

Simo Karinkanta

**MYKEELI- JA LEVÄPOHJAISTEN
MATERIAALIEN KÄYTTÖ
PAKKAUKSISSA**

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Karinkanta Simo: Mykeeli- ja leväpohjaisten materiaalien käyttö pakkauksissa
(The Use of Mycelium and Algae-based Materials in Packaging)
Tekniikan kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Materiaalitekniikan koulutusohjelma
Toukokuu 2024

Pakkausmateriaalien kasvava kulutus on luonut tarpeen ympäristöystävällisemmille materiaaliratkaisuille. Työssä esitellään mykeelistä valmistettavien biokomposiittien ja levästä valmistettavien biomuovien valmistus, valmistamiseen vaikuttavia tekijöitä, materiaalien mekaanisia ominaisuuksia ja ympäristövaikutuksia. Työssä suoritetaan materiaalivertailu, jossa mykeelikomposiittia vertaillaan paisutettuun polystyreeniin (EPS) ja levästä valmistettavia biomuoveja korkea- sekä matalatiheysiseen polyeteeniin (PE-HD ja PE-LD) ja polypropeeniin (PP).

Mykeeli on sienien rihmasto-osa, joka kasvatettuna orgaanisen substraatin sekaan muodostaa komposiittirakenteen. Mykeelikomposiitin valmistamiseen vaikuttavia tekijöitä ovat sienilajike, kasvatusolosuhteet, käytetty substraatti ja mahdolliset kuuma- sekä kylmäpuristus menetelmät. Mykeelikomposiitit ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan materiaalivertailun perusteella samankaltaisia kuin EPS:stä valmistetut pakkaukset. Niiden korkeat puristus- ja taivutuslujuuksien arvot mahdollistavat niiden käytön pakkausmateriaaleina, joiden tehtävä on suojata ja tukea pakkauksien sisältämiä tuotteita. Mykeelistä valmistettujen pakkausten huono kosteudenkestävyys vaatii kuitenkin vielä kehitystä. Mykeelikomposiittien orgaaninen rakenne mahdollistaa niiden kierrätyksen biojätteenä, toisin kuin öljypohjaisella EPS:llä, joka ei ole biohajoavaa.

Levistä pystytään valmistamaan biomuoveja niiden sisältämien polysakkaridien avulla. Levät voidaan jaotella kolmeen eri pääryhmään niiden värin perusteella. Työssä esitellään punaisista, vihreistä ja ruskeista merileivistä saatavien karrageenin, algiinin ja agarin käyttöä biopohjaisten materiaalien valmistuksessa. Lisäksi työssä vertaillaan niiden mekaanisia ominaisuuksia ja ympäristövaikutuksia PE-HD, PE-LD ja PP muoveihin. Polysakkaridien erittely merileivistä sisältää yleensä erilaisia uutto-, alkali-, happo- ja neutraloimisvaiheita. Levistä valmistettavien biopohjaisten materiaalien mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi valmistusmenetelmät sekä käytetyt additiivit ja plastisoijat. Leväpohjaisten materiaalien ympäristövaikutukset ovat tutkimusten mukaan pienemmät kuin vastaavien öljypohjaisten muovien. Työssä esiteltyjen levästä valmistettujen muovien päätyessä luontoon ne hajoavat mikro-organismien vaikutuksesta muuttuen lopulta vedeksi, biomassaksi ja hiilidioksidiksi.

Avainsanat: Pakkausmateriaali, mykeeli, merilevä, karrageeni, algiini, agar

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Haluan kiittää kandidaatityön ohjaajaani Sanna Auvista tuesta ja avusta työn suorituksen aikana. Haluan kiittää myös läheisiäni tuesta työn kirjoittamisen aikana.

Tampereella, 19.5.2024

Päivittäjä Simo Karinkanta

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PAKKAUKSET JA MATERIAALIT	2
2.1 Biopohjaisten pakkausmateriaalien tarve	2
2.2 Mykeeli	3
2.2.1 Valmistusmenetelmät ja prosessit	3
2.2.2 Mekaaniset ominaisuudet	7
2.2.3 Sovellukset	12
2.3 Levä	12
2.3.1 Valmistusmenetelmät ja prosessit	15
2.3.2 Mekaaniset ominaisuudet	17
2.3.3 Sovellukset	21
3. MATERIAALIEN VERTAILU	22
3.1 Mykeeli	22
3.2 Levä	25
4. YHTEENVETO	29
LÄHTEET	31

LYHENTEET JA MERKINNÄT

PE Polyeteeni

PE-HD Korkeatiheksinen polyeteeni

PE-LD Matalatiheksinen polyeteeni

PP Polypropeeni

EPS Paisutettu polystyreeni

KCl Kaliumkloridisuola

NaOH Natriumhydroksidi

KOH Kaliumhydroksidi

WVP Vesihöyryn läpäisevyys

HCl Suolahappoa

Na₂CO₃ Natriumkarbonaatti

CED Kumulatiivinen energian tarve elinkaaren aikana

IPCC GWP100 Lämmityspotentiaali 100 vuoden aikana.

1. JOHDANTO

Biopohjaiset materiaalit ovat uusiutuvista ja orgaanisista raaka-aineista valmistettuja. Työssä käydään läpi mykeelistä ja levästä valmistettavien biopohjaisten materiaalien tutkimuksen ja sovellusten nykytilaa sekä erityisesti niiden käytön mahdollisuuksia kestäväen kehityksen mukaisissa pakkausratkaisuisissa. Öljystä valmistettujen muovipakkausten aiheuttamat päästöt, niiden päätyminen luontoon sekä valmistuksen sidonnaisuus uusiutumattomiin luonnonvaroihin ovat luoneet tarpeen biopohjaisille materiaaleille ja niiden tutkimukselle. Uusina innovatiivisina ratkaisuinä on esitetty uusiutuvista luonnonvaroista valmistettuja mykeeli- ja leväpohjaisia materiaaleja. Niiden avulla voidaan vähentää nykyisten käytössä olevien öljystä valmistettujen muovien ympäristövaikutuksia.

Työn tavoitteena on tutkia mykeeli- ja leväpohjaisia materiaaleja sekä pohtia niiden soveltuvuutta pakkausmateriaalikäyttöön. Työssä käydään läpi, mistä mykeeli- ja levämateriaalit ovat tehty, mitkä ovat niiden valmistamiseen vaikuttavia tekijöitä, ja millaiset mekaaniset ominaisuudet sekä ympäristövaikutukset materiaaleilla on. Mykeeli -ja leväpohjaisille materiaaleille suoritetaan työssä materiaalitarkastelu, jossa mykeeliä vertaillaan mekaanisilta ominaisuuksiltaan ja ympäristövaikutuksiltaan EPS:ään ja leväpohjaisia materiaaleja PP, PE, PE-HD ja PE-LD:hen.

Kappaleessa 2. pakkaukset ja materiaalit käydään läpi biopohjaisten pakkausmateriaalien tarvetta, esitellään mykeeli- ja levämateriaalien alkuperää sekä niiden valmistamisen sisältämiä prosesseja ja vaiheita. Seuraavaksi kappaleessa 3. materiaalien vertailu suoritetaan materiaalien mekaanisten ominaisuuksien ja ympäristövaikutusten tarkastelu sekä vertailu öljypohjaisiin muoveihin. Työ on tehty kirjallisuusselvityksenä eikä se sisällä kokeellista tai laskennallista osuutta.

2. PAKKAUKSET JA MATERIAALIT

Pakkauksista on muodostunut 2000-luvulla päivittäinen ja tärkeä osa yhteiskuntaamme, ja koko ajan kasvava pakkausmateriaalien käyttö ja niiden aiheuttamat ympäristövaikutukset ovat yleisesti nykypäivänä tunnistettu ongelma. Pakkausmateriaalit ovat välttämätön osa nykypäivän tuotanto- ja kulutusprosessia. Niillä tarkoitetaan materiaaleja, joita käytetään tuotteiden kuljetukseen, suojaamiseen, säilyttämiseen sekä esillepanoon [1]. Pakkausmateriaalit kattavat laajan kirjon erilaisia materiaalityyppejä eri tarkoituksiin, ja niistä jokaisella on omat hyvät sekä huonot puolensa.

Yleisimmin käytettyjä pakkausmateriaaleja ovat öljypohjaiset muovimateriaalit, jotka ovat tuotantokapasiteetiltaan, muokattavuudeltaan ja mekaanisilta ominaisuuksiltaan käytännöllisiä sekä tehokkaita vaihtoehtoja. Muovien lisäksi muita yleisesti käytettyjä pakkausmateriaaleja ovat paperi, pahvi, lasi, puu ja metalli. [2]

2.1 Biopohjaisten pakkausmateriaalien tarve

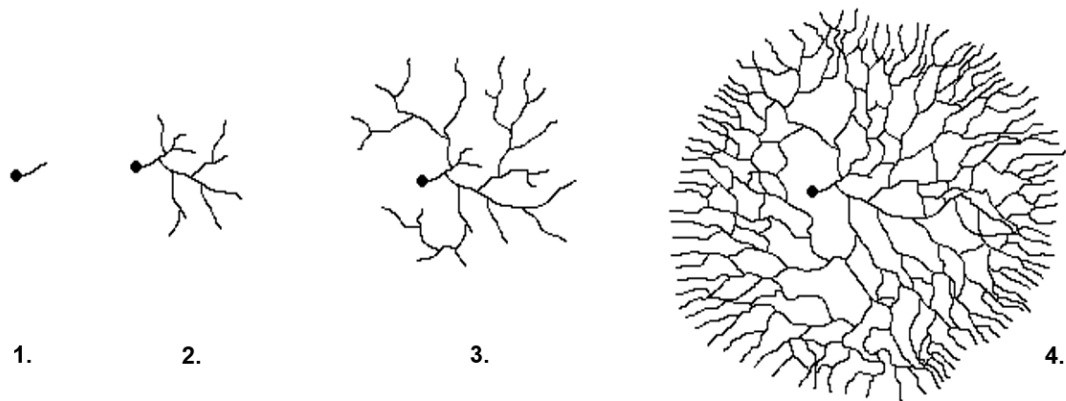
Ympäristötietoisuuden ja kestävä kehityksen tavoitteiden tärkeyden korostuessa ekologisten ratkaisujen tarve on kasvanut merkittävästi. Biopohjaisilla materiaaleilla on mahdollisuus korvata perinteisiä öljypohjaisia pakkausmateriaaleja ja vähentää niiden aiheuttamia ympäristövaikutuksia. Euroopan unionin tavoitteena on päästä muovin kierrätyksessä 55 %:n tehokkuuteen vuoteen 2030 mennessä, ja jotta tähän tavoitteeseen päästään, on käytettyjen materiaalien sekä niiden kierrätyksen kehityttävä huomattavasti [3].

Biomuovit valmistetaan uusiutuvista luonnonvaroista, kuten esimerkiksi kasveista sekä tässä työssä käsiteltävistä sienistä ja levistä. Ne ovat määritelmänsä mukaan sellaisia materiaaleja, joilla on ominaisuutena biopohjaisuus, biohajoavuus tai molemmat edellä mainituista ominaisuuksista. Biomuovit voidaan jaotella niiden ominaisuuksien perusteella myös bio- ja öljypohjaisiin materiaaleihin sekä biohajoaviin ja hajoamattomiin. [4] Biopohjaisten muovien etu on niiden mahdollisuus vähentää riippuvuutta öljypohjaisiin raaka-aineisiin. Sen ansiosta valmistuksessa aiheutuvia kasvihuonepäästöjä, öljyn kulutusta sekä muovin päätymistä ekosysteemiin pystytään vähentämään. Biohajoavuus on myös tärkeä ominaisuus biomuoveille. Se tarkoittaa, että materiaali hajoaa luonnossa mikro-organismien vaikutuksesta, muuttuen lopulta vedeksi, biomassaksi ja hiilidioksidiksi. On kuitenkin huomioitava, että kaikki biomuoveiksi luokitellut materiaalit eivät ole biohajoavia. Biohajoavat biomuovit ovat merkittävästi ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja öljypohjaisille muoveille, jotka voivat luontoon päätyessään säilyä siellä pitkiä aikoja. Tässä työssä käsitellään mykeeli- sekä leväpohjaisia materiaaleja, jotka ovat biopohjaisia ja biohajoavia. [5], [6]

2.2 Mykeeli

Sienet ovat monimuotoinen eliöryhmä, ja ne luokitellaan eukaryoottien joukkoon. Ne hankkivat ravintonsa hajottamalla orgaanisia yhdisteitä solujensa ulkopuolelta ja ovat rakenteeltaan joko rihmastollis- tai hiivarakenteisia. Tässä työssä käsitellään rihmastollisrakenteisia sieniä, jotka koostuvat suurimman osan elinkaarestaan sieni-itiöistä ja niistä haarautuneista soluista eli hyyfeistä. [7]

Sienien pienin ja ensimmäinen rakenteellinen osa on sieni-itiö, joka näkyy kuvassa 1 mustana pisteenä vasemmassa reunassa vaiheessa yksi (kuva 1, vaihe 1). Itiö on sienien yksisoluisen rakenteellinen osa, joka itää ympäristöönsä ja levittäytyy siihen itiöputkien avulla. Itiöputket ovat sieni-itiöstä ympäristöönsä kasvava lankamainen sylinterirakenne, jonka tarkoitus on levittäytyä mahdollisimman ravintorikkaaseen ja tarpeeksi kosteaan ympäristöön (kuva 1, vaihe 2) mahdollistaakseen sienien tehokkaan toimimisen, kasvamisen ja jatkuvan levittäytymisen. Solurakenteisen itiöputken kasvaessa ja haaroittuessa se tunnetaan nimityksellä hyyfa, ja kun sienien hyyfat kasvavat, ne muodostavat haaroittuneen ja verkkomaisen jatkuvan kokonaisuuden, jota kutsutaan mykeeliksi (kuva 1, vaihe 4). Mykeeli on sienien rihmastollinen rakenne, joka koostuu siis hyyfaverkostosta ja joka kasvaa yleisesti maaperässä puhjetessaan pintaan ainoastaan kasvattaakseen itiöemän sieni-itiöiden ilmateitse tapahtuvaa levittäytymistä varten. [8], [9]



Kuva 1: Mykeelin kasvuvaiheita [10].

2.2.1 Valmistusmenetelmät ja prosessit

Mykeelin hyödyntäminen pakkausmateriaalien valmistuksessa vaatii tarkkaan suunniteltuja valmistusmenetelmiä sekä prosesseja, jotta halutun kaltainen tuote saadaan valmistettua. Kasvatustila jossa mykeelipohjaisia materiaaleja valmistetaan, on oltava lämpötila- ja kosteuskontrolloitu, jotta saavutetaan optimaaliset kasvuolosuhteet. Yleisesti noudatettavat arvot kasvatustiloissa ovat eri tutkimuslähteiden perusteella lämpötilalle 24–30°C ja ilmankosteudelle 50–80 % [11–17]. On kuitenkin huomioitavaa, että jokaiselle sienilajikkeelle on omat optimaaliset

kasvuolosuhteet ja liian korkean lämpötilan tai ilmankosteuden seurauksena kasvunopeus tai mykeelikomposiitin matriisin rakenne voi kärsiä. Sienen lajikkeella on siis suurin merkitys mykeelipohjaisia materiaaleja suunniteltaessa, mutta myös substraatilla ja valmistusmenetelmällä on omat vaikutuksensa lopullisen materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. [11–17]

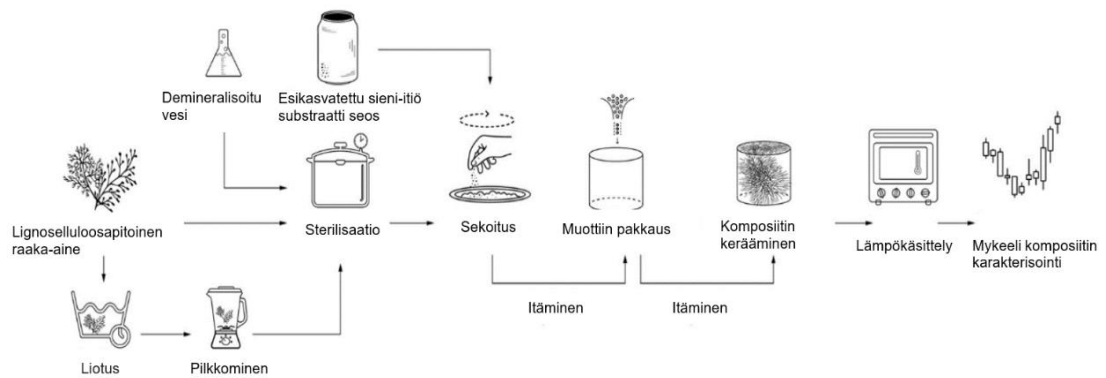
Substraatti on myykelin kasvatuksessa käytetty raaka-aine, joka on ravintorikasta ja rakenteeltaan sellaista, että mykeeli pääsee kasvamaan sen joukkoon. Substraatin tehtävä mykeelipohjaista materiaalia valmistettaessa on luoda perusta mykeelin ja substraatin väliselle komposiittirakenteelle. Lisäksi se toimii sienirihmaston ravinnon lähteenä mahdollistaakseen ja edistääkseen sen kasvua ja levittäytymistä ympäristöönsä. Mykeeli käyttää substraatin sisältämiä hiilihydraatteja, proteiineja sekä muita ravintoaineita energianaan kasvamiseen [18]. Substraattivaihtoehdot voivat vaikuttaa mykeelistä ja substraatista muodostuvan komposiitin ominaisuuksiin monin eri tavoin. Esimerkiksi substraatin kosteuspitoisuus, rakenne ja ravintoarvot vaikuttavat sienirihmaston kasvuun ja siten myös komposiitin vahvuuteen kuin myös tiheyteen. Substraattina käytettävät materiaalit voivat olla maatalous-, teollisuus- tai kuluttajakäytössä muodostunutta orgaanista jätettä. Näistä kolmesta substraatin saantikanavasta tulevat vaihtoehdot voidaan jaotella tarkemmin kasveihin sekä suurempi tiheyksisiin lehti- ja pienempi tiheyksisiin havupuujätteisiin [18]. Muita yleisesti mykeelikomposiitin valmistuksessa käytettyjä substraatteja edellä mainittujen puujätteiden ja kasvien lisäksi ovat hamppu, puuvilla sekä erilaiset viljat kuten riisi, vehnä ja kaura. [13], [15], [16]

Substraatin käytössä on varmistettava, että substraattina käytetty materiaali on puhdistettu ja steriloitu tarkasti mahdollisista epäpuhtauksista, jotka voivat estää tai vähintään vaikuttaa negatiivisesti sienirihmaston kasvuun ja levittäytymiseen. Puhdistamiseen yleisesti käytettyjä menetelmiä ovat autoklaavi ja pastörointi. Autoklaavi on laite, jota käytetään erilaisten materiaalien, kuten ruoan, lääkkeiden ja laboratoriovälineiden sterilointiin. Se toimii korkean lämpötilan ja paineen avulla tappamalla ja neutralisoimalla mikro-organismeja kuten bakteereita, viruksia ja itiöitä. Autoklaavissa materiaalia pidetään 15–120 minuuttia 115–121 °C lämpötilassa. Pastöroinnissa materiaali altistetaan noin 100 °C lämpötilalle 100 minuutin ajan [12]. [17], [18], [19]

Mykeelin ja substraatin valmistus biokomposiitiksi voidaan jakaa yleensä kuuteen eri vaiheeseen: [13], [18], [19]

1. Ensimmäisessä vaiheessa mykeeli esikasvatetaan homogeenisessä substraatissa, jotta saadaan kasvuvalmis alku.

2. Toisessa vaiheessa mykeelin pääkasvatus vaiheen kasvuaineena käytettävä substraatti puhdistetaan mikro-organismeista autoklaavin tai pastöroinnin avulla.
3. Kolmannessa vaiheessa mykeeliä sekoitetaan puhdistettuun pääkasvatusvaiheessa käytettävään substraattiin.
4. Neljännessä vaiheessa mykeeli-substraatti seos siirretään kasvumuottiin.
5. Viidennessä vaiheessa mykeeli kasvatetaan substraatin sekaan. Kasvatus voidaan jakaa kahteen vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe on muotissa tapahtuvan komposiitin muodostuminen, jossa mykeeli on käyttänyt substraatin ravinteita kasvamiseen ja muodostanut sen sekaan laajan sekä tiheän verkoston, joka sitoo materiaalit yhteen. Toinen vaihe on muotin ulkopuolella tapahtuva kasvatus, jonka idea on mahdollistaa ulkopintojen kiinteytyminen.
6. Viimeisessä vaiheessa komposiitti lämpökäsitellään mykeelin kasvun lopettamiseksi.



Kuva 2: Mykeeli komposiitin valmistuksen vaiheita. [19]

Mykeelin kasvatus substraatissa kestää noin 5–42 päivää riippuen käytetyn substraatin tyypistä sekä mykeelin sienilajikkeesta. Kasvuajalla pystytään vaikuttamaan halutun materiaalin rakenteeseen sekä ominaisuuksiin. Mykeelin pidemmällä kasvuajalla on havaittu olevan negatiivinen vaikutus leikkausmoduuliin ja elastisiin ominaisuuksiin, ja positiivinen vaikutus puristus- sekä taivutuslujuuteen. [11–17], [19] Taulukossa 1 on listattu eri sienilajikkeiden substraattivaihtoehtoja ja valmistusvaiheita eri tutkimuslähteistä.

Taulukko 1: Mykeelin valmistuksen vaiheiden tietoja eri tutkimus lähteistä.

Sieni lajike	Substraatti	Sterilisaatio	Kasvuympäristö	Kasvu aika	Kuivaus	Sovelluskohde	Lähde
<i>Ganoderma lucidum</i>	sahanpuru ja hedelmien kuoria	120 °C:ssa vähintään 20 minuuttia ja jäähdytetään sitten	Lämpötila 26–28 °C ja kosteus 70–80 %	14 päivää + 4–9 päivää	24 h uunissa 50 °C lämpötilassa	Lastulevy tyyppinen tuote. Korkeatiteys	[11]
<i>Trametes versicolor</i>	Irtopellavajäte, irtohamppu, pellava, irtopuu, irta-olki.	autoklaavikoneessa 20 minuutin ajan 121 °C:ssa	28 °C	8 päivää + 8 päivää.	kiertoilmauuni ssa 70 °C:n lämpötilassa 5–10 tuntia,	vaahtomuovi	[12]
<i>Pleurotus Ostreatus</i>	Riisinkuori, vehnän olki, kuorijauhe, puunlastu, saksanpähkinäkuori	Autoklaavi	kasvutila on pimeä, kosteus 75–80 %, lämpötila 24 °C:een	7 päivää + 7 päivää	100 °C:ssa 45 minuuttia	vaahtomuovi	[13]
<i>Pleurotus ostreatus & Trametes</i>	Pyökkisahanpurua, 1–3 cm rapsin olkea ja heikko laatuista puuvillakuitua	Autoklaavi	25 °C	14 päivää pimeässä + 10	80 °C:ssa 24 tuntia	-	[14]
<i>Lacteus innocuum</i>	Alaskan koivun maseroitua sahanpurumassaa (<5 mm), hirssinjyviä, vehnäleseitä, luonnonkuitua ja	-	-	14–42 päivää	uunissa 60 °C 24 tuntia.	vaahtomuovi	[15]
<i>Pleurotus Ostreatus & Coriolus</i>	puulastut ja hamppukuidut	Kiehuvaan veteen 100 minuutiksi.	Pimeässä olosuhteissa huoneenlämmössä	30 päivää	125 °C ja 2 tuntia	vaahtomuovi	[16]
<i>Coriolus Versicolor</i>	puulastut ja hamppukuidut	0,3 % vetyperoksidiliuos	Pimeässä olosuhteissa huoneenlämmössä	30 päivää	125 °C ja 2 tuntia	vaahtomuovi	[16]
<i>Pleurotus ostreatus & Coprinus comatus</i>	Olki	Autoklaavissa 30 min lämpötilassa 121 °C ja 16 psi paineessa.	Lämpötila 25.7 ± 0.2 °C ja 50.5 ± 5.6 %	46 päivää	100 °C ja 6 tuntia	Vastaava kuin EPS	[17]

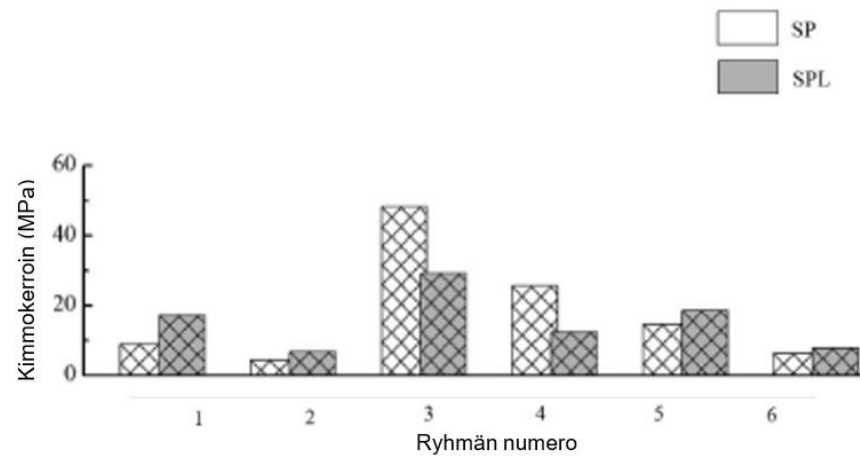
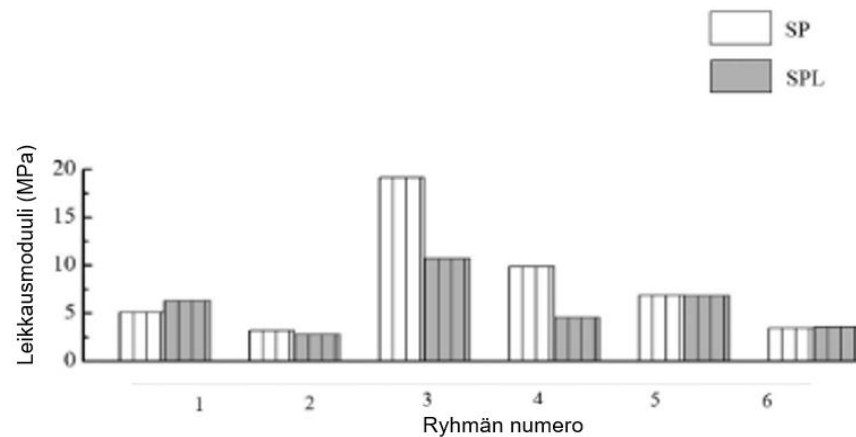
2.2.2 Mekaaniset ominaisuudet

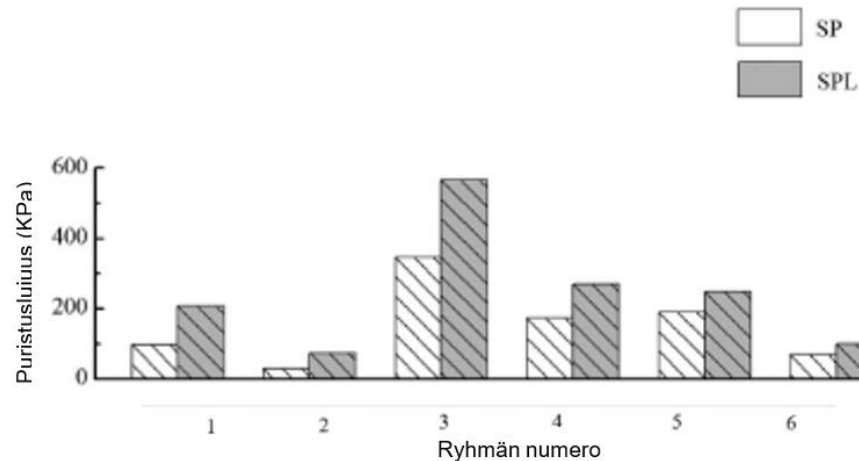
Tutkimukset mykeelin mekaanisista ominaisuuksista ovat keskeisessä roolissa niiden soveltuvuuden arvioimiseksi erilaisiin käyttökohteisiin, kuten esimerkiksi pakkausmateriaaleiksi. Mykeelin mekaaniset ominaisuudet voivat vaihdella riippuen käytetystä substraatista, kasvuolosuhteista ja käytetyn sienen lajikkeesta. Tässä kappaleessa tarkastellaan mykeelistä ja substraatista valmistetun komposiittimateriaalin keskeisiä mekaanisia ominaisuuksia kuten puristuslujuutta, taivutuslujuutta, vetolujuutta ja kimmokerrointa sekä yleisesti mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä.

Mykeelistä valmistettujen komposiitti materiaalien kasvatusmenetelmien vaikutusta mekaanisiin ominaisuuksiin voidaan arvioida Z Yang et al. [15] tekemän tutkimuksen avulla, jossa tutkitaan mykeelikomposiittien valmistamisessa käytettyjen menetelmien vaikutusta lopullisen mykeelikomposiittimateriaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Taulukon 2 komposiiteissa SP näytteitä on kasvatettu kaksi viikkoa ja SPL näytteitä kuusi viikkoa. SP ja SPL näytteiden sekoittamiseen on käytetty kolmea eri menetelmää, joissa 5 millimetrin maksimikoon omaavaa Alaskan koivupuusubstraattia ja mykeeliä sekoitetaan kasvatusmuotteihin. Sekoitustavassa 1 substraatti ja mykeeli sekoitetaan tasaisesti keskenään, jonka jälkeen ne pakataan kasvatusmuotteihin ja siirretään lämpötila- ja kosteuskontrolloituun kasvatustilaan. Sekoitustavassa 2 substraattia ja mykeeliä kasvatetaan aluksi polypropeenipusseissa ennalta määritellyn ajan verran, jonka jälkeen muodostunut komposiittirakenne hajotetaan ja se siirretään sylinterimäiseen kasvumuottiin uudelleen kasvamaan. Substraatin ja mykeelin kasvattamisella, rikkomisella ja uudelleen kasvattamisella tavoitellaan tiheämpää rakennetta, koska mykeelille on ominaista vahvistaa kasvuaan katkenneiden rihmastojen alueella. Sekoitustavan 3 metodi noudattaa samaa kaavaa, kuin tapa 1, mutta substraatin ja mykeelin joukkoon lisätään niiden keskinäisen sekoittamisen vaiheessa luonnonkuituja, joiden määrä on 50 % substraatin kuivapainosta. Kolmen eri sekoitusvariaation lisäksi kaikkia näytetyyppejä pakataan kasvatusmuotteihin tiheästi ja väljästi. [15] Kuvassa 3 on esitetty komposiittien kimmokerroin, kuvassa 4 leikkausmoduuli ja kuvassa 5 puristuslujuus.

Taulukko 2: Mykeelikomposiittien sekoitustapa, pakkaustiheys ja kasvu-aika [15].

Ryhmän numero	Sekoitus tapa	Pakkaus tiheys	Kasvu-aika
SP1	Tapa 1	Tiheä	2 Viikkoa
SP2	Tapa 1	Väljä	2 Viikkoa
SP3	Tapa 2	Tiheä	2 Viikkoa
SP4	Tapa 2	Väljä	2 Viikkoa
SP5	Tapa 3	Tiheä	2 Viikkoa
SP6	Tapa 3	Väljä	2 Viikkoa
SPL1	Tapa 1	Tiheä	6 Viikkoa
SPL2	Tapa 1	Väljä	6 Viikkoa
SPL3	Tapa 2	Tiheä	6 Viikkoa
SPL4	Tapa 2	Väljä	6 Viikkoa
SPL5	Tapa 3	Tiheä	6 Viikkoa
SPL6	Tapa 3	Väljä	6 Viikkoa

**Kuva 3:** Mykeelikomposiitin kimmokerroin. [15]**Kuva 4:** Mykeelikomposiitin leikkausmoduuli. [15]



Kuva 5: Mykeelikomposiitin puristuslujuus. [15]

Kuvista 3–5 voidaan todeta, että näyteryhmällä 3 (SP3 ja SPL3) on suurimmat mekaanisten ominaisuuksien arvot verrattuna muihin tutkittaviin näytteisiin. Ryhmän kolme näytteet ovat sekoitettu tavon kaksi mukaan eli niitä esikasvatetaan polypropeenipussissa, jonka jälkeen niiden rakenne hajotetaan ennen lopulliseen kasvumuottiin siirtämistä. Lopulliseen kasvumuottiin hajotettu mykeelin ja substraatin seos on pakattuna tiiviisti. [15]

Tutkimusten tulosten mukaan mykeelin ja substraatin sekoittamisella sekä kasvuajalla on merkittävä vaikutus lopullisen materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Näytteet, jotka olivat pakattu tiiviisti kasvatusmuotteihin, omasivat suuremmat tiheyden, elastisen moduulin ja puristuslujuuden arvot verrattaessa väljästi kasvatusmuotteihin pakattuun ainekseen. Mykeelin ja substraatin kasvatus tiheydellä nähdään jokaisessa näyteryhmässä olevan vaikutuksia mekaanisiin ominaisuuksiin. Tiheästi kasvumuottiin pakattu aines edesauttaa tiiviimmän mykeelimatriisin kasvua substraatin sekaan, jolloin komposiitista tulee rakenteeltaan homogeenisempää. Kuitenkin tiheyden kasvaessa komposiittimateriaalin rakenne ei pysty liikkumaan ja adaptoitumaan ulkoiseen voimaan niin hyvin kuin pienemmällä tiheydellä pakatut näytteet. [15]

Mykeelikomposiittien jälkikäsitteilyllä voidaan myös vaikuttaa niiden mekaanisiin ominaisuuksiin. F.V.W Appels et al. [14] suorittamassa tutkimuksessa tutkittiin kuuma- ja kylmäpuristettuja sekä puristamattomia mykeelikomposiitteja. Tutkimuksen tulosten mukaan kuumapuristetut näytteet omasivat suurimpien tiheyden arvojen lisäksi korkeimmat vetolujuuden ja kimmomodulin arvot. Kuumapuristus suoritettiin materiaaleille 150 °C lämpötilassa ja kylmäpuristus 20 °C lämpötilassa. Kuumapuristetut näytteet olivat mekaanisilta ominaisuuksiltaan vahvempia, jäykempiä, mutta hauraampia verrattaessa kylmäpuristettuihin ja puristamattomiin näytteisiin. [14] X.Y. Chan et al. [11] tutkimuksessa on valmistettu samankaltainen mykeelikomposiitti, joka kuumapuristetaan 120 °C lämpötilassa. Taulukosta 3 voidaan havaita, että kuumapuristuksen ansiosta materiaalilla on merkittävästi korkeammat mekaanisten ominaisuuksien arvot verrattuna puristamattomiin

materiaaleihin [11]. Tiheydellä on merkittävä vaikutus pakkausmateriaaleihin, koska se vaikuttaa lopullisen tuotteen painoon, mutta myös samalla mekaanisiin ominaisuuksiin. On tärkeää siis huomioida mykeelikomposiittien mekaanisten ominaisuuksien riippuvuus lopullisen materiaalin tiheydestä.

Vetolujuus on tärkeä mittari mykeelinkomposiitin kyvystä vastustaa vetävää voimaa. Tutkimukset ovat osoittaneet, että mykeeli pystyy kehittämään huomattavaa vetolujuutta, erityisesti, kun sienirihmasto on tiheästi verkostoitunut substraatin kanssa. Tämä ominaisuus tekee mykeelikomposiiteista vahvoja ja kestäviä materiaaleja. Taulukosta 2 voidaan nähdä vetolujuuden arvon kasvavan tiheyden kasvaessa, joka osoittaa jälleen kasvatetun komposiitin tiheyden merkityksen materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. [15], [20] Puristuslujuus puolestaan määrittää mykeelin kykyä kestää puristavaa voimaa. Sienirihmasto kykenee luomaan tiiviin ja vahvan rakenteen substraatin kanssa, mikä johtaa hyviin puristuslujuusominaisuuksiin. Kuvassa 9 voidaan nähdä puristuslujuuden olevan korkeimmillaan näyteryhmässä kolme. [15]

Muita tutkimuksissa kasvatukseen vaikuttavia tekijöitä on mainittu olevan kasvatustilan hiilidioksidipitoisuus (CO_2). F.V.W Appels et al. [21] mukaan matalassa CO_2 -pitoisuudessa ja vähäisessä valossa kasvatetut näytteet olivat paremmat murtolujuuden ja kimmomoduulin arvot kuin korkeassa CO_2 -pitoisuudessa ja vähäisessä valossa kasvatetut näytteet. Valaistussa tilassa paremmat mekaaniset ominaisuudet olivat näytteillä, jotka olivat korkeassa CO_2 -pitoisuudessa. Heikkoutena mykeelistä valmistetuilla komposiittimateriaaleilla on huono kosteudenkestävyys. Materiaalin orgaaninen koostumus aiheuttaa nesteiden helpon imeytymisen materiaaliin. Tämä aiheuttaa rajoitteita sen käytölle kosteusrasitteisissa ympäristöissä, ja suora kosketus nesteiden kanssa voi sa aikaan materiaalissa haitallisia vaikutuksia kuten pehmenemistä, muodonmuutosta ja mahdollista komposiittirakenteen hajoamista. [13]

Taulukko 3: Mykeelikomposiittien mekaanisia ominaisuuksia eri tutkimuslähteistä.

Sienilaji	Substraatti	Tiheys (g/cm ³)	Paksuus (mm)	Vetolujuus (MPa)	Kimmokerr oin (MPa)	Venymä murtuessa (%)	Taivutuslujuus (MPa)	Puristuslujuus (MPa)	Lähde
<i>Trametes multicolor</i>	Rypsi olki	0,1	13,9	0,04	4	4,7	0,22	-	[20]
<i>Trametes multicolor</i>	Sahanpuru (Pyökki)	0,17	15,2	0,05	13	1,5	0,29	-	[20]
<i>Pleurotus Ostreatus</i>	vehnä olki						0,37	0,21	[13]
<i>Pleurotus Ostreatus</i>	Rypsi olki	0,24	11,7	0,03	6	1,4	0,24	-	[20]
<i>Pleurotus Ostreatus</i>	Puulastu	-	-	-	-	-	0,39	0,32	[13]
<i>Pleurotus Ostreatus</i>	Puuvilla	0,35	8,8	0,15	59	0,9	0,86	-	[20]
-	-	0,0597– 0,187	-	-	1,14–1,32	-	-	0,31–0,51	[12]
<i>Pleurotus Ostreatus</i>	Puuvilla	0,39	9,5	0,24	97	0,7	0,87	-	[20]
<i>Ganoderma lucidum</i>	Sahanpuru ja hedelmien kuoret	0,954	-	1,55	-	-	2,68	4,44	[11]
<i>Pleurotus ostreatus</i> & <i>Coprinus co-</i>	Olki	0,136– 0,283	-	-	0,15–4,55	-	-	-	[17]

2.2.3 Sovellukset

Nykyään mykeelipohjaisille biokomposiittimateriaaleille on kehittynyt monipuolisia käyttömahdollisuuksia pakkausmateriaaleissa sekä muissa sovelluskohteissa kuten rakentamisessa, huonekaluvalmistuksessa ja vaatetusteollisuudessa. Mykeelikomposiitin mekaaniset ominaisuudet ovat suorituskykyisiä moniin pakkausmateriaalisovelluksiin. Materiaalin ominaisuuksia voidaan muokata valmistetun mykeelikomposiitin tiheyden kontrolloinnilla, ja muokattavuutensa ansiosta se soveltuu erinomaisesti kilpailemaan EPS:n käyttökohteissa. Mykeelipohjaisista materiaaleista valmistetut tuotteet edustavat kestävän kehityksen innovaatioita pakkausmateriaaleissa niiden ympäristöystävällisyyden ansiosta. Mykeelin biopohjaisuus mahdollistaa pakkauksen käyttötarpeen loppuessa sen kierrättämisen biojätteenä. Elinkaarensa loppuun tullut mykeelipakkaus voidaan siis käyttää esimerkiksi uuden pakkauksen valmistuksessa käytettävänä substraattina. [17]

Mykeelituotteen lopullista muotoa voidaan muokata tarkasti valitsemalla kasvatusmuotti, joka määrää lopullisen tuotteen muodon, tai leikkaamalla mykeelikomposiittimateriaalia haluttuun muotoon. Tämä mahdollistaa monimuotoisten ja käytännöllisten pakkausten valmistuksen eri käyttötarkoituksiin. Kuvassa 6 on esitelty mykeelistä valmistettuja käytössä olevia pakkauksia.



Kuva 6: Mykeelistä valmistettuja pakkauksia. [22–24]

2.3 Levä

Jopa 75 % maapallon pinta-alasta on vesistöjen peitossa ja ne toimivat ihanteellisena kasvuympäristönä erilaisille merileville, jotka tunnetaan myös nimellä merimakrolevät. Merilevät ovat monisoluisia fotosynteesisiä organismeja, joiden kasvuympäristönä toimii vesi. Ne voidaan

jaotella kolmeen eri pääryhmään niiden värien perusteella, jotka määräytyvät levien yksilöllisistä pigmenttiominaisuuksista. Eri värityksen omaavilla merilevillä on niiden pigmentin perusteella määräytyviä polysakkarideja, joita voidaan käyttää erilaisissa pakkausmateriaalisovelluksissa. Levistä saatavilla polysakkarideilla, kuten karrageenilla, agarilla ja algiinilla on ainutlaatuiset mekaaniset, fysikaaliset ja antibakteeriset ominaisuudet biohajoavuuden lisäksi, joka mahdollistaa niille hyvät mahdollisuudet nykyisten biopohjaisten muovien markkinoilla. [25]

Ruskeat merilevät sisältävät runsaasti pigmenttejä, jotka vaihtelevat keltaisesta tummanruskeaan väritykseen. Yleisimpiä ruskeita merilevälajikkeita ovat esimerkiksi *Saccharina sp*, *Himanthalia sp* ja *Sargassum sp*. Ruskeista merilevistä saatavia biomuovisovelluksissa tärkeitä polysakkarideja ovat selluloosa, fukoidaani ja algiini. [26]

Yleisimpiä punaisia merilevälajikkeita ovat *Melanothamnus sp*, *Palmaria sp* ja *Acanthophora sp*. Punaiset merilevät sisältävät polysakkarideja kuten agaria, karrageenia ja selluloosaa. Edellä mainituista polysakkarideista voidaan valmistaa esimerkiksi erilaisia biohajoavia muovikalvoja. [26], [27]

Vihreät merilevät sisältävät suuren määrän klorofylliä, joka tunnetaan keskeisestä roolistaan fotosynteesissä. Sen vihertävä pigmentti välittää kasveille, leville ja sinileville niiden tyypillistä vihreää väritystä. Vihreän merilevän seinämät sisältävät runsaasti biomuovin tuotannossa hyödynnettäviä polysakkarideja kuten ulvaa (9–36 %) ja selluloosaa (1–15 %) [25]. [26]

Levästä saatavaa algiinia löytyy eniten ruskeista merilevistä. Algiini on ruskean merilevän soluseinien rakennekomponentti, joka esiintyy algiinihapon kaksiarvoisten suolojen muodossa ja muodostaa solujen välisen geelimatriisin. Ruskeat merilevät sisältävät algiinia useimmiten 10–50 % niiden kuivapainosta. Karrageenia saadaan pääasiallisesti punaisista merilevistä. Se on lineaarinen polysakkaridi, joka voidaan jakaa kolmeen eri pääryhmään κ -, ι - ja λ -karrageeni. Tässä työssä käsitellään karrageenin kaikkia muotoja yleisellä tasolla. Agar on punaisista merilevistä saatava polysakkaridi, jota uutetaan *Gelidium*-, *Gracilaria*- ja *Pterocladia*-sukuista levistä. Sen ominaisuutena on vahva geelityvyys, jonka vuoksi sitä on käytetty paljon ruoka- ja lääkekäytännöissä sovelluksissa ennen nykyisiä kokeiluja pakkausmateriaalien saralla [27]. [28]

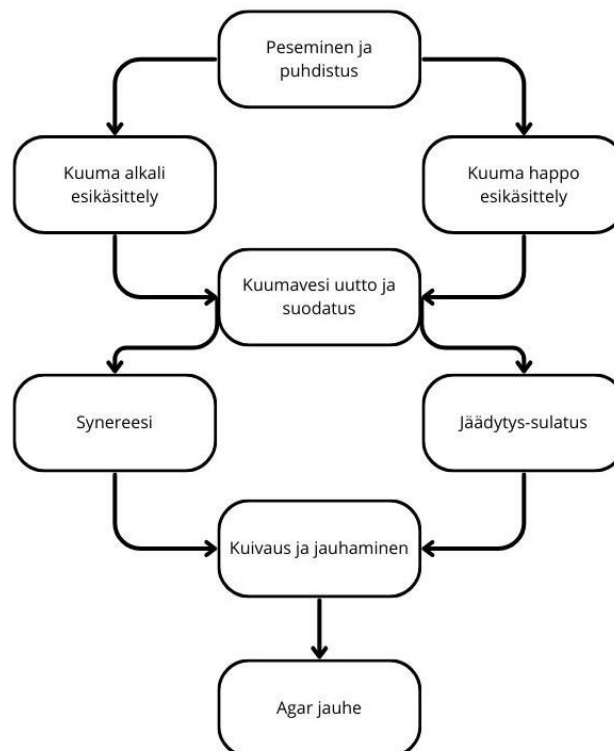
Taulukko 4: Merilevälajikkeita, värejä, valmistustapoja ja sovelluskohteita eri tutkimuslähteistä.

Merilevä lajike	Väri	Polysakkaridi	Valmistustapa	Sovelluskohde	Lähde
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	Punainen merilevä	κ-karrageeni	Liutinvalu	Karrageeni kalvo	[26]
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	Punainen merilevä	κ-karrageeni	Liutinvalu	Puolijalostettu karrageeni kalvo	[26]
<i>Gelidium sesquipedale</i>	Punainen merilevä	Agar	Liutinvalu	Agar kalvo	[26]
<i>Sargassum sp</i>	Ruskea merilevä	Algiini	Liutinvalu	Algiini kalvo	[26]
<i>Ulva fasciata</i>	Vihreä merilevä	Selluloosa	Liutinvalu	Karboksimeetylliselluloosa kalvo	[26]
<i>Furcellaria lumbicalis</i>	Punainen merilevä	Karrageeni	Uutetaan kuumalla alkalilla (KOH- tai NaOH-liuokset) ja kuumasuodatetaan huokoisen lasisuodattimen läpi.	Karrageeni kalvo	[29]
<i>Sargassum fluitans</i>	Ruskea merilevä	Algiini	Korkean ja matalan lämpötilan alkalinen uutto.	-	[30]
<i>Sargassum oligocystum</i>	Ruskea merilevä	Algiini	Korkean ja matalan lämpötilan alkalinen uutto.	-	[30]
<i>Sargassum baccularia</i>	Ruskea merilevä	Algiini	Kylmä- ja kuumamenetelmä.	-	[31]
<i>Sargassum binderi</i>	Ruskea merilevä	Algiini	Kylmä- ja kuumamenetelmä.	-	[31]
<i>Gracilaria arcuata</i>	Punainen merilevä	Agar	Puhdistus, kemiallinen esikäsitely, uutto, suodatus, valkaisu ja vedenpoisto. Muita menetelmiä ovat esikäsitely, primäärinen vedenpoisto ja puhdistus pakastesulatusyklillä, valkaisu ja kuivaus auringossa.	-	[32]
<i>Turbinaria decurrens</i>	Ruskea merilevä	Algiini	Happamoittaminen, emäksinen uutto, kiinteä-nesteerotus, saostus ja kuivaus.	-	[32]

Taulukossa 4 on listattuna eri merilevälajikkeita ja niistä saatavia polysakkarideja, sekä niihin käytettyjä valmistusmenetelmiä. Taulukossa 4 S.Y Chee et al. [31] tutkimuksessa kylmämenetelmässä käytettiin 20 grammaa ilmakeivattua levänäytettä, joka liotettiin 1 %:n CaCl_2 -liuoksessa huoneenlämmössä (27 °C) yön yli. Tämän jälkeen levä pestiin tislatussa vedessä, käsiteltiin HCl -liuoksella, pestiin uudelleen ja liotettiin lopuksi Na_2CO_3 -liuoksessa. Näytteet erotettiin viskoosisesta seoksesta sentrifugoinnilla, ja saatu natriumalgiini saostettiin etanoli- tai vesiseoksella. Kuumamenetelmä noudatti samankaltaista prosessia kuin kylmämenetelmä, mutta säilytysaika oli 3 tuntia 50 °C lämpötilassa. [32] [29, pp.193–194]

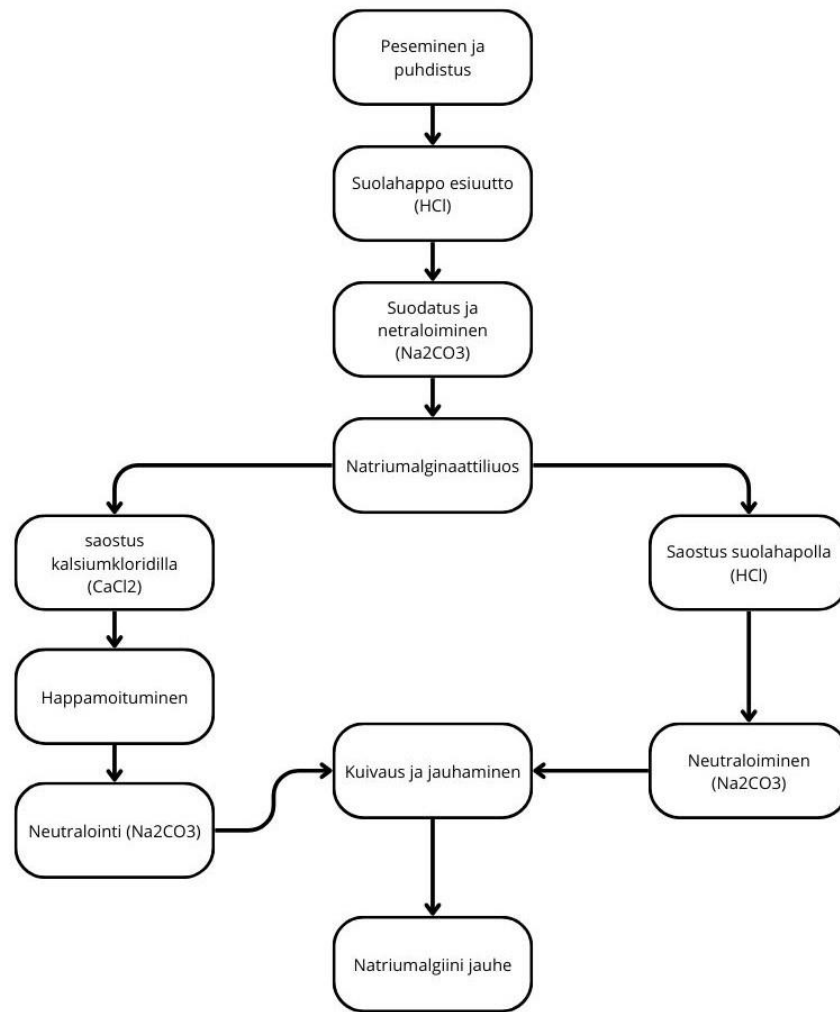
2.3.1 Valmistusmenetelmät ja prosessit

Merilevistä saatavia polysakkarideja, joita sovelletaan pakkausmateriaaleissa, saadaan yleisesti eriteltyä levistä erilaisilla uutto-, neutraloimis-, happamoitus-, kuuma- ja kylmäprosesseilla. Kuvissa 11,12 ja 13 nähdään C. Lim et al. [26] esittelemiä yleisimpien agarin, algiinin ja karrageenin valmistukseen tarvittavia vaiheita.



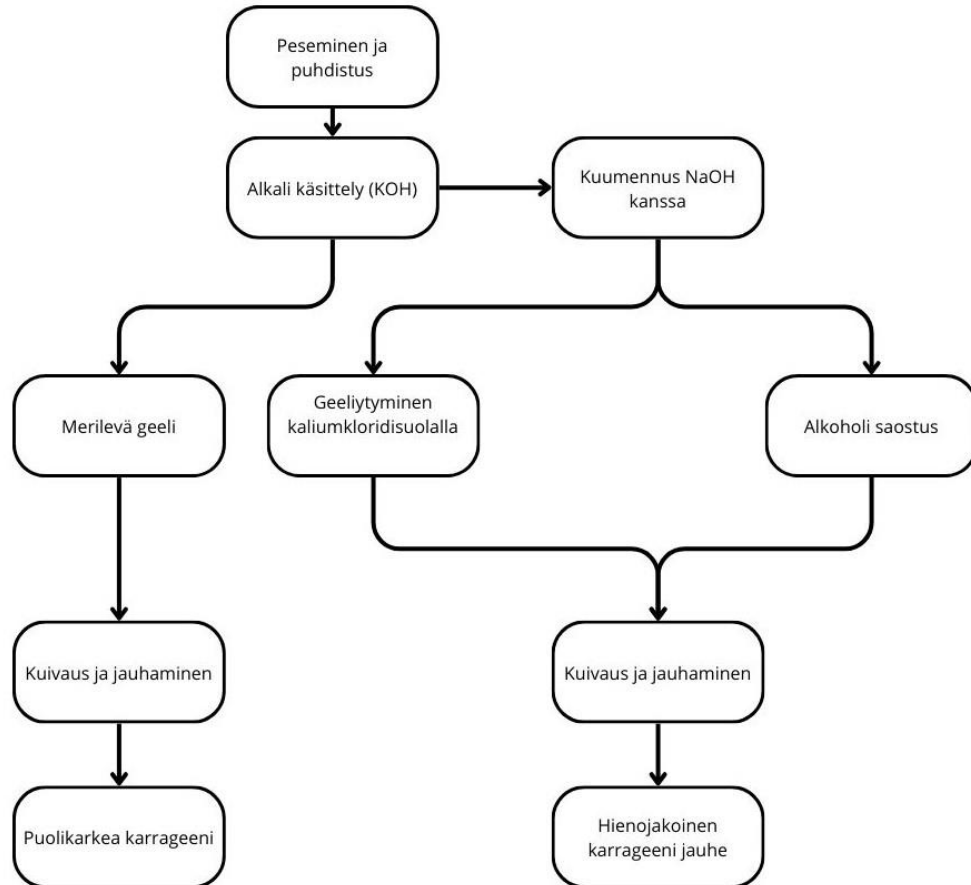
Kuva 7: Agarin erittely ja valmistus. [26]

Agarin uuttomenetelmä riippuu merilevälajikkeen tyypistä. Yleensä uuttomenetelmä koostuu alussa tapahtuvasta merilevän pesemisestä ja puhdistuksesta. Tämän jälkeen leville tehdään kuuma alkali- tai happoesikäsitely, jota seuraa kuumavesiuutto ja suodatus. Agaria saadaan pääasiallisesti *Garcilaria sp* ja *Geldium sp* levistä. Kuumavesiuuton ja suodatuksen jälkeen prosessi jatkuu synereesiprosessiin tai jäädityssulatuksen ja lopulta tuote kuivataan sekä jauhetaan agarjauheen saamiseksi. [26]



Kuva 8: Algiinin valmistus. [26]

Algiinia saadaan ruskeista merileivistä uuttamalla sitä demineralisoinnin avulla. Sen valmistamiseen yleisimmin käytettyjä lajikkeita ovat *Laminaria sp* ja *Ascophyllum nodosum*. Algiinin valmistus alkaa levän pesemisellä sekä puhdistuksella. Puhdistamisen jälkeen on vuorossa esiuuttaminen, suodatus sekä neutraloiminen hapon ja emäksen avulla. Hapon käytön tarkoitus on protonien vaihto, jonka ansiosta algiinin suolat muuttuvat vapaiksi algiinihapoiksi. Lopuksi aines neutraloidaan natriumkarbonaatilla (Na_2CO_3), kuivataan ja jauhetaan. [26]



Kuva 9: Karrageenin erittely ja valmistus. [26]

Karrageenin valmistuksen alussa yleisimmin käytetty punainen merilevä pestään ja puhdistetaan, jonka jälkeen se kuumennetaan kaliumhydroksidiliuoksella (KOH). KOH-liuoksen avulla saadaan lisättyä karrageenin määrää. Kaliumkationit aiheuttavat geelytymistä ainekseen, joka voidaan jauhaa puolikarkean karrageenin valmistusta varten. Toinen vaihtoehto on prosessoida geeliä edelleen kuumentamalla sitä natriumhydroksidin (NaOH) kanssa. NaOH:n jälkeen käytetään joko alkoholia tai kaliumkloridisuolaa (KCl), ja aines voidaan saostaa, puristaa, kuivata ja jauhaa hienojakeiseksi karrageenijauheeksi (kuva 9). [26]

2.3.2 Mekaaniset ominaisuudet

Levistä valmistettavat biomuovisovellukset ovat yleensä kalvo- tai filmityyppisiä pakkauksia ja vaativat hyviä mekaanisten ominaisuuksien arvoja kuten korkeaa vetolujuutta, venyvyyttä ja pientä vesihöyryn läpäisevyyttä (WVP). Taulukossa 5 on esitelty eri polysakkarideista valmistettujen biopohjaisten muovien vetolujuuden, kimmokertoimen, venymän murtuessa ja WVP: arvoja sekä biomuovien sovelluskohteita.

Taulukko 5: Yleisimpien levästä valmistettävien muovien mekaanisia ominaisuuksia ja käyttökohteita.

Additiivit/Plastisoijat	Polysakkaridi	Vetolujuus (MPa)	Kimmoerotoin (MPa)	Venymä murtuessa (%)	WVP (g*mm/m ² *h*kPa)	Sovelluskohde	Lähde
CaCl ₂	Algiini	-	-	-	0,388–0,550	Kalvo/filmi	[33]
Glyseroli	Karrageeni	38,32	182,87	23,26	1,393	Kalvot	[34]
Glyseroli, etikkahappo	Karrageeni	47,56	-	9,24	0,33264	Kalvot	[35]
Glyseroli (30 %)	Agar	38,5	160	14,6	0,4608	Muovipussit ja kalvot	[36]
-	Agar	20,21	-	21,34	0,014436	Muovipussit ja kalvot	[37]
Kalsiumkloridi (0 %)	Algiini	18,74	-	21,38	0,012024	Muovipussit ja kalvot	[38]
Glyseroli (SE1S1)	Karrageeni	41,37	6,43	6,5	0,0006228	Kalvot	[39]
Hedelmien kuoret (0–50 %)	-	45–81	-	2,5–5,4	-	Kalvot	[22]
Kalsiumkloridi (0,08 g)	Algiini	43,5	-	9,1	4,68	Kalvo, kertakäyttöisten kuppien tai paperista valmistettujen kulhojen päällystysmateriaali.	[40]
-	k-karrageeni & Algiini	45,9	21	3,1	-	-	[41]
Glyseroli (Saostettu kalsiumkarbonaatti (MB-CaCO ₃) 0,15 %)	-	58,5	286,79	29,1	0,738	Kalvo	[42]
Glyseroli (kaupallinen kalsiumkarbonaatti (C-CaCO ₃) 0,10 %)	-	69,31	351,89	25,22	0,882	Kalvo	[42]

Taulukosta 5 voidaan havaita, että eri polysakkarideista valmistetuilla biomuoveilla on vaihtelevat mekaaniset ominaisuudet, jotka vaikuttavat niiden soveltuvuuteen erilaisissa käyttötarkoituksissa. Vetolujuus, venymä murtuessa ja WVP ovat olennaisia ominaisuuksia, jotka vaikuttavat biomuovien soveltuvuuteen pakkausmateriaaleiksi. Korkea vetolujuus merkitsee materiaalin kykyä kestää suurta vetokuormitusta ennen materiaalin murtumaa, ja venymä murtuessa rakenteen prosentuaalista venymää ennen murtumista. Esimerkiksi karrageenista valmistetut biomuovit ovat osoittaneet hyviä vetolujuuden ja venymän murtuessa arvoja, mutta niiden vesihöyryn läpäisevyys arvoissa on suurta hajontaa.

WVP on olennainen tekijä biomuovien soveltuvuudessa pakkausmateriaaleiksi. WVP kuvaa materiaalin kykyä päästää läpi vesihöyryä, ja alhainen WVP on tärkeää pakkausmateriaaleissa, jotka pyrkivät suojaamaan pakattuja tuotteita kosteuden vaikutuksilta. Pakkausten WVP-arvoista on annettu ohjeelliset lukuarvot, joiden mukaan WVP:n ollessa välillä $0,42 - 4,2 \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot h \cdot kPa}$ arvot ovat heikkoja, $0,0042 - 0,42 \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot h \cdot kPa}$ välillä keskivertoja ja $0,00042 - 0,0042 \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot h \cdot kPa}$ välillä hyviä [43]. Taulukossa 5 olevalla muovikalvolla, joka on valmistettu karrageenista ja additiivina/plastisoijana käytetystä glyserolista, saavutti parhaat WVP-arvot $0,0006228 \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot h \cdot kPa}$. Muiden kalvojen WVP-arvot olivat keskivertoja tai huonoja.

Taulukko 6: Plastisoijien vaikutus merileivistä valmistettavien biomuovien mekaanisiin ominaisuuksiin. [44]

Merilevä lajike	Polysakkaridi	Additiivi/plastisoija	Vetolujuus (MPa)	Pitenemä murtuessa (%)	WVP (g*mm/m ² *h*kPa)
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	κ-karageeni	Ei additiivia/plastisoijaa	40,3	1,77	0,326
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	κ-karageeni	Glyseroli (Konsentraatio 20 %)	44,63	3,8	0,33
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	κ-karageeni	Glyseroli (Konsentraatio 25 %)	47,07	4,68	0,37
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	κ-karageeni	Glyseroli (Konsentraatio 30 %)	47,42	8,09	0,432
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	κ-karageeni	Sorbitoli (Konsentraatio 20 %)	45,54	4,02	0,326
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	κ-karageeni	Sorbitoli (Konsentraatio 25 %)	48	4,68	0,366
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	κ-karageeni	Sorbitoli (Konsentraatio 30 %)	48,74	10,01	0,425

Taulukosta 6 voidaan nähdä, että plastisoijilla, kuten taulukossa mainituilla glyserolilla ja sorbitolilla, on merkittävä vaikutus merilevistä valmistettavien biomuovien mekaanisiin ominaisuuksiin. Lisääntyvä plastisoijan pitoisuus kasvattaa biomuovien vetolujuutta ja venymää murtuessa, mutta samalla saattaa kasvattaa materiaalin läpi kulkeutuvan vesihöyryn määrää. Tämä tieto on tärkeä materiaalien suunnittelussa, kun pyritään kehittämään biomuoveja esimerkiksi erilaisiin filmi- tai kalvosovelluksiin.

2.3.3 Sovellukset

Leivistä valmistettavat biomuovit tarjoavat monia mielenkiintoisia sovelluksia ja käyttökohteita eri aloilla. Nämä biomuovit tarjoavat luonnollisen ja kestävän vaihtoehdon perinteisille muoveille, ja tässä kappaleessa esitellään joitakin leivistä valmistettavien biomuovien sovelluksia ja niiden käyttökohteita. Leivistä valmistettavia tuotteita voidaan käyttää useissa teollisissa sovelluksissa, kuten lääketieteessä, lannoitteiden tuotannossa tai ekologisten materiaalien valmistuksessa muovien korvaamiseksi. Kuvassa 10 on esitelty merilevästä valmistettuja elintarvikepakkauksia.



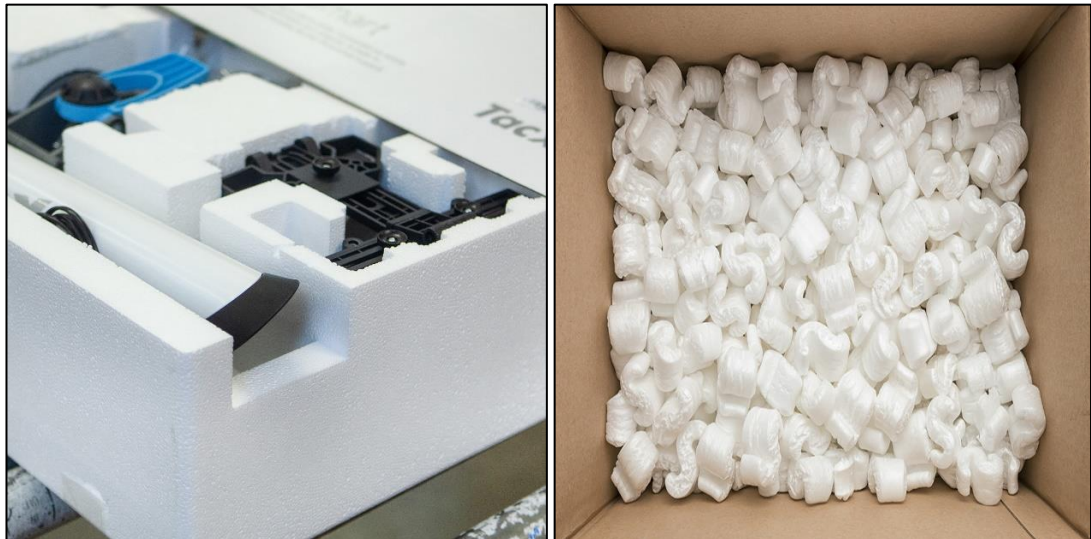
Kuva 10: Merilevästä valmistettuja pakkauksia. [45–47]

3. MATERIAALIEN VERTAILU

Materiaalivertailussa käsitellään mykeelin ja leväpohjaisten pakkausmateriaalien vastaavia öljypohjaisia yleisesti markkinoilla olevia muoveja, jotka ovat pakkausmateriaalikäytössä. Mykeelistä valmistettuja pakkausmateriaaleja vertaillaan EPS:ään ja leväpohjaisia PP, PE, PE-LD ja PE-HD materiaaleihin.

3.1 Mykeeli

Mykeelistä valmistetut pakkausmateriaalit soveltuvat erilaisiin tuenta- ja vahvikekomponenttisovelluksiin ja ne vertautuvat EPS:n sovelluskohteisiin. EPS on umpisoluinen termoplastisiin polymeereihin lukeutuva öljypohjainen muovi. Se valmistetaan polystyreenihelmistä, jotka solustetaan kaasun avulla, jotta materiaalille saadaan huokoinen rakenne. [48] Sen yleisiä sovelluskohteita ovat esimerkiksi sekundääriset pakkauskomponentit, joiden käyttötarkoitus on tukea, suojata ja säilyttää tuotteita niiden varastoinnin ja kuljetuksen aikana. EPS on perinteinen valinta monissa pakkausmateriaaleissa sen keveyden ja iskunkestävyyden ansiosta.



Kuva11: Paisutetusta polystyreenistä valmistettuja tuotteita. [49]

Ympäristötietoisuuden kasvaessa korvaavien ympäristöystävällisten materiaalien kysyntä ja tarve ovat kasvaneet. Taulukossa 7 on kirjattuna mykeelipohjaisten biokomposiittimateriaalien sekä paisutetun polystyreenin mekaanisia ominaisuuksia. Taulukon 7 materiaaleille on laskettu mekaanisten ominaisuuksien keskiarvot, joiden avulla suoritetaan EPS:n ja mykeelikomposiitin mekaanisten ominaisuuksien vertailua taulukossa 8.

Taulukko 7: Mykeelin ja paisutetun polystyreenin mekaanisia ominaisuuksia.

Tiheys (g/cm ³)	Vetolujuus (MPa)	Kimmoduuli (MPa)	Puristuslujuus (MPa)	Taivutuslujuus (MPa)	Lähde
0,1	0,04	4	-	0,22	[20]
0,17	0,05	13	-	0,29	[20]
0,13	-	-	-	0,05	[20]
0,24	0,03	6	-	0,24	[20]
0,24	0,03	9	-	0,21	[20]
0,35	0,15	59	-	0,86	[20]
0,35	0,13	35	-	0,62	[20]
0,39	0,24	97	-	0,87	[20]
-	-	-	0,21	0,37	[13]
-	-	-	0,32	0,39	[13]
0,0597-0,187	-	1,14-1,32	0,31-0,51	-	[12]
0,954	1,55	-	2,68	4,44	[11]
0,136-0,283	-	0,15-4,55	-	-	[17]
0,135	0,276	5	-	-	[50]
0,28	0,416	7,2	-	-	[50]
0,212	0,464	-	-	0,433	[44]
0,012	0,029	1,611	0,016	0,088	[51]
0,015	0,052	2,769	0,044	0,169	[51]
0,02	0,096	5,086	0,072	0,219	[51]

Materiaali	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Mykeelikomposiitti	Paisutettu polystyreeni (EPS)	Paisutettu polystyreeni (EPS)	Paisutettu polystyreeni (EPS)	Paisutettu polystyreeni (EPS)	Paisutettu polystyreeni (EPS)	Paisutettu polystyreeni (EPS)
-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------

Taulukko 8: Mykeelin ja EPS materiaalien ominaisuuksien keskiarvot taulukosta 7.

Materiaali	Tiheys (g/cm ³)	Vetolujuus (MPa)	Kimmomoduuli (MPa)	Puristuslujuus (σ _M) MPa	Taivutuslujuus (MPa)	Lähde
EPS	0,112	0,222	4,333	0,044	0,227	[11], [12], [13], [17], [20]
Mykeeli	0,296	0,278	28,03	0,905	0,778	[44], [50], [51]

Taulukossa 8 esitetään mekaanisia ominaisuuksia, jotka ovat keskeisiä tukemiseen ja suojaamiseen tarkoitettujen pakkausmateriaalien suorituskyvyn kannalta. Vertailu paljastaa eroja mykeeli- ja EPS-materiaalien mekaanisten ominaisuuksien välillä. Pakkausmateriaalien tiheydellä on suuri merkitys tuotteen toimivuuteen, koska niitä liikutetaan pitkiä matkoja ja suuria määriä. Liian suuri tiheys voi kasvattaa pakkauksen kokonaismassaa ja täten lisätä siihen kohdistuvien logististen toimenpiteiden kustannuksia. EPS on taulukon 8 mukaan tiheydeltään noin kolmasosan mykeelikomposiitin massasta. Materiaalien vetolujuudet ovat samaa suuruusluokkaa, mutta mykeelin vetolujuus on hieman suurempi kuin EPS:n. Kimmomoduulien arvoja vertailtaessa mykeelikomposiitilla on noin kuusi kertaa suurempi kimmomoduulin arvo verrattaessa EPS-materiaaleihin. Myös puristuslujuus on mykeelillä suurempi. Taulukon 7 arvoja tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava, että suurin osa mykeelikomposiittien puristuslujuuksista ovat välillä 0,21–0,51 MPa ja EPS:n välillä 0,016–0,072 MPa. Materiaalien taivutuslujuudessa mykeelillä on noin kolme kertaa suuremmat arvot kuin EPS:llä.

Kokonaisvaltaisen arvioinnin perusteella voidaan päätellä, että mykeelistä valmistetut biokomposiitit voivat olla hyvä vaihtoehto korvaamaan EPS:ssä pakkausmateriaaleissa. Pakkauksiin kohdistuvat kuormitukset ovat yleisesti taivutus- ja puristuskuormitusta, joissa mykeelin mekaaniset ominaisuudet kilpailevat EPS:n kanssa. Tiheydeltään mykeeli on kuitenkin suurempaa, joka on huono asia edellämainittujen mahdollisten logististen kustannusten kasvun vuoksi. Kun pakkauksia siirretään suuria määriä, on pienelläkin painon muutoksella suuri merkitys isossa kuvassa. Tarkemmat arviot vaativat kuitenkin yksityiskohtaisempia testejä ja arvioita mykeelikomposiitin sopivuudesta pakkausmateriaalisovelluksiin. Lisäksi on tärkeää tarkastella laajempaa kuvaa, kuten ympäristövaikutuksia ja mahdollisia innovaatioita materiaalien valmistuksessa, kierrätyksessä ja kosteuden kestävydessä.

Tutkimukset mykeelin ympäristövaikutuksista ovat vielä melko alkuvaiheessa ja niistä saadut ympäristöarvot ovat vielä suuntaa antavia. R Dolor et al. [52] tekemässä tutkimuksessa on kuitenkin vertailtu laajasti mykeelistä ja EPS:stä valmistettujen sekundääripakkausten ympäristövaikutuksia elinkaariarvioinnin avulla, joka suoritetaan gate to grave-menetelmällä, eli materiaalien elinkaareissa huomioidaan niiden jakelu, varastointi, käyttö sekä materiaalien loppusijoitus hävittämällä tai kierrättämällä [53]. Tutkimuksessa tehtiin oletuksia kuljetuksen osalta ja mykeeliä valmistettaessa raaka-aineen saamiseksi tuotantolaitokselle arvioidaan olevan 50 kilometrin välimatka ja EPS valmistuksessa 500 kilometrin välimatka. Taulukossa 9 on kirjattuna mykeelin ja EPS valmistuksen ympäristöön vaikuttavia arvoja. [52]

Taulukko 9: EPS:n ja mykeelin valmistuksen eri ympäristöarvoja. [52]

Materiaali	Sitoutunut energia tuotannossa (MJ/kg)	Loppusijoitus	CED	IPCC GWP100
EPS	5	Kaatopaikka (69 %), Poltto (17 %), Kierrätys (14 %)	6.08E+00	2.99E+05
Mykeeli	6	kunnalliset kompostipaikat (70 %), kompostointi kuluttajalla (30 %)	2.86E+05	1.28E+05

Taulukossa 9 käsiteltävä CED on menetelmä, joka ottaa huomioon kaiken tyyppisen energian käytön laitoksen tai tuotannon elinkaaren aikana, jota tässä tapauksessa mykeelin tai EPS-pakkausmateriaalien valmistukseen kuuluu. IPCC GWP100 kuvaa valmistetun tuotteen aiheuttamien kaasujen lämmitysvaikutusta 100 vuoden aikana. Menetelmässä ei oteta huomioon CO_2 -ottoa tai biogeenisiä CO_2 -päästöjä. Biogeeniset metaanipäästöt kuuluvat kuitenkin menetelmän laskentaan mukaan. Taulukossa 9 esiteltujen tutkimustulosten perusteella mykeelillä voidaan todeta olevan matalampi ympäristölle aiheutuva vaikutus sen elinkaaren aikana kokonaisuudessaan. EPS kuluttaa noin kaksi kertaa enemmän energiaa valmistusvaiheessa ja GWP 100, eli lämmityspotentiaaliarvo 100 vuoden aikana on myös kaksi kertaa suurempi kuin mykeelistä valmistetulla pakkausmateriaalilla. Ympäristövaikutuksia analysoitaessa on huomioitava myös pakkausten loppusijoitus. R Dolor et al. tekemässä tutkimuksessa oletetaan EPS-pohjaisista pakkauksista kaatopaikalle päätyvän 69 %, polttoon 17 % ja kierrätykseen 14 %. Mykeelistä valmistettua materiaalia ei ole mahdollista kierrättää uudelleenkäyttöön, vaan materiaali on kertakäyttöinen ja elinkaarensa lopussa se sijoitetaan paikkaan, jossa se käsitellään biojätteenä. [52]

3.2 Levä

Karrageeni, agar ja algiini ovat merileivistä saatavia polysakkarideja, jotka tarjoavat lupaavia vaihtoehtoja öljypohjaisille muoveille pakkausmateriaaleina. Näiden biopohjaisten muovien mekaaniset ominaisuudet ja sovelluskelpoisuus pakkausmateriaalisovelluksissa on esitetty

taulukossa 9, jossa vertaillaan eri materiaalien vetolujuutta, kimmokerrointa, venymää murtuessa ja WVP:tä.

Taulukko 10: Levästä ja muovista valmistettujen pakkausmateriaalien mekaanisten ominaisuuksien keskiarvoja taulukosta 6.

Materiaali	Vetolujuus (MPa)	Kimmokerroin (MPa) (Keskiarvo)	Venymä murtuessa (%) (Keskiarvo)	WVP ((g*mm/m ² *h*kPa)	Sovelluskohde	Lähde
Karrageeni	42,42	94,65	13	0,575	Kalvo	[17], [26]
Agar	29,36	160	17,97	0,237	Muovipussit ja kalvot	[26]
Algiini	31,12	-	15,24	1,72	Muovipussit ja kalvot	[26], [40]
k-karrageeni & algiini	45,9	21	3,1	-	Kalvo	[41]
PE-HD	27,58	-	600	-	-	[54]
PE-HD	-	-	-	0,00083	Kalvo	[55]
PE-HD	-	-	-	0,0000627-0,000125	Kalvo	[56]
PE-LD	9,65	-	500	-	Muovipussit ja kalvot	[54]
PE-LD	-	-	-	0,003	Kalvo	[55]
PE-LD	-	-	-	0,000240-0,000313	Kalvo	[56]
PP (kalvo/filmi)	32,3	-	217	-	kalvo	[57]
PE	32,75	758,5	-	-	Pakkaukset kuten kassit, kalvot ja purkit.	[57]
PP (kalvo/filmi)	32,3	-	378	0,001077-0,2155	Kalvo	[58]
Iskunkestävä PS (High impact PS)	24,1	-	47	-	-	[59]

Karrageeni, jota saadaan punaisista merileivistä, osoittaa erinomaisia mekaanisia ominaisuuksia, kuten korkeaa vetolujuutta (42,42 MPa) ja kimmokertoimen arvoa (94,65 MPa). Lisäksi se tarjoaa kohtuullisen venymän murtuessa (13 %) ja WVP arvon $0,575 \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot h \cdot kPa}$, joka luokitellaan olevan arvoltaan heikko. Agar ja algiini, joita saadaan eriteltyä esimerkiksi punaisista ja ruskeista merileivistä, ovat myös lupaavia vaihtoehtoja muovipussien ja kalvojen valmistuksessa. Niiden vetolujuus (agar noin 29,36 MPa ja algiini 31,12 MPa) ja kimmokerroin (agar noin 160 MPa) ovat kohtuulliset ja ne tarjoavat hyvän venymän murtuessa noin 18 %. Lisäksi niiden WVP-arvot olivat agarilla noin $0,237 \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot h \cdot kPa}$ ja algiinilla $0,049 \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot h \cdot kPa}$, joka tarkoittaa niiden olevan luokiteltu keskiverroiksi ja algiinin melkein hyväksi. Merileivistä valmistettujen biomuovien mekaanisia ominaisuuksia vertaillaan öljypohjaisiin muoveihin PE-HD, PE-LD, PP ja PE:hen. Materiaalien yleisimpiä sovelluskohteita ovat kalvot, filmit ja muovipussit, jolloin niiden tärkeimpiä mekaanisia ominaisuuksia ovat vetolujuus, venymä murtuessa ja WVP. Vetolujuudet ovat levästä valmistetuilla muoveilla noin samansuuruisia tai vähän isompia, kuin vertailussa olevilla öljypohjaisilla muoveilla. Korkeimmat vetolujuuksien arvot ovat karrageenista valmistetuilla muoveilla 42,42–45,9 MPa. Venymä murtuessa arvoissa on suuri eroavuus levä- ja öljypohjaisten muovien välillä. Merilevästä valmistettavat biomuovit eivät kykene saman suuruusluokan venymiin kuin öljypohjaiset muovit. Levästä valmistettujen materiaalien venymän arvot murtuessa vaihtelevat 3,1–17,97 % välillä, kun taas öljypohjaisten muovien 47–600 % välillä. WVP-arvoista agaripohjaisilla biomuoveilla on parhaat arvot $0,237 \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot h \cdot kPa}$. Karrageeni- ja algiinikalvojen WVP-arvot luokitellaan olevan tasoltaan huonoja. PE-HD:llä on tunnetusti erittäin hyvät vesihöyryn läpäisevyyttä hidastavat arvot korkean tiheydensä ansiosta ja sen WVP-arvo on tutkimuslähteestä riippuen kirjattu olevan $0,0000627-0,00083 \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot h \cdot kPa}$.

Mekaanisien ominaisuuksien vertailun tuloksena voidaan sanoa, että merileväpohjaisten biomuovien heikkoutena ovat matalat WVP-arvot sekä merkittävästi pienemmät venymän arvot murtuessa. Nämä tekijät eivät poissulje biomuovien käyttömahdollisuuksia öljypohjaisten muovien sovelluskohteissa, mutta lisäävät tarvetta tutkia additiivien sekä plastisoidien ja valmistusmenetelmien vaikutuksia materiaalien mekaanisiin ominaisuuksiin. Ympäristön kannalta merileivistä ja öljypohjaisista muoveista on huomioitava niiden valmistuksen, käytön ja loppusijoituksen aiheuttamat ympäristölliset rasitteet. B.D Beckstrom et al. [60] tekemässä tutkimuksessa käsitellään yhdeksää erilaista tuotantoskenaariota. Elinkaaritutkimuksessa kasvihuonekaasujen määrä leväpohjaisilla raaka-aineilla verrattuna öljypohjaisiin muovihartseihin oli 67–116 % vähemmän riippuen käytetystä tuotantoskenaariosta. Merilevästä valmistetut pakkaukset voivat olla myös biohajoavia eli ne hajoavat luontoon päätyessään.

4. YHTEENVETO

Työssä tutkitaan mykeeli- ja leväpohjaisten materiaalien mahdollisuuksia pakkausteollisuuden kestäväen kehityksen edistämisessä. Nämä uusiutuvat biopohjaiset materiaalit tarjoavat ainutlaatuisia etuja, jotka vastaavat nyky-yhteiskunnan tarpeisiin vähentää fossiilisten materiaalien käyttöä ja lisätä uusiutuvia raaka-aineita pakkausmateriaalimarkkinoilla.

Mykeelistä valmistettavat biokomposiitit ovat innovatiivisia uusia vaihtoehtoja nykypäivän pakkausmateriaaleiksi korvaamaan EPS valmisteisia pakkausmateriaaleja. Mykeelikomposiittia pystytään valmistamaan sienien ja erilaisten orgaanisten substraattilähteiden avulla, jotka voivat olla peräisin erilaisten prosessien kuten maatalouden tai puuhakkuun sivuvirroista. Sivuvirtojen hyödyntäminen edesauttaa kiertotaloudellista toimintaa sekä vähentää tarkoituksella mykeelikomposiitin valmistusta varten tuotettujen raaka-aineiden määrää. Mykeelikomposiitit ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan kykeneviä korvaamaan EPS-pakkauksia, mutta ne vaativat vielä kehitystä kosteudenkestävyydessä ja valmistuksen kustannuksissa. Mykeelikomposiitin haasteina tulevaisuudessa tulee olemaan skaalautuvuusongelmat, jotka johtuvat niiden pitkästä valmistusajasta. Eri tutkimuslähteissä ilmenevä kasvuaikojen hajonta kertoo tämänhetkisestä tilanteesta, jossa kasvatukseen vaikuttavien parametrien tutkimukset ovat vielä kesken, ja kasvatuksen eri tekijät eivät ole vakiintuneet. Mykeelikomposiitti ja EPS eroavat toisistaan niiden ympäristö- ja ilmastoarvoiltaan. EPS tunnetaan muovina, jota on todella vaikeaa kierrättää ja loppusijoituksena sillä on useimmiten energiaksi polttaminen tai kaatopaikalle päätyminen. EPS-pakkaukset eivät ole biohajoavia, jolloin ne säilyvät kaatopaikalla pitkiä aikoja pilkkoutuen pienijakeisiksi mikromuoveiksi. EPS:n onkin arvioitu vievän tilavuudeltaan jopa 30 % globaalisti kaatopaikalla olevasta jätteestä [61]. EPS materiaalien korvaaminen mykeelikomposiiteilla vähentäisi riippuvuutta öljystä, laskisi luontoon päätyvän muovin määrää ja edesauttaisivat globaalisi kestävien ympäristöratkaisuja yleistymistä kulutuskeskeisessä yhteiskunnassa.

Toisena työssä esiteltynä biopohjaisena materiaalivaihtoehtona on merilevän polysakkarideista valmistettavat muovit. Merilevistä saatavat karrageeni, agar ja algiini ovat mahdollisia tulevaisuuden muovien raaka-aineita. Leväpohjaisten muovien mekaaniset ominaisuudet, additiivien sekä plastisoijien vaikutukset ja valmistusmenetelmät vaativat vielä kuitenkin lisää tutkimuksia, jotta materiaaleilla olisi mahdollisuus korvata öljypohjaisia muoveja elintarvikepakkauksissa, jossa pakkauksessa olevan tuotteen säilyvyys on tärkeää. Levästä valmistettuja pakkauksia on jo käytössä, mutta öljypohjaisten muovien edulliset tuotantokustannukset ja erinomainen saatavuus vaikeuttavat ympäristöystävällisempien vaihtoehtojen yleistymistä. Vertailu öljystä valmistettuihin muoveihin osoittaa, että leväpohjaiset biomuovit tarjoavat kilpailukykyisiä ominaisuuksia ja työssä viitattujen B.D Beckstrom et al. suorittamien tutkimusten mukaan 67–116 % vähemmän ympäristövaikutuksia. Näin ollen ne

edustavat houkuttelevaa vaihtoehtoa tulevaisuuden kestäväälle pakkaamiselle ja materiaalien käytölle.

LÄHTEET

- [1] Law Insider. Packaging material Definition, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17. lokakuuta 2023): <https://www.lawinsider.com/dictionary/packaging-material>
- [2] Nations U. United Nations. United Nations. In Images: Plastic is Forever, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 9. maaliskuuta 2024): <https://www.un.org/en/exhibits/exhibit/in-images-plastic-forever>
- [3] Plastic waste and recycling in the EU: facts and figures | News | European Parliament [Verkkosivu]. 2018, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 31. lokakuuta 2023): <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20181212STO21610/plastic-waste-and-recycling-in-the-eu-facts-and-figures>
- [4] EUBIO Admin. Bioplastics. European Bioplastics e.V, internet. Saatavissa (viitattu 24. lokakuuta 2023): <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>
- [5] Muoviteollisuus ry. Biomuovit, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18. toukokuuta 2024): <https://www.plastics.fi/bio/>
- [6] Biopohjainen ja biohajoava muovi – eivät tarkoita samaa 2017, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18. toukokuuta 2024): <https://www.pakkaus.com/biopohjainen-ja-biohajoava-muovi-eivat-tarkoita-samaa/>
- [7] M.R McGinnis, S.K Tying. Introduction to Mycology. Teoksessa: Baron S, toimittaja. Medical Microbiology. 4th p. Galveston (TX): University of Texas Medical Branch at Galveston; 1996, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18. toukokuuta 2024): <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK8125/>
- [8] F.V.W Appels, H.A.B Wösten. Mycelium Materials. In: Ó Zaragoza, A Casadevall, reporter. Encyclopedia of Mycology. Oxford: Elsevier; 2021, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30. lokakuuta 2023): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012809633821131X>
- [9] J Webster, R Weber. Introduction to Fungi. Cambridge University Press; 2007. 1744 p, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30. lokakuuta 2023) a:https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=SApIn7IEucC&oi=fnd&pg=PT11&ots=Cozwsv6hIs&sig=rO_Xmua-E9qp1RgUHKy7owuzxLM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

- [10] Gardens; jurisdiction: Commonwealth of A corporate Name: Australian NB. Mycelium. jurisdiction: Commonwealth of Australia; corporateName: Australian National Botanic Gardens, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 31. lokakuuta 2023): <https://www.anbg.gov.au/fungi/mycelium.html>
- [11] X.Y Chan, N Saeidi, A Javadian, D.E Hebel, M Gupta. Mechanical properties of dense mycelium-bound composites under accelerated tropical weathering conditions. *Sci Rep.* 11. marraskuuta 2021;11(1):22112, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 31. lokakuuta 2023): <https://www.nature.com/articles/s41598-021-01598-4>
- [12] Elsacker E, Vandelook S, Brancart J, Peeters E, De Laet L. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. 2019, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 31. lokakuuta 2023): https://www.researchgate.net/profile/Elise-Elsacker/publication/331605737_Mechanical_physical_and_chemical_characterisation_of_mycelium-based_composites_with_different_types_of_lignocellulosic_substrates/links/5c87d33c299bf1e02e2b04b2/Mechanical-physical-and-chemical-characterisation-of-mycelium-based-composites-with-different-types-of-lignocellulosic-substrates.pdf
- [13] S Sağlam, S Acun Ozgunler. An experimental study on production opportunities of biocomposite by using fungal mycelium. 31. elokuuta 2022;2022, verkkosivu. Saatavissa: https://www.researchgate.net/profile/Seden_Acun_Ozgunler/publication/368789637_An_experimental_study_on_production_opportunities_of_biocomposite_by_using_fungal_mycelium/links/63f9d80d574950594541d8ba/An-experimental-study-on-production-opportunities-of-biocomposite-by-using-fungal-mycelium.pdf
- [14] F.V.W Appels, S Camere, M Montalti, E Karana, K.M.B Jansen, J Dijksterhuis, et al. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials & Design.* 5. tammikuuta 2019;161:64–71, verkkosivu. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127518308347>
- [15] Z Yang, F Zhang, B Still, M White, P Amstislavski. Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam. *Journal of Materials in Civil Engineering.* 23. maaliskuuta 2017;29:04017030, verkkosivu. Saatavissa: https://www.researchgate.net/profile/Philippe-Amstislavski/publication/315593116_Physical_and_Mechanical_Properties_of_Fungal_Mycelium-Based_Biofoam/links/59e458ff458515393d6023e9/Physical-and-Mechanical-Properties-of-Fungal-Mycelium-Based-Biofoam.pdf

- [16] R Lelivelt, G Lindner, P Teuffel, H Lamers. THE PRODUCTION PROCESS AND COMPRESSIVE STRENGTH OF MYCELIUM- BASED MATERIALS. 2015, verkkosivu. Saatavissa: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/15138585/leliproduct2015.pdf>
- [17] T Houette, C Maurer, R Niewiarowski, P Gruber. Growth and Mechanical Characterization of Mycelium-Based Composites towards Future Bioremediation and Food Production in the Material Manufacturing Cycle. *Biomimetics*. syyskuuta 2022;7(3):103, verkkosivu. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2313-7673/7/3/103>
- [18] M Sydor, G Cofta, B Doczekalska, A Bonenberg. Fungi in Mycelium-Based Composites: Usage and Recommendations. *Materials*. tammikuuta 2022;15(18):6283, verkkosivu. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/18/6283>
- [19] E Elsacker, S Vandelook, A Van Wylick, J Ruytinx, L De Laet, E Peeters. A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. *Science of The Total Environment*. 10. heinäkuuta 2020;725:138431, verkkosivu. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720319446>
- [20] F.V.W. Appels, S Camere, M Montalti, E Karana, K.M.B. Jansen, J Dijksterhuis, et al. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials & Design*. 5. tammikuuta 2019;161:64–71, verkkosivu. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127518308347>
- [21] F.V.W. Appels, J Dijksterhuis, C.E Lukasiewicz, KMB Jansen, H.A.B. Wösten, P Krijgsheld. Hydrophobin gene deletion and environmental growth conditions impact mechanical properties of mycelium by affecting the density of the material. *Sci Rep*. 16. maaliskuuta 2018;8(1):4703, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24. huhtikuuta 2024): <https://www.nature.com/articles/s41598-018-23171-2>
- [22] H.P.S Abdul Khalil, Y.Y Tye, S.T Chow, C.K Saurabh, M.d.T Paridah, R Dungani, et al. Cellulosic Pulp Fiber as Reinforcement Materials in Seaweed-Based Film. *BioResources*. 3. marraskuuta 2016;12(1):29–42, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.huhtikuu.2024): <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/cellulosic-pulp-fiber-as-reinforcement-materials-in-seaweed-based-film/>
- [23] Innovative Mycelium Packaging for All Kinds of Products 2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. huhtikuuta 2024): <https://www.grown.bio/>
- [24] Compostable Packaging - Earth-friendly Styrofoam® Alternative | Ecovative, Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. huhtikuuta 2024): <https://www.ecovative.com/pages/packaging>

- [25] S Lomartire, J.C Marques, A.M.M. Gonçalves. An Overview of the Alternative Use of Seaweeds to Produce Safe and Sustainable Bio-Packaging. *Applied Sciences*. tammikuuta 2022;12(6):3123, verkkosivu. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/359373406_An_Overview_of_the_Alternative_Use_of_Seaweeds_to_Produce_Safe_and_Sustainable_Bio-Packaging
- [26] C Lim, S Yusoff, C.G Ng, P.E Lim, Y.C Ching. Bioplastic made from seaweed polysaccharides with green production methods. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 1. lokakuuta 2021;9(5):105895, verkkosivu. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343721008721>
- [27] J.S Aragão Rebouças Júnior, G Turan. Biodegradable Plastic and Film Production from Seaweeds. *Bulletin of Biotechnology*. 21. kesäkuuta 2022;3(1):21–6, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24. huhtikuuta 2024): <https://dergipark.org.tr/en/pub/biotech/issue/70169/1033959>
- [28] X.Y Yap, L.T Gew, M Khalid, Y.Y Yow. Algae-Based Bioplastic for Packaging: A Decade of Development and Challenges (2010–2020). *J Polym Environ*. maaliskuuta 2023;31(3):833–51, verkkosivu. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10924-022-02620-0>
- [29] U Zaimis, S Ozolina, R Jurmalietis. Production of seaweed derived bioplastics. Teoksessa 2021 [viitattu 20. huhtikuuta 2024]. Saatavissa: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2021/Papers/TF370.pdf>
- [30] T.A Davis, M Ramirez, A Mucci, B Larsen. Extraction, isolation and cadmium binding of alginate from *Sargassum* spp. *Journal of Applied Phycology*. 1. elokuuta 2004;16(4):275–84, verkkosivu. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1023/B:JAPH.0000047779.31105.ec>
- [31] S.Y Chee, P.K Wong, C.L Wong. Extraction and characterisation of alginate from brown seaweeds (*Fucales*, *Phaeophyceae*) collected from Port Dickson, Peninsular Malaysia. *J Appl Phycol*. 1. huhtikuuta 2011;23(2):191–6, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. huhtikuuta 2024): <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-010-9533-7>
- [32] A Abraham, B Afewerki, B Tsegay, H Ghebremedhin, B Teklehaimanot, K.S Reddy. Extraction of Agar and Alginate from Marine Seaweeds in Red Sea Region. *International Journal of Marine Biology and Research*. 23. elokuuta 2018; 3(2), verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. huhtikuuta 2024): <https://symbiosisonlinepublishing.com/marine-biology-research/>

- [33] Q Zhang, J Xu, X Gao, X Fu. Optimized water vapor permeability of sodium alginate films using response surface methodology. *Chin J Ocean Limnol.* 1. marraskuuta 2013;31(6):1196–203, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24. huhtikuuta 2024): <https://link.springer.com/article/10.1007/s00343-013-2125-z>
- [34] H.P.S Abdul Khalil, E.W.N Chong, F.A.T Owolabi, M Asniza, Y.Y Tye, H.A Tajarudin, et al. Microbial-induced CaCO₃ filled seaweed-based film for green plasticulture application. *Journal of Cleaner Production.* 20. lokakuuta 2018;199:150–63, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. huhtikuuta 2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618320900?via%3Dihub>
- [35] A Ramu Ganesan, M Shanmugam, R Bhat. Producing novel edible films from semi refined carrageenan (SRC) and ulvan polysaccharides for potential food applications. *International Journal of Biological Macromolecules.* 1. kesäkuuta 2018;112:1164–70, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. huhtikuuta 2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813017338047?via%3Dihub>
- [36] M Martínez-Sanz, A Martínez-Abad, A López-Rubio. Cost-efficient bio-based food packaging films from unpurified agar-based extracts. *Food Packaging and Shelf Life.* 1. syyskuuta 2019;21:100367, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. huhtikuuta 2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214289419300481>
- [37] E.J Go, K.B Song. Effect of java citronella essential oil addition on the physicochemical properties of Gelidium corneum-chitosan composite films. *Food Sci Biotechnol.* 1. heinäkuuta 2020;29(7):909–15, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. huhtikuuta 2024): <https://link.springer.com/article/10.1007/s10068-020-00740-8>
- [38] S Kim, S.K Baek, K.B Song. Physical and antioxidant properties of alginate films prepared from Sargassum fulvellum with black chokeberry extract. *Food Packaging and Shelf Life.* 1. joulukuuta 2018;18:157–63, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. huhtikuuta 2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214289418302060?via%3Dihub>
- [39] H.P.S Abdul Khalil, S.W Yap, Y.Y Tye, P.M.d Tahir, S Rizal, M.R Nurul Fazita. Effects of Corn Starch and Kappaphycus alvarezii Seaweed Blend Concentration on the Optical, Mechanical, and Water Vapor Barrier Properties of Composite Films. *BioResources.* 19. joulukuuta 2017;13(1):1157–73, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.huhtikuu.2024): <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effects-of-corn-starch-and-kappaphycus-alvarezii->

[seaweed-blend-concentration-on-the-optical-mechanical-and-water-vapor-barrier-properties-of-composite-films/](#)

[40] J.W Rhim. Physical and mechanical properties of water resistant sodium alginate films. LWT - Food Science and Technology. 1. toukokuuta 2004;37(3):323–30, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. huhtikuu.2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643803001877>

[41] G.D Ulrich, R Faez. Thermal, Mechanical and Physical Properties of Composite Films Developed from Seaweed Polysaccharides/Cellulose Nanofibers. J Polym Environ. 1. syyskuuta 2022;30(9):3688–700, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. huhtikuu.2024): <https://link.springer.com/article/10.1007/s10924-022-02459-5>

[42] M H, E.W.N Chong, S Jafarzadeh, M.T Paridah, D.A Gopakumar, H.A Tajarudin, et al. Enhancement in the Physico-Mechanical Functions of Seaweed Biopolymer Film via Embedding Fillers for Plasticulture Application—A Comparison with Conventional Biodegradable Mulch Film. Polymers. helmikuuta 2019;11(2):210, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.huhtikuu.2024): <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/2/210>

[43] R Battisti, N Fronza, Á Vargas Júnior, S.M da Silveira, M.S.P Damas, M.G.N Quadri . Gelatin-coated paper with antimicrobial and antioxidant effect for beef packaging. Food Packaging and Shelf Life. 1. maaliskuuta 2017;11:115–24, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24. huhtikuuta 2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214289416300527?via%3Dihub>

[44] A Farhan, N.M Hani. Characterization of edible packaging films based on semi-refined kappa-carrageenan plasticized with glycerol and sorbitol. Food Hydrocolloids. 1. maaliskuuta 2017;64:48–58, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16. helmikuuta 2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X16306397>

[45] Javinny. Agar bioplastic. Seaweed Packaging. 2019, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. huhtikuuta 2024): <https://seaweedpackaging.com/2019/05/31/agar-bioplastic/>

[46] Packaging made from alginate, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. huhtikuuta 2024): <https://www.anugafoodtec.com/magazine/packaging-made-from-alginate.php>

[47] P India. Seaweed-based Packaging. FutureBridge. 2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. huhtikuuta 2024): <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-food-nutrition/seaweed-based-packaging/>

- [48] Federation BP. British Plastics Federation. Expanded Polystyrene (EPS) , verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. huhtikuuta 2024): Saatavissa: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/expanded-and-extruded-polystyrene-eps-xps.aspx>
- [49] Protective packaging | BEWI Packaging, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4. maaliskuuta 2024): <https://bewi.com/solutions-industries/protective-packaging/>
- [50] W Chen, H Hao, D Hughes, Y Shi, J Cui, Z.X Li. Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene. *Materials & Design*. 15. maaliskuuta 2015;69:170–80, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3. maaliskuuta 2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914010085#0010>
- [51] Y Zerie, J Mandal. Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam: Preliminary Characteristic Evaluation. *Procedia Engineering*. 31. joulukuuta 2017;189:239–46, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. huhtikuu 2024): https://www.researchgate.net/publication/317193265_Expanded_Polystyrene_EPS_Geofoam_Preliminary_Characteristic_Evaluation
- [52] D.R. Enarevba, K.R Haapala. A Comparative Life Cycle Assessment of Expanded Polystyrene and Mycelium Packaging Box Inserts. *Procedia CIRP*. 2023;116:654–9, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12. maaliskuuta 2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827123001099>
- [53] Gate to grave | Knowledge for policy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12. maaliskuuta 2024): https://knowledge4policy.ec.europa.eu/glossary-item/gate-grave_en
- [54] Curbell Plastics. Plastic Properties Table, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12. maaliskuuta 2024): <https://www.curbellplastics.com/resource-library/material-selection-tools/plastic-properties-table/>
- [55] C Otoni, R Avena-Bustillos, H Azeredo, M Lorevice, M Moura, L Mattoso, et al. Recent Advances on Edible Films Based on Fruits and Vegetables—A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 4. heinäkuuta 2017;16, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12. maaliskuuta 2024): https://www.researchgate.net/profile/Marcia-Moura/publication/318160682_Recent_Advances_on_Edible_Films_Based_on_Fruits_and_Vegetables-A_Review/links/5cac7cd1a6fdccf47828df85/Recent-Advances-on-Edible-Films-Based-on-Fruits-and-Vegetables-A-Review.pdf
- [56] L Bastarrachea, S Dhawan, S.S Sablani. Engineering Properties of Polymeric-Based Antimicrobial Films for Food Packaging: A Review. *Food Eng Rev*. 1. kesäkuuta 2011;3(2):79–93,

verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24. huhtikuuta 2024):
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12393-011-9034-8>

[57] Curbell Plastics. Plastic Properties Table, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13. helmikuuta 2024): <https://www.curbellplastics.com/resource-library/material-selection-tools/plastic-properties-table/>

[58] Overview of materials for Polypropylene, Film Grade, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12. maaliskuuta 2024): <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=642060cb11204fcb95164a82edc4b5fa&ckck=1>

[59] Technologies S. SyBridge Technologies. 2021. Know Your Materials: Polystyrene (PS), verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4. maaliskuuta 2024): <https://sybridge.com/know-your-materials-polystyrene/>

[60] B.D Beckstrom, M.H Wilson, M Crocker, J.C Quinn. Bioplastic feedstock production from microalgae with fuel co-products: A techno-economic and life cycle impact assessment. Algal Research. 1. maaliskuuta 2020;46:101769, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12. maaliskuuta 2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926419305375?via%3Dihub>

[61] What happens to polystyrene packaging when thrown away? – EPE Global, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29. huhtikuuta 2024): <https://epe.global/2019/03/08/what-happens-to-polystyrene-packaging-when-thrown-away/>