

**TARTU ÜLIKOOL**  
**ÖKOLOOGIA JA MAATEADUSTE INSTITUUT**  
**ZOOLOOGIA OSAKOND**  
**ENTOMOLOOGIA ÕPPETOOL**

**Birgit Plaado**

**PLASTI LAGUNDAVAD MARDIKALISED: MÕJUD KESKKONNALE,  
PUTUKATELE JA ENDOSÜMBIONTIDELE**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Toomas Esperk

**TARTU 2025**



## **Infoleht**

### **Plasti lagundavad mardikalised: mõjud keskkonnale, putukatele ja endosümbiontidele**

Plastil on aeglane lagunemiskiirus, mis tähendab, et see jõuab laiemalt levida enne kui see laguneb. Viimasel ajal on putukate vastsed pälvinud plasti biolagunemise uurijate tähelepanu, sest mõned liigid suudavad sünteetilisi polümeere purustada ja seedida. Bakalaureusetöö annab ülevaate tehtud uuringutest, mis hindavad mardikaliste seltsi erinevate liikide võimet plasti lagundada ning selle mõju putukatele endile. Olulist rolli selles protsessis mängivad ka soolestiku endosümbiondid, kes aitavad plastipõhiseid ühendeid keemiliselt muundada ning mõjutavad peremeesorganismi seedimist, ainevahetust ja arengut. Peamiselt võrreldakse erinevate liikide efektiivsust nelja erinevat tüüpi plasti lagundamisel ning mõju putukate elukäiguomadustele. Töö tulemustest selgub, et plast ei ole piisavalt toitainerikas, et olla mardikatele põhiline toiteallikas. Kui lisada plastile ka liigile harjumuspärast toitu, on liigid võimelised elutsükli läbima, kuid järgmised põlvkonnad pole nii elujõulised, kui tavatoidul kasvanud mardikad.

Märksõnad: *Coleoptera*; plasti lagundamine; vastsed; mardikalised; endosümbiondid

### **Plastic-degrading beetles: impacts on the environment, insects and endosymbionts**

Plastic has a slow rate of decomposition, which means that it can spread everywhere before decomposing. Recently, insect larvae have attracted the attention of researchers, as some species can break down and digest synthetic polymers. This bachelor's thesis provides an overview of studies that evaluate the ability of different species of the beetle order to decompose plastic and its effect on the insect's life history. Gut endosymbionts also play an important role in this process, helping to chemically transform plastic-based compounds and influencing the host's digestion, metabolism, and development. The main focus is on comparing the efficiency of beetle species in breaking down four different types of plastics and the impact of these substances on the life history traits of insects. Results indicate that plastic is not nutritious enough to be a primary food source for the beetle larvae. If, in addition to plastic, the diet includes food that is habitual for the species, the species can

complete their life cycle; however, the next generations may have lower fitness compared to conspecifics reared on regular diet.

Keywords: *Coleoptera*; plastic degradation; larvae; beetles; endosymbionts

## Sisukord

Sissejuhatus.....	6
Metoodika.....	8
Plastitüübid ja nende lagunemine.....	9
Polüstüreen.....	9
Polüpropüleen.....	9
Polüetüleen.....	10
Polüvinüülkloriid.....	10
Plasti biodegradatsioon.....	11
Putukate plastiseedimine.....	11
Plasti lagundavad putukaliigid.....	13
Mardikalised.....	13
<i>Alphitobius diaperinus</i> .....	18
<i>Plesiophthalmus davidis</i> .....	19
<i>Protaetia brevitarsis</i> .....	19
<i>Zophobas atratus</i> .....	20
Harilik jahumardikas ( <i>Tenebrio molitor</i> ).....	22
Tume jahumardikas ( <i>Tenebrio obscurus</i> ).....	24
Punane jahumardikas ( <i>Tribolium castaneum</i> ).....	25
Ruuge-jahumardikas ( <i>Tribolium confusum</i> ).....	26
<i>Uloma</i> .....	26
Lõpp-produktide keskkonnamõju.....	28
Arutelu.....	30
Kokkuvõte.....	35
Summary.....	36
Tänuavaldused.....	37
Kasutatud kirjandus.....	38
Interneti allikad.....	45

## Sissejuhatus

Plasttooteid on hakatud üha enam tarbima, kuna need on vastupidavad ja kerged. Neid kasutatakse erinevates eluvaldkondades, näiteks meditsiinis ja tööstuses (Turan jt, 2021; Chawla jt, 2022). 2021. aastal suurenes ülemaailmne plasti tootmine 4% võrra ehk 390 miljoni tonnini, mis näitab siiani suurt nõudlust plasttoodete järele (Internet 3).

Plastjäätmel on aeglane lagunemiskiirus, igapäevaselt kasutataval plastil võtab lagunemine aega 20 kuni 600 aastat, olenevalt tema tihedusest, molekulmassist, õhuniiskusest, temperatuurist ja paljust muust (Chamas jt, 2020). Plastisaaste on globaalne keskkonnaprobleem, kuna plast laguneb väga aeglaselt, akumuleerub kõikjal looduses ja ohustab ökosüsteemide terviklikkust (Chamas jt, 2020; Turan jt, 2021). Plasti on raske taaskasutada sinna lisatud lisandite tõttu, milleks on näiteks PAH-id, ftalaadid ning mürgised värvained (Chawla jt, 2022). Erinevate plastiliikide eraldamine on väga keeruline või kulukas. Lihtsam on toota uut plasti kui üritada vanast, juba kasutatud plastist midagi uut toota (Vogt jt, 2021). Plasti lagunemisel tekkiv mikroplast on saanud üheks populaarsemaks uurimisobjektiks, kuna selle mõju organismidele ja toiduahelatele on veel ebapiisavalt uuritud (Fackelmann jt, 2023). Mikroplastiks liigitatakse plasti, mis on lagunenu väiksemateks osadeks kui 5 mm. Seda peetakse uut tüüpi saasteaineks, mis on tänapäeval laialdaselt levinud (Turan jt, 2021; Fackelmann jt, 2023). Nanoplastid, mis on veelgi väiksemad plastiosakesed (alla 100 nm), kujutavad endast eriti suurt ohtu, kuna nad võivad tungida rakkudesse ja mõjutada valkude sekundaarset struktuuri, põhjustades nende denatureerumist ja seeläbi potentsiaalselt rakusurma (Hollóczki ja Gehrke, 2019).

Mikroplast jagatakse primaarseks ja sekundaarseks mikroplastiks vastavalt tema päritolule (An jt, 2020; Pirsahab jt, 2020). Primaarne mikroplast toodetakse kohe mikroplastina koduseks kasutamiseks, see on leitav erinevates kosmeetikatoodetes, näiteks päikesekreemides, puhastusvahendites, näiteks pulbrites ja muudes meditsiinitoodetes (Pirsahab jt, 2020). Vastupidiselt primaarsele, tekib sekundaarne mikroplast aja möödudes suuremate plastesemete, näiteks autorehvide, plastpudelite ja -kottide ning kalastusvarustuse, lagunemisel bioloogilisel-, keemilisel- või füüsilisel teel (An jt, 2020).

Hiljutistes uuringutes on putukate vastsed pälvinud plasti biolagunemise uurijate tähelepanu, kuna mõned liigid suudavad sünteetilisi polümeere purustada ja seedida. Seetõttu on hakatud uurima vastsete võimet plasti lagundada ning plasti mõju putukatele endile. Põhiliselt on

uuritud mardikaliste (eeskätt hariliku- ja tumeda jahumardika), liblikaliste (väike-vahaleediku ja lõuna-aidaleediku), kui ka süsiklaste (*Zophobas atratus* ja *Plesiophthalmus davidis*) võimet lagundada erinevaid polümeere (Zhong jt, 2022; Brandon jt., 2018; Luo jt, 2020; Peng jt., 2019). Mardikalistele keskenduti töös seetõttu, et nende kohta on avaldatud kõige rohkem artikleid ning on uuritud erinevaid aspekte plasti lagundamise osas, näiteks elumus, nukkumise tõenäosus ja mõjud vastsetele.

Leitud on tõendeid, mis näitavad, et erinevat liiki plastid läbivad keemilisi reaktsioone putukate vastsete seedesüsteemis, seega saame oletada, et nad on suutelised seda seedima erinevate bakterite abil nende seedesüsteemis. Need keemilised reaktsioonid põhjustavad polümeeri massi vähenemist ja molekulmassi muutumist, vaheühendite teket, CO<sub>2</sub> tootmist, mis tõendavad plasti biodegradatsiooni (Sanchez-Hernandez, 2021; Pivato jt 2022).

Eelnevates uurimustes on enamasti selgitatud, kui tõhusad plastilagundajad konkreetsed putukaliigid on ja kuidas plast neile putukatele mõjub. Samas puuduvad kokkuvõtavad tööd, mis võrdleks millist plasti ja kui tõhusalt erinevad putukaliigid lagundavad. Seni puuduvad ka süsteemsed, tervikpilti silmas pidavad sünteesid, mis integreeriks lagundamisvõimekuse, bioloogilise mõju ja mikroobikoosluste rolli võrreldaval kujul.

Töö eesmärk on välja selgitada erinevate plastiliikide lagundamiseks kõige efektiivsemad mardikalised; sümbiondid, kellega efektiivsemad plasti töötlevad putukad koostööd teevad; plasti töötlemise lõpp-produktid ning nende keskkonnamõju. Eesmärgiks on veel uurida mõju putukatele endile, sealhulgas plastitoidu mõju nende elukäiguomadustele nagu elumus, kehakaalu muutus, nukkumise tõenäosus ja sigimisvõime. Sihiks on eelnevaid punkte silmas pidades koostada kokkuvõtlik ülevaade erinevate mardikaliste polümeeride lagundamise efektiivsusest. See töö aitab meil paremini mõista plasti mõju putukatele, mis annab meile aimu kuidas plast ka teisi elusorganisme mõjutada võiks. Töö hindab, kui tõhusad on mardikad erinevate plastide lagundamisel ning annab jäätmekäitlejatele sellesisulisi soovitusi.

## Metoodika

Otsisin erinevatest seltsidest putukaliike, kes plasti lagundavad. Otsingumootorina kasutasin Google Scholar (Internet 1) andmebaasi sisestades vastavalt “plastic degradation” AND “*seltsi teaduslik nimetus*”. Jätsin ebausaldatavuse tõttu välja MDPI-kirjastuse poolt avaldatud artiklid ning ülejäänud artiklite avaldajatel kontrollisin üle mõjuteguri (*impact factor*), jätsin välja artiklid, mille mõjutegur oli väiksem kui 2. Mõjutegur on indeks, mis näitab, kui palju on viidatud uuritud ajakirja erinevatele artiklitele kahe aasta jooksul kõikidest selles ajakirjas ilmunud artiklitest (Aase, 2008). Seltside nimetused, mida otsingumootoris kasutasin olid: *Blattodea, Isoptera, Zoraptera, Grylloblattida, Mantoptera e. Mantodea, Phasmoptera e. Phasmida, Orthoptera, Coleoptera, Lepidoptera, Diptera*.

Kui leidsin artikleid, kus oli mainitud otsitud seltsi liigil võimet plasti töötleda, sisestasin sama ka EBSCO Discovery (Internet 2) andmebaasi ning otsisin sealt erinevaid teadusartikleid, mis viitaksid selle liigi võimele plasti töödelda, taas kontrollisin artiklitel mõjutegurit. Sain kinnitust, et mardikaliste (*Coleoptera*), liblikaliste (*Lepidoptera*), prussakaliste, sh termiitide (*Blattodea*), sihktiivaliste (*Orthoptera*) ja kahetiivaliste (*Diptera*) seltsides leidub liike, kellel on avastatud võimekus plasti mingil määral lagundada. Kuna selliselt leitud artiklite koguarv ületas kaugelt bakalaureusetöö nõudeid, keskendusin edaspidi kõige arvukamalt uuritud seltsile ehk mardikalistele.

Iga plasti lagundava liigi kohta lugesin vähemalt kahte artiklit vältimaks infoallikate kallutatust. Artiklitest otsisin välja sarnased uuringud, mis selgitasid vastsete kaalumuutuseid 30-päeva jooksul ning analüüsisid väljaheidete ja soolestiku sisu. Nukkumise tõenäosuse (ja seeläbi vastse suremuse) leidsin uuringutest, mis kestsid 90 päeva ja rohkem, kuna 30 päeva on ebaoptimaalsel toidul kasvavatele putukatele vastsestaadiumi läbimiseks liiga lühike aeg. Sama liiki ja samu tunnuseid uurivate tööde puhul eelistasin suurema valimiga töid.

## Plastitüübid ja nende lagunemine

Plastide tõhusate biotililiste lagundamismehhanismide leidmiseks on oluline mõista erinevate plastide omadusi ning tuvastada viise, kuidas plastid looduses lagunevad. Plastid on looduses osaliselt lagunevad, kuid vajavad selleks pikka ajaperioodi ja spetsiifilisi tingimusi, näiteks päikesevalgust, kuumust või niiskust (Geyer jt, 2017). Kõik all loetletud plastitüübid on valdavalt süsiniksidemeid sisaldavad, raskesti lagundatavad ning hõlmavad rohkem kui 75% iga-aastasest plasti tootmisest (Zhang jt, 2022b).

### Polüstüreen

Polüstüreen (PS), keemilise valemiga  $(C_8H_8)_n$  ehk  $[-CH-(C_6H_5)CH_2-]_n$  (Peng jt, 2019), on aromaatsete külghelatega, vahelduvalt fenüülosadega seotud, mis muudab PS-i biolagunemise raskeks (Kim jt, 2021). Tegemist on termoplastiga, mis hakkab lagunema looduskeskkonnas, kuid väga aeglaselt, mis tähendab, et PS säilib keskkonnas pikka aega (Ho jt, 2018). Seda kasutatakse tavaliselt pakkimisvahu, ühekordselt kasutatavate tasside ja toidupakendite tootmiseks. On leitud üksikuid mikroorganisme, kes on võimelised polüstüreeni keemiliselt muutma (Ho jt, 2018; Mor ja Sivan 2008). PS-i on võimelised lagundama näiteks bakterid *Microbacterium sp. NA23*, *Paenibacillus urinalis NA26*, *Bacillus sp. NB6* ja *Pseudomonas aeruginosa NB26*, mis kuuluvad vastavalt *Actinobacteria*, *Firmicutes* ja *Proteobacteria* hõimkondadesse ning suudavad kasutada polüstüreeni ainsa süsinikuallikana, põhjustades selle struktuurimuutusi ja lagunemisproduktide teket (Zhang jt, 2022b).

### Polüpropüleen

Polüpropüleeni (PP) keemiline valem on  $(C_3H_6)_n$ . Selle plasti süsinikahel on lineaarne. Tegemist on termoplastiga, mis on kõrge temperatuuritaluvusega ja sobib selliste esemete jaoks nagu kandikud, lehtrid, ämbrid, pudelid ja kliinilised instrumendid, mida peab tihti steriliseerima. Polüpropüleeni on looduslikus keskkonnas väga halvasti lagunev plast, kuna tal on kõrge temperatuuri vastupidavus, kuid UV-kiirgus mõjub plastile nõrgestavalt. (Maddah, 2016) PP-d on võimelised lagundama mitmed bakteriliigid, sealhulgas erinevad *Bacillus* perekonda kuuluvad tüved nagu *Bacillus sp.* (BS-1 ja BS-2), *Bacillus cereus* (BC) ja *Bacillus paramycoides* (BP), kes kõik kuuluvad *Firmicutes* või *Actinobacteria* hõimkonda (Rana jt, 2022).

## Polüetüleen

Polüetüleeni (PE) keemiline valem on  $(C_2H_4)_n$ , süsinikahel lineaarne. Jagatakse LDPE ehk *low-density* PE, HDPE ehk *high density* PE, MDPE ehk *medium density* PE ja LLDPE-ks ehk *linear low-density* PE (Zhang jt, 2022b). Erinevatel polüetüleenitüüpidel on erinevad tihedused ja mehaanilised omadused. HDPE on suure tihedusega, jäigem ja talub lühiajaliselt kõrgemaid temperatuure kui näiteks LDPE. See on tugev ja läbipaistmatu, samas kui LDPE on paindlikum, poolläbipaistev ja suurema hargnemisega struktuuriga. MDPE jääb oma tiheduse ja omaduste poolest kahe vahele, olles hea löögikindluse ja pragunemistavastupidavusega. LLDPE-l on rohkelt lühiahelaist hargnemist, mis annab sellele parema purunemiskindluse kui tavalisel LDPE-l (Zhang jt, 2004). Siin töös uuritakse kahte kõige enam kasutatavat polüetüleeni tüüpi: LDPE ja HDPE. LDPE ja HDPE on termoplastid, mida kasutatakse plastkottide jm õhukeste kilede tootmiseks (Skariyachan jt, 2018).

Polüetüleeni (PE) lagundamise võime on täheldatud mitmetel bakteriliikidel, sealhulgas *Rhodococcus ruber* (tüvi C208), mis kuulub *Actinobacteria* hõimkonda ja on tuntud oma võime poolest moodustada plastipinnale biofilme, mis soodustavad lagunemisprotsessi (Zhang jt, 2022b). Samuti on identifitseeritud termofiilseid lagundajaid, näiteks *Brevibacillus borstelensis* (tüvi 707), kes kuulub *Firmicutes* hõimkonda ja suudab lagundada polüetüleeni kõrgetel temperatuuridel, demonstreerides tugevat metaboolset võimekust plastmaterjalide depolümeerimisel (Hadad, Geresh ja Sivan, 2005).

## Polüvinüülkloriid

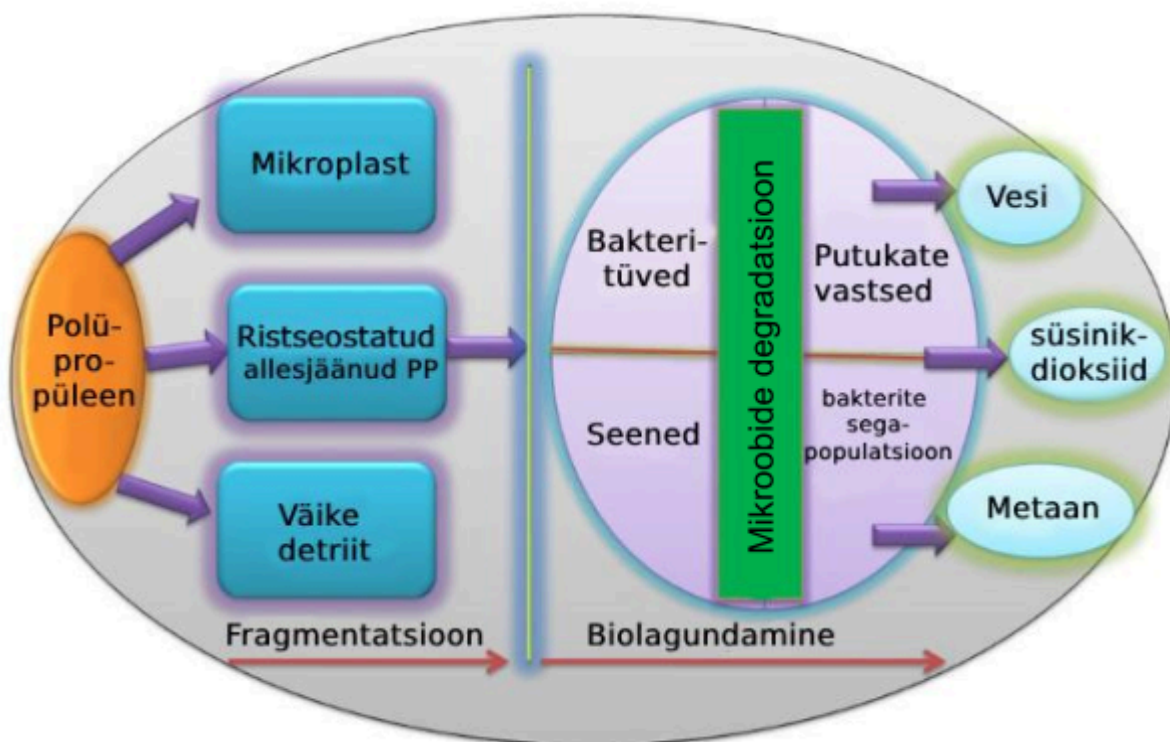
Polüvinüülkloriidi (PVC) keemiline valem on  $C_2H_3Cl$ . Puhas PVC on valge, tahke aine, mis sisaldab 56,7% kloori ning ei lahustu vees (Castro jt, 2012). Tegemist on termoplastiga, mida kasutatakse toruehituses, pakkimisel, torustikes, kunstnahas ja paljudes muudes rakendustes, näiteks kummi ja löuendi valmistamisel (Barnes jt, 2009). PVC-jäätmete käitlemiseks pole muid praktilisi meetodeid peale prügilasse ladestamise ja põletamise. PVC-d lagundavad näiteks bakteriliigid nagu *Pseudomonas otitidis*, *Bacillus cereus* ja *Acanthopleurobacter pedis*, samuti pärmseened nagu *Aureobasidium pullulans* ja *Rhodotorula aurantiaca* ning *Kluyveromyces* perekonda kuuluvad liigid; need kuuluvad vastavalt gramnegatiivsete proteobakterite, grampositiivsete *Firmicutes* ning *Ascomycota* hõimkondadesse. (Anwar jt, 2016).

## **Plasti biodegradatsioon**

Plastid jagunevad temperatuuri ja struktuuri põhjal termoplastideks ja termoreaktiivseteks polümeerideks, kusjuures termoplaste saab toota kuumutamisel mistahes kujusse, nende hulka kuuluvad polüetüleen (PE), polüstüreen (PS), polüpropüleen (PP), polüvinüülkloriid (PVC) jne (Ghosh jt, 2013). PE, PP, PS ja PVC on mitte-hüdroolüüsuvad plastid, see tähendab, et nad on lagunemise suhtes vastupidavamad (Inderthal, Tai ja Harrison, 2021). Kord kindla kuju saanud termoreaktiivseid polümeere ei saa uuesti vormida ning seetõttu on nende taaskasutus võimatu (Ghosh jt, 2013). Termoreaktiivsete polümeeridega siin töös ei tegeletud, kuna plasti tarbimist putukate vastsete poolt nende kohta uuritud ei ole. Plastide, nagu PVC, biolagunemine hõlmab vähemalt kolme reaktsiooni: a) depolümerisatsioon või polümeeriahelate lagunemine; b) oksüdeeritud vaheühendite moodustumine ja c) vaheühendite mineraliseerumine, näiteks PVC puhul süsihappegaasiks, veeks ja klooriks (Peng jt, 2020a).

## **Putukate plastiseedimine**

Mikroorganismid, näiteks vetikad, seened ja bakterid, võivad lagundada plasti ilma soojusenergiat kasutamata anaeroobsetes ja aeroobsetes tingimustes. Seda teevad nad nendes esinevate ainevahetusprotsesside kaudu, mida tuntakse teisisõnu ka kui biolagunemist (Rutkowska jt, 2002). Biolagundamise aeroobse protsessi lõpp-produktid on biomass, vesi ja süsinikdioksiid, samas kui anaeroobne meetod toodab lisaks veele ja süsinikdioksiidile lõppsaadusena metaani (Gu, 2003; Rana jt, 2022). Putukate poolt toimub plasti lagundamine aeroobsena, mis tähendab, et metaani lõpp-produktina ei teki, vt Joonis 1.



**Joonis 1. Polüpropüleen (PP) biologundamine. (Rana jt, 2022)**

Putukate soolestikus elab arvukalt mikroorganisme, millel on oluline roll seedimisel, sealhulgas plastjätmete lagundamisel (Jang ja Kikuchi 2020). Erinevatel liikidel on soolestikus teatatud erinevatest reaktsiooniradadest, mis tähendab, et liigid lagundavad plasti erinevate mehhanismide kaudu (Yang jt, 2021a). Uurimused on näidanud, et näiteks harilik jahumardikas suudab ligniini eemaldada, kui ta toitub tavaliselt maisi- või riisiõlgedest, kuna mikroobid tema maos on selleks kohastunud (Yang jt, 2019). Huvitav oleks teada, kas ligniini lagundamisvõime soodustab ka plasti lagundamist, hetkel selle teemakohased tööd puuduvad. On uuritud ka antibiootikumide (gentamütsiini) mõju liikide biologundamisvõimele. Rana jt (2022) täheldasid, et antibiootikumide kasutamisel väheneb biologunemine, kuna antibiootikumid võivad vastsete soolestikus mikroobide arvu vähendada ja seega mõjutada nende biologunemise aktiivsust.

## Plasti lagundavad putukaliigid

Putukad, kes on võimelised plasti lagundama, kutsutakse plastivoorideks (Sanchez-Hernandez, 2021). Plastivoore on hakatud uurima alles hiljaaegu, kuid sellegipoolest on neid leitud palju. Täismoondega arenevatest putukatest lagundavad plasti mardikalised (*Coleoptera*) harilik jahumardikas (*Tenebrio molitor*) ja tume jahumardikas (*Tenebrio obscurus*), *Tribolium castaneum*, *Tribolium confusum*, *Protaetia brevitarsis* ning süsiklased (*Tenebrionidae*) *Plesiophthalmus davidis*, *Zophobas atratus*, *Alphitobius diaperinus*, *Zophobas morio* ja *Uloma sp* (Tabel 1). Täismoondega arenevatest putukatest liblikalistel (*Lepidoptera*) on plasti lagundamist tuvastatud lõuna-aidaleedikul (*Plodia interpunctella*), suurel vahaleedikul (*Galleria mellonella*), väike-vahaleedikul (*Achroia grisella*) ning rohuleediklasel *Corcyra cephalonica* ja öölasel *Spodoptera frugiperda* (Boschi jt, 2024; Kesti ja Thimmappa, 2019; Kundungal jt, 2019; Navlekar, Osuji ja Carr, 2023; Zhang jt, 2022a; Yang jt 2014). Täismoondega arenevatest veel kahetiivalised (*Diptera*), kellest on võimeline plasti lagundama ogakärblane *Hermetia illucens* (De Filippis, 2023). Vaegmoondegaga arenevatest putukatest lagundavad plasti prussakalised, sh termiidilised (*Blattodea*) *Macrotermes carbonarius*, *Mastotermes darwiniensis*, *Coptotermes acinaciformis* ja *Nasutitermes nigriceps*, *Blattella germanica*, ning sihktiivalistest (*Orthoptera*) *Grylloides sigillatus* (Fudlosid jt, 2022; Gerhardt ja Lindgren, 1954; Lenz jt, 2013; López-Naranjo jt, 2013).

Lisaks eelnimetatud liikidele on leitud, et mardikalistest ka *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus oryzae*, *Lasioderma serricorne*, *Protaetia cuprea* (Riudavets, Salas ja Pons, 2007; Gallitelli, Zauli ja Scalici, 2022) on võimelised plasti manustama, kuid kuna töid oli väga vähe ning seal ei olnud vajalikke detailseid andmeid, ei olnud võimalik neid liike siin töös võrdlusesse tuua.

Paljud uuringud on viidud läbi 21-35 päeva vältel. Põhiliselt on uuritud plaste, mis on kõige suurema mõjuga tänapäeva reostusprobleemis ehk PE, PVC, PP ja PS.

### Mardikalised

Töö keskendub mardikaliste (*Coleoptera*) seltsi erinevatele liikidele, kuna just selles seltsis on seni kirjeldatud enim plastide lagundamise võimega liike. Järgnevas peatükis antakse ülevaade nende liikide plastide lagundamise efektiivsusest ning sellega seotud bioloogilistest ja keskkonnateguritest. Tabelis 1 on esitatud olulisemad näitajad, mille alusel võrreldakse

erinevate plastide lagundamise tõhusust, liikide elumust, nukkumise tõenäosust ning kehakaalu muutust. Lisaks käsitletakse domineerivaid mikroobikooslusi ja katsetingimustes kasutatud temperatuuri, kuivõrd temperatuur mõjutab oluliselt mardikaliste arenguetappe, sealhulgas nukkumise edukust.

**Tabel 1. Erinevate plastitüüpide mõju mardikaliste liikidele.**

Liik & plast	Temperatuur katsel (°C)	Kaalulangus(-)/-tõus(+)	Lagundamise efektiivsus (mg 100 vastne <sup>-1</sup> p <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	Domineerivad mikroobid	Nukkumise tõenäosus (%)	Ellujäämus (%)	Allikas
<b>Põrniklased</b> <i>(Scarabaeidae)</i>							
<i>Protaetia brevitarsis</i>	PS	27±1	<sup>a</sup> P: +4,1% T: +22,5%	P+T: 342 ± 67	<i>Promicromonosporaceae, Bacillaceae ja Paenibacillaceae</i>	- P: 100 T: 100	(Jiang jt, 2024)
<b>Süsiklased</b> <i>(Tenebrionidae)</i>							
<i>Alphitobius diaperinus</i>	PS	20 ± 2	P: -89%		<i>Pseudomonas, Kocuria, Cronobacter, Basidiomycota</i>	0	(Cucini jt, 2020; 2022)
<i>Plesiophthalmus davidis</i>	PS	24		P: 244.79	<i>Serratia</i>	P: 100	(Woo, Song ja Cha, 2020)
<i>Zophobas atratus</i>	PE	25 ± 1	P: -5,7± 3,3% T: 7,3 ± 0,5%	P: 58,7 ± 1,8 P+T: 70,0 ± 3,3	<i>Citrobacter, Klebsiella ja Enterococcus</i>	- P: 94,0 ± 1,0 P+T: 95,0 ± 1,0	(Luo jt, 2021; Peng jt, 2022; Peng jt, 2020b)

Liik & plast		Temperatuur katsel (°C)	Kaalulangus(-)/-tõus(+)	Lagundamise efektiivsus (mg 100 vastne <sup>-1</sup> p <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	Domineerivad mikroobid	Nukkumise tõenäosus (%)	Ellujäämus (%)	Allikas
<b>Zophobas atratus</b>	PS	25 ± 1	P: -2,1 ± 1,3% N: -13,9% T: +7,3%	P: 61,5 ± 1,6 P+T: 77,0 ± 2,5	<i>Enterobacteriaceae</i> , <i>Enterococcus</i> , <i>Dysgonomonas</i> ja <i>Sphingobacterium</i>	-	P: 96,5 ± 0,5 P+T: 95,5 ± 1,0 T: 98,3 ± 0,6%	(Luo jt, 2021; Peng jt, 2022)
	PP	25	P: -8,1 ± 3,7% P+T: +15,9 ± 4,1%	P: 3,1 ± 0,4 P+T: 3,6 ± 0,4	<i>Proteobacteria</i> , <i>Citrobacter</i> ja <i>Enterobacter</i>	-	P: 76,7 ± 2,9% P+T: 82,1 ± 2,0	(Yang jt, 2021a; Weng jt, 2024)
	PVC	25 ± 0,5	-	P: 36,6	<i>Citrobacter</i> , <i>Enterobacteriaceae</i>	-	-	(Nyamjav jt, 2023; Wang jt, 2024)
<b>Tenebrio molitor</b>	PE	25	P: +25,6 ± 0,43%	P: 0,4 ± 0,1 mg P+T: 1,3 ± 0,3)	P: <i>Pediococcus</i> , <i>Stenotrophomonas</i> P+T: <i>Lactococcus</i>	P: 2,0 ± 1,0 P+T: 31,3 ± 0,6	P: 78,4 ± 1,7 P+T: 82,4 ± 5,1	(Brandon jt, 2018; Ding jt, 2023; Lou jt, 2021; Yang jt, 2021b; Ding jt, 2024; Jin jt, 2023)

Liik & plast	Temperatuur katsel (°C)	Kaalulangus(-)/-tõus(+)	Lagundamise efektiivsus (mg 100 vastne <sup>-1</sup> p <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	Domineerivad mikroobid	Nukkumise tõenäosus (%)	Ellujäämus (%)	Allikas
PS	26,5 ± 1	P: -8,6 ± 1,2%, P+T: +14,6 ± 1,8% N: -18,2 ± 6,0%	P: 24,30 ± 1,34 P+T: 33,23 ± 0,80	<i>Bifidobacterium</i> , <i>Brooklawnia</i> , <i>Acinetobacter</i> ja <i>Streptococcus</i> P+T: <i>Pediococcus</i>	P: 3,0 ± 0,0 P+T: 35,7 ± 7,6	P: 89,3 ± 2,7 P+T: 93,2 ± 1,0 N: 62,0 ± 2,9	(Peng jt, 2019; Lou jt, 2021; Brandon jt, 2018)
<b><i>Tenebrio molitor</i></b>	PP 25,0 ± 0,5	P: +41,84% T: 61,08% N: -13,79%	P: 1,0 ± 0,4 P+T: 1,6 ± 0,3	<i>Kluyvera</i> , <i>Pediococcus</i> , <i>Enterococcus</i> , <i>Bacillus</i> ja <i>Spiroplasma</i>	-	P: 88,7 ± 0,7 P+T: 91,0 ± 0,3 N: 68,4 ± 1,0%	(Yang jt, 2021a; He jt, 2024)
PVC	25~28	P: -18,2% P+T: +49,9% N: -30,9% T: +66,7%	P: 17,3 ± 0,5 P+T: 40,3 ± 1,4	<i>Streptococcaceae</i> , <i>Spiroplasmataceae</i> , <i>Enterobacteriaceae</i> ja <i>Clostridiaceae</i>	P: 39 P+T: 91	P: 38,7 ± 0,3 P+T: 86,7 ± 1,2 N: 47,3 ± 3,2 T: 96,3 ± 1,2	(Peng jt, 2020a; Jin jt, 2023; Peng jt 2023)

Liik & plast		Tempera- tuur katsel (°C)	Kaalulangus (-)/-tõus(+)	Lagundamis e efektiivsus (mg 100 vastne <sup>-1</sup> p <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	Domineerivad mikroobid	Nukkumi se tõenäosu s (%)	Ellujäämus (%)	Allikas
<b><i>Tenebrio obscurus</i></b>	PE	25 ± 0,5	P: +69,8 ± 2,6%  P+T: +82,4 ± 5,1%	P: 0,1 ± 0,0  P+T: 0,4 ± 0,2	<i>Enterobacteriaceae</i> , <i>Acinetobacter</i>	-	P: 82,4 ± 3,4  P+T: 87,0 ± 2,0  T: 88 ± 3.18	(Ding jt, 2023; 2024)
	PS	25 ± 1	P: -8,1±3,7%,  P+T: +15,9 ± 4,1%  N: -13,2 ± 2.7%	P: 32,44 ± 0,51;  P+T: 39,24 ± 1,73	<i>Enterococcaceae</i> , <i>Spiroplasmataceae</i> ja <i>Enterobacteriaceae</i>	-	P: 91,5 ± 1,5  P+T: 95,0 ± 1,7%  N: 67.6 ± 2.2	(Peng jt, 2019)
<b><i>Tribolium castaneum</i></b>	EPS	27 ± 2	P: +2,7%  P+T: +3,7%  T: 0%	P: 70,8  P+T: 108,3	<i>Acinetobacter</i> , <i>Enterococcus</i>	-	P: 63  P+T: 80  T: 87	(Wang jt, 2020; Fabreag ja Familiara, 2019)
<b><i>Tribolium confusum</i></b>	PE	30	P: -31,4%				P: 50 ±2,45  T: 90±6,01	(Abdulhay, 2020)
	PS	30	P: -26,2%				P: 70 ±4,0  T: 90±6,01	(Abdulhay, 2020)

Liik & plast		Tempera- tuur katsel (°C)	Kaalulangus (-)/-tõus(+)	Lagundamis e efektiivsus (mg 100 vastne <sup>-1</sup> p <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	Domineerivad mikroobid	Nukkumi se tõenäosu s (%)	Ellujäämus (%)	Allikas
<b>Uloma</b>	PE	28±1	P: 0,0 ± 0,0% T: +22,92 ± 2,1% N: -8,20 ± 1,4%	P: 46,43		T, P: ellu jäänud vastsetes t 100	P: 82,7±0,4 T: 88,7±0,5	(Kundungal , Amal ja Devipriya, 2025)
<b>Uloma</b>	PS	28 ± 1	P: +4,31 ± 1,7% P+T: +22,01 ± 3,8% T: +22,92± 4.1% N: -8,20 ± 5.4%	P: 37,14 P+T: 56,47		T, P ja P+T: ellu jäänud vastsetes t 100	P: 78,3 ± 1,4 P+T: 84 ± 2,9 T: 89,2 ± 1.01% N: 38,4 ± 2.9%	(Kundungal , Amal ja Devipriya, 2021; Kundungal, Amal ja Devipriya, 2025)

<sup>a</sup> Enamus uuringutes on veahinnanguna kasutatud standardhälvet. Nendes uuringutes tehakse uuringud kvalitatiivselt ning veahinnangu statistilise analüüsi meetodit ei mainita: Abdulhay jt, 2020; He jt, 2024; Fabreag ja Familara, 2019; Cucini jt, 2020; 2022.

<sup>1</sup> P - ainult plastisöödal olnud vastsed

<sup>2</sup> T - ainult tavasöödal olnud vastsed

<sup>3</sup> P+T - plasti ja tavatoidul olnud vastsed

<sup>4</sup> N - näljutatud grupi vastsed

### ***Alphitobius diaperinus***

Süsiklane *Alphitobius diaperinus* on valmikuna 5,5–6,7 mm pikkune tumepruuni värvi läikiv mardikas, kelle keha on laialt ovaalne (Internet 6). Ta toitub peamiselt orgaanilisest

materjalist, nagu linnusõnnik, allapanu ja söödajääd. Elupaigana eelistab ta sooja ja niisket keskkonda, eriti sügava allapanuga linnukasvatushoonetes (Lambkin, 2001).

**PS:** uuriti kahe erineva toitumisrühmaga vastsete (7–10 mm pikkused) võimet lagundada vahtpolüstüreeni (EPS) (Tabel 1). Plastigrupi (20 g EPS, 350 g vastseid) ja kontrollgrupi (150 g vastseid, 12 g porgandeid) katse kestis 30 päeva. Mõlemat rühma hoiti  $20 \pm 2$  °C ja 50–70% õhuniiskuse juures 12 tundi pimedas ja 12 tundi valguses (Cucini jt, 2020).

Mikroobianalüüsid näitasid, et PS-grupi soolestikus esines rohkem bakterite perekondi nagu *Pseudomonas*, *Kocuria*, *Cronobacter*, kuid tavatoidu rühmas oli suurem taksonoomiline mitmekesisus (Cucini jt, 2020; 2022). Seente hulgas moodustas *Basidiomycota* PS-grupis 29%, kuid kontrollgrupis vaid 0,4% (Cucini jt, 2020). Hoolimata kaalukaotusest jäi enamik vastseid ellu ja osa neist arenes hiljem valmikuks (Cucini jt, 2020; Bjørge jt., 2018).

### ***Plesiophthalmus davidis***

*Plesiophthalmus davidis* on süsiklate (*Tenebrionidae*) sugukonda kuuluv liik. Nad elavad peamiselt Kirde-Aasia segametsades, sealhulgas Hiina põhja- ja keskosas ning Korea poolsaarel. *P. davidise* vastsed ja valmikud toituvad teadaolevalt mädanenud puidust (Woo, Song ja Cha, 2020).

**PS:** vastseid (n=7) kasvatati pimedas 24 °C ning 60% õhuniiskuse juures. Kõik vastsed jäid ellu, mis viitab võimalusele, et *Plesiophthalmus davidis* suudab PS-i kasutada energiaallikana (Tabel 1), kuid peab tegema pikaajalisemaid katseid, et seda infot kinnitada. Väljaheidetest ekstraheeriti  $41,41\% \pm 0,13\%$  järelejäänud PS-i. Leiti, et mikroobidest perekonna *Serratia* liigi (tüvi *WSW*) bakter tegeles PS-i lagundamisega, kusjuures *Serratia* perekonna liigid moodustasid 33% soolestiku koosseisust, võrreldes looduses esineva 5,5% asemel. Kuigi perekonna *Lactococcus* osakaal suurenes 4%, jäi selle muutuse ulatus tagasihoidlikumaks võrreldes *Serratia* liikide märgatava kasvuga. Kui tavatoidul oleva vastse soolestikus olid põhiliselt *Lactococcus*, *Aquabacterium*, *Buttiauxella*, *Raoultella* ja *Serratia* perekonnad, siis oli plastisöödal olevate vastsete soolestikus esindatud ka perekond *Enterococcus*. Kannibalismi ei täheldatud (Woo, Song ja Cha, 2020).

### ***Protaetia brevitarsis***

*Protaetia brevitarsis* on põrniklaste (*Scarabaeidae*) sugukonda kuuluv liik, keda leidub Hiinas, Jaapanis, Koreas ja Venemaal. Neil on üks põlvkond aastas ja nad talvituvad

vastsetena. Vastse staadium kestab 125–142 päeva (Jiang jt, 2024). Tänu tugevatele seedeensüümidele ja kõrgele valgu-/rasvasisaldusele on *P. brevitarsis* vastsed paljulubavad polüstüreeni (PS) biolagundamiseks pinnases (Jiang jt, 2024).

**PS:** *P. brevitarsis* vastsed (u 3,4 cm) hoiti enne katset  $27 \pm 1$  °C juures ja toideti fermenteeritud saepuruga. Katses jagati mardikad kahte menetlusrühma: kontrollrühm (ainult tavatoit) ja katserühm (tavatoit + PS-plokid suuruses 15×15×3 cm). Mõlemas rühmas oli 120 vastset, PS-plokke vahetati kord nädalas. Elumust, eluea kestust ja kehakaalu mõõdeti iganädalaselt. PS-jäägid ekstraheeriti THF-ga, filtreeriti PVDF-filtriga ja analüüsiti erinevate meetoditega keemilise lagunemise hindamiseks. Lisaks analüüsiti vastsete soolestiku sisu ja ekstraheeriti DNA (Jiang jt, 2024).

Nelja nädala jooksul etteantud PS-i mass vähenes 61,5%, läbides vastse soolestiku umbes 4 tunniga, plasti molekulmass vähenes 20,04%. Kõik vastsed jäid ellu nii PS- kui ka tavatoidul, kuid PS-toidul võtsid kaalus juurde 18,4% vähem, kui tavatoidul olevad vastsed (Tabel 1). Plastiosakesed leiti kogu seedekulglast, osakeste suurus vähenes soole lõikes: ees-sooles 859,7 µm → jämesooles 258,1 µm. Mikroobikoosseis muutus pärast plastiga toitumist oluliselt – ainult 10,4% mikroobidest olid samad enne plastiga toitumist võrreldes katse lõpul. Enne plastitoitu domineerisid nt sugukonna *Enterococcaceae* liigid, pärast aga sugukonna *Promicromonosporaceae* (tõus 39,64%) liigid. Metabooloomianalüüs näitas, et plastitoit põhjustas vastsetes oksüdatiivset stressi ja muutis oluliselt metaboolseid radasid. Need muutused viitavad, et vastsed kohandavad oma ainevahetust, et kaitsta end plastist põhjustatud stressi eest (Jiang jt, 2024). PS põhjustab mikroobioomi ja ainevahetuse olulist ümberkorraldust, viidates vastsete bioloogilisele kohanemisele plastireostusega keskkonnas.

### ***Zophobas atratus***

Süsiklane *Zophobas atratus*, pärineb troopilisest Kesk- ja Lõuna-Ameerikast ning on levinud Euroopasse ja Aasiasse. Tänu oma kõrgele valgu- ja rasvasisaldusele kasutatakse selle mardika vastseid laialdaselt kogu maailmas loomasöödana (Peng jt, 2022). Nende vastsed võivad olla 1,5–3 korda suuremad kui *T. molitor* ja *T. obscurus* vastsed ning kasvada 5,0–6,0 cm pikkuseks. *Z. atratus* vastsed taluvad nälga ja janupuudust paremini kui paljud teised liigid, kuid nende puhul on täheldatud ka kannibalismi nii nukkude kui ka vastsete suhtes (Peng jt, 2020b; Tschinkel, 1981).

**PE:** *Zophobas atratus* vastseid kasvatati temperatuuril  $25 \pm 1$  °C ja  $70 \pm 5\%$  õhuniiskusega pimedas. PE-sööt põhjustas vastsete keskmise kaalulanguse  $0,80 \pm 0,03$  g vastse kohta (Luo jt, 2021). PE-ga toidetud *Zophobas atratus* vastsete elumus oli natukene madalam kui segasöödaga toidetud rühmas (Tabel 1). Kuigi elumus oli kõrge ja kannibalism madal, vähenes PE-d sööval rühmal keha rasvasisaldus (Peng jt, 2020b). Vastsed tarbisid keskmiselt 24% vähem plasti plastisöödal, kui segasöödal (Peng jt, 2022).

Mikrobioomi analüüs näitas PE-toidul viie domineeriva bakteri perekonna esinemist: *Spiroplasma*, *Klebsiella*, *Citrobacter* ja *Enterococcus*. Perekondade *Citrobacter* ja *Lactococcus* liigid olid tugevalt seotud PE söödaga (Luo jt, 2021). LDPE-sööt muutis mikrobioomi koostist: sugukonna *Streptococcaceae* liikide arvukus tõusis ja sugukonna *Enterococcaceae* liikide arvukus veidi vähenes. Plast lagundati mikroplastiks, kuid nanoplasti vastsed ei suutnud tekitada (Peng jt, 2022).

**PS:** vastseid kasvatati  $25 \pm 1$  °C ja  $60 \pm 5\%$  õhuniiskuse juures pimedas. PS-ga toidetud vastsete elumus oli madalam kui kliidega toidetutel (Tabel 1). Plastidieet ja nälgimine põhjustasid kehakaalu langust, samas kui kliidega toidetud vastsed võtsid kaalus juurde (Peng jt, 2022). Madalam elumus ja kaalukaotus olid tõenäoliselt seotud alatoitumise ja kannibalismiga (Luo jt, 2021; Peng jt, 2022). PS-dieedil vastsete rasvasisaldus vähenes, kuid elumus jäi kõrgeks (Peng jt, 2022).

PS-sööt muutis mikrobioomi koosseisu: sugukonna *Enterobacteriaceae* ja perekonna *Enterococcus* liikide osakaal kasvas, samuti lisandusid perekonna *Dysgonomonas* ja *Sphingobacterium* liigid (Luo jt, 2021; Peng jt, 2022). Sugukonna *Streptococcaceae* liikide koosseis suurenes 18,4%, sugukonna *Enterococcaceae* osakaal vähenes (Peng jt, 2022). Sooles toimus benseeni lõhustumine, süsivesinikahelasse ilmus hapnik ning toimus plasti depolümeerisatsioon ehk osaline biolagundamine (Luo jt, 2021; Peng jt, 2022). Plast killustus mikroplastiks, kuid nanoplasti ei tekkinud (Peng jt, 2022).

**PP:** 35 päeva jooksul  $25$  °C ja  $65\%$  niiskusega hoitud *Zophobas atratus* vastsed tarbisid ainult polüpropüleenis söödal (PP) vähem plasti, kui segadieedil (PP + nisukliid). PP-söödal kaotasid nad kaalu, samas, kui segatoidul tõusis kaal (Tabel 1). Elumus PP-ga oli ca 5,4% väiksem, kui segasöödal olevatel vastsetel. Nukkumissagedus plastisöödal vähenes (täpne määr teadmata). Soolestikus domineerisid *Enterobacteriaceae* sugukonna bakterid, hõimkond *Proteobacteria* esines ainult plastisöödal, seega on *Proteobacteria* oluline PP lagundamisel. PP-ga seotud peamised bakterid olid *Citrobacter* (31%) ja *Enterobacter* (20–25%). PP

lagundamisega kaasnes depolümeerisatsioon (20,4% molekulmassi langus). Kannibalismi täheldati plastisöödal kuni 45% ulatuses (Yang jt, 2021a; Weng jt, 2024). OTU ehk operatiivsete taksonoomiliste üksuste arv ainult PP-ga toidetud *Z. atratus* rühmadel oli 99 ning PP + nisukliidega oli see arv 122, kuid see oli ikka väiksem kui ainult nisukliidega toidetud rühmas 151, mis näitab, et PP söötmine vähendas oluliselt soolestiku kogukonna mitmekesisust (Yang jt 2021a). OTU tähistab sarnaste organismide rühma, mis on määratletud geneetilise sarnasuse alusel ning mida kasutatakse laialdaselt mikroobikoosluste mitmekesisuse hindamiseks järjestuspõhistes uuringutes (Ciuffreda, Rodríguez-Pérez ja Flores, 2021).

**PVC:** *Zophobas atratus* vastsed tarbisid PVC söödal pea 10 korda rohkem plasti, kui PP söödal (Tabel 1). Plastitoit muutis soolestiku mikrobioomi koostist – ilmnesid uued bakteriperekonnad nagu *Mangrovibacter*, *Leminorella* ja *Proteus*, suurenes hõimkondade *Firmicutes* ja *Bacteroidota* osakaal, ning liik *Citrobacter koseri* oli PVC lagundamisel üks võtmetaksonitest (Nyamjav jt, 2023; Wang jt, 2024).

### **Harilik jahumardikas (*Tenebrio molitor*)**

Süsiklane harilik jahumardikas (*Tenebrio molitor*) on valmikuna umbes 12–19 mm pikkune putukas, kelle vastsed võivad kasvada kuni 32 mm pikkusteks (Ribeiro, Abelho ja Costa, 2018). Ta eelistab elada niisketes ja pimedates kohtades, näiteks ladustatud teraviljas, kanamajade allapanu sees või jahulaos (Cotton, 1956). Tema toit sisaldab peamiselt lagunenuid või niiskeid viljasaadusi, näiteks jahud, leivajäänused, aga ka liha, suled ja isegi surnud putukad (Cotton, 1956; Ghaly ja Alkoaik, 2009).

**PE:** Ding jt (2024) uurisid HDPE, LLDPE ja LDPE pulbrite lagunemist hariliku jahumardika vastsete poolt, keda hoiti 25 °C ja 70% õhuniiskusega (Tabel 1). 21 päevaga seedisid vastsed kuni 40% neelatud polüetüleenist. Vastsete elumus PE-ga toites oli umbes 4% madalam kui segatoidul ning nad lagundasid PE-d segasöödal ca 1 grammi rohkem kui plastisöödal. Vastsete kaalutõus oli PE puhul suurem kui PS-il (Jin jt, 2023). Nukkumissagedus oli PE-toidul madal võrreldes PE+klii seguga. Ainult PE-ga toituvad vastsed kaotasid rasvasisaldust 30–50%, kogesid oksüdatiivset stressi ja soolekude kahjustusi ning ei jõudnud nukkumiseni, mis viitab toitainete puudusele elutsükli lõpetamiseks (Yang jt, 2021b; Lou jt, 2021; Brandon jt, 2018; Ding, 2024). Mikroobioomis domineeris PE-söödal perekond *Pediococcus* (44,34%) ning suurenenud oli perekonna *Lactococcus* arvukus PE+klii söötmisel. Perekond *Stenotrophomonas* oli olemas ainult PE-söödal. PE molekulmass langes

plastisöödal 43,3% ja segasöödal 36,7%, mis kinnitab PE lagundamist vastsete poolt (Ding jt, 2023; Lou jt, 2021). Gentamütsiini lisamisel vastse söödale suudeti vähendada molekulmassi palju vähem ehk  $12,3 \pm 2,0\%$  (Yang, 2021b).

**PS:** hariliku jahumardika vastseid hoiti  $26,5 \pm 1$  °C ja  $80 \pm 4,9\%$  õhuniiskuse juures. Pärast 29 päeva oli elumus ainult polüstüreenil toidetud vastsetel segatoidust ca 4% madalam (Tabel 1). Katse lõpus oli PS-ga toituvate vastsete kehamass 22% väiksem, kui segatoidul olevatel vastsetel (Peng jt, 2019). Lühemas uuringus (21 päeva) täheldati  $20 \pm 4\%$  väiksemat massikaotust (Urbanek jt, 2020). Nukkumissagedus oli PS-söödal palju madalam kui segasöödaga (ca 30%) (Lou jt, 2021). Plastitarbimine oli segatoitu tarbivas rühmas suurem (Peng jt, 2019).

Mikroorganismidest olid perekondade *Citrobacter* ja *Kosakonia* liigid tugevalt seotud PS-i lagundamisega (Brandon jt, 2018). Mikrobioomis domineerisid PS-söödal perekondade *Bifidobacterium*, *Acinetobacter* ja *Streptococcus*, segatoidul aga *Pediococcus* (18,25% vs 0,18–0,22%). Perekonda *Brooklawnia* seostati PS-lagundamisega (Lou jt, 2021). PS molekulmass langes 11,67%, mis kinnitab plastide lagundamist (Peng jt, 2019).

**PP:** hariliku jahumardika vastsed suudavad polüpropüleen (PP) osaliselt biolagundada (Tabel 1). Vastseid hoiti  $25 \pm 0,5$  kraadi juures ja  $65 \pm 5\%$  õhuniiskusega. Ainult PP-ga toidetud vastsed tarbisid ca 0,6 mg vähem 100 vastse kohta päevas võrreldes segasöödal olevate vastsetega (maisijahu + PP) (Yang jt, 2021a). Vastsed võtsid kaalus juurde 20% vähem, kui maisijahu söödal olevad vastsed (He jt, 2024), kuid siiski oli see märkimisväärne, kui arvestada plasti toiteväärtuse vähesust. PP molekulmassi langus oli ainult PP söödal  $20,4 \pm 0,8\%$  ja segasöödal  $32,4 \pm 1,2\%$ , mis viitab efektiivsemale depolümeerisatsioonile segasöödal (Yang jt, 2021a). Elumus oli PP söödal oli ca 2% väiksem, kui segasöödal (Yang jt, 2021a).

Soolestiku mikroobidest domineeris *Enterobacteriaceae* sugukond, arvatakse, et perekonnad *Kluyvera* ning *Pediococcus* olid seotud PP lagundamisega. Ka perekondade *Bacillus*, *Spiroplasma* ja *Enterococcus* liigid arvatakse olevat osa plastilagundamisest ning see tuleneb hariliku jahumardika võimest lagundada looduses lignotselluloosi (He jt, 2024). PP söötmisel vähenes soolestiku mikrobioomi liigiline rikkus võrreldes tavasööda rühmaga. Kuigi vastsed suutsid PP-d osaliselt lagundada ja moodustada uusi hüdrofiilseid rühmi, ei täheldatud nende võimet nukkuda ainult PP-ga toidetuna (He jt, 2024; Yang jt, 2021a). Kannibalism esines kõigil söötadel, kuid suurim oli see PP söödal ( $5,3 \pm 0,7\%$ ) (Yang jt, 2021a).

**PVC:** vastseid hoiti 25–28 °C ja 60–70% õhuniiskuse juures 30 päeva (Peng jt, 2020a). Ainult PVC-ga toidetud vastsete elumus oli ca 48% madalam, kui segatoiduga toidetutel (Tabel 1). Plasti lagundati segasöödaga ca 23 mg rohkem, kui plastisöödaga 100 vastse kohta päevas. Võrreldes tavatoidul kasvanud vastsete kaalutõusuga, oli segasöödal kaalutõus ca 17% väiksem, kui. Plastisöödal vastsete kaal vähenes. Elumus ja kaalu vähenemine oli suurim nälgutatud grupil (Peng jt, 2023).

Väljaheidetes leiti kloori ja hapnikut, mis viitas PVC jääkidele, kuid plast lagunes ainult osaliselt ning kloori vabanemine õhku oli minimaalne. Uuring näitas, et kloor ja hapnik ei esinenud väljaheidetes vabade ioonidena, vaid olid seotud osaliselt lagunenud PVC jääkide ja oksüdeeritud klooritud süsivesinikega. PVC molekulmass muutus, mis näitas depolümeerisatsiooni, kuid lagundamise ulatust mõjutas soolestiku mikroobide koostise muutus (Peng jt, 2020a). Ainult PVC toidul oli nukustadiumisse jõudnute osakaal oli madal (39%), segasöödal oli see palju kõrgem (80%) (Peng jt, 2020a).

PVC-söödaga vastsete soolestiku mikrobioomi rikkus vähenes ja domineerisid spetsiifilised bakterisugukonnad *Streptococcaceae* (kõige suurema arvukusega pärast plastisööta), *Spiroplasmataceae*, *Enterobacteriaceae* ja *Clostridiaceae* (Peng jt, 2020a). Samalaadseid mikrobioomi muutusi täheldati ka teiste plastidega toitmisel, rõhutades soolestiku mikroobide tähtsust PVC biolagunemises (Jin jt, 2023; Xu jt, 2023).

### **Tume jahumardikas (*Tenebrio obscurus*)**

Tume jahumardikas (*Tenebrio obscurus*) on süsikliaste sugukonda kuuluv mardikas. Täiskasvanud isendid on 1,5–2,5 cm pikkused (Peng jt, 2019). Nad on kõigesööjad, toitudes lagunevast taime-materjalist, surnud putukatest, seentest ja ladustatud saadustest. Tumedad mardikad kahjustavad harva kultuurtaimi, tavaliselt elavad nad looduses ega kujuta endast kahju (Dellinger ja Day, 2023). Liik on levinud Põhja-Ameerikas, Euroopas, Aasias ja Austraalias, elupaikadena eelistavad nad pimedust ja niiskust, näiteks mahajäetud nurki veskites, söödaaluseid laoruumides või niiskust saanud viljahoidlaid (Dellinger ja Day, 2023; Peng jt, 2019).

**PE:** tumeda jahumardika vastsed (n=20) suutsid lagundada polüetüleeniga segasöödal keskmiselt 0,3 mg rohkem, kui plastisöödal 100 vastse kohta päevas (Tabel 1). Vastseid hoiti 25 ± 0,5 °C ja 65 ± 5% õhuniiskuse juures (Ding jt, 2024). Elumus oli plastisöödal oluliselt kõrgem võrreldes segasöödaga, erinevus ca 12% (Ding jt, 2023). PE molekulmass vähenes

plastisöödal  $45,4 \pm 0,4\%$  ja segasöödal  $58,0 \pm 0,2\%$  (Ding jt, 2023). LDPE lagunemisel tekkisid uued hüdrofiilsemad funktsionaalrühmad. Mikroobidest domineerisid sugukonnad *Enterobacteriaceae*, kusjuures sugukonda *Acinetobacter* seostati plastiseedimisega. Täheledatai vastsetel ka vähenenud rasvasisaldust ja soolekudede kahjustusi, mis viitab võimalikule oksüdatiivsele stressile (Ding jt, 2024). Kõigil PE-ga söödetud rühmadel esinesid tavatoiduga söödetud kontrollrühmaga võrreldes kõrvaltoimed, näiteks soolekoe kahjustus ja kõrgenenud oksüdatiivse stressi näitajad (Ding jt, 2024).

**PS:** vastseid hoiti pimedas,  $25 \pm 1$  kraadilises,  $70 \pm 5\%$ -lises õhuniiskusega keskkonnas. Tumeda jahumardika vastsed, keda toideti ainult PS-ga kaalusid katse lõppu ca 24% vähem kui segasöödal olevad vastsed (Tabel 1). Plasti tarbimine 100 vastse kohta päevas oli plastisöödal 6 mg väiksem kui segasöödal. Mikroobikoosluse mitmekesisus vähenes, domineerivaks jäi sugukond *Enterobacteriaceae*, tumeda jahumardika vastsed suutsid kõigest 6 päevaga suurendada sugukonna *Enterobacteriaceae* arvukust 27%. Plasti seedimisega seostati perekondi *Enterococcaceae*, *Spiroplasmataceae* ja *Enterobacteriaceae*. Plasti seedimisel tekkisid uued funktsionaalsed hüdrofiilsemad rühmad. 30 päeva lõpuks oli vastsete elumus plastisöödal natukene väiksem, kui segasöödal olevatel vastsetel. PS-i molekulmass vähenes 26,03% (Peng jt, 2019).

### **Punane jahumardikas (*Tribolium castaneum*)**

Punane jahumardikas (*Tribolium castaneum*) on umbes 2,3–4,4 mm pikkune punakaspruun süsikliaste sugukonda kuuluv mardikas (Internet 4). Ta toitub peamiselt jahust ja teraviljadest, olles levinud kahjur ladustatud toiduainete seas. Elupaigana eelistab ta sooje ja niiskeid kohti, näiteks laod, kus leidub kuiva toitu (Campbell jt, 2022).

**PS:** katsetes jahumardikaga *Tribolium castaneum* (400 vastset, 4 mm pikk, 1 mg) hoiti vastseid  $27 \pm 2$  °C ja 60–70% õhuniiskuse juures pidevas pimeduses (Wang jt, 2020). Kolmes erinevas söödagrupis (EPS, EPS+riisikliid, ainult riisikliid) oli punase jahumardika elumus EPS-grupis väiksem, kui riisikliide kontrollrühmas (Tabel 1). EPS ei mõjutanud vastsete elujõulisust ega kehakaalu liiga negatiivselt, mis viitab sellele, et *T. castaneum* suudab EPS-i toiteallikana kasutada (Fabreag ja Familara, 2019).

Mikroobianalüüs näitas, et domineerivad plastilagundajad bakterid olid perekondade *Acinetobacter* ja *Enterococcus* liigid, samas vähenes soolestiku taksonoomiline mitmekesisus. EPS-plasti mass vähenes  $12,14\% \pm 1,4\%$  ning selle molekulmass alanes märgatavalt (Wang jt, 2020). *Tribolium castaneum*'i OTU oli vaid 69, võrreldes hariliku

jahumardika 515-ga, mis viitab väiksemale mikroobikoosluse mitmekesisusele ja nõrgemale plastilagundamise võimekusele (Wang jt, 2020). Perekonna *Acinetobacter* liikide poolt lagundatud polüstüreeni molekulmass vähenes 60 päeva jooksul 13%. 20 päeva lõpuks suutsid jahumardika *T. castaneum* vastsed ainult plastisöödal lagundada etteantud plastist 6,07%, segasööda toidust 9,29% ning nisukliide söödast 10,71% (Wang jt, 2020).

### **Ruuge-jahumardikas (*Tribolium confusum*)**

*Tribolium confusum* ehk ruuge-jahumardikas on 3,5–4,5 mm pikkune, lapik ja punakaspruun mardikas, kes ei suuda lennata (Rees, 2004). Ta toitub peamiselt jahust, teraviljadest, kaerahelvestest ja riisikliidest, ja sööb isegi loomseid jäänuseid, näiteks luid. Elupaigana eelistab ta sooje ja niiskeid ladustatud toiduainetega seotud keskkondi (Internet 5).

**PE:** katseks kasutati elektroonika kaitseks mõeldud vahtplastist valmistatud kettaid (1 cm diameeter, 1 mm paksus). Vastseid (n=10) hoiti 30 °C ja 70 ± 5% õhuniiskuses täielikus pimeduses, katse kestis 30 päeva. Plastist suudeti lagundada 46,84%. Surnud vastsed ja vastsekestad korjati kohe ära ning suremust mõõdeti iga nädal. Elumus plastisöödal oli 30 päeva lõpuks ca 40% väiksem võrreldes tavasööda peal olevate vastsete elumusega (Tabel 1). Leiti mitmeid seenetaksonite rühmi vastsete soolestikus (nt *Saccharomycetales*, *Botryosphaeriales*, *Hypocreales*, *Xylariales* ja *Capnodiales*), kuid nende roll plasti lagundamisel on teadmata. Mõned vastsed jõudsid ka nukkuda, kuid seda ei uuritud põhjalikumalt (Abdulhay, 2020).

**PS:** katseks kasutati toidukarpidest saadud plastist lõigatud kettaid (1 cm diameeter, 1 mm paksus). Vastseid hoiti 30 °C ja 70 ± 5% õhuniiskuses täielikus pimeduses 30 päeva. Plastist suudeti lagundada 51,92%. Plastisöödal olnud vastsete elumus oli ca 20% madalam, kui tavatoidul olevatel vastsetel (Tabel 1). PS- ja PE-plastide massi vähenemine ei olnud katse mõttes määrav. Mõned vastsed jõudsid nukkumiseni, kuid seda aspekti ei käsitletud põhjalikumalt (Abdulhay, 2020).

### ***Uloma***

Süsiklaste sugukonda kuuluva perekonna *Uloma* liigid on mesilaste, näiteks *Apis cerana*, kahjur Lõuna-Indias, kes toitub kärjekannudest. Kuna liik elab looduslikult pimedas, siis katsed läbiti samamoodi pimedas (Kundungal, Amal ja Devipriya, 2025).

**Metoodika:** *Uloma* perekonda kuuluva liigi vastseid hoiti polüpropüleenist tehtud anumates (mõõtudega 12,5 cm × 8 cm × 6 cm),  $28 \pm 1$  °C ja  $80 \pm 2\%$ -lise õhuniiskuse juures. Vastseid (n=100) toideti kogu katse vältel 50 grammise meekärjega. Plastisöödal olnud vastsetele anti 4 g PE-d, katse kestus oli 28 päeva (Tabel 1). Sööda kaalukaotust ja vastsete elumust jälgiti 14 kuni 28 päeva jooksul. Väljaheiteid koguti ja analüüsiti, et hinnata keemilisi muutusi, mis viitasid plasti lagunemisele. Nende elutsükli uuriti, lastes valmikutel paarituda, kogudes munetud mune ja jälgides vastsete arengut valmikustaadiumini, kasutades toiduks mesilasvaha. Keskmise katse jooksul tuvastatud elutsükkel oli järgmine: munestaadium kestis  $6,4 \pm 0,68$  päeva, vastsestaadium  $49,6 \pm 2,62$  päeva, nukustaadium  $8,3 \pm 0,53$  päeva ning valmikustaadium  $153 \pm 4,02$  päeva (Kundungal, Amal ja Devipriya, 2025).

**PE:** polüetüleeni tarbiti ca 22,36% vähem kui mesilasvaha (Tabel 1). Võrreldes katses kasutatud teiste liikidega, *Galleria mellonella* ja *Achroia grisella*, tegi *Uloma sp.* plastis kõige suuremad keemilised muudatused, mis kinnitavad depolümerisatsiooni ja oksüdatsiooni. Ainult tavatoidul olnud vastsete elumus oli ca 6% kõrgem kui PE-ga toidetud vastsete elumus. Kõik grupid läbisid terve elutsükli. Kaaluerinevus oli gruppidel erinev, tavatoiduga grupiga kaal tõusis  $22,92 \pm 2,1\%$ , PE-ga toidetud grupi kaal jäi samaks ning näljutatud grupi kaal vähenes (Kundungal, Amal ja Devipriya, 2025).

**PS:** kolmes rühmas uuriti *Uloma sp.* vastseid: tavasöödal, plastisöödal (2,5 g PS) ja segadieedil (PS + meekärg). Kõrgeim elumus oli tavasöödal, madalaim näljutatud rühmas; plastisöödal oli see madalam kui tavasöödal ja segadieedil ca 5% madalam kui tavasöödal (Tabel 1). Läbiti kogu elutsükkel kõigis söötmisrühmades, kuid ainult segatoidul arenes ka teine põlvkond, kelle elujõulisus jäi madalaks. Teise põlvkonna vastsed näitasid võrreldavat PS-i lagundamisvõimet (36 mg 100 vastse kohta päevas) ja elumust (87%) ning lõpetasid edukalt oma elutsükli. Siiski viitasid autorid, et vastkoorunud teise põlvkonna vastsed, kes olid toidetud ainult PS-ga, ei suutnud edukalt areneda ega kohaneda ning näitasid vähenenud arengut ja elujõulisust, mis võib viidata toitainete puudusest tingitud arenguhäiretele. Väljaheidetes täheldati uusi funktsionaalseid rühmi, mis viitavad plastide keemilisele lagunemisele (Kundungal, Amal ja Devipriya, 2021). Plast lagunes rohkem segasöödal, kui plastisöödal. Kehakaalu kasv oli suurim tavasöödal (Kundungal, Amal ja Devipriya, 2021).

## Lõpp-produktide keskkonnamõju

Plastijäätmete kuhjumine looduskeskkonnas on kaasa toonud ülemaailmse vajaduse nende lagunemisprotsesside ja saaduste parema mõistmise järele. Viimastel aastatel on saagenud uurimused plastide, sh polüetüleeni, polüstüreeni ja polüvinüülkloriidi biolagunemise kohta erinevates süsteemides, sealhulgas mikroorganismide ja putukate seedesüsteemides (Brandon jt, 2018; Kundungal jt, 2019; Peng jt, 2020b).

Plasti biodegradatsiooni käigus tekivad mitmesugused lõpp-produktid, sealhulgas süsinikdioksiid, vesi, happed, alkoholid ning mikro- ja nanoplastid (Yang jt, 2014). Näiteks Chamas jt (2020) ning Zhang jt (2022a) toovad välja, et laguproduktide hulka kuuluvad ka aldehüüdid ja ketoonid. Need jäägid ei pruugi olla ohutud, sest mikroplast võib püsida keskkonnas aastakümneid (Fackelmann jt, 2023), mõjutades pinnase mikrobioloogilist koosseisu (Urbanek jt, 2020) ja sisenedes toiduahelasse (Sanchez-Hernandez, 2021).

Putukate, nagu hariliku jahumardika ja süsiklase *Zophobas atratus*, kasutamine plastide lagundamisel on näidanud, et seedimisprotsess viib sageli osalise depolümerisatsioonini (Yang jt, 2021a), mille tulemusel tekivad keerukad vaheühendid ja väikese molekulmassiga ühendid, nagu etaanhape ja propüülalkohol (Peng jt, 2023). Samuti täheldas Kundungal jt (2025), et plastijääkide metabolismi kõrvalproduktide hulka võivad kuuluda ka alkoholid ja fenoolsed ühendid. Osa neist võib toimida mikroorganismidele toitainelikkana, kuid nende mõju ökosüsteemidele on sageli teadmata või potentsiaalselt kahjulik (Lou jt, 2021).

Uuringud on tuvastanud, et plastide lagunemisel vabanevad ka monomeerid ja lisandid nagu stüreen, ftalaadid ja bisfenool A, mille toksilisus on hästi dokumenteeritud (Boschi jt, 2024). Näiteks Fackelmann jt (2023) seostasid nende ühendite esinemise häiretega soolestiku mikrobioomis. Sellised ühendid võivad mõjutada organismide arengut (Jin jt, 2023), ainevahetust ja käitumist ning kutsuda esile oksüdatiivset stressi või põletikulisi reaktsioone (Jiang jt, 2024).

Siiski on leitud ka viiteid, et teatud lõpp-produktid, näiteks bioaktiivsed happed või lipiidid, võivad mõningates tingimustes olla kasulikud, nt mulla viljakuse parandamisel väetisena (Yang jt, 2019). Gallitelli jt (2022) näitasid, et frass võib parandada mulla mikrobioloogilist aktiivsust. Sellest hoolimata on teadlaste seas valdav seisukoht, et enamik teadaolevaid lagunemissaadusi ei ole keskkonnale täielikult ohutud ja vajavad täiendavat hindamist, eriti nende püsimise ja bioakumulatsiooni osas (Chamas jt, 2020; Urbanek jt, 2020).

Kokkuvõttes on plastide biolagunemine paljutõotav lähenemine keskkonnasõbralikumale jäätmekäitlusele (Rana jt, 2022), kuid vajab tähelepanelikku jälgimist lõpp-produktide iseloomu ja nende keskkonnamõjude osas (Gu, 2003). Sanchez-Hernandez on leidnud, et osaline lagunemine ja toksiliste ühendite teke võivad tuua kaasa soovimatuid tagajärgi, mistõttu on oluline arendada edasi laguproduktide analüüsimeetodeid ja keskkonnariskide hindamist.

## Arutelu

Plastide laialdase leviku ja keskkonnamõju tõttu on viimasel ajal üha enam tähelepanu pööratud putukate kui võimalike plasti biolagundajate uurimisele. Bakalaureusetöö tulemused näitasid, et mitmed putukaliigid on võimelised plastide keemilist struktuuri muundama ja nende massi vähendama, kuid lagundamise efektiivsus jäi üldiselt mõõdukaks ning varieerus liikide lõikes oluliselt. Plastisööt mõjutas märkimisväärselt putukate elukäiguomadusi – näiteks põhjustas see kehakaalu langust, vähendas nukustadiumini jõudmist ning tõi kaasa muutusi mikroobioomis. Enamus uuritud liike ei suutnud läbida kogu elutsüklit üksnes plastipõhisel söödal, mis viitab plastide toiteväärtuse ebapiisavusele. Neil liikidel, kes suutsid plastisöödal valmikustadiumini jõuda, vähenes järglaste kohasus. Töö näitas, et plastilagundamise protsessis mängisid olulist rolli teatud sümbiondid – näiteks *Enterococcus*, *Pediococcus*, *Citrobacter* ja *Acinetobacter* –, kelle esinemissagedus suurenes plastidieedil olevate putukate soolestikus. Need mikroobid toetasid plasti lagundamist keemiliselt ja mõjutasid otseselt peremeesorganismi füsioloogilist seisundit ja elumust.

Mardikad on näidanud erinevat plastide lagundamisvõimekust sõltuvalt plastiliigist, kuid üldjoontes on nende efektiivsus kõige suurem termoplastide puhul, nagu PE, PS, PP ja PVC. Kõige tõhusam plastide lagundaja oli *Zophobas atratus*, kes näitas häid tulemusi polüetüleeni ja polüstüreeni puhul (Tabel 1). PVC ja PP puhul olid lagundamismäärad madalamad ning kaasnes rohkem füsioloogilisi kahjustusi. Põrniklane *Protaetia brevitarsis* on praegustel andmetel polüstüreeni kõige efektiivsem lagundaja, kuid kuna selle kohta leidub vaid üks teadusartikkel, jääb ta hetkel efektiivsuse järjestusest välja ning vajab edasist uurimist (Jiang jt, 2024). Samuti leiti, et süsiklane *Plesiophthalmus davidis* lagundab polüstüreeni väga efektiivselt, kuid samal põhjusel ei ole võimalik teda võrdlusesse tuua (Tabel 1). Plastide lagundamise tõhusus oli üldiselt kõrgem segasööda korral – näiteks PE puhul suurenes liigi *Z. atratus* lagundamismäär 58,7 mg-lt  $70,0 \pm 3,3$  mg-ni (Tabel 1). See viitab sellele, et plastide kõrval lisatoitaineid sisaldav segasööt võib parandada putukate üldist ainevahetust ja füsioloogilist seisundit, võimaldades tõhusamat plastide lagundamist – ilmselt tänu paremale energiatasakaalule, mis toetab mikroobide ja peremeesorganismi koostoimet.

Kõige suurema elumusega oli PE puhul süsiklane *Zophobas atratus*, kellest säilitas 33 päeva lõpuks elumuse 94%; PS puhul samuti *Z. atratus*, kelle vastsetest jäi katse lõpuks ellu 96,5%; PP puhul harilik jahumardikas, kelle vastsetest jäi 35-päevase plastsöötme katse lõpuks ellu 88%; ning PVC puhul harilik jahumardikas, kelle elumus oli 30 päeva pikkuse plastsöötme

perioodi lõpuks 38% (Tabel 1). Elumust ei hinnanud kõik tööd, mistõttu paljude mainitud liikide puhul see puudub. Tulemused näitavad, et plastide lagundamise võime ei ole otseselt võrdelises seoses elumusega – kuigi mõni liik lagundab plastide massi suuremal määral, ei pruugi tema elujõulisus plastidieedil olla parim. Seetõttu tuleb plastilagundajate sobivust hinnata komplekselt, arvestades nii lagundamisvõimet kui ka elukäiguomaduste säilimist.

Huvitava tähelepanekuna ilmnes, et plastisöödal olevate vastsete kehakaalu langus ja elumus erineb oluliselt näljutatud gruppidest. Näiteks täheldati mitmes katses, et plastidieedil olevad putukad kaotasid kaalu vähem kui täielikult näljutatud rühmad ning nende elumus oli samuti märgatavalt kõrgem (Peng jt, 2020a; 2023; Ding jt, 2024). See viitab võimalusele, et hoolimata plasti vähesest toiteväärtusest on toitainete osaline omastamine siiski võimalik. Tõenäoliselt pole plastide seedimine pelgalt mehaaniline protsess, vaid vähemalt osa plasti laguproduktidest suudetakse mikroobide abil seedesüsteemis omastada ja kasutada organismi elutegevuseks. Sellest tulenevalt võib plast toimida kui minimaalne, kuid siiski eksisteeriv toiduallikas, mille kaudu putukas suudab elumust pikendada. Samas jääb teadmata, millises ulatuses need toitained arengut toetavad ning kas nende omastamisega kaasnevad peremeesorganismile pikaajalised toksilised mõjud. Tulevikus tuleks täpsustada, millised laguproduktid muutuvad putukatele kättesaadavaks ja kuidas need mõjutavad putukate ainevahetust, kasvukiirust ning reproduktiivset võimekust.

Olemasolevad uuringud ei võimalda teha lõplikke järeldusi plastisööda piisavusest kogu arengutsükli toetamiseks. Enamus eksperimente on kestnud vaid 21–35 päeva (nt Peng jt, 2019; Ding jt, 2023; Luo jt, 2021), ehkki paljude mardikaliste, näiteks hariliku jahumardika (*Tenebrio molitor*), arengutsükkel võib sõltuvalt tingimustest ulatuda 280 kuni 630 päevani, kus vastsestaadium võib kesta kuni 18 kuud (Pham jt, 2023). Senine andmestik viitab, et suurem osa liikidest ei suuda ainult plastil põhineval söödal areneda valmikuks ega järglasi edukalt toota. Erandlikuks näiteks on perekonna *Uloma* liigid, kelle vastsed suutsid PE- ja PS-põhisel söödal valmikuks areneda ning järgmise põlvkonna produtseerida. Järglaste elujõulisus oli madalam ning toitumiseelistus kaldus tugevalt plasti kasuks, viidates võimalikele ökotoksikoloogilistele mõjudele (Kundungal, Amal ja Devipriya, 2021; 2025). Samuti täheldati süsikliksel *Alphitobius diaperinus*, et osa vastseid jõudis plastisöödaga valmikustaadiumini, kuid järglaste elujõulisust ega sigimisedukust ei uuritud, mistõttu tulemused jäävad ebaselgeks (Cucini jt, 2020; 2022).

Praegu viitavad teadaolevad andmed, et plast võib soodsates tingimustes toetada vastsete osalist arengut ja elumust, kuid see ei pruugi olla piisav pikaajalise populatsiooni püsimiseks ega plastilagundamise laiemaks rakendamiseks. Seetõttu on edasisteks uuringuteks hädavajalik kavandada pikemaajalised katsed, mis hõlmavad mitut põlvkonda ning hindavad lisaks lagundamisvõimele ka sigimisvõimet, järglaste elujõulisust ja plastidieedi võimalikke kumulatiivseid füsioloogilisi mõjusid.

Plasti lagundamise protsessis mängivad keskset rolli mitte ainult putukad, vaid ka nende soolestikus elavad mikroorganismid, eeskätt bakterid, kes on võimelised polümeere depolümeriseerima ning laguprodukte mineraliseerima (Jang ja Kikuchi, 2020; Yang jt, 2021a). Käesoleva töö põhjal suurenes plastilagundajate soolestikus märgatavalt järgmiste mikroobirühmade osakaal: *Citrobacter*, *Pediococcus*, *Streptococcus*, *Lactococcus*, *Acinetobacter* ja *Spiroplasma* (vt Tabel 1). Need sümbiondid osutusid võtmeteguriteks plastimolekulide lagundamisel ning olid plastiga toidetud putukatel sageli seotud parema elumuse ja kehakaalu säilimisega.

Plasti biodegradatsioon on saavutatav ka ilma putukateta – näiteks bakterite ja seente abil, nii aeroobsetes kui ka anaeroobsetes tingimustes (Rutkowska jt, 2002; Gu, 2003). Samas on monokultuursete mikroorganismide kasutamisel lagundamisvõime sageli piiratud, kuna neil puudub keerukas ensümaatiliste ja metaboolsete radade võrgustik, mis on vajalik täielikuks ja stabiilseks polümeeride lagundamiseks (Ghosh jt, 2013; Inderthal, Tai ja Harrison, 2021). Seevastu pakub putukate seedesüsteem looduslikult heterogeenset keskkonda, kus mikroobikooslus töötab koos peremeesorganismi füüsikaliste ja keemiliste mehhanismidega (nt närimine, emulsioonid, ensümaatiline lõhustamine), võimaldades efektiivsemat lagundamist (Jang ja Kikuchi, 2020; Yang jt, 2021a).

Oluline erinevus tekib ka laguproduktide olemuses. Mikroorganismide anaeroobsel lagundamisel tekivad metaan, süsihappegaas ja biomass, mis võivad suurendada kasvuhoonegaaside emissiooni (Gu, 2003; Rana jt, 2022). Putukate kaudu toimuv lagundamine toimub aga valdavalt aeroobses keskkonnas, mille tulemuseks on süsihappegaas, vesi ja biomass – metaani ei teki (Rutkowska jt, 2002; Lou jt, 2021). Seetõttu on putukate osalusel toimuv lagundamine keskkonnamõju poolest soodsam. Lisaks suudab putuka seedekeskond tõenäoliselt paremini toime tulla plastide koostises leiduvate lisanditega (nt ftalaadid, värvained, UV-stabilisaatorid), mis võivad mikroobide monokultuure pärssida või toksiliselt mõjutada (Chawla jt, 2022). Putuka keemiliselt ja

füüsikaliselt mitmekesisem seedekeskond võimaldab selliseid ühendeid lagundada või mehhanismide kaudu eemaldada (Yang jt, 2021b; Peng jt, 2020a).

Senised andmed viitavad, et kõige tõhusam plastide lagundamise strateegia ei tugine ainult mikroobidel ega putukatel, vaid just sümbiootilistel süsteemidel, kus peremeesorganism ja tema mikrobiom toimivad koos (Yang jt, 2021a; Peng jt, 2023; He jt, 2024). Selle teadmise valguses on arutletud kahe rakendussuuna üle: esimeseks spetsiaalsete, plastilagundava mikrobiomiga putukate kasvatamine, teiseks võimekate bakterite isoleerimine ning kasutamine autonoomselt tööstuslikes bioreaktorites (De Filippis jt, 2023; Urbanek jt, 2020). Viimane lähenemine võimaldaks plastide lagundamist kontrollitud tingimustes, suurema skaleeritavuse ja madalama bioturvalisusohuga (Zhang jt, 2022b; Rana jt, 2022; He jt, 2024). Samas sõltub bakterite funktsionaalsus sageli peremeesorganismi mikrokeskkonnast, mis piirab nende otsekohaldatavust väljaspool putuka keha (De Filippis jt, 2023). Seetõttu on realistlikuks tulevikusuunaks kombineeritud lahendus, kus putukad toimivad loodusliku filtrina sobivate bakterite tuvastamiseks ja isoleerimiseks, mille järel saaks neid mikroobe optimeeritud tööstuslikes süsteemides sihipäraselt rakendada. Nii ühendataks ökoloogiline toimivus tehnoloogilise kontrollitavusega, luues kestlikke lahendusi plastireostuse leevendamiseks.

Putukate osalusel toimuv plastide osaline lagundamine ei tähenda plasti täielikku mineraliseerumist. Mineraliseerumine, s.o plastide täielik muundumine süsinikdioksiidiks, veeks ja kahjutuks biomassiks, on keskkonnakaitse seisukohalt kriitiline, sest vaid selliselt lagunenu plast ei kuhju ega kujuta ohtu elusorganismidele (Gu, 2003). Töodes täheldatud laguproduktid viitavad sageli vaid osalisele depolümeerisatsioonile (Ding jt, 2023; Peng jt, 2022; Rana jt, 2022), mille käigus võivad alles jääda mikroplastijäägid või toksilised ühendid. Näiteks PVC lagundamisel tuvastati putukate väljaheidetes klooriühendeid (Peng jt, 2020a), millele lisaks täheldati plastil toitunud putukates oksüdatiivset stressi ja soolekahjustusi (Lou jt, 2021; Ding jt, 2024). Seetõttu tuleb plastide lagundamise edukust hinnata mitte ainult massi vähenemise, vaid ka lõpp-produktide keemilise koostise ja keskkonnamõju põhjal.

Tulevikusuundades on keskne roll laguproduktide keemilise koostise ja toksilisuse hindamisel, samuti nende võimaliku bioakumulatsiooni uurimisel (Fackelmann jt, 2023; Zhong jt, 2022). Eriti oluline on keskenduda putukate soolestikus elavatele mikroorganismidele ja nende ensümaatilistele radadele, mis võiksid võimaldada plastide

täielikumat ja keskkonnasõbralikumat lagundamist. Paralleelselt tuleb analüüsida, millises ulatuses muundub plast tegelikult kahjutuks biomassiks ning millised laguproduktid võivad jääda püsivateks keskkonna saaste aineteks. Ainult sellise tervikliku arusaama kaudu saab hinnata plastilagundamise tõelist keskkonnakasutust.

Jäätmeäritajatele oleks putukate kasutamine kõige otstarbekam väikese koguse ühtlase koostisega plastijäätmete korral, eriti kui tegemist on PE või PS-iga. Kuna mitmekesise koostisega või lisanditerikka plasti puhul on lagundamisvõime madalam, võiks putukatepõhine biolagundamine olla sobiv eeltötluse etapp mehaanilise või keemilise ümbertöötlemise kõrval. Samuti tuleks tööstuslikuks kasutuseks eelistada liike, kelle lagundamisvõime on korduvalt kinnitatud, elutsükkel on hästi tuntud ning mikrobiomi kooslust on võimalik stabiliseerida ja hallata.

Tulevikus peaks kindlasti korraldama pikaajalisemad katsed, et näha plasti mõju põlvkondade kaupa. Siiani tehtud katsed keskenduvad ainult ühele põlvkonnale, seega pikaajalisemat mõju ei ole veel hinnatud. Uurimuste edasiarenduse kaudu saaksime koguda täiendavaid andmeid, mis aitaksid vastata küsimusele, kas putukate vastsete kasutamine plastireostuse leevendamiseks on realistlik või jääb see pelgalt üheks entomoloogide unistuseks.

## Kokkuvõte

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida mardikaliste võimekust erinevate plastitüüpide – polüetüleen (PE), polüstüreen (PS), polüpropüleen (PP) ja polüvinüülkloriidi (PVC) – lagundamisel, hinnata plasti tarbimise mõju putukate elukäiguomadustele ning analüüsida lagundamisega seotud endosümbiontide rolli. Samuti käsitleti laguproduktide võimalikke keskkonnamõjusid.

Töö tulemused näitavad, et mitmed mardikaliigid suudavad osaliselt lagundada uuritud plastitüüpe. Kõige tõhusamaks plastilagundajaks osutus süsiklane *Zophobas atratus*, kes näitas kõrgeimat plastitarbimist kõigi plastiliikide puhul. Lagundamisvõime oli siiski üldiselt suurem segasöötade kasutamisel, mis parandas oluliselt nii putukate elumust kui ka plastide tarbimise määra. See viitab lisatoitainete olulisele rollile plastide lagundamise tõhustamisel.

Lagundamisprotsessis osalesid olulisel määral soolestiku mikroorganismid, sh *Enterobacteriaceae* sugukonna ja *Citrobacter* perekonna bakterid, kes aitasid kaasa polümeeride depolümeeriseerimisele ning laguproduktide mineraliseerimisele. Ainult plastist koosneval söötmel esines putukatele siiski mitmeid negatiivseid füsioloogilisi mõjusid: kehakaalu langus, nukustaadiumini jõudmise vähenemine, oksüdatiivne stress ja mikrobioomi mitmekesisuse vähenemine. Ükski liik ei suutnud läbida kogu elutsükli üksnes plastipõhisel toidul, mis viitab plastide toiteväärtuse ebapiisavusele.

Töö tulemustest lähtuvalt võib arvata, et plastide lagundamine on tõhusaim sümbiootilises süsteemis, kus peremeesorganism ja tema mikrobioom tegutsevad koos. Siiski ei tähenda plastmassi hulga vähenemine tingimata täielikku lagunemist – putukate väljaheidetes leiti mikroplastijääke ning teatud juhtudel ka potentsiaalselt toksilisi ühendeid. Seetõttu tuleb plasti osalist biolagunemist käsitleda ettevaatusega, pöörates tähelepanu ka laguproduktide keskkonnamõjudele.

Kokkuvõttes näitab käesolev töö, et putukate – eeskätt mardikaliste – kasutamine plastijäätmete eeltöötlusel võiks olla perspektiivne lahendus homogeensete termoplastide puhul, eriti väikeste jäätmekoguste korral. Praktilise rakendatavuse suurendamiseks on vajalikud pikaajalisemad katsed, mis hõlmavad mitut putukapõlvkonda ning hindavad laguproduktide ohutust ja bioakumulatsiooni riske. Edasised uuringud peaksid keskenduma plastide lagundamisele spetsialiseerunud mikroobikoosluste isoleerimisele ning nende rakendamisele kontrollitud ja keskkonnasõbralikes tingimustes.

## Summary

### **Plastic-degrading beetles: impacts on the environment, insects and endosymbionts**

The aim of this bachelor's thesis was to investigate the ability of various beetle species to degrade different types of plastics—polyethylene (PE), polystyrene (PS), polypropylene (PP), and polyvinyl chloride (PVC)—to assess the physiological effects of plastic consumption on insects, and to analyze the role of endosymbionts involved in the degradation process. The environmental impact of degradation by-products was also considered.

The results show that several beetle species are capable of partially degrading the examined types of plastics. Among them, *Zophobas atratus* proved to be the most efficient plastic degrader, exhibiting the highest plastic intake rates across all plastic types. Degradation efficiency was generally higher when mixed diets were used, indicating the importance of additional nutrients in enhancing plastic biodegradation.

Microorganisms in the insect gut, particularly from the *Enterobacteriaceae* family and the genus *Citrobacter*, played a central role in depolymerizing plastic polymers and in the subsequent mineralization of degradation products. However, plastic-based diets led to negative physiological outcomes, including weight loss, reduced pupation, oxidative stress, and decreased gut microbiome diversity. None of the studied species were able to complete a full life cycle on a plastic-only diet, highlighting the nutritional inadequacy of plastic as a sole food source.

The findings confirm that plastic degradation is most effective in symbiotic systems where the host organism and its microbiome operate in tandem. However, a reduction in plastic mass does not equate to complete degradation—microplastic residues and potentially toxic compounds were detected in insect feces. Therefore, partial biodegradation should be approached cautiously, with attention to the environmental impacts of residual by-products.

In conclusion, this study highlights the potential of beetles as an effective pre-treatment tool of homogeneous thermoplastic waste, especially in small scale applications. For practical applications, long-term studies are essential to examine multiple insect generations and evaluate the toxicity and bioaccumulation risks of degradation products. Future research should prioritize the isolation of specialized microbial consortia from insect gut microbiota and their applications in controlled, environmentally sustainable settings.

## **Tänuavaldused**

Esmalt soovin tänada enda juhendajat Toomas Esperki, kes on olnud mulle alati olemas ning vastamas kõikidele minu tekkinud küsimustele. Temast kiirgav energia oli lõputöö kirjutamiseks üheks motivatsiooniallikaks. Samuti soovin tänada enda sõpru ja eelkõige perekonda, kes on minu ülikooli teekonnale väga kaasa elanud.

## Kasutatud kirjandus

- Aase, S. (2008). What weight does impact factor carry?. *Journal of the American Dietetic Association*, 108(10).
- Abdulhay, H. S. (2020). Biodegradation of plastic wastes by confused flour beetle *Tribolium confusum* Jacquelin du Val larvae.
- An, L., Liu, Q., Deng, Y., Wu, W., Gao, Y., & Ling, W. (2020). Sources of microplastic in the environment. *Microplastics in terrestrial environments: Emerging contaminants and major challenges*, 143–159.
- Anwar, M. S., Kapri, A., Chaudhry, V., Mishra, A., Ansari, M. W., Souche, Y., ... & Goel, R. (2016). Response of indigenously developed bacterial consortia in progressive degradation of polyvinyl chloride. *Protoplasma*, 253, 1023-1032.
- Bardají, D. K. R., Moretto, J. A. S., Furlan, J. P. R., & Stehling, E. G. (2020). A mini-review: current advances in polyethylene biodegradation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36, 1-10.
- Barnes, D. K., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 364(1526), 1985–1998.
- Barnetson, A. (1997). *Advances in polymers*. iSmithers Rapra Publishing, 10.
- Bjørge, J. D., Overgaard, J., Malte, H., Gianotten, N., & Heckmann, L. H. (2018). Role of temperature on growth and metabolic rate in the tenebrionid beetles *Alphitobius diaperinus* and *Tenebrio molitor*. *Journal of Insect Physiology*, 107, 89-96.
- Boschi, A., Scieuzo, C., Salvia, R., Arias, C. F., Perez, R. P., Bertocchini, F., & Falabella, P. (2024). Beyond microbial biodegradation: plastic degradation by *Galleria mellonella*. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(5), 2158-2177.
- Brandon, A. M., Gao, S. H., Tian, R., Ning, D., Yang, S. S., Zhou, J., ... & Criddle, C. S. (2018). Biodegradation of polyethylene and plastic mixtures in mealworms (larvae of *Tenebrio molitor*) and effects on the gut microbiome. *Environmental science & technology*, 52(11), 6526–6533.
- Campbell, J. F., Athanassiou, C. G., Hagstrum, D. W., & Zhu, K. Y. (2022). *Tribolium castaneum*: a model insect for fundamental and applied research. *Annual review of entomology*, 67(1), 347–349.
- Castro, A., Soares, D., Vilarinho, C., & Castro, F. (2012). Kinetics of thermal de-chlorination of PVC under pyrolytic conditions. *Waste Management*, 32(5), 847-851.

- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., ... & Suh, S. (2020). Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3494–3504.
- Chawla, S., Varghese, B. S., Chithra, A., Hussain, C. G., Keçili, R., & Hussain, C. M. (2022). Environmental impacts of post-consumer plastic wastes: Treatment technologies towards eco-sustainability and circular economy. *Chemosphere*, 135867.
- Ciuffreda, L., Rodríguez-Pérez, H., & Flores, C. (2021). Nanopore sequencing and its application to the study of microbial communities. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 19, 1497-1511.
- Cucini, C., Leo, C., Vitale, M., Frati, F., Carapelli, A., & Nardi, F. (2020). Bacterial and fungal diversity in the gut of polystyrene-fed *Alphitobius diaperinus* (Insecta: Coleoptera). *Animal Gene*, 17, 200109.
- Cucini, C., Funari, R., Mercati, D., Nardi, F., Carapelli, A., & Marri, L. (2022). Polystyrene shaping effect on the enriched bacterial community from the plastic-eating *Alphitobius diaperinus* (Insecta: Coleoptera). *Symbiosis*, 86(3), 305–313.
- De Filippis, F., Bonelli, M., Bruno, D., Sequino, G., Montali, A., Reguzzoni, M., ... & Caccia, S. (2023). Plastics shape the black soldier fly larvae gut microbiome and select for biodegrading functions. *Microbiome*, 11(1), 205.
- Dellinger, T. A., & Day, E. R. (2018). *Darkling Beetles and Mealworms*.
- Ding, M. Q., Ding, J., Zhang, Z. R., Li, M. X., Cui, C. H., Pang, J. W., ... & Yang, S. S. (2024). Biodegradation of various grades of polyethylene microplastics by *Tenebrio molitor* and *Tenebrio obscurus* larvae: Effects on their physiology. *Journal of Environmental Management*, 358, 120832.
- Ding, M. Q., Yang, S. S., Ding, J., Zhang, Z. R., Zhao, Y. L., Dai, W., ... & Wu, W. M. (2023). Gut microbiome associating with carbon and nitrogen metabolism during biodegradation of polyethylene in *Tenebrio* larvae with crop residues as co-diets. *Environmental Science & Technology*, 57(8), 3031-3041.
- Fabreag, M. A. C., & Familara, J. A. (2019). Biodegradation of expanded polystyrene (EPS)(Styrofoam) block as feedstock to *Tribolium castaneum* (Red Flour Beetle) imago: A promising plastic-degrading process. *World News of Natural Sciences*, (24), 145–156.
- Fackelmann, G., Pham, C. K., Rodríguez, Y., Mallory, M. L., Provencher, J. F., Baak, J. E., & Sommer, S. (2023). Current levels of microplastic pollution impact wild seabird gut microbiomes. *Nature Ecology & Evolution*, 7(5), 698–706.

- Fudlosid, S., Ritchie, M. W., Muzzatti, M. J., Allison, J. E., Provencher, J., & MacMillan, H. A. (2022). Ingestion of microplastic fibres, but not microplastic beads, impacts growth rates in the tropical house cricket *Gryllobates sigillatus*. *Frontiers in physiology*, 13, 871149.
- Gallitelli, L., Zauli, A., & Scalici, M. (2022). Another one bites the plastics. *Ecology and Evolution*, 12(9), e9332.
- Gerhardt, P. D., & Lindgren, D. L. (1954). Penetration of various packaging films by common stored-product insects.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782.
- Ghaly, A. E., & Alkokaik, F. N. (2009). The yellow mealworm as a novel source of protein, 319–321.
- Ghosh, S. K., Pal, S., & Ray, S. (2013). Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 4339–4355.
- Gu, J. D. (2003). Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent research advances. *International biodeterioration & biodegradation*, 52(2), 69–91.
- Hadad, D., Geresh, S., & Sivan, A. (2005). Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis*. *Journal of applied microbiology*, 98(5), 1093-1100.
- He, L., Ding, J., Yang, S. S., Zang, Y. N., Pang, J. W., Xing, D., ... & Wu, W. M. (2024). Molecular-Weight-Dependent Degradation of Plastics: Deciphering Host–Microbiome Synergy Biodegradation of High-Purity Polypropylene Microplastics by Mealworms. *Environmental Science & Technology*.
- Ho, B. T., Roberts, T. K., & Lucas, S. (2018). An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: the microbial approach. *Critical reviews in biotechnology*, 38(2), 308–320.
- Hollóczki, O., & Gehrke, S. (2019). Nanoplastics can change the secondary structure of proteins. *Scientific Reports*, 9(1), 16013.
- Inderthal, H., Tai, S. L., & Harrison, S. T. (2021). Non-hydrolyzable plastics—an interdisciplinary look at plastic bio-oxidation. *Trends in biotechnology*, 39(1), 12–13.
- Jang, S., & Kikuchi, Y. (2020). Impact of the insect gut microbiota on ecology, evolution, and industry. *Current Opinion in Insect Science*, 41, 33–39.

- Jiang, J., Xu, H., Cao, X., Liang, Y., Mo, A., Cao, X., ... & He, D. (2024). Soil-dwelling grub larvae of *Protaetia brevitarsis* biodegrade polystyrene: Responses of gut microbiome and host metabolism. *Science of The Total Environment*, 934, 173399.
- Jin, L., Feng, P., Cheng, Z., & Wang, D. (2023). Effect of biodegrading polyethylene, polystyrene, and polyvinyl chloride on the growth and development of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(13), 37118–37126.
- Kesti, S. S. K., & Thimmappa, S. C. T. (2019). First report on biodegradation of low density polyethylene by rice moth larvae, *Corcyra cephalonica* (Stainton). *The holistic approach to environment*, 9(4), 79-83.
- Kim, H. W., Jo, J. H., Kim, Y. B., Le, T. K., Cho, C. W., Yun, C. H., ... & Yeom, S. J. (2021). Biodegradation of polystyrene by bacteria from the soil in common environments. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126239.
- Kundungal, H., Amal, R., & Devipriya, S. P. (2025). Nature's Solution to Degrade Long-Chain Hydrocarbons: A Life Cycle Study of Beeswax and Plastic-Eating Insect Larvae. *Journal of Polymers and the Environment*, 33(1), 483–496.
- Kundungal, H., Gangarapu, M., Sarangapani, S., Patchaiyappan, A., & Devipriya, S. P. (2019). Efficient biodegradation of polyethylene (HDPE) waste by the plastic-eating lesser waxworm (*Achroia grisella*). *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 18509-18519.
- Kundungal, H., Synshiang, K., & Devipriya, S. P. (2021). Biodegradation of polystyrene wastes by a newly reported honey bee pest *Uloma* sp. larvae: An insight to the ability of polystyrene-fed larvae to complete its life cycle. *Environmental Challenges*, 4, 100083, 1–8.
- Lambkin, T. A. (2001). Investigations into the biology and control of the darkling beetle *Alphitobius diaperinus* (Panzer) (Coleoptera: Tenebrionidae) in broiler poultry sheds in southeast Queensland. *General and Applied Entomology*, 30, 1.
- Lenz, M., Kard, B., Creffield, J. W., Evans, T. A., Brown, K. S., Freytag, E. D., ... & De Santi, M. P. (2013). Ability of field populations of *Coptotermes* spp., *Reticulitermes flavipes*, and *Mastotermes darwiniensis* (Isoptera: Rhinotermitidae; Mastotermitidae) to damage plastic cable sheathings. *Journal of economic entomology*, 106(3), 1395–403.
- López-Naranjo, E. J., Alzate-Gaviria, L. M., Hernández-Zárate, G., Reyes-Trujeque, J., Cupul-Manzano, C. V., & Cruz-Estrada, R. H. (2013). Effect of biological degradation

- by termites on the flexural properties of pinewood residue/recycled high-density polyethylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(5), 2595–2603.
- Lou, Y., Li, Y., Lu, B., Liu, Q., Yang, S. S., Liu, B., ... & Xing, D. (2021). Response of the yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) gut microbiome to diet shifts during polystyrene and polyethylene biodegradation. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126222.
- Luo, L., Wang, Y., Guo, H., Yang, Y., Qi, N., Zhao, X., ... & Zhou, A. (2021). Biodegradation of foam plastics by *Zophobas atratus* larvae (Coleoptera: Tenebrionidae) associated with changes of gut digestive enzymes activities and microbiome. *Chemosphere*, 282, 131006.
- Maddah, H. A. (2016). Polypropylene as a promising plastic: A review. *Am. J. Polym. Sci*, 6(1), 1–11.
- Mor, R., & Sivan, A. (2008). Biofilm formation and partial biodegradation of polystyrene by the actinomycete *Rhodococcus ruber*: Biodegradation of polystyrene. *Biodegradation*, 19, 851–858.
- Navlekar, A. S., Osuji, E., & Carr, D. L. (2023). Gut microbial communities in mealworms and indianmeal moth larvae respond differently to plastic degradation. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(6):1–14.
- Nyamjav, I., Jang, Y., Lee, Y. E., & Lee, S. (2023). Biodegradation of polyvinyl chloride by *Citrobacter koseri* isolated from superworms (*Zophobas atratus* larvae). *Frontiers in Microbiology*, 14, 1175249.
- Peng, B. Y., Su, Y., Chen, Z., Chen, J., Zhou, X., Benbow, M. E., ... & Zhang, Y. (2019). Biodegradation of polystyrene by dark (*Tenebrio obscurus*) and yellow (*Tenebrio molitor*) mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae). *Environmental science & technology*, 53(9), 5256–5265.
- Peng, B. Y., Chen, Z., Chen, J., Yu, H., Zhou, X., Criddle, C. S., ... & Zhang, Y. (2020a). Biodegradation of polyvinyl chloride (PVC) in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae. *Environment International*, 145, 106106.
- Peng, B. Y., Li, Y., Fan, R., Chen, Z., Chen, J., Brandon, A. M., ... & Wu, W. M. (2020b). Biodegradation of low-density polyethylene and polystyrene in superworms, larvae of *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae): Broad and limited extent depolymerization. *Environmental Pollution*, 266, 115206.
- Peng, B. Y., Sun, Y., Wu, Z., Chen, J., Shen, Z., Zhou, X., ... & Zhang, Y. (2022). Biodegradation of polystyrene and low-density polyethylene by *Zophobas atratus*

- larvae: Fragmentation into microplastics, gut microbiota shift, and microbial functional enzymes. *Journal of Cleaner Production*, 367, 132987.
- Peng, B. Y., Sun, Y., Li, P., Yu, S., Xu, Y., Chen, J., ... & Zhang, Y. (2023). Biodegradation of polyvinyl chloride, polystyrene, and polylactic acid microplastics in *Tenebrio molitor* larvae: Physiological responses. *Journal of Environmental Management*, 345, 118818.
- Pham, T. Q., Longing, S., & Siebecker, M. G. (2023). Consumption and degradation of different consumer plastics by mealworms (*Tenebrio molitor*): Effects of plastic type, time, and mealworm origin. *Journal of Cleaner Production*, 403, 136842.
- Pirsaheb, M., Hossini, H., & Makhdoumi, P. (2020). Review of microplastic occurrence and toxicological effects in marine environment: Experimental evidence of inflammation. *Process Safety and Environmental Protection*, 142, 1–14.
- Pivato, A. F., Miranda, G. M., Prichula, J., Lima, J. E., Ligabue, R. A., Seixas, A., & Trentin, D. S. (2022). Hydrocarbon-based plastics: Progress and perspectives on consumption and biodegradation by insect larvae. *Chemosphere*, 293, 133600.
- Rana, A. K., Thakur, M. K., Saini, A. K., Mokhta, S. K., Moradi, O., Rydzkowski, T., ... & Thakur, V. K. (2022). Recent developments in microbial degradation of polypropylene: Integrated approaches towards a sustainable environment. *Science of The Total Environment*, 826, 154056.
- Rees, D. (2004). *Insects of stored products*. CSIRO publishing. 118.
- Ribeiro, N., Abelho, M., & Costa, R. (2018). A review of the scientific literature for optimal conditions for mass rearing *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Entomological Science*, 53(4), 434–436.
- Riudavets, J., Salas, I., & Pons, M. J. (2007). Damage characteristics produced by insect pests in packaging film. *Journal of Stored Products Research*, 43(4), 564–570.
- Rutkowska, M., Heimowska, A., Krasowska, K., & Janik, H. (2002). Biodegradability of polyethylene starch blends in sea water. *Polish Journal of Environmental Studies*, 11(3), 267–268.
- Sanchez-Hernandez, J. C. (2021). A toxicological perspective of plastic biodegradation by insect larvae. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 248, 109117.
- Skariyachan, S., Patil, A. A., Shankar, A., Manjunath, M., Bachappanavar, N., & Kiran, S. (2018). Enhanced polymer degradation of polyethylene and polypropylene by novel thermophilic consortia of *Brevibacillus* sps. and *Aneurinibacillus* sp. screened from

- waste management landfills and sewage treatment plants. *Polymer Degradation and Stability*, 149, 52–68.
- Tschinkel, W. R. (1981). Larval dispersal and cannibalism in a natural population of *Zophobas atratus* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Animal Behaviour*, 29(4), 990–996.
- Turan, N. B., Erkan, H. S., & Engin, G. O. (2021). Current status of studies on microplastics in the world's marine environments. *Journal of Cleaner Production*, 327, 129394.
- Vogt, B. D., Stokes, K. K., & Kumar, S. K. (2021). Why is recycling of postconsumer plastics so challenging?. *ACS Applied Polymer Materials*, 3(9), 4325–4346.
- Urbanek, A. K., Rybak, J., Wróbel, M., Leluk, K., & Mirończuk, A. M. (2020). A comprehensive assessment of microbiome diversity in *Tenebrio molitor* fed with polystyrene waste. *Environmental Pollution*, 262, 114281.
- Zhang, Z., Peng, H., Yang, D., Zhang, G., Zhang, J., & Ju, F. (2022a). Polyvinyl chloride degradation by a bacterium isolated from the gut of insect larvae. *Nature Communications*, 13(1), 5360.
- Zhang, X. M., Elkoun, S., Ajji, A., & Huneault, M. A. (2004). Oriented structure and anisotropy properties of polymer blown films: HDPE, LLDPE and LDPE. *Polymer*, 45(1), 217-229.
- Zhang, Y., Pedersen, J. N., Eser, B. E., & Guo, Z. (2022b). Biodegradation of polyethylene and polystyrene: From microbial deterioration to enzyme discovery. *Biotechnology Advances*, 60, 107991.
- Zhong, Z., Nong, W., Xie, Y., Hui, J. H. L., & Chu, L. M. (2022). Long-term effect of plastic feeding on growth and transcriptomic response of mealworms (*Tenebrio molitor* L.). *Chemosphere*, 287, 132063.
- Wang, Z., Xin, X., Shi, X., & Zhang, Y. (2020). A polystyrene-degrading *Acinetobacter* bacterium isolated from the larvae of *Tribolium castaneum*. *Science of the Total Environment*, 726, 138564.
- Wang, S., Yu, H., Li, W., Song, E., Zhao, Z., Xu, J., ... & Xie, Z. (2024). Biodegradation of four polyolefin plastics in superworms (Larvae of *Zophobas atratus*) and effects on the gut microbiome. *Journal of Hazardous Materials*, 477, 135381.
- Weng, Y., Han, X., Sun, H., Wang, J., Wang, Y., & Zhao, X. (2024). Effects of polymerization types on plastics ingestion and biodegradation by *Zophobas atratus* larvae, and successions of both gut bacterial and fungal microbiomes. *Environmental Research*, 251, 118677.

- Woo, S., Song, I., & Cha, H. J. (2020). Fast and facile biodegradation of polystyrene by the gut microbial flora of *Plesiophthalmus davidis* larvae. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(18), e01361-20.
- Xu, Y., Xian, Z. N., Yue, W., Yin, C. F., & Zhou, N. Y. (2023). Degradation of polyvinyl chloride by a bacterial consortium enriched from the gut of *Tenebrio molitor* larvae. *Chemosphere*, 318, 137944.
- Yang, J., Yang, Y., Wu, W. M., Zhao, J., & Jiang, L. (2014). Evidence of polyethylene biodegradation by bacterial strains from the guts of plastic-eating waxworms. *Environmental science & technology*, 48(23), 13776-13784.
- Yang, S. S., Chen, Y. D., Kang, J. H., Xie, T. R., He, L., Xing, D. F., ... & Wu, W. M. (2019). Generation of high-efficient biochar for dye adsorption using frass of yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus) fed with wheat straw for insect biomass production. *Journal of Cleaner Production*, 227, 33-47.
- Yang, S. S., Ding, M. Q., He, L., Zhang, C. H., Li, Q. X., Xing, D. F., ... & Wu, W. M. (2021a). Biodegradation of polypropylene by yellow mealworms (*Tenebrio molitor*) and superworms (*Zophobas atratus*) via gut-microbe-dependent depolymerization. *Science of The Total Environment*, 756, 144087.
- Yang, S. S., Ding, M. Q., Zhang, Z. R., Ding, J., Bai, S. W., Cao, G. L., ... & Wu, W. M. (2021b). Confirmation of biodegradation of low-density polyethylene in dark-versus yellow-mealworms (larvae of *Tenebrio obscurus* versus *Tenebrio molitor*) via gut microbe-independent depolymerization. *Science of The Total Environment*, 789, 147915.

Kasutatud on zoologia bakalaureusetöö juhendit.

<https://zoologia.ut.ee/et/sisu/juhendid-ja-dokumendid>

## Interneti allikad

Internet 1. Google Scholar. Kasutatud 30.09.2023, <https://scholar.google.com/>

Internet 2. EBSCO Discovery. Kasutatud 30.09.2023, <https://www.ebsco.com/>

Internet 3. Plastics—The Facts 2022. Plastics Europe: Brussels, Belgium, 1–81. Kasutatud 05.11.2023, <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>

Internet 4. Envu. Rust-Red Flour Beetle. Kasutatud 23.05.2025, <https://www.za.envu.com/pest-management/whattocontrol/red-flour-beetle>

Internet 5. Envu. Confused Flour Beetles. Kasutatud 23.05.2025,

<https://www.za.envu.com/pest-management/whattocontrol/confused-flour-beetle>

Internet 6. Envu. Lesser Mealworms (Litter Beetle). Kasutatud 23.05.2025,

<https://www.za.envu.com/pest-management/whattocontrol/litter-beetle>

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Birgit Plaado,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose “Plasti lagundavad mardikalised: mõjud keskkonnale, putukatele ja endosümbiontidele”, mille juhendaja on Toomas Esperk, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Birgit Plaado*

**24.05.2025**