

Teemu Tenkilä

BIPOHJAISTEN POLYMEERIEIN KÄYTTÖ JA SOVELTUVUUS ELINTAR- VIKEPAKKAUKSISSA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
04/2021

TIIVISTELMÄ

Teemu Tenkilä: Biopohjaisten polymeerien käyttö ja soveltuvuus elintarvikepakkauksissa

Tampereen yliopisto

Materiaalitekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2021

Öljypohjaisten muovien käyttöä pakkauksissa pyritään vähentämään muun muassa raaka-aineen uusiutumattomuuden ja pakkausten aiheuttamien ympäristörasitteiden vuoksi. Vaihtoehtoisina materiaaleina käytetään ensisijaisesti erilaisia biomuoveja, joilla on väitetyksi monia etuja perinteisiin muoveihin nähden erityisesti niiden raaka-aineen ja ympäristökäyttämisen vuoksi. Tässä työssä tutkitaan biopohjaisten polymeerien käyttöä ja soveltuvuutta elintarvikepakkauksissa perinteisiä muoveja korvaavina materiaaleina. Työn tarkoituksena on tutkia biopohjaisten polymeerien olemassa olevia elintarvikepakkauksosovelluksia ja määrittellä biopohjaisten polymeerien pakkausten kannalta keskeiset materiaaliominaisuudet, minkä jälkeen voidaan arvioida materiaaliominaisuuksien sekä pakkaussovellusten vaatimusten avulla biopohjaisten polymeerien soveltuvuutta pakkausmateriaaleina.

Työssä esitellään ensin elintarvikepakkauksiin liittyviä ominaisuuksia sekä ympäristötekijöitä ja määritellään biopohjaiset polymeerit yleisellä tasolla. Lisäksi selvitetään elintarvikepakkauksen kannalta oleelliset biopohjaiset polymeerit. Biopohjaiset polymeerit luokitellaan niiden ominaisuuksien perusteella luonnollisiin ja synteettisiin biopohjaisiin polymeereihin. Kirjallisuuslähteiden avulla esitetään biopohjaisten polymeerien keskeiset sovellukset elintarvikepakkauksissa ja kummankin polymeeriryhmän väliset erot mahdollisissa sovelluskohteissa. Määritellään luonnollisten ja synteettisten polymeerien pakkaussovellusten kannalta keskeiset materiaaliominaisuudet. Soveltuvuuteen keskeisesti vaikuttaviksi materiaaliominaisuuksiksi todetaan mekaaniset ominaisuudet, veden ja kaasujen läpäisevyys, termiset ominaisuudet sekä bioyhteensopivuus ja -aktiivisuus. Lisäksi pohditaan polymeeriryhmien poikkeavista keskeisistä materiaaliominaisuuksista johtuvia eroja erilaisissa sovelluskohteissa. Materiaaliominaisuuksia tarkastellessa otetaan huomioon myös ympäristöön liittyvät tekijät molempien polymeeriryhmien kannalta ja esitellään polymeerien ympäristövaikutukset perinteisiin muoveihin verrattuna raaka-aineen uusiutuvuuden ja materiaalin hiilijalanjäljen avulla.

Elintarvikepakkauksosovellusten, materiaaliominaisuuksien ja ympäristötekijöiden avulla voidaan tehdä johtopäätöksiä biopohjaisten polymeerien soveltuvuudesta pakkausmateriaalina. Luonnolliset polymeerit soveltuvat erityisesti käytettäväksi säilyvyyttä edistävinä syötävinä kalvoina ja geeleinä niiden bioaktiivisuuden ja bioyhteensopivuuden vuoksi. Synteettisiä biopohjaisia polymeerejä voidaan käyttää monimuotoisemmissa sovelluskohteissa niiden perinteisiä muoveja vastaavien mekaanisten ominaisuuksien, kemiallisen koostumuksen sekä muokattavuuden vuoksi. Lisäksi kumpaakin polymeeriryhmää voidaan käyttää sekoituksissa toistensa kanssa, jolloin sovelluskohteet ovat laajemat. Materiaaliominaisuuksista soveltuvuutta heikentävät tekijät voivat olla polymeeristä riippuen heikot mekaaniset ominaisuudet tai liian suuri veden tai kaasujen läpäisevyys. Ympäristötekijöiden kannalta voidaan todeta, että biopohjaiset polymeerit soveltuvat raaka-aineen uusiutuvuuden ja pienen hiilijalanjäljen vuoksi laajaan käyttöön. Tulevaisuuden soveltuvuusongelmia ovat biopohjaisten polymeerien tuotannon vaatimat resurssit tuotantokapasiteetin kasvaessa ja taloudellisen kannattavuuden toteutuminen

Avainsanat: elintarvikepakkaus, biopohjainen polymeeri, pakkaussovellukset, soveltuvuus, materiaaliominaisuudet, ympäristötekijät

SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO	1
2.ELINTARVIKEPAKKAUSTEN JA BIOPOHJAISTEN POLYMEERIEN OMINAISUUDET	3
2.1 Elintarvikepakkausten ominaisuudet ja vaatimukset	3
2.2 Biopohjaisten polymeerien määrittely	4
2.3 Elintarvikepakkauksiin liittyvät ympäristötekijät	6
3.BIOPOHJAISTEN POLYMEERIEN SOVELLUKSET JA KÄYTTÖ ELINTARVIKEPAKKAUKSISSA	8
3.1 Biopohjaisten polymeerien osuus pakkaus- ja elintarvikepakkausteollisuudessa	8
3.2 Elintarvikepakkauksissa käytetyt biopohjaiset polymeerit	10
3.3 Luonnollisten polymeerien käyttö elintarvikepakkauksissa	12
3.4 Synteettisten biopohjaisten polymeerien käyttö elintarvikepakkauksissa ..	15
4.BIOPOHJAISTEN POLYMEERIEN MATERIAALIOMINAISUUKSIEN TARKASTELU	17
4.1 Pakkausten kannalta	17
4.2 Biopohjaisten polymeerien ympäristötekijöiden kannalta	19
5.BIOPOHJAISTEN PAKKAUSMATERIAALIEN SOVELTUVUUS	21
5.1 Biopolymeerien soveltuvuus elintarvikepakkausten vaatimuksien ja materiaaliominaisuuksien näkökulmasta	21
5.2 Biopohjaisten pakkausmateriaalien soveltuvuus pakkausteollisuuden ja kuluttajien näkökulmasta	23
6.YHTEENVETO	25
7.VIITTAUKSET	27

LYHENTEET JA MERKINNÄT

PLA	polylaktidi
Bio-PET	biopohjainen polyetyleenitereftalaatti
Bio-PE	biopohjainen polyeteeni
HDPE	korkean tiheyden polyeteeni
LDPE	matalan tiheyden polyeteeni
PEF	polyeteenifuaronaatti
PVF	polyvinyylifluoridi

1. JOHDANTO

Elintarvikepakkaukset, niiden ominaisuudet ja niissä käytettävät materiaalit ovat tärkeä osa elintarvike- ja pakkausteollisuuden tuotantoa. Kysynnän kasvu pakkauksille ja niiden erilaisille toiminnallisuuksille, kuten pakkausten valmistuksen eri vaiheiden yksinkertaisuudelle, valmiiden pakkausten yhteensopivuudelle, kierrätyskelpoisuudelle ja käytön jälkeiselle käsittelymahdollisuuksille aiheuttaa haasteita pakkausten suunnittelun, tuotannon ja käytön jälkeisen käsittelyn jokaisessa vaiheessa [1]. Erityisesti erilaiset perinteiset pakkausmateriaalit ovat ongelmallisia niiden ominaisuuksien aiheuttamien haittojen vuoksi pakkausten tuotannossa ja pakkauksen hävittämisessä. Elintarvikepakkausmateriaalit myös aiheuttavat usein käytön jälkeisiä ympäristörasitteita. Näiden haittojen ehkäisemiseksi on pakkaus- ja elintarviketeollisuudessa pyritty tuottamaan uudenlaisia vaihtoehtoisia pakkausmateriaaleja korvaamaan täysin tai osittain perinteisiä materiaaleja.

Erilaiset muovimateriaalit ovat perinteisesti yhdessä paperi- ja metallipohjaisten materiaalivalintojen kanssa olleet erityisen suosittuja elintarvikepakkauksissa muovien ominaisuuksien ja alhaisten kustannuksien vuoksi [2]. Perinteiset pakkauksissa käytetyt muovit ovat erilaisia raakaöljystä johdettuja muoveja, joiden suurimpia ongelmia ovat muun muassa öljyn uusiutumattomuus, öljyraaka-aineen hankinnan ja prosessoinnin rasitteet sekä valmiin tuotteen käyttäytyminen jätteenä ja muut ympäristöseikat. Öljystä riippumattomien muovien tutkiminen ja käyttöönotto elintarvikepakkauksissa on pyrkinyt eliminoimaan ja vähentämään näitä ongelmia. Biomuovien laajan käytön soveltuvuudesta ja kannattavuudesta elintarvikepakkausten sovelluksissa perinteisiin muoveihin verrattuna ei kuitenkaan ole monien seikkojen kannalta yksimielisyyttä. Tästä johtuen ja muun muassa pakkaus- ja elintarviketeollisuuden yksipuoleisen markkinoinnin sekä kuluttajien tottumusten ja käsitysten vuoksi ei ole yksinkertaista määritellä, minkälaisia todellisia vaikutuksia, hyötyjä ja haittoja biomuovien käytöllä elintarvikepakkauksissa on.

Biomuovien käytön mahdollistavat sovellukset elintarvikepakkauksissa, niiden hyödyt ja soveltuvuus ja niiden tutkiminen erilaisten materiaaliominaisuuksien, ympäristörasitteiden ja elintarvikepakkausten ominaisuuksien kannalta on tämän työn tarkoitus. Aluksi esitellään biopohjaisten muovien keskeisiä ominaisuuksia ja aiheen kannalta keskeisiä elintarvikepakkausten vaatimuksia. Lisäksi esitellään ja määritellään erityisesti muovisiin

elintarvikepakkauksiin liittyviä ympäristökäsitteitä ja biopohjaisten muovien osuutta, sovelluksia ja tarkoitusta pakkausteollisuudessa. Tarkastellaan biopohjaisten polymeerien keskeisiä ominaisuuksia ja verrataan niitä perinteisiin muoveihin.

Seuraavaksi pohditaan, miten biopohjaisten polymeerien hyödyllisyys tai soveltuvuus määritellään niiden ongelmien näkökulmasta, joita kyseisillä materiaaleilla pyritään ratkaisemaan. Pohditaan, kuinka eri biopohjaisiin polymeereihin perustuvat pakkaussovellukset käyttäytyvät ekologisen kestävyuden ja hiilijalanjäljen kannalta. Tutkitaan, miten soveltuvuus ja hyödyt tarkoittavat pakkausteollisuuden näkökulmasta ja miten ne esiinnyvät kuluttajien ja asiakkaiden näkökulmasta. Tutkitaan soveltuvuutta myös määritelyjen materiaaliominaisuuksien ja pakkausten vaatimuksien näkökulmasta.

2. ELINTARVIKEPAKKAUSTEN JA BIPOHJAISTEN POLYMEERIEIEN OMINAISUUDET

2.1 Elintarvikepakkausten ominaisuudet ja vaatimukset

Elintarvikepakkaus voidaan yleisellä tasolla käsittää suljetuksi kokonaisuudeksi, joka sisältää jonkin elintarvikeyksikön tai toisen elintarvikepakkauksen siten, että se tuottaa yhden tai useamman toiminnallisen hyödyn. Pakkauksen toiminnallisuuksia voivat olla esimerkiksi säilytys, suojele, säilyvyyden muokkaaminen, kommunikaatio tai jokin hyötyä tai toimintakykyä lisäävä toiminnallisuus [3, s. 2-3]. Nämä ovat kuitenkin laajoja ja moniselitteisiä käsitteitä, joiden merkitys riippuu pakkauksen sisällöstä, tarkoituksesta sekä pakkausmateriaaleista. Pakkaukset voidaan jakaa luokkiin pakkausten kerrosteisuuden mukaan. Primääripakkaukset pitävät sisällään itse elintarvikkeen, sekundääripakkaukset pitävät sisällään primääripakkauksen ja tertiääripakkaukset pitävät sisällään sekundääripakkauksen tai -pakkauksia. Erityyppisillä pakkauksilla on usein eri vaatimukset ja toiminnallisuudet [3, s. 2–3]. Biopohjaisia polymeerejä tarkastellessa puhutaan lähes aina primääri- ja sekundääripakkauksista, sillä ulommat pakkauskerrokset ovat pääasiassa kuljetusta varten.

Elintarvikkeiden luonne asettaa erityisiä vaatimuksia myös niiden pakkauksille. Robertson [3, s. 2] määrittelee elintarvikepakkauksille neljä päätoiminnallisuutta tai tehtävää: säilytys, suojele, kätevyys ja kommunikaatio. Näiden tehtävien luonne on hyvin sovellus- ja materiaalikohtainen. Säilytyksellä ja suojauksella käsitetään elintarvikkeen sulkeminen pakkaukseen siten, että se säilyy halutunlaisena myös käytön aikana. Säilyvyys voidaan saavuttaa esimerkiksi estämällä ulkoisten tekijöiden vaikutus pakkauksen sisällä tai luomalla pakkauksen sisälle säilyvyyttä edistävä ympäristö. Ulkoisilla tekijöillä tarkoitetaan yleisesti säilyvyydestä ja suojauksessa puhuttaessa pakkaukseen kohdistuvien fyysisten rasitusten ja esimerkiksi veden kaltaisten aineiden vaikutusta elintarvikkeeseen.

Säilyvyyden ja suojelukyvyn edistäminen voi siis asettaa pakkausmateriaalin mekaanisille materiaaliominaisuuksille vaatimuksia. Voidaan esimerkiksi vaatia lujuutta tai jäykkyyttä sekä tiettyä läpäisevyyttä pakkauksen sisä- ja ulkopuolen välillä eri aineiden suhteen. Esimerkkinä säilyvyyden yhteydestä läpäisevyyden ja lujuuden kaltaisiin materiaaliominaisuuksiin on vakuumpakatut elintarvikkeet [3, s. 2], joissa pakkauksen sisäinen ympäristö ja koostumus ja niiden kautta itse elintarvike säilyvät vain, jos pakkaus pysyy täysin tiiviinä eli jos pakkauksen läpi ei passiivisesti siirry ainetta eikä pakkaus hajoa.

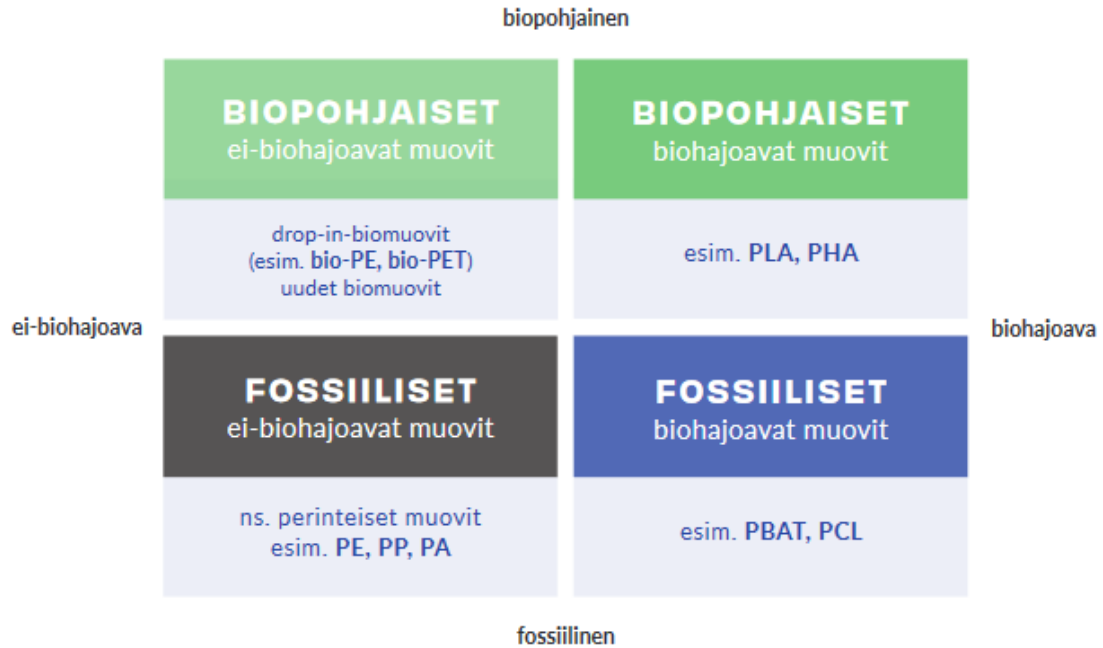
Pakkauksen materiaalivalinnat suojaus- ja säilytyskykyyn liittyen on tehtävä sovelluskohdaisesti ottaen huomioon myös se, kuinka kauan pakkauksen oletetaan säilyttävän ominaisuutensa ja minkäläisten ympäristötekijöiden kohteeksi se joutuu.

Elintarvikepakkausten kätevyydellä puolestaan tarkoitetaan Robertsonin [3, s 3–4] mukaan asioita, kuten pakkauksen poiston ja elintarvikkeen saatavuuden nopeutta erityisesti elintarvikkeissa, jotka on tarkoitettu nopeasti käytettäväksi tai valmistettavaksi. Tällaisiin elintarvikkeisiin kuuluvat erilaiset välipalat ja einekset, joiden pakkausten kätevyys voi ilmetä mahdollisuutena syödä elintarvike pakkausta poistamatta. Toisaalta kätevyudeksi voidaan käsittää myös pakkauksen käyttöönoton tai valmistamisen nopeus ja helppous, tai käytönjälkeisen pakkauksen hävittämisen helppous. Kaikkia edellä mainittuja kätevyuden määritelmiä yhdistävät pakkauksen suunnitteluvaiheen valinnat pakkauskoon ja pakkauksen monimutkaisuuden suhteen. Kätevä pakkaus on elintarvike huomioiden tietyn kokoinen, helppokäyttöinen ja yksinkertainen, jotta pakkauksia olisi helppo valmistaa, poistaa ja hävittää. Materiaalivalintojen kannalta suunnittelu siis yksinkertaistuu, kun otetaan pakkauksen kätevyys huomioon. Mitä vähemmän materiaaleja käytetään, sitä kätevämpi ja helppokäyttöisempi pakkaus on valmistaa, käyttää ja hävittää.

Kommunikaatio käsittää Robertsonin [3, s. 4] mukaan pääasiassa pakkauksen ulkonäköön liittyviä seikkoja, joilla pakkaus ja sitä kautta elintarvike voidaan tehdä houkuttelevammaksi kuluttajan näkökulmasta. Materiaalitekkinen vaatimus hyvälle kommunikatiokyvyille on esimerkiksi painatukseen soveltuva pinta ja pinnanlaatu. Esimerkiksi materiaalin muotoilukyky tai pintakäsittelymahdollisuudet edesauttavat kommunikaation toteutumista mahdollistamalla informaation sisällyttämisen pakkauksen pintaan.

2.2 Biopohjaisten polymeerien määrittely

Biopohjainen polymeeri terminä kannattaa määritellä, koska se sekoittuu helposti lähteestä ja lukijasta riippuen muihin biopolymeereihin liittyviin käsitteisiin. Biopolymeerejä jakavat kaksi päätekijät ovat niiden raaka-aineen tyyppi sekä biohajoavuus, eli polymeerien kyky hajota luonnollisiksi aineiksi kuten biomassaksi, vedeksi ja hiilidioksidiksi kohtuullisessa ajassa bakteerien toiminnan tai hydrolyyttisen hajoamisen seurauksena. Standardin [24] mukaan pakkausmateriaali on biohajoava, jos sen hajoavuus aerobisissa olosuhteissa on vähintään 90 % sen painosta. Anaerobisissa olosuhteissa biohajoavan materiaalin painosta vähintään 50 % on hajottava biokaasuksi. Enimmäisaika, joka hajoamiseen saa kulua on aerobisissa olosuhteissa kuusi kuukautta ja anaerobisissa olosuhteissa kaksi kuukautta. Raaka-aineen ja biohajoavuuden perusteella biopolymeerit voidaan jakaa kuvan (1) mukaisesti kolmeen ryhmään, joista biopohjaiset biomuovit kattavat kaksi.



Kuva 1: Polymeerien ja biopolymeerien jako nelikenttään [5]

Biopohjaisia polymeerejä on perustasolla kahdenlaisia niiden biohajoavuuden mukaan. Biopohjaisuus ei takaa biohajoavuutta, joten biopohjaisia polymeerejä arvioitaessa on tapauskohtaisesti mietittävä biohajoavuuden merkitystä. Tämän vuoksi ainoat kaikkia biopohjaisia polymeerejä yhdistävät tekijät niiden ekologisuutta elintarvikepakkausmateriaalina tutkittaessa on niiden riippumattomuus öljystä ja tästä riippumattomuudesta aiheutuvat hyödyt ja haitat. Kabascin kirjan [7, s. 2-5] mukaan kaikki biopohjaiset polymeerit on valmistettu täysin tai suurimmilta osin bioraaka-aineesta, eli kasvi- tai biomassasta. Tämä erottaa selkeästi biopohjaiset polymeerit kaikista muista polymeereistä, sillä muut polymeerit hyödyntävät täysin tai lähes täysin öljyä raaka-aineena. Biopohjaiset polymeerit voivat olla suoraan biomassasta johdettuja luonnollisia polymeerejä, tai biomassasta johdetuista luonnollisista monomeereistä keinoitekoisesti polymeroituja polymeerejä. Luonnollisista polymeereistä valmistetut muovit ovat biohajoavia biopohjaisia muoveja, kun taas öljypohjaisia muoveja vastaavat biopohjaiset synteettiset uusiomuovit eivät täytä biohajoavuuden vaatimuksia niiden kemiallisen rakenteen vuoksi [7, s. 2-5]. Suuri osa synteettisistä biopohjaisista polymeereistä ovat tällaisia niin sanottuja drop in-polymeerejä. Drop in- polymeerit ovat tyypillisesti jonkin tunnetun öljypohjaisen polymeerin biopohjaisia vastineita, joilla on sama kemiallinen koostumus, mutta joiden raaka-aine on biomassasta. Drop-in- muovien raaka-aine valmistetaan polymeroimalla biomassasta johdettuja luonnollisia monomeerejä öljypohjaisen polymeerin rakenteeksi. Kemiallinen yhtenevyys öljypohjaisten muovien kanssa estää näiden biomuovien biohajoavuuden,

sillä öljypohjaiset muovit eivät synteettisyytensä vuoksi hajoa luonnollisesti. Synteettisiin biopohjaisiin polymeereihin kuuluu myös biohajoavia polymeerejä kuten PLA, jonka polymeerirakenne koostuu luonnollisista monomeereistä.

Biopohjaisiksi polymeereiksi voidaan määritellä myös erilaiset polymeeriseokset muiden biopohjaisten muovien tai öljypohjaisten muovien kanssa. Seoksissa öljypohjaisten muovien kanssa raaka-aineesta kaikki tai valtaosa on korvattu biomassalla. Tällaisten muovien ominaisuudet muistuttavat läheisimmin öljypohjaisten muovien ominaisuuksia, mutta materiaaliin liittyvät ympäristörasitukset ovat pienemmät. Ympäristötekijöiden lisäksi biopohjaisten polymeerien käytöllä seosaineena saattaa olla elintarvikkeille hyödyllisiä ominaisuuksia, jotka edistävät pakkauksen toiminnallisuutta.

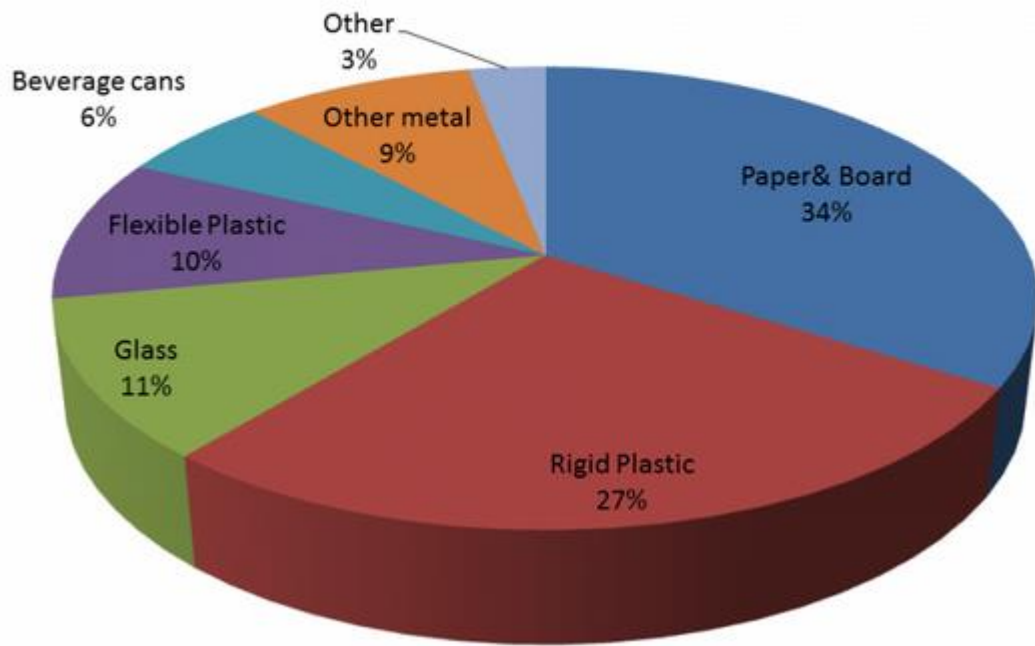
2.3 Elintarvikepakkauksiin liittyvät ympäristötekijät

Elintarvikepakkauksen toiminnallisuuksista ja tehtävistä erillisenä seikkana on ympäristöön liittyvät tekijät, joilla on nykyaikana merkitystä pakkausten elinkaaren jokaisessa vaiheessa. Pakkausten ekologinen kestävyys on käsite, joka on tärkeässä roolissa erityisesti muovisten elintarvikepakkausten valmistuksessa, markkinoinnissa ja kuluttajien näkemyksissä. Robertsonin mukaan [3, s. 645–665] elintarvikepakkauksiin ja niissä esiintyvien materiaalien ympäristöystävällisyyteen liittyy erilaisia tosiasioihin tai väärinkäsityksiin perustuvia uskomuksia ja mieltymyksiä, jotka vaikuttavat kuluttajien käyttäytymiseen ja sitä kautta pakkausten ympäristöystävällisyyttä korostaviin materiaalivalintoihin ja markkinointiin. Tarve pakkausten aiheuttamien ympäristörasitteiden vähentämiseksi pakkausteollisuudessa syntyy myös ympäristövaikutuksiin liittyvän tutkimuksen ja sitä kautta lisääntyneen ymmärryksen ja odotusten pohjalta.

Perinteiset öljypohjaiset muovit elintarvikepakkauksissa ovat saaneet maailmanlaajuisesta huomiota niiden monimuotoisten ympäristöön liittyvien ongelmien seurauksena. Ongelmia korostaa se, että muovin osuus pakkausjätteestä on merkittävä länsimaissa, joissa myös tuotetaan valtaosa koko maailman jätteestä [4]. Tällaisten muovien ympäristöongelmat johtuvat sekä niiden öljyriippuvuudesta että useiden muovien heikosta hajoamiskyvystä ja muovipartikkeleiden aiheuttamista haitoista ekosysteemeissä. Eräs ehkäisykeino on pyrkiä minimoimaan tarvittavan pakkausmateriaalin määrää. Tarpeettoman pakkausmateriaalin minimoimista on toisaalta elintarvikepakkausten kohdalla pyritty toteuttamaan jo vuosikymmeniä. Toinen, uudempi menetelmä on korvata öljypohjaiset polymeerit täysin tai osittain biopohjaisilla tai biohajoavilla muoveilla, jolloin ainakin teoriassa osasta öljypohjaisuuden aiheuttamasta rasitteesta päästään täysin eroon. Biopohjaisten polymeerien käytöllä elintarvikepakkauksissa pyritään ensisijaisesti vaikuttamaan öljyn uusiutumattomuuteen sekä öljyn käyttöön liittyvien ongelmien ehkäisemiseen ja

vasta toissijaisesti muovijätteen aiheuttamiin ongelmiin, sillä joidenkin biopohjaisten muovien öljypohjaisia muoveja vastaava käyttäytyminen ympäristössä aiheuttaa myös vastaavia käytön jälkeisiä ympäristöongelmia [3].

Market Share of Packaging Material



Kuva 2. Elintarvikepakkausissa käytettyjen materiaalien osuudet [6]

Robertsonin kirjan [3, s. 49-50] mukaan vuonna 2010 koko pakkausteollisuus käytti muovia 100 miljoonaa tonnia, joista vain 125 000 tonnia oli biopohjaisia muoveja. Toisaalta vuonna 2020 biopohjaisia muoveja tuotettiin kaikkiin tarkoituksiin jo 884 000 tonnia, joista 47 % käytettiin pakkausteollisuudessa [10]. Toisaalta Nova- instituutin tutkimuksen mukaan [11] biopohjaisten polymeerien tuotannon määrä olisi huomattavasti suurempi. Erot johtunevat tarkkojen lukemien saatavuudesta tai biopohjaisten polymeerien erimäärittelyistä, sillä biopohjaisia polymeerejä voivat lähteestä riippuen olla myös osittain biomassaa hyödyntävät perinteiset polymeerit. Suurin osa globaalista biopohjaisten polymeerien tuotantokapasiteetista sijoittuu tällä hetkellä Aasiaan. Vuonna 2020 46 % biopolymeereistä tuotettiin Aasiassa, 26 % Euroopassa ja loput 28 % muualla. Tuotantokapasiteetin odotetaan kasvavan seuraavan viiden vuoden aikana varsinkin Euroopassa.

Markkinaosuuksien tiedoista nähdään joka tapauksessa, että biopohjaisten polymeerien suhteellinen osuus elintarvikepakkausissa on noussut alle prosentista muutamaan pro-

senttiin, ja on kasvanut viime vuosikymmenen aikana moninkertaiseksi. Ennusteen mukaan biomuovien ja biopohjaisten muovien käyttö pakkauksissa ja tuotanto jatkaa kasvuaan useita kymmeniä prosentteja vuoteen 2025 mennessä [10]. On vaikeaa arvioida tarkasti, kuinka iso osa kaikkiin pakkauksiin tuotetuista biopohjaisista muoveista kuluu juuri elintarvikepakkauksiin. Muovin suosio ja suotuisat ominaisuudet erityisesti elintarvikepakkauksissa muovipakkausten kätevyys osalta antaa ymmärtää, että suuri osa kasvavasta biopohjaisten polymeerien kysynnästä suuntautuu elintarvikepakkauksiin.

3.2 Elintarvikepakkauksissa käytetyt biopohjaiset polymeerit

Elintarvikepakkauksissa voidaan yleisesti käyttää muoveja primääri- ja sekundääripakkauksella. Sekundääripakkaukset ovat useimmiten primääripakkauksia yhdessä pitäviä pakkauksia esimerkiksi varastointitarkoituksessa, jolloin molemmilla pakkaustyypeillä on hyvin samankaltaisia toiminnallisuusvaatimuksia materiaaliominaisuuksien suhteen. Elintarvikepakkauksissa käytettävistä biopohjaisista polymeereistä puhuttaessa voidaan kuitenkin lähtökohtaisesti viitata primääripakkauksiin.

Sekä biohajoavia että biohajoamattomia biopohjaisia polymeerejä käytetään elintarvikepakkauksissa. Erilaisia käytettyjä biopolymeerejä ja niiden sekoituksia paljon, mutta yleistä käytön soveltuvuutta tutkiessa voidaan biopohjaiset polymeerit jakaa Robertsonin kirjan [3, s. 59] mukaisesti kolmeen kategoriaan ja näiden kategorioiden pohjalta tutkia yleisiä biopohjaisia polymeerejä ja niiden sovelluksia elintarvikepakkauksissa.

Ensimmäiseen kategoriaan kuuluvat suoraan biomassasta johdetut polymeerit, eli luonnolliset polymeerit. Luonnolliset polymeerit voidaan edelleen jakaa karkeasti kahteen alaluokkaan, jotka ovat kasvi- ja eläinproteiinit sekä polysakkaridit. Toisen kategorian polymeerit synteettisiä biohajoavia polymeerejä, jotka ovat kemialliselta koostumukseltaan uniikkeja tai usein myös perinteisiä öljypohjaisia polymeerejä vastaavia drop-in- uusiopolymeerejä, jotka on polymeroitu luonnollisista, biomassapohjaisista monomeereistä. Uniikit synteettiset polymeerit eivät vastaa rakenteeltaan olemassa olevia materiaaleja. Suppein on kolmas kategoria, johon kuuluu bakteerien ja muiden organismien tuottamat bakteeriviljelmistä johdetut polymeerit. Robertsonin [3, s. 59] mukaan kaikkien

kategorioiden biopolymeereillä on olemassa olevia tai ainakin potentiaalisia sovelluksia elintarvikepakkauksissa.

Ensimmäisen kategorian elintarvikepakkausten laaja-alaisten sovellusten kannalta tärkeimpiin biopohjaisiin luonnollisiin polymeereihin Niaounakiksen kirjan [6] [6, s.139-165] kuvaamien sovelluskohteiden sekä raaka-aineena käytettävän biomassan saatavuuden pohjalta kuuluu Robertsonin kirjassa [3, s. 59] mainitut eläinpohjaiset proteiinit, kuten kaseiini hera ja kollageeni; kasvipohjaiset proteiinit kuten soija ja gluteeni; sekä polysakkaridit kuten erityyppiset tärkkelykset, luonnolliset kumit, selluloosajohdannaiset sekä kitosaani. Biopohjaisten polymeerien markkinakatsauksen [8] mukaan varsinkin tärkkelykset ja niihin pohjautuvat polymeeriseokset ovat luonnollisista polymeereistä tuotetuimpia. Toisen kategorian pakkaussovelluksiin tällä hetkellä käyttökelpoisia uusiomuoveja ovat varsinkin polylaktidi eli PLA, biopohjainen polyetyleenitereftalaatti eli bio-PET ja biopohjaiset polyalkeenit kuten biopohjainen polyeteeni eli bio-PE. Robertsonin kirjan ja Niaounakiksen kirjan sovelluskuvausten perusteella kolmannen kategorian materiaaleista eli PHA-polymeereistä on riittämättömästi näyttöä sovelluskäytössä tutkimaan kyseisten polymeerien varsinaista soveltuvuutta elintarvikepakkauksissa, mutta kiinnostus niiden käyttöä kohtaan on hyvin suurta. Käytön puute johtuu näiden polymeerien organismeihin perustuvan tuotannon korkeasta hinnasta verrattuna muihin biopohjaisiin polymeereihin [12].

Ensimmäisen kategorian eläin- ja kasvipohjaisten luonnollisten polymeerien tuotantoon kuluva biomassa saadaan pääasiassa merestä sekä maatalouden tuotteista. Näistä polymeereistä tärkkelykset ovat yleisimmin käytettyjä. Vaikka luonnollisia polymeerejä käytetään myös yksinään, tyyppillistä kaikille luonnollisille polymeereille on niiden käyttö sekoituksissa muiden polymeerien kanssa tai lisäaineina esimerkiksi synteettisten biopohjaisten polymeerien kanssa materiaaliominaisuuksien parantamiseksi. Luonnollisten polymeerien käyttöä puoltaa ensisijaisesti niiden bioyhteensopiva luonne. Elintarvikepakkauksissa bioyhteensopivuus ja bioaktiivisuus ovat tärkeitä varsinkin primääripakkauksissa, joissa pakkausmateriaali saattaa olla kosketuksessa tai muunlaisessa vuorovaikutuksessa elintarvikkeen kanssa [3].

Toisen kategorian synteettisistä biopohjaisista polymeereistä polylaktidi on laajimmin tuotettu, käytetty ja tutkittu pakkausteollisuudessa. Sitä tuotetaan fermentoimalla tärkkelyksestä aluksi maitohappomonomeerejä ja edelleen synteettisesti polymeroimalla tuotetut monomeerit. Polymerointivaiheessa monomeereistä voidaan tuottaa polylaktidin

kahdesta erilaisesta optisesta isomeeristä kopolymeeri, jossa optisten isomeerien keskinäinen suhde valmiissa materiaalissa vaikuttaa suuresti polylaktidin materiaaliominaisuuksiin [3].

Biopolyeteeni eli bio-PE on synteettinen biopohjainen drop-in polymeeri, jolla on samankaltainen koostumus kuin elintarvikepakkauksissa yleisimmin esiintyvällä öljypohjaisella muovilla eli polyeteenillä. Sitä valmistetaan polylaktidin tapaan biomassasta monomeerejä fermentoimalla ja edelleen polymeroimalla [3]. Polyeteenin suhteen samanlainen koostumus tekee biopolyeteenistä soveltuvan korvaajan polyeteenille, mikä näkyy biopolyeteenin valmistuksen ja käytön kasvuna viime vuosikymmenen aikana [13]. Bio-PET on niin ikään biopohjainen vastine öljypohjaiselle PET-muoville, jonka tuotanto on moninkertaistunut viimeisen vuosikymmenen aikana [14]. PLA, bio-PE ja bio-PET muodostavat tällä hetkellä yhdessä valtaosan toisen kategorian elintarvikepakkauksissa käytetyistä polymeereistä. Näillä kolmella materiaalilla voidaan arvioida synteettisten biopolymerien käytön soveltuvuutta elintarvikepakkauksissa, ja huomioida vaihtoehtoisia materiaaleja kyseisten polymeerien käytöstä havaittujen haittojen yhteydessä.

Kaiken kaikkiaan synteettisiä biopohjaisia polymeerejä käytetään tällä hetkellä huomattavasti luonnollisia polymeerejä enemmän elintarvikepakkauksissa johtuen niiden koostumuksen ja ominaisuuksien samankaltaisuudesta öljypohjaisiin polymeereihin verrattuna. Tällöin saavutetaan samankaltaiset mekaaniset ominaisuudet, läpäisevyys ja kemialliset ominaisuudet biohajoavuuden kustannuksella. Luonnollisten polymeerien biohajoavuus, bioaktiiviset ominaisuudet sekä mahdollisuudet sekoittaa niitä toisiinsa tai synteettisiin polymeereihin tekevät niistä varteenotettavan polymeeriluokan, jotka parantavat biopohjaisten muovien käytön ja soveltuvuuden potentiaalia.

3.3 Luonnollisten polymeerien käyttö elintarvikepakkauksissa

Niaounakis jakaa kirjassaan [6, s.139–165] biopohjaisia materiaaleja hyödyntävät pakkaussovellukset neljään luokkaan: kalvoihin, pusseihin, säilytysastioihin ja hauta-arkkuihin sekä uurniin. Elintarvikepakkausten kannalta olennaisia sovelluksia ovat kalvot, pusset sekä säilytysastiat, erityisesti pullot.

Luonnollisten polymeerien yleisimmät pakkaussovellukset ovat erilaiset kalvorakenteet ja geelit. Elintarvikepakkauksissa esiintyvät kalvorakenteet voivat olla erityyppisiä yksitai monikerroksisia kalvoja, kuten kutistekalvoja tai kääreitä, joita käytetään yhtenä osana elintarvikepakkausta. Kalvot tai kääreet ovat harvoin pakkauksen ainoa osa, jolloin luonnollisia polymeerejä käytetään lähes aina yhdessä muiden materiaalien kanssa. Tällöin myös sovelluskohteet ovat laajemmat ja yhteydessä muiden muovien sovelluskohteisiin. Kalvojen perinteinen tehtävä pakkauksen toiminallisuudessa on tavanomaisesti suojata elintarviketta ulkopuolisilta ympäristötekijöiltä kuten ilmalta, kosteudelta tai muilta aineilta kuten hiilidioksidilta tai aromaattisilta aineilta toimimalla aineiden läpäisevyyttä säätelevänä osana pakkausta. Kalvoilta edellytetään myös sovelluskohteisesti määriteltyjä kohtuullisia mekaanisia ominaisuuksia. Tyypilliset kalvomateriaalit, joilla on hyvät läpäisevyys- ja suojausominaisuudet ovat polyalkeeneja kuten PET, PE ja PVF. Näiden perinteisten kalvomateriaalien käytettävyyttä heikentää niiden biohajomattomuus. Puhtaasti luonnollisia polymeerejä käyttämällä tuotetut kalvot ovat toisaalta käytännössä aina heikompia joko mekaanisilta ominaisuuksiltaan tai aineenläpäisevyysominaisuuksiltaan kuin perinteiset muovikalvot, mutta täysin biohajoavia ja biopohjaisia [3] [6]. Luonnolliset polymeerikalvot eivät siis yksinään sovellu perinteisiin tarkoituksiin, joissa vaaditaan elintarvikepakkaukselta sekä hyviä mekaanisia ominaisuuksia että tiettyjä läpäisevyysominaisuuksia. Luonnollisten polymeerien käyttö sellaisenaan onnistuu valtaosassa pakkaussovelluksia vain lisänä jo valmiissa pakkauksessa tai enintään osittain korvaamaan pakkauksen osia. Suurimmassa osassa kalvosovelluksista, joilla pyritään korvaamaan jo olemassa oleva kalvo, tarvitaan öljypohjaisia lisäainepolymeerejä luonnollisten polymeerien lisäksi [3, s.51]. Toisaalta on hyödyllistä käyttää luonnollisia polymeerikalvoja perinteisten muovien rinnalla tai sekoituksissa siten, että minimoidaan perinteisten muovien käyttö.

Polymeerisekoituksia, joissa käytetään ainakin osittain luonnollisia polymeerejä, voidaan käyttää parempien yksittäisten materiaalien ominaisuuksien yhdistämiseksi ja koko kalvon ominaisuuksien parantamiseksi. Perinteisen polymeerisekoituksen lisäksi luonnollisten nanomateriaalien käyttö sekoitusaineena kalvon tuotannossa on osoittautunut erinomaiseksi tavaksi tuottaa perinteisiin muovikalvoihin verrattavat ominaisuudet [8, s.87]. Yleisimpiä luonnollisia polymeerejä, joita käytetään elintarvikepakkausten perinteisissä kalvoissa ovat tärkkelys ja selluloosan johdannaiset, mutta myös erityisesti proteiinikalvoja käytetään [3]. Perinteinen kalvo tarkoittaa elintarvikepakkauksessa käytettävää perinteisistä muoveista valmistettua ja niiden ominaisuuksiin perustuvaa kalvoa. Tyypillisintä luonnollisten polymeerikalvojen käyttöä perinteisissä sovelluksissa estävät tekijät ovat riittämättömät kosteudensietokyky ja hapen tai hiilidioksidin läpäisevyys.

Luonnollisista polymeereistä valmistetuilla kalvoilla on niiden bioyhteensopivuuden ja bioaktiivisten ominaisuuksien vuoksi myös uudenlaisia kalvo- ja geelipohjaisia käyttökohteita aktiivisina pakkausmateriaaleina, joita perinteisillä materiaaleilla ei voida toteuttaa. Rangappan kirjan [8, s. 85–96] mukaan erilaiset syötävät kalvot ja aktiiviset kalvot, joilla on elintarvikkeiden säilyvyyteen vaikuttavia ominaisuuksia ovat luonnollisten polymeerien tämän hetken tärkeimpiä sovelluksia elintarvikkepakkauksissa. Bioyhteensopivuuksensa vuoksi biopohjaisia kalvoja ja pinnoitteita voidaan käyttää osana elintarvikkepakkauksista siten, että biopohjainen kalvo tai pinnoite on kosketuksissa tai vaikuttaa elintarvikkeeseen suoraan jollakin edistävällä tavalla. Syötävät ja bioaktiiviset kalvot edistävät elintarvikkepakkauksen toiminnallisuuksista pakkauksen suojele- ja säilyvyyskykyä. Kalvot voivat suojata elintarvikkeita ympäristön haitallisilta aineilta, kuten vedeltä, kaasuilta tai jopa mikrobeilta. Lisäksi kalvot ja geelipinnoitteet voivat parantaa elintarvikkeiden säilyvyyttä epäsuorasti suojelemalla elintarviketta tai suorasti sisältämällä säilyvyyttä edistäviä komponentteja kuten luonnollisia säilytysaineita, antioksidantteja, antimikrobiallisia aineita tai kasvipohjaisia öljyjä. Säilyvyyden edistäminen luonnollisilla polymeereillä vähentää perinteisten säilyvyyteen vaikuttavien aineiden käytön tarvetta [15]. Syötäviä kalvoja voidaan käyttää myös pakkausjätteen minimoimiseksi, jos syötävien kalvojen käyttö vähentää muiden pakkauksen osien tarvetta. Lisäksi luonnollisia polymeerikalvoja voidaan bioyhteensopivien ominaisuuksien vuoksi käyttää aggressiivisemmin elintarvikkepakkauksissa erottamaan pakkauksen sisältämiä elintarvikkeita toisistaan, jolloin saman pakkauksen elintarvikkeet eivät pääse haitallisesti vaikuttamaan toisiinsa esimerkiksi siirtämällä makuja tai kosteutta [3, s.50–52].

Syötäviä ja bioyhteensopivia kalvoja ja pinnoitteita elintarvikkeisiin voidaan valmistaa kaikista erilaisista Robertsonin kirjan kategorian yksi [3, s. 59]. Luonnollisista polymeereistä ja niiden sekoituksista. Eniten syötäviä kalvoja valmistetaan tällä hetkellä polysakkarideista [15], mutta syötäviä proteiinikalvoja muun muassa kalaproteiineista, soijaproteiinista tai kollageenista on käytetty tuottamaan elintarvikkeelle ravintoarvoa samalla edistäen elintarvikkeen säilyvyyttä proteiinikalvojen hyvien kaasunläpäisevyysominaisuuksien vuoksi [8]. Varsinkin tärkkelystä ja selluloosaa käytetään samanlaisiin tarkoituksiin, mutta myös muita polysakkarideja kuten kitosaania ja kumeja sekä rasvoja käytetään. Joitakin eroja on myös materiaalien välillä niiden säilyvyyttä edistävissä ominaisuuksissa ja bioaktiivisuudessa. Tämän vuoksi tyypillisesti myös syötävissä kalvoissa suositaan eri luonnollisten polymeerien sekoituksia. Varsinkin tärkkelyksiä, jotka ovat käytetyimpiä luonnollisia polymeerejä, käytetään ensisijaisesti seoskalvoissa. Selluloosan johdannaisia käytetään kalvoissa estämään rasvojen ja kosteuden kulkeutumista

elintarvikkeeseen tai siitä pois. Kitosaania käytetään Rangappan kirjan mukaan [8, s. 90–92] erityisesti antimikrobisissa kalvoissa. Moniin luonnollisiin polymeerikalvoihin voidaan lisätä antioksidantteja tai antimikrobisia aineita lisäaineina, jolloin tämänkaltainen bioaktiivinen toiminallisuus saadaan laajempaan käyttöön [8, s. 92]. Erityisesti kasvien ja hedelmien pilaantumista voidaan hidastaa merkittävästi monenlaisilla syötävillä polysakkaridipohjaisilla kalvoilla, mutta myös liha- ja kalapakkauksissa suositetaan niiden nopean pilaantumisen vuoksi biopohjaisia kalvoja ja geelejä [8, s. 95-96].

3.4 Synteettisten biopohjaisten polymeerien käyttö elintarvikkepakkauksissa

Synteettisillä biopohjaisilla polymeereillä on elintarvikepakkausten osalta sovelluksia useissa Niaounakin kirjassa [6, 139–165] esiintyvissä biopohjaisten materiaalien sovellustyypeissä. Synteettisten biopohjaisten polymeerien osuus elintarvikkepakkauksissa on huomattavasti suurempi kuin luonnollisilla polymeereillä, johtuen synteettisten polymeerien rakenteiden ja ominaisuuksien monipuolisuudesta. Varsinkin PLA:n osuus kaikesta käytetystä biopohjaisesta muovista pakkauksissa on huomattava. Merkittäviä sovelluksia elintarvikkepakkauksissa ovat erilaiset kalvot, kääreet, pussit ja astiat, kuten pullot ja kupit.

Luonnollisten polymeerien tapaan synteettisistä biopohjaisista polymeereistä varsinkin PLA:sta valmistettuja kalvoja käytetään elintarvikkepakkauksissa korvaamaan perinteisiä kalvomateriaaleja. Puhtaan PLA:n käyttö kalvojen valmistuksessa on kuitenkin ongelmallista puutteellisten mekaanisten ominaisuuksien kuten suuren jäykkyyden ja korkean kosteuden läpäisevyyden vuoksi. Erilaisia luonnollisia lisäaineita ja PLA-pohjaisia polymeerisekoituksia voidaan kuitenkin käyttää erilaisissa elintarvikesovelluksissa, jolloin PLA on erittäin monipuolinen vaihtoehto perinteisten muovien korvaajaksi elintarvikepakkausille olennaisten ominaisuuksien suhteen [3, s. 68]. PLA:n monipuolisuus ja prosessointimahdollisuudet mahdollistavat sen laajan käytön. PLA-pohjaisia biopohjaisia polymeerejä on onnistuneesti käytetty täysin biopohjaisissa kalvoissa, kääreissä, pusseissa, kupeissa ja pulloissa. PLA:ta voidaan käyttää myös aktiivisissa pakkaustekniikoissa kuten antimikrobiallisissa ja antioksidanttisissa pakkauksissa sekoittamalla PLA-kalvoihin antioksidanttisia tai antimikrobisia aineita [16]. PLA:n käyttöä sen ominaisuuksien lisäksi rajaa sen prosessoinnin eli sekoittamisen ja lisäaineiden lisäämisen tarpeellisuus.

Bio-PET ja bio-PE- muoveja käytetään pääsääntöisesti niitä vastaavien perinteisten muovien sovelluksissa. Elintarvikepakkauksissa tärkeitä bio-PET- ja bio-PE- muovin sovelluksia ovat kalvot, kääreet, muovipullot ja muut jäykät astiat. Muiden biopohjaisten polymeerien tapaan myös bio-PET ja bio-PE- muoveja käytetään lisäaineiden ja sekoituksissa muiden polymeerien kanssa, sillä niiden suorituskyky ei yllä perinteisten muovien tasolle varsinkaan läpäisvevyysominaisuuksien suhteen [17]. Varsinkin bio-PET- muovin suosio on ollut viime vuosina laskussa, sillä sen käyttö täysin biopohjaisissa sovelluksissa ei ole ollut mahdollista, vaan bio-PET vaatii valmistusvaiheessa suuren määrän vastaavan perinteisen muovin valmistukseen käytettäviä ympäristölle haitallisia aineita [8]. Korvaavana muovina bio-PET- muovin tilalle on pyritty ottamaan käyttöön PEF- muovi, jolla on testien perusteella potentiaalia toimia 100 % biopohjaisissa pakkauksissa [8].

Bio-PE- polymeeriä voidaan valmistaa perinteisen PE:n tapaan erilaisina koostumuksina eri sovelluksiin. Korkean tiheyden bio-HDPE:ä ja matalan tiheyden bio-LDPE:ä voidaan molempia käyttää PE:n tavoin monipuolisissa pakkaussovelluksissa, kuten kalvoissa ja astioissa tai harvemmin myös sekoituksissa. Pakkaussovelluksissa bio-PE:tä on käytetty sekoituksissa ainakin PLA:n kanssa [15].

4. BIPOHJAISTEN POLYMEERIEIEN MATERIAALIOMINAISUUKSIEN TARKASTELU

4.1 Pakkausten kannalta

Muovien suotuisimmat materiaaliominaisuudet pakkauksen eri toiminnallisuuksien kannalta ovat soveltuvien osin mekaaniset ominaisuudet, terminen kestävyys sekä kyky estää tai sallia veden ja kaasujen läpäisyä [18]. Mekaanisista ominaisuuksista oleellisin on materiaalin lujuus ja jäykkyys, joilla on merkitystä varsinkin pakkauksen suojaustoiminnallisuuden kannalta. Toisaalta mekaaniset ominaisuudet vaikuttavat myös pakkauksen kätevyteen ja kommunikaatiokykyyn esimerkiksi lujuuden, jäykkyyden ja painatukseen soveltuvien pintaominaisuuksien kannalta. Termisellä kestävyydellä tarkoitetaan materiaalin rakenteen reagointia lämpötilaan ja stabiiliutta pakkaukselle määritettyjen normaalien lämpötilavaihteluiden seurauksena. Läpäisevyysominaisuuksista tärkeimpiä ovat kosteuden ja happi- ja hiilidioksidikaasujen läpäisevyys pakkauksen ulkoisen ja sisäisen tilan välillä normaaleissa olosuhteissa eli pakkauksen säilytys- ja käyttöolosuhteissa. Terminen kestävyys ja läpäisevyys ovat tärkeitä pakkauksen ja elintarvikkeen säilyvyyden ylläpitämiseksi. Tutkitaan kappaleessa 3 esitettyjen biopohjaisten polymeerien materiaaliominaisuuksia elintarvikepakkausten toiminnallisuuden kannalta, jotta voidaan arvioida eri materiaalien soveltuvuutta.

Elintarvikepakkauksissa käytettyihin luonnollisiin polymeereihin kuuluu kappaleen 3 mukaisesti polysakkaridit, erityisesti tärkkelykset, selluloosajohdannaiset, luonnolliset sekä kitosaani. Lisäksi luonnollisiin polymeereihin kuuluu erilaiset eläin- ja kasviproteiinit, kuten kollageeni, soija, hera ja gluteeni. Näiden polymeerien sovellukset elintarvikepakkauksissa ovat erilaiset suojaavat, säilyvyyttä parantavat, syötävät, bioyhteensopivat ja bioaktiiviset kalvot, kääreet ja geelit. Luonnollisten polymeerien mekaaniset ominaisuudet ovat tyypillisesti heikompia kuin perinteisten kalvomateriaalien, kuten PET- ja PE-muovien mekaaniset ominaisuudet [8, s.87–95]. Lisäksi luonnollisilla polymeereillä on verrattain heikko terminen kestävyys. Sellaisenaan luonnollisia polymeerejä ei voida perinteisten termoplastisten muovien tapaan muokata sulassa tilassa, sillä luonnollisten polymeerien korkean kiteisyysasteen vuoksi niiden rakenne hajoaa sulamislämpötilan yläpuolella. Luonnollisten polymeerien muokkauksessa on käytettävä lisäaineena pehmentimiä ja ulkoista leikkausrasitusta rakenteen ylläpitämiseksi [3, s.64]. Kiteisen rakenteensa vuoksi luonnolliset polymeerit ovat alttiita rakenteen ja materiaaliominaisuuksien

heikentymiselle lämpötilan nousun myötä. Oleellisia materiaaliominaisuuksia luonnollisille polymeereille pakkausten toiminnallisuuden näkökulmasta ovat aineiden läpäisevyys sekä bioaktiivisuus.

Luonnollisista polymeerikalvoista proteiinikalvot estävät parhaiten kaasujen läpäisevyyttä ja ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan kohtuullisia [3, s.54]. Polysakkaridipohjaiset kalvot ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan vaihtelevia johtuen polysakkaridien erikokoisista molekyyliarakenteista ja niiden kaasunläpäisevyys on proteiineja suurempi [3, s.51]. Tärkkelykset ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan kaikista biopolymeereistä lujimpia, minkä vuoksi tärkkelystä käytetään hyvin paljon sekoitusaineena biopohjaisissa kalvoissa, jolloin saadaan hyvät mekaaniset ominaisuudet. Selluloosajohdannaiset edustavat keskiarvoa luonnollisten polymeerien mekaanisten ja läpäisevyysominaisuuksien suhteen. Selluloosajohdannaisten ominaisuuksiin lukeutuu myös sitkeys, läpinäkyvyys ja hajuttomuus, mikä tekee niistä erinomaisia kalvoja sovelluksiin, joissa se täyttää ominaisuusvaatimukset [8, s.94]. Materiaalikohtaisista hyödyllisistä läpäisevyysominaisuuksista riippumatta kosteuden läpäisevyys on biopohjaisten polymeerien yhteinen suurin heikkous [3, s.75–77]. Luonnollisten polymeerien kyky estää kosteuden siirtymistä materiaalin läpi on huono materiaalista riippumatta, jolloin pakkauksissa, joissa kosteudensietokyky on vaatimuksena, on käytettävä vaihtoehtoisia materiaaleja lisänä.

Vaikka luonnollisilla polymeereillä on yleisesti bioyhteensopivia ominaisuuksia [8, s. 84-85], erityisesti kitosaani on korkean molekyylipainonsa helppo valmistaa kalvoksi tai geeliksi, jolla on muihin luonnollisiin polymeerikalvoihin verrattuna suotuisia ominaisuuksia kuten kyky torjua tehokkaasti mikrobeja ja toimia syötävänä elintarvikepinnotteena tai -kalvona. Tärkeimpänä luonnollisia polymeerikalvoja yhdistävänä ominaisuutena voidaan pitää niiden käyttöä syötävinä säilyvyyden edistäjinä, joilla on kyky torjua elintarvikkeita pilaannuttavia tekijöitä kuten mikrobeja, vettä ja kaasuja. Syötävyyteen liittyvä ominaisuus on myös pakkausjätteen minimointi. Vaikka syötävää kalvoa ei syötäisikään, syötävyys takaa sen bioyhteensopivuuden ja ei-myrkyllisyyden myös ympäristössä.

Synteettisten biopohjaisten polymeerien ominaisuuksissa korostuvat mekaaniset ominaisuudet kuten lujuus ja jäykkyys, sillä niille tyypillistä pakkaussovelluksissa on pakkauksen kestävyys ja pysyminen muodossaan, joka on oleellinen tekijä pakkausten toiminnallisuuden kannalta varsinkin astioissa kuten pulloissa. Kuvassa 3 näkyy laajimmin käytetyn biopohjaisen polymeerin PLA:n keskeiset mekaaniset ja läpäisevyyteen liittyvät materiaaliominaisuudet verrattuna tyypillisiin öljypohjaisiin muoveihin.

Property/Polymer	LDPE	PET	PLA	PP	PS
Strength (MPa)	10–12	55–79	37–66	15–27	24–60
Elongation at Break (%)	300–500	15–165	0.5–9.2	100–600	1.6–2.5
Oxygen barrier (permeation at 30 °C [$\times 10^{-10}$ cm ³ (STP)-cm/cm ² ·S-cm Hg])	6.9	0.04	3.3	1.5	2.6
Moisture vapour transmission rate (g-mil/10in. ² /24 h)	1.0–1.5	2	18–22	0.5	10
Water absorbance (%)	0.005–0.015	0.1–0.2	3.1	0.01–0.1	0.01–0.4
Thermal properties [Glass Transition Temperature-T _g (°C)]	-110	73	55	-20	90
Transparency (Clarity)	High	Excellent	High	Poor	Excellent
Carbon dioxide barrier (permeation)	28	0.2	10.2	5.3	10.5
Chemical resistance	Good	Good	Poor	Good	Good

Kuva 3: PLA:n ja käytetyimpien perinteisten muovien materiaaliominaisuudet [19]

Huomataan, että lujuus on PLA:n rakenteesta riippuen samankaltainen verrattavana oleviin muoveihin nähden. Astioihin liittyvissä pakkaussovelluksissa kuten pulloissa ja kupeissa huomioitavaa on lujuuden lisäksi PLA:n poikkeavan suuri jäykkyys. Jäykkyyden ansiosta PLA-pakkaukset pitävät muotonsa taulukon muita muoveja tehokkaammin. Kalvo- ja astiasovelluksissa molemmissa voidaan huomioida kuvan taulukon muut seikat, kuten kaasun- ja kosteudenläpäisevyys, termiset ominaisuudet ja kemiallinen vastustuskyky. Nähdään, että PLA:n kyky vastustaa hapen ja kosteuden läpäisyä on heikko varsinkin verrattuna perinteiseen PET-muoviin. Hiilidioksidin läpäisyntokky PLA:lla on parempi kuin kalvomateriaalina käytetyllä LDPE:llä, mutta huonompi kuin PET-muovilla. Verrattuna öljypohjaisiin muoveihin, PLA:lla on lisäksi huono elintarvikkeille haitallisten kemikaalien sietokyky. Bio-PET ja bio-PE ovat ominaisuuksiltaan samanlaisia kuin perinteiset muovivastineensa, jolloin niitä voidaan ominaisuuksien puolesta käyttää vastaavissa sovelluksissa. Synteettiset biopohjaiset polymeerit ovat luonnollisista polymeereistä poiketen helppo muovata sulassa olotilassa lopulliseen muotoonsa niiden termoplastisuudesta johtuen, jolloin niiden prosessointiin ei tarvita ylimääräisiä vaiheita tai menetelmiä perinteisten muovipakkausten prosessointimenetelmien lisäksi. Synteettisten polymeerien kuumamuokkaamisen mahdollistavat materiaaliominaisuudet yhdistettynä mekaanisiin ominaisuuksiin tekevät niistä huomattavasti luonnollisia polymeerejä monikäyttöisempiä.

4.2 Biopohjaisten polymeerien ympäristötekijöiden kannalta

Biopohjaisten polymeerien ympäristövaikutuksiin liittyviä ominaisuuksia voidaan tarkastella kahdesta päänäkökulmasta: öljyriippumattomuuden vaikutukset ja biohajoavuuden

tai biohajoamattomuuden liittyvät ominaisuudet, kuten kompostoitavuus ja muut biohajoavuuden edellytykset. Luonnolliset polymeerit ovat sellaisenaan täysin biohajoavia myös luonnollisissa olosuhteissa, mutta niiden käyttö lisäaineena ja sekoituksissa muiden polymeerien kanssa elintarvikepakkausten sovelluksissa ei takaa sovelluksen biohajoavuutta. Kuitenkin luonnollisten polymeerien läsnäolo osana pakkausta edistää lopputuotteen biohajoamista vähintään luonnollisten polymeerien osalta, jolloin niiden käyttö sovelluksen biohajoavuuden osalta on kannattavaa joka tapauksessa. Robertsonin kirjan mukaan [3, s.655] suuri osa varsinkin pakkauksissa käytetyistä kalvoista ei päädy kierrätettäväksi, jolloin ne ovat yleisyytensä vuoksi merkittävä ympäristörasite ja luonnollisiin polymeereihin perustuvat kalvot vähentäisivät oleellisesti elintarvikepakkausista johtuvaa kuormitusta.

Synteettiset biopohjaiset polymeerit ovat tyypillisesti biohajoamattomia. Kuitenkin esimerkiksi PLA on biohajoava tietyissä kompostointiolosuhteissa, mutta tutkimusten perusteella on todettu sen riittämätön hajoamisnopeus erilaisissa luonnollisissa olosuhteissa [7, s.194-198]. Ympäristöön joutuessaan yksinkertaisen PLA tuotteen hajoamisnopeuden on todettu olevan vuosia maalla, ja meressä sen on laajalti todettu olevan yhtä biohajoamatonta kuin öljypohjaisten muovien [21]. Biopohjaisten drop-in- polymeerien biohajoavuus vastaa niiden öljypohjaisten vastineiden biohajoavuutta.

Öljyriippumattomuuteen liittyy läheisesti hiilijalanjäljen ja ekologisen kestävyuden käsitteet. Kabascin kirjassa [7, s. 348–350] esitetään, että biomassasta tuotettujen biopohjaisten polymeerien pelkkään materiaaliin liittyvä hiilijalanjälki on teoriassa nolla. Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan sitä hiilen määrää, joka nettona kulkeutuu ympäristöön kyseisten muovien sisältämän hiilen vuoksi. Biopohjaisten polymeerien hiilijalanjälki on seurausta raaka-aineen uusiutuvuudesta. Biopohjaisten polymeerien kuluttama vapauttama hiilidioksidi palautuu käyttöön biomassan tuotannossa, toisin kuin öljypohjaisilla polymeereillä, joiden raaka-aine ei uusiudu. Tällainen hiilijalanjäljen määrittely ei kuitenkaan ota huomioon materiaalista valmistetun pakkauksen käyttöönoton vaatiman kuljetuksen ja prosessoinnin vaikutuksia. Kabascin kirjassa arvioidaan, että esimerkiksi PLA:n monivaiheisen prosessoinnin vuoksi sen prosessoinnin hiilijalanjälki on lähes kaksi kertaa suurempi kuin perinteisten PET- ja PE-muovien [7, s.351–352]. Yhteenlaskettu materiaalin ja prosessoinnin hiilijalanjälki suosii kuitenkin biopohjaisia polymeerejä. Hiilijalanjäljen lisäksi biohajoamattomuus vaikuttaa synteettisten biopohjaisten polymeerien ekologiseen kestävyteen. Synteettisiä polymeerejä sisältävillä pakkauksilla ei ole käytännössä eroa perinteisiin muovipakkauksiin biohajoavuuden suhteen. Toisaalta Kabascin kirjassa [7, s.353] todetaan, että bio-PE ja bio-PET ovat yhteensopivia perinteisten pakkausten kierrätysmahdollisuuksien kanssa.

5. BIPOHJAISTEN PAKKAUSMATERIAALIEN SOVELTUVUUS

5.1 Biopolymeerien soveltuvuus elintarvikepakkausten vaatimusten ja materiaaliominaisuuksien näkökulmasta

Perinteisiä öljypohjaisia polymeerejä suositaan erityisesti elintarvikepakkauksissa hinnan, saatavuuden ja monipuolisten materiaaliominaisuuksien vuoksi. Kappaleessa 3 esitellyjen biopohjaisten polymeerien raaka-aineen saatavuuden on siis vastattava perinteisten muovien saatavuutta. Natural Polymers- lehden artikkelin [18] ja Robertsonin kirjan [3] mukaan kasvi- ja eläinpohjaisen biomassan saatavuus ylittää kysynnän todella helposti, sillä tuotetusta biomassasta vain muutama prosentti hyödynnetään ja sitä on helppo tuottaa biopohjaisten polymeerien tuotantokapasiteettiin nähden todella paljon. Biomassan saatavuus ja uusiutuva luonne verrattuna öljyraaka-aineen uusiutumattomuuteen tekee biopohjaisista polymeereistä ainakin elintarvikepakkausmateriaalien olemassa olevan ja tulevaisuudessa kasvavan kysynnän puolesta erittäin soveltuvia. Raaka-aineen prosessointiin liittyvänä ongelmana voidaan pitää luonnollisten polymeerien osalta niiden termistä kestävyttä, joka estää niiden prosessoinnin pakkaussovelluksiksi ilman ylimääräistä kuormitusta aiheuttavia lisäaineita. Synteettisillä polymeereillä ei ole vastaavia raaka-aineen prosessointiin liittyviä materiaalitekniisiä ongelmia.

Elintarvikepakkausten sisältämien erilaisten toiminnallisuuksien näkökulmasta voidaan vertailla perinteisten muovimateriaalien ja biopohjaisten muovien erilaisia materiaaliominaisuuksia ja soveltuvuutta. Suojaukseen ja säilyvyyden edistämiseen liittyvät ominaisuudet kuten pakkauksen kyky pysyä ehjänä ja säilyttää muotonsa siten, että elintarvike ei vahingoitu, on biopohjaisten polymeerien kannalta osittain ongelmallista. Tyypillisesti biopohjaiset polymeerit sellaisenaan, ja varsinkin luonnolliset polymeerit ovat hauraampia ja pehmeämpiä kuin monet öljypohjaiset muovit. Poikkeuksena on perinteisiä muoveja vastaavat synteettiset biopolymeerit. Mekaanisiin ominaisuuksiin liittyvät soveltuvuusongelmat voidaan kuitenkin ratkaista sekoituksilla varsinkin PLA:n ja muiden synteettisten polymeerien kanssa ja lisäaineilla, joilla voidaan parantaa mekaanisia ominaisuuksia siinä määrin, että elintarvikepakkausten mekaaniset vaatimukset täyttyvät. Useilla materiaaleilla suuri soveltuvuusongelma on veden läpäisevyys. Tällaisten biopohjaisten polymeerien suuri veden läpäisevyys estää niiden muista materiaaleista riippumattoman käytön sovelluksissa, joissa käyttöolosuhteissa kosteus vaikuttaa elintar-

vikkeen tai pakkauksen säilyvyyteen. Tilanteissa, joissa vaaditaan tiettyjä läpäisevyysominaisuuksia, voidaan kuitenkin käyttää drop-in- biopolymeerejä, joiden aineiden läpäisevydet ovat perinteisiä muoveja vastaavat. Toisaalta soveltuvuutta säilyvyyden kannalta edistää biopohjaisten polymeerien bioyhteensopivuus ja bioaktiivisuus. Jos kosteuden läpäisy ei ole ongelma, biopohjaiset polymeerit ja varsinkin luonnolliset polymeerit ovat erittäin soveltuvia aktiivisina pakkausmateriaaleina edistämään säilyvyyttä. Bioaktiivinen luonne estää monilla polymeereillä ja sekoituksilla pilaannuttavien tekijöiden kuten kaasujen ja mikrobien pääsyn elintarvikkeen kosketuspintaan. Syötävien kalvojen sisällyttäminen pakkaukseen säilyvyyttä edistävänä tekijänä vähentää potentiaalisesti myös pakkausjätteen määrää, mikä lisää pakkauksen kätevyyttä. Pakkauksen kommunikointikykyyn ei biopohjaisilla polymeereillä ole soveltuvuuden näkökulmasta vaikutusta.

Ympäristötekijöihin liittyvät materiaaliominaisuudet kuten biohajoavuus, ekologinen kestävyys ja hiilijalanjälki vaikuttavat biopohjaisten materiaalien soveltuvuuteen. Kappaleessa 4 todettiin, että vaikka biopohjaisten polymeerien pakkauksiin vaadittavan prosessoinnin hiilijalanjälki on usein huomattavasti öljypohjaisia muoveja suurempi, nettohiilijalanjälki on pienempi johtuen raaka-aineena käytettävän biomassan uusiutuvuudesta. Luonnollisten polymeerien ekologinen kestävyys biohajoavuudesta ja ympäristöystävällisyydestä johtuen tekee niistä soveltuvia pakkausmateriaaliksi. Synteettisten biopohjaisten polymeerien biohajoamattomuus ei juurikaan tuota niille hyötyä perinteisiin muoveihin verrattuna, mutta hiilijalanjälki huomioon ottaen nettoympäristövaikutukset synteettisillä polymeereillä ovat positiivisia. Biopohjaisten polymeerien tuotantoon liittyvä maapinta-alan ja vesialueiden käyttö on ongelma, joka tulee tulevaisuudessa huomioida biopohjaisten polymeerien tuotantokapasiteetin kasvaessa. Verrattuna perinteisiin muoveihin, biopohjaisiin polymeereihin liittyvät maapinta-alan käyttö ja veden kulutus ovat huomattavasti suuremmat [22]. Perinteisistä muovien käytöstä poikkeavien luonnonvarojen kulutus on todennäköinen tulevaisuuden ongelma ja soveltuvuutta heikentävä tekijä.

5.2 Biopohjaisten pakkausmateriaalien soveltuvuus pakkausteollisuuden ja kuluttajien näkökulmasta

Pakkausteollisuuden näkökulmasta biopohjaisten raaka-aineiden hankinta ja jalostus elintarvikepakkauksiin soveltuviksi osiksi on oltava taloudellisesti kannattavaa. Kuvassa 4 ja 5 on esitetty vertailukohteina biopohjaisten ja perinteisten muovien hintatasot.

Plastic	Price level (euro/kg)	Density (kg/m ³)
CA	5	1,200–1,300
Bio-PA	+10–20%	1,040–1,190
Bio-PE	+20–40%	910–970
Bio-PET	No information	1,370–1,390
Bio-PP	+80–100%	900–920
PP (certified bio)	+40–50%	900–920
PBAT	3.5	1,250
Bio-PBS	4	1,260
PHA	5	1,200–1,250
PLA	2	1,250
PTT	4	1,320
Starch blends	2–4	1,250–1,350

Kuva 4: Biopohjaisten polymeerien hinnat [23]

Plastic	Price level (euro/1,000 kg)	Density (kg/m ³)
LDPE	1,250–1,450	910–940
HDPE	1,200–1,500	930–970
HIPS	1,350–1,525	1,080
PET	850–1,050	1,370–1,390
PP	1,000–1,200	900–920
PS	1,250–1,430	1,040
PVC	800–930	1,100–1,450

Kuva 5: Perinteisten polymeerien hinnat [23]

Nähdään, että tällä hetkellä biopohjaisten muovien käyttö pakkauksissa on materiaalista riippuen moninkertaisesti tai ainakin kymmeniä prosentteja kalliimpaa. Hintaluokkiin vaikuttaa pääasiassa biopohjaisten polymeerien tuotantokapasiteetin rajallisuus ja prosessoinnin hinnat. Biopohjaisten polymeerien lisäaineiden ja sekoitusten käytön tarve materiaalivaatimuksien täyttämiseksi tekee niistä kalliimpia, vaikka raaka-ainetta onkin helposti saatavilla. On oletettavaa, että tuotantokapasiteetin kasvaessa odotusten mukaisesti moninkertaiseksi tulevana vuosina [8], myös hintataso laskee ja taloudellinen kannattavuus ja sitä kautta biopohjaisten polymeerien soveltuvuus nousee huomattavasti verrattuna perinteisiin muoveihin. Soveltuvuutta pidemmällä aikavälillä pakkausteollisuuden näkökulmasta nostaa myös ulkoinen paine siirtyä vaihtoehtoisiin materiaaleihin ympäristöhuolien ja öljyn uusiutumattomuuden vuoksi. Nämä seikat nostavat näennäistä biopohjaisten polymeerien soveltuvuutta myös kuluttajien näkökulmasta. Markkinoinnilla vaikutetaan myös kuluttajien käsitykseen biopohjaisten polymeerien soveltuvuudesta, sillä pakkausteollisuus haluaa markkinoinnilla korostaa biopohjaisten polymeerien hyötyjä. Tällaisella yksipuoleisella markkinoinnilla saattaa olla haitallisia vaikutuksia biopohjaisten polymeerien todelliseen soveltuvuuteen, sillä kuluttajat saattavat käsittää väärin varsinkin synteettisten biopohjaisten polymeerien ympäristökäyttötymisen ja huomauttaen aiheuttaa enemmän ympäristöärsitettä kuin perinteisiä pakkauksia käyttäessään esimerkiksi hävittämällä pakkauksen väärin.

6. YHTEENVETO

Sekä luonnollisia polymeerejä että synteettisiä biopohjaisia polymeerejä sekä näiden sekoituksia keskenään tai perinteisten pakkausmateriaalien kanssa käytetään monipuolisiin elintarvikepakkauksiin osana pakkauskokonaisuutta tai sellaisenaan. Luonnollisten polymeerien pääkäyttökohteet ovat erilaiset kalvot ja geelit, joilla on bioaktiivisia vaikutuksia elintarvikkeen säilyvyyteen. Lisäksi luonnollisia polymeerejä käytetään seos- ja lisäaineina muiden polymeerien kanssa monipuolisissa elintarvikepakkaussovelluksissa. Synteettisiä biopohjaisia polymeerejä käytetään huomattavasti enemmän ja laaja-alaisemmin erilaisissa elintarvikepakkauksissa kalvoina, pusseina ja astioina korvaamaan perinteisiä muoveja. Synteettisistä polymeereistä varsinkin PLA on suosittu sen monipuolisten ja seostamalla muokattavien materiaaliominaisuuksien vuoksi. Synteettisiä polymeerejä ovat myös niin sanotut drop-in polymeerit, jotka ovat perinteisten muovien biopohjaisia vastineita. Käytetyimpiä drop-in polymeerejä ovat muun muassa bio-PET ja bio-PE.

Biopohjaisten polymeerien markkinaosuus pakkausmateriaaleista kattaa vasta muutamaa prosenttia, mutta on noussut alle yhden prosentin osuudesta viimeisen kymmenen vuoden aikana ja ennusteen mukaan tulee edelleen moninkertaistumaan muutaman seuraavan vuoden aikana. Pieni tuotantokapasiteetti ja prosessointivaatimukset tekevät useista biopohjaisista polymeereistä perinteisiä muoveja huomattavasti kalliimpia, mutta niiden käyttöä osana pakkauskokonaisuutta esimerkiksi kalvona voidaan tapauskohtaisesti pitää riittävän edullisena. Tuotantokapasiteetin ja saatavuuden kasvaessa suurempi osa pakkauksesta voidaan valmistaa biopohjaisista polymeereistä siten, että se on taloudellisesti kannattavaa.

Biopohjaisten polymeerien tyypillisiä materiaaliominaisuuksia ovat kohtuulliset mekaaniset ominaisuudet ja vaihtelevat kosteuden ja kaasujen läpäisevyyskyvyt. Polymeerisekoituksilla saadaan useimmissa tapauksissa sovelluskohtaisesti riittävät mekaaniset ominaisuudet ja kaasujen läpäisevyysominaisuudet, mutta kosteissa olosuhteissa toimiviin pakkauksiin soveltuvat vain perinteisiä muoveja vastaavat synteettiset biopolymeerit. Luonnollisten polymeerien ongelmana on lisäksi huono muokkautuskyky niiden huonon termisen kestävyuden vuoksi. Lisäaineiden avulla niitä voidaan kuitenkin muokata pakkauksiin soveltuviksi kalvoiksi. Synteettiset polymeerit ovat perinteisten muovien veroisia

muokausmahdollisuuksien suhteen ja soveltuvat paremmin muokattavaksi pakkausten vaatimiin muotoihin.

Ympäristötekijät kuten hiilijalanjälki, ekologinen kestävyys ja biohajoavuus ovat keskeisiä biopohjaisten polymeerien käsitteitä. Luonnolliset polymeerit ovat biohajoavuutensa ja biopohjaisuutensa ansiosta erittäin soveltuvia pakkausmateriaaleiksi ympäristötekijöiden puolesta. Synteettisten polymeerien biohajoamattomuus asettaa ne samalle tasolle perinteisten muovien kanssa käytönjälkeisen soveltuvuuden ja ympäristörasitteiden suhteen. Toisaalta bioraaka-aineen vuoksi niiden materiaaliin sitoutunut hiilijalanjälki tekee niistä jonkin verran ekologisesti kestävämpiä kuin perinteisistä muoveista.

7. VIITTAUKSET

- [1] N. Peelman, P. Ragaert ja a. Et, "Application of bioplastics for food packaging," *Trends in Food Science & Technology*, 08 2013.
- [2] "Food Packaging Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Rigid, Flexible), By Material (Paper, Plastic), By Application (Bakery and Confectionery, Dairy Products), By Region, And Segment Forecasts, 2020 - 2027," Grand View Research, 2020.
- [3] G. Robertson, tekijä: *Food Packaging : Principles and Practice, Third Edition*, Taylor & Francis Group, 2012.
- [4] M. Norton, "Tackling the Challenge of Packaging Plastic in the Environment," *Chemistry, a European Journal*, 23 06 2020.
- [5] "Biomuoviopas," Muoviteollisuus Ry, 2020.
- [6] M. Niaounakis, "Biopolymers: Applications and Trends," Elsevier Science & Technology Books, 2015.
- [7] C. V. S. Stephan Kabasci, "Bio-Based Plastics : Materials and Applications," John Wiley & Sons, Incorporated, 2013.
- [8] S. M. Rangappa ja e. al., "Food Packaging : Advanced Materials, Technologies, and Innovations," Taylor & Francis Group, 2021.
- [9] J. Muncke, "Food Packaging Materials," 2012.
- [10] "Market update 2020: Bioplastics continue to become mainstream as the global bioplastics market is set to grow by 36 percent over the next 5 years," European Bioplastics, 2020.
- [11] A. Mirabal, L. Scholz ja M. Carus, "Bio-based Polymers in the World Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends towards 2020," Nova Institut, 2013.
- [12] M. Asgher, S. A. Qamar ja e. al, "Bio-based active food packaging materials: Sustainable alternative to conventional petrochemical-based packaging materials," *Food Research International*, 11 2020.
- [13] D. B. M. Research, "Global Bio-Based Polyethylene (PE) Market – Industry Trends and Forecast to 2027," 2020.
- [14] "Bio-based Polyethylene Terephthalate Market Size, Share & Trends Analysis By Application (Bottles, Technical, Consumer Goods), By Region (North America, Europe, Asia Pacific, Central & South America), And Segment Forecasts, 2018 - 2025," Research, Grand View, 2017.
- [15] S. Mohamed ja a. et, "Polysaccharides, Protein and Lipid -Based Natural Edible Films in Food Packaging: A Review," *Carbohydrate Polymers*, p. 2020, 15 06 2020.
- [16] A. Oz, Ö. sufer ja Y. Sezer , "Poly (Lactic Acid) Films in Food Packaging Systems," *Food Science And Nutrition Technology*, 2017.
- [17] V. Siracusa , "Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent Developments in Bio-Based Polymers Analogous to Petroleum-Derived Ones for Packaging and Engineering Applications," *Polymers*, 16 7 2020.
- [18] S. T. Sam, M. A. Nurabidah ja N. Hani, "Current Application and Challenges on Packaging Industry Based on Natural Polymer Blending," *Natural Polymers*, pp. 163-184, 25 12 2015.
- [19] L. Ncube, A. Ude ja a. Et.
- [20] "Bioplastic materials," European Bioplastics, 2020.
- [21] G. R. Montalvao, "Behaviour of 3D printed PLA and PLA-PHA in marine environments," IOP, 2020.

- [22] J. Brigza, K. Hubacek ja K. Feng, "The Unintended Side Effects of Bioplastics: Carbon, Land, and Water Footprints," *One Earth*, 07 2020.
- [23] N. Halonen, A. Bassani ja A. Et, "Bio-Based Smart Materials for Food Packaging and Sensors – A Review," *frontiers in Materials*, 04 2020.
- [24] Standardi: SFS-EN 13432

