CHIQINDI POLIETILENTEREFTALATNI QAYTA ISHLASH VA MODIFIKATSIYALASH ORQALI UNING STRUKTURAVIY VA EKSPLUATATSION XOSSALARINI TIKLASH HAMDA TADQIQ ETISH

Sadinova Ozoda Olimovna
Navoiy davlat universiteti, Kimyo kafedrasi mustaqil tadqiqotchisi
Mardonova Gulnoza Vahobovna
Navoiy davlat universiteti, Kimyo kafedrasi tayanch doktoranti
To‘xtayev Feruz Sadulloyevich
Navoiy davlat universiteti Kimyo kafedrasi professori,
kimyo fanlari doktori (DSc). ORCID: 0009-0004-5105-8437
doi:https://doi.org/10.5281/zenodo.23037160

Annotatsiya. Mazkur tadqiqot chiqindi polietilentereftalat (PET)ni qayta ishlash jarayonida uning strukturaviy, reologik, termik va fizik-mexanik xossalarida yuz beradigan o‘zgarishlarni aniqlash hamda maqsadli modifikatsiyalash orqali ushbu xossalarni tiklashning ilmiy-texnologik asoslarini ishlab chiqishga qaratilgan. Tadqiqotda iste’moldan keyingi PET chiqindilarini saralash, tozalash, maydalash, quritish, ekstruderlash va granulyatsiyalash jarayonlarining polimer strukturasi va ekspluatatsion ko‘rsatkichlariga ta’sirini kompleks baholash nazarda tutiladi.

Qayta ishlash jarayonida PET makromolekulalarining termik, gidrolitik va termooksidlanish degradatsiyasi natijasida yuzaga keladigan strukturaviy o‘zgarishlar, molekulyar massaning kamayishi, eritma reologik xususiyatlarining o‘zgarishi hamda mexanik va termik barqarorlikning pasayish qonuniyatlari tadqiq etiladi. Birlamchi PET, chiqindi PET va qayta granulyatsiyalangan PET namunalarining xossalarini qiyosiy tahlil qilish orqali qayta ishlash bosqichlarining material sifatiga ta’siri aniqlanadi..

Kalit so‘zlar: polietilentereftalat, chiqindi, regeneratsiya, granulyatsiya, polimer, degradatsiyasi, modifikatsiyalash, ekstruderlash, modifikator, termik degradatsiya.

Kirish.

Hozirgi kunda polimer materiallar ishlab chiqarish va iste’mol hajmining jadal ortishi natijasida hosil bo‘layotgan plastik chiqindilarni samarali boshqarish, ularni ikkilamchi xomashyo sifatida qayta ishlash hamda resurs aylanishiga qaytarish muhim ekologik va ilmiy-texnologik vazifalardan biriga aylangan. Jahonda plastik chiqindilarning katta qismi poligonlarda to‘planishi yoki atrof-muhitga tushishi, qayta ishlash ulushining esa nisbatan pastligicha qolayotgani mavjud chiziqli “ishlab chiqarish–iste’mol–chiqindi” modelidan sirkulyar iqtisodiyot tamoyillariga o‘tish zaruratini kuchaytirmoqda [1, 2]. Mazkur muammo O‘zbekiston uchun ham dolzarbdir. Rasmiy ma’lumotlarga ko‘ra, mamlakatda 14,8 mln tonna maishiy chiqindi hosil bo‘lgan va uning 6,1 % qismi qayta ishlangan [3]. So‘nggi ma’lumotlarda plastik chiqindilar qattiq maishiy chiqindilarning qariyb 15 % ini tashkil etishi, yiliga o‘rtacha 1,8 mln tonna plastik chiqindi hosil bo‘lishi hamda uning faqat 6,6 % ga yaqin qismi qayta ishlanishi qayd etilgan [4]. Shu sababli O‘zbekistonda polimer chiqindilarini, jumladan polietilentereftalat (PET) chiqindilarini chuqur qayta ishlash, ulardan sifatli ikkilamchi xomashyo olish va qayta foydalanish imkoniyatlarini kengaytirish ekologik barqarorlik hamda resurs tejamkorligini ta’minlash nuqtai nazaridan alohida ahamiyat kasb etadi. Polietilentereftalat yuqori mexanik mustahkamlik, kimyoviy barqarorlik, shaffoflik va yaxshi texnologik xossalarga ega termoplastik poliester bo‘lib, ichimlik idishlari, qadoqlash materiallari, plyonka, sintetik tola va turli texnik mahsulotlar ishlab chiqarishda keng qo‘llaniladi [5]. PET mahsulotlarining katta qismi foydalanishdan keyin chiqindiga aylanishi ushbu polimerni qayta ishlashning samarali usullarini ishlab

chiqishni talab etadi. PET chiqindilarini mexanik qayta ishlash saralash, yuvish, maydalash, quritish, ekstruderlash va granulyatsiyalash orqali polimerni ikkilamchi xomashyo sifatida qayta foydalanishga imkon beradigan amaliy usullardan hisoblanadi [5, 6]. Biroq PETni takroriy termomexanik qayta ishlash jarayonida yuqori harorat, qoldiq namlik, kislorod va mexanik siljish kuchlari ta'sirida makromolekulyar zanjirlarning termik, gidrolitik va termooksidlanish degradatsiyasi yuz beradi. Natijada molekulyar massa va xarakteristik qovushqoqlik (IV) kamayishi, eritmaning reologik xususiyatlari, kristallanish jarayoni, termik barqarorlik hamda fizik-mexanik ko'rsatkichlarning o'zgarishi kuzatiladi [6, 7]. Shu bois chiqindi PETni faqat qayta granulyatsiyalash materialning dastlabki sifat ko'rsatkichlarini to'liq tiklash uchun yetarli emas.

Ushbu muammoni bartaraf etishning istiqbolli yo'nalishlaridan biri qayta ishlangan PETni (rPET) maqsadli modifikatsiyalashdir. Xususan, zanjir uzaytiruvchi (chain extender) birikmalardan foydalanib reaktiv ekstruderlash jarayonida PET makromolekulalarining funksional terminal guruhlari o'rtasida reaksiyalarni amalga oshirish orqali zanjir uzunligini va molekulyar massani oshirish, eritma qovushqoqligini hamda mexanik xossalarni yaxshilash imkoniyati mavjud [8, 9]. Bunda modifikatorning turi va konsentratsiyasi, PETning namlik darajasi, ekstruziya harorati va boshqa texnologik parametrlar materialning yakuniy struktura va xossalarini belgilovchi muhim omillar hisoblanadi.

Shu nuqtai nazardan, chiqindi polietilentereftalatni qayta ishlash va modifikatsiyalash orqali uning strukturaviy va ekspluatatsion xossalarini tiklash hamda tadqiq etish dolzarb ilmiy-amaliy masala hisoblanadi. Tadqiqotda birlamchi PET, chiqindi PET, qayta granulyatsiyalangan rPET va modifikatsiyalangan rPET namunalarini qiyosiy o'rganish, qayta ishlash jarayonida yuz beradigan degradatsiya qonuniyatlarini aniqlash hamda modifikatsiyalash orqali yo'qotilgan xossalarni tiklash nazarda tutiladi. Bunda PETning strukturaviy, reologik, termik va fizik-mexanik ko'rsatkichlarini kompleks baholash asosida "qayta ishlash sharoiti – struktura – xossa" o'zaro bog'liqligini aniqlash va xossalari yaxshilangan regeneratsiyalangan PET granulalarini olishning ilmiy-texnologik asoslarini ishlab chiqish muhim ahamiyat kasb etadi.

Tadqiqot obyekti va usullari.

Tadqiqot obyekti sifatida ichimlik mahsulotlari qadoqlaridan hosil bo'lgan rangsiz iste'moldan keyingi polietilentereftalat (PET) chiqindilari tanlanadi. Qiyosiy etalon sifatida qayta ishlanmagan birlamchi PET (vPET) granulasi qo'llaniladi. Chiqindi PET idishlari polipropilen/polietilen qopqoq, yorliq, yelim qoldiqlari va boshqa begona komponentlardan ajratilib, 8–12 mm o'lchamdagi holatigacha maydalanadi. Namunalar iliq yuvish eritmasida tozalanib, distillangan suv bilan neytral muhitgacha chayiladi. Yuvilgan PET 120 °C da 2 soat dastlabki quritilib, so'ng vakuum quritgichda 150 °C da 4 soat quritiladi. Ekstruziyadan oldin namlik miqdori imkon qadar <0,02 mass.% (200 ppm) darajaga yetkazilishi nazorat qilinadi. Tajribalarda beshta asosiy namuna guruhi shakllantiriladi: V-PET – birlamchi PET, etalon; W-PET – yuvilgan va quritilgan chiqindi PET; R-PET – modifikatorsiz qayta ekstruderlash va granulyatsiyalash orqali olingan PET; M05-PET – R-PETga 0,5 mass.% ko'p funksiyali epoksid tipidagi zanjir uzaytiruvchi modifikator qo'shilgan namuna; M10-PET – 1,0 mass.% zanjir uzaytiruvchi modifikator bilan olingan namuna. Modifikator samaradorligini optimallashtirish zarur bo'lganda 0,25 va 0,75 mass.% miqdorlaridagi M025-PET va M075-PET oraliq namunalar ham tayyorlanadi.

PETni qayta granulyatsiyalash laboratoriya ikki vintli ekstruderida amalga oshiriladi. Ekstruder zonalarida harorat profili dastlab 240–250–260–265 °C, kallak harorati 260–265 °C etib belgilanadi. Vintlarning aylanish tezligi 80–120 ayl/min diapazonida o'rganiladi. Materialning yuqori haroratda uzoq turishi qo'shimcha termik degradatsiyani yuzaga keltirishi sababli ekstruderda bo'lish vaqti imkon qadar 2–4 min chegarasida saqlanadi. R-PET namunasi ayni sharoitlarda hech qanday reaktiv

modifikator qo‘shmasdan olinadi va keyingi modifikatsiyalangan namunalar uchun nazorat materiali vazifasini bajaradi.

M025-PET–M10-PET namunalarini olishda quritilgan R-PET granulalari mos ravishda 0,25; 0,50; 0,75 va 1,00 mass.% zanjir uzaytiruvchi bilan quruq aralashtiriladi va reaktiv ekstruderlash amalga oshiriladi. Jarayon alohida erituvchi muhitda emas, PETning o‘z eritmasida olib boriladi. Imkoniyat mavjud bo‘lganda oksidlanish degradatsiyasini kamaytirish uchun ekstruder oziqlantirish qismi va tizim azot (N_2) inert muhiti bilan himoyalanadi. Ekstrudat sovitilib, 3–4 mm o‘lchamdagi granulalarga kesiladi va tahlildan oldin qayta quritiladi.

PETning molekulyar holatini baholash uchun xarakteristik qovushqoqlik (IV) eritma viskozimetriyasi yordamida aniqlandi. PET uchun laboratoriyaning xavfsizlik talablari va amaldagi standart metodiga mos tasdiqlangan erituvchi tizimi qo‘llandi; barcha V-PET, W-PET, R-PET va M-PET namunalarida bir xil erituvchi tizimi, konsentratsiya va o‘lchash harorati saqlandi. Eritmaning massaviy oqish tezligi (MFR) PET uchun tanlangan standart sharoitda aniqlanib, namuna degradatsiyasi va zanjir uzayishining eritma oqimiga ta’siri baholandi.

Tadqiqot natijalar va muhokamasi.

Tadqiqotning dastlabki bosqichida chiqindi polietilentereftalatni ikkilamchi xomashyo sifatida qayta tiklash, granula olish va zanjir uzaytiruvchi modifikatorning qayta ishlangan PET xossalariga ta’sirini aniqlashga asosiy e’tibor qaratildi. Chiqindi sifatida rangsiz PET idishlari tanlanib, qopqoq, yorliq va begona aralashmalardan ajratildi. PET chiqindilari yuvildi, 8–12 mm o‘lchamgacha maydalandi va namlikning qayta ishlash jarayoniga ta’sirini kamaytirish maqsadida quritildi.

Tajriba uchun V-PET – birlamchi PET; W-PET – yuvilgan va quritilgan chiqindi PET; R-PET – modifikatorsiz qayta granulyatsiyalangan PET; P025, P050, P075 va P100 – mos ravishda 0,25; 0,50; 0,75 va 1,00 mass.% piromellit dianhidridi (PMDA) bilan modifikatsiyalangan rPET namunalari sifatida belgilandi.

Chiqindi PETni qayta granulyatsiyalash natijalari. Dastlab chiqindi PET modifikator qo‘shilmagan holda ekstruderlash orqali qayta granulyatsiyalandi. Mazkur tajriba R-PET nazorat namunasini olish hamda chiqindi PETning qayta ishlanuvchanligini baholash uchun amalga oshirildi. Ekstruderning asosiy harorat zonalari 240–250–260–265 °C diapazonida, kallak harorati 260–265 °C, vintning aylanish tezligi esa 80–120 ayl/min oralig‘ida belgilandi. Quritilgan PETning ekstruderda barqaror erishi va uzluksiz ekstrudat hosil qilishi granulyatsiya jarayonining asosiy texnologik mezoni sifatida qabul qilindi.

Olingan ekstrudat sovitilib, taxminan 3–4 mm o‘lchamdagi granulalarga kesildi. Natijada keyingi modifikatsiyalash tajribalari uchun R-PET bazaviy granulasi olindi.

Zanjir uzaytiruvchi modifikator miqdorining ta’sirini o‘rganish. PET makromolekulyar zanjirlarining qayta ishlash davomida qisqarishini kompensatsiyalash maqsadida zanjir uzaytiruvchi sifatida PMDA tanlandi. Modifikatorning optimal miqdorini aniqlash uchun uning konsentratsiyasi 0,25–1,00 mass.% oralig‘ida o‘zgartirildi. Olingan tadqiqot natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval.

Turli miqdordagi PMDA qo‘shilgan rPET namunalarining kompozitsion tarkibi va belgilanishi

Namuna	rPET, mass.%	PMDA, mass.%	Namunaning vazifasi
R-PET	100,00	0	Nazorat
P025	99,75	0,25	Modifikatsiyalangan
P050	99,50	0,50	Modifikatsiyalangan
P075	99,25	0,75	Modifikatsiyalangan
P100	99,00	1,00	Modifikatsiyalangan

Barcha namunalarni olishda imkon qadar bir xil quritish va ekstruderlash rejimlaridan foydalandi. Bunday yondashuv kuzatiladigan farqlarni harorat yoki namlik ta'siridan emas, birinchi navbatda PMDA konsentratsiyasi bilan bog'lash imkonini berdi.

Tadqiqotning mazkur bosqichida murakkab instrumental strukturaviy tahlillardan oldin granulalarning chiqish unumi, tashqi ko'rinishi, rangi, granulalar o'lchami, zichligi, namlik miqdori va eritmaning oquvchanlik ko'rsatkichi (MFR/MFI) kabi birlamchi ko'rsatkichlarini aniqlash maqsadga muvofiq.

2-jadval.

Turli miqdordagi PMDA bilan modifikatsiyalangan rPET namunalarining granula chiqishi, namligi, zichligi, eritma oqim ko'rsatkichi va tashqi holati.

Namuna	Granula chiqishi, %	Namlik, %	Zichlik, g/cm³	MFR, g/10 min
R-PET	94,2	0,018	1,342	24,6
P025	94,5	0,017	1,345	20,8
P050	95,1	0,016	1,349	16,3
P075	94,8	0,016	1,351	12,7
P100	93,9	0,017	1,353	9,8

Olingan natijalar rPET tarkibiga PMDA miqdorining oshirilishi granulyatsiya jarayoni, namlik miqdori, zichlik, eritmaning massaviy oqish tezligi hamda granulalarning tashqi ko'rinishiga turlicha ta'sir ko'rsatishini ko'rsatdi. Ayniqsa, MFR qiymatining muntazam kamayishi zanjir uzaytiruvchi modifikatorning rPET eritmasining reologik holatiga sezilarli ta'sir ko'rsatganini ko'rsatuvchi asosiy natija sifatida baholanishi mumkin.

Modifikatorsiz R-PET namunasida granula chiqishi 94,2 % ni tashkil etgan bo'lsa, 0,25 mass.% PMDA kiritilgan P025 namunada ushbu ko'rsatkich 94,5 % gacha, 0,50 mass.% PMDA saqlagan P050 namunada esa 95,1 % gacha oshgan. P050 namunada R-PETga nisbatan granula chiqishining 0,9 foiz punktga ortishi o'rtacha miqdordagi modifikator ishtirokida ekstrudatning hosil bo'lishi va granulyatsiya jarayoni nisbatan barqaror kechganini ko'rsatdi.

PMDA miqdori 0,75 mass.% gacha oshirilganda granula chiqishi 94,8 % ni, 1,00 mass.% da esa 93,9 % ni tashkil etdi. P100 namunasidagi pasayish eritmaning oqish xususiyatlari sezilarli o'zgargani bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Yuqori modifikator miqdorida molekulyar zanjirlarning uzayishi va tarmoqlanish darajasining ortishi eritma qovushqoqligini oshirib, ekstruder kallagidan materialning chiqishini murakkablashtirishi mumkin. Shu sababli faqat mahsulot chiqishi nuqtai nazaridan P050–P075 oralig'i texnologik jihatdan ma'qulroq ekanligi kuzatildi.

Namunalardagi namlik miqdori 0,016–0,018 % diapazonda bo'ldi. R-PETda namlik 0,018 % bo'lgan bo'lsa, P025 da 0,017 %, P050 va P075 namunalarida 0,016 % gacha kamaydi. P100 namunada esa 0,017 % qiymat kuzatildi. Umuman olganda, barcha namunalar orasidagi farq kichik bo'lib, modifikatsiyalangan va modifikatsiyalanmagan namunalarni qiyoslashda boshlang'ich namlik darajasi bir-biriga yaqin bo'lganligini ko'rsatadi. PET gidrolizga sezgir polimer bo'lganligi sababli bu ko'rsatkich alohida ahamiyatga ega: namlikning ortishi yuqori haroratli ekstruderlash vaqtida makromolekulyar zanjirlarning gidrolitik parchalanishiga olib kelishi mumkin. Shuning uchun past va bir-biriga yaqin namlik qiymatlari modifikator ta'sirini namlik omilidan nisbatan mustaqil baholash imkonini beradi.

Zichlik qiymatlarida kichik, ammo muntazam o'sish kuzatildi. R-PETning zichligi 1,342 g/cm³ bo'lgan bo'lsa, P025, P050, P075 va P100 namunalarida mos ravishda 1,345; 1,349; 1,351 va 1,353 g/cm³ ni tashkil etdi. P100 namunasida R-PETga nisbatan zichlikning umumiy ortishi taxminan 0,82 % ni tashkil qiladi. Biroq ushbu o'zgarishni faqat zanjir uzayishi bilan bevosita bog'lash yetarli emas. PETning zichligiga kristallanish darajasi, termik tarix, sovish tezligi va granulaning ichki

morfologiyasi ham ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli zichlikdagi mazkur tendensiya qo'shimcha strukturaviy yoki termik tahlillar bilan tasdiqlanmaguncha yordamchi ko'rsatkich sifatida talqin qilinishi maqsadga muvofiq.

Eng aniq o'zgarish MFR qiymatlarida kuzatildi. Modifikatorsiz R-PET namunasida MFR 24,6 g/10 min ni tashkil etdi. 0,25 mass.% PMDA qo'shilganda bu qiymat 20,8 g/10 min gacha kamaydi. PMDA miqdori 0,50 mass.% ga oshirilganda MFR 16,3 g/10 min, 0,75 mass.% da 12,7 g/10 min va 1,00 mass.% da 9,8 g/10 min gacha pasaydi.

R-PETga nisbatan MFR qiymati P025 namunada taxminan 15,4 %, P050 da 33,7 %, P075 da 48,4 %, P100 da esa 60,2 % ga kamaydi. Bu natija PMDA miqdori bilan eritmaning oqish qobiliyati o'rtasida aniq teskari bog'liqlik mavjudligini ko'rsatadi.

MFR o'zgarishi: R-PET: 24,6 g/10 min, P025: 20,8 g/10 min, P050: 16,3 g/10 min, P075: 12,7 g/10 min, P100: 9,8 g/10 min

MFRning pasayishi eritma qovushqoqligining ortganligini bildiradi. PET tizimida bunday o'zgarish PMDAning makromolekulalardagi terminal funksional guruhlar bilan reaksiyaga kirishishi natijasida molekulyar zanjirlar uzayishi va tarmoqlangan strukturalar hosil bo'lishi bilan izohlanishi mumkin.

MFRning PMDA miqdoriga bog'liqligi ayniqsa P050–P075 namunalarida texnologik jihatdan qiziqarli natijani ko'rsatadi. P050 namunada MFR R-PETga nisbatan qariyb uchdan birga kamaygan bo'lsa-da, granula chiqishi eng yuqori — 95,1 % bo'lib qolgan. P075 da MFR yanada kamayib, 12,7 g/10 min ga yetgan, lekin granula chiqishi hali ham 94,8 % darajasida saqlangan. Demak, ushbu diapazonda eritma qovushqoqligining oshishi granulyatsiya jarayonini keskin yomonlashtirmagan.

P100 namunasida esa boshqa holat kuzatildi. MFR 9,8 g/10 min gacha kamayishi bilan bir vaqtda granula chiqishi 93,9 % gacha pasaydi va materialda sarg'ish tusning kuchayishi hamda eritma oqimining qiyinlashishi qayd etildi. Bu 1,00 mass.% PMDA sharoitida modifikatsiya darajasi texnologik qayta ishlanuvchanlik uchun haddan tashqari yuqori bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi. Eritmaning yuqori qovushqoqligi ekstruderda bosimning ortishi, oqimning beqarorlashishi va granulyatsiya samaradorligining pasayishiga olib kelishi mumkin. Sarg'ish tusning kuchayishi esa yuqori haroratdagi qayta ishlash davomida yuz beradigan termik yoki termooksidlanish jarayonlari bilan bog'liq bo'lishi mumkin; buning aniq sababini qo'shimcha tahlilsiz qat'iy belgilash mumkin emas.

Granulalarning tashqi ko'rinishi ham modifikator konsentratsiyasiga bog'liq ravishda o'zgardi. R-PET biroz sarg'ish va shaffof holatda bo'lgan bo'lsa, P025 va ayniqsa P050 namunalar bir jinsli hamda silliq granula hosil qilgan. P075 da biroz sarg'ish tus qayd etilgan, P100 da esa sarg'ishlik sezilarli kuchaygan. Shu jihatdan P050 namunasi tashqi ko'rinish va granulyatsiya barqarorligi bo'yicha eng maqbul natijani ko'rsatgan.

Natijalarni kompleks baholash P050 va P075 namunalarining istiqbolli ekanligini ko'rsatadi. P050 uchun granula chiqishi maksimal — 95,1 % bo'lib, MFR 24,6 dan 16,3 g/10 min gacha, ya'ni 33,7 % ga kamaygan. P075 da esa eritma oqimining yanada sezilarli kamayishi kuzatilgan, biroq granulalarning tashqi ko'rinishida sarg'ish tus paydo bo'la boshlagan. P100 namunada MFR eng past bo'lsa ham, granulyatsiya samaradorligining pasayishi va tashqi ko'rinishning yomonlashishi kuzatilgan.

Shu sababli mazkur natijalar asosida 0,50–0,75 mass.% PMDA diapazoni keyingi tadqiqotlar uchun eng istiqbolli konsentratsiya oralig'i sifatida ajratilishi mumkin. Agar asosiy mezon granula hosil bo'lish barqarorligi, tashqi ko'rinish va yetarlicha yuqori eritma qovushqoqligi o'rtasidagi muvozanat bo'lsa, P050 namunasi dastlabki optimal tarkib sifatida qaralishi mumkin. Biroq yakuniy optimal tarkibni belgilash uchun keyingi bosqichda mexanik va zarur bo'lsa molekulyar hamda termik ko'rsatkichlarni aniqlash talab etiladi.

Umuman olganda, PMDA konsentratsiyasining 0 dan 1,00 mass.% gacha oshirilishi bilan rPETning MFR qiymati 24,6 dan 9,8 g/10 min gacha kamayishi modifikatorning eritma reologiyasiga kuchli ta'sir ko'rsatishini ko'rsatdi. Shu bilan birga, 1,00 mass.% miqdorda qayta ishlanuvchanlikning yomonlashishi zanjir uzaytiruvchi modifikator uchun optimal konsentratsiya mavjudligini ko'rsatadi. Olingan ma'lumotlar asosida P050 namunasi texnologik jihatdan eng muvozanatli, P075 esa yuqori qovushqoqlik talab etiladigan qo'llanmalar uchun istiqbolli tarkib sifatida baholanishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. OECD. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options. – Paris: OECD Publishing, 2022.
2. United Nations Development Programme. Plastic Pollution. – UNDP, 2026.
3. O'zbekiston Respublikasi Ekologiya, atrof-muhitni muhofaza qilish va iqlim o'zgarishi vazirligi. O'zbekistonda chiqindilarni qayta ishlash: "yashil" iqtisodiyot sari qadam. – 2025.
4. O'zbekiston Respublikasi Chiqindilarni boshqarish va sirkulyar iqtisodiyotni rivojlantirish agentligi. O'zbekistonda qattiq maishiy chiqindilarning 15 foizini plastik chiqindilar tashkil etadi. – 2025.
5. Awaja F., Pavel D. Recycling of PET // European Polymer Journal. – 2005. – Vol. 41. – P. 1453–1477.
6. Ragaert K., Delva L., Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste // Waste Management. – 2017. – Vol. 69. – P. 24–58.
7. Fiorillo C., Trossaert L., Bezeraj E. et al. Molecular and material property variations during the ideal degradation and mechanical recycling of PET // RSC Sustainability. – 2024. – Vol. 2. – P. 3596–3637.
8. Incarnato L., Scarfato P., Di Maio L., Acierno D. Structure and rheology of recycled PET modified by reactive extrusion // Polymer. – 2000. – Vol. 41. – P. 6825–6831.
9. Jang J. et al. Chain-Extending Modification for Value-Added Recycled PET: A Review // Polymer Reviews. – 2022. – Vol. 62. – No. 4.