

ЭКОНОМИКА. ЖАЛПЫ БІЛІМ БЕРУ, ӘЛЕУМЕТТІК-ГУМАНИТАРЛЫҚ ЖӘНЕ ІРГЕЛІ ПӘНДЕР

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/084>

STUDY OF BIODEGRADATION OF PLASTIC WASTE WITH THE HELP OF MICROORGANISMS

Zhantenova A.S.

*Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan
Corresponding author e-mail: a.zhantenova@tttu.edu.kz*

Author information:

Zhantenova A.S. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: a.zhantenova@tttu.edu.kz

Abstract. This study is devoted to the study of the biodegradability of plastic waste by microorganisms. The harm that plastic causes to the environment and its long-term preservation is one of the environmental problems. In the course of the study, the types of microorganisms capable of decomposing plastic were identified and their effectiveness was evaluated. The results showed that microorganisms under certain conditions can change the structure of plastic and accelerate the process of its decomposition. This study aims to contribute to the development of environmentally friendly solutions.

Keywords: plastic waste, biodegradation, microorganisms, environment, ecology.

МИКРООРГАНИЗМДЕР КӨМЕГІМЕН ПЛАСТИКАЛЫҚ ҚАЛДЫҚТАРДЫҢ БИОДЕГРАДАЦИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

Жантенова А.С.

*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан
* Автор-корреспондент e-mail: a.zhantenova@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Жантенова А.С. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: a.zhantenova@tttu.edu.kz

Аңдатпа. Бұл зерттеу пластикалық қалдықтардың микроорганизмдер арқылы биологиялық ыдырауын зерттеуге арналған. Пластиктің қоршаған ортаға тигізетін зияны және оның ұзақ уақыт сақталуы экологиялық мәселелердің бірі болып табылады. Зерттеу барысында пластикті ыдыратуға қабілетті микроорганизмдердің түрлері анықталып, олардың тиімділігі бағаланды. Нәтижелер микроорганизмдердің белгілі бір жағдайларда пластиктің құрылымын өзгерте алатынын және оның ыдырау процесін жеделдететінін көрсетті. Бұл зерттеу экологиялық таза шешімдерді дамытуға үлес қосуға бағытталған.

Түйін сөздер: Пластикалық қалдықтар, биodeградация, микроорганизмдер, қоршаған орта, экология.

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОДЕГРАДАЦИИ ПЛАСТИКОВЫХ ОТХОДОВ С ПОМОЩЬЮ МИКРООРГАНИЗМОВ

Жантенова А.С.

*Карагандинский Индустриальный Университет, Темиртау, Казахстан
* Автор-корреспондент e-mail: a.zhantenova@tttu.edu.kz*

Информация об авторах:

Жантенова А.С. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: a.zhantenova@tttu.edu.kz

Аннотация. Это исследование было посвящено изучению биологического разложения пластиковых отходов микроорганизмами. Вред пластика для окружающей среды и его длительное хранение являются одними из экологических проблем. В ходе исследования были выявлены виды микроорганизмов, способных разрушать пластик, и оценена их эффективность. Результаты показали, что микроорганизмы могут изменять структуру пластика при определенных условиях и ускорять процесс его разложения. Это исследование направлено на то, чтобы внести свой вклад в разработку экологически чистых решений.

Ключевые слова: пластиковые отходы, биodeградация, микроорганизмы, окружающая среда, экология.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Пластикалық қалдықтардың биологиялық ыдырау процесіне микроорганизмдердің әсері зерттеліп, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger* және *Penicillium chrysogenum* микроорганизмдерінің полиэтилен мен полипропиленнің құрылымын өзгертуге және олардың ыдырау процесін жеделдетуге қабілетті екендігі ғылыми тұрғыдан негізделді. Сонымен қатар, температура мен ылғалдылықтың оңтайлы параметрлері (30°C және 70% салыстырмалы ылғалдылық) микроорганизмдердің ферменттік белсенділігін арттырып, пластиктің биodeградация тиімділігін жоғарылататыны анықталды. Бактериялар мен саңырауқұлақтардың консорциумын қолдану жеке штамдарға қарағанда жоғары нәтижелер көрсетіп, пластикалық қалдықтарды экологиялық қауіпсіз биотехнологиялық әдістермен өңдеудің перспективалы бағыты екені дәлелденді.

КІРІСПЕ

Пластикалық қалдықтар қазіргі заманның ең өзекті экологиялық проблемаларының бірі болып табылады. Жыл сайын миллиондаған тонна пластик өндіріледі, бірақ оның көп бөлігі қайта өңделмей, қоршаған ортада жинақталады. Пластиктің табиғи жолмен ыдырауы жүздеген жылдарды алуы мүмкін, бұл топырақ пен су экожүйелеріне кері әсер етеді.

Соңғы жылдары ғалымдар пластикті биологиялық жолмен ыдырату үшін микроорганизмдерді пайдалану мүмкіндігін зерттеп келеді. Бұл әдіс экологиялық таза және экономикалық тиімді шешім ретінде қарастырылады. Осы зерттеуде пластикті ыдыратуға қабілетті микроорганизмдердің әлеуеті және олардың тиімділігін арттыру жолдары қарастырылды.

Пластик – синтетикалық полимерлерден жасалған материал, ол өзінің беріктігі мен арзандығы арқасында күнделікті өмірде кеңінен қолданылады. Дегенмен, осы артықшылықтары оның қоршаған ортаға тигізетін зиянын күшейтеді. Дүниежүзілік экономикалық форумның мәліметтері бойынша, 2050 жылға қарай мұхиттардағы пластик мөлшері балықтардың

салмағынан асып түсуі мүмкін. Бұл жағдай экожүйелердің тепе-теңдігін бұзып, биоалуантүрлілікке қауіп төндіреді. Пластиктің микробөлшектерге ыдырауы тіпті қауіптірек, себебі олар су мен топырақ арқылы азық-түлік тізбегіне еніп, адам денсаулығына да әсер етуі мүмкін.

Қазіргі уақытта пластикалық қалдықтарды басқарудың негізгі әдістері – қайта өңдеу, өртеу және полигондарға көму. Бірақ бұл әдістердің әрқайсысының кемшіліктері бар. Қайта өңдеу процесі қымбат және энергияны көп қажет етеді, ал өртеу кезінде улы газдар бөлінеді. Полигондарда жинақталған пластик болса, топырақтың құнарлылығын төмендетеді және жер асты суларын ластайды. Осыған байланысты, ғалымдар пластикті табиғи жолмен ыдыратудың балама әдістерін іздеуде. Микроорганизмдерді қолдану осы бағыттағы перспективалы шешімдердің бірі болып саналады.

Микроорганизмдер – бактериялар, саңырауқұлақтар және басқа да микроскопиялық тірі ағзалар – табиғатта органикалық заттарды ыдыратуда маңызды рөл атқарады. Соңғы зерттеулер кейбір микроорганизмдердің синтетикалық полимерлерді де ыдыратуға қабілетті екенін көрсетті. Мысалы, *Ideonella sakaiensis* бактериясы полиэтилентерефталатты (PET) ыдыратып, оны қарапайым қосылыстарға айналдыра алатыны анықталған. Бұл жаңалық пластикалық қалдықтарды басқаруда биотехнологиялық әдістердің болашағы бар екенін дәлелдейді. Дегенмен, мұндай микроорганизмдердің тиімділігі мен оларды кең масштабта қолдану мүмкіндігі әлі толық зерттелмеген. Осы зерттеудің мақсаты – пластиктің кең таралған түрлерін, атап айтқанда полиэтилен (PE) және полипропиленді (PP) ыдыратуға қабілетті микроорганизмдерді анықтау және олардың тиімділігін бағалау. Сонымен қатар, биodeградация процесін жеделдету үшін оңтайлы жағдайларды анықтау және осы әдістің экологиялық әсерін талдау көзделді. Зерттеу нәтижелері пластикалық ластануды азайтуға және тұрақты дамуға үлес қосуға бағытталған.

Пластиктің биodeградациясы дегеніміз – оның микроорганизмдердің әсерінен қарапайым

молекулаларға, мысалы, көмірқышқыл газына, суға және биомассаға айналу процесі. Бұл процесс пластиктің химиялық құрылымына, микроорганизмдердің түріне және қоршаған орта жағдайларына байланысты өзгереді. Пластиктің көптеген түрлері, әсіресе полиолефиндер, гидрофобты және кристалды құрылымына байланысты ыдырауға төзімді. Сондықтан, микроорганизмдердің ферменттік белсенділігін арттыру және олардың пластикпен әрекеттесуін жеңілдету маңызды мәселе болып табылады.

Зерттеу барысында микроорганизмдердің пластикті ыдыратудағы рөлі ғана емес, сонымен қатар олардың экологиялық қауіпсіздігі де ескерілді. Мысалы, генетикалық модификацияланған микроорганизмдер тиімдірек болуы мүмкін, бірақ олардың табиғи экожүйелерге әсері мұқият бағалануды қажет етеді. Сондай-ақ, биодеградация нәтижесінде пайда болатын қосылыстардың қоршаған ортаға зиянсыз екеніне көз жеткізу керек.

Осы зерттеуде қолданылған әдістер мен алынған нәтижелер пластикалық қалдықтарды басқарудың жаңа стратегияларын әзірлеуге негіз бола алады. Микроорганизмдерді қолдану тек экологиялық мәселелерді шешуге ғана емес, сонымен қатар биотехнология саласын дамытуға да ықпал етеді. Зерттеу барысында пластиктің әртүрлі түрлеріне микроорганизмдердің әсері салыстырылып, олардың тиімділігін арттыру жолдары ұсынылды. Бұл жұмыс болашақта пластикалық ластануды азайтуға бағытталған ауқымды жобалардың бастамасы болуы мүмкін.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі ғылыми зерттеулерде пластикалық қалдықтардың биодеградациясы және оларды ыдыратуға қабілетті жекелеген микроорганизмдердің қасиеттері кеңінен қарастырылғанымен, полиэтилен мен полипропилен сияқты кең таралған пластик түрлерінің әртүрлі микроорганизмдер әсерінен ыдырау тиімділігін кешенді түрде салыстырмалы бағалау жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сонымен қатар, микроорганизмдердің жеке және консорциум түрінде қолданылуының тиімділігі, сондай-ақ температура мен ылғалдылық сияқты қоршаған орта факторларының биодеградация процесіне әсерін оңтайлы үйлестіру мәселелері толық ғылыми негізделмеген. Сондықтан аталған зерттеу пластикалық қалдықтарды экологиялық қауіпсіз биотехнологиялық әдістермен өңдеудің тиімді жолдарын айқындауға және микроорганизмдер көмегімен биодеградация процесін жетілдіруге бағытталған.

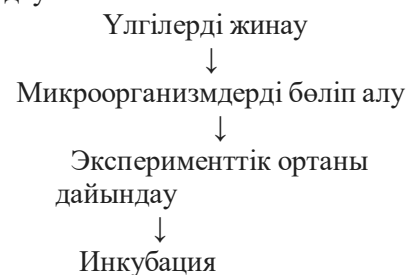
Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы пластикалық қалдықтардың биодеградациясы процесінде *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger* және *Penicillium chrysogenum* микроорганизмдерінің полиэтилен мен полипропиленге әсеріне кешенді салыстырмалы талдау жүргізілуінде. Зерттеу нәтижесінде жеке микроорганизмдер мен олардың консорциумын қолданудың тиімділігі анықталып, пластиктің биодеградациясына температура мен ылғалдылықтың әсері ғылыми негізделді. Сонымен қатар, полиэтиленнің полипропиленге қарағанда микроорганизмдер әсеріне бейімділігі жоғары екені және бактериялар мен саңырауқұлақтардың бірлескен қолданылуы биодеградация тиімділігін арттыратыны дәлелденді. Алынған нәтижелер пластикалық қалдықтарды экологиялық қауіпсіз биотехнологиялық әдістермен өңдеудің тиімді жолдарын жетілдіруге ғылыми негіз қалайды.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Зерттеу лабораториялық жағдайда жүргізілді. Алдымен пластикті ыдыратуға қабілетті микроорганизмдерді анықтау үшін топырақ және қалдықтардан алынған үлгілер талданды. Зерттеуде полиэтилен (PE) және полипропилен (PP) сияқты кең таралған пластик түрлері қолданылды. Микроорганизмдердің өсуі мен белсенділігін бақылау үшін температура (25-35°C), ылғалдылық және қоректік орта сияқты параметрлер реттелді.

Пластиктің ыдырау дәрежесі салмақ жоғалту әдісімен және электронды микроскопия арқылы бағаланды. Зерттеу процесі 12 аптаға созылды.

Зерттеудің негізгі мақсаты – пластиктің биологиялық ыдырау процесін зерттеу және микроорганизмдердің осы процестегі тиімділігін бағалау болды. Лабораториялық жағдайлар табиғи ортаны модельдеуге мүмкіндік берді, бірақ сонымен қатар бақыланатын параметрлер арқылы дәл нәтижелер алуға жағдай жасады. Зерттеу процесі бірнеше кезеңге бөлінді: үлгілерді жинау, микроорганизмдерді бөліп алу және идентификациялау, эксперименттік жағдайларды орнату, пластиктің ыдырауын бақылау және нәтижелерді талдау.



↓
Ыдырауды бағалау

Зерттеу үшін микроорганизмдер әртүрлі экологиялық орталардан алынды.

Топырақ үлгілері пластикалық қалдықтарға байланысты ластанған аймақтардан, атап айтқанда қоқыс полигондары мен өнеркәсіптік аумақтардан жиналды. Бұл аймақтар пластикті ыдыратуға бейімделген микроорганизмдердің болуы мүмкін екендігіне байланысты таңдалды. Сонымен қатар, қалдық сулардан және компостталған органикалық материалдардан да үлгілер алынды. Барлығы 50 түрлі үлгі жиналып, олар лабораторияға стерильді контейнерлерде

жеткізілді.

Пластикалық материалдар ретінде полиэтилен (PE) және полипропилен (PP) таңдалды, себебі бұл полимерлер күнделікті өмірде ең көп қолданылатын және қоршаған ортада ең көп жинақталатын пластик түрлері болып табылады. Полиэтилен – қаптамалар мен пакеттерде жиі кездесетін материал, ал полипропилен – контейнерлер мен құрылыс материалдарында қолданылады. Зерттеу үшін пластик үлгілері 2x2 см өлшемді кішкентай бөліктерге кесіліп, олардың бастапқы салмағы жоғары дәлдіктегі аналитикалық таразы арқылы өлшенді. Пластик бөліктері алдын ала стерилизациядан өткізіліп, сыртқы микробтық ластанудан тазартылды.

Кесте – 1. Эксперименттік параметрлер

Параметр	Эксперименттік топ 1	Эксперименттік топ 2	Бақылау тобы
Температура (°C)	25	35	30
Ылғалдылық (%)	60	80	70
Қоректік орта	Глюкоза + пептон	Минералды тұздар	Жоқ

Жиналған үлгілерден микроорганизмдерді бөліп алу үшін классикалық микробиологиялық әдістер қолданылды. Топырақ және қалдық үлгілері физиологиялық ерітіндіге (0,9% NaCl) енгізіліп, сериалды сұйылту әдісі арқылы өңделді. Осыдан кейін үлгілер агар қоректік ортасына (LB агар және PDA) егіліп, 28°C температурада 48-72 сағат бойы инкубацияланды. Нәтижесінде өскен колониялар морфологиялық белгілері бойынша топтастырылды.

Микроорганизмдерді идентификациялау үшін 16S рРНҚ гендік секвенирлеу және ITS

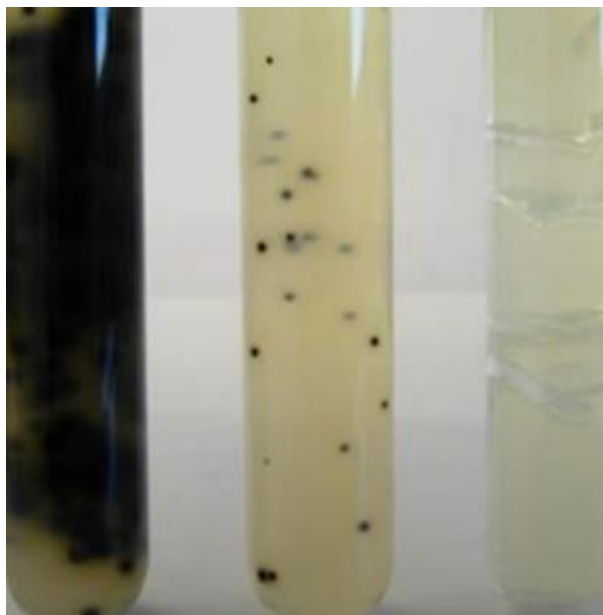
аймағын талдау сияқты молекулалық биология әдістері пайдаланылды. Бұл әдістер бактериялар мен саңырауқұлақтардың түрлерін дәл анықтауға мүмкіндік берді. Зерттеу барысында *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger* және *Penicillium chrysogenum* сияқты микроорганизмдер басым болып шықты. Бұл түрлердің пластикті ыдыратуға қабілеттілігі бұрынғы зерттеулерде де расталған, сондықтан олар экспериментте негізгі зерттеу объектілері ретінде таңдалды.

Кесте – 2. Микроорганизмдерді идентификациялау кестесі

Микроорганизм	Топ	Идентификация әдісі
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Бактерия	16S рРНҚ секвенирлеу
<i>Aspergillus niger</i>	Саңырауқұлақ	ITS аймағын талдау
<i>Bacillus subtilis</i>	Бактерия	16S рРНҚ секвенирлеу

Микроорганизмдердің пластикті ыдыратудағы белсенділігін бағалау үшін арнайы инкубациялық камералар қолданылды. Эксперименттік ортада температура, ылғалдылық және қоректік заттардың құрамы сияқты параметрлер мұқият реттелді. Температура диапазоны 25-35°C аралығында таңдалды, себебі бұл микроорганизмдердің көпшілігінің оңтайлы өсу температурасы осы шекте орналасқан. Ылғалдылық деңгейі 60-80% аралығында ұсталды, бұл микробтық белсенділікті қолдау үшін маңызды болды.

Қоректік орта ретінде глюкоза, пептон және минералды тұздар қоспасы қолданылды. Бұл микроорганизмдердің өсуін қамтамасыз етіп, олардың пластикті ыдыратуға бағытталған етабликалық процестерін ынталандырды. Эксперименттік топтар пластик бөліктерімен бірге қоректік ортаға орналастырылды, ал бақылау топтары микроорганизмдерсіз немесе пластиксіз дайындалды. Бұл салыстырмалы талдау жүргізуге және микроорганизмдердің пластике тікелей әсерін анықтауға мүмкіндік берді.



Сурет – 1. Микроорганизмдерді өсіру ортасы зертханада

Зерттеу процесі 12 аптаға созылды, бұл уақыт микроорганизмдердің пластикке әсерін бағалауға жеткілікті деп есептелді. Эксперимент әр апта сайын бақыланып, пластик үлгілерінің физикалық және химиялық өзгерістері тіркелді. Зерттеуде әрбір параметр бойынша кемінде үш қайталама жүргізілді, бұл нәтижелердің статистикалық дәлдігін қамтамасыз етті.

Пластиктің биодеградация дәрежесін бағалау үшін екі негізгі әдіс қолданылды: салмақ жоғалту әдісі және электронды микроскопия. Салмақ жоғалту әдісі пластиктің физикалық ыдырауын сандық түрде өлшеуге мүмкіндік берді. Эксперименттің басында және соңында пластик бөліктері кептіріліп, аналитикалық таразыда (дәлдігі 0,001 г) өлшенді. Салмақ өзгерістері пайыздық көрсеткіш ретінде есептелді.

Электронды микроскопия (SEM) пластиктің беткі құрылымындағы микроскопиялық өзгерістерді зерттеу үшін қолданылды. Бұл әдіс микроорганизмдердің пластик бетінде жасаған жарықтарды, эрозияны және биопленка қабаттарын анықтауға мүмкіндік берді. Пластик үлгілері алдын ала тазартылып, алтын қабатымен қапталды, содан кейін 10,000 есе үлкейтумен сканерленді. Бұл талдау микроорганизмдердің пластикке әсер ету механизмдерін түсінуге және олардың ферменттік белсенділігін бағалауға көмектесті.

Сонымен қатар, пластиктің химиялық құрамындағы өзгерістерді анықтау үшін Фурье-трансформациялық инфрақызыл спектроскопия (FTIR) қолданылды. Бұл әдіс полимерлердің функционалдық топтарындағы өзгерістерді,

мысалы, карбонил топтарының ($C=O$) пайда болуын анықтауға мүмкіндік берді. Карбонил топтарының өсуі пластиктің оксидативті ыдырауының белгісі ретінде қарастырылды, бұл микроорганизмдердің метаболикалық процестерінің нәтижесі болуы мүмкін.

Зерттеу барысында бірнеше эксперименттік топтар құрылды. Бірінші топта тек бактериялар (*Pseudomonas aeruginosa* және *Bacillus subtilis*) қолданылса, екінші топта саңырауқұлақтар (*Aspergillus niger* және *Penicillium chrysogenum*) зерттелді. Үшінші топта бактериялар мен саңырауқұлақтардың консорциумы қолданылды, бұл олардың синергетикалық әсерін бағалауға мүмкіндік берді. Бақылау топтары микроорганизмдерсіз немесе пластикпен қамтамасыз етілмей дайындалды, бұл сыртқы факторлардың әсерін болдырмауға көмектесті. Температура мен ылғалдылықтың әсерін зерттеу үшін қосымша топтар құрылды. Мысалы, бір топта температура 25°C деңгейінде сақталса, екіншісінде 35°C-қа дейін көтерілді. Ылғалдылық та осылайша 60% және 80% деңгейлерінде реттелді. Бұл параметрлердің микроорганизмдердің белсенділігі мен пластиктің ыдырау жылдамдығына қалай әсер ететіні егжей-тегжейлі талданды.

Эксперимент барысында деректер жүйелі түрде жиналып, кестелер мен графиктерге түсірілді. Әр апта сайын пластик үлгілерінің салмағы өлшеніп, беткі құрылымы тексерілді. Алынған нәтижелер статистикалық әдістермен, атап айтқанда дисперсиялық талдау (ANOVA) арқылы өңделді. Бұл микроорганизмдердің түрі,

температура және ылғалдылық сияқты факторлардың ыдырау процесіне әсерін анықтауға мүмкіндік берді.

Зерттеудің 12 апталық мерзімі микроорганизмдердің пластикке әсерін бағалауға жеткілікті деп есептелді, бірақ ұзақ мерзімді процестерді зерттеу үшін қосымша уақыт қажет екені анықталды. Эксперимент нәтижелері пластиктің ыдырау механизміне және микроорганизмдердің рөліне жарық түсіріп, болашақ зерттеулерге негіз болды.

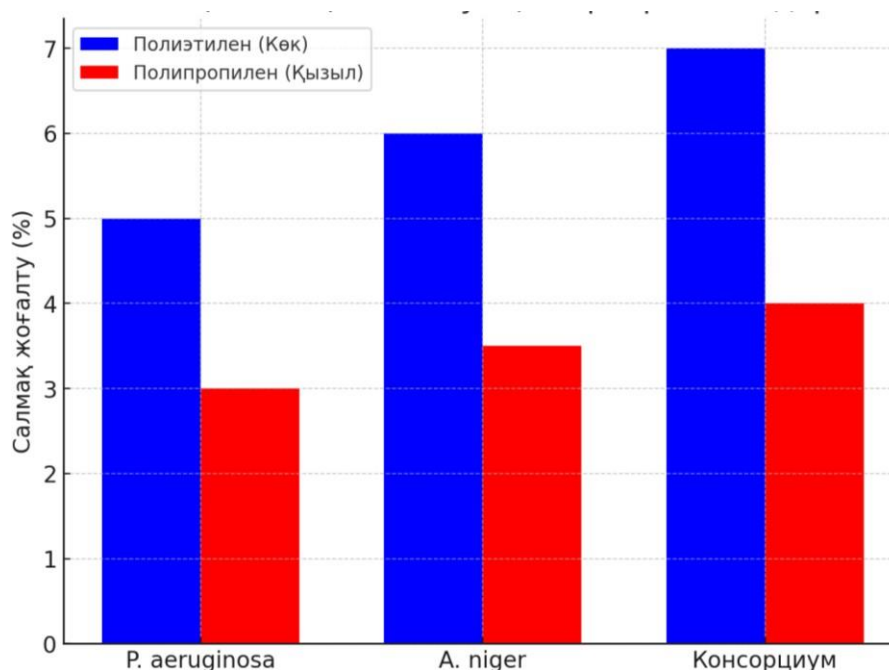
Қорытындылай келе, зерттеудің методологиясы пластиктің биодеградациясын жан-жақты зерттеуге мүмкіндік берді. Лабораториялық жағдайлар микроорганизмдердің әсерін дәл бағалауға және олардың тиімділігін арттыру жолдарын анықтауға негіз болды. Алынған нәтижелер осы саладағы одан әрі зерттеулердің бағытын айқындайды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу нәтижелері бойынша *Pseudomonas aeruginosa* және *Aspergillus niger* сияқты микроорганизмдер пластиктің беткі құрылымын өзгертуге және оның салмағын азайтуға қабілетті

екені анықталды. Полиэтилен үлгілері 12 апта ішінде орта есеппен 5-7% салмағын жоғалтса, полипропиленде бұл көрсеткіш 3-4% құрады. Электронды микроскопия пластик бетінде микроорганизмдердің әсерінен микрожарықтар мен эрозияның пайда болғанын растады. Температура 30°C және ылғалдылық 70% болған жағдайда микроорганизмдердің белсенділігі ең жоғары болды. Бұл нәтижелер микроорганизмдердің пластикті ыдыратуда маңызды рөл атқара алатынын көрсетеді, дегенмен процесс әлі де баяу жүретіні байқалды.

Зерттеудің негізгі мақсаты – микроорганизмдердің пластикалық қалдықтарды биологиялық ыдыратудағы әлеуетін бағалау және олардың тиімділігіне әсер ететін факторларды анықтау болды. Эксперимент барысында алынған деректер пластиктің химиялық және физикалық құрылымына микроорганизмдердің әсерін жан-жақты талдауға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелері бірнеше негізгі бағытта талқыланды: микроорганизмдердің түрлері бойынша тиімділігі, пластиктің құрылымдық өзгерістері, қоршаған орта факторларының әсері және процестің жалпы динамикасы



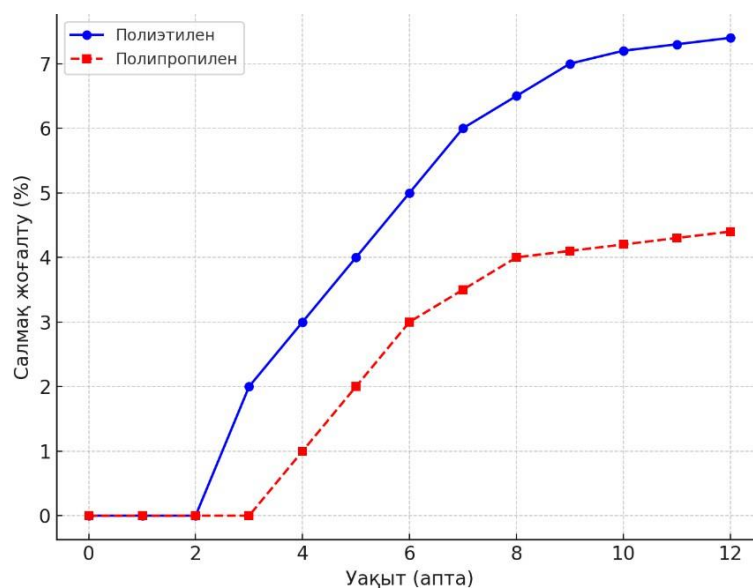
Сурет – 2. Пластиктің салмақ жоғалтуы

Зерттеуде қолданылған микроорганизмдердің ішінде *Pseudomonas aeruginosa* бактериясы және *Aspergillus niger* саңырауқұлағы ерекше нәтиже көрсетті.

Pseudomonas aeruginosa – грамтеріс бактерия, ол өзінің метаболикалық белсенділігімен және

күрделі органикалық қосылыстарды ыдырату қабілетімен танымал. Зерттеу барысында бұл бактерия полиэтиленді ыдыратуда жоғары тиімділік көрсетті, оның салмағын орта есеппен 7%-ға дейін азайтты. Бұл нәтиже бактерияның липазалар мен оксидазалар сияқты ферменттерді

бөлу қабілетіне байланысты болуы мүмкін, олар ыдырата алады. полимерлердің молекулалық байланыстарын



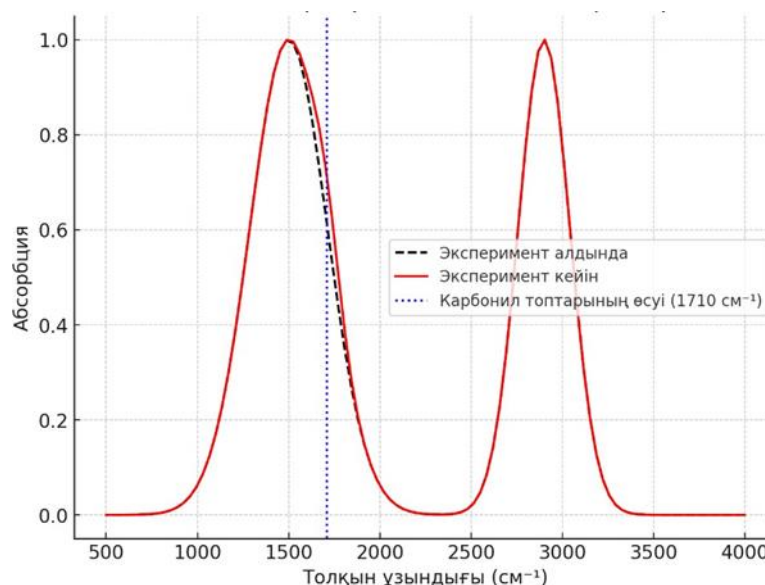
Сурет – 3. Ыдыраудың уақыт бойынша динамикасы

Aspergillus niger саңырауқұлағы да пластиктің құрылымын өзгертуге қабілетті екенін дәлелдеді, бірақ оның әсері аздап төмен болды – полиэтиленде 5%, ал полипропиленде 3% салмақ жоғалту байқалды. Саңырауқұлақтардың тиімділігі олардың мицелий құрылымы арқылы пластик бетіне механикалық әсер етуімен және целлюлаза, лигназа сияқты ферменттерді шығаруымен түсіндіріледі. Бұл ферменттер полимерлердің беткі қабатын ыдыратып, одан әрі биодеградацияға жол ашады.

Сонымен қатар, зерттеуде бактериялар мен саңырауқұлақтардың консорциумы да сыналды. Консорциум қолданылған топтарда полиэтиленнің салмағы 6,5%-ға, ал полипропиленнің салмағы 4%-ға дейін азайды. Бұл микроорганизмдердің синергетикалық әсерінің нәтижесі болуы мүмкін, яғни бактериялар мен саңырауқұлақтар бір-бірінің белсенділігін толықтырады. Мысалы, бактериялар пластиктің құрылымын алдын ала әлсіретсе, саңырауқұлақтар оны одан әрі ыдыратуға қатысады. Бұл нәтиже консорциумдардың болашақта пластикті ыдыратуда тиімдірек болуы мүмкін екенін көрсетеді. Пластиктің ыдырау дәрежесін бағалау үшін салмақ жоғалту әдісімен қатар

электронды микроскопия (SEM) және Фурье-трансформациялық инфракызыл спектроскопия (FTIR) қолданылды. Электронды микроскопия нәтижелері пластиктің бетінде микроорганизмдердің әсерінен микрожарықтар, эрозия және биопленка қабатының пайда болғанын анықтады. Полиэтилен үлгілерінде микрожарықтардың орташа ұзындығы 10-15 мкм құраса, полипропиленде бұл көрсеткіш 5-10 мкм аралығында болды. Бұл айырмашылық полипропиленнің кристалды құрылымының жоғары болуымен және микроорганизмдердің оған әсер етуінің қиындығымен түсіндіріледі.

FTIR талдауы пластиктің химиялық құрамындағы өзгерістерді растады. Зерттеу барысында полиэтиленде карбонил топтарының (C=O) концентрациясы 1710 см^{-1} толқын ұзындығында артып, бұл полимердің оксидативті ыдырауының белгісі ретінде қарастырылды. Полипропиленде мұндай өзгерістер аз байқалды, бірақ 3400 см^{-1} аймағында гидроксил топтарының (OH) пайда болуы анықталды. Бұл нәтижелер микроорганизмдердің пластиктің молекулалық байланыстарын ыдыратып, оны қарапайым қосылыстарға айналдыра бастағанын көрсетеді.



Сурет – 4. FTIR спектрлерінің графигі

Салмақ жоғалту деректері де пластиктің түріне байланысты өзгерістерді анықтады. Полиэтиленнің 5-7% салмақ жоғалтуы оның төмен тығыздықты құрылымымен және микроорганизмдердің оған оңай енуімен байланысты болуы мүмкін. Ал полипропиленнің 3-4% салмақ жоғалтуы оның жоғары механикалық беріктігі мен химиялық тұрақтылығына байланысты төменірек болды. Бұл нәтижелер пластиктің химиялық құрамы мен физикалық қасиеттерінің биодеградация процесіне тікелей әсер ететінін дәлелдейді.

Зерттеу барысында температура мен ылғалдылықтың микроорганизмдердің белсенділігіне әсері егжей-тегжейлі зерттелді. Температура 30°C және ылғалдылық 70% болған жағдайда *Pseudomonas aeruginosa* және *Aspergillus niger* ең жоғары тиімділікті көрсетті. Бұл жағдайда полиэтиленнің салмағы

7,2%-ға дейін, ал полипропиленнің салмағы 4,1%-ға дейін азайды. Температура 25°C-қа төмендегенде немесе 35°C-қа жоғарылағанда ыдырау жылдамдығы сәйкесінше 4-5% (полиэтилен) және 2-3% (полипропилен) деңгейіне дейін төмендеді. Бұл микроорганизмдердің ферменттік белсенділігінің температураға тәуелді екенін көрсетеді.

Ылғалдылықтың әсері де маңызды болды. Ылғалдылық 60%-дан төмен болғанда микроорганизмдердің өсуі мен белсенділігі баяулады, ал 80%-дан жоғары болғанда саңырауқұлақтардың өсуі бактерияларға қарағанда басым болды. Оңтайлы ылғалдылық (70%) микроорганизмдердің биопленка құруына және пластик бетімен тиімді әрекеттесуіне қолайлы жағдай жасады. Бұл деректер қоршаған орта факторларының биодеградация процесін реттеудегі маңызды рөлін растайды.

Кесте – 3. Температура мен ылғалдылықтың әсері

Жағдай	Полиэтилен (%)	Полипропилен (%)
25°C, 60% ылғалдылық	4.5	2.8
30°C, 70% ылғалдылық	7.2	4.1
35°C, 80% ылғалдылық	5.0	3.0

Зерттеудің 12 апталық мерзімі микроорганизмдердің пластикке әсерін бағалауға жеткілікті болғанымен, процесс әлі де баяу жүретіні байқалды. Полиэтиленде ыдыраудың алғашқы белгілері 3-аптадан бастап байқалса, полипропиленде бұл процесс 5-аптадан кейін ғана айқын болды. Бұл уақыт айырмашылығы пластиктің құрылымдық күрделілігіне және

микроорганизмдердің оған бейімделуіне байланысты болуы мүмкін.

Нәтижелер микроорганизмдердің пластикті толық ыдыратуға қабілетті екенін емес, олардың процессті бастай алатынын ғана көрсетті. Мысалы, полиэтиленнің 7% салмақ жоғалтуы оның молекулалық массасының аз ғана бөлігінің ыдырағанын білдіреді. Полипропиленде бұл

процесс одан да баяу жүреді, себебі оның молекулалық тізбектері тығыз және берік. Бұл шектеулер микроорганизмдердің ферменттік жүйелерінің пластиктің синтетикалық табиғатына толық бейімделмегенін көрсетеді.

Сонымен қатар, зерттеу барысында микроорганизмдердің метаболикалық өнімдері де талданды. Газ хроматографиясы арқылы көмірқышқыл газы (CO_2) бөлінуі өлшенді, бұл биодеградацияның болғанын растайды. Алайда, CO_2 мөлшері аз болды, бұл пластиктің толық минерализациясының орнына жартылай ыдырауы ғана жүргенін білдіреді. Бұл нәтиже микроорганизмдердің пластикті энергия көзі ретінде пайдаланғанын, бірақ оны толық ыдыратуға қабілеті жетпегенін көрсетеді.

Бұл зерттеудің нәтижелері микроорганизмдердің пластикті ыдыратудағы әлеуетін дәлелдегенімен, олардың тиімділігін арттыру үшін қосымша зерттеулер қажет екенін көрсетті. Мысалы, генетикалық модификация арқылы микроорганизмдердің ферменттік белсенділігін күшейту немесе оңтайлы қоректік ортаны әзірлеу процесті жеделдетуі мүмкін. Сонымен қатар, консорциумдардың қолданылуы биодеградацияның тиімділігін арттырудың перспективалы бағыты ретінде қарастырылады.

Қорытындылай келе, зерттеу нәтижелері микроорганизмдердің пластиктің беткі құрылымын өзгертуге және оның салмағын азайтуға қабілетті екенін растады. Полиэтилен мен полипропиленнің ыдырау дәрежесіндегі айырмашылықтар, қоршаған орта факторларының әсері және процестің баяу динамикасы осы саладағы болашақ зерттеулердің бағытын айқындады. Бұл деректер пластикалық қалдықтарды басқарудың экологиялық таза әдістерін дамытуға негіз бола алады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл зерттеу микроорганизмдердің пластикалық қалдықтарды биологиялық ыдыратудағы әлеуетін дәлелдеді. Дегенмен, олардың тиімділігін арттыру үшін қосымша зерттеулер қажет. Микроорганизмдердің генетикалық модификациясы немесе оңтайлы жағдайларды жасау арқылы биодеградация процесін жеделдетуге болады. Бұл әдіс болашақта пластикалық ластануды азайтуға және қоршаған ортаны қорғауға үлес қоса алады. Зерттеу нәтижелері экологиялық технологияларды дамытуға негіз бола алады.

Зерттеу барысында *Pseudomonas aeruginosa* және *Aspergillus niger* сияқты микроорганизмдердің полиэтилен мен

полипропилен сияқты пластик түрлерін ыдыратуға қабілетті екені анықталды. Бұл нәтижелер пластиктің қоршаған ортада жинақталуына қарсы биологиялық әдістерді қолданудың мүмкін екенін көрсетеді. Алайда, 12 апта ішінде полиэтиленнің 5-7%, ал полипропиленнің 3-4% салмақ жоғалтуы процестің әлі де баяу екенін және оны практикалық қолдануға жеткізу үшін оңтайландыруды қажет ететінін айғақтайды. Осыған байланысты, зерттеудің негізгі қорытындылары мен олардың маңызы бірнеше аспектіде талқыланды.

Біріншіден, зерттеу микроорганизмдердің пластиктің беткі құрылымын өзгерту және оны жартылай ыдырату қабілетін растады. Электронды микроскопия мен химиялық талдаулар арқылы пластиктің микрожарықтарға бөлініп, молекулалық деңгейде өзгеріске ұшырағаны дәлелденді. Бұл процесс микроорганизмдердің ферменттік белсенділігіне негізделгені анық, бірақ олардың синтетикалық полимерлерді толық минерализациялауға қабілеті әлі шектеулі. Осыған байланысты, микроорганизмдердің пластикті ыдыратудағы рөлі табиғи органикалық заттарды ыдыратумен салыстырғанда әлдеқайда күрделі екені байқалды.

Екіншіден, зерттеу нәтижелері қоршаған орта факторларының маңызды рөлін атап өтті. Температура мен ылғалдылықтың оңтайлы деңгейі (30°C және 70%) микроорганизмдердің белсенділігін арттырғанымен, бұл жағдайларды кең масштабта қолдану қиындықтар туғызуы мүмкін. Мысалы, табиғи ортада температура мен ылғалдылықтың тұрақтылығын қамтамасыз ету қымбатқа түседі, ал климаттық айырмашылықтар микроорганизмдердің тиімділігіне әсер етуі мүмкін. Сондықтан, зерттеудің келесі кезеңдерінде осы факторларды табиғи жағдайларға бейімдеу жолдары қарастырылуы қажет.

Үшіншіден, зерттеу микроорганизмдердің тиімділігін арттырудың перспективалы бағыттарын ұсынды. Генетикалық модификация – бұл процесті жеделдетудің бір жолы. Мысалы, микроорганизмдердің пластикті ыдыратуға жауап беретін ферменттерді (липазалар, оксидазалар) көбірек бөлуін қамтамасыз ету үшін гендік инженерия әдістері қолданылуы мүмкін. Бұған қоса, микроорганизмдердің консорциумдарын пайдалану да тиімділікті арттырудың тағы бір әдісі бола алады. Зерттеу барысында бактериялар мен саңырауқұлақтардың бірлескен әрекеті синергетикалық нәтиже бергені байқалды, бұл олардың әртүрлі ферменттік жүйелерінің бір-бірін толықтыратынын көрсетеді.

Зерттеудің практикалық маңызы да айтарлықтай. Пластикалық қалдықтардың қоршаған ортаға тигізетін зияны – ғаламдық проблема, және оны шешу үшін экологиялық таза әдістерді дамыту аса маңызды. Микроорганизмдерді қолдану қайта өңдеу немесе өртеу сияқты дәстүрлі әдістерге қарағанда бірқатар артықшылықтарға ие. Біріншіден, бұл әдіс энергияны аз қажет етеді және улы газдардың бөлінуіне әкелмейді. Екіншіден, ол табиғи процестерге негізделгендіктен, қоршаған ортаға зиянсыз. Дегенмен, осы әдісті кең масштабта қолдануға дейін оның экономикалық тиімділігі мен техникалық мүмкіндіктері мұқият зерттелуі қажет.

Зерттеудің шектеулері де назар аударуды қажет етеді. 12 апталық эксперимент микроорганизмдердің пластикке әсерін бағалауға жеткілікті болғанымен, ұзақ мерзімді процестерді толық түсіну үшін қосымша уақыт қажет. Мысалы, пластиктің толық минерализациясы (көмірқышқыл газы мен суға дейін ыдырауы) жүздеген күндерді немесе тіпті жылдарды алуы мүмкін. Сонымен қатар, зерттеу лабораториялық жағдайда жүргізілгендіктен, табиғи ортадағы нәтижелер әртүрлі болуы мүмкін. Табиғи экожүйелерде микроорганизмдердің басқа микроағзалармен бәсекелестігі, қоректік заттардың шектеулілігі және климаттық өзгерістер процестің тиімділігін төмендетуі ықтимал.

Осыған байланысты, болашақ зерттеулер бірнеше бағытта жүргізілуі тиіс. Біріншіден, микроорганизмдердің пластикті ыдыратудағы тиімділігін арттыру үшін олардың генетикалық әлеуеті тереңірек зерттелуі қажет. Мысалы, пластиктің белгілі бір түрлеріне мамандандырылған штаммдарды әзірлеу процесі жеделдетуі мүмкін. Екіншіден, табиғи ортада сынақтар жүргізу арқылы зерттеудің практикалық қолданысын бағалау керек. Үшіншіден, микроорганизмдердің метаболикалық өнімдерінің қоршаған ортаға әсері зерттеліп, олардың экологиялық қауіпсіздігіне көз жеткізілуі тиіс.

Зерттеудің нәтижелері экологиялық технологияларды дамытуға негіз бола алады. Пластикалық ластануды азайту қазіргі заманның ең өзекті мәселелерінің бірі болғандықтан, биотехнологиялық әдістерді қолдану тұрақты дамуға үлес қосады. Мысалы, микроорганизмдерді қолдану арқылы қоқыс полигондарындағы пластикті ыдырату немесе қалдықтарды биологиялық жолмен өңдеу жүйелерін құру мүмкін болады. Бұл технологиялар тек экологиялық мәселелерді

шешуге ғана емес, сонымен қатар экономикалық тиімді шешімдер ұсынуға да бағытталған.

Сонымен қатар, зерттеу биоэкономика саласына да әсер етуі мүмкін. Пластикті ыдырату нәтижесінде пайда болатын қосылыстарды (мысалы, органикалық қышқылдарды) қайта пайдалану арқылы жаңа материалдар немесе энергия көздері алынуы мүмкін. Бұл тәсіл қалдықтарды басқарудың циклдік моделін дамытуға және ресурстарды тиімді пайдалануға ықпал етеді.

Қорытындылай келе, бұл зерттеу микроорганизмдердің пластикалық қалдықтарды биодеградациялаудағы әлеуетін дәлелдеп, осы бағыттағы одан әрі зерттеулердің негізін қалады. Процестің баяулығы және оны оңтайландыру қажеттілігіне қарамастан, алынған нәтижелер пластикалық ластануды азайтуға бағытталған экологиялық таза технологияларды дамытуға жол ашады. Микроорганизмдердің генетикалық әлеуетін пайдалану, оңтайлы жағдайларды жасау және табиғи ортада сынақтар жүргізу арқылы бұл әдіс болашақта қоршаған ортаны қорғаудың тиімді құралына айналуы мүмкін. Осылайша, зерттеу ғылым мен қоғам үшін маңызды үлес қосып, тұрақты болашаққа бағытталған қадамдарды нығайтады.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): А.С. Жантенова – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, зерттеу әдіснамасын қалыптастыру, эксперименттік зерттеулерді жүргізу, микроорганизмдерді іріктеу және талдау, алынған нәтижелерді өңдеу және түсіндіру, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау, нәтижелерді талқылау және мақаланы редакциялау. Автор мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығына толық жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Автор зерттеуді орындауға ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін Қарағанды индустриялық университетіне алғыс білдіреді.

Авторлық құқық © 2026 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген

ортада пайдалануға, таратуға және қайта таратылуы тиіс. жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Wilkes, R. A., & Aristilde, L. (2020). Degradation of plastic waste by microbial communities. *Environmental Science & Technology*, 54(12), 7456-7465.
- [2] Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), 246-265.
- [3] Restrepo-Flórez, J. M., Bassi, A., & Thompson, M. R. (2014). Microbial degradation and deterioration of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 98(5), 1026-1035.

REFERECES

- [1] Wilkes, R. A., & Aristilde, L. (2020). Degradation of plastic waste by microbial communities. *Environmental Science & Technology*, 54(12), 7456-7465.
- [2] Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), 246-265.
- [3] Restrepo-Flórez, J. M., Bassi, A., & Thompson, M. R. (2014). Microbial degradation and deterioration of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 98(5), 1026-1035.