

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Ultrakevyet häivemateriaalit luonnon raaka-aineista (Biohäive)

Sami Franssila, Aalto-yliopisto, PL 13500 Micronova, 00076 Aalto
Päivi Laaksonen, HAMK
Monika Österberg, Aalto
Karim Bassily, Aalto
Tia Lohtander, Aalto
Reima Herrala, Aalto
Nina Forsman, Aalto
Juha Jordan, HAMK

Tiivistelmä

Tässä hankkeessa tutkittiin selluloosapohjaisten materiaalien, ja niistä valmistettujen vaahtojen soveltuvuutta maastouttamiseen ja häiveen toteuttamiseen. Nanokuituinen selluloosa on materiaaliominaisuuksiltaan mielenkiintoista, sillä se on kevyttä ja lujaa, sen luontainen mitta-kaava ~10 µm vuorovaikuttaa infrapunaa kanssa, ja sillä on luonnonmateriaalin spektraaliset ominaisuudet. Vaahtojen mekaaninen stabiilius ja lämmöneristävyys ovat riittävän hyvää mo-niin sovelluksiin, mutta edes luonnonaineilla, kuten ligniinillä ja levillä värjätyt vaahdot eivät pysty täysin toistamaan puiden lehvästön ja kaarnan spektrisignaalia.

1. Johdanto

Maastouttamisen ja häiveen käsitettä pitää tarkastella moniulotteisesti: aallonpituuden, rakentamisnopeuden, massan/kuljetustarpeen, kestävyys ja hinnan funktiona. Savu on helppo toteuttaa nopeasti, mutta sen kesto on hyvin rajallinen; naamioverkko vaatii kymmeniä kiloja ja ryhmän miehiä; luonnonpuiden käyttö on hyperspektrimielessä edul-lista mutta rauhan aikana hankalaa, ja häivemaalaus on varikko-operaatio.

BioHäive –hankkeessa tutkimus perustuu lähtökohtaisesti materiaaleihin, joita on saata-villa suuria määriä jo tutkimusvaiheessa, ja kehitettävät ratkaisut ovat skaalattavissa te-olliseen mittakaavaan tunnetuilla menetelmillä.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkittavat materiaalit ovat huokoisia vaahtoja, jotka voidaan valmistaa vaahdottamalla tai kehräämällä nanohuokoisesta puusta ja pinta-aktiivisista biomolekyyleistä. Selluloosa-kuidut tuovat komposiitteihin mekaanista lujuutta, mutta toimivat myös valoa heijastavi-na pintoina. Pinta-aktiiviset eli rajapinnoille hakeutuvat biomolekyylit vaikuttavat vaah-tomaisten rakenteiden huokoisuuteen ja huokosten kokoon. Myös nanosellun värjäämi-nen näkyvän valon alueen tähyttämisen estämiseksi voidaan tehdä biopohjaisilla aineilla, kuten levällä (Spirulina tai Chlorella) tai klorofyllillä.

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

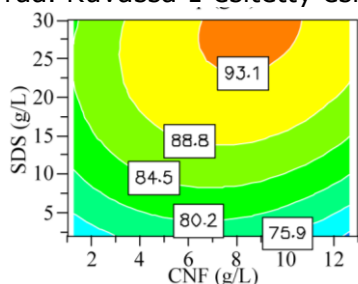
Tutkimuksen keskeisimmät hypoteesit ovat:

- 1) Nanosellumateriaaleista saadaan aikaan ultrakeveitä vaahtoja, joilla on erinomaiset lämmöneristysominaisuudet
- 2) Ultraeristeiden optisia ominaisuuksia voidaan muokata heijastavilla ja värillisillä biomolekyyleillä
- 3) Vaahto voidaan stabiloida kestämään tunteja

3. Aineisto ja menetelmät

Vaahdot muodostuvat nesteestä ja kaasukuplista. Jos vaahtoon lisätään pinta-aktiivista ainetta, saadaan kaasukuplien ympärille muodostumaan kalvo, joka stabiloi kuplat ja tekee vaahdosta pitkäikäisen. Vaahtojen kuiva-aineena käytettiin koivun selluloosaa (UPM Na+, 15,2 w-% kuiva-ainepitoisuus), nanoselluloosaa (CNF, 2,8 w-% kuiva-ainepitoisuus), kraft-ligniiniä (UPM BioPiva 100 kraft ligniini jauhe) ja mikrolevää (*Chlorella Vulgaris*). Surfaktanteina käytettiin Tween 80 (Polysorbaatti 80, Sigma Aldrich) ja SDS (Sodium dodecyl sulfate, Sigma Aldrich). Nestefaasina toimi DI- ja hanavesi. Homogenisaattoria (IKA T18 basic Ultra-Turrax) ja sauvasekoitinta (Electrolux ESTM3200, 600 W, 16500 rpm) käytettiin vaahdottamiseen laboratoriomittakaavassa (näytetilavuudet litra-luokassa).

Vaahtojen ominaisuuksien optimointiin käytettiin kokeellista suunnittelua ja vastepinta-menetelmää, jossa parametriavaruudesta valitaan joukko parametriyhdistelmiä niin, että ne edustavat tasapuolisesti faktorien eri asetusrvoja (-1, 0, +1; jotka vastaavat kunkin faktorin kolmea valittua asetusrvoa) jolloin tarvittavien ajojen määrää saadaan vähennettyä merkittävästi. Kokeellinen suunnitteluun ja vastepintojen luomiseen käytettiin Modde-ohjelmistoa (Modde 8.0, Umetrics). Vaahdotuskokeessa muuttujina olivat selluloosan, surfaktantin ja ligniinin/mikrolevän pitoisuudet. Vasteina kokeissa käytettiin muodostunutta vaahdon määrää ja vaahtofaasista erottuneen nesteen (valuman) määrää. Kuvassa 1 esitetty esimerkki vastepinnasta vaahdolle, jossa SDS, CNF ja ligniiniä.



Kuva 1. Esimerkki vastepinnasta. Lukuarvot kertovat ennusteen paljonko vaahtoa syntyy eri SDS ja CNF konsentraatioyhdistelmillä.

Menetelmän haittapuolena on se, ettei optimiyhdistelmä useinkaan kuulu ajettuihin yhdistelmiin: y.o. tapauksessa meillä on 27 yhdistelmää, mutta vain 17 ajoa, joten optimin osuminen ajoihin on 63%. Toisaalta matriisi voi vihjata optimin sijaitsevan valitun parametriavaruuden ulkopuolellakin. Molemmassa tapauksissa optimiyhdistelmää kokeillaan joka tapauksessa useilla toistoajoilla matriisin tulosten tulokinnan jälkeen.

Kuplien kokoa ja muotoa analysoitiin optisella mikroskoopilla (DM750, Leica) 10X suurennoksella. Vaahtojen reologiset ominaisuudet ja viskositeetti määritettiin kuudesta näytteestä, joiden komponenttien konsentraatiot oli valittu siten, että ne tuottivat vastepintamenetelmän mukaan maksimimäärän vaahtoa, paitsi mikrolevävaahdot, missä opti-

oitiin sekä maksimaalisen vaahtovolyyymiin että minimaaliseen valumaan. Mittaus suoritettiin MCR 302 reometrillä (Anton Paar) käyttämällä parallel-plate geometriaa (halkaisija 25 mm). Mittaus suoritettiin leikkausnopeuksilla 0.001-1000 s⁻¹.

Vaahtojen lämmöneristävyyttä karakterisoitiin kahdella eri menetelmällä. Ensimmäisellä menetelmällä mitattiin lämmöneristävyyttä vaahtojen pinnalta. Vaahdot laitettiin lämpölevylle (IKA C-MAG HS10 digital), jonka päällä asetettiin kuparilevy (155 mm x 155 mm x 1 mm) tasaamaan lämpötilaa. Vaahtojen pidikkeenä toimivat PEX (ristisilloitettu polyeteeni) sylinterit (halkaisija 5,9 cm, korkeudet 1, 2 ja 4 cm). Ellei erikseen mainita, näytteille mitattiin samanaikaisesti korkeudet 1, 2 ja 4 cm. Lämpökamerana käytettiin FLIR ONE PRO (FLIR One Pro for Android, resoluutio 160*120 pixeliä, lämpöherkkyys 150 mK MRDT, dynaaminen lämpötilaväli -20 °C - 400 °C ja tarkkuus ±3 °C). Vertailumateriaaleina käytettiin styroksia ja lasiviljaa. Toisella menetelmällä mitattiin vaahtojen lämmönjohtavuutta 2 cm syvyydessä vaahdon pinnasta CTherm TCi laitteella. Laite kalibroitiin DI-vedellä, LAF 6720 vaahdolla, ilmalla ja pyrexillä. Koetta varten valmistettiin noin 270 mL vaahtoa, jonka annettiin tasaantua 12 minuutin ajan ennen mittausta.

Hyperspektrinen kuvantaminen suoritettiin ulkotiloissa käyttäen aurinkoa ainoana valonlähteenä. Vaahtoja ei lämmitetty. Kuvausjärjestelyt on esitetty kuvassa 7 ja 8. Kuvaus suoritettiin Specim IQ CMOS-kuva-anturilla varustetulla hyperspektrikameralla, jonka aallonpituusalue on 400–1000 nm ja spektrinen erotukyky 7 nm. Kuvan resoluutio on 512 x 512 pikseliä, joista jokaiselle mitattiin 204 spektrivyyötä.

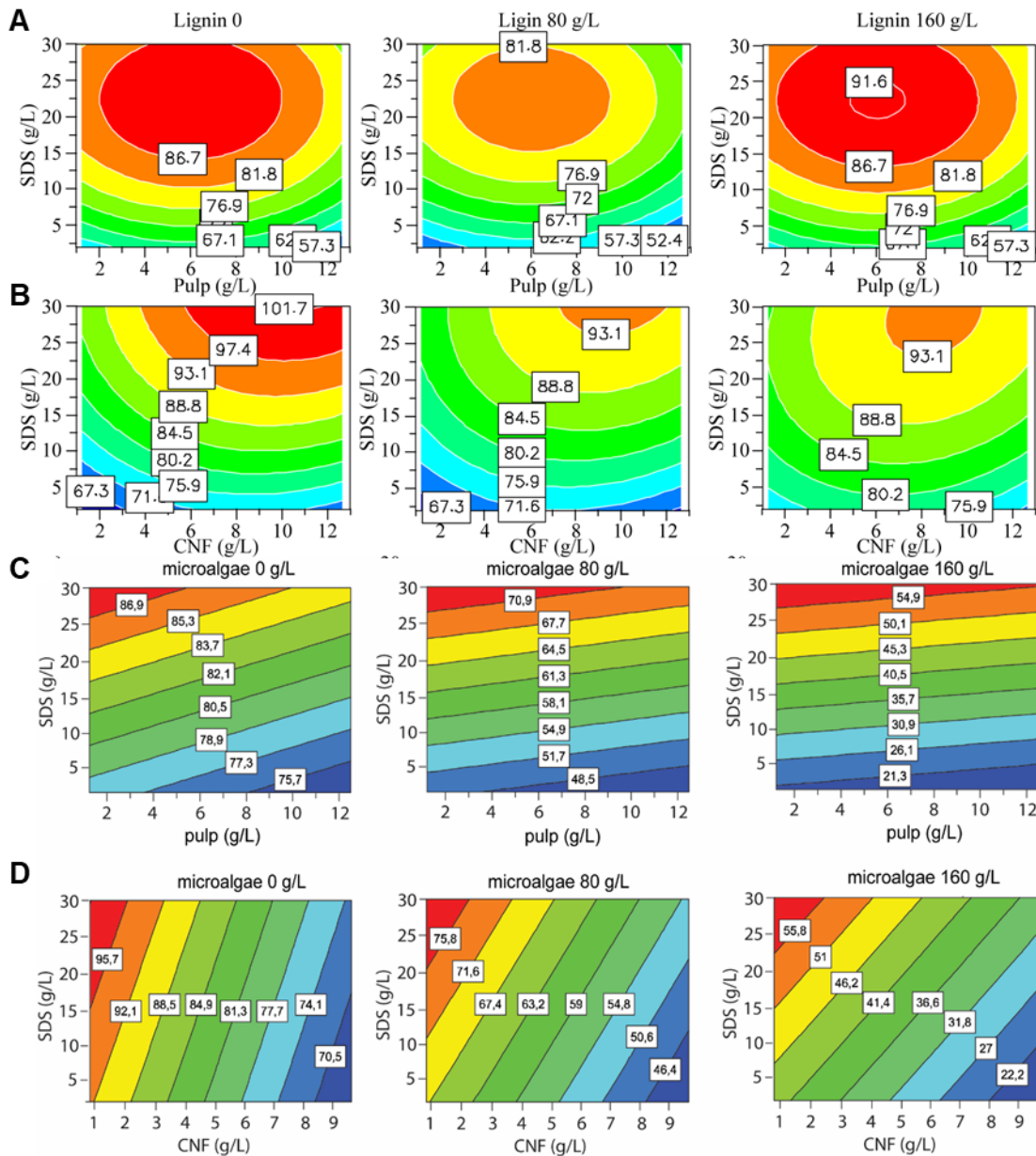
4. Tulokset ja pohdinta

Vaahdotus ja vaahdon stabiilius

Generoidun vaahdon tilavuuden havaittiin olevan verrannollinen surfaktantin konsentraatioon. Lisäksi surfaktanteista SDS (sodium dodecyl sulfate) tuotti suuremman vaahtotilavuuden kuin Tween80 (Taulukko 1). Selluloosan konsentraation ja vaahdon tilavuuden välillä oli iso ero surfaktantista riippuen. Tween80 tuotti suurimman vaahtovolyymin alhaisella selluloosakonsentraatiolla, mutta volyymi jäi aina pienemmäksi kuin SDS:llä, riippumatta siitä käytettiin valkaistua sellua tai selluloosananokuituja (CNF). Koska SDS:n vaahdotusominaisuudet olivat paremmat kuin T80:n, tästä eteenpäin vaahdot on valmistettu SDS:llä ellei toisin mainita. Selluloosapitoisuuden lisäksi tutkittiin ligniiniin ja mikrolevän vaikutusta vaahtoutumiseen. Ligniinin lisäys ei juurikaan lisännyt vaahdon tilavuutta, kun taas mikrolevän lisäys vaikutti suoraan vähentävästi vaahdon tilavuuteen (Kuva 2).

Taulukko 1. Vastepintamenetelmällä ennustetut korkeimmat vaahtomäärät SDS ja T80 surfaktanteilla.

Vaahdotyyppi	Korkein vaahtomäärä (mL)
SDS-CNF	102
T80-CNF	39
SDS-sellu	87
T80-sellu	47



Kuva 2. Vastepintamenetelmällä mallinnettu vaahdon tilavuus. Vaahdo generoitu SDS surfaktantilla ja A) kiintoaineena sellu ja ligniini B) kiintoaineena CNF ja ligniini C) sellu ja mikrolevä D) sellu ja mikrolevä.

Vastepintamenetelmän antamat ennusteet verifioitiin ajamalla mallin ennustamat optiomiolosuhteet vaahdon volyyymille (Taulukko 2). Virhe mallin antaman ja mitatun volyymin välillä on 1-2%, mitä voidaan pitää erinomaisena. Vaahdon määrän maksimoimisen lisäksi vastepintamenetelmällä tutkittiin vaahdojen ikääntymistä havainnoimalla vaahdoista poistuvan veden määrää, eli valumaa. Vaahdon valuma on termodynaaminen välttämättömyys, mutta vaahdon rakennetta ja koostumusta muokkaamalla saadaan aikaan huomattavan hitaasti valuvia vaahdoja. Vaahdojen katsottiin olevan stabiilimpia mitä pienempi valuma oli. Mallin antama minimi veden poistuma (millilitroissa) SDS surfaktantilla, eri selluloosamateriaaleilla ja ligniinillä/mikrolevällä on esitetty Taulukossa 3. Vaahdojen sta-

biiliuden havaittiin lisääntyvän, kun selluloosapitoisuus oli korkea. Lisäksi ligniini ja mikrolevä paransivat vaahdon kestävyyttä, sillä valuma pieneni, kun niiden pitoisuutta kasvatettiin 80g/L:sta 160 g/L:aan. Havainto oli päinvastainen kuin vaahtoutumiskokeissa, jossa matala selluloosa-, ligniini- ja mikroleväpitoisuus olivat suotuisia. Toisin sanoen, maksimi vaahtomäärän luominen ja parhaan stabiilisuuden (pienen valuman) saavuttaminen samanaikaisesti ei ole mahdollista ainakaan näissä kokeissa käytettyjen parametrien puitteissa.

Taulukko 2. Vastepintamenetelmän ennustama konsentraatioyhdistelmä ligniinillä ja ilman, jolla saadaan maksimimäärä vaahtoa (V_{pred}) ja toistokokeessa määritetty todellinen vaahdon määrä (V_{exp}).

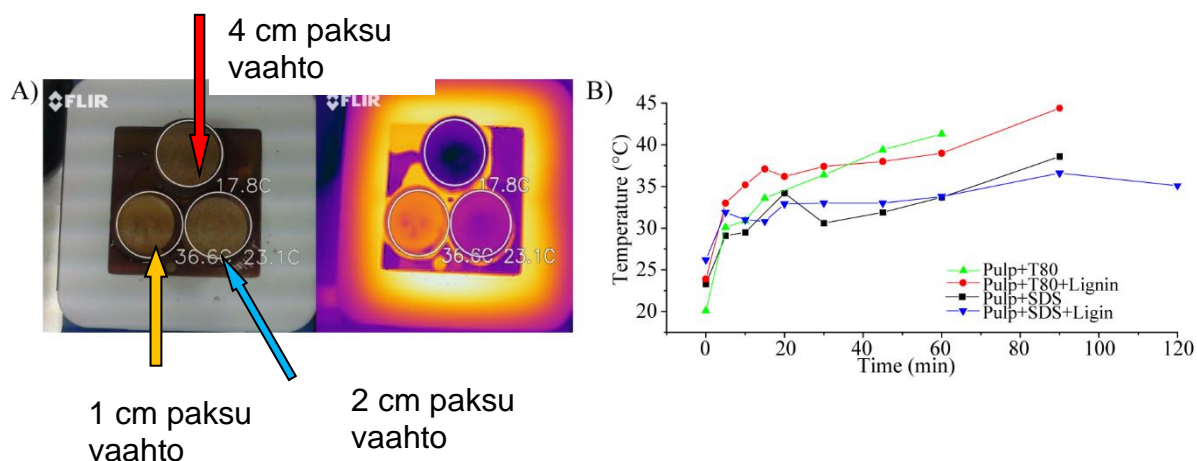
				$V_{pred.}(mL)$	$V_{exp.}(mL)$	$RD(\%)^a$
Testi 1: Sellu+SDS						
	Sellu (mg)	SDS (mg)	Ligniini (mg)			
1	6.1	22.4	160.0	91. 6	91	1.1
2	7.0	21.6	0	86. 7	80	1.2
Testi 2: Sellu+T80						
	Sellu (mg)	T80 (mg)	Ligniini (mg)			
1	1.265	29.6	160.0	45. 3	45	2.2
2	1.265	30.0	0	47. 6	47	2.1
Testi 3: CNF+SDS						
	CNF (mg)	SDS (mg)	Ligniini (mg)			
1	8.5	29.1	160.0	93. 9	91	1.1
2	10.4	30.0	0	101 .9	95	1.0
Testi 4: CNF+T80						
	CNF (mg)	T80 (mg)	Ligniini (mg)			
1	1.265	30.0	160.0	42. 9	44	2.3
2	1.265	30.0	0	42. 2	45	2.4

Taulukko 3. Vastepintamenetelmällä ennustettu pienin valuma (mL) eri vaahtotyypeille. Suluissa merkitty lukema on ligniinin tai mikrolevän konsentraatio.

Vahto	5 minuutin jälkeen	2 tunnin jälkeen
SDS-sellu	4.4	8.7
SDS-CNF	1.0	6.4
SDS-sellu-ligniini	3.5 (80g/L)–2.7 (160g/L)	8.3 (80g/L)–8.3 (160g/L)
SDS-sellu-mikrolevä	2.5 (80g/L)–0 (160g/L)	8.5 (80g/L)–5.2 (160g/L)
SDS-CNF-ligniini	1.0 (80g/L ja 160 g/L)	6.9 (80g/L)–6.4(160g/L)
SDS-CNF-mikrolevä	1.0 (80g/L)–0 (160g/L)	3.2(80g/L)–0(160g/L)

Vaahtojen termiset ominaisuudet

Vaahtojen lämmönjohtavuutta tutkittiin kahdella eri menetelmällä. Ensimmäisellä menetelmällä arvioitiin vaahtojen kykyä piilottaa alla olevan kappaleen lämpötila tutkimalla vaahtojen pinnan lämpötilaa lämpökameramittauksilla (Kuva 3). Samalla kertaa mitattiin 1, 2 ja 4 cm paksut näytteet, ja vaahdon paksuudella oli merkittävä vaikutus pinnalta mitattuun lämpötilaan. Paksuimman vahtokerroksen (4 cm) pintalämpötila oli miltei puolet alempi kuin ohuimman mitatun (1 cm) vahtokerroksen lämpötila. Paksuudessa vaahdonäytteessä lämmön tarvitsee liikkua materiaalissa pidempi matka kuin ohuessa kerroksessa, minkä takia pintalämpötila on alhaisempi. Paksuuden lisäksi vaahdon ilmamäärä vaikuttaa eristyskykyyn. Kuten jo aikaisemmin huomattiin, SDS surfaktantilla saatiin tehtyä suurempia vaahtomääriä kuin vastaavilla T80 pitoisuuksilla. Suurempi vaahtomäärä implikoi, että vaahtofaasin tiheys on pienempi ja siten ilmapitoisuus korkeampi, mikä puolestaan parantaa vaahdon lämmöneristyskykyä.



Kuva 3. A) Vasen: valokuva, oikea: lämpökuva FLIR One kameralla. Lämpölevyn lämpötila on 51°C. B) Lämpötilan nousu 1 cm paksulle vaahdolle ajan funktiona. Vaahdon paksuus ja surfaktantti vaikuttivat eniten vaahdon pintalämpötilaan.

Lämpölevykokeissa surfaktanttivalinnalla huomattiin olevan merkitystä myös vaahdon kasassa pysymiseen. Kuvassa 4 nähdään, että SDS:llä vaahdotettu ligniiniä sisältävä selluvahto pysyi paremmin kasassa kuin T80:llä vaahdotettu vastaava vahto. Näiden lisäksi vaahdon ikääntyminen ja siten rakennemuutokset vaikuttivat termisiin ominaisuuksiin. Vaahtoja, joiden paksuus oli 2 ja 4 cm verrattiin 4 cm paksuiseen polystyreenivaahtoon (PS) (Taulukko 4). Vaahdon lämmönjohtavuus nousi sen kuivuessa, mikä johtui vaahtorakenteen osittaisesta romahtamisesta ikääntymisen ja veden haihtumisen myötä. Paksuimman selluvaahdon eristyskyky oli kuitenkin samaa suuruusluokkaa kuin kuivan PS vaahdon.



Kuva 4. 160 g/L ligniiniä sisältäneet selluvaahdot 90 minuutin jälkeen 54 °C lämpölevyllä. SDS vaahto kuivui kovapintaiseksi rakenteeksi (vasen) kun Tween-vahto romahti (oikea).

Taulukko 4. Mediaani selluvaahdojen pinnasta määritetyille lämmönjohtavuudelle 3 ja 24 tunnin päästä vaahdotuksesta. Verrokkina kuiva polystyreenivahto (PS).

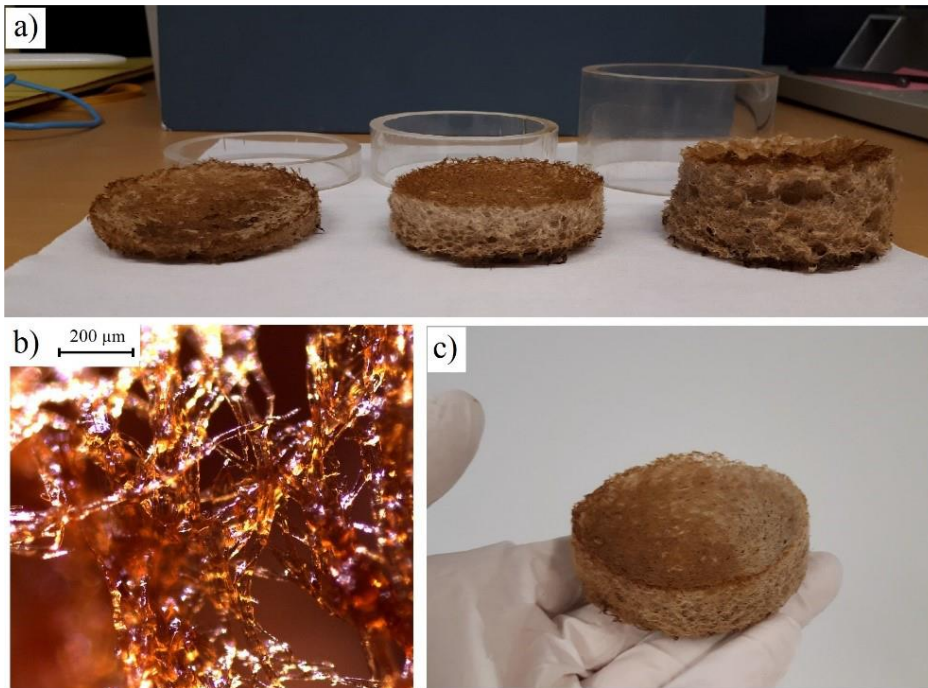
Vaahto	Lämmönjohtavuus (mW/m°C) 3 tunnin jälkeen	Lämmönjohtavuus (mW/m°C) 24 tunnin jälkeen
Sellu-SDS 2 cm	45	54
Sellu-SDS 4 cm	21	44
PS vaahto 4 cm	36	

Pintalämpötilan lisäksi määritettiin märkien vaahtojen lämmönjohtavuus 2 cm syvyydessä pinnasta (Taulukko 5). Määritys tehtiin näytteistä, joiden vaahtomäärä oli optimoitu vastepintamenetelmällä luomaan maksimi vaahtomäärä (Taulukko 2). Mikrolevälle käytettiin samaa pitoisuutta kuin ligniinille optimointikokeissa. Vaahtojen viskositeetti oli riippuvainen selluloosan kuiva-ainepitoisuudesta ja viskositeetti kasvoi selluloosapitoisuuden mukana. Vaahdoissa käytetyt selluloosapitoisuudet olivat toisistaan poikkeavia, koska vaahdot oli optimoitu tuottamaan mahdollisimman paljon vaahtoa (paitsi levävaahdot, missä sekä suuri vaahtovolyymi ja pieni valuma oli otettu huomioon optimoinnissa). Selluloosapitoisuuden ja siten viskositeetin huomattiin vaikuttavan myös lämmönjohtavuuteen. Vaahdoissa, joissa oli korkea selluloosapitoisuus ja jotka olivat stabiileja valuman suhteen (Taulukko 3), lämmönjohtavuus oli huonompi kuin matalan selluloosapitoisuuden ja -viskositeetin vaahdoissa, sillä mitä pienempi valuma oli vaahdossa, sitä paremmin se sitoi veden vaahtofaasiin. Veden lämmönjohtokykyyn ollessa korkeampi kuin ilman, lämpö liikkuu tehokkaammin materiaalissa. Siten stabiilien vaahtojen eristyskyky oli huonompi kuin suuren vaahtomäärän tuottavien vaahtojen.

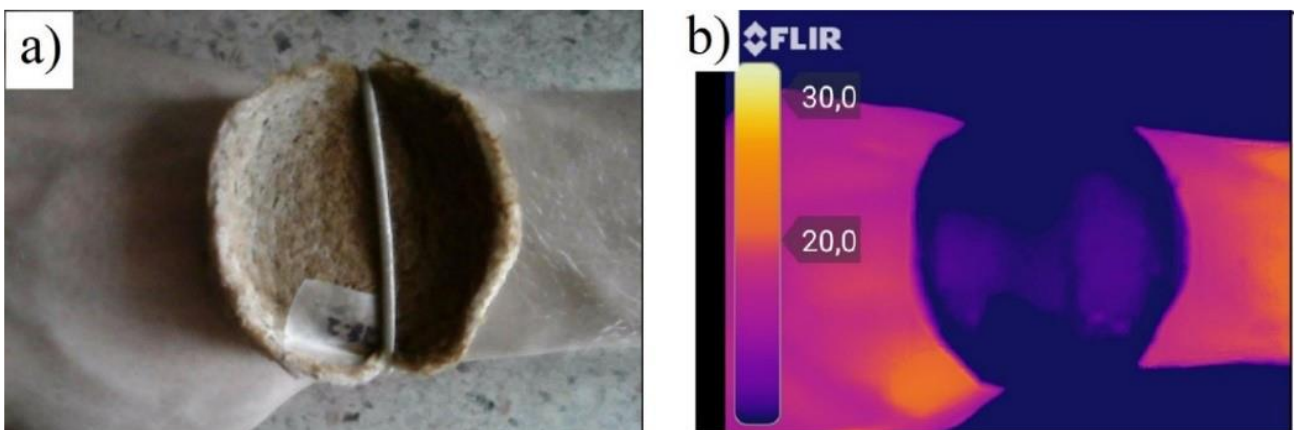
Taulukko 5. Lämmönjohtavuus ja viskositeetti märille sellu- ja CNF-vaahdoille, jotka generoitu SDS:llä. Viskositeetti määritetty leikkausnopeudella 0.1 s⁻¹.

Vaahto	Lämmönjohtavuus (mW/m°C)	Viskositeetti (Pa·s)
Sellu	52	0.99
Sellu-ligniini	104	4.94
Sellu-mikrolevä	154	10.43
CNF	247	291.58
CNF-ligniini	191	64.57
CNF-mikrolevä	181	0.99

Ligniiniä sisältävien selluvaahtojen rakennetta ja lämmöneristystä arvioitiin myös kuivana. Kuivissa vaahtoissa oli havaittavissa vaahtomainen solurakenne kuivumisen jälkeen ja kuivuneet sellukuidut muodostivat verkkomaisen rakenteen (Kuva 5). Vaikka lämmöneristysominaisuudet huonontuivat vaahton kuivumisen myötä, kuiva vaahto häivytti tehokkaasti käsivarren lämpöjäljen, kuten kuvassa 6 esitetään.



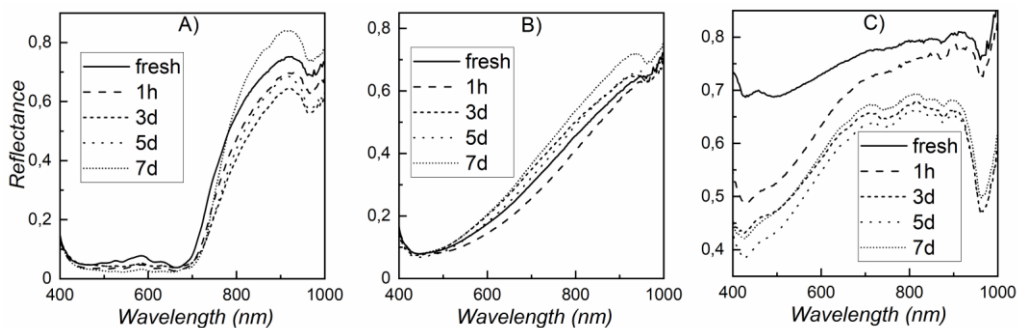
Kuva 5. Kuivattuja vaahtoja: a) 1, 2 ja 4 cm korkeat vaahtot 24 h jälkeen 51 °C lämpölevyllä. Takana näytepidikkeet. b) Optinen mikroskooppikuva kuivuneen vaahton pinnasta. c) 2 cm korkea kuivunut vaahto, jonka pinta on värjäytynyt epätasaisesti ligniinin vaikutuksesta. Vaahton koostumus: selluloosa 18 g/l, Tween80 43 g/l, ligniini 20 g/l.



Kuva 6. 2 cm paksu kuivunut selluloosavaahto peittää käsivarren lämpöjäljen. a) valokuva, b) lämpökuvaa viiden minuutin kohdalla. Tausta graniittia huoneenlämmössä.

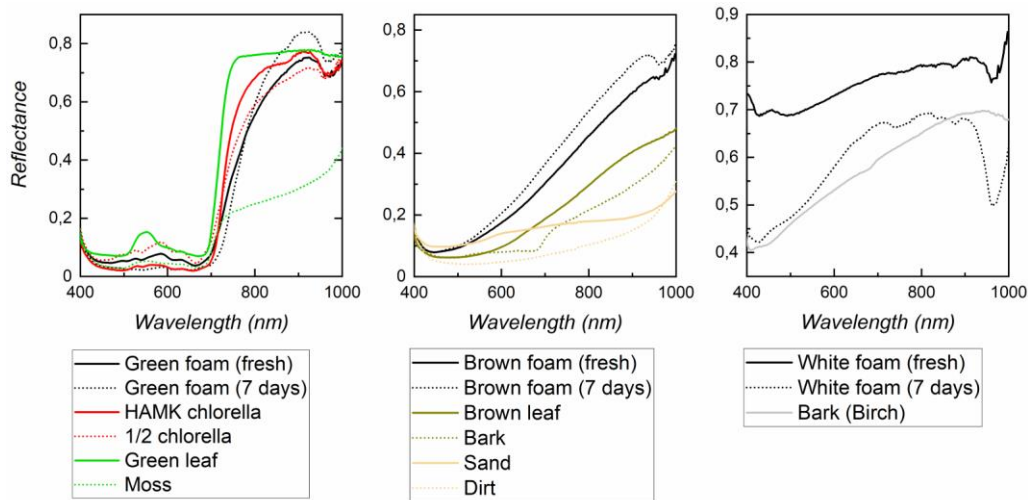
Vaahdon spektraaliset ominaisuudet

Lämmöneristävyuden lisäksi vaahdon spektraaliset ominaisuudet arvioitiin hyperspektri-kuvantamisen avulla, sillä ne ovat häiveominaisuuksien kannalta olennaiset. Kuvantaminen tehtiin vastepintamenetelmällä optimoiduista SDS:llä vaahdotetuista selluvaahdoista sekä ilman että ligniinillä tai mikrolevällä. Märkien vaahtojen spektrit mitattiin tuoreeltaan ja 7 päivän ajan (Kuva 7). Puhtaanvalkoisen selluvaahdon spektrin havaittiin muuttuvan eniten verrattuna ligniiniä tai mikrolevää sisältäneeseen vaahtoon. Vaahtojen rakenne romahti 7 päivän seurantajakson aikana, minkä takia lopullinen heijastusspektri viimeisen päivän kohdalla johtui vain nesteeseen jäljelle jääneestä kiintoaineesta. Ruskea ligniini ja vihreä mikrolevä heijastivat yhä 7 päivän jälkeen sisältämiensä väriaineiden johdosta, joten vaikka vaahtorakenne oli hävinnyt, joten niiden muutos oli pieni verrattuna pelkkään selluvaahtoon. Vaahdot olivat kuitenkin romahtaneet jo kolmen päivän jälkeen, ja käytännössä kuvattiin nestettä.



Kuva 7. Märkien vaahtojen spektraaliset ominaisuudet tuoreeltaan vaahdotuksen jälkeen ja 7 päivän seurausjakson aikana. A) Mikrolevää sisältävä selluvaahdo B) ligniiniä sisältävä selluvaahdo C) selluvaahdo. Kaikissa esitetyissä vaahtoissa käytettiin SDS:ää surfaktanttina.

Vaahtojen heijastusspektriä verrattiin myös metsästä kerättyihin verrokinäytteisiin (Kuva 8). Näkyvän valon aallonpituuksilla (400-800 nm) kaikilla vaahtotyypeillä oli havaittavissa samankaltaisuutta heijastusspektrin muodossa. Suurimmat eroavaisuudet verrokkeihin seuranta-ajanjakson aikana oli vihreässä mikrolevää sisältävässä vaahtossa, mikä johtui siitä, että mikrolevälle vihreän värin antava klorofylli on herkästi hajoava väripigmentti. Toisaalta samankaltainen vaihtelu heijastusspektrissä tapahtuu myös luonnon verrokkimateriaaleille niiden hajotessa. Ruskean ligniiniä sisältävän vaahtojen heijastusspektri pysyi suhteellisen muuttumattomana koko seurantajakson ajan, sillä ligniini on stabiilimpi kuin klorofylli. Nykyiset hyperspektridetektorit skannaavat näkyvän valon aallonpituuksien lisäksi lähi-infrapun aallonpituuksia (800-1000 nm), joten myös kyseisen alueen häivesuoja tutkittiin vaahtoista. Kaikilla tutkituilla selluvaahdoilla erottui selkeä pudotus heijastusspektrissä aallonpituudella 950 nm, mitä ei kuitenkaan havaittu verrokinäytteissä. Pudotus vaahtojen heijastusspektrissä katsottiin johtuvan niiden korkeammasta vesipitoisuudesta verrattuna verrokinäytteisiin.



Kuva 8. Märkien tuoreiden ja 7 päivää vanhojen vaahtojen spektraaliset ominaisuudet verrattuna verrokkinäytteisiin. A) Mikrolevyä sisältävä selluvaaho B) ligniiniä sisältävä selluvaaho C) selluvaaho. Kaikissa esitetyissä vaahtoissa käytettiin SDS:ää surfaktanttina.

5. Loppupäätelmät

Tutkimuksen tavoitteena oli luoda lämmöneristäviä ultrakeveitä lignoselluloosapohjaisia vaahtoja, jotka kestävät stabiileina tunteja ja joiden optiset ominaisuudet vastaavat metsäympäristöä.

Olellista oli myös tuottaa mahdollisimman paljon vaahtoa, ja optimipitoisuudet vaahtojen komponenteille määritettiin vastepintamenetelmää hyödyntäen. Vastepintamenetelmää käytettiin myös vaahtojen stabiilisuuden arvioinnissa. Tulosten mukaan korkea surfaktanttipitoisuus yhdistettynä matalaan kiintoainepitoisuuteen (selluloosa, ligniini, mikrolevä) tuotti maksimimäärän vaahtoa, kun taas korkea kiintoainepitoisuus oli avain hyvään stabiilisuuteen.

Vaahtojen lämmöneristyskykyä tutkittiin sekä vaahtojen pinnalta että vaahtorakenteen sisältä. Pinnalta havaitun lämmönjohtavuuden kannalta oleellisinta oli vaahtopatjan korkeus. Vaahtorakenteen sisältä mitattuun lämmönjohtavuuteen vaikutti vaahton viskositeetti sekä vesipitoisuus. Kaikista stabiilimpien vaahtojen havaittiin omaavan huonoimmat lämmöneristysominaisuudet, sillä ne sitoivat tehokkaasti vesifraktion vaahtofaasiinsa. Huolimatta heikommasta lämmöneristyksestä, stabiili ligniiniä sisältävä selluvaaho kykeni kuivana häivyttämään käsivarren lämpöjäljen taustaan.

Märkien vaahtojen hyperspektraaliset ominaisuudet osoittivat, että näkyvän valon alueella niiden heijastusominaisuudet ovat samankaltaisia kuin vastaavan värisillä luonnon verrokkimateriaaleilla. Vaahtojen vesipitoisuus oli kuitenkin korkeampi kuin verrokkien, mikä erotti ne verrokkimateriaaleista lähi-infrapuna aallonpituuksilla. On mahdollista, että kuivaamalla vaahtoa ero lähi-infrapun alueen sormenjäljessä kaventuisi ja vaahtojen spektraaliset ominaisuudet olisivat lähempänä verrokkeja molemmilla aallonpituusalueilla.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Diplomityö. Karim Bassily, 2020. Foam Stabilization Using Wood Polymers.
https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/46036/master_Bassily_Karim_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Diplomityö. Reima Herrala, 2020. Selluloosapohjaisten vaahtojen lämmöneristävyys ja spektraaliset ominaisuudet.
https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/97510/master_Herrala_Reima_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Tieteellinen julkaisu. Tia Lohtander, Reima Herrala, Päivi Laaksonen, Sami Franssila, and Monika Österberg, 2021. Lightweight lignocellulosic foams for thermal insulation. Vertaisarvioitavana *Cellulose*-lehdessä.

Tieteellinen julkaisu. Nina Forsman, Tia Lohtander, Juha Jordan, Huyen Ngoc, Ari Sepäälä, Päivi Laaksonen, Sami Franssila, Monika Österberg, 2021. Microalgae *Chlorella vulgaris* and kraft lignin stabilized cellulosic wet foams for camouflage. Julkaisematon käsikirjoitus.