



PAHVISTEN HUONEKALUJEN PALOTURVALLISUUDEN JA KOSTEUDEN- SIETOKYVYN LISÄÄMINEN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Kemiantekniikan kandidaatintyö

2022

Mona Grann

Tarkastajat: Yliopisto-opettaja Maaret Paakkunainen

TkT Tero Rantala

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Teknis-luonnontieteellinen

Kemiantekniikka

Mona Grann

Pahvisten huonekalujen paloturvallisuuden ja kosteudensietokyvyn lisääminen

Kemiantekniikan kandidaatintyö

39 sivua, 10 kuvaa, 3 taulukkoa

Tarkastajat: Yliopisto-opettaja Maaret Paakkunainen ja TkT Tero Rantala

Avainsanat: aaltopahvi, syttyvyys, vettyminen, tilapäismajoitus, Rehome

Humanitaariset kriisit kuten luonnonkatastrofit sekä konfliktit luovat tarpeen nopealle kalustamiselle. Suomalainen Rehome- konsepti tarjoaa ongelmaan ratkaisun aaltopahvista valmistetuilla huonekaluilla. Pääasiallisena käyttökohteena aaltopahvia käytetään pakkausmateriaalina keveytensä, lujuutensa sekä edullisen hintansa vuoksi. Aaltopahvi onkin eniten kierrätetty pakkausmateriaali maailmassa. Korkean maailmanlaajuisen kierrätysasteen ansiosta aaltopahvi on kilpailukykyinen materiaalivaihtoehto myös kalustamisen tarpeisiin.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia aaltopahvin paloturvallisuutta ja kosteudensietokykyä lisääviä keinoja. Aaltopahvi koostuu pääosin selluloosasta, ligniinistä ja hemiselluloosasta. Raaka-aineidensa vuoksi aaltopahvi on hydrofiilinen sekä helposti syttyvä materiaali. Jotta aaltopahvin käyttö huonekaluissa yleistyisi, on kehitettävä syttyvyyttä ja vettymistä hillitseviä keinoja. Ominaisuuksiin paneutumalla varmistettaisiin lisäksi materiaalin turvallinen ja tehokas käyttö kalustamisessa.

Tämän kirjallisuuskatsauksen tuloksena huomattiin, että aaltopahvin kyseisten ominaisuuksien parantamiseen ei ole tällä hetkellä yksiselitteistä, selkeää ja vakiintunutta menetelmää. Aaltopahvin syttyvyyttä ja vettymiskäyttäytymistä voidaan kuitenkin muokata käyttökohdeesta riippuen erilaisilla palonestoaineilla, pinnoitteilla, liimoilla tai lisäaineilla. Nanokomposiittipinnoitteet ja synergiset palonestoaineet ovat laajaa huomiota herättäneitä potentiaalisia vaihtoehtoja pahvisille huonekaluille. Puolestaan aaltopahvin vettymiskäyttäytymiseen voidaan vaikuttaa esimerkiksi märkälujaliimoilla tai hydrofobiliimoilla. Tämän tutkimuksen tuloksena havaittiin, että aaltopahvin paloturvallisuuden ja kosteudensietokyvyn edistäminen vaatii lisää tutkimusta, jotta löydetään ympäristöystävällinen ja teknistaloudellisesti järkevä vaihtoehto.

LYHENNELUETTELO

APP	Polyammoniumfosfaatti
AVG	Keskimääräinen massan lisäys
BA	Boorihappo
BFR	Bromattu palonestoaine
BX	Booraksi
CCT	Kartiokalorimetrinen analyysi
CFR	Kloorattu palonestoaine
DAP	Diammoniumfosfaatti
DSC	Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria
DTA	Differentiaalinen terminen analyysi
LOI	Rajahappi-indeksi
MAP	Monoammoniumfosfaatti
MFC	Nanoselluloosa
MMT	Montmorilloniitti
NFR	Tyypipohjainen palonestoaine
NSSC	Neutraalisulfiittimassa
PFR	Fosfori palonestoaine
PHB	Polyhydroksibutyaatti
PLA	Polylaktidi
PVA	Polyvinyylialkoholi
SEM	Pyyhkäisyelektronimikroskooppi
TGA	Termogravimetrinen analyysi
VBT	Vertikaalinen polttoanalyysi
WVP	Vesihöyryn läpäisevyys

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	5
2	Taustaa.....	6
2.1	Aaltopahvin tuotekuvaus.....	6
2.2	Aaltopahvin valmistusprosessi.....	7
2.2.1	Aallotuskartonki.....	9
2.2.2	Pintakartonki.....	9
2.3	Aaltopahvin kierrätettävyys ja ekologisuus	10
2.4	Aaltopahvin hyödyt huonekaluissa	12
2.5	Käyttö huonekaluissa	12
2.6	Lain asettamat vaatimukset huonekalujen turvallisuudelle.....	14
3	Aaltopahvin syttyvyys ja vettyminen	15
3.1	Palamisen ja syttyvyyden periaatteet	15
3.1.1	Aaltopahvin syttyvyys	15
3.1.2	Palonestoaineet	17
3.2	Aaltopahvin vettyminen ja kosteudensietokyky	18
3.2.1	Kartongin vettymiseen vaikuttavat tekijät	19
3.2.2	Vettymisen vaikutukset kartongin ja aaltopahvin rakenteeseen	20
4	Paloturvallisuuden ja kosteudensietokyvyn lisääminen	21
4.1	Palonestokykyä edistävät yhdisteet.....	21
4.1.1	Fosforin ja typen synergiset palonestoaineet.....	24
4.1.2	Piipohjaiset palonestoaineet.....	25
4.1.3	Nanokomposiittien pintasuojaus palonestossa.....	25
4.1.4	Muita potentiaalisia palonestoaineita.....	27
4.2	Kosteudensietokykyä edistävät yhdisteet.....	28
4.2.1	Polylaktidi-pinnoite	30
4.2.3	Polyhydroksibutyraatti.....	31
5	Yhteenveto ja johtopäätökset	32
	Lähteet	34

1 Johdanto

Luonnonkatastrofien määrä on yli kymmenkertaistunut 1960-luvun jälkeen, minkä lisäksi konfliktit kuten geopoliittiset kriisit ovat arkipäivää useissa valtioissa (IEP, 2020). Maailmanlaajuisesti miljoonia taloja vaurioituu ja tuhoutuu vuosittain luonnonkatastrofien seurauksena, mikä pakottaa ihmiset jättämään kotinsa sekä omaisuutensa, ja etsimään turvaa muualta. Punaisen Ristin (2022) mukaan väkivalta tai sen uhka ovat kuitenkin yleisin syy pakolaisuuteen, joka on tällä hetkellä hyvin ajankohtaista myös Euroopassa. Onkin siis selvää, että monipuolisille, toimiville sekä nopeille hätämajoitusratkaisuille on suuri tarve maailmanlaajuisesti. Humanitaaristen kriisien aiheuttamiin tarpeisiin on kehitetty pahvisia huonekaluja valmistava Suomalainen Rehome-konsepti, joka pitää sisällään hätä- ja väliaikaismajoitukseen tarkoitettuja ratkaisuja (Rehome, 2021).

Pahviset huonekalut tuovat nopeita ympäristöystävällisiä ratkaisuja muuttuviin maailman tilanteisiin ja tarpeisiin. Aaltopahvin lukuisten potentiaalisten ominaisuuksien, kuten keveyden ja lujuuden vuoksi, materiaali soveltuu käytettäväksi huonekaluissa sekä esimerkiksi hätämajoitusratkaisuissa (Suomen Aaltopahviyhdistys ry, 2022). Materiaalissa on myös heikkoutensa: herkkä syttyvyys sekä vettyminen. Näiden ominaisuuksien vuoksi ympäristö, ilmasto sekä sääolosuhteet aiheuttavat aaltopahvisille rakenteille haasteita halutussa soveltuvuuskohteessa, ja voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa seuraavan katastrofin, kuten tulipalon. Pahvisten huonekalujen paloturvallisuuden sekä kosteudensietokyvyn lisäämiseen ja parantamiseen liittyy vielä joukko avoimia kysymyksiä, joiden ratkaisemiseen tämä kandidaatintyö etsii vastauksia.

Kandidaatintyössä tutkitaan vaihtoehtoja jo olemassa olevien tutkimustulosten pohjalta, ja pyritään löytämään ratkaisuja huonekaluissa käytetyn pahvin hyödyn ja turvallisuuden maksimoimiseksi. Ratkaisuissa huomioidaan ympäristöystävällisyys; ei muokata materiaalin ominaisuuksia ekologisuuden kustannuksella. Lisäksi työssä tutustutaan aaltopahvin ominaisuuksiin sekä mahdollisuuksiin kalustamisen näkökulmasta, ja kartoitetaan pahvisten huonekalujen käyttömahdollisuuksia. Kandidaatintyön keskeisimmät tutkimuskysymykset ovat: Millaisilla keinoilla aaltopahvin paloturvallisuutta ja kosteudensietokykyä voidaan lisätä, ja miten paloturvallisuuden ja kosteudensietokyvyn edistäminen vaikuttavat pahvisten huonekalujen käyttömahdollisuuksiin?

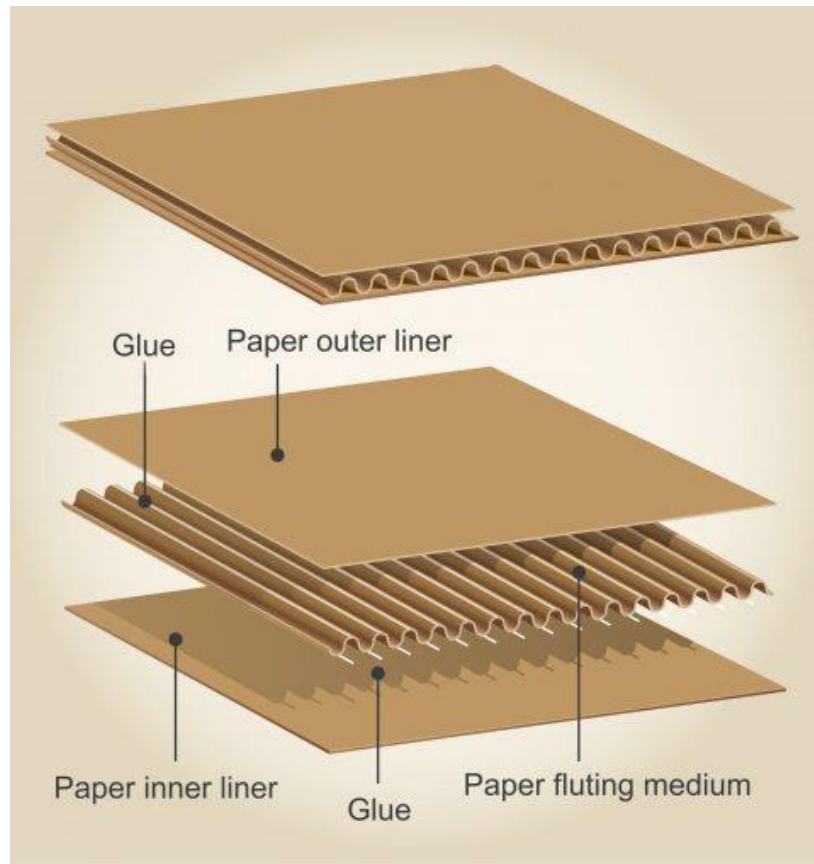
2 Taustaa

Aaltopahvin taustan kartoittamisen tarkoituksena on käsitellä aiheita, jotka vaikuttavat aaltopahvin soveltuvuuteen huonekaluissa. Luvuissa käsitellään aaltopahvin rakennetta, koostumusta sekä materiaalin valmistusprosessia. Lisäksi tutustutaan materiaalin valmistuksessa käytettäviin raaka-aineisiin, joiden avulla voidaan vaikuttaa valmiin aaltopahvin ominaisuuksiin, kuten syttyvyyteen ja kosteudensietokykyyn. Aaltopahvin rakenteen ja valmistuksen raaka-aineiden lisäksi luvuissa käsitellään aaltopahvin ekologisuutta sekä kierrätettävyyttä, joiden ansiosta aaltopahvi erottuu edukseen muista huonekaluissa käytetyistä materiaaleista. Luvun lopussa käsitellään materiaalin käyttöä kalustamisessa sekä lainsäädännön asettamia vaatimuksia huonekalujen turvallisuudelle.

2.1 Aaltopahvin tuotekuvaus

Aaltopahvin rakenne koostuu yhdestä tai useammasta suorasta pintakartonkikerroksesta (liner), joiden väliin on liimattu yksi tai useampi poimutettu ydinosa eli aallotuskartonki (fluting). Ulommaiset kerrokset vahvistavat rakenteen lujuusominaisuuksia estämällä keskiosan vääntymistä. Poimutettu ydinosa puolestaan edistää rakenteen leikkausjäykkyyttä. Aaltopahvi on ortotrooppinen materiaali. Tämä tarkoittaa sitä, että rakenteen lujuusominaisuudet riippuvat materiaaliin kohdistuvan kuormituksen suunnasta. (Aboura et al., 2004)

Aaltopahvi voi koostua yhdestä tai useammasta kerroksesta, jolloin pintakartonkikerrokset ja aallotuskartongit vuorottelevat rakenteessa (Laakso & Rintamäki, 2003). Aaltopahvin perustyyppinä ovat: yksipuolinen, kaksipuolinen yksiaaltoinen, kaksipuolinen kaksiaaltoinen sekä kaksipuolinen kolmiaaltoinen aaltopahvi. Useammasta aallotuskartongista koostuvan aaltopahvin valmistamisen tarkoituksena on lisätä rakenteen lujuutta, minkä vuoksi huonekaluissa käytetäänkin usein moniaaltoista aaltopahvia. Aaltopahvin paksuuden kasvaessa rakenteen neliömassa sekä paino suurenevät. (Suomen Aaltopahviyhdistys ry, 2022) Kuvassa 1 on havainnollistettu yksiaaltoisen aaltopahvin rakenne.



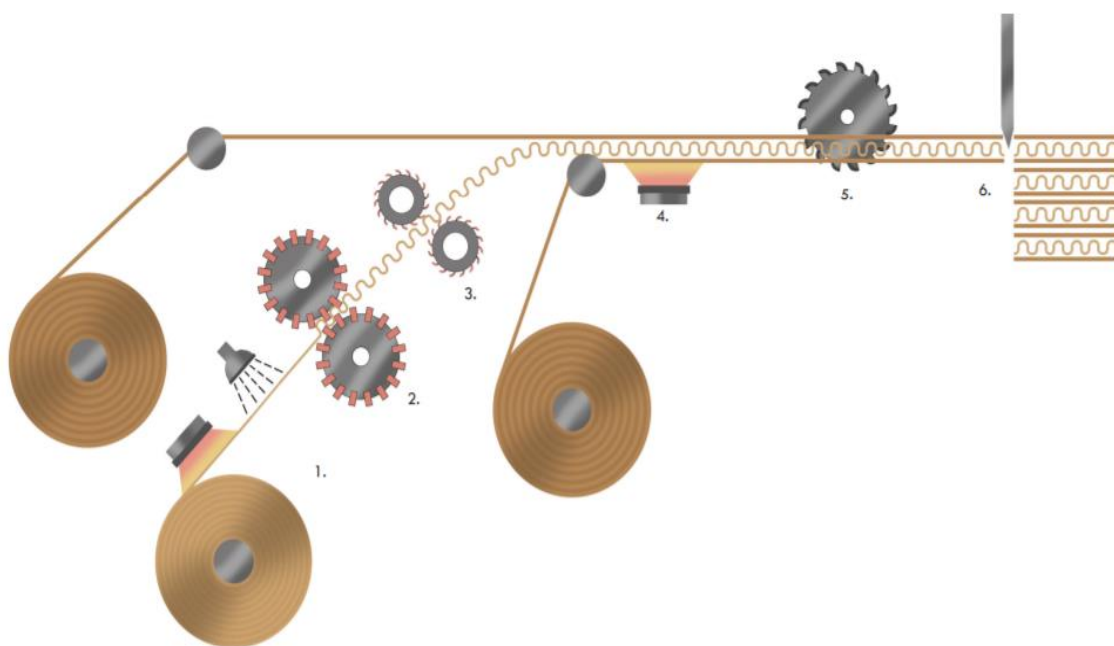
Kuva 1. Yksiaaltoisen aaltopahvin rakenne, jossa on kaksi lainerikartonkia sekä yksi aallotuskartonki (Orconind, 2020)

2.2 Aaltopahvin valmistusprosessi

Aaltopahvin valmistusprosessilla voidaan vaikuttaa valmiin materiaalin ominaisuuksiin, kuten jäykkyyteen, hydrofobisuuteen sekä syttyvyyteen. Vaikutuksia tarkastellaan myöhemmin luvussa 3. Lisäksi aallotuskartongin ja pintakartongin raaka-aineet muokkaavat valmiin tuotteen ominaisuuksia. Valmistuksessa käytetyt raaka-aineet linkittyvät materiaalin ekologisuuteen sekä hintaan. Näistä syistä on oleellista tarkastella aaltopahvin valmistusprosessia.

Aaltopahvin valmistus sisältää kaksi päävaihetta: kartongin valmistus ja pahvin aallottaminen. Aaltopahvin tärkein raaka-aine on kartonki, ja sitä valmistetaan tavallisesti mekaanisesti tai kemiallisesti. Lisäksi kartonkimassaa voidaan valmistaa puolikemiallisesti, eli mekaanisen ja kemiallisen menetelmän yhdistelmällä. Puun kuidut ovat etupäässä selluloosaa, ja kartongin valmistuksessa kuituja sitova ligniini ja hemiselluloosa erotetaan toisistaan eli kuidutetaan. (Laakso & Rintamäki, 2003)

Kemiallisessa valmistuksessa puuhakkeesta tehdään sellua keittämällä puuhaketta valkoli-
peän eli natriumhydroksidin ja natriumsulfidin seoksen kanssa korkeassa 170 °C lämpöti-
lassa (Bajpai & Bajpai, 1992). Keittämisen tuloksena suurin osa puun hemiselluloosasta sekä
ligniinistä liukenevat kemikaalien vaikutuksesta, minkä jälkeen puuhake hajoaa kuiduiksi ja
on valmis jatkokäsiteltäväksi. (Suomen Aaltopahviyhdistys ry, 2022) Mekaanisessa valmis-
tuksessa ligniini ja hemiselluloosa vastaavasti erotetaan toisistaan hiomalla ja hiertämällä.
Valmis massa sisältää kaikki puun ainesosat, minkä vuoksi se on edullisempaa kuin kemial-
lisesti valmistettu sellu. Mekaanisesti valmistettua massaa käytetään aaltopahveista lähinnä
monikerroskartonkien valmistuksessa. (Laakso & Rintamäki, 2003) Aallotuskartongin aal-
lottaminen sekä aaltopahvin kokoamisprosessi koostuvat karkeasti kuudesta eri vaiheesta,
jotka on havainnollistettu kuvassa 2. (Suomen Aaltopahviyhdistys ry, 2022)



Kuva 2. Aaltopahvin valmistusprosessi, joka sisältää kuusi päävaihetta: materiaalin esi-
lämmitys ja kostutus (1), aallonprofiilipuristus (2), pintakartonkien liimaus (3),
kuivaus (4), leikkaus ajosuunnassa (5) sekä arkeiksi (6) (Kanto, 2019)

Kartongin valmistuksen jälkeen aaltopahvin valmistusprosessi jatkuu lainereiden sekä aal-
lotuskartongin esilämmityksellä ja kostuttamisella (1). Aallotuskartonki puristetaan halut-
tuun aallonprofiiliin telojen avulla (2). Rakenteen kokoamista varten aallon harjoille lisätään
liima-ainetta, jonka jälkeen kostea kartonki kuivataan (3 ja 4). Kun liima on kuivunut pitä-
väksi, aaltopahvi leikataan ensin leveysuunnassa, ja lopuksi poikkileikkurilla arkeiksi (5 ja
6). (Suomen Aaltopahviyhdistys ry, 2022)

2.2.1 Aallotuskartonki

Aaltopahvin aallotuskartonki valmistetaan Suomessa yleisimmin puolikemiallisesta (NSSC) lehtipuusellusta sekä usein myös keräyskuiduista, ja ne kuuluvat tonninhinnaltaan halvimpiin paperilaatuihin (Seppälä, 2000). Keräyskuidulla tarkoitetaan kierrätettyä kasvikuitua, jota käytetään uudelleen raaka-aineena. Lehtipuusellua voidaan valmistaa esimerkiksi koivu-, eukalyptus- tai haapakuiduista. Puolikemiallinen aallotuskartonki säilyttää jäykkyytensä kosteissa olosuhteissa paremmin kuin keräyskuidusta valmistettu kartonki, joka johtuu puolikemiallisen massan suuremmasta suhteellisesta hemiselluloosapitoisuudesta. Raaka-aineiden lisäksi aallotuskartongin aallonharjojen korkeudella voidaan vaikuttaa aaltopahvin pak-suuteen sekä rakenteen jäykkyyteen (Laakso & Rintamäki, 2003).

2.2.2 Pintakartonki

Aaltopahvin lainerikerroksien valmistuksessa käytetään raaka-aineina kuorittua puuta, tavallisimmin kuusi- ja mäntykuituja (Yáñez et al., 2004). Pintakartonkeina aaltopahvissa käytetään kraftlaineria, testlaineria tai muita kartonkeja. Kraftlaineri koostuu tavallisesti kahdesta kerroksesta, ja vaihtamalla kerroksien massatyyppejä, saadaan kartonkiin haluttuja ominaisuuksia. (Laakso & Rintamäki, 2003)

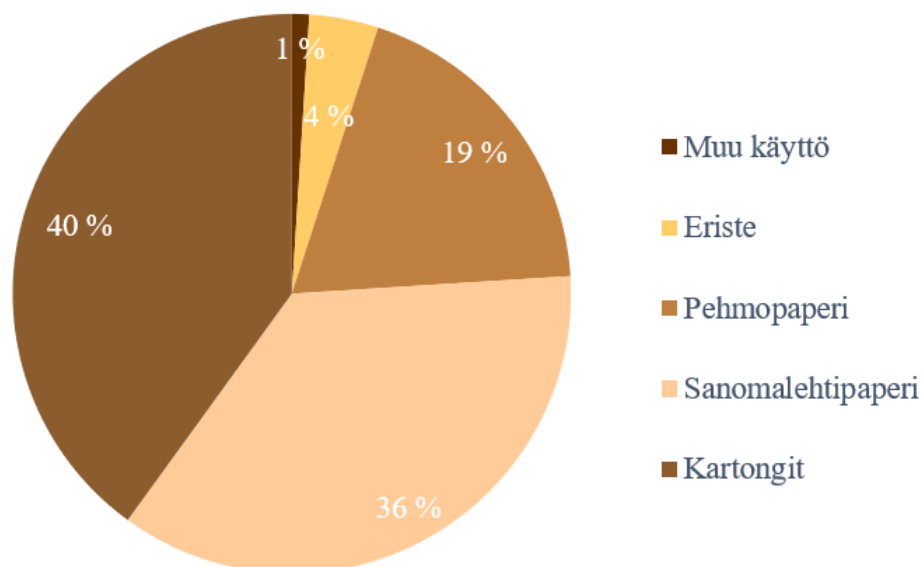
Kraftlainerin runkokerros on valmistettu pääosin ensikuidusta eli raa'asta sulfaattisellusta, mutta osa sulfaattisellusta voidaan korvata keräyspahvikuidulla. Kartongin lujuusominaisuudet riippuvat pääosin kraftlainerin runkokerroksen seossuhteesta. Pintakerros valmistetaan pidempään keitetystä sulfaattisellusta. Pintakerroksen massan pitkä keittämisaika tekee lainerin pinnasta sileän ja lujan, joka edistää materiaalin painatusominaisuuksia. (Laakso & Rintamäki, 2003)

Testlaineri on vastaavasti kraftlainerin mukainen monikerroskartonki, mutta materiaali valmistetaan kokonaan tai suurimmaksi osin keräyskuidusta. Testlainerin ajettavuus sekä painettavuus ovat lähes samaa luokkaa kraftlainerin kanssa, ja testlaineri on hinnaltaan edullisempää kuin kraftlaineri. Lujuusominaisuudet ovat testlainerissa alhaisemmat kuin kraftlainerissa. (Suomen Aaltopahviihdistys ry, 2022)

2.3 Aaltopahvin kierrätettävyys ja ekologisuus

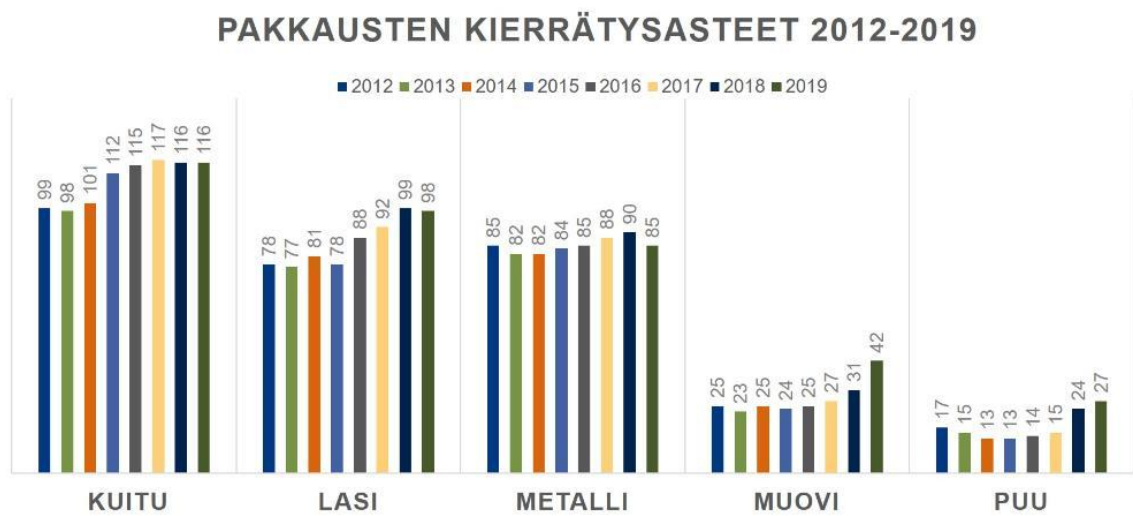
Suomen aaltopahviyhdistys ry:n (2022) mukaan aaltopahvin kierrätettävyys perustuu materiaalin lujaan kuiturakenteeseen, joka voidaan hajottaa ja koota uudelleen, korvaten ensikuidun käytön. Aaltopahveissa käytetyt liima-aineet ovat usein tärkkelyspohjaisia, ja valmistettu maissista, vehnästä tai perunasta (Talbi et al., 2009). Materiaali valmistuu siis kokonaan luonnollisista uusiutuvista luonnonvaroista, joita on runsaasti tarjolla ympäri maailmaa. Raaka-aineidensa ansiosta aaltopahvi on eniten kierrätetty pakkausmateriaali maailmassa, ja sillä on kattavat talteenottojärjestelmät sekä tehokkaasti toimiva kierrätys. (Suomen Aaltopahviyhdistys ry, 2022) Voidaankin siis sanoa, että materiaalilla on monia entuudestaan tunnettuja hyödyllisiä ominaisuuksia, mutta myös paljon potentiaalia kasvaa muille teollisuuden aloille, kuten huonekaluteollisuuteen.

Euroopassa keräyspahvia käytetään pääosin aaltopahvin valmistuksen raaka-aineena (Fefco, 2018). Ekologisuuden näkökulmasta onkin siis selvää, että aaltopahvi on erinomainen kiertotalouden huomioiva materiaali. Suomessa kierrätettävästä keräyspahvista valmistetaan pääosin kartonkia sekä sanomalehtipaperia. Kierrätyskuidusta 40 % käytetään kartonkiteollisuuteen, joka on huomattavan suuri osuus kaikista jatkojalostuksen kohteista (Metsäteollisuus ry, 2021) Kuvassa 3 on esitetty prosentteina kierrätyskuidun käyttökohteiden jakaantuminen tuotekohtaisesti Suomessa vuonna 2008.



Kuva 3. Vuonna 2008 Suomessa käytetystä kierrätyskuidusta 40 % käytettiin kartonkiteollisuuteen ja 36 % sanomalehtipaperin valmistukseen (mukailten Metsäteollisuus ry, 2021)

Kierrätysasteella kuvataan, kuinka suuri osuus tietyistä syntyvästä jätteestä ohjataan kiertoon hyödynnettäväksi, materiaaliksi polttamisen sijaan. Mitä enemmän materiaalia saadaan kierrätettyä, sitä korkeammaksi kierrätysasteen arvo kasvaa. (Lassila & Tikanoja, 2020). Kuvassa 4 on esitetty eri materiaaleista valmistettujen pakkausten kierrätysasteet Suomessa vuodesta 2012 vuoteen 2019. Pylväsdiagrammin lukuarvot kuvaavat kyseisenä vuonna kierrätetyn materiaalin prosenttiosuutta koko materiaalin tuotannosta.



Kuva 4. Tilasto kuitujen, lasin, metallin, muovin ja puun pakkausten kierrätysasteista vuosina 2012–2019. Kuituihin lukeutuvat paperi, kartonki ja pahvi. (ELY-keskus, 2020)

Tilastosta huomataan selkeästi, että pakkausmateriaaleista kuduilla on suurin kierrätysaste. Kierrätysasteen arvo on pysynyt melko tasaisena viimeisen neljän vuoden aikana. Kierrätettyä aaltopahvia käytetään valtaosin uuden aaltopahvin valmistukseen, mikä korreloi kuitujen korkean kierrätysasteen kanssa. Kierrätysyöyklien lisääntyessä jätepaperimassan kuidut kuitenkin lyhenevät, jolloin paperin ominaisuudet kuten lujuus ja painatuskelpoisuus heikkenevät. (Chibani et al., 2016)

2.4 Aaltopahvin hyödyt huonekaluissa

Aaltopahvi on ollut menestyksekkäs ja muodikas pakkausmateriaali jo vuosikymmenien ajan. Materiaalin monet hyödylliset ominaisuudet kuten keveys, lujuus, edullisuus sekä painatuskelpoisuus eri painatusmenetelmillä, ovat syitä, joiden vuoksi aaltopahvi erottuu edukseen muista pakkausmateriaaleista. (Suomen Aaltopahviyhdistys ry, 2022) Lisäksi aaltopahvin helppo kierrätettävyys sekä korkea kierrätysaste tekevät materiaalista huomattavasti ympäristöystävällisemmän vaihtoehdon esimerkiksi puuhun tai muoviin verrattuna, kuten kuvasta 4 huomataan. Näitä hyviä ominaisuuksia voidaan hyödyntää huonekaluissa ja tilapäismajoitusratkaisuissa. Davide Turrinin (2017) mukaan pahvin käyttö esineiden ja huonekalujen valmistuksessa juontaa juurensa 1960-luvulle. Materiaalin käyttö huonekaluissa ei siis ole uusi keksintö, mutta sen hyödyntäminen on tullut ajankohtaiseksi viime vuosien aikana erityisesti ekologisuuden näkökulman vuoksi.

2.5 Käyttö huonekaluissa

Aaltopahvi tarjoaa huonekalujen materiaalina ratkaisuja erityisesti tilapäismajoitukseen keveytensä sekä helpon siirrettävyytensä ansiosta. Lisäksi urheilutapahtumat, messuosastot, festivaalit ja muut nopean väliaikaisen kalustamisen tapahtumat ovat materiaalin potentiaalisia käyttökohteita. Pahvisten sänkyjen toimivuus on testattu esimerkiksi vuoden 2020 Olympialaisissa sekä Paralympialaisissa, kun nukkumisjärjestelyiden tuli olla linjassa Tokion 2020 olympialaisten kestävä kehityksen suunnitelman kanssa. (Finney Alice, 2021) Myöhemmin samoja kalusteita hyödynnettiin COVID-19-potilaiden väliaikaisessa sairaalanhoitokeskuksessa Osakassa (Lloyd, 2021).

Materiaalin trendikkyys ympäristöystävällisyyden saralla on saanut esimerkiksi Yhdysvaltalaisen Chairigamin luomaan pahvisia huonekaluratkaisuja (Chairigami, 2020). Toinen yhdysvaltalainen yritys BoxSquared puolestaan valmistaa aaltopahvihuonekaluja erityisesti helpottamaan ihmisten arkea (Globenewswire, 2021). Suomessa vastaavasti aaltopahvista valmistettua kalustemallistoa tarjoaa Rehome (Rehome, 2021).

Rehome konsepti syntyi Suomessa LAB Ammattikorkeakoulun (entiseltä nimeltään Lahden ammattikorkeakoulu) muotoiluinstituutiosta valmistuneiden opiskelijoiden toimesta.

Konseptin tarkoituksena on tarjota edullisia suurella volyymilla tuotettavia ratkaisuja väliaikaismajoitukseen. Nukkuminen, varastointi sekä yksityisyys ovat muodostuneet suurimmiksi ongelmiksi, joita Rehome- konsepti pyrkii ratkaisemaan. (Rehome, 2021)

Tuotteet valmistetaan biopohjaisista materiaaleista huomioiden kestävä kehitys. Huonekaluissa käytetään pääosin aaltopahvia, mutta rakenteen lujittamiseksi esimerkiksi kerrossängyssä on käytetty aaltopahvin lisäksi vaneria. Nämä materiaalit mahdollistavat nopean tuotannon, rakentamisen ja kierrätyksen. Kuvassa 5 on esitetty Rehome konseptin verholla varustettu yhden hengen vuode. (Rehome, 2021)



Kuva 5. Rehome-konseptin verholla varustettu yhden hengen vuode (Rehome, 2021)

2.6 Lain asettamat vaatimukset huonekalujen turvallisuudelle

Kuluttajaturvallisuuslaki määrittää huonekalujen turvallisuuteen liittyvät vaatimukset. Huonekalujen tulee olla käyttäjäystävällisiä, ja ne eivät saa aiheuttaa vaaraa kuluttajan terveydelle tai omaisuudelle. Pahvisten huonekalujen valmistuksessa tulee siis huomioida materiaalin syttyvyys, ja käytettyjen kemikaalien turvallisuus sekä palonestoaineiden että kosteudensietokykyä vahvistavien yhdisteiden kannalta. (Tukes, 2021) Kemikaalien turvallisuus huomioidaan seuraavissa luvuissa, kun tarkastellaan vaihtoehtoja aaltopahvin ominaisuuksien parantamiseksi.

Useat valtiot vaativat tarkat sekä laaja-alaiset selvitykset palonestoyhdisteiden vaikutuksista ympäristölle sekä ihmisen terveydelle ennen markkinoille pääsyä. (WHO, 1997) Palonestoaineiden turvallisuus korostuu erityisesti huonekaluissa, jotka ovat jatkuvassa kosketuksessa ihmisen kanssa. Vastuu huonekalujen turvallisuudesta on tuotteen valmistajalla, valmistuttajalla, maahantuojalla, jakelijalla tai jälleenmyyjällä. (Tukes, 2021)

Turvallisuus ja kemikaaliviraston (2021) mukaan huonekalujen turvallisuuden kannalta kriittiset kohdat liittyvät rakenteen kestävyYTEEN, oikeanlaiseen mitoituskeeseen, tasapainoon, materiaalien paloturvallisuuteen sekä valmistuksessa käytettyihin materiaaleihin ja lisäaineisiin. Lisäksi huonekalujen kokoamis- ja käyttöohjeiden selkeys ovat merkittäviä tekijöitä huonekalujen turvallisuuden kannalta.

3 Aaltopahvin syttyvyys ja vettyminen

On oleellista ymmärtää, kuinka palaminen tapahtuu, ymmärtääkseen miten palonestoaineet toimivat ja mihin ne vaikuttavat. Tässä luvussa käsitellään palamisen ja syttyvyyden kautta palonestoaineiden toimintaperiaatteita sekä analyysimenetelmiä. Lisäksi käsitellään aaltopahvin vettymiskäyttäytymistä ja kosteudensietokykyä, jotta voidaan myöhemmin tarkastella vettymistä hillitseviä keinoja.

3.1 Palamisen ja syttyvyyden periaatteet

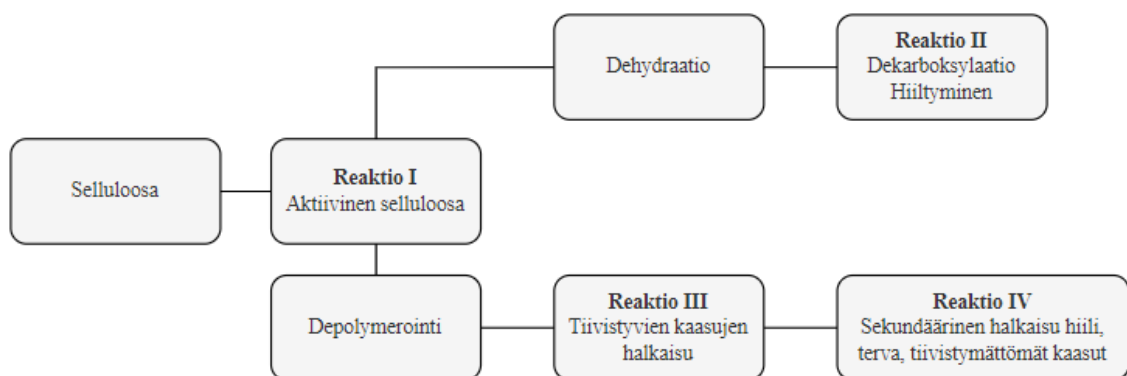
Palamisella tarkoitetaan kemiallista reaktiota, jossa orgaaninen aines hajoaa lämmön vaikutuksesta kaasuksi ja hapettuu. Palavan materiaalin hajoamista kiinteäksi hiiltojäännökseksi ja vapautuviksi kaasuiksi kutsutaan pyrolyysiksi. (Horrocks & Price, 2001) Palaminen vaatii palavan aineen, riittävän korkean lämpötilan ja kontaktin hapen kanssa, sekä näiden kolmen muuttujan katkeamattoman ketjureaktion palaakseen liekillä (Raiko, 1995). Mikäli ketjureaktiota ei tapahdu, materiaali hajoaa lämmön vaikutuksesta hehkupaloina eli kytemällä, mikäli lämpötila ylittää 500 °C, tai vaihtoehtoisesti sammuu (Horrocks & Price, 2001).

Aaltopahvin ja muiden kiinteiden aineiden palaminen voidaan jakaa periaatteellisesti neljään eri vaiheeseen: palavan materiaalin lämpeneminen eli esilämmitys, pyrolyysi, kaasumaisten yhdisteiden syttyminen ja palaminen sekä hiiltojäännöksen palaminen (Raiko, 1995). Yleisesti materiaalin syttyvyydellä tarkoitetaan sen kykyä ja taipumusta palaa. Syttyvyyteen vaikuttaa kiinteiden aineiden kohdalla ympäristöolosuhteet, kuten lämpötila, paine, hapen konsentraatio sekä tarkasteltavan kappaleen geometria (Thermopedia, 2011).

3.1.1 Aaltopahvin syttyvyys

Aaltopahvi on tunnetusti erittäin herkästi syttyvä materiaali, joka hankaloittaa sen käyttöä useissa sovellutuksissa (Kiilto, 2021). Materiaalin herkkä syttyvyys on seurausta kartonkien raaka-aineista ja erityisesti puukuiduista sekä niiden sisältämästä selluloosasta, joka tekee

materiaalista epästabiilin, kun lämpötila ylittää 200 °C (Liodakis et al., 2009). Selluloosa hajoaa kahdella kilpailevalla reaktiolla, ja kuvassa 6 on esitetty selluloosan pyrolyysin päävaiheet. Dehydraatiossa muodostuu alifaattista hiiltä, joka eristää ja suojaa palavaa sellumateriaalia lämmöltä. (Horrocks & Price, 2001) Basu (2010) toteaa tutkimuksessaan, että puhdas selluloosa pyrolysoituu yli 300 °C:ssa depolymeroinnin kautta levoglukosaanimomeereiksi, jotka edelleen haihtuvat korkeissa lämpötiloissa tuottaen helposti syttyviä kaasuja sekä nesteitä.



Kuva 6. Kaaviokuva selluloosan pyrolyysiprosessista, jossa on esireaktion (I) jälkeen kaksi kilpailevaa ensimmäisen asteen reaktiota dehydraatio ja depolymerointi (Basu, 2010)

Puukuidun sisältämän hemiselluloosan terminen stabiilisuus on alhaisempi kuin selluloosan. Hemiselluloosa vapauttaa palaessaan enemmän palamattomia yhdisteitä ja vähemmän teravapitoisia aineita kuin selluloosa. (Horrocks & Price, 2001) Polymeerisen materiaalin kykyä säilyttää ominaisuutensa ja vastustaa lämmön aiheuttamia vaikutuksia rakenteeseen, kuvataan termisellä stabiilisuudella (Król-Morkisz & Pielichowska, 2019). Aaltopahvin sisältämä ligniini hajoaa selluloosaa hitaammin ja suuremmassa lämpötilahaarukassa aromaattisen pitoisuutensa vuoksi, ja näistä syistä tuottaa lisäksi enemmän hiiltynyttä materiaalia (Basu, 2010).

Aaltopahvin valmistusprosessilla voidaan vaikuttaa pienissä määrin materiaalin syttyvyyteen, mutta on kuitenkin huomattava, että valmistusprosessista riippumatta aaltopahvi on helposti syttyvä materiaali. Kemiallisesti valmistetussa sellussa puuhakkeen hemiselluloosa sekä ligniini on liuotettu pois, mikä vähentää kartongin syttymisherkkyyttä. Vastaavasti

kuituraaka-aineet vaikuttavat syttymisherkkyteen, ja havupuusta valmistettu aaltopahvi syttyy helpommin kuin lehtipuusta tehty, sillä havupuu sisältää enemmän ligniiniä. Aaltopahvin sisältämät epäorgaaniset täyteaineet eivät ole syttyviä yhdisteitä, jolloin täyteaineiden määrää kasvattamalla voidaan pienentää syttymisherkkyttä. (Horrocks & Price, 2001)

3.1.2 Palonestoaineet

Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen (2021) mukaan palonestoaineita käytetään kuluttajatuotteiden syttymisen estämiseen sekä hidastamaan palamisen etenemistä. Palon eston kannalta merkittävimmät palamisen vaiheet ovat pyrolyysi sekä liekehtiminen, sillä palonestoaineilla voidaan vaikuttaa erityisesti näihin palamisprosessin vaiheisiin. Lignoselluloosa materiaaleille käytettävien paloestoaineiden teho perustuu pääosin palavien ja haihtuvien aineiden muodostumisen vähentämiseen, palavan materiaalin hapettumisen hidastamiseen sekä palamisreaktiossa muodostuvan suojaavan hiilikerroksen määrän kasvattamiseen. (Horrocks & Price, 2001).

Palonestoaineita käytetään monille kemiallisilta ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan erilaisille tuotteille. Tästä syystä myös palonestoaineita on lukuisia erilaisia. Palonestoaineet voidaan jakaa seuraaviin ryhmiin kemiallisen koostumuksen ja käyttökohteen mukaan: Halogeenit eli klooratut (CFR) ja bromatut (BFR), fosforoidut (PFR), tyypipohjaiset (NFR) ja epäorgaaniset sekä mineraaliyhdisteet. Tyypillisesti käytetään useita eri ryhmien yhdisteitä lisäämään palon eston tehokkuutta. (ChemicalSafetyFacts, 2021) Palonestoaineet voidaan jakaa toimintaperiaatteensa mukaan kahteen eri ryhmään reaktiivisiin ja additiivisiin (WHO, 1997). Reaktiiviset palonestoaineet vuorovaikuttavat ja reagoivat kemiallisesti selluloosan, ligniinin sekä hemiselluloosan kanssa. Nimensä mukaan additiiviset palonestoaineet ovat ainoastaan fyysisesti kontaktissa materiaalin kanssa, ja eivät näin muodosta kemiallisia sidoksia polymeerien kanssa. Additiiviset palonestoaineet kuten pinnoitteet ovat ekologisempia kuin reaktiiviset, mutta kuluvat tehokkaammin, jolloin materiaalin palonestokyky vähenee nopeammin. (Horrocks & Price, 2001)

Termisellä analyysillä voidaan tutkia paloneston tehokkuutta eri yhdisteiden tapauksessa. Tyypillisiä selluloosapohjaisille materiaaleille käytettyjä termisen analyysin menetelmiä ovat: termogravimetria (TGA), differentiaalinen terminen analyysi (DTA) ja

differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria (DSC). Nämä analyysitekniikat perustuvat syttymiskokeessa näytteen massan muutokseen lämpötilan ja ajan funktiona. (Liodakis et al., 2009) Rajahappi-indeksi (LOI) määrittää vähimmäishappipitoisuuden tilavuusprosentteina, joka vaaditaan näytteen stabiilin palamisen ylläpitämiseksi. Menetelmää käytetään palonestoaineiden tehokkuuden puolikvalitatiivisena indikaattorina tutkimusvaiheessa, ja mitä matalampi LOI-arvo sitä helpommin aine syttyy (Lu & Hamerton, 2002). Selluloosan LOI-arvo on Geng et al. (2019) tutkimuksen mukaan 18,4 %, kun paloestetyillä materiaaleilla indeksi on yli 30 %.

Muita hyödyllisiä syttyvyyden ja termisen hajoamisen analyysitekniikoita ovat kartiokalorimetrinen analyysi (CCT), jolla mitataan paloprosessissa vapautuvan lämmön määrää, sekä liekin leviämismittaukset kuten vertikaalinen polttoanalyysi (VBT). CCT:n rinnalla voidaan hyödyntää FTIR mittauksia, jolloin saadaan tietoa palamisreaktiossa vapautuvien yhdisteiden myrkyllisyydestä. (Horrocks & Price, 2001) Analyysitekniikoiden lisäksi tyypillinen tapa mitata palonestoaineen tehokkuutta suhteessa lisäysmäärään on keskimääräinen massan lisäys (AVG), jolla määritetään kuinka paljon käytetty palonestoaine lisää aaltopahvin massaa. Peruseriaatteena suurempi ainemäärä palonestoainetta takaa voimakkaamman palonestokyvyn, mutta rakenteen jämakkyuden säilyttämisen sekä kustannusten kannalta, AVG:n arvo pyritään pitämään alhaisena (alle 20 %). (Mochizuki et al., 2016)

3.2 Aaltopahvin vettyminen ja kosteudensietokyky

Aaltopahvin suuri heikkous on kartonkien taipumus absorboida vettä ilman suuren suhteellisen kosteuden sekä suoran vesikontaktin vaikutuksesta. Veden absorptio heikentää merkittävästi aaltopahvin lujuusominaisuuksia, mikä puolestaan rajoittaa aaltopahvin sovelluskohteita. (Laakso & Rintamäki, 2003) Absorptiolla tarkoitetaan tässä yhteydessä veden tunkeutumista kartongin kuitujen sisään, jolloin absorboivan aineen eli kartongin sisäinen rakenne muuttuu, ja materiaali turpoaa. Puolestaan adsorptio tarkoittaa ilmiötä, jossa kaasu tai neste kerääntyy toisen aineen pintaan. Näistä mekanismeista käytetään yleisnimityksenä käsitettä sorptio. (Arjas, 1983) Vesi tunkeutuu selluloosamateriaaleihin pääosin seuraavilla mekanismeilla: painepetraatiolla, kapillaariabsorptiolla sekä höyryn ja veden diffuusiolla (Alén, 2007).

3.2.1 Kartongin vettymiseen vaikuttavat tekijät

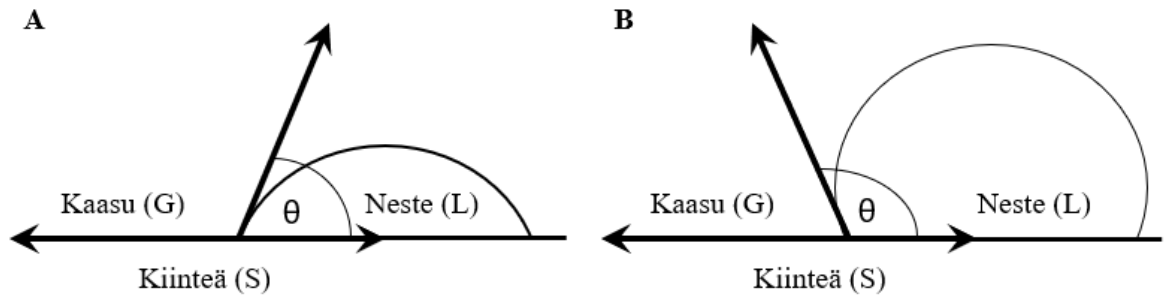
Valmiin kartongin nestesorptioon vaikuttavat fysikaaliskemialliset ilmiöt, jotka noudattavat Van Der Waalsin voimia. Kartongin kuituraaka-aineiden valinnalla voidaan vaikuttaa valmiin kartongin vesiadsorptio-ominaisuuksiin, sillä eri kuitulajien kyvyt adsorboida vettä poikkeavat toisistaan. Erot vesihöyryn sorption vaikutuksesta kuitulajiin aiheutuvat seuraavista tekijöistä: kiteisen ja amorfisen aineen suhteesta, kuituaineen komponenttien vesiaffiniteetista, niiden sijoittumisesta kuituseinään sekä keskinäisestä sitoutuneisuusasteesta. (Arjas, 1983)

Puukuidun selluloosalla on suuri vesiaffiniteetti, mikä on seurausta sokerimolekyylien happiatomien kyvystä muodostaa vetysidoksia sekä glukoosiyksikön hydroksyylien että adsorboituneen vesimolekyylin kanssa. Kartongin raaka-aineena nämä selluloosan ominaisuudet tekevät aaltopahvista hydrofiilisen. Toisaalta puun komponenteista ligniini sekä muut uuteaineet ovat hydrofobisia komponentteja, jolloin mekaanisesti valmistettu massa on koostumukseltaan hydrofobisempaa kuin kemiallisesti valmistettu (Laakso & Rintamäki, 2003). Fysikaalisessa kemiassa sovelletun Le Chatelierin periaatetta noudattaen adsorption määrä vähenee lämpötilan kohotessa, koska adsorptio on lämpöä kehittävä reaktio eli eksoterminen (Arjas, 1983). Näin ollen veden adsorptioon vaikuttavat kuiturakenteen lisäksi ympäristön olosuhteet.

Sorptiossa paperin ja nesteen välisellä kontaktikulmalla (θ) on suuri merkitys. Nestepisaran ollessa kosketuksissa kiinteän pinnan kanssa, se voi levitä tai jäädä pisaraksi tietyssä kontaktikulmassa. Kun nesteen ja pinnan väliset vetovoimat (adheesiovoimat) ovat suuremmat kuin nestettä koossa pitävät voimat (koheesiovoimat), pisara leviää ja kastelee pinnan. Koheesiovoiman ollessa suurempia kuin adheesiovoimien, pisara jää kiinteän aineen rajapinnalle tietyssä kontaktikulmassa. (Alén, 2007)

Attraktiovoimat aiheuttavat paine-eron rajapinnan koveralla ja kuperalla puolella, joka on seurausta nestepinnan kaareutumisesta. Attraktiovoimien keskinäistä suhdetta eli paine-eroa kuvaa kontaktikulma, joka auttaa tai vastustaa nesteen tunkeutumista kapillaariin. (Arjas, 1983) Kuvassa 7 on havainnollistettu nesteen ja kiinteän aineen välinen rajapinta. Terävä kontaktikulma aiheuttaa pisaran leviämisen pinnalle ja spontaanin tunkeutumisen kapillaariin. Kontaktikulman ollessa tylppä, paine-ero vastustaa nesteen tunkeutumista kapillaariin, ja neste jää kiinteän pinnan päälle pisaraksi. Tällöin nesteen imeytymiseen tarvitaan

hydrostaattista painetta penetraation tapahtumiseksi. Kontaktikulman lisäksi nesteen tunkeutumiseen huokoisessa materiaalissa vaikuttaa kapillaarin säde. Penetraationopeutta voidaan hidastaa pienentämällä kapillaarin sädettä. (Arjas, 1983)



Kuva 7. Nesteen ja kiinteän aineen rajapinta. A: Kastuminen, terävä kontaktikulma ($\theta < 90^\circ$) B: Hylkivyyys, tylppä kontaktikulma ($\theta > 90^\circ$) (mukaillen Alén, 2007)

3.2.2 Vettymisen vaikutukset kartongin ja aaltopahvin rakenteeseen

Aaltopahvin kartonkien sorptio- ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi valmiin aaltopahvi-tuotteen lujuusominaisuuksiin ja näin käyttökohteisiin. Puukuidun kyky sitoa vettä vaikuttaa kuitujen seuraaviin ominaisuuksiin: pinta-ala, tilavuus, sisäinen rakenne sekä mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet. Veden absorboituessa kartonkiin, voi ilmetä turpoamista. Tällöin neste tunkeutuu kiinteän aineen sisään, jolloin materiaalin dimensiot laajenevat ja rakenteen jäykkyys heikkenee. Aaltopahvin tapauksessa puhutaan rajallisesta turpoamisesta, sillä materiaali pysyy homogeenisena eikä liukene nesteeseen. (Arjas, 1983)

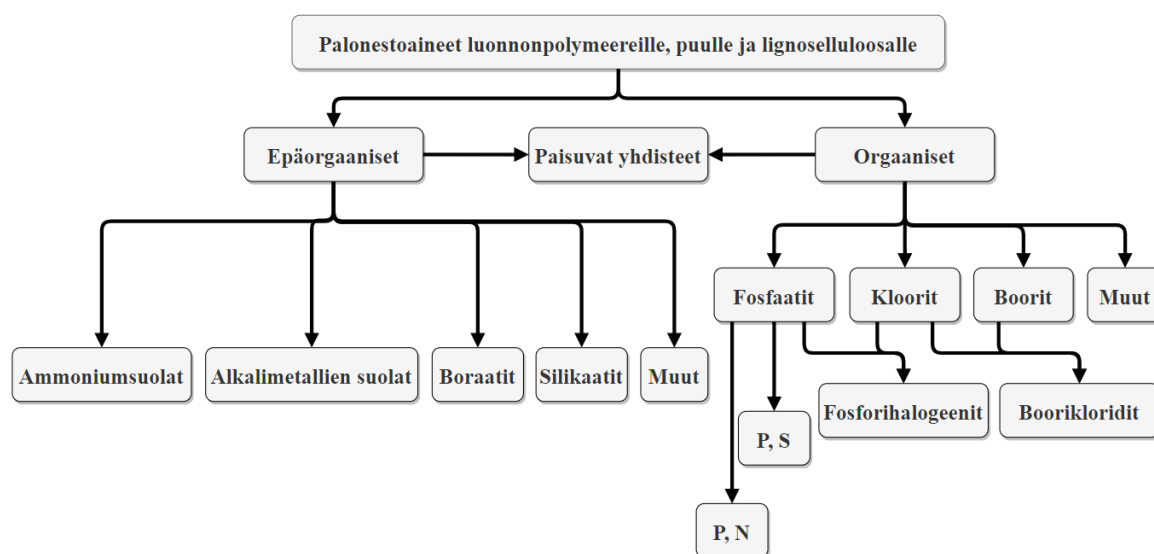
4 Paloturvallisuuden ja kosteudensietokyvyn lisääminen

Tässä osiossa kartoitetaan vaihtoehtoja ja tutkimuksia aaltopahvista valmistettujen huonekalujen paloturvallisuuden ja kosteudensietokyvyn lisäämiseksi. Vaihtoehtoja tarkastellaan tehokkuuden, ekologisuuden sekä myrkyttömyyden näkökulmista.

4.1 Palonestokkyä edistävät yhdisteet

Paloturvallisuus on merkittävä tekijä huonekalujen turvallisuuden kannalta. Aaltopahvi on herkästi syttyvä materiaali, jonka syttymisherkkyyttä voidaan hillitä erilaisilla palonestoaineilla. Maailman terveysjärjestön WHO:n (1997) mukaan palonestoaineissa on tärkeää huomioida käytettyjen kemikaalien myrkyttömyys lopputuotteessa sekä materiaalin kierrätettävyyden säilyttäminen. Palonestoaineen valinnassa tulee ottaa lisäksi huomioon aaltopahvin hydrofiilisuus, joka voi estää muuten toimivan palonestoaineen käytön (WHO, 1997). Ihanteellisella palonestoaineella tulisi olla tunnunomaista synergiavaikutus, joka mahdollistaa selluloosan rakenteen stabiloinnin, ja näin hidastaa materiaalin hajoamista sekä tuhoutumista palamisreaktiossa (Horrocks & Price, 2001).

Kuvassa 8 on esitetty luonnon polymeereille, puulle sekä lignoselluloosa tuotteille sopivien palonestoaineiden luokitus kemiallisen koostumuksen mukaan. Aaltopahvin koostumuksen perusteella on syytä tarkastella näiden soveltuvuutta materiaalin palonestokyvyn lisäämiseksi. Palonestoaineet voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: orgaanisiin ja epäorgaanisiin. Yleisimmät epäorgaaniset palonestoaineet ovat ammoniumsuolat, alkalimetalli suolat, booraatit sekä silikaatit. Vastaavasti tyypillisimmät orgaaniset palonestoaineet ovat kemialliselta koostumukseltaan fosfaatteja, klooria tai booria, ja näiden yhdisteiden synergiassa toimivia palonestoaineita. (Horrocks & Price, 2001)



Kuva 8. Palosuoja-aineiden luokitus kemiallisen koostumuksen mukaan luonnon polymeereille, puulle sekä lignoselluloosalle (mukaiillen Horrocks & Price, 2001)

Epäorgaanisista yhdisteistä yleisesti käytetyt magnesiumin ja alumiinin hydroksidit ovat ympäristölle ystävällisiä palonestoaineita, sillä ne tuottavat kuumentuessaan inerttejä laimennuskaasuja kuten vettä. Näillä yhdisteillä tehokas palonesto vaatii kuitenkin huomattavat suuret lisäysmäärät (AWG 40-70 %) (Han et al., 2014). Aaltopahvin tapauksessa suuret lisäysmäärät vaikuttaisivat negatiivisesti huonekalun lujuusominaisuuksiin ja kestävyys. Lisäksi laajalti polymeereille käytetyt halogeenipohjaiset palonestoaineet, kuten CFR ja BFR, ovat osoittautuneet palovaaraa lisääviksi sekä myrkyllisiä kaasuja vapauttaviksi yhdisteiksi (Lu & Hamerton, 2002). Ympäristö sekä terveysnäkökulma huomioiden, näitä yhdisteitä ei ole aiheellista tarkastella pahvisten huonekalujen paloturvallisuuden lisäyksen kannalta.

Selluloosapohjaisille tuotteille tehokkaita palonestoaineita ovat suolat, jotka dissosioituvat eli hajoavat kuumennettaessa muodostaen happoja tai emäksiä. Seuraavat yhdisteet ovat tehokkaita palonestoaineita sellaisenaan tai muodostuessaan palamisreaktiossa: ammonium- ja amiinisulolat sekä Lewisin hapot ja emäkset. (WHO, 1997) Taulukkoon 1 on koottu tässä luvussa käsiteltäviä palonestoaineita suojausmekanismin mukaan.

Taulukko 1. Palonestoaineiden merkittävimmät suojausmekanismit yhdistekohtaisesti

Suojaavan toiminnan mekanismi	Yhdiste
Palamisreaktiossa muodostuvan suojaavan hiilikerroksen määrän kasvattaminen sekä syttyvien kaasujen muodostumisen vähentäminen	Ammoniumfosfaatit: monoammoniumfosfaatti, diammoniumfosfaatti, polyammoniumfosfaatti
Materiaalia eristys lämpötilan nousulta ja hapelta, sekä palamattomien yhdisteiden muodostuminen kaasufaasiin ja suojattavan materiaalin pinnalle	Piin yhdisteet, paisuvat tulenestopinnoitteet, booraksi, polyvinyylialkoholi ja montmorillonitti, polyammoniumfosfaatti, organofosfaatti
Palamisreaktion lämpötilan inhibointi kaasufaasissa, estäen liekin sekä palavien kaasujen muodostumisen, ja suojakerroksen muodostaminen	Boorihappo

Paloturvallisuutta lisäävien yhdisteiden potentiaalisuutta voidaan vertailla määrittämällä niiden merkittävimmät edut sekä haasteet. Taulukkoon 2 on listattu luvussa käsiteltävien yhdisteiden keskeisimpiä etuja sekä haasteita aaltopahvin paloneston kannalta. Merkittävä kehityskohde ja jatkotutkimuksen aihe palonestoaineiden kannalta, on yhdisteiden hydrofobisuuden lisääminen. Palonestoaineen huuhtoutuminen veden mukana rajoittaa aaltopahvista valmistettujen huonekalujen käyttökohteita.

Taulukko 2. Palonestoaineiden keskeisimmät edut ja haasteet

Yhdiste	Edut	Haasteet
Fosforin ja typen synergiset palonestoaineet	Tehokas suoja liekin leviämistä vastaan, helppo käytettävyys, edullinen	Huuhtoutuminen veden mukana, suojattavan materiaalin lujuusominaisuuksien heikentäminen
Pii ja APP	Palamisreaktiossa vapautuvien myrkyllisten kaasujen pitoisuuden vähentäminen, aaltopahvin itsenäinen sammuminen syttymisen jälkeen	APP hydrofiilisyyden
Boorihappo	Nostaa materiaalin syttymislämpötilaa, jolla saadaan aikaan tehokas palonesto	Suuri liukenevuus veteen
Paisuvat tulenestopinnoitteet, PVA/MMT pintasuojaus	Käyttövalmis, suhteellisen alhaiset kustannukset, palon leviämisen estäminen	Suojaa ainoastaan materiaalin pintaa, jonka vaurioituessa tulipalovaara

4.1.1 Fosforin ja typen synergiset palonestoaineet

Ammoniumsuoloista ammoniumfosfaatit ovat tehokkaita palonestoaineita erityisesti runsaasti happea sisältäville yhdisteille, kuten pääasiassa selluloosasta koostuvalle aaltopahville. (Kishore & Mohandas, 1982). Uudemmassa tutkimuksessa Mochizuki et al. (2016) mukaan fosfori ja typpi soveltuvat aaltopahvin palonestoon, ja näillä yhdisteillä palonestokyky saavutetaan suhteellisen pienillä määrillä, alle 18 % AVG. Fosforiyhdisteistä tyypillisimpiä palonestoaineiden sovellutuksia ovat fosforin ja typen synergiset yhdisteet, kuten diammoniumfosfaatti (DAP), monoammoniumfosfaatti (MAP) ja polyammoniumfosfaatti (APP). Synergisyydellä tarkoitetaan, että aineet voimistavat toistensa vaikutuksia, jolloin niiden palonestotehokkuus on suurempi yhdisteenä kuin erillisinä aineina. Ammoniumfosfaattien tapauksissa typpi lisää fosforin toimintaa. (Kishore & Mohandas, 1982)

Ammoniumfosfaattien teho palonestoaineena perustuu fosforiyhdisteiden kykyyn muodostaa hiiltä selluloosan palamisreaktion tuotteena, mikä eristää aaltopahvia kuumuudelta ja hapelta sekä vähentää pyrolyysissä muodostuvien kaasujen määrää. Palotilanteessa fosfori hajoaa vesihöyryksi sekä fosforioksidiksi lämmön ja hapen vaikutuksesta. Fosforioksidi reagoi edelleen erityisesti aaltopahvin selluloosan kanssa, ja dehydratoi sen sisältämää vettä, muodostaen forforihappoa ja polyfosforihappoa. (Kishore & Mohandas, 1982) Pääpiirteittäin ammoniumfosfaatit siis muuttavat selluloosan hajoamisen hiilen, vesihöyryn sekä fosforioksidien muodostumiseksi, jolloin palavien kaasujen muodostus vähenee. (WHO, 1997) Lisäksi ammoniumfosfaatit vapauttavat palamisreaktion seurauksena ammoniakkaa, joka on palamaton yhdiste (Horrocks & Price, 2001).

Horrocks & Price (2001) toteavat tutkimuksessaan, että tpestä ja fosforista muodostuvien epäorgaanisten suolojen haittapuolena on niiden palamisessa vapautuvat myrkylliset savupäästöt sekä vapautuvan hiilimonoksidin konsentraation kasvu. Toisaalta Han et al. (2014) mukaan polymeerien palamisessa vapautuvien haihtuvien fosforiyhdisteiden myrkyllisyydestä ei ole vielä vakuuttavia todisteita. Lisäksi ammoniumfosfaattien kaltaiset suoloihin perustuvat epäorgaaniset palonestoaineet huuhtoutuvat helposti veden mukana, ja voivat imeä kosteutta polymeerin rakenteeseen heikentäen materiaalin lujuusominaisuuksia. (Horrocks & Price, 2001) Näistä syistä ammoniumfosfaattien soveltuvuus palonestoaineeksi pahvisille huonekaluille riippuu vahvasti huonekalujen käyttökohteesta ja ympäristöolosuhteista.

4.1.2 Piipohjaiset palonestoaineet

Han et al. (2014) toteavat tutkimuksessaan, että piipohjaisilla palonestoaineilla on optimistiset tulevaisuuden näkymät polymeerien palonestoaineena. On osoitettu, että piipitoisilla yhdisteillä voidaan suhteellisen pienellä AWG:n arvolla parantaa merkittävästi polymeerien palonestokykyä, lisäämättä ympäristöhaittoja (Lu & Hamerton, 2002).

Toisaalta uudemmassa tutkimuksessa Yang et al. (2020) polyammoniumfosfaatin (APP) palonestokykyä edistettiin lisäämällä aaltopahvin rakenteeseen piitä ioninvaihtomenetelmällä. Menetelmässä käytettiin molekyyliseulaa, jonka rakenteeseen puolimetallikationit modifioitiin. Tutkimuksen mukaan Piin ja APP:n palonestokyky perustuu palamattomien yhdisteiden muodostumiseen kaasufaasiin sekä suojattavan materiaalin pintaan. Modifioitu molekyyliseula vahvistaa APP palonestokykyä, kiinteyttää palamisreaktiossa muodostuvaa hiilikerrosta sekä vähentää vapautuvien myrkyllisten kaasujen määrää. Tutkimuksen VBT- ja LOI-testit osoittivat, että palonestokäsittelyn jälkeen aaltopahvinäyte pystyi sammumaan itsestään syttymisen jälkeen. Puolestaan CCT analyysi osoitti, että käsitellyistä näytteistä vapautuva kokonaislämpö väheni 49,9 %, ja palamisreaktiossa vapautuvien savukaasujen määrä väheni 27,6 %. Lisäksi TG-testien avulla havaittiin, että palonestoaine nosti jäännöshiilipitoisuutta merkittävästi. Tutkimuksen mukaan tuotteena saadaan ympäristöystävällisempi sekä ihmiselle turvallinen palonestoaine pahvisille huonekaluille. (Yang et al., 2020)

Gilman et al. (1997) mukaan piioksidin ja alkalimetallisuolan kaliumkarbonaatin synergiset yhdisteet ovat tehokkaita palonestoaineita monille polymeereille kuten selluloosalle. Uudemmassa tutkimuksessa myös Shaorui He et al. (2016) totesivat edellä mainitun yhdisteen toimivuuden puun palonestoaineena. Piioksidin ja kaliumkarbonaatin toimivuutta aaltopahville ei ole kuitenkaan vielä tutkittu.

4.1.3 Nanokomposiittien pintasuojaus palonestossa

Williams et al. (2021) mukaan aaltopahvin rakenne sekä koostumus tekevät materiaalista erinomaisen ehdokkaan orgaanisten sekä epäorgaanisten nanopinnoitteiden soveltuvuuskohdeksi. Yleisenä toimintaperiaatteena nanokomposiitit hidastavat polymeerien palamisreaktiota pintasuojauksen avulla, ja selluloosapohjaisten materiaalien tapauksessa täyttämällä

kuitujen huokosrakenteen aukot, jotka ovat herkkiä syttymään (Han et al., 2014; Mizutani et al., 2016).

Eräänä nanokomposiittipinnoitteena Williams et al. (2021) totesi tutkimuksessaan Polyvinyylialkoholin (PVA) ja montmorilloniitin (MMT) olevan tehokas palonestoyhdiste aaltopahville, erityisesti palonestoaineen ja aaltopahvin synergiavaikutuksen ansiosta. MMT palonestokyky perustuu suojaavan pinnan muodostamiseen, joka estää hapen ja lämmön pääsyn suojattavaan materiaaliin. Palamisreaktiossa MMT akkumuloituu PVA:n muodostaman jäännöshiilen kanssa, muodostaen vahvan palonestopinnoitteen. (Ding et al., 2017) Tutkimuksen TGA testin tuloksena pinnoite vähensi merkittävästi palamisreaktion huippumasahäviöiden arvoja (7 % ja 56 %), jotka ovat seurausta selluloosan pyrolyysin kahdesta päävaiheesta, ja kuvaavat rakenteen hajoamista ja näin ollen rakenteen massan pienemistä. VBT testi, joka on esitetty kuvassa 9, havainnollistaa erinomaisesti PLA/MMT pinnoitteen toimintaa: pinnoittamaton aaltopahvi tuhoutui täysin, kun pinnoitettu vastusti tulen leviämistä muodostamalla hiilikerroksen materiaalin pinnalle. (Williams et al., 2021). Tutkimuksen perusteella PVA/MMT pinnoite on potentiaalinen vaihtoehto pahvisten huonekalujen palonestoaineeksi.



Kuva 9. Aaltopahvinäytteet VBT testien jälkeen. Vasemmalla pinnoittamaton näyte, ja oikealla PVA/MMT pinnoitettu (mukaihen Williams et al., 2021)

4.1.4 Muita potentiaalisia palonestoaineita

Boorin yhdisteistä boorihappo (BA) on yleisimmin käytetty palonestoaine, ja sitä käytetään pääasiassa selluloosapohjaisten materiaalien kuten paperin, kankaiden sekä puutavaran palonestoaineena, missä BA alentaa erityisesti LOI-arvoa (Dogan et al., 2021). BA:n palonesto perustuu sen kykyyn toimia palamisreaktion lämpötilan nousun kemiallisena inhibiittorina kaasufaasissa, estäen liekin sekä palavien kaasujen muodostumisen. Kiinteässä faasissa boorihappo muodostaa kuumentuessaan lasimaisen kerroksen suojattavan materiaalin pintaan, mikä on seurausta yhdisteen dehydratoitumisesta metaboorihapoksi (HBO_3). (Horrocks & Price, 2001) Boorihappo toimii erityisen hyvin kytevää eli liekkiä paloa vastaan, jolloin palonestossa yhdisteen kanssa käytetään usein booraksia (BX) vahvistamaan liekillä palamisen palonestoa. Nämä yhdisteet lisäävät materiaalia suojaavan hiilikerroksen saantoa sekä vähentävät palamisreaktion toksisten kaasujen muodostumista. (Dogan et al., 2021) BA:n käyttöä soveltuvuuskohteissa rajoittaa yhdisteen suuri liukenevuus veteen. (WHO, 1997) BA ja BX käyttöä pahvisten huonekalujen palonestoaineena on tutkittu hyvin vähän, ja aihe vaatii jatkotutkimusta erityisesti hydrofiilisyyden saralla. Näitä yhdisteitä voitaisiin kuitenkin mahdollisesti käyttää, sillä aiempien tutkimustulosten mukaan ne soveltuvat selluloosapohjaisille materiaaleille.

Organofosfaatit voisivat toimia jatkotutkimuksen puitteissa pahvisten huonekalujen palonestossa, sillä ne toimivat erinomaisesti paloa hidastavina pinnoitteina selluloosakuitukan-kaille. Rakenteeltaan organofosfaatit koostuvat fosforihapon ja alkoholin estereistä sekä hiilivetyketjuista. Yhdisteiden palonesto perustuu katalyyttinä toimivan fosforihapon muodostumiseen alhaisissa lämpötiloissa. Fosforihappo katalysoi selluloosan kuivumista sekä hiiltymistä, mitkä estävät levoglukosaanin ja muiden palavien haihtuvien yhdisteiden muodostumista. Lisäksi korkeissa lämpötiloissa muodostuva polyfosforihappo stabiloi palamisreaktiossa syntyvän viskoosin hiilipinnoitteen rakentumista. (Vasiljević et al., 2013)

Tulenestopinnoitteet ovat toimiva tapa suojata materiaalia palamiselta, erityisen tehokkaita ovat eristekalvon muodostavat koostumukseltaan paisuvat tulenestopinnoitteet. Nämä palonestoaineet muodostavat kuumentuessaan paksun, huokoisen hiilipitoisen kerroksen suojattavan materiaalin pinnalle. Kerros eristää materiaalia lämpötilan nousulta sekä rajoittaa hapen saatavuutta, mikä hidastaa palamisprosessia. Paisuvilla pinnoitteilla palonestokyky saavutetaan pienillä määrillä sekä suhteellisen ohuella pinnoitekerroksella, mikä erottaa ne

positiivisesti monista muista palonestoaineista. Pinnoite voidaan valmistaa useiden eri yhdisteiden summana, mutta seuraavat komponentit ovat välttämättömiä: hiiltävät yhdisteet, vettä poistavat yhdisteet, vaahtoa muodostavat yhdisteet sekä koostumusta ja rakennetta modifioivat aineet. (Horrocks & Price, 2001) Paisuvien tulenestopinnoitteiden soveltuvuutta aaltopahville ei ole tutkittu, mutta niiden toimintaperiaate sekä soveltuvuus yleisesti lignoselluloosaa sisältäville materiaaleille tukee mahdollista käyttöä myös aaltopahville.

4.2 Kosteudensietokykyä edistävät yhdisteet

Tällä hetkellä aaltopahvista valmistettujen huonekalujen käyttö rajoittuu lähinnä sisätilojen kalustamiseen (Marinelli et al., 2021). Mahdollisten käyttökohteiden lisäämiseksi aaltopahvin sovellutukset voisivat tulevaisuudessa laajentua myös ulkokäyttöön. Ulkoilmaolosuhteissa materiaalin merkittäväksi haasteeksi muodostuu vettyminen. Tällöin ulkokäytön mahdollistamiseksi on tutkittava materiaalin vettymistä estäviä yhdisteitä sekä puolestaan kosteudensietokykyä lisääviä yhdisteitä, joita esitellään tässä luvussa.

Selluloosan hydrofiilisen rakenteen vuoksi kosteus ja vesi vaikuttavat voimakkaasti aaltopahvituotteiden ominaisuuksiin, mikä rajoittaa niiden käyttöä eri kohteissa. Materiaalin kosteudensietokykyä voidaan parantaa jo kartongin valmistusvaiheessa, tai vaihtoehtoisesti valmistuksen jälkeen. (Suomen Aaltopahviyhdistys ry, 2022) Materiaalin ominaisuuksia optimoidaan yleensä massa tai pintamodifikaatiolla, eli kemiallisella tai fysikaalisella pinnoituksella. Käytännössä mahdollisia ratkaisuja ovat esimerkiksi materiaalin oksastus, pintaliimaus, lisäaineiden käyttö tai kerrostuspinnointi. Selluloosasubstraattien pintafunktionointiin liittyy lisäksi erilaisia sovellustekniikoita kuten laminointia ja ruiskupinnoitusta. (Marinelli et al., 2021) Taulukkoon 3 on koottu tässä luvussa käsiteltävien kosteudensietokykyä lisäävien menetelmien suojausmekanismit, edut ja haasteet.

Taulukko 3. Kosteudensietokykyä edistävien menetelmien suojaavan toiminnan mekanismit sekä keskeisimmät edut ja haasteet

Menetelmä	Suojaavan toiminnan mekanismi	Edut	Haasteet
Pintamodifikaatio	Yhdisteen kyky täyttää huokoisen kuiturakenteen aukot, estäen veden sorption materiaalin rakenteeseen	Materiaalin ominaisuuksien kuten lujuuden ja painettavuuden parantaminen	Suhteellisen vähäinen kosteuden suoja
Hydrofobiliimat	Pisaran ja kuituverkoston välisen kosketuskulman kasvattaminen	Monikäyttöinen ja edullinen menetelmä	Voi vaikuttaa materiaalin kierrätettävyyteen
Märkälujaliimat	Kalvon muodostus sekä materiaalin lujuusominaisuuksien kasvattaminen	Parantaa aaltopahvin kestävyyttä kosteissa olosuhteissa	Hankaloittaa materiaalin kierrätettävyyttä
Polylaktidi-pinnoite	Täyttää materiaalin kuiturakenteen aukot, ja muodostaa tasaisen pinnan suojattavalle materiaalille	Tehokas vettymisen esto ja ympäristöystävällinen menetelmä	Vaatii jatkotutkimusta suuren mittakaavan toteutusta varten
Polyhydroksibutyraatti-pinnoite	Veden absorption väheneminen materiaalin kuiturakenteeseen, kestävyys rakenteen turpoamista vastaan	Biohajoava ja kestävä hydrolyyttistä hajoaamista vastaan	Vaatii jatkotutkimusta

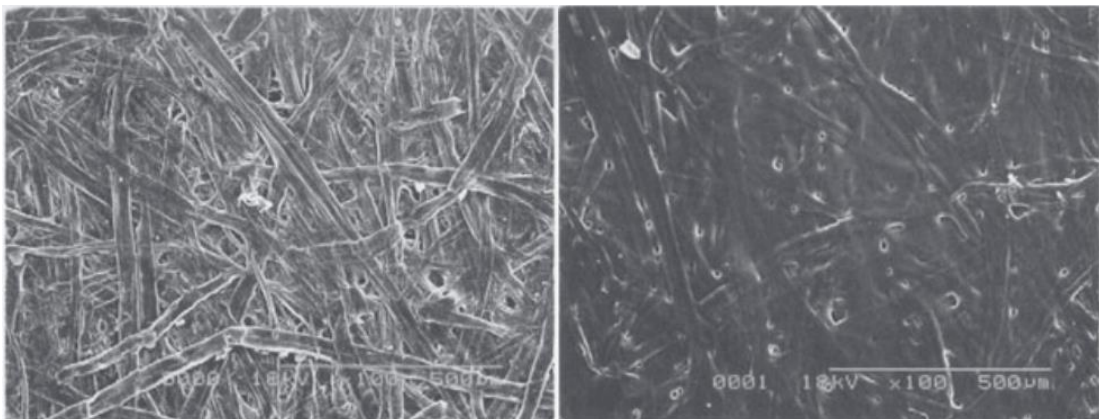
Perustavoitteena on suurentaa pisaran ja kuituverkoston välinen kosketuskulma yli 90°:seen, jolloin veden spontaani penetraatio selluloosan huokosiin estyy. Tähän periaatteeseen perustuu penetraationopeutta hidastavien hydrofobiliimojen käyttö. Liimoja käytetään aaltopahveissa joko massaliimoina tai osana kartongin pintaliimaa. Massaliimat ovat hartsiliimoja kuten saippuoituja hartsi- ja dispersioliimoja sekä neutraaliliimoja (Arjas, 1983). Lisäksi aaltopahvin pintakartonkien valmistuksessa voidaan käyttää lisäaineena hartsiliimaa tai päällystyspastoja, jotka voimistavat kartongin veden hylkivyyttä. (Laakso & Rintamäki, 2003)

Märkälujaliimoilla voidaan parantaa aaltopahvin kestävyyttä kosteissa olosuhteissa. Liimat ovat normaalien aaltopahvien tärkeyspohjaista liimaa, joihin on lisätty märkälujalisäainetta. Niiden käyttö ei vähennä materiaalin kierrätettävyyttä. Märkälujalisäaine muodostaa liima-aineen pinnalle ohuen kalvon, mikä estää kosteuden pääsyn liima-aineeseen, lujittaen näin aaltopahvin rakennetta ja estämällä vettymistä. (Suomen Aaltopahviyhdistys ry, 2022) Tarkemmin märkälujaliimojen teho perustuu yhdisteen kykyyn muodostaa aaltopahvin kuitujen välille ylimääräisiä sidoksia. Tällöin vedellä on haastavampaa erottaa kuituja toisistaan. Märkälujaliimojen käytön ohessa aaltopahvin lujuusominaisuuksien kasvaminen perustuu märkälujaliimojen yhdisteiden liittymiseen kuituihin ristsidoksilla. (Roberts, 1996)

Nanoselluloosa (MFC) toimii erinomaisesti paperin ominaisuuksien parantamisessa. Pahveissa ongelmaksi muodostuu kartongin suuri neliömassa verrattuna paperiin. Käytetyn MFC:n määrä tulisi olla pahveissa suhteessa vähintään sama määrä kuin paperisubstraateissa. Tällöin MFC:n määrä tulisi lisätä tai suspensiota tulisi väkevöittää. Tällä hetkellä kyseinen tekniikka ei ole mahdollista, ja aihe vaatisi jatkotutkimusta. (Lavoine et al., 2014)

4.2.1 Polylaktidi-pinnoite

Rhim et al. (2007) tutkimuksen mukaan polylaktidi-pinnoitteet (PLA) toimivat erittäin hyvin kartongin kosteudensietokyvyn lisäämisessä. Molekyyli on biohajoava, sillä se syntetisoidaan maitohaposta, joka on peräisin uusiutuvista luonnonvaroista kuten maissista tai punajuuresta (Donald, 2001). Onkin siis selvää, että suojattava materiaali säilyttää ekologisuutensa ja kierrätettävyytensä, mitkä ovat pinnoitteen tuomia merkittäviä positiivisia etuja. PLA:n kosteudensietokykyä parantava vaikutus perustuu molekyylien hitaaseen hajoamiseen sekä biopolymeerejä pienempään vesihöyryn läpäisevyyteen (WVP) (Donald, 2001). Näin ollen PLA-pinnoitteen toimintaperiaate perustuu yhdisteen kykyyn täyttää huokoisen kuiturakenteen aukot muodostaen tasaisen pinnan suojattavalle materiaalille. Toimintaperiaatetta on havainnollistettu kartongin tapauksessa pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvilla (SEM), jotka ovat esitetty kuvassa 10. SEM-analyysissä on vertailtu pinnoittamatonta kartonkia sekä massakonsentraatioiltaan 3 % PLA pinnoitettua.



Kuva 10. SEM kuvat kartongin pinnan selluloosakuiturakenteesta. Pinnoittamaton kartonki vasemmalla ja PLA pinnoitettu oikealla (3 w/v % PLA pinnoitelius) (Rhim et al., 2007)

Pinnoittamattomasta kartongista erottaa selkeästi selluloosan kuiturakenteet (vas.), kun pinnoitetussa (oik.) PLA täyttää huokosrakenteen, ja näin estää veden sorption kartongin rakenteeseen, vähentäen materiaalin vettymistä. (Rhim et al., 2007) Edellä mainittujen tutkimustulosten perusteella ekologinen PLA-pinnoite sopisi mahdollisesti käytettäväksi aaltopahvista valmistetuille huonekaluille.

4.2.3 Polyhydroksibutyraatti

Polymeeripinnoitteiden on tutkittu olevan toimivia aaltopahvin hydrofobisten ominaisuuksien parantamiseksi, mutta monesti käytetään muovipohjaisia yhdisteitä, jotka vähentävät aaltopahvin ekologisuutta (Marinelli et al., 2021). Edellä mainitusta syystä Cyras et al. (2009) tutkivat poly(3-hydroksibutyraatti) (PHB) toimivuutta pakkausmateriaalipahvin hydrofobisena pinnoitteena. PHB käyttöä puoltavat erityisesti yhdisteen seuraavat ominaisuudet: veteen liukenemattomuus, biohajoavuus sekä kestävyys hydrolyyttistä hajoamista vastaan. (Cyras et al., 2009) Erityisesti elintarvikepakkaussovellutuksissa yhdistettä on hyödynnetty alhaisen WVP arvonsa vuoksi (Zhang et al., 1997). Tutkimuksessa testattiin massakonsentraatioiltaan 5 %, 10 %, 15 % ja 20 % PHB pinnoitteita. Tuloksina absorboituneen veden määrä sekä näytteiden keskimääräinen kosteuspitoisuus laskivat merkittävästi, mikä muodosti selluloosarakenteelle kestävyuden turpoamista vastaan. Näin ollen rakenteen lujuusominaisuudet säilyivät, ja jopa suurenivat yhdisteen massakonsentraation ollessa yli 15 %. (Cyras et al., 2009) PHB:n vaikutus ja tehokkuus aaltopahvirakenteille vaatii lisää soveltavaa tutkimusta.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Muuttuvat maailman tilanteet kuten sodat, luonnonkatastrofit sekä ilmastonmuutos ovat liikuttaneet, ja tulevat myös tulevaisuudessa liikuttamaan kasvavissa määrin suuria ihmismassoja. Kriisitilanteita sekä niiden varautumista varten tarvitaan ratkaisuja, joita humanitaarinen muotoilu voi tarjota. Aaltopahvista valmistetuilla huonekaluilla nopean kalustamisen tarve voidaan täyttää uusiutuvilla luonnonvaroilla ja korkealla materiaalitehokkuudella, luoden puitteita humanitaaristen kriisien uhreille väliaikais- ja hätämajoitukseen. Korkean maailmanlaajuisen kierrätysasteen, ja näin ollen edullisen hintansa ansiosta, aaltopahvi on markkinoilla kilpailukykyinen materiaalivaihtoehto kalustamisen tarpeisiin.

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin, millaisia vaihtoehtoja aaltopahvista valmistettujen huonekalujen paloturvallisuuden ja kosteudensietokyvyn lisäämiseksi on kehitetty. Toinen työn keskeinen tutkimuskysymys pohti, miten paloturvallisuuden ja kosteudensietokyvyn edistäminen vaikuttaa pahvisten huonekalujen käyttömahdollisuuksiin.

Palonestoaineita on lukuisia erilaisia, ja halutulle materiaalille voidaan valita laajasta kirjosta kaikkein sopivin tai hyödyntää useita eri yhdisteitä sekä niiden synergioita. Palonestoaineiden käyttö kuluttajataroituksessa lisää yhdisteiltä vaadittavia ominaisuuksia, joista merkittävimpiä ovat myrkyttömyys ja turvallinen käyttö. Selluloosapohjaisille tuotteille kuten kangaille, puulle sekä polymeereille on kehitetty lukuisia palonestoaineita. Näitä ovat muun muassa paisuvat tulenestopinnoitteet, organofosfaatit sekä booriyhdisteet kuten boorihappo. Aaltopahville vaihtoehtoja on huomattavasti vähemmän, mikä kuvaa materiaalin uutuutta paloturvallisuuden huomioivassa huonekalukäytössä. Aaltopahville soveltuvia palonestoaineita on tutkittu ja kehitetty pääosin vasta viime vuosien aikana. Tämän vuoksi mahdolliset ympäristö- ja terveyshaitat vaativat lisää soveltavaa tutkimusta. Erityisesti fosforin ja typen palamisesta vapautuvien savukaasujen haitallisuudesta on ristiriitaista tietoa. Nanokomposiittipinnoitteet ovat laajaa huomiota herättänyt potentiaalinen vaihtoehto pahvisille huonekaluille. Lisäksi synergisten palonestoaineiden, kuten fosforin ja typen sekä fosforin ja piin yhdisteet, ovat osoittaneet positiivisia tuloksia aaltopahvin palonestossa.

Aaltopahvia käytetään pääosin pakkausmateriaalina, minkä vuoksi materiaalin kosteudensietokykyä esimerkiksi elintarvikepakkausten tapauksessa on tutkittu huomattavasti

enemmän kuin syttyvyyttä. Valmistusprosessilla sekä kuituraaka-aineiden valinnalla voidaan vaikuttaa valmiin materiaalin hydrofobisuuteen. Aaltopahvin vettymiskäyttäytymistä voidaan muokata valmistuksen jälkeen pinnoitteilla, liimoilla tai erilaisilla lisäaineilla. Muun muassa märkälujaliimoilla ja hydrofobiliimoilla voidaan parantaa aaltopahvin kestävyttä kosteissa olosuhteissa. Polyhydroksibutyraatti sekä polylaktidi ovat toimivia vettymistä estäviä pinnoitteita kartongille, ja jatkotutkimuksen kautta mahdollisesti myös aaltopahville. Erityisesti polyhydroksibutyraatti on järkevä jatkotutkimuskohde ekologisuutensa vuoksi.

Tämän tutkimuksen tuloksena havaittiin, että aaltopahvin paloturvallisuuden ja kosteudensietokyvyn edistäminen vaatii lisää tutkimusta, jotta löydetään sekä ympäristöystävällinen että teknistaloudellisesti järkevä vaihtoehto. Seuraavissa tutkimuksissa olisi syytä paneutua muun muassa syttymisen ja vettymisen yhteisvaikutukseen, jolla on suuri merkitys käyttökohteiden laajentamisessa. Tällä hetkellä näiden kahden ilmiön yhteisvaikutuksen tutkimus on varsin vähäistä. Paloturvallisuuden ja kosteudensietokyvyn edistäminen vaikuttavat aaltopahvista valmistettujen huonekalujen käyttömahdollisuuksiin, lisäämällä soveltuvuuskohteiden määrää, turvallisuutta ja mukavuutta. Vettymisen estäminen ja hillitseminen mahdollistaisi huonekalujen käytön ulkotiloissa ja -tapahtumissa kuten leireillä. Paloturvallisuuden edistäminen lisäisi aaltopahvista valmistettujen huonekalujen vaikuttavuutta ja terveysturvallisuutta kuluttajamarkkinoilla. Näin ollen poikkeusoloissa pahvisten huonekalujen avulla voitaisiin toteuttaa ihmisarvon mukainen majoittaminen.

Lähteet

Aboura, Z., Talbi, N., Allaoui, S. & Benzeggagh, M. (2004). Elastic behavior of corrugated cardboard: experiments and modeling. *Composite Structures*, 63(2), s. 53–62.

Alén, R. (2007). Papermaking science and technology. Book 4, *Papermaking chemistry* (2nd ed.). Finnish Paper Engineers' Association.

Arjas, A. (1983). *Paperin valmistus. Osa 1* (2nd ed.). Suomen paperi-insinöörien yhdistys.

Bajpai, P., & Bajpai, P. K. (1992). Biobleaching of kraft pulp. *Process Biochemistry*, 27(6), s. 319–325. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.2.2022]. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/0032-9592\(92\)87009-6](https://doi.org/10.1016/0032-9592(92)87009-6)

Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Elsevier/Academic Press.

Chairigami. (2020). *Cardboard Furniture: Lightweight & Eco-Friendly*. Chairigami. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.2.2022]. Saatavissa: <https://www.chairigami.com>

ChemicalSafetyFacts. (2021). *Flame Retardants*. ChemicalSafetyFacts.org. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.3.2022]. Saatavissa: <https://www.chemicalsafetyfacts.org/flame-retardants/>

Chibani, N., Djidjelli, H., Dufresne, A., Boukerrou, A., & Nedjma, S. (2016). Study of effect of old corrugated cardboard in properties of polypropylene composites: Study of mechanical properties, thermal behavior, and morphological properties. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 22(3), s. 231–238. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.2.2022]. Saatavissa: <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1002/vnl.21437>

- Cyras, V., Soledad, C., & Analía, V. (2009). Biocomposites based on renewable resource: Acetylated and non-acetylated cellulose cardboard coated with polyhydroxybutyrate. *Polymer (Guilford)*, 50(26), s. 6274–6280.
- Ding, F., Liu, J., Zeng, S., Xia, Y., Wells, K., Nieh, M., & Sun, L. (2017). Biomimetic nanocoatings with exceptional mechanical, barrier, and flame-retardant properties from large-scale one-step coassembly. *Science Advances*, 3(7).
- Dogan, M., Dogan, S., Savas, L., Ozcelik, G., & Tayfun, U. (2021). Flame retardant effect of boron compounds in polymeric materials. *Composites. Part B, Engineering*, 222,
- Donald, G. (2001). A Literature Review of Poly(Lactic Acid). *Journal of Polymers and the Environment*, 9, 63–84.
- ELY-keskus. (2020). Muovipakkausten kierrätys kiihtyy, myös puupakkausten kierrätyksessä kasvua. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.2.2022]. Saatavissa: https://www.ely-keskus.fi/-/muovipakkausten_kierratys_kiihtyy
- Fefco. (2018). Circular by nature. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.3.2022]. Saatavissa: <https://www.fefco.org/circular-by-nature>
- Finney A. (2021). Airweave creates cardboard beds for athletes at Tokyo 2020 Olympics. Dezeen. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.3.2022]. Saatavissa: <https://www.dezeen.com/2021/07/11/cardboard-beds-modular-mattresses-airweave-tokyo-2020-olympics/>
- Geng, C., Zhao, Z., Xue, Z., Xu, P., & Xia, Y. (2019). Preparation of Ion-Exchanged TEMPO-Oxidized Celluloses as Flame Retardant Products. *Molecules*, 24(10).
- Gilman, J., Ritchie, S., Kashiwagi, T., & Lomakin, S. (1997). Fire-retardant additives for polymeric materials—I. Char formation from silica gel–potassium carbonate. *Fire and Materials*, 21(1), s. 23–32.
- Globenewswire. (2021). BoxSquared, a U.S.-Based Cardboard Furniture Company, Provides a Vital New Addition to the Home Furnishings Market. GlobeNewswire. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.3.2022]. Saatavissa: <https://www.globenewswire.com/news>

release/2021/10/18/2315627/0/en/BoxSquared-a-U-S-Based-Cardboard-Furniture-Company-Provides-a-Vital-New-Addition-to-the-Home-Furnishings-Market.html

Han, Z., Fina, A., & Camino, G. (2014). Organosilicon Compounds as Polymer Fire Retardants. *Polymer Green Flame Retardants*, 12, s. 389-418.

Horrocks, A., & Price, D. (2001). *Fire Retardant Materials*. Elsevier Science & Technology.

IEP. (2020). ECOLOGICAL THREAT REGISTER 2020. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.3.2022]. Saatavissa: https://www.visionofhumanity.org/wpcontent/uploads/2020/10/ETR_2020_web_1.pdf

Kanto, T. (2019). Aura pop up -messupöytäratkaisu aaltopahvista. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.3.2022]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019052913286>

Kiilto. (2021). Palonestoaineet paperille ja pahville. Kiilto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.2.2022]. Saatavissa: <https://www.kiilto.fi/teollisuus/palonestoratkaisut/paperi-ja-pahvi/>

Kishore, K., & Mohandas, K. (1982). Action of phosphorus compounds on fire-retardancy of cellulosic materials. *Fire and Materials*, 6(2), s. 54-58.

Król-Morkisz, K., & Pielichowska, K. (2019). Thermal Decomposition of Polymer Nanocomposites With Functionalized Nanoparticles. *Polymer Composites with Functionalized Nanoparticles*, 13, s. 405-435.

Laakso, O., & Rintamäki, T. (2003). *Aaltopahvin valmistus ja jalostus* (2nd ed.). Suomen Aaltopahviyhdistys.

Lassila & Tikanoja. (2020). *Kiertotalouden termit tutuksi – miten kierrätysaste eroaa hyötykäyttöasteesta?* [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.2.2022]. Saatavissa: <https://lassikko.lt.fi/kiertotalouden-termit-tutuksi>

Lavoine, N., Bras, J., & Desloges I. (2014). Mechanical and Barrier Properties of Cardboard and 3D Packaging Coated with Microfibrillated Cellulose. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(8)

Lioudakis, S., Fetsis, I., & Agiovlasis, I. (2009). The fire-retarding effect of inorganic phosphorus compounds on the combustion of cellulosic materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 98(1), s. 285-291.

Lloyd, O. (2021). Tokyo 2020 cardboard beds to be made available for COVID-19 patients in Osaka. Insidethegames. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 4.3.2022]. Saatavissa: <https://www.insidethegames.biz/articles/1112915/tokyo-2020-cardboard-beds-covid19-osaka>

Lu, S., & Hamerton, I. (2002). Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers. *Progress in Polymer Science*, s. 1661-1712.

Marinelli, A., Diamanti, M., Lucotti, A., Pedferri, M., & Del Curto, B. (2021). Evaluation of Coatings to Improve the Durability and Water-Barrier Properties of Corrugated Cardboard. *Coatings*, 12(1). [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2079-6412/12/1/10/htm>

Metsäteollisuus ry. (2021). Metsät ovat Suomen tärkein luonnonvara. Metsäteollisuuden tietopalvelu. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.3.2022]. Saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/>

Mizutani, Y., Mochizuki, Y., Okoshi, M., & Hamada, H. (2016). The Flameretardant Study of PVA Using for Corrugated Cardboard. *Energy Procedia*, 89, s. 98–103.

Mochizuki, Y., Mizutani, Y., Okoshi, M., & Hamada, H. (2016). The Flame Retardancy Study of the Furniture Made from Corrugated Cardboard. *Energy Procedia*, 89, s. 93-97.

Orconind. (2020). What is Corrugated Cardboard and Why is it Essential for Shipping Goods? Orcon Industries. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.2.2022]. Saatavissa: <https://www.orconind.com/what-is-corrugated-cardboard-and-why-is-it-essential-for-shipping-goods/>

Punainen Risti. (2022). Sodat. Punainen Risti. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.3.2022].

Saatavissa: <https://www.punainenristi.fi/tyomme/kansainvalinen-apu/sodat/>

Raiko, R. (1995). Poltto ja palaminen. Teknillisten tieteiden akatemia.

Rehome. (2021). Rehome. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.3.2022]. Saatavissa: <https://www.rehomefurniture.com/>

Rhim, J., Lee, J., & Hong, S. (2007). Increase in water resistance of paperboard by coating with poly(lactide). *Packaging Technology and Science*, 20(6), s. 393-402.

Roberts, J. (1996). *Chemistry of Paper*. Royal Society of Chemistry.

Seppälä, M. J. (2000). Paperin ja kartongin jalostus

Shaorui H., Weihong W., Mengjiao Z., Hongqiang Q., & Jianzhong X. (2016). Synergistic effect of silica sol and K₂CO₃ on flame-retardant and thermal properties of wood. *Thermal Analysis and Calorimetry*, 128, s. 825–832. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.3.2022]. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-016-5947>

Suomen Aaltopahviyhdistys ry. (2022). Aaltopahvi käyttäjän käsikirja. Suomen Aaltopahviyhdistys ry. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.2.2022]. Saatavissa: <https://www.aaltopahvi.fi/aaltopahvi>

Talbi, N., Batti, A., Ayad, R., & Guo, Y. (2009). An analytical homogenization model for finite element modelling of corrugated cardboard. *Composite Structures*, 88(2), s. 280–289. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.3.2022]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.04.008>

Thermopedia. (2011). Flammability. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.2.2022]. Saatavissa: <https://thermopedia.com/content/767/>

THL. (2021). Palonestoaineet. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.3.2022]. Saatavissa: <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/palonestoaineet>

Tukes. (2021). Huonekalujen turvallisuus. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). [Verkkoaineisto]. [Viitattu 8.2.2022]. Saatavissa: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/yleiset-kulutustavarat/huonekalut>

Turrini, D. (2017). Democratic Cardboard. Materials and design for a sustainable

society. *The Design Journal*, 20(1), s. 1682-1691. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.3.2022]. Saatavissa: www.tandfonline.com/journals/rfdj20

Vasiljević, J., Hadžić, S., Jerman, I., Černe, L., Tomšič, B., Medved, J., Godec, M., Orel, B., & Simončič, B. (2013). Study of flame-retardant finishing of cellulose fibres: Organic-inorganic hybrid versus conventional organophosphonate. *Polymer Degradation and Stability*, 98(12), s. 2602-2608.

WHO. (1997). Flame retardants: a general introduction. World Health Organization.

Williams, B., Ding, H., Hou, Z., Patrick, O., Lewis, F., Smith, A., & Sun, L. (2021). Highly efficient polyvinyl alcohol/montmorillonite flame retardant nanocoating for corrugated cardboard, s. 662-669. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.3.2022]. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42114-021-00299-w>

Yáñez, R., Alonso, J., & Parajó, J. (2004). Production of hemicellulosic sugars and glucose from residual corrugated cardboard. *Process Biochemistry*, 39(11), s. 1543-1551. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.3.2022]. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00283-8](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00283-8)

Yang, G., Liu, J., Xu, B., Liu, Z., Ma, F., & Zhang, Q. (2020). Effect of silicon-containing nitrogen and phosphorus flame-retardant system on the mechanical properties and thermal and flame-retardant behaviors of corrugated cardboard. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145(5), s. 2321-2334.

Zhang, L., Deng, X., Zhao, S., & Huang, Z. (1997). Biodegradable polymer blends of poly(3-hydroxybutyrate) and hydroxyethyl cellulose acetate. *Polymer*, 38(24), s. 6001-6007.