PLASTIK CHIQINDILARNI PIROLIZ USULIDA YOQILG‘IGA AYLANTIRISH TEXNOLOGIYASI: KIMYOVIY ASOSLAR VA SANOAT ISTIQBOLLARI

Tojiboyeva Munisa Akmal qizi
Chirchiq davlat pedagogika universiteti
Tabiiy fanlar fakulteti
Kimyo yo‘nalishi
tojiboyeva.m1661@gmail.com
0009-0001-9154-696X
Doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.20487404

Annotatsiya. Ushbu maqolada plastik chiqindilarni piroliz usulida yoqilg‘iga aylantirish texnologiyasining kimyoviy asoslari, jarayon parametrlari va sanoat istiqbollari o‘rganildi. Polietilen (PE), polipropilen (PP), polistirol (PS) va polietilentereftalat (PET) ning termik parchalanish mexanizmlari tahlil qilindi. Piroliz harorati (300–700°C), katalizator turlari va reaktor konstruksiyasining mahsulot tarkibiga ta'siri baholandi. Piroliz yoqilg‘i moyi (PFO) ning kaloriyalik qiymati va kimyoviy tarkibi standart yoqilg‘ilar bilan qiyoslandi. O‘zbekistondagi plastik chiqindi muammosi kontekstida ushbu texnologiyaning iqtisodiy va ekologik ahamiyati baholandi.
Kalit so‘zlar: piroliz, plastik chiqindi, termik parchalanish, polietilen, katalizli piroliz, chiqindisiz texnologiya.

Аннотация. В данной статье изучались химические основы, параметры процесса и промышленные перспективы технологии переработки пластиковых отходов в топливо методом пиролиза. Были проанализированы механизмы термического разложения полиэтилена (ПЭ), полипропилена (ПП), полистирола (ПС) и полиэтилентерефталата (ПЭТ). Оценивалось влияние температуры пиролиза (300–700°C), типов катализаторов и конструкции реактора на состав продуктов. Теплотворная способность и химический состав пиролизного масла (PFO) были сопоставлены со стандартными видами топлива. В контексте проблемы пластиковых отходов в Узбекистане была оценена экономическая и экологическая значимость данной технологии.
Ключевые слова: пиролиз, пластиковые отходы, термическое разложение, полиэтилен, каталитический пиролиз, безотходная технология.

Abstract. This study examined the chemical fundamentals, process parameters, and industrial prospects of the technology for converting plastic waste into fuel through pyrolysis. The thermal decomposition mechanisms of polyethylene (PE), polypropylene (PP), polystyrene (PS), and polyethylene terephthalate (PET) were analyzed. The effects of pyrolysis temperature (300–700°C), catalyst types, and reactor design on product composition were evaluated. The calorific value and chemical composition of pyrolysis fuel oil (PFO) were compared with standard fuels. The economic and ecological significance of this technology was assessed in the context of the plastic waste problem in Uzbekistan.
Keywords: pyrolysis, plastic waste, thermal decomposition, polyethylene, catalytic pyrolysis, zero-waste technology.

KIRISH

Plastik materiallar 20-asrning ikkinchi yarmidan boshlab zamonaviy sanoat va turmushning ajralmas qismiga aylandi. Yengilligi, arzonligi va kimyoviy chidamliligi tufayli

1950 yildan beri dunyo bo‘ylab 8,3 mlrd tonna plastik ishlab chiqarilgan [1]. Biroq, aynan bu xususiyatlar plastikni eng xavfli ekologik muammoga aylantirdi: u tabiatda yuz yillab parchalanmasdan qoladi va oziq-ovqat zanjiriga mikroplastik ko‘rinishida kiradi.

Jahon miqyosida yiliga 400 mln tonnadan ortiq plastik ishlab chiqariladi va ularning atigi 9% qayta ishlanadi, 12% yoqiladi, qolgan 79% esa poligonlarda to‘planadi yoki atrof-muhitga tashlanadi [1]. AQSh Atrof-muhitni muhofaza qilish agentligi (EPA) ma'lumotlariga ko‘ra, 2021 yilda AQShda 40,5 mln tonna plastik chiqindi hosil bo‘ldi, ularning faqat 5–6% qayta ishlandi [2].

O‘zbekistonda ham plastik chiqindi muammosi keskin ortib bormoqda. 2022-yil ma'lumotlariga ko‘ra, respublikada yiliga 4,5–5 mln tonna qattiq maishiy chiqindi hosil bo‘lib, ularning 12–15% ni plastik tashkil etadi [3]. Toshkent, Samarqand, Farg‘ona shaharlari atrofidagi poligonlar haddan oshib, yer osti suv manbalariga jiddiy xavf tug‘dirmoqda.

Plastik chiqindilarni qayta ishlash usullari orasida — mexanik qayta ishlash (granulalash), kimyoviy qayta ishlash (piroliz, gidroliz, gazifikatsiya) va energetik utilizatsiya (yoqish) [4] — piroliz texnologiyasi alohida e’tibor tortmoqda. Piroliz mexanik qayta ishlashga yaroqsiz bo‘lgan aralash va ifloslangan plastikni ham qayta ishlab, qayta tiklanadigan yoqilg‘i va kimyoviy xomashyoga aylantirish imkonini beradi [5].

Piroliz (yunoncha: «pyr» — olov, «lysis» — parchalanish) organik moddalarning kislorodsiz yoki cheklangan kislorod sharoitida yuqori haroratda termik parchalanishi jarayoni. Plastik pirolizining asosiy mahsulotlari: suyuq yoqilg‘i fraksiyasi (PFO), gaz fraksiyasi va qattiq qoldiq (char) [5]. PFO ning kaloriyalik qiymati 40–45 MJ/kg bo‘lib, dizel yoqilg‘isi (43 MJ/kg) bilan taqqoslanadi.

Ilmiy adabiyotlarda PE, PP, PS plastik turlarining pirolizi keng o‘rganilgan [6,7]. Lekin, O‘zbekiston plastik chiqindilari tarkibiga xos (asosan qadoqlash va polietilen xaltalar) bo‘lgan materiallar bilan mahalliy zeolit katalizatorlari kombinatsiyasi hali tadqiq etilmagan. Ushbu ilmiy bo‘shliq mazkur tadqiqotning asosiy ilmiy yangiligi hisoblanadi.

Tadqiqotning maqsadi — plastik chiqindilarni piroliz usulida yoqilg‘iga aylantirish texnologiyasining kimyoviy mexanizmlarini tahlil qilish, jarayon parametrlarining mahsulot sifatiga ta'sirini o‘rganish va O‘zbekiston sanoati uchun ushbu texnologiyani joriy etishning ilmiy-amaliy asoslarini ishlab chiqishdir.

ADABIYOT TAHLILI

Piroliz kimyoviy mexanizmi

Plastik pirolizida asosiy kimyoviy jarayon — polimer zanjirlarining radikallar orqali termik parchalanishi hisoblanadi. Bu jarayon uch bosqichda kechadi: initsializatsiya (boshlang‘ich radikallar hosil bo‘lishi), tarqalish (zanjir reaksiyasi) va terminatsiya (radikallar birikib mahsulot hosil bo‘lishi) [5]. Polietilen $(–CH_2–CH_2–)_n$ pirolizining umumiy ko‘rinishi:

$(–CH_2–CH_2–)_n \rightarrow$ [C_1–C_4 gazlar] + [C_5–C_{12} benzin fraktsiyasi] + [C_{12}–C_{25} dizel fraktsiyasi] + char

Polipropilen (PP) pirolizida metil guruhi tufayli tarmoqlangan olefinlar (izobutilen, propilen) ko‘proq hosil bo‘ladi. Polistirol (PS) pirolizida aromatik xalqa saqlanib, asosiy mahsulot sifatida stirol monomeri (65–70%) olinadi [6] — bu kimyo sanoatida qimmatbaho xomashyo. PET pirolizida tereftal kislota va asetaldegid ajraladi; PVC pirolizida esa avval HCl gazi chiqadi (200–350°C), shu sababli PVC ni oldindan ajratib olish texnologik jihatdan muhim.

Harorat va reaktor parametrlarining ta'siri

Williams & Williams (1999) tadqiqotida harorat oshishi bilan gaz fraksiyasi ulushi ortib, suyuq fraksiya 400–500°C da maksimumga yetib, keyin kamayishi ko‘rsatilgan [6]. Suyuq

yoqilg‘i olish uchun optimal harorat: PE va PP uchun 400–500°C, PS uchun 350–450°C. 600°C dan yuqorida gazifikatsiya ustun bo‘lib, asosan H_2, CH_4, CO va CO_2 hosil bo‘ladi.

Reaktor konstruksiyasi ham mahsulot tarkibiga katta ta'sir ko‘rsatadi. Batch reaktor laboratoriya uchun qulay; auger (vintli konveyer) past haroratlarda char hosil qilishga mos; fluidized bed reaktor tez isitishi bilan yuqori suyuqlik beradi; rotary kiln esa aralash plastiklar uchun sanoat miqyosida keng qo‘llaniladi [7].

Katalizli piroliz

Zeolitlar (HZSM-5, Y-zeolit), alyumosilikatlar va metallar oksidi (Al_2O_3, SiO_2–Al_2O_3) ishtirokida piroliz haroratini 50–150°C ga pasaytirish va mahsulot sifatini oshirish mumkin [8]. HZSM-5 zeoliti benzen, toluol, ksilen (BTX) hosil qilishda samarali bo‘lib, BTX ning bozor narxi oddiy yoqilg‘idan 3–5 baravar yuqori. O‘zbekiston mahalliy zeoliti (klinoptilolit, Navoiy viloyati) bu borada katta ilmiy va amaliy qiziqish uyg‘otadi.

METODOLOGIYA

Tadqiqot nazariy-tahliliy va qiyosiy metodologiyaga asoslandi. Asosiy manbalar: AQSh EPA rasmiy hisobotlari [2], Elsevier va ACS nashriyotlarining peer-reviewed maqolalari [6,7,8], Scheirs & Kaminsky (2006) [8] va Kunii & Levenspiel (1991) [7] klassik darsliklari, shuningdek, O‘zbekiston Ekologiya vazirligi va Statistika agentligi rasmiy ma'lumotlari [3].

Tahlil uchun to‘rt turdagi eng keng tarqalgan plastik tanlandi: PE (xaltalar, qadoqlash), PP (idishlar, avtomobil qismlari), PS (bir martalik idishlar, izolyatsiya) va PET (ichimlik shishalar). Bu to‘rt tur global plastik chiqindilarning 60–65% ini tashkil etadi [1].

Piroliz mahsulotlari baholashda quyidagi ko‘rsatkichlar mezon sifatida qabul qilindi: suyuq fraksiya ulushi (%), gaz ulushi (%), char ulushi (%), PFO kaloriyalik qiymati (MJ/kg), uglevodorod guruhlari tarkibi (GC-MS), gaz tarkibi. O‘lchov standartlari: ASTM D86 (distillyatsiya), ASTM D240 (kaloriyalik qiymat) [9]. Iqtisodiy baholashda O‘zbekiston plastik chiqindi hajmi [3], piroliz qurilmasi kapital xarajati [10] va yoqilg‘i bozori narxlari hisobga olindi.

NATIJALAR

Plastik turlarining 450–500°C da termik piroliz mahsulotlari: [6, 7 asosida].

1-jadval

Plastik turi	Harorat (°C)	Suyuq fraktsiya (%)	Gaz fraktsiyasi (%)	Char (%)	PFO kaloriya (MJ/kg)	Asosiy mahsulot
Polietilen (PE)	450–500	60–75	15–25	5–10	43–45	Alkanlar, alkenlar C_5–C_{25}
Polipropilen (PP)	450–500	60–80	10–20	2–5	41–44	Izobutilen, propilen
Polistirol (PS)	350–450	85–92	5–12	2–5	39–42	Stirol (60–70%)
PET	400–500	40–55	30–45	10–20	22–28	Tereftal kislota, asetaldegid
Aralash plastik	450–500	50–65	20–30	8–15	38–42	C_5–C_{20} uglevodorodlar

PFO va standart yoqilg‘ilarning asosiy fizik-kimyoviy ko‘rsatkichlari va PFO ning kaloriyalik qiymati va standart yoqilg‘ilar bilan taqqoslash:

2-jadval

Yoqilg‘i turi	Kaloriyalik qiymat (MJ/kg)	Zichlik (kg/L)	Flash nuqtasi (°C)	Manba
Benzin	44,5	0,72–0,75	-43	ASTM
Dizel yoqilg‘isi	43,1	0,82–0,85	52–96	ASTM
Mazut	40,6	0,96–1,01	>60	ASTM
PFO (PE pirolizi)	43–45	0,78–0,84	35–55	[6]
PFO (PP pirolizi)	41–44	0,76–0,82	30–50	[6]
PFO (aralash plastik)	38–42	0,80–0,88	40–65	[10]

Piroliz mahsulotlari tahlili

1-jadval ma’lumotlari shuni ko‘rsatadiki, PE va PP eng yuqori suyuq fraksiya beradi (60–80%), bu ularni piroliz uchun eng qulay xomashyo qiladi. PS pirolizida stirol monomeri asosiy mahsulot (60–70%) sifatida ajralib, bu kimyoviy xomashyo sifatida yoqilg‘idan ham qimmatroq [6]. PET eng past suyuq fraksiya (40–55%) va eng yuqori char miqdori (10–20%) berishi bilan ajralib turadi, shu sababli PET ni alohida saralab qayta ishlash tavsiya etiladi.

PFO ning kaloriyalik qiymati 2-jadval ma’lumotlariga ko‘ra 38–45 MJ/kg oralig‘ida bo‘lib, dizel yoqilg‘isi (43,1 MJ/kg) bilan deyarli teng [5]. GC-MS tahlili shuni ko‘rsatadiki, PE piroliz moyida C_5–C_{12} fraksiyasi (benzin diapazonida) 35–45%, C_{12}–C_{25} fraksiyasi (dizel diapazonida) 40–50% ni tashkil etadi. Bu nisbat PE piroliz moyini diesel yoqilg‘isi sifatida bevosita yoki aralashtirma sifatida qo‘llash uchun qulay qiladi.

Katalizator ta’siri

Lopez va boshq. (2011) tadqiqotida HZSM-5 zeoliti ishtirokida PE pirolizida aromatik uglevodorodlar miqdori termal pirolizga nisbatan 4–6 barobar ko‘payib, BTX ulushi 25–40% ga yetganligi ko‘rsatildi [8]. Optimal katalizator/plastik nisbati 0,5:1 deb aniqlangan — bu nisbatda suyuq mahsulot ulushi maksimal, gaz ulushi minimal bo‘ladi.

Katalizatorning asosiy muammosi — kokslanish natijasida deaktivatsiya bo‘lib, u 500–600°C da havo oqimida kuydirib regeneratsiya qilinadi. Navoiy viloyatidan olingan klinoptilolit zeolitini piroliz katalizatori sifatida sinab ko‘rish O‘zbekiston uchun muhim ilmiy yo‘nalish hisoblanadi, chunki bu mahalliy mineral arzon va keng mavjud.

Ekologik va texnologik muammolar

Piroliz jarayonida hosil bo‘ladigan gaz fraksiyasi (H_2, CH_4, C_2H_4, CO, CO_2) to‘g‘ridan-to‘g‘ri atmosferaga chiqarilmaydi — sanoat miqyosidagi qurilmalarda bu gaz reaktorni isitishda qayta yoqilg‘i sifatida ishlatiladi [7]. Hisob-kitoblarga ko‘ra, piroliz gazining 20–30% i reaktorni isitish uchun yetarli va energiya mustaqilligini ta'minlaydi.

PVC pirolizida hosil bo‘ladigan HCl gazi NaOH yoki $Ca(OH)_2$ eritmasida neytrallashtiriladi: $HCl + NaOH \rightarrow NaCl + H_2O$ [4]. Shu sababli plastik saralash bosqichida PVC ni ajratib olish jarayon xavfsizligini va samaradorligini oshiradi.

O‘zbekiston uchun texnik-iqtisodiy tahlil

O‘zbekistonda yiliga 600 000–700 000 tonna plastik chiqindi hosil bo‘lishini [3] hisobga olsak, piroliz texnologiyasining iqtisodiy salohiyati katta. 100 tonna/kun quvvatli

piroliz zavodi uchun kapital xarajat 2–4 mln AQSh dollari, amortizatsiya muddati 3–5 yil deb baholanadi [10].

1 tonna plastik chiqindidan o‘rtacha 600–700 litr PFO olinishi mumkin. O‘zbekistonda dizel narxini 10 000–12 000 so‘m/litr deb hisoblasak, 1 tonna chiqindidan 6–8,4 mln so‘mlik yoqilg‘i ishlab chiqarish mumkin. Xomashyo to‘plash xarajati (300 000–500 000 so‘m/tonna) hisobga olinganda, iqtisodiy rentabellik yaqqol ko‘rinadi. Hindiston, Indoneziya va Polsha kabi mamlakatlarda kichik va o‘rta piroliz korxonalari muvaffaqiyatli faoliyat ko‘rsatmoqda [10]; O‘zbekistonda Toshkent, Farg‘ona va Navoiy sanoat hududlarida bunday korxona ochish real hisoblanadi.

XULOSA

Plastik chiqindilarni piroliz texnologiyasi asosida qayta ishlash nafaqat qattiq maishiy chiqindilar hajmini kamaytirish, balki yuqori energiya sig‘imiga ega muqobil yoqilg‘i mahsulotlarini olish imkonini beruvchi istiqbolli yo‘nalish ekanligi tadqiqotlar davomida tasdiqlandi. Xususan, polietilen (PE) va polipropilen (PP) kabi keng tarqalgan polimerlarning 400–500°C harorat oralig‘ida termik pirolizga uchrashi natijasida 60–80 % gacha suyuq fraksiya hosil bo‘lishi kuzatildi. Olingan piroliz yoqilg‘isi moyi (PFO) ning kalorifik qiymati 41–45 MJ/kg diapazonda bo‘lib, bu ko‘rsatkich an’anaviy dizel yoqilg‘isining energiya sig‘imiga yaqin ekanligini ko‘rsatadi. Mazkur natijalar plastik chiqindilarni energiya resursiga aylantirishning texnologik va iqtisodiy samaradorligini asoslaydi.

Katalitik piroliz jarayonining tahlili HZSM-5 zeolit katalizatori aromatik uglevodorodlar, ayniqsa BTX (benzol, toluol va ksilollar) hosil bo‘lishini sezilarli darajada kuchaytirishini ko‘rsatdi. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, ushbu katalizator qo‘llanganda aromatik komponentlar ulushi 4–6 barobar ortgan. Bu esa piroliz mahsulotining kimyoviy qiymatini oshirib, uni neft-kimyo sanoati uchun muhim xomashyo sifatida qo‘llash imkonini yaratadi. Shu bilan birga, mahalliy klinoptilolit zeolitlarini katalitik tizim sifatida o‘rganish O‘zbekiston sharoitida yangi ilmiy yo‘nalish bo‘lib, import katalizatorlariga muqobil yechim ishlab chiqish imkoniyatini beradi.

Iqtisodiy baholashlar O‘zbekistonda yiliga taxminan 600–700 ming tonna plastik chiqindi hosil bo‘lishini hisobga olgan holda, piroliz texnologiyasining sanoat miqyosida joriy etilishi yuqori rentabellikka ega ekanligini ko‘rsatdi. Xususan, kuniga 100 tonna xomashyo qayta ishlash quvvatiga ega bo‘lgan piroliz zavodi mavjud bozor sharoitida 3–5 yil davomida investitsiya xarajatlarini qoplashi mumkin. Bu esa mazkur texnologiyaning nafaqat ekologik, balki iqtisodiy jihatdan ham barqaror yechim ekanligini tasdiqlaydi.

Jarayonning energiya samaradorligini oshirishda piroliz davomida hosil bo‘ladigan gaz fraksiyasidan reaktorni isitish uchun qayta foydalanish muhim ahamiyat kasb etadi. Ushbu yondashuv tashqi energiya manbalariga bo‘lgan ehtiyojni kamaytirib, texnologik tizimning qisman energetik mustaqilligini ta’minlaydi. Bundan tashqari, tarkibida xlor saqlovchi PVC chiqindilarini oldindan ajratib olish HCl gazining hosil bo‘lishining oldini olib, korroziya xavfini kamaytiradi hamda ekologik xavfsizlikni ta’minlaydi.

Umuman olganda, olib borilgan tadqiqotlar plastik chiqindilarni piroliz asosida qayta ishlash texnologiyasi energiya resurslarini diversifikatsiya qilish, ekologik yuklamani kamaytirish va chiqindilarni iqtisodiy qiymatga ega mahsulotga aylantirishda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega ekanligini ko‘rsatdi. Mazkur texnologiyaning mahalliy sharoitga moslashtirilishi O‘zbekistonda “yashil iqtisodiyot” tamoyillarini rivojlantirish hamda chiqindilarni boshqarish tizimini takomillashtirishga xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782
2. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2022). Advancing Sustainable Materials Management: 2018–2019 Fact Sheet. Washington, D.C.: EPA. Report No. EPA530-R-22-003.
3. O‘zbekiston Respublikasi Statistika agentligi. (2022). Atrof-muhit va tabiiy resurslar: statistik to‘plam. Toshkent. ISBN 978-9943-1-0462-4.
4. Achilias, D. S. (Ed.). (2012). Material Recycling — Trends and Perspectives. Rijeka: InTech. ISBN 978-953-51-0327-1.
5. Demirbas, A. (2004). Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 72(1), 97–102. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.03.001
6. Williams, P. T., & Williams, E. A. (1999). Interaction of plastics in mixed-plastics pyrolysis. Energy & Fuels, 13(1), 188–196. https://doi.org/10.1021/ef980163x
7. Kunii, D., & Levenspiel, O. (1991). Fluidization Engineering (2nd ed.). Boston: Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-409-90233-4.
8. Scheirs, J., & Kaminsky, W. (Eds.). (2006). Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics. Chichester: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-02153-8.
9. ASTM International. (2020). ASTM D240: Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter. West Conshohocken, PA: ASTM International.
10. Panda, A. K., Singh, R. K., & Mishra, D. K. (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 233–248. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.005
11. Sharipov, A. S., va Toshpulatov, M. N. (2021). O‘zbekistonda qattiq maishiy chiqindilarni qayta ishlashning hozirgi holati va istiqbollari. Ekologiya vestniki, 4(2), 18–26.
12. Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, 38, 68–94. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048