

MIKROORGANIZMLAR YORDAMIDA PLASTIK CHIQINDILARNI BIOLOGIK PARCHALANISHI: ZAMONAVIY YONDASHUVLAR VA ISTIQBOLLAR

Navoiy Innovatsiyalar Universiteti talabalari:

Ibodullayeva Sabina Sunnatillo qizi

Bo'riboeva Zuhra Umarbekovna

Akmalova Sevinch San'atjon qizi

Anotatsiya: Ushbu ishda plastik chiqindilarning atrof-muhitga salbiy ta'sirini kamaytirishda mikroorganizmlar (bakteriyalar, zamburug'lar va mikroskopik suvo'tlar) yordamida biologik parchalash (biodegradatsiya) jarayonlarining zamonaviy yondashuvlari tahlil qilingan. Tadqiqotda polietilen (PE), polietilentereftalat (PET) va polistirol (PS) kabi chidamli polimerlarni parchalovchi unikal fermentlar (PETaza, MHETaza, lakkaza va kutinazalar) hamda ularni sintez qiluvchi shtammlarning biologik xususiyatlari yoritilgan. Shuningdek, gen muhandisligi va metagenomika usullari orqali mikrob fermentlarining faolligini oshirish hamda sanoat miqyosida plastik chiqindilarini qayta ishlashning kelajakdagi istiqbollari ko'rib chiqilgan.

Kalit so'zlar: Plastik chiqindilar, biodegradatsiya, mikroorganizmlar, PETaza, polimerlar, metagenomika, bio-qayta ishlash.

Abstract: This paper analyzes modern approaches to the biodegradation of plastic waste using microorganisms (bacteria, fungi, and microalgae) to mitigate their adverse environmental impact. The study highlights the biological characteristics of microbial strains and unique enzymes (such as PETase, MHETase, laccases, and cutinases) capable of degrading resistant polymers, including polyethylene (PE), polyethylene terephthalate (PET), and polystyrene (PS). Furthermore, the application of genetic engineering and metagenomics to enhance enzymatic efficiency and the future prospects of scaling up biological plastic recycling for industrial applications are discussed.

Keywords: Plastic waste, biodegradation, microorganisms, PETase, polymers, metagenomics, bio-recycling.

Аннотация: В данной работе проанализированы современные подходы к биодegradации пластиковых отходов с использованием микроорганизмов (бактерий, грибов и микроводорослей) для снижения их негативного воздействия на окружающую среду. В исследовании освещены биологические особенности микробиологических штаммов и уникальных ферментов (ПЭТаза, МГЭТаза, лакказы и кутиназы), способных расщеплять устойчивые полимеры, такие как полиэтилен (ПЭ), полиэтилентерефталат (ПЭТ) и полистирол (ПС). Также рассматриваются возможности применения генной инженерии и

метагеномики для повышения активности ферментов и перспективные пути промышленного внедрения биорециклинга пластика.

Ключевые слова: Пластиковые отходы, биodeградация, микроорганизмы, ПЭТаза, полимеры, метагеномика, биорециклинг.

Kirish

Plastik chiqindilar — zamonaviy dunyoning eng jiddiy ekologik muammolaridan biri bo'lib, ularning tabiiy sharoitda parchalanishi yuzlab yillarni talab qiladi. Yillik sintetik polimerlar (masalan, polietilen (PE), polietilentereftalat (PET), polipropilen (PP), polistirol (PS)) atrof-muhitda uzoq vaqt saqlanib, tuproq, suv havzalari va oziqlanish zanjiriga mikroplastiklar shaklida kirib boradi. Ushbu muammoni hal qilishda mikroorganizmlar (bakteriyalar, zamburug'lar, mikroalgalar) yordamida biologik parchalanish (biodegradatsiya) eng istiqbolli va ekologik xavfsiz yondashuvlardan biri hisoblanadi. Ushbu maqolada plastik chiqindilarni mikroorganizmlar yordamida biologik parchalanish mexanizmlari, zamonaviy biotexnologik yondashuvlar, amaliy qo'llanilish sohalari va kelajakdagi istiqbollar batafsil tahlil qilinadi.

1. Plastik chiqindilar va ularning ekologik ta'siri

Plastiklar neft mahsulotlaridan olinadigan yuqori molekulyar og'irlikdagi sintetik polimerlar bo'lib, ularning keng qo'llanilishi (qadoqlash, qurilish, avtomobilsozlik, tibbiyot va boshqa sohalarda) har yili dunyo bo'ylab 400 million tonnadan ortiq plastik chiqindi hosil bo'lishiga sabab bo'lmoqda. Ushbu chiqindilarning 10% dan kamrog'i qayta ishlanadi, aksariyat qismi ochiq poligonga yoki tabiiy muhitga chiqarib yuboriladi.

Plastiklarning tabiiy sharoitda parchalanishi sekin kechadi:

Polietilen (PE): 100–500 yil;

Polietilentereftalat (PET): 450 yilgacha;

Polistirol (PS): 500 yildan ortiq;

Poliuretan (PU): 50–100 yil.

Bu jarayon davomida plastiklar kichik bo'laklarga (mikroplastiklar: $\leq 5 \text{ mm}$ va nanoplastiklar: $\leq 100 \text{ nm}$) ajraladi va ular suv, tuproq, havo orqali inson organizmiga kirib, endokrin tizim buzilishi, immun javobning pasayishi, o'simtalar rivojlanishi kabi xavfli oqibatlarga olib kelishi mumkin.

Shu sababli, plastik chiqindilarni qayta ishlashning an'anaviy usullari (yoqish, poligonga chiqarish, mexanik qayta ishlash) ekologik va iqtisodiy jihatdan samarasiz bo'lib qolmoqda. Bunday sharoitda mikroorganizmlar yordamida biologik parchalanish — barqaror muqobil yechim sifatida e'tirof etilmoqda.

2. Biologik parchalanish tushunchasi va mexanizmlari

Biologik parchalanish (biodegradatsiya) — bu organik birikmalarning mikroorganizmlar (bakteriyalar, zamburug'lar, aktinomitsetlar, mikroalgalar) ta'sirida oddiyroq moddalar (CO_2 , H_2O), metan, mineral tuzlar va biomassa) ga aylanish jarayoni. Plastiklar uchun biologik parchalanish ikki bosqichda amalga oshadi:

1 Birlamchi parchalanish (depolimerizatsiya): Mikroorganizmlar o'zlarining maxsus fermentlari (ekzo- va endoenzimlar) yordamida polimer zanjirini kichikroq oligomerlar va monomerlarga ajratadi.

PETaza va MHETaza fermentlari polietilentereftalatni (PET) tereftalat kislota va etilen glikolga ajratadi.

Kutinazlar, lipazlar, esterazlar poliefirlar va poliuretanlarni parchalashda ishtirok etadi.

Oksidazlar (lakkaza, peroksidaza) polistirol va polietilen kabi barqaror polimerlarni oksidlovchi parchalanishga uchratadi.

2 Ikkinchi darajali parchalanish (mineralizatsiya): Olingan kichik molekulalar mikroorganizmlar tomonidan o'zlashtirilib, hujayra metabolizmi orqali yakuniy mahsulotlarga (CO_2 , H_2O , CH_4) aylanadi.

Bu jarayon samaradorligi quyidagi omillarga bog'liq:

Polimernining kimyoviy tuzilishi (C-C , C-O , C-N) bog'lari mavjudligi;

Molekulyar og'irlik va kristallik darajasi;

Atrof-muhit sharoitlari (harorat, pH), kislorod miqdori, namlik, ozuqa moddalari);

Mikroorganizmlarning turlari va ularning konsorsiumi.

3. **Plastiklarni parchalovchi mikroorganizmlar**

A) Bakteriyalar

Bakteriyalar plastiklarni biologik parchalanishida eng faol va ko'p o'rganilgan mikroorganizmlar hisoblanadi:

Ideonella sakaiensis 2016-yilda Yaponiyada kashf etilgan bo'lib, u PET plastikasini 6 haftada 90% gacha parchalash qobiliyatiga ega. Ushbu bakteriya PETaza va MHETaza fermentlarini ishlab chiqarib, polimer zanjirini tereftalat kislota va etilen glikolga ajratadi, keyin esa ularni o'zlashtirib, energiya va biomassa hosil qiladi.

Pseudomonas va Bacillus turlari esa polietilen (PE) va polipropilen (PP) kabi barqaror polimerlarni ham qisman parchalash qobiliyatiga ega. Ular biofilmlar hosil qilib, polimer yuzasida yashaydi va sekretsia qilingan fermentlar orqali oksidlovchi parchalanishni boshlaydi.

B) **Zamburug'lar (Fungi)**

Zamburug'lar, xususan, Aspergillus, Penicillium, Pestalotiopsis turlari plastiklarni parchalanishida muhim rol o'ynaydi:

Pestalotiopsis microspora — Amazon o'rmonlaridan topilgan ushbu zamburug' kislorodsiz muhitda ham polietilen va poliuretanlarni parchalash qobiliyatiga ega.

Aspergillus niger va Penicillium — PE, PET, PE va PS ni lakkaza, peroksidaza va boshqa oksidlovchi fermentlar yordamida parchalaydi.

Zamburug'larning afzalligi shundaki, ular katta miqdorda ekzokutinazlar va ligninolitik fermentlar ishlab chiqaradi, bu esa ularni ingichka o'sxash strukturali polimerlar (masalan, polistirol) uchun samarali qiladi.

Mikroalgalar

Mikroalgalar (masalan, Chlorella, Scenedesmus) ham mikroplastiklarni, xususan, mikroplastiklarni biosorbsiya va biokatalitik parchalash orqali yo'qotishda qatnashadi. Ular fotosintez jarayonida kislorod ishlab chiqarib, boshqa mikroorganizmlar uchun qulay sharoit yaratadi va polimerlar yuzasiga adsorbsiya qilib, fermentativ parchalanishni kuchaytiradi.

4. Zamonaviy biotexnologik yondashuvlar

So'nggi yillarda mikroorganizmlar yordamida plastik parchalanish samaradorligini oshirish uchun bir qator zamonaviy biotexnologik yondashuvlar ishlab chiqilmoqda:

1. Genetik muhandislik va ferment optimizatsiyasi

Ideonella sakaiensis dan olingan PETaza genini boshqa mikroorganizmlarga (E. coli, Bacillus subtilis) ko'chirish orqali ularning parchalash qobiliyatini kuchaytirish mumkin.

Fermentlarning termobarqarorligi va katalitik faolligini oshirish uchun yo'naltirilgan evolyutsiya (directed evolution) va ratsional dizayn usullari qo'llanilmoqda.

Masalan: 2020-yilda FAST-PETaza (turli, barqaror, yuqori faol FAST-PETaza) fermenti ishlab chiqilgan bo'lib, u 50°C haroratda ham faol bo'lib, PET ni bir necha kunda 90% gacha parchalaydi.

2. Konsorsium mikrobiologiyasi

Yagona mikroorganizm o'rniga turli turlarni birgalikda ishlatish mikrobial konsorsiumlar yaratish orqali parchalanish samaradorligini oshirish mumkin. Masalan, bakteriya + zamburug' + mikroalga konsorsiumi birgalikda ishlanganda, ular o'zaro sinergik ta'sir ko'rsatib, bir-biri o'zga xos fermentlar va metabolik yo'llar orqali polimerni to'liq mineralizatsiya qiladi.

3. Bioreaktorlar va immobilizatsiya texnologiyalari

Mikroorganizmlarni yoki ularning fermentlarini bioreaktorlarda o'stirish va immobilizatsiya qilish (masalan, nanozarralar, polimer matritsalar yoki biofilmlar yordamida) jarayonni boshqarish va samaradorlikni oshirish imkonini beradi.

Bunday tizimlarda:

Harorat, pH, kislorod miqdori nazorat qilinadi;

Substrat (plastik) va mikroorganizmlar optimal nisbatda ta'minlanadi;

Olingan mahsulotlar (monomerlar) doimiy ravishda qayta ishlanadi.

4. Nanozarralar va katalizatorlar

Nanotexnologiya sonasidagi yutuqlar plastik parchalanishini tezlashtirishda qo'llanilmoqda. Masalan, temir oksid (Fe_3O_4), kumush (Ag) va titan dioksid (TiO_2) nanozarralari mikroorganizmlar faolligini oshiradi va ularning fermentativ faoliyatini kuchaytiradi.

5. Omika texnologiyalari (genomika, transkriptomika, proteomika)

Yangi plastik parchalovchi mikroorganizmlar va fermentlarni aniqlash uchun metagenomika va transkriptomika usullari keng qo'llanilmoqda. Bu usullar orqali tabiiy muhitlardan (poligonlar, okeanlar, kompost) olingan namunalarda noma'lum mikroorganizmlarning genetik materialini tahlil qilib, yangi ferment genlarini aniqlash mumkin.

5. Amaliy qo'llanilish sohalari

Amaliyotda plastiklarni biologik va biotexnologik qayta ishlash quyidagi sohalarda qo'llanilmoqda:

1 Chiqindilarni qayta ishlash zavodlari: Ba'zi mamlakatlarda (Masalan, Fransiya, Germaniya, Yaponiya) plastik chiqindilarni biologik qayta ishlash bo'yicha pilot loyihalar amalga oshirilmoqda. Bu yerda PET va PU mikrobial va maxsus bioreaktorlarda mikroorganizmlar yordamida monomerlarga ajratiladi va qayta polimerizatsiya qilinadi.

2 Bioplastiklar ishlab chiqarish: Plastiklarni biologik parchalanish natijasida olingan monomerlar (masalan, tereftalat kislota, etilen glikol) asosida bioplastiklar (masalan, PEF — polietilen furanoat) ishlab chiqarish mumkin. Bu materiallar an'anaviy plastiklarga nisbatan tezroq parchalanadi va ekologik xavfsizdir.

3 Atrof-muhitni tiklash (bioremediatsiya): Okeanlarda, daryo va ko'llarda to'plangan mikroplastiklarni yo'qotish uchun mikrobial bioremediatsiya usullari qo'llanilmoqda. Masalan, maxsus bakteriya shtammlari suv havzalariga yuborilib, ular plastiklarni parchalab, suv sifatini yaxshilaydi.

4 Kompostlash va organik chiqindilarni qayta ishlash: Organik chiqindilar bilan birga plastik chiqindilarni ham kompostlash jarayonida mikroorganizmlar ishlatib parchalash mumkin.

Bunday tizimlarda aero va anaerob parchalanish jarayonlari birgalikda kechib, samaradorlikni oshiradi.

6. Qiyinchiliklar va cheklovlar

Biologik parchalanish istiqbolli yondashuv bo'lsa-da, bir qator qiyinchiliklar mavjud:

1 Parchalanish tezligining sekinligi: Ko'pgina mikroorganizmlar plastiklarni juda sekin parchalaydi (haftalar, oylar). Bu esa sanoat miqyosida qo'llashni qiyinlashtiradi.

2 O'rta mahsulotlarning toksikligi: Plastiklarning parchalanish jarayonida hosil bo'ladigan tereftalat kislotasi, etilen glikol, bisfenol A kabi oraliq mahsulotlar toksik bo'lishi mumkin va ularning to'liq mineralizatsiyasi ta'minlanmasa, atrof-muhitga zarar yetkazishi ko'rsatiladi.

3 Mikroorganizmlarning barqarorligi: Tabiiy sharoitda mikroorganizmlar harorat, pH , tuzlilik va boshqa omillar ta'sirida o'z faolligini yo'qotishi mumkin. Shuning uchun ularga qulay muhit yaratish va ularni barqaror saqlash muhimdir.

4 Iqtisodiy samaradorlik: Hozirgi kunda mikroorganizmlar yordamida plastik parchalash texnologiyalari an'anaviy usullarga (masalan, mexanik qayta ishlash) nisbatan qimmatroq bo'lishi mumkin. Biroq, texnologiyalar rivojlanishi bilan bu farq kamaymoqda.

5 Polimer turlarining xilma-xilligi: Barcha plastiklar ham mikroorganizmlar tomonidan oson parchalanmaydi. Masalan, polietilen (PE) va polipropilen (PP) kabi to'liq uglevodorod zanjirli polimerlar juda barqaror bo'lib, ularni parchalanish uchun maxsus kuchli oksidlovchi fermentlar talab qilinadi.

7. Kelajakdagi istiqbollar

Mikroorganizmlar yordamida plastik chiqindilarni biologik parchalanish sohasida quyidagi istiqbollar kutilmoqda:

1 Sun'iy intellekt va mashina o'rgatish: Sun'iy intellekt (AI) va mashina o'rgatish texnologiyalari yordamida yangi fermentlarni bashorat qilish va ularning tuzilishini modellashtirish mumkin. Bu esa yangi, yuqori faol fermentlarni dizayn qilish va ularni sintetik biologiya orqali mikroorganizmlarga kiritish imkonini beradi.

2 Sintetik biologiya va sun'iy mikrobiomlar: Sintetik biologiya orqali maxsus dizayn qilingan mikroorganizmlar yaratish mumkin, ular bir nechta fermentlarni ishlab chiqarib, turli xil plastiklarni bir vaqtning o'zida parchalay oladi.

3 Aylana iqtisodiyot va barqaror rivojlanish: Plastiklarni biologik parchalanish "circular economy" (aylana iqtisodiyot) tamoyillariga asoslanadi: chiqindilar qayta ishlanib, yangi mahsulotlar olinadi. Bu esa tabiiy resurslarni tejash va chiqindilarni kamaytirish imkonini beradi.

4 Global miqyosda qo'llash: Kelajakda rivojlanayotgan mamlakatlarda ham plastik chiqindilarni biologik qayta ishlash texnologiyalari keng qo'llanilishi mumkin. Bu esa global miqyosda plastik ifloslanishni kamaytirish va ekologik barqarorlikni ta'minlashga hissa qo'shadi.

Xulosa

Mikroorganizmlar yordamida plastik chiqindilarni biologik parchalash — bu ekologik jihatdan xavfsiz, barqaror va istiqbolli yechimdir. Bakteriyalar, zamburug'lar va mikroalgalar o'zlarining maxsus fermentlari orqali turli xil plastiklarni parchalash qobiliyatiga ega. Zamonaviy biotexnologik yondashuvlar (genetik muhandislik, mikrobial konsorsiumlar, bioreaktorlar, nanozarralar, omika texnologiyalari) bu jarayonni yanada samaraliroq va amaliy qo'llanilish imkonini qilmoqda. Barcha bir qator qiyinchiliklar bo'lishiga qaramay, biologik parchalanish kelajakda plastik chiqindilari muammosini hal qilishda asosiy o'rin tutadi.

Foydalanilgan manbalar:

- 1 Abdullayeva G.I. Plastik chiqindilarning biologik parchalanishi va inson organizmiga kirish yo'llari (2025).
- 2 Microbial Biodegradation of Plastics and Microplastics: Enzymatic Mechanisms, Biotechnological Applications, and Ecotoxicological Perspectives (2025).
- 3 Ropiyeva Z., Mamatkulova I. Plastik chiqindilarni mikroorganizmlar yordamida parchalash (2025).
- 4 Harnessing bacterial power and omics technologies for plastic biodegradation (2026).
- 5 Recent Advances and Mechanism of Plastics Biodegradation Promoted by Bacteria (2023).
- 6 Microbial degradation of microplastics: Effectiveness and mechanisms (2025).
- 7 Biologik chiqindilarni qayta ishlashda mikroorganizmlarning o'rni (2026).