

УДК 576.32/.36. 628.473.24. 771.523.4

Микроорганизмдердің көмегімен пластиктің биодеградациясы

Мухамади Дана Дулатқызы 1, Қыдырбаева Найля Ерланқызы 2, Жолдыбаева Камила Дулатқызы 3, Қазбекова Дилара Алтынбековна 4, Иманбердиева Жания Ұлықбекқызы 5

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің студенті, Нұр-сұлтан қ, Қазақстан,
dana.muhamadi@icloud.com 1

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің студенті, Нұр-сұлтан қ, Қазақстан,
neka.k2000@gmail.com 2

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің студенті, Нұр-сұлтан қ, Қазақстан,
zholdybaevakd@gmail.com 3

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің студенті, Нұр-сұлтан қ, Қазақстан,
Dilarakzkb@gmail.com 4

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің студенті, Нұр-сұлтан қ, Қазақстан,
zhaniyaimanberdieva01@gmail.com 5

Жетекші: Наекова Салтанат Кобеевна

Пластмассалар дүниежүзілік экономикада кеңінен қолданылады және жыл сайын кем дегенде 350 - 400 миллион тонна өндірілуде. Өңдеудің нашарлығы және айналмалы айналымның

төмендігі салдарынан жыл сайын миллиондаған тонна құрлықтағы немесе теңіз ортасында жиналады. Бүгінгі күні пластиктің барлық экожүйелерде жағымсыз әсерлер туғызатыны және микропластиктердің біздің денсаулығымыз үшін ерекше алаңдаушылық тудыратыны белгілі болды. Сондықтан, жақында жүргізілген микробтық зерттеулер микроорганизмдер қоршаған ортадағы пластиктерді қаншалықты ыдырата алады деген мәселені шешті. Бұл шолуда микробтық пластиканың деградациясы туралы қазіргі білім қорытылған. [1]

Қазақстанда жиналған және қайта өңделген пластикалық қалдықтардың көлемі 2017 жылы 6066 тоннаны және 2018 жылы 11856 тоннаны құрады. Ресми статистикаға сәйкес, Қазақстанда жылына 5-6 миллион тонна қатты тұрмыстық қалдықтар жиналады, оның шамамен 150-200 мың тоннасы Полиэтилентерефталат (ПЭТ) қалдықтары. Сонымен бірге, МСҚ-ның шамалы үлесі ғана (әр түрлі бағалаулар бойынша - 3-тен 5% -ға дейін) қайта өңделеді немесе қайта өңделеді. Жалпы алғанда, Қазақстанда 43 миллиард тоннаға жуық өндіріс пен тұтыну қалдықтары жинақталған. Қазақстанда қоқыс өңдейтін зауыттар жұмыс істейді, бірақ мәселе тұрғындардың қалдықтарды дұрыс сұрыптауды әлі үйренбегендігінде. Шикізат ластанған зауыттарға жеткізіледі немесе олар зауыттардың толық қуатында жұмыс істеуі үшін жеткіліксіз (мысалы, мамандар мұндай көрсеткішті 30 пайыз деп атады - Нұр-Сұлтандағы қоқысты қайта өңдеу кешенінің жүктемесі, осылай бүгін және ол келіп түскен қалдықтардың тек 10-11% -ын өңдейді). [2]

Энергетика министрлігі 2018 жылдың соңында Қазақстанда қатты тұрмыстық қалдықтарды бөлек жинау, сұрыптау және қайта өңдеумен айналысатын кәсіпорындар саны 150-ге дейін өсті деп хабарлайды. [2] Термопластиктер полиэтилен (ПЭ), полиэтилентерефталат (ПЭТ), полипропилен (ПП) және полистирол (ПС) - бұл қаптамада ең көп қолданылатын пластиктер және 2016 жылы Еуропадағы жалпы пластмассаға деген қажеттіліктің 60% -дан астамын құрады [1]. Пластикалық қалдықтарды қайта өңдеу әлеуеті негізінен пайдаланылмаған күйінде қалып отыр, ғаламдық қайта өңдеу жылдамдығы өте төмен [3], ал пластмассаны қайта өңдеу жалпы пластмассаға деген қажеттіліктің тек 6% құрайды [4]. Қайта өңделген пластмассаның таза пластикамен салыстырғанда жоғары бағасы мен сапасының төмендігі олардың нарықта қолданылуын шектейді.

Алдағы 20 жыл ішінде ол екі есеге өседі деп күтілуде. Пластмассадан жасалған қаптамалар ең маңызды өнім болып табылады (пайдаланылатын барлық пластмассалардың 26% -ы), дегенмен, мысалы, құрылыс және автомобиль өнеркәсібінде қолданылатын пластмассалармен салыстырғанда қысқа мерзімге ие. Пластмасса өндірушілері мен трансформаторлар пластикалық орамнан алынатын артықшылықтарды атап көрсеткісі келеді; ол тікелей экономикалық пайда әкеліп қана қоймайды, сонымен қатар тамақ қалдықтары мен ластанудың алдын алуға көмектеседі. Одан әрі, орамның салмағын азайту арқылы жүк тасымалдауда қолданылатын отынды азайтуға болады. Бұл, әрине, маңызды, бірақ егер бұл пластмассалар қайтадан қолданылған болса да, олар белгілі бір уақытта қоқысқа айналады. Егер біз айналмалы экономиканың тізбегін жабатын болсақ, онда бұл қалдықтарды пластмассалардың өмірлік циклына қайта қосылатын ресурс ретінде қарау қажет (PlasticsEurope, 2018). [5]

Еуропалық Одақ (ЕО) және АҚШ Қоршаған ортаны қорғау агенттігі (ЕРА) ұсынған қалдықтарды басқару стратегиялары қалдықтардың алдын-алуға және азайтуға бағытталған, содан кейін қайта пайдалану, қайта өңдеу, энергияны қалпына келтіру және жою ең аз нұсқалар ретінде қарастырылған. Бұл стратегияларға енгізуге болатын нұсқалардың бірі - биологиялық ыдырайтын пластиктерді басқару, өйткені олар тозығы жеткен пластиктерге анаэробты ас қорыту және компосттау сияқты ашық емес қалдықтарды басқарудың жаңа нұсқаларын ашуы мүмкін. Заманауи ыдырамайтын пластмассалардың тағаммен ластануы мүмкіндікті болдырмайды немесе шектейді. [6,7]

Полиэтилентерефталат (ПЭТ) негізінен ПЭТ бөтелкелерін, ПЭТ фольгасын және тоқыма өндірісінде талшықтарды өндіру үшін қолданылады. ПЭТ - хош иісті терефтал қышқылы мен этиленгликольдің қайталанатын қондырғыларының полярлық, сызықтық полимері. ПЭТ мономері бис (2-гидроксетил) терефталат деп тағайындалады [8,9]. ПЭТ термопласт және ішінара кристалды. ПЭТ жылдық өндірісі 2017 жылы 30 миллион тоннадан асты.

Қазіргі уақытта ПЭТ-ті олигомерлерге немесе мономерлерге дейін ішінара ыдырату үшін бірнеше бактериялар мен саңырауқұлақтар сипатталған [10]. Барлық белгілі ПЭТ гидролазаларының айналым жылдамдығы салыстырмалы түрде төмен. Ең жақсы сипатталған мысалдар *Thermobifida* and *Thermomonospora* тұқымдастардан шыққан [11-13]

Ыдырауға қатысатын ферменттер (мысалы, ПЭТ гидролаза және танназа, МНЕТase) типтік серин гидролазалары, мысалы, кутиназалар, липазалар және карбоксилестеразалар. Бұл ферменттер типтік α / β -гидролаза қатпарына ие, ал каталитикалық триада серин, гистидин және аспартат қалдықтарынан тұрады [14]. Олар сондай-ақ цистеин қалдықтарынан туындайтын бірнеше дисульфидті байланыстарды қамтуы мүмкін, бұл термиялық тұрақтылықты және ПЭТ-пен спецификалық байланысын арттырады, бұл *Ideonella sakaiensis* 201-F6 [15] -дан алынған PETase мысалында көрсетілген.

Сондай-ақ, *I. sakaiensis* бактериясы үшін ПЭТ-ті негізгі энергия және көміртек көзі ретінде пайдалану сипатталған [15]. ПЭТ гидролазасынан басқа, осы уақытқа дейін ерекше болып көрінетін және моно (2-гидроксетил) терефтал қышқылын ыдыратуға қабілетті танналар тобына жоғары ұқсастықты көрсететін екінші ферменттің *I. sakaiensis* геномы кодтайды. ПЭТ гидролаза секрецияланған фермент ретінде аралық моно (2-гидроксетил) терефтал қышқылын (ТҚ) түзеді. ТҚ жасуша арқылы интерьерленеді және ТҚ (МНЕТase) арқылы гидролизденеді.

I. sakaiensis PETase үш өлшемді (3D) құрылымы жақында түсіндірілді [16]. Жалпы құрылым көбінесе кутиназалардың құрылымына ұқсайды. Остин және басқалар. қос мутация (S238F/W159H), бұл ферменттің белсенді орнын тарылтады және ақуызды *Thermobifida fusca* ферментіне ұқсайтын кутиназа тәрізді етеді, жақсартылған нұсқаға әкеледі. Функционалды тексерілген ПЭТ гидролазаларының көпшілігінде термиялық және сонымен қатар кинетикалық тұрақтылықты қамтамасыз ететін дисульфидті С терминалының байланысы бар [17,18]. Осы уақытқа дейін жалғыз ерекшелік - *Bacillus subtilis*-тен алынған пара-нитробензилестераза [26]. Дисульфидтің қосымша байланысын *I. sakaiensis* PETase, сондай-ақ Дансо және басқалар сипаттаған функционалды тексерілген ПЭТ гидролазаларының құрылымдық модельдерінен табуға болады. [19,20]

I. sakaiensis ферменттері ең жақсы зерттелген модельдер болса, басқа ферменттер мен организмдер ПЭТ-тің деградаторы ретінде анықталды. Қазіргі уақытта термобифида түрлерінен төртеуі, біреуі сахаромоноспорадан және біреуі термомоноспора филумынан ПЭТ-ке әсер ететіні белгілі. Бұл актинобактериялы ферменттер көбінесе Ca^{2+} тәуелді болады, әсіресе олардың жылу тұрақтылығы тұрғысынан және оларды ТҚ және БГЭТ (бис-гидроксиэтилтерефталат) гидролиздік өнімдері ішінара тежейді. Сондықтан осы шектеуден шығу үшін күш-жігер жұмсалды; бір тәсіл полиэфир гидролазаларының субстрат байланыстыру және каталитикалық қасиеттерін жақсарту үшін басқа ферменттермен үйлесімінде жатыр [21,22,23,24]

Актинобактериялық ПЭТ гидролазаларынан басқа, саңырауқұлақ кутиназалары ПЭТ субстраттарында да белсенділік көрсетті. Ең көрнекті мысалдар - Фузариум мен Хумикола филасының кутиназалары. Соңғысы сонымен қатар ТҚ және БГЭТ өнімдерінің тежелуін айналып өту үшін *Candida* антарктиданың CalB липазасымен бірге қолданылған [25,26]. CalB толығымен терефтал қышқылына айналған кезде, *Humicola*-дан алынған фермент реакцияның соңғы сатысында шектеліп, ТҚ аралық шоғырын жинады.

Жоғарыда көрсетілген белсенділікке негізделген тәсілдерді толықтыра отырып, жасырын Марков моделіне (ЖММ) негізделген потенциалды ПЭТ гидролазаларының болуы үшін қолданыстағы геном мен метагеномның мәліметтер базасын іздеу негізінде жасалды. Осы тәсілді қолдану арқылы бактериялық және археальды геномдар мен метагеномаларда > 800 потенциалды ПЭТ гидролаза анықталды және бірнеше ферменттер функционалды түрде тексерілді (мысалы, PET2, PET4, PET6 және PET12). Бұл тұжырымдар ПЭТ гидролазаны кодтайтын гендердің теңізде және құрлықта орналасқан метагеномаларда ғаламдық деңгейде таралғанын білдіреді [27,28].

Силико-геномды тау-кен әдісін қолдана отырып, *Pseudomonas pseudoalcaligenes* (PpCutA) -ден кутиназа және *Pseudomonas relagia*-дан (PpelaLip) болжамды липаза жалпы полиэфирлерге әсер ететін потенциалды ферменттер ретінде анықталды. PpCutA және PpelaLip рекомбинантты ферменттерін қолдана отырып, одан әрі жүргізілген эксперименттік жұмыстар полиэстерилентерефталаттың гидролизін қоса полиэфирлердің әр түрлі типтерінде екі ферменттердің гидролитикалық белсенділіктерін тексерді. Авторлар өз зерттеулерінде микробтық деградацияны тексеру үшін құрылымдық жағынан әртүрлі иондық фтал қышқылына негізделген орташа молекулалық салмағы 1770-тен 10000 г / мольге дейінгі полиэфирлерді және кристаллдылығы 1% -дан төмен поликристалды полиэфирлерді қолданды. Атап айтқанда, анықталған организм *Pseudomonas pertucinogena* деп белгіленген биотехнологиялық маңызды *Pseudomonas* тұқымдасының жаңа түріне жатады.[29,30]

Жоғарыда сипатталған метагеномнан алынған ПЭТ эстеразаларынан басқа, шет елдік әріптестер жақында метагеномалардың функционалды скринингі және таңдалған ферменттердің сипаттамасы туралы хабарлады. Олардың ішінде метагеномнан алынған полилактикалық қышқылды (PLA) және поликапролактонды, сондай-ақ бис (бензойлоксидил) -терефталатты гидролиздейтін MGS0156 және GEN0105 эстеразалары болды. MGS0156 үшін 1,95 ат деңгейіндегі 3D құрылымдық деректері қақпағы домені және жоғары гидрофобты белсенді учаскесі бар модификацияланған α / β -гидролаза қатпарын көрсетеді. MGS0156-ға ең жақын гомолог - бұл *Desulfovibrio fructosivorans* ферменті, 70% дәйектілік ұқсастығы.

Қысқаша айтқанда, PETases синтетикалық полимерлердің гидролизіне қатысты ферменттердің ең жақсы зерттелген.

Полиуретанды (PUR) әр түрлі полиэфир немесе полиэфирполиол көмегімен синтездеуге болады. PUR-карбаматпен байланысқан органикалық байланыстардың полимері. Хош иісті сақиналы құрылымдардың қосымша қосылуы полимердің физикалық және химиялық қасиеттеріне қосымша әсер етеді. PUR-бұл коррозияны болдырмау үшін көбік, оқшаулағыш материалдар, тоқыма жабындары мен бояулар жасау үшін кеңінен қолданылатын синтетикалық полимер [31]. Жылына 27 тоннадан астам өнім шығарады, ол жиі өндірілетін синтетикалық полимерлердің ішінде бесінші орында.

Бүгінгі күні эфир негізінде PUR-да әрекет ететін биоактивтілік туралы ғана айтылады. Биодegradацияға бактериялар немесе саңырауқұлақтар арқылы қол жеткізілді. PUR ыдырауға қабілетті бактерияларға келетін болсақ, Псевдомоналар тұқымынан шыққан грам-теріс бетапротеобактериялар көбінесе PUR белсенділігімен байланысты. PUR-да әрекет ететін алғашқы ферменттердің бірі *Pseudomonas chlorographis* липаза PucB болды. Бұл организм PucA деп белгіленген PUR-ға қатысты кем дегенде бір қосымша ферментті кодтайды. Екі фермент те липазалар; PUR бөлінетін гидролаздармен ыдырайды және ыдырау қатаң реттеледі. Тиісті гендер жеті ашық оқу шеңберін қамтитын үлкен гендік кластердің бөлігі болып табылады. *Pseudomonas protegens* PF-5 штаммы полиэфир полиуретанды дисперсиясын ыдырату үшін ұқсас механизмді қолданады. Алайда, бұл штаммда PUR деградациясы көміртегі катаболитін бақылау механизмдерімен қатаң реттелетіні және липаза, pucE және pucB гендерінің екеуі де PUR дисперсиясының өсуі үшін маңызды болып көрінетіні көрсетілген. Сол сияқты

Pseudomonas putida PUR-ны салыстырмалы түрде жоғары жылдамдықпен ыдырататыны туралы хабарланды.[32] Бактериялар қосылған коллоидты полиуретанды өсіру және тұтыну үшін 4 күн қажет болды. Тағы бір мысал - *Comamonas acidovorans* ТВ-35. Бұл штамм pur-белсенді ферментті шығарады, ол эстераза болып табылады және Puda деп аталды. Puda гидрофобты беттік байланыстыратын pur доменін және жеке каталитикалық доменді көрсетеді, ал оның беттік байланыстыратын домені PUR деградациясы үшін маңызды болып саналады. Puda массасы 62 кДа мономер ретінде әрекет етеді және оңтайлы температурада 45 ° С және оңтайлы рН 6,5 диэтиленгликоль мен адипин қышқылын шығарады.[33]

Бұл тұрғыда ферменттердің жиі кездесетін белсенділігі агар ыдыстарындағы тазарту аймақтарына негізделгенін атап өткен жөн. Алайда, бұл талдаулар толығымен сенімді емес. Мысалы, *Pseudomonas* spp-ден әртүрлі ферменттер және *Bacillus* spp. эстеразаның айтарлықтай белсенділігін көрсетті және коллоидты PUR бар шыныаяқтарды ішінара немесе тіпті толығымен тазартты. Алайда, тек *Pseudomonas* sp. липаза ядролық магниттік резонанс (ЯМР) және инфракызыл (ИК) диапазоны деректері негізінде қосылған полиуретанды едәуір ыдыратты. Сонымен қатар, кейбір *B. subtilis* және *Alicyclophillus* sp екендігі туралы нақты дәлелдер бар. изоляттар полиуретанды ыдыратуға қабілетті [34]

Қосымша зерттеулер *Fusarium solani* , *Candida ethanolica* және *Candida rugosa* PUR деструкторлары ретінде анықталды. *C. rugosa* үшін липаза PUR метаболизміне қатысатын негізгі фермент ретінде анықталған, ал *C. ethanolica* және *F. solani* үшін ферменттер әлі анықталған жоқ . Басқа тіркелген саңырауқұлақтар *cladosporium cladosporioides* кешеніне жатады , оның ішінде *Cladosporium pseudocladosporioides* , *Cladosporium tenuissimum*, *cladosporium asperulatum* және *cladosporium montecillanum*.. тағы үшеуі *Aspergillus fumigatus*, *Penicillium chrysogenum* және *Aspergillus flavus* ретінде анықталды. *A. flavus* жағдайында секрецияланған эстеразалар деградацияға жауап береді деп болжанады. Алайда, белгілі бір фермент әлі байқалған белсенділікпен байланысты емес. Осыған ұқсас зерттеу жақында *Aspergillus tubingensis* полиуретанды отарлайтындығы және полиуретаннан жасалған пленкалардың бетінде әрекет ететіндігі туралы хабарлады. Алайда, ешқандай фермент PUR белсенділігімен байланысты емес.[35]

Жоғарыда аталған барлық PUR-белсенді ферменттер мен организмдер эфирмен байланысқан PUR-да әрекет еткені қызық. Алайда, біздің білуімізше, полиуретанды эфирлерге әсер ететін ферменттер әлі сипатталған жоқ.

Полиэтилен (ПЭ) этиленнің ұзын тізбекті полимерлерінен тұрады және ол жоғары тығыздықты (HD-ПЭ) немесе төмен тығыздықтағы (LD-ПЭ) полиэтилен түрінде шығарылады. ПЭ этанды полимерлеу арқылы химиялық синтезделеді және өте өзгермелі, өйткені бүйірлік тізбектерді өндіріс процесіне байланысты алуға болады. Мұндай модификация негізінен кристаллдық пен молекулалық салмаққа әсер етеді. Полимер орауышта негізгі орау материалдарының бірі ретінде жиі қолданылады және жылына 100 миллион тоннадан астам ПЭ өндіріледі. [36]

Мүмкін болатын ПЭ деградациясы бактериялардың өте көп тұқымдасымен байланысты. Олардың қатарында *Pseudomonas*, *Ralstonia* және *Stenotrophomonas* тұқымдастарымен байланысқан грамтеріс түрлері болды, сонымен қатар көптеген грам-позитивті таксондар болды (мысалы, Родококк, Стафилококк, Стрептомицес, Бациллус және басқалары). Сонымен қатар, болжамды ПЭ деградациясымен байланысты саңырауқұлақ тұқымдары туралы хабарланды; Оларға *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Penicillium* және басқалары кірді . Сонымен қатар, бірнеше зерттеулер ПЭ-деградациялаушы микробтарды омыртқасыздардың ішектің күрделі микробиомаларымен байланыстырды [37,38]

Жоғарыда аталған ПЭ-деградациялаушы микроорганизмдер туралы зерттеулердің барлығында дерлік авторлар коммерциялық полимерлерді қолдана отырып полимерлердің ыдырауы туралы

хабарлады, олардың құрамында химиялық қоспалар болуы мүмкін, ал деградация салмақ жоғалтуды өлшеу және Фурье трансформациялық инфрақызыл спектроскопиясы арқылы анықталған (ФТИС). Салмақ жоғалту және беттік құрылымның өзгеруі көбінесе полимердің едәуір бөлігін құрайтын химиялық қоспалардың деградациясына байланысты болғандықтан, бұл зерттеулердің нәтижелерін неғұрлым жетілдірілген технологияларды қолдану арқылы тексеру қажет. Осы зерттеулердің ешқайсысы РЕ бұзылуына қатысатын биохимиялық механизмдер мен ферменттерді ашпады. Осы шеңберде жақында жарияланған басылым Пенициллийден алынған лакворды РЕ бұзылуына ықтимал қатысы бар деп анықтады [39]. Өкінішке орай, егжей-тегжейлі биохимиялық сипаттама орындалмады, ақуыздың немесе тиісті геннің реттілігі сақталмады.

Жақында омыртқасыздар әртүрлі пластмассаларды бұзуы мүмкін деп хабарланды[36,37]. Бұл зерттеулер жәндіктердің пластикті механикалық тегістеу және тегістеу жұмыстарын жүргізетінін көрсеткенімен, әртүрлі жәндіктермен байланысты микробиомалардың синтетикалық полимерлерді шынымен жоя алатындығы және қаншалықты дәрежеде екендігі сыни тұрғыдан талқыланды. Осы зерттеулердің бірінде Ян және оның әріптестері *Tenebrio molitor* L. (ұн құрттары) полистирол көбігін сіңіретіні туралы нақты дәлелдер келтірді. Личинкалар полистирол көбігін жеген кезде бір айдан астам уақыт өмір сүрді. 16 күн ішінде сіңірілген көміртегі полистиролының шамамен 50% - ы CO₂-ге айналды., ал көбік полистиролдың қалдықтары нәжістен табылды. А - 13 С немесе β - 13 С таңбаланған полистиролды қолдану арқылы таңбалау бойынша зерттеулер көміртегі қосылысы липидтер жасау үшін жақсырақ қолданылған деп болжайды. Жәндіктердің пластмассаны сіңіруі туралы ең алғашқы есептердің бірі құрттардан шыққан. 2017 жылы испан тобы балауызды көбелектің личинкалары (*Galleria mellonella*) арқылы тез биодеградация туралы хабарлады. Бұл жұмыстың авторлары балауыз көбелегінің личинкалары полиэтилен пленкаларында айтарлықтай жылдамдықпен тесіктер жасағандығы туралы дәлелдер келтірді. Бұл зерттеудің нәтижелері кейінірек сыни тұрғыдан талқыланды, өйткені этиленгликольдің болуы, сондай-ақ ФТИС әдісін дұрыс қолдану дереу тексерілмеді. Қытай мен АҚШ-тың зерттеу тобының одан әрі жұмысы *Bacillus* sp анықтауға мүмкіндік берді. ур1 штаммы полиэтиленді ыдырататын бактерия ретінде үнді ұн құрттарындағы ПЭ деградациясына жауап береді. Сол топтың осыған байланысты зерттеуі *Citrobacter* және *Kosakonia* ұрпақтарына жататын бактерияларды *Tenebrio molitor* ішектеріндегі ПЭ және PS негізгі деструкторлары ретінде анықтады.

Осылайша, үлкен пластикалық бөлшектерді кішігірім бөліктерге ұсақтау шешім ұсына алады, өйткені ол бетінің ауданын ұлғайтады және осылайша микроорганизмдерді беттерге жақсы жабыстыруға мүмкіндік береді.

Синтетикалық полимерлерге әсер ететін белгілі ферменттер мен микробтардың әртүрлілігі әлі де шектеулі. Сондықтан болашақ жұмыс ең көп таралған полимерлерге әсер ететін ағзаларды анықтауға бағытталуы керек. Негізгі қиындық-жоғары молекулалық және жоғары беріктігі бар полимерлер мен олардың кристалды құрылымдарының бастапқы бұзылуы. Сонымен қатар, қоршаған ортадағы пластикалық ластаушы тауашалардың тозуына мүмкіндік беретін процестерге ферменттерді енгізу микробиологтардың болашақ ұрпақтары үшін проблема болып табылады. Қазіргі заманғы өсіру технологиялары көптеген пластмассалар үшін жоғары белсенді ферменттерді анықтауға әлі әкелмегендіктен, өсірілмейтін микроорганизмдердің (яғни, ғаламдық метагеномдар) және қара материя ақуыздары деп аталатындар осындай биокатализаторларды анықтаудың перспективалы көзі болып табылады. Осылайша, метагеномдық мәліметтер жиынтығын алу үшін ақылды іздеу алгоритмдерін одан әрі дамыту, әрине, маңызды міндет болып табылады. Сонымен қатар, жоғары молекулалық полимерлік белсенді ферменттерді анықтау үшін сенімді функционалды анализдерді орнату маңызды.

Коммерциялық қол жетімді полимерлер мен олардың пленкалары субстрат ретінде жиі қолданылатындықтан, олардың құрамында қоспалар, пластификаторлар және басқа да

биологиялық ыдырайтын қоспалар (мысалы, фталаттар) бар, олар нақты жақтауға қарағанда оңай бұзылады. Демек, бұл нәтижелерге әсер етеді және көбінесе жалған позитивтерді анықтауға әкеледі. Осылайша, пластиктің микробтық деградациясын талдаумен байланысты жалпы әдіснаманы стандарттау және оңтайландыру қажет.

Сол сияқты микробтардағы целлюлосомаларға ұқсас құрылымдарды (мысалы, "пластосомалар") бұзылмаған және кристалды талшықтарға шабуыл жасау үшін жасау сөзсіз құнды жоба болады. Осылайша, тоқыма өнеркәсібі үшін жоғары белсенді ферменттердің қарапайым дамуы жыл сайынғы пластикалық ластануды едәуір төмендетуі мүмкін және қысқа мерзімді мақсаттардың бірі болуы мүмкін.

Сонымен қатар, пластикалық қалдықтардан құнды қосылыстар шығаратын микроорганизмдерді құру үшін синтетикалық биологияны қолдану болашақ міндет болып табылады және пластмассаны тиімді циркуляциялық қолдануға ықпал етеді. Ыдырағаннан кейін пайда болған мономерлер мен олигомерлерді қосымша құнды өнімдерді немесе тіпті жаңа (биологиялық ыдырайтын) полимерлерді жасау үшін пайдалануға болады.

Пластикалық қалдықтар мәселесін шешу адамның мінез-құлқындағы үлкен өзгерісті қажет етеді, бұл технологиялық шешімдермен бірге пластикалық қалдықтар мәселесін шеше алады, бірақ соңғысы біріншісіз тиімсіз болады. Қоғамның қалдықтарды тастауға деген көзқарасы өзгеруі керек және біз биологиялық ыдырайтын пластмассаны бізді қоршаған орта үшін жауапкершіліктен босататын технологиялық шешім ретінде қарастырмауымыз керек. Көптеген биологиялық ыдырайтын Пластмассалардың табиғатта ұзақ өмір сүруінің болжамды уақыты бұл пластмассалар қоршаған ортаға шығарылмай, қоғамның бақылауында болуы керек екенін айқын көрсетеді. Осылайша, биологиялық ыдырайтын пластмассалар қоғамға "лақтыруды жалғастыру" шешімін ұсынбайды, керісінше олар адамзатқа биологиялық негіздегі тыңайтқыштар (компост) арқылы құндылық беретін пластикалық қалдықтарды жоюдың жаңа нұсқаларын ұсына алады, белсенді ферменттер алу және оларды нақты биополимерлер өндірісіне енгізу - бұл біздің пластиктің Ғаламдық проблемасын едәуір төмендететін өте пайдалы зерттеу міндеті.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі:

1. Geyer R, Jambeck JR, Law KL. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv* 3:e1700782. doi:10.1126/sciadv.1700782. [[PMC free article](#)][[PubMed](#)][[CrossRef](#)][[Google Scholar](#)]
2. Из обзора «Ситуация с пластиком в Казахстане, странах ВЕКЦА (Восточная Европа, Кавказ, Центральная Азия) и по миру: законодательство, производство, потребление и утилизация» Подготовлен Аналитическим экологическим агентством Greenwomen (Алматы, Казахстан) в феврале 2020 г.
3. PlasticsEurope. 2018. PlasticsEurope, plastics—the facts 2018: an analysis of European plastics production, demand and waste data. PlasticsEurope, Brussels, Belgium. [[Google Scholar](#)]
4. 3. Ellen MacArthur Foundation. 2017. The new plastics economy: rethinking the future of plastics and catalysing action. Ellen MacArthur Foundation, Cowes, United Kingdom. [[Google Scholar](#)]
5. System Initiative on Environment and Natural Resource Security The New Plastics Economy: Catalysing action. World Economic Forum 2016 [[Google Scholar](#)]
6. EC GREEN PAPER: on a european strategy on plastic waste in the environment. 2013
7. EPA U, Year F. EPA Strategic Plan. 2014
8. Hanke G. Marine beach litter in Europe – Top items: Joint Research Centre. European Commission 2016 [[Google Scholar](#)]
9. Rochman CM, Browne MA, Halpern BS, Hentschel BT, Hoh E et al. Policy: Classify plastic waste as hazardous. *Nature* 2013;494:169–171 [[CrossRef](#)][[PubMed](#)][[Google Scholar](#)]

10. Rochman CM, Hoh E, Kurobe T, Teh SJ. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Sci Rep* 2013;3:3263 [[CrossRef](#)][[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
11. Acero EH, Ribitsch D, Steinkellner G, Gruber K, Greimel K, Eiteljoerg I, Trotscha E, Wei R, Zimmermann W, Zinn M, Cavaco-Paulo A, Freddi G, Schwab H, Guebitz G. 2011. Enzymatic surface hydrolysis of PET: effect of structural diversity on kinetic properties of cutinases from *Thermobifida*. *Macromolecules* 44:4632–4640. doi:10.1021/ma200949p. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
12. Kleeberg I, Hetz C, Kroppenstedt RM, Muller RJ, Deckwer WD. 1998. Biodegradation of aliphatic-aromatic copolyesters by *Thermomonospora fusca* and other thermophilic compost isolates. *Appl Environ Microbiol* 64:1731–1735. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
13. Hu X, Thumarat U, Zhang X, Tang M, Kawai F. 2010. Diversity of polyester-degrading bacteria in compost and molecular analysis of a thermoactive esterase from *Thermobifida alba* AHK119. *Appl Microbiol Biotechnol* 87:771–779. doi:10.1007/s00253-010-2555-x. [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
14. Wei R, Oeser T, Then J, Kuhn N, Barth M, Schmidt J, Zimmermann W. 2014. Functional characterization and structural modeling of synthetic polyester-degrading hydrolases from *Thermomonospora curvata*. *AMB Express* 4:44. doi:10.1186/s13568-014-0044-9. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
15. Wei R, Oeser T, Zimmermann W. 2014. Synthetic polyester-hydrolyzing enzymes from thermophilic actinomycetes. *Adv Appl Microbiol* 89:267–305. doi:10.1016/B978-0-12-800259-9.00007-X. [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
16. Chen S, Tong X, Woodard RW, Du GC, Wu J, Chen J. 2008. Identification and characterization of bacterial cutinase. *J Biol Chem* 283:25854–25862. doi:10.1074/jbc.M800848200. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
17. Zimmermann W, Billig S. 2011. Enzymes for the biofunctionalization of poly(ethylene terephthalate). *Adv Biochem Eng Biotechnol* 125:97–120. doi:10.1007/10_2010_87. [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
18. Ribitsch D, Acero EH, Greimel K, Dellacher A, Zitzenbacher S, Marold A, Rodriguez RD, Steinkellner G, Gruber K, Schwab H, Guebitz GM. 2012. A new esterase from *Thermobifida halotolerans* hydrolyses polyethylene terephthalate (PET) and polylactic acid (PLA). *Polymers* 4:617–629. doi:10.3390/polym4010617. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
19. Kawai F, Oda M, Tamashiro T, Waku T, Tanaka N, Yamamoto M, Mizushima H, Miyakawa T, Tanokura M. 2014. A novel Ca²⁺-activated, thermostabilized polyesterase capable of hydrolyzing polyethylene terephthalate from
20. *Saccharomonospora viridis* AHK190. *Appl Microbiol Biotechnol* 98:10053–10064. doi:10.1007/s00253-014-5860-y. [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
21. Ollis DL, Cheah E, Cygler M, Dijkstra B, Frolow F, Franken SM, Harel M, Remington SJ, Silman I, Schrag J. 1992. The alpha/beta hydrolase fold. *Protein Eng* 5:197–211. doi:10.1093/protein/5.3.197. [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
22. Yoshida S, Hiraga K, Takehana T, Taniguchi I, Yamaji H, Maeda Y, Toyohara K, Miyamoto K, Kimura Y, Oda K. 2016. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351:1196–1199. doi:10.1126/science.aad6359. [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
23. Austin HP, Allen MD, Donohoe BS, Rorrer NA, Kearns FL, Silveira RL, Pollard BC, Dominick G, Duman R, El Omari K, Mykhaylyk V, Wagner A, Michener WE, Amore A, Skaf MS, Crowley MF, Thorne AW, Johnson CW, Woodcock HL, McGeehan JE, Beckham GT. 2018. Characterization and engineering of a plastic-

24. degrading aromatic polyesterase. Proc Natl Acad Sci U S A 115:E4350–E4357. doi:10.1073/pnas.1718804115. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
25. Roth C, Wei R, Oeser T, Then J, Follner C, Zimmermann W, Strater N. 2014. Structural and functional studies on a thermostable polyethylene terephthalate degrading hydrolase from *Thermobifida fusca*. Appl Microbiol Biotechnol 98:7815–7823. doi:10.1007/s00253-014-5672-0. [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
26. Sulaiman S, You DJ, Kanaya E, Koga Y, Kanaya S. 2014. Crystal structure and thermodynamic and kinetic stability of metagenome-derived LC-cutinase. Biochemistry 53:1858–1869. doi:10.1021/bi401561p. [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
27. Then J, Wei R, Oeser T, Gerdt A, Schmidt J, Barth M, Zimmermann W. 2016. A disulfide bridge in the calcium binding site of a polyester hydrolase increases its thermal stability and activity against polyethylene terephthalate. FEBS Open Bio 6:425–432. doi:10.1002/2211-5463.12053. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
28. Ribitsch D, Heumann S, Trotscha E, Acero EH, Greimel K, Leber R, Birner-Gruenberger R, Deller S, Eiteljoerg I, Remler P, Weber T, Siegert P, Maurer KH, Donelli I, Freddi G, Schwab H, Guebitz GM. 2011. Hydrolysis of polyethyleneterephthalate by *p*-nitrobenzylesterase from *Bacillus subtilis*. Biotechnol Progress 27:951–960. doi:10.1002/btpr.610. [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
29. Danso D, Schmeisser C, Chow J, Zimmermann W, Wei R, Leggewie C, Li X, Hazen T, Streit WR. 2018. New insights into the function and global distribution of polyethylene terephthalate (PET)-degrading bacteria and enzymes in marine and terrestrial metagenomes. Appl Environ Microbiol 84:e02773-17. doi:10.1128/AEM.02773-17. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
30. Palm GJ, Reisky L, Böttcher D, Müller H, Michels EAP, Walczak MC, Berndt L, Weiss MS, Bornscheuer UT, Weber G. 2019. Structure of the plastic-degrading Ideonella sakaiensis MHETase bound to a substrate. Nat Commun 10:1717. doi:10.1038/s41467-019-09326-3. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
31. Barth M, Oeser T, Wei R, Then J, Schmidt J, Zimmermann W. 2015. Effect of hydrolysis products on the enzymatic degradation of polyethylene terephthalate nanoparticles by a polyester hydrolase from *Thermobifida fusca*. Biochem Eng J 93:222–228. doi:10.1016/j.bej.2014.10.012. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
32. Peng YH, Shih YH, Lai YC, Liu YZ, Liu YT, Lin NC. 2014. Degradation of polyurethane by bacterium isolated from soil and assessment of polyurethanolytic activity of a *Pseudomonas putida* strain. Environ Sci Pollut Res Int 21:9529–9537. doi:10.1007/s11356-014-2647-8. [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
33. Akutsu Y, Nakajima-Kambe T, Nomura N, Nakahara T. 1998. Purification and properties of a polyester polyurethane-degrading enzyme from *Comamonas acidovorans* TB-35. Appl Environ Microbiol 64:62–67. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
34. Shigeno-Akutsu Y, Nakajima-Kambe T, Nomura N, Nakahara T. 1999. Purification and properties of culture-broth-secreted esterase from the polyurethane degrader *Comamonas acidovorans* TB-35. J Biosci Bioeng 88:484–487. doi:10.1016/S1389-1723(00)87663-X. [[PubMed](#)] [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
35. Biffinger JC, Barlow DE, Cockrell AL, Cusick KD, Hervey WJ, Fitzgerald LA, Nadeau LJ, Hung CS, Crookes-Goodson WJ, Russell JN. 2015. The applicability of Impranil® DLN for gauging the biodegradation of polyurethanes. Polym Degradation Stab 120:178–185. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2015.06.020. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
36. Shah Z, Krumholz L, Aktas DF, Hasan F, Khatkhat M, Shah AA. 2013. Degradation of polyester polyurethane by a newly isolated soil bacterium, *Bacillus subtilis* strain MZA-75.

- Biodegradation 24:865–877. doi:10.1007/s10532-013-9634-5. [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
37. Seymour RB, Kauffman GB. 1992. Polyurethanes: a class of modern versatile materials. *J Chem Educ* 69:909. doi:10.1021/ed069p909. [CrossRef] [Google Scholar]
 38. Darby RT, Kaplan AM. 1968. Fungal susceptibility of polyurethanes. *Appl Microbiol* 16:900–905. [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar]
 39. Sowmya HV, Ramalingappa B, Krishnappa M, Thippeswamy B. 2015. Degradation of polyethylene by *Penicillium simplicissimum* isolated from local dumpsite of Shivamogga district. *Environ Dev Sustain* 17:731–745. doi:10.1007/s10668-014-9571-4. [CrossRef] [Google Scholar]