä sinkkiboraatti että titaanidioksidi paransivat molemmat iskulujuutta 7 %. Komposiiteille määritetyt mekaaniset ominaisuudet on esitetty kuvassa 13.

Komposiittien morfologia

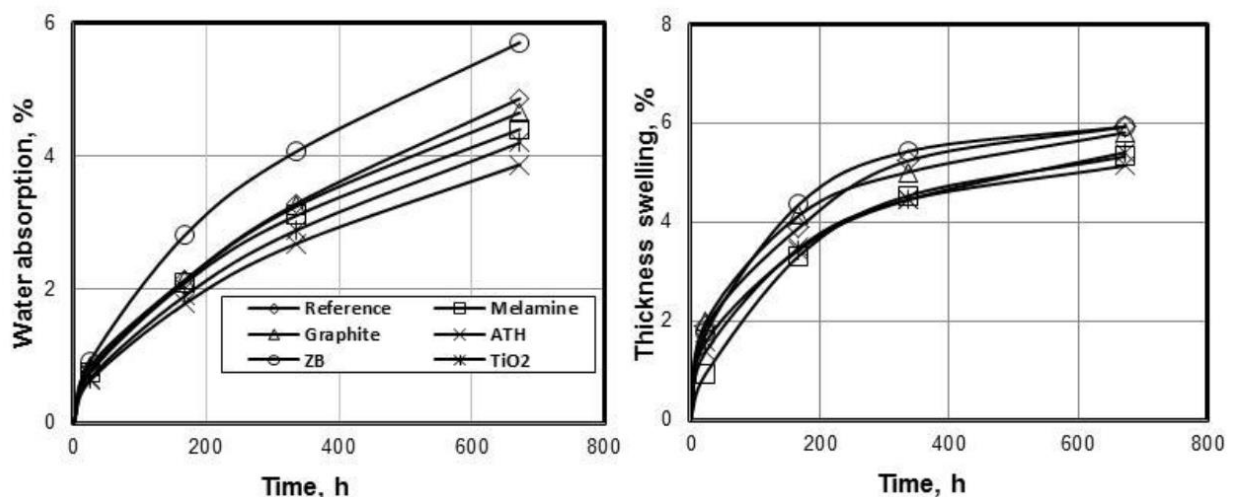
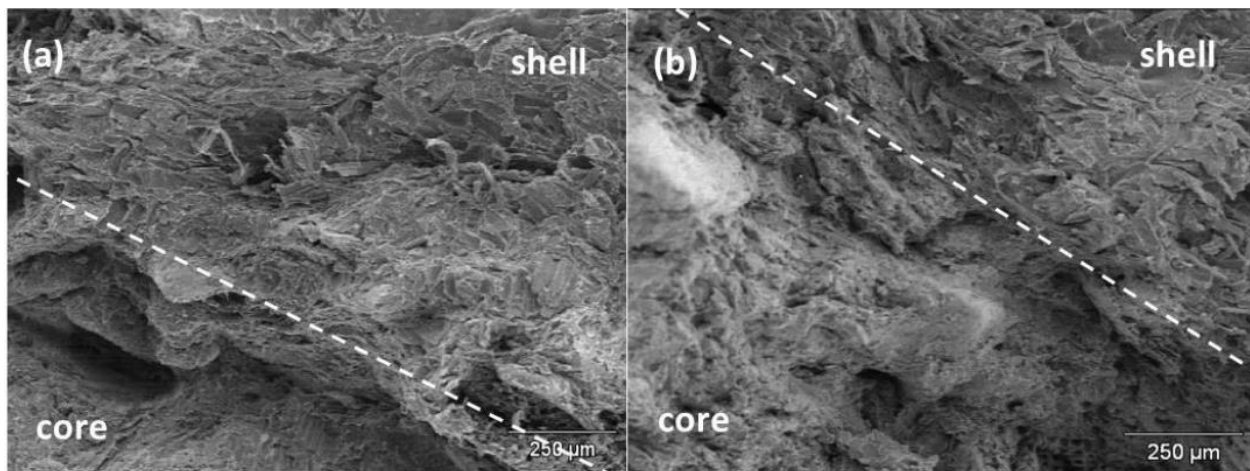
Tutkittaessa komposiittien poikkileikkauspintaa pyyhkäisyelektronimikroskoopilla havaittiin, että profiilin pinta- ja runkokerroksen välillä ei näkynyt selvää rajapintaa eikä halkeilua, joten voidaan olettaa, että kerrosten välinen sidos on hyvä. Kuvassa 14 on esimerkkinä esitetty komposiitin poikkileikkauksen mikrorakenne; yläpuolella on pintakerros (shell) ja alapuolella runko (core). Tutkittujen komposiittien morfologioiden välillä ei ollut suurta eroa.

Kosteusominaisuudet

Sinkkiboraatin lisäys materiaaliin kasvatti veden absorptiota selvästi, liki 6 %, mutta paksuusturpoama pysyi samalla tasolla referenssiin nähden, noin 6 %:ssa. Tämä selittyy sinkkiboraatin korkealla hydrofiilisuudella ja

kristallirakenteella. Kaikkein alhaimmat veden absorptio (alle 4 %) ja paksuusturpoama (n. 5 %) olivat alumiinitrihydraattia sisältävällä materiaalilla. Tulokset on esitetty kuvassa 15.

Kuva 14. Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva poikkileikkauksesta, (a) = referenssi ja (b) = melamiinia sisältävä komposiitti.



Kuva 15. Veden absorptio ja paksuusturpoama.

Komposiitteihin lisätyt palosuoja-aineet vähensivät enimmäislämmöntuottoa 8...22 %. Myös muut tutkitut palo-ominaisuudet paranivat. Lukuun ottamatta grafiittia sisältävää komposiittia, kokonaislämmöntuotto ja tehollinen lämpöarvo alenivat kaikilla tutkituilla lisäaineilla. Yleisesti ottaen taivutuslujuus parani mutta taivutusmoduuli pieneni. Ainoastaan alumiinitrihydraatti paransi komposiittien iskulujuutta. Täyteaineet paransivat kosteudenkestoa lukuun ottamatta sinkkiboraattia.

4.7 Hiilipohjaisten täyteaineiden vaikutus polypropeenipohjaisten sivuekstruusiolla valmistettujen puumuovikomposiittien palo-ominaisuuksiin.

Turku, Irina; Kärki, Timo. 2014. The influence on the carbon-based fillers on the flammability of the PP-based co-extruded WPC. Manuscript.

Tutkimuksessa verrattiin viiden erilaisen hiilipohjaisen täyteaineen vaikutusta sivuekstruusion avulla valmistettujen, pinnoitettujen puumuovikomposiittien palo-ominaisuuksiin. Kaksi tutkituista materiaaleista oli nanokokoisia, hiilimusta ja hiilinanoputket.

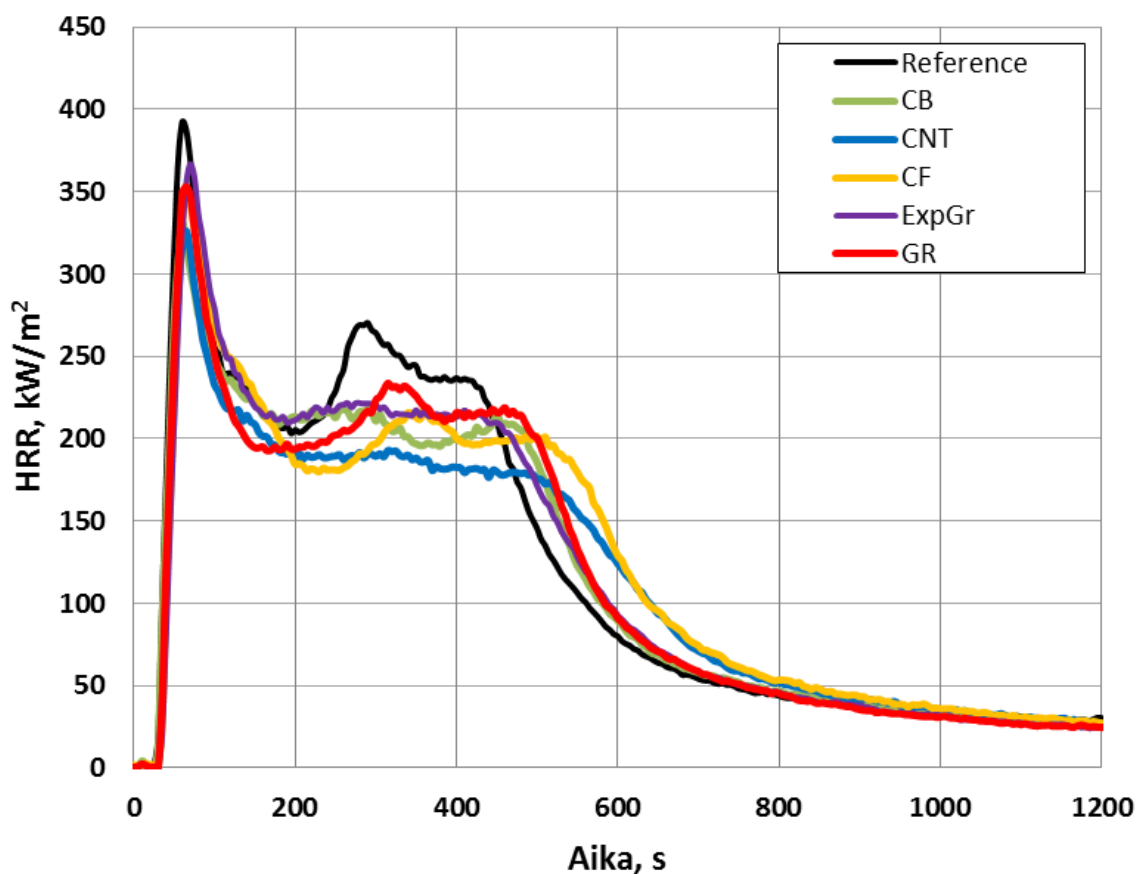
Tutkimusta varten valmistettiin sivuekstruusion avulla 5 erilaista komposiittia, joiden pintakerrokseen oli seostettu 3 % erilaisia hiilipohjaisia täyteaineita; hiilimustaa, paisutettavaa grafiittia, grafiittia, hiilinanoputkia ja hiilikuituja. Näiden palo-ominaisuuksia verrattiin vastaavan rakenteen omaavaan referenssimateriaaliin, johon ei ollut seostettu täyteaineita. Koekappaleet, joiden koko oli $100 \times 100 \times 5 \text{ mm}^3$, testattiin kartiokalometrillä standardin ISO 5660-1 mukaisesti. Kokeissa käytetty lämpöteho oli 50 kW/m^2 .

Palotestaus

Palotestissä koekappaleet poltetaan ja niiden lämmöntuotto määritetään palotapahtuman hapenkulutuksen avulla teoreettisen 13.1 kJ:n energiatuoton perusteella per kulutettu happigramma. Testilaitteen nimitys kartiokalometri tulee koekappaleen yläpuolella olevan säteilylämmittimen kartiomaisesta muodosta. Tulokset osoittavat, että kaikki tutkitut hiilipohjaiset täyteaineet alentavat enimmäislämmöntuottoa. Hiilinanoputkien lisäyksellä oli suurin vaikutus, 18 %. Lähes yhtä suuri vaikutus oli hiilimustalla, 16 %. Huomattavaa on, että molemmat ovat nanokokoisia materiaaleja. Muiden tutkittujen materiaalien vaikutus oli 6...11 %.

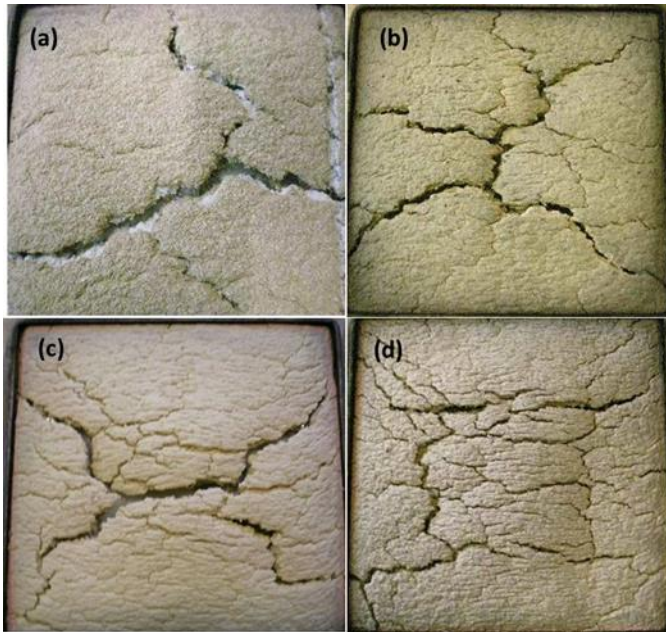
Kuvasta 16 voidaan nähdä, että hiilinanoputkia sisältävällä komposiitilla oli selvästi alhaisempi lämmöntuoton huippuarvo, tämän lisäksi muilla tutkituilla materiaaleilla esiintyvä toinen huippu puuttuu kokonaan. Tämä johtuu oletettavasti hiilinanoputkien muodostamasta hyvästä suojakerroksesta ja lisäksi niiden kyvystä pitää palokappaleen pintaan syntynyt hiilikerros yhtenäisenä. Koekappaleiden ulkomuotoa palotestauksen jälkeen on esitetty kuvassa 17. Myös kokonaislämmöntuotto, massanale-

nemisnopeus ja materiaalien lämpöarvot alenivat hieman. Erot eri materiaalien välillä häviävät ajan kuluessa ja merkittäviä eroja ei voida enää havaita 1000 sekunnin testin keston jälkeen. Kaikki tutkitut täyteaineet lisäsivät hiilimonoksidin tuottoa palotestauksessa mikä johtunee täyteaineiden hiilen hapettumisesta hiilidioksidiksi. Keskeiset tulokset on esitetty taulukossa 16. Arvioitaessa tutkittujen täyteaineiden kykyä toimia palosuojauksessa, voidaan saatujen tulosten perusteella arvioida mihin Euroclass -paloluokkaan koemateriaalit



Kuva 16. . Koekappaleiden lämmöntuotto. CB=hiilimusta, CNT=hiilinanoputket, CF=hiilikuitu, ExpGr=paisutettava grafiitti ja GR=grafiittijauhe.

sijoittuisivat. Simuloidun FIGRA -indeksin perusteella kaikki tutkitut hiilipohjaiset täyteaineet parantaisivat komposiittien paloluokitusta yhdellä luokalla, luokasta E luokkaan D.



Kaikki tutkitut täyteaineet paransivat komposiittien palo-ominaisuuksia. Kokonaisuutena suurin vaikutus oli hiilinanoputkien lisäyksellä. Riippumatta täyteaineet tyypistä, kaikkien puumuovikomposiittien Euroclass -paloluokka parani yhdellä luokalla jo 3 % täyteaineseostuksella tutkittujen lisäaineiden avulla.

Kuva 17. Kappaleet palotestin jälkeen. (a)=referenssi, (b)=grafiitti, (c)=hiilimusta ja (d)=hiilinanoputket.

5. Yhteenveto

NANOKOMPO -hankkeen puitteissa tehtiin kattava kirjallisuustutkimus nanoseosteisten puumuovikomposiittien tutkimuksen nykytilasta ja eri tutkimuksia varten valmistettiin yhdeksän erilaista yksikerrosrakenteista puumuovikomposiittia ja 16 erilaista sivuekstruusion avulla valmistettua, pinnoitettua komposiittia. Valmistetuista puumuovikomposiiteista määritettyjä ominaisuuksia tutkimuksesta riippuen olivat vetolujuus ja -moduuli, taivutuslujuus ja -moduuli, iskulujuus, kovuus, tiheys, veden absorptio, paksuusturpoama, palo-ominaisuudet ja lisäksi komposiittien mikrorakennetta analysoitiin pyyhkäiselektronimikroskopiaa apuna käyttäen.

Yleisesti ottaen, kiinnostus puumuovikomposiitteihin on kasvamassa, sillä kyseessä on uusi materiaali, jolla on uudenlaisia ominaisuuksia ja jolla voidaan korvata puuta ja muovia. Lisäksi mahdollisuus hyödyntää kierrätettyjä materiaaleja puumuovikomposiittien valmistuksessa on etu. Puumuovikomposiittien hyödyntämistä ovat rajoittaneet usein suhteellisen alhaiset lujuusominaisuudet ja rakenteen epätiiviys. Tiedemaailmassa on tutkittu runsaasti nanomateriaalien

vaikutusta komposiittien ominaisuuksiin yleisesti. Tutkimukset osoittavat, että komposiittien ominaisuuksia voidaan parantaa merkittävästi jo muutamain painoprosentin nanomateriaaliseostuksella.

Lappeenrannan teknillisen yliopiston Kuitukomposiittilaboratoriossa hiili- ja lasikuitujen sekä nanosaven vaikutuksesta puumuovikomposiittien ominaisuuksiin tehdyt tutkimukset osoittivat kuitujen lisäyksen parantavan selvästi komposiittien taivutuslujuutta. Nanosavi kasvatti taivutusmoduulia yli kolmanneksella, mutta vaikutti muihin mekaanisiin ominaisuuksiin heikentävästi. Tutkimuksessa havaittiin, että lisättyjen kuitujen pituus aleni merkittävästi ekstruusioprosessissa, joka vaikeuttaa lisäaineiden vaikutusten arviointia merkittävästi ilman koemateriaalien valmistusta todellisen mittakaavan laitteistolla eri raaka-aineista. Kaikki kokeessa tutkitut lisäaineet pienensivät veden absorptiota.

Selluloosapohjaiset materiaalit ovat verrattain edullisia, yleisesti saatavilla olevia, uusiutuvia, biohajoavia ja hyvät mekaaniset ominaisuudet omaavia aineita. Nämä ominaisuudet tekevät niistä houkuttelevat käytettäväksi puumuovikomposiittien lujit-

teenä. Tutkimuksessa selvitettiin käytetyn selluloosapohjaisen lisäaineen partikkelikoon vaikutusta puumuovikomposiittien ominaisuuksiin. Tarkasteltaessa puupohjaisista kuiduista valmistettujen komposiittien ominaisuuksia, huomattiin keskikokoisen partikkelin olevan parhain; partikkelikoon pienentäminen alle mesh 20-koon ei tuonut komposiitteihin lisäarvoa. Kemiallisesti valmistettu, pienimmän partikkelikoon omaava selluloosakuitu osoittautui kokeissa heikoimmaksi. Yhdistettäessä mikrofibrilloitu selluloosa ja keskikokoinen puujauho, havaittiin merkittävä parannus puumuovikomposiittien ominaisuuksiin ja tätä kautta niiden käytettävyyteen. Vastaavan kaltainen tutkimus tehtiin sivuekstruusiolla valmistetuille komposiiteille, joiden pintakerrokseen käytettiin kahta erikoista puukuitua ja lisäksi pintakerroksen materiaaliin seostettiin mikrofibrilloitua selluloosaa. Saadut tulokset olivat edellisestä, yksikerrokselliselle puumuovikomposiitille tehdystä kokeesta poikkeavia. Tällöin pienempi puujauhon koko oli edullisin lujuuden kannalta. Mikrofibrilloidun selluloosan vaikutus komposiittien ominaisuuksiin oli myös verrattain pieni ja vaikutusta iskulujuuteen ja veden absorptioon ei havaittu, mutta paksuusturpoama kasvoi hieman.

Viiden erilaisen hiilipohjaisen lisäaineen vaikutusta sivuekstruusiolla valmistettujen puumuovikomposiittien ominaisuuksiin tutkittiin myös. Lujuusominaisuuksien kannalta nanomittakaavan lisäaineet, hiilimusta ja hiilinanoputket, olivat kokonaisuutena parhaimmat. Molempien vaikutus vetomoduuliin oli kuitenkin lievästi alentava. Hiilikuidun lisäys heikensi lähes kaikkia tutkittuja lujuusominaisuuksia ja iskulujuus parani hiilikuidun lisäyksen myötä. Myös kosteusominaisuuksien kannalta nanokokoiset hiilimateriaalit toivat huomattavaa parannusta komposiittien ominaisuuksiin, sekä veden absorptioon että paksuusturpoamaan. Tehty vertailututkimus osoittaa, että nanokokoiset hiilimateriaalit, hiilimusta ja hiilinanoputket, ovat tehokkaampia puumuovikomposiittien ominaisuuksien parantamisessa kuin mikrokokoiset hiilipohjaiset lisäaineet.

Komposiitit, jotka koostuvat puusta ja muovista ovat hyvin palavia materiaaleja ja tämä ominaisuus voi rajoittaa niiden hyödyntämistä eri käyttökohteissa. Tutkittaessa palonsuoja-aineiden vaikutusta sivuekstruusiolla valmistettujen puumuovikomposiittien ominaisuuksiin havaittiin, että palo-ominaisuuksien lisäksi aineet

vaikuttavat merkittävästi myös komposiittien mekaanisiin ominaisuuksiin ja kosteudenkestoon. Tutkituista lisäaineista kaksi oli nanometristä, grafiitti ja titaanidioksidi. Kokeet osoittivat, että kaikki käytetyt lisäaineet parantavat komposiittien palo-ominaisuuksia, grafiitti kaikkein eniten FIGRA -indeksin perusteella. Myös kaikki lisätyt palosuoja-aineet paransivat komposiittien vetolujuutta, lisäksi grafiitti paransi myös vetomo-
duulia. Komposiittien iskulujuus parani selvästi melamiinin ja grafiitin seostuksella, muiden lisäaineiden vaikutus oli vähäinen. Tutkitut palosuoja-aineet paransivat puumuovikomposiittien kosteudenkestoa lu-
kuun ottamatta sinkkiboraattia, joka lisäsi veden absorptiota merkittävästi vaikuttamatta kuitenkaan paksuusturpoamaan huomattavasti. Kaiken kaikkiaan nanometrinen grafiitti paransi kaikkia komposiitin tutkittuja ominaisuuksia eniten ja pääsääntöisesti muitakin palosuoja-aineita voidaan lisätä puumuovikomposiitteihin parantamaan niiden palonkestoa ja lisäksi myös muut käytön kannalta oleelliset ominaisuudet pääsääntöisesti parantuivat.

Myös pelkästään hiilipohjaisten täyteaineiden vaikutusta sivuekstruusiolla

valmistettujen puumuovikomposiittien palo-ominaisuuksiin tutkittiin. Koetta varten saostettiin viittä erilaista hiilimateriaalia komposiitin pintakerrokseen ja materiaalit testattiin kartiokalorimetrillä. Tulokset osoittavat, että jo 3 % seostusmäärällä puumuovikomposiittien palonkesto-ominaisuudet parantuvat selvästi. Etenkin hiilinanoputket muuttivat selvästi komposiitin palokäyttäytymistä eliminoimalla materiaalille tyypillisen toisen lämmöntuottohuipun kokonaan. Kaikki tutkitut hiilipohjaiset lisäaineet toimivat palosuoja-aineina parantaen materiaalin SBI-paloluokitusta yhdellä luokalla.

Kun tavanomaisten, yleisesti käytössä olevien materiaalien partikkeli-kokoa pienennetään nanomittakaavaan, voivat aineen ominaisuudet muuttua dramaattisesti. On mahdollista luoda aineita, joilla on lähtömateriaalista selvästi poikkeavia, uudenlaisia ominaisuuksia. Esimerkiksi luonnolliset materiaalit, kuten hiili, saavat nanomittakaavaisena aivan uusia ominaisuuksia, kuten kestävyysominaisuuksia, sähkönjohtavuutta, kemiallista reaktiivisuutta ja muita ominaisuuksia, jotka puuttuvat samoilta materiaaleilta mikro- tai makromittakaavassa. Partikkelien lisääntynyt ominaispinta-ala voi myös

tehostaa aineiden tunnettuja vaikutuksia monikymmenkertaiseksi, jolloin muutaman prosentin nanomateriaalin saostuksella voidaan saavuttaa sama vaikutus kuin saman materiaalin kymmenien prosenttien lisäyksellä. On kuitenkin muistettava, että nanomateriaalien uudet ominaisuudet voivat myös aiheuttaa riskejä terveydelle ja ympäristölle – tästäkin syystä nanomateriaalien ja niiden sovellusten tutkimus on tärkeää. Nanomateriaaleja hyödynnetään jo erilaisissa kaupallisissa sovelluksissa esimerkiksi biolääketieteessä, kosmetiikassa, elektroniikassa sekä katalyyttinä ja materiaalisovelluksissa.

NANOKOMPO –hankkeen puitteissa tehty tutkimustyö osoittaa selvästi nanomateriaalien hyödyntämispotentialin myös puumuovikomposiiteissa. Tutkituilla nanomittakaavan lisäaineilla voidaan parantaa komposiittien ominaisuuksia laajalla saralla, lujuusominaisuuksista kosteudenkestoon ja palo-ominaisuuksiin. Merkittävää on myös se, että yhdellä nanomateriaalilla (esim. hiilinanoputket) voidaan jo 3 % seostuksella parantaa käytännössä kaikkia tutkittuja puumuovikomposiittien ominaisuuksia merkittävästi.



Open your mind. LUT.

Lappeenranta University of Technology

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Kuitukomposiittilaboratorio
PL 20
53851 Lappeenranta

www.lut.fi

sähköposti: etunimi.sukunimi@lut.fi

www.greencampus.fi



Lappeenranta University of Technology (LUT)