POLIETILEN VA POLIPROPILEN CHIQINDILARI PIROLIZIDAN OLINGAN SUYUQ MAHSULOTLARNING KIMYOVIY TARKIBI, FIZIK-KIMYOVIY XOSSALARI VA QAYTA ISHLASH ISTIQBOLLARI

Turdiyeva Nargiza Murodovna

Tayanch doktorant | turdiyevanargiza00@gmail.com

Annotatsiya. Tadqiqotning maqsadi polietilen (PE) va polipropilen (PP) chiqindilarining pirolizidan olinadigan suyuq mahsulotlar tarkibi, fizik-kimyoviy sifat ko‘rsatkichlari va qayta ishlash imkoniyatlarini adabiyotlar asosida tahlil qilish hamda taqdim etilgan bir laboratoriya namunasining FTIR spektrini sharhlashdan iborat. Miqdoriy ma’lumotlar 2021–2026-yillarda chop etilgan ishlardan qiyosiy usulda umumlashtirildi. Muallifga taqdim etilgan spektr Shimadzu LabSolutions muhitida QATR rejimida qayd etilgan (45 skan, spektral ajrata olish qobiliyati 4 sm^{-1}, o‘tkazuvchanlik %T). Unda 2920,40; 2852,92; 1460,20; 1376,92 va 722,20 sm^{-1} da yutilish chiziqlari aniqlangan. Mazkur chiziqlar alifatik CH_2 va CH_3 guruhlari hamda uzun metilen ketma-ketliklari mavjudligini ko‘rsatadi. Adabiyotlardagi PE/PP piroliz moylarida zichlik 0,79–0,844 g/sm^3, kinematik qovushqoqlik 1,25–6,54 mm^2/s va yuqori yonish issiqligi 41,2–47,1 MJ/kg chegaralarida berilgan, biroq sinov sharoitlari farqlanadi. Namuna identifikatori va xomashyo kelib chiqishi spektr protokolida qayd etilmagani sababli FTIR natijasi PE yoki PP piroliz moyining kelib chiqishini mustaqil tasdiqlamaydi. Natijalar suyuq mahsulotlarni maqsadli fraksiyalash va kompleks baholash zaruratini asoslaydi.

Kalit so‘zlar: polietilen; polipropilen; piroliz moyi; piroliz distillyati; FTIR; QATR; metilen guruhlari; fizik-kimyoviy xossalar; qayta ishlash.

Abstract. This study reviews the composition, physicochemical properties, and upgrading prospects of liquid products derived from polyethylene (PE) and polypropylene (PP) waste pyrolysis and interprets an additionally supplied laboratory FTIR spectrum. Published values were compared by feedstock, product fraction, and analytical conditions. The supplied infrared spectrum was recorded with Shimadzu LabSolutions in QATR mode (45 scans, 4 cm^{-1} resolution, transmittance mode). Major absorption bands were labelled at 2920.40, 2852.92, 1460.20, 1376.92, and 722.20 cm^{-1}, which are consistent with aliphatic CH_2/CH_3 groups and extended methylene sequences. Selected literature reports densities of 0.79–0.844 g cm^{-3}, kinematic viscosities of 1.25–6.54 $mm^2\ s^{-1}$, and higher heating values of 41.2–47.1 MJ kg^{-1}; the underlying conditions are not uniform. Because the FTIR export lacks the sample name, identifier, and feedstock provenance, its origin as a PE- or PP-derived pyrolysis liquid cannot be demonstrated independently. The results emphasize the need for GC–MS, fractional-distillation and quality-control measurements before process selection.

Keywords: polyethylene; polypropylene; pyrolysis oil; pyrolysis distillate; FTIR; QATR; methylene groups; physicochemical properties; upgrading.

Аннотация. В работе проанализированы состав, физико-химические свойства и перспективы переработки жидких продуктов пиролиза отходов полиэтилена (PE) и полипропилена (PP), а также интерпретирован представленный лабораторный ИК-спектр. Опубликованные количественные показатели сопоставлены с учетом сырья, типа продукта и условий измерения. Спектр зарегистрирован в программной среде Shimadzu LabSolutions в режиме QATR (45 сканирований, разрешение 4 $см^{-1}$, регистрация пропускания %T). Выделены полосы 2920,40; 2852,92; 1460,20; 1376,92 и 722,20 $см^{-1}$, соответствующие преимущественно алифатическим группам CH_2 и CH_3, а также протяженным метиленовым последовательностям. По данным литературы плотность отдельных масел пиролиза составляет 0,79–0,844 $г/см^3$, кинематическая вязкость — 1,25–6,54 $мм^2/с$, высшая теплота сгорания — 41,2–47,1 МДж/кг; условия испытаний неодинаковы. Поскольку в протоколе не указаны название образца, его идентификатор и происхождение сырья, отнесение данного спектра именно к пиролизу PE/PP требует подтверждения. Обоснована необходимость дополнительных анализов ГХ–МС и фракционного состава.

Ключевые слова: полиэтилен; полипропилен; пиролизное масло; дистиллят; ИК-Фурье-спектроскопия; QATR; метиленовые группы; переработка.

1. KIRISH

Poliolefinlar — polietilen (PE) va polipropilen (PP) — qadoqlash, quvurlar, maishiy buyumlar va texnik detallar ishlab chiqarishda keng qo‘llanadi. Saralash va mexanik qayta ishlashga yaroqsiz yoki bunday usullarda sifatini saqlash qiyin bo‘lgan ayrim oqimlarni kimyoviy qayta ishlash yo‘llaridan biri pirolizdir. Pirolizda inert yoki kislorodsiz muhitda makromolekulalar parchalanib, gaz, kondensatlanuvchi uglevodorodlar, mum va qattiq qoldiqlar hosil qiladi [1–4].

Atamalarni aniq farqlash zarur: “piroliz moyi” yoki “birlamchi kondensat” reaktor bug‘larini sovitib olingan aralash suyuq mahsulotni, “piroliz distillyati” esa ushbu kondensatni distillash orqali olingan ma’lum qaynash chegarasidagi fraksiyani bildiradi [13–15]. Etilen ishlab chiqaruvchi pechlarda etan, propan yoki nafta kabi xomashyolarning bug‘li pirolizidan hosil bo‘ladigan “pirokondensat” boshqa texnologik oqimdir; uni PE/PP chiqindilarining piroliz moyi bilan aynan bir mahsulot sifatida taqqoslash ilmiy jihatdan noto‘g‘ri [24, 26].

Ushbu ishning maqsadi PE/PP chiqindilari piroliz suyuq mahsulotlarining kimyoviy tarkibi va fizik-kimyoviy ko‘rsatkichlarini

adabiyotlar asosida umumlashtirish, O‘zbekiston uchun qayta ishlash mezonlarini aniqlash hamda taqdim etilgan bir namunaning FTIR spektrini funksional guruhlar darajasida tahlil qilishdir. Namuna kelib chiqishi protokolda ko‘rsatilmaganligi sababli adabiyotlar sharhi va birlamchi spektral kuzatuvning daliliy darajalari alohida ko‘rsatiladi [6–13].

2. MATERIALLAR VA METODLAR

Maqola adabiyotlarning narrativ-qiyosiy tahlili va taqdim etilgan instrumental spektrning tavsifiy talqinidan tashkil topgan. Tahlilga ilmiy jurnallarda e’lon qilingan 2021–2026-yillardagi maqolalar, fundamental ishlar, rus va o‘zbek tillaridagi tadqiqotlar hamda O‘zbekistonning ochiq chiqindi statistikasi kiritildi. Nashrlar nomi, yili va mavjud DOI/havolalari bo‘yicha identifikatsiya qilindi. Bu tadqiqot PRISMA mezonlariga muvofiq tizimli sharh yoki metatahlil emas; mustaqil GC–MS va to‘liq laboratoriya sifat sinovlari bajarilmagan.

Ma’lumotlar (1) PE, HDPE, LDPE, PP yoki PE/PP asosli aralashma; (2) butun birlamchi piroliz moyi yoki ajratilgan fraksiya; (3) katalizator va texnologik sharoit; (4) zichlik, kinematik qovushqoqlik, yuqori yonish issiqligi (HHV), kislota soni (TAN), suv, aromatik moddalar ulushi va ifloslantiruvchilar bo‘yicha guruhlandi. Suv va cho‘kma yig‘ma ko‘rsatkichi alohida suv miqdori bilan tenglashtirilmadi; GC–MS signal maydoni foizi avtomatik ravishda massa ulushi deb talqin qilinmadi [7, 10, 11, 18, 21].

Adabiyotlardagi tahlil usullari: GC–MS va GC×GC–FID/MS — individual uglevodorodlarni identifikatsiyalash; FTIR — funksional guruhlar; ASTM D4052/D1298 — zichlik; ASTM D445/D7042 — kinematik qovushqoqlik; ASTM D664/D974 — kislota soni; Karl Fisher titrlashi — suv; ASTM D86/D2887 — fraksion tarkib; kalorimetriya — yuqori yonish issiqligi. GC–MS xromatogrammasidagi pik maydoni foizi tegishli kalibrlashsiz massa ulushi sifatida talqin qilinmadi [10, 11, 17, 18, 21].

Birlamchi spektral material sifatida “Piroliz tajriba.pdf” faylidagi “Data233” belgili Shimadzu LabSolutions IR chiqishi qabul qilindi. Protokolda QATR, o‘tkazuvchanlik (%T), 45 skan, “SqrTriangle” apodizatsiyasi va spektral ajrata olish qobiliyati 4 sm^{-1} ko‘rsatilgan. Spektr grafikidan asbob belgilagan beshta pikning to‘lqin sonlari o‘qib olindi; piklar intensivligi, namuna miqdori yoki tarkibiy ulushi hisoblanmadi. Protokolning “Sample name” va “Sample ID” maydonlari bo‘sh, dastlabki xomashyo, reaksiya rejimi va spektrni qayd etish sanasi berilmagan. Shu sababli namuna shartli ravishda “Data233” deb ataldi va PE/PP kelib chiqishi isbotlangan deb olinmadi.

Spektrni talqin qilishda yutilish chiziqlari alifatik CH_2/CH_3 tebranishlariga doir ilmiy ma’lumotlar bilan solishtirildi [10, 31, 32]. FTIR natijasi molekula yoki xomashyoni bir qiymatli aniqlamaydi; moddalarning

alohida massa ulushlari, aromatiklar miqdori va to‘yinmaganlik darajasi ushbu fayldan chiqarilmadi.

3. ADABIYOTLAR TAHLILI VA TAJRIBA NATIJALARI

3.1. Piroliz mexanizmi va komponentlar selektivligi

PE zanjirining termik parchalanishida radikal β-parchalanish mexanizmlari natijasida turli uzunlikdagi, ko‘pincha chiziqli alkan va alkenlar hosil bo‘ladi. PP tuzilishidagi yon metil guruhlari esa shoxlangan mahsulotlarning paydo bo‘lishiga yordam beradi. Kusenberg va hammualliflar pilot qurilmada PP-ga boy oqim moyida qariyb 63 massa % shoxlangan olefinlar va 20 massa % dienlar, PE-ga boy oqim moyida esa 34 massa % chiziqli parafinlar va 26 massa % chiziqli olefinlarni qayd etgan [7]. Wu va hammualliflar PEning tarmoqlanishi ko‘payganda aromatik hamda shoxlangan komponentlar taqsimoti ham o‘zgarishini ko‘rsatgan [10].

Harorat, katalizator, bug‘ning reaktorda bo‘lish vaqti hamda bosim mahsulotni yengil gazlarga, suyuq moyga yoki aromatiklarga yo‘naltirishi mumkin. Masalan, kislota markazli ZSM-5 turidagi katalizatorlar kreking va ikkilamchi aromatlanishni kuchaytiradi; ularning maqsadi har doim eng yuqori suyuqlik chiqishini olish emas, balki muayyan fraksiyaga selektivlikni oshirish ham bo‘lishi mumkin [12, 19, 23]. 2025-yilgi Fe^{3+} bilan modifikatsiyalangan kaolin bo‘yicha ishda PP moyidagi aromatik komponentlarga doir qayd etilgan ko‘rsatkich 27,9% dan 72,3% ga ortgan; buni barcha PP pirolizlariga xos universal natija deb qabul qilib bo‘lmaydi [19].

3.2. Fizik-kimyoviy ko‘rsatkichlarning manbalararo taqqoslanishi

1-jadvalda alohida namunalarning e’lon qilingan ko‘rsatkichlari keltiriladi. Dastlabki moy bilan qo‘shimcha ishlov berilgan moy bir ustunda aralashtirilmagan. Zichlik qiymatlari 15 °C uchun berilgan; qovushqoqlik harorati aynan ko‘rsatilgan hollarda ajratilgan. Bir qator adabiyotlarda harorat izchil qayd etilmagani sababli ularning qiymatlari o‘zaro standartlashtirilgan o‘lchovlar sifatida qabul qilinmaydi [16, 18, 21].

1-jadval. PE/PP piroliz suyuqliklari uchun chop etilgan ayrim miqdoriy ko‘rsatkichlar

Manba	Namuna / mahsulot	ρ, g/sm³ (15 °C)	ν, mm²/s	HHV, MJ/kg
[18] Palmay va b., 2022	PE, birlamchi moy	0,8124	1,70 (40 °C)	46,49
[18] Palmay va b., 2022	PP, birlamchi moy	0,8339	1,60 (40 °C)	47,103

Manba	Namuna / mahsulot	ρ, g/sm³ (15 °C)	ν, mm²/s	HHV, MJ/kg
[16] Pumpuang va b., 2024	HDPE piroliz moyi	0,82	6,54 (manbadagi sharoit)	41,2
[16] Pumpuang va b., 2024	LDPE piroliz moyi	0,844	3,00 (manbadagi sharoit)	42,4
[16] Pumpuang va b., 2024	PP piroliz moyi	0,79	1,25 (manbadagi sharoit)	42,9
[21] Yadav va b., 2026	PP, birlamchi (CPPO)	0,799	2,126 (40 °C)	44,88
[21] Yadav va b., 2026	PP, tozalangan (UPPO)	0,812	3,385 (40 °C)	45,99
[20] Koti va b., 2025	PE/PP/PET = 70/23/7, tozalangan katalitik moy	0,791	1,96 (40 °C)	45,16 ± 0,79

Izoh. Birlamchi suyuqliklar va tozalangan mahsulotlar bevosita “bir xil piroliz distillyati” emas. [16] maqolaning umumlashtirilgan fizik ko‘rsatkichlar jadvalidagi o‘lchash harorati ustunlar bo‘yicha bir xillashtirilmagan. [20] namunasi toza poliolefin emas; 7% PET aralashmasi mavjud.

Tanlangan PE/PP namunalari orasida zichlik 0,79–0,844 g/sm³ atrofida, qovushqoqlik 1,25–6,54 mm²/s, HHV 41,2–47,1 MJ/kg sifatida uchraydi [16, 18, 21]. Bu qiymatlar amaliy tadqiqotlar kesimidan olingan tasviriy diapazon, poliolefin piroliz moyi uchun texnik standart chegaralari emas. Qovushqoqlik haroratlari bir xil bo‘lmaganda oraliqni yakuniy loyihaviy ma’lumot sifatida ishlatish mumkin emas; talab etilgan haroratda qayta o‘lchash zarur.

3.3. TAN, suv, aromatik uglevodorodlar va distillashning miqdoriy natijalari

Piroliz moylarining sanoatdagi ishlatilishini faqat yuqori yonish issiqligi bilan aniqlash yetarli emas. Geteroatomli aralashmalar va beqaror to‘yinmagan komponentlar saqlash, korroziya, smolalanish hamda katalizator zaharlanishiga olib kelishi mumkin. TAN uchun “mg KOH/g”, suv uchun “% hajm” va aromatiklar uchun “massa foiz” yoki “xromatografik maydon foizi” bir-biridan farq qiladi [8, 9, 11, 17, 21].

2-jadval. Kislota soni, suv va aromatik ulush bo‘yicha manbaga bog‘langan qiymatlar

Ko‘rsatkich	Xomashyo / mahsulot	E’lon qilingan qiymat	Manba / sharh
Kislota soni (TAN)	PP, xom moy (CPPO)	5,82 mg KOH/g	[21], ASTM D974
Kislota soni (TAN)	PP, qayta ishlangan (UPPO)	0,54 mg KOH/g	[21], distillash + ishlov
Kislota soni (TAN)	Tijorat plastik chiqindi moyining ajratilgan fraksiyasi	12 mg KOH/g (eng yaxshi HHV ko‘rsatilgan fraksiya)	[14], barcha fraksiyalar uchun oraliq emas
Suv + cho‘kma	PE, birlamchi moy	0,39 hajm %	[18], ASTM D1796; sof suv emas
Suv + cho‘kma	PP, birlamchi moy	0,60 hajm %	[18], ASTM D1796; sof suv emas
Suv (alohida)	Aralash maishiy plastik moyi (xom va vakuum-distillangan)	<0,1 hajm % (har ikkisi)	[5], KS M ISO 3733; sof PE/PP emas
Aromatik komponentlar	PE-film piroliz moyi	1,0 monoaromatik + 0,1 naftenoaromatik massa %	[17], [7] bo‘yicha sharh ma’lumoti
Aromatiklar	PE/PP-aralash moyning yengil–o‘rta–og‘ir fraksiyasi	19%; 12%; 11% (mos ravishda)	[17], manbadagi guruhiy tarkib; aralash plastik oqimi
Aromatiklar	PP, Fe/kaolin katalitik jarayoni	27,9 → 72,3%	[19], shu tajriba sharoitidagi ko‘rsatkich

Izoh. “Suv + cho‘kma” ASTM D1796 bilan topilgan umumiy miqdor bo‘lib, Karl Fisher usulida aniqlangan sof suv foiziga teng emas. Alohida aromatik foizlarni universal ko‘rsatkich sifatida berish ilmiy jihatdan asossiz. Kislota soni bilan pH ham bir kattalik emas.

Yadav va hammualliflarning PP namunasida TAN 5,82 dan 0,54 mg KOH/g gacha kamaygan [21]. Chop etilgan shu ikkita qiymatdan hisoblangan nisbiy pasayish (5,82−0,54)/5,82×100 = 90,7% (muallifning qayta hisob-kitobi) bo‘lib, qayta ishlashning aynan ushbu namunadagi

ta’sirini ko‘rsatadi. Shu bilan birga mualliflar tozalangan namuna ham barcha me’yorlarga avtomatik ravishda mos emasligini, masalan, oltingugurt nazorati zarurligini qayd etgan [21].

Suvning mustaqil miqdori hamma tadqiqotlarda e’lon qilinmagan. Aralash maishiy plastmassa piroliz moyi va undan vakuumda ajratilgan mahsulotda suv miqdori <0,1 hajm % deb ko‘rsatilgan [5]; bu sonni sof PE yoki PP moyiga avtomatik ko‘chirish mumkin emas. [18] dagi 0,39 va 0,60 hajm % ko‘rsatkichlari esa “suv va cho‘kma” yig‘indisi bo‘lgani uchun ularni sof suv diapazoni deb ko‘rsatish xato. Laboratoriya natijasida suv va mexanik cho‘kmani alohida aniqlash talab etiladi [5, 11, 18].

Wang va hammualliflar 20 kg ko‘lamidagi vakuumli distillyatsiyada 74 fraksiyani ajratgan: yengil C_6–C_{11} kesimlarida 40 °C dagi qovushqoqlik 0,55–0,72 mm^2/s va HHV 42–45 MJ/kg, kerosinga yaqin C_{10}–C_{20} kesimlarda esa mos ravishda 1,07–2,53 mm^2/s hamda 44–45 MJ/kg bo‘lgan [15]. Zeb va hammualliflar PP moyi fraksiyalarida 70 massa % dan ko‘p izoolefinlarni qayd etgan [13]. Demak, birlamchi moyning umumiy ko‘rsatkichi tor distillyatning xossalarini avtomatik ifodalamaydi.

3.4. Ifloslantiruvchi komponentlar va analitik standartlar

Qayta ishlangan qadoqlash PE/PP chiqindilaridan olingan piroliz moylarida xlor, brom, azot, kislorod va metall aralashmalari aniqlangan. Kusenberg va hammualliflar bug‘li kreking tajribalarida begona qo‘shimchalar koks hosil bo‘lishi va texnologik barqarorlikni yomonlashtirishi mumkinligini ko‘rsatgan [7–9]. Shu sababli chiqindi oqimini FTIR/NIR bilan saralash, PVC/PET va ko‘p qatlamli materiallarni imkon qadar ajratish, suv va qoldiq iflosliklarni kamaytirish zarur. PP/PE asosli moylarning zichligi yoki HHV ko‘rsatkichlari tayyor benzin/dizel standarti talablariga javob berishining dalili emas [8, 9, 16].

3-jadval. O‘zbekiston sharoitida tavsiya etiladigan minimal tahlil dasturi

Bosqich	Tahlil usuli	Hisobotda qayd etilishi lozim bo‘lgan natija
Chiqindi xomashyo	ATR–FTIR/NIR, polimer saralash	PE/PP/PET/PVC ulushlari, tozalik, namlik
Birlamchi kondensat	GC–MS/GC×GC, GC–FID	C sonlari; parafin, olefin, dien, aromatik ulush; kalibrlash usuli
Fizik sifat	ASTM D4052, D445, D240	Zichlik (15 °C), ν (40 °C), HHV (MJ/kg)
Korroziya va suv	ASTM D664/D974, Karl Fisher	TAN (mg KOH/g), suv (mg/kg yoki wt%)
Ifloslik va xavfsizlik	XRF/ICP; Cl/S/N; ASTM D93	Cl/S/N/metallar; chaqnash harorati

Bosqich	Tahlil usuli	Hisobotda qayd etilishi lozim bo‘lgan natija
Fraksion ajratish	ASTM D86/D2887; massa balansi	IBP, T10/T50/T90, chiqish (massa %), qoldiq

Izoh. Usulning aniq turi, asbob kalibrlashi, takroriylik va namuna olish protokoli laboratoriya sharoitida belgilanadi [7–11, 13, 18, 21].

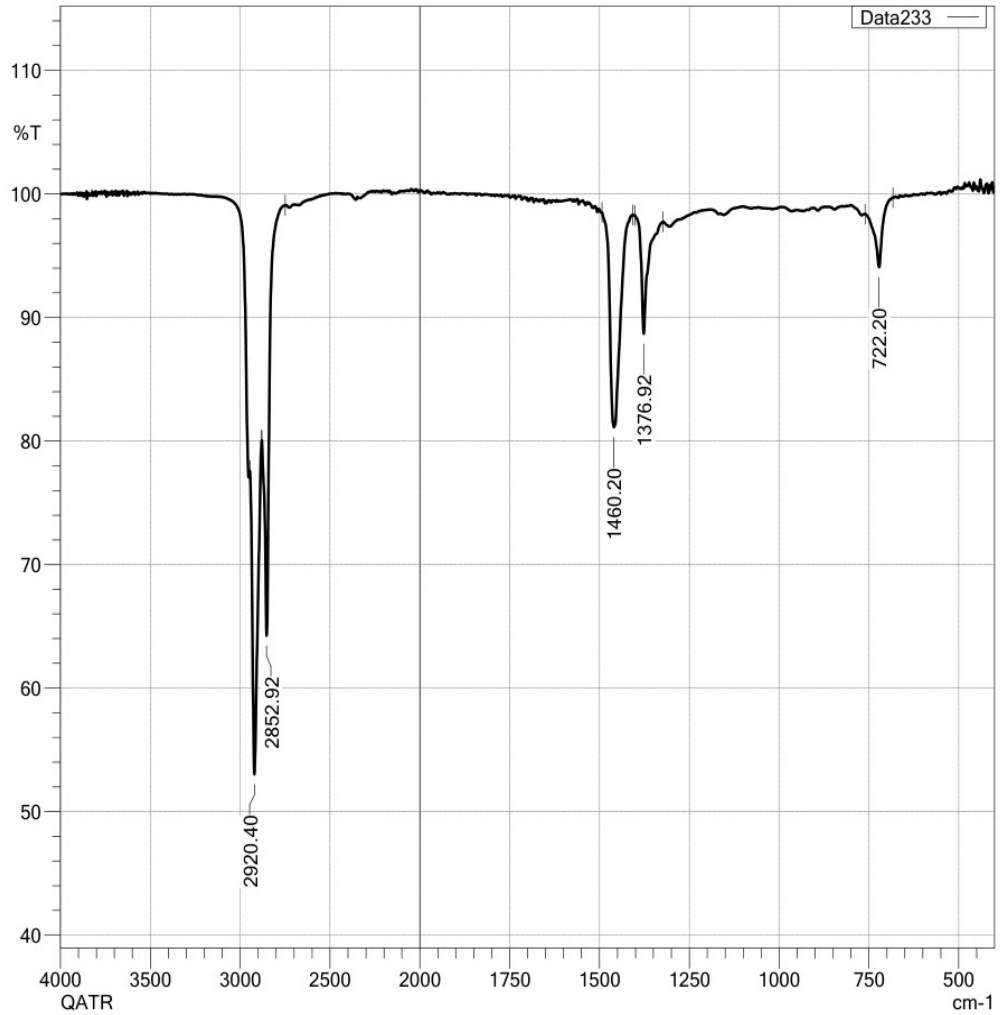
3.5. Laboratoriya namunasi FTIR spektrining tavsifi

“Data233” spektri 4000–500 sm^{-1} atrofidagi diapazonda qayd etilgan bo‘lib, asbob beshta asosiy yutilish chizig‘ini belgilagan. Eng kuchli signallar 2920,40 va 2852,92 sm^{-1} atrofida aniqlanadi; spektrda 1460,20, 1376,92 va 722,20 sm^{-1} dagi chiziqlar ham qayd etilgan (1-rasm). O‘lchangan to‘lqin sonlari va ehtimoliy tebranish turlari 4-jadvalda umumlashtirildi [10, 31, 32].

4-jadval. “Data233” namunasining FTIR yutilish chiziqlari va ehtimoliy funksional guruhlari

To‘lqin soni, sm^{-1}	Spektral belgi (ehtimoliy)	Ilmiy talqin
2920,40	CH_2 guruhining asimmetrik C–H valent tebranishi	Alifatik uglevodorod zanjirlariga xos signal
2852,92	CH_2 guruhining simmetrik C–H valent tebranishi	Metilen bo‘g‘inlari mavjudligiga mos
1460,20	CH_2 deformatsion (“scissoring”) tebranishi; CH_3 hissasi ham bo‘lishi mumkin	Alifatik CH_2/CH_3 guruhlarini qo‘llab-quvvatlaydi
1376,92	CH_3 guruhining simmetrik deformatsion tebranishi	Metil guruhlari borligiga mos; PP mahsuloti ekanini alohida isbotlamaydi
722,20	$(CH_2)n$ ketma-ketliklarining tebranma (“rocking”) harakati	Uzun metilen zanjirlari mavjudligiga mos

Izoh: guruhlar spektrdagi yutilish chiziqlariga xos taxminiy tayinlash asosida berilgan; biror chiziqning mavjudligi namunadagi komponentning massaviy ulushini aniqlamaydi [10, 31, 32].



1-rasm. “Data233” piroliz mahsuloti deb taqdim etilgan namunaning QATR–FTIR spektri. Manba: taqdim etilgan Shimadzu LabSolutions IR laboratoriya chiqishi (45 skan, ajrata olish qobiliyati 4 sm⁻¹).

FTIR tasvirida taxminan 1700 sm^{-1} dagi kuchli karbonil chizig‘i, 3200–3600 sm^{-1} sohasida aniq keng O–H chizig‘i va 1600 sm^{-1} atrofida alohida kuchli aromatik halqa chizig‘i ko‘zga tashlanmaydi. Biroq ushbu kuzatuvlar mazkur guruhlar umuman mavjud emasligini anglatmaydi: signal intensivligi, asbob sezgirligi, namuna konsentratsiyasi va chiziqlarning ustma-ust tushishi cheklov yaratadi. Shuning uchun spektrda alifatik CH_2/CH_3 guruhlari ustun namoyon bo‘lgan, degan sifat xulosasi asosli, ammo PE/PP nisbati yoki alkan–alken–aromatik massa ulushlari haqida aniq sonli xulosa chiqarish mumkin emas [10, 31, 32].

4. MUHOKAMA

4.1. Qayta ishlash yo‘nalishlarining texnologik tanlovi

Manbalar tahlili shuni ko‘rsatadiki, sanoatdagi ustuvor vazifa “maksimal piroliz moyi olish” emas, balki olinayotgan moy uchun aniq mahsulot yo‘nalishini tanlashdir. Poliolefin moylari molekulyar tuzilishiga ko‘ra yengil olefinlar olish uchun bug‘li kreking, maqsadli uglevodorod fraksiyalari

uchun distillash, aromatik boy fraksiyalar uchun ajratish va tegishli texnologik talablar bajarilgach yoqilg‘i komponenti sifatida foydalanish kabi variantlarga ega [6–15].

Kimyoviy qayta ishlashda kuchliroq yo‘nalish — poliolefin moyini iflosliklardan tozalash va neft-kimyo tizimiga xomashyo sifatida qaytarish. Kusenberg va hammualliflarning 2022-yilgi bug‘li kreking tajribalarida piroliz moyi/nafta aralashmalaridan etilen chiqishi taxminan 23–28 massa % bo‘lgan, biroq xom moydagi iflosliklar va olefinlar koks hosil bo‘lishini oshirgan [9]. Bu natija texnologiya prinsipial amalga oshishini ko‘rsatadi, ammo tozalash va iqtisodiy balansni chetlab o‘tishga asos bo‘lmaydi.

Agar suyuq fraksiyalar yonilg‘i komponenti sifatida ko‘rilsa, to‘yinganlik darajasi, chaqnash harorati, kislota soni, barqarorlik va yonilg‘i standartiga moslik birgalikda baholanishi kerak. Qayta ishlangan PP moyi TAN 90,7% ga kamaygan bo‘lsa-da, bu tadqiqotning natijasi har qanday distillyatga tatbiq etilmaydi; ayniqsa yonilg‘i uchun oltingugurt, aromatiklar va emissiyalar alohida tekshiriladi [16, 21].

4.2. O‘zbekiston uchun amaliy ahamiyat va cheklangan resurs bahosi

O‘zbekiston ekologiya idoralari e’lon qilgan 2025-yilgi axborotda mamlakatda yiliga o‘rtacha 1,8 mln tonna plastik chiqindi hosil bo‘lishi, 116 ta qayta ishlash korxonasi yiliga qariyb 130 ming tonnani qayta ishlashi qayd etilgan [29]. Boshqa rasmiy axborotda 2024-yilda 14,8 mln tonna maishiy chiqindi shakllangani ko‘rsatilgan [30]. Bu sonlar turli yil va hisoblash bazalariga tegishli, shuning uchun 2025-yil plastik hajmini 2024-yil jami chiqindi hajmiga qo‘shish yoki birini ikkinchisidan avtomatik hisoblash mumkin emas.

Milliy plastik chiqindining barchasi PE va PP dan iborat emas: PET, PVC, PS, ko‘p qatlamli qadoqlar hamda mexanik qayta ishlashga yaroqli polimerlar mavjud. Shuning uchun 1,8 mln tonnani to‘lig‘icha piroliz xomashyosi deb qabul qilish noto‘g‘ri. Dastlab mintaqalar bo‘yicha chiqindining morfologik tarkibi, saralashdan keyingi PE/PP massasi va ifloslanish darajasi aniqlanishi zarur [29, 30].

Mahalliy neft-kimyo amaliyotida Uz-Kor Gas Chemical kompaniyasining uglevodorodlar bug‘li pirolizi bilan bog‘liq distillyat, piroliz moyi va og‘ir smola mahsulotlari ilmiy ishlarda tavsiflangan [24, 26]. Jo‘rayeva va hammualliflar ikkilamchi mahsulotlar haqida ochiq maqolasida yillik 100 ming tonnadan ortiq yengil piroliz distillyati, 8 ming tonna atrofida piroliz moyi va 10 ming tonnadan ortiq tar-mahsulot haqidagi ko‘rsatkichlarni keltiradi [24]. Bular korxonaning mustaqil tekshirilgan amaldagi ishlab chiqarish hisobotlari emas, maqolada bayon etilgan ikkilamchi ma’lumotlardir. Mazkur oqimlar poliolefin chiqindilarini qayta piroliz qilish natijasi emasligini alohida ta’kidlash lozim.

O‘zbekiston uchun amaliy ustuvorlik: mexanik qayta ishlash mumkin bo‘lgan chiqindini saralash orqali ajratish, qolgan PE/PP oqimi sifatini standartlashtirish, kichik pilot piroliz va ajratish tizimida material-energiya balansini olish, mahalliy neft-kimyo iste’molchilarining xomashyo spetsifikatsiyalari bilan solishtirish hamda ekologik baholashni bajarish [8, 12, 23, 29]. PE/PP chiqindisi pirolizi bilan bug‘li piroliz korxonasining pirokondensatini birlashtirish faqat alohida moslik va sinovlar asosida muhokama qilinishi mumkin.

4.3. Adabiyotda keltirilgan namunani qayta hisoblash: miqdoriy misol

Taqdim etilgan namuna bo‘yicha faqat FTIR protokoli mavjudligi, uning zichligi va boshqa ko‘rsatkichlari o‘lchanmagani uchun ushbu bo‘limda e’lon qilingan bitta PP piroliz moyi juftligi mustaqil arifmetik qiyoslandi: 2026-yilgi tadqiqotda 15 °C dagi zichlik 0,799 → 0,812 g/sm³ (+1,63%); 40 °C dagi qovushqoqlik 2,126 → 3,385 mm²/s (+59,2%); HHV 44,88 → 45,99 MJ/kg (+2,47%); TAN 5,82 → 0,54 mg KOH/g (−90,7%) o‘zgargan [21]. O‘zgarish foizlari mazkur maqola muallifining e’lon qilingan ko‘rsatkichlar asosidagi hisob-kitoblaridir; yangi fizik-kimyoviy o‘lchash natijasi emas.

Bu misol TAN kamayishi bilan birga qovushqoqlik oshishi mumkinligini ko‘rsatadi: sifatni bitta ko‘rsatkich bilan baholash yetarli emas. Toshkent yoki Buxoroda olinadigan aniq chiqindi oqimi uchun yuqoridagi sonlarni “mahalliy tajriba natijasi” deb qo‘llash mumkin emas. Keyingi tadqiqotda kamida uch mustaqil takror bilan bitta identifikatsiya qilingan PE/PP namunasini olish, mahsulot chiqishini massa balansi bilan tekshirish hamda GC–MS, ASTM D4052, D445, D664/D974 va distillash orqali tasdiqlash taklif etiladi.

4.4. FTIR tajribasining adabiyotlar bilan qiyosiy muhokamasi

Taqdim etilgan spektrdagi 2920 va 2853 sm^{-1} chiziqlari poliolefinlarga oid ilmiy manbalarda qayd etilgan alifatik C–H signallari bilan mos keladi. Wu va hammualliflar polietilen uchun 2916, 2848, 1467 va 721 sm^{-1}; polipropilen uchun esa 2947, 2924, 2846, 1448 va 1379 sm^{-1} atrofidagi xos yutilishlarni ko‘rsatgan [10]. Shunga yaqin to‘lqin sonlari piroliz moylari hamda polimerlar spektrlarida kuzatilishi mumkin [31, 32]. Ayniqsa 722,20 sm^{-1} chizig‘i metilen bo‘g‘inlarining uzun ketma-ketliklarini, 1376,92 sm^{-1} signali esa metil guruhlarini qo‘llab-quvvatlaydi. Lekin ushbu ikki belgi bilan xomashyoni HDPE, LDPE yoki PP deb aniq tanish, shuningdek, mahsulotni distillyat yoki birlamchi kondensat deb ajratish mumkin emas. Bu identifikatsiya uchun xomashyo pasporti va GC–MS/GC–FID hamda fraksion haydash ma’lumotlari talab etiladi.

Spektrning namuna kodi, ishlab chiqarish obyekti, olingan sana, namuna olish usuli, reaksiya harorati, fraksiya raqami va holati haqidagi ma’lumotlar keltirilmagan. Shu bois uning maqoladagi vazifasi poliolefin

piroliz moyining kelib chiqishini isbotlash emas, balki piroliz mavzusidagi alifatik guruhlarga oid amaliy FTIR kuzatuvni bayon qilishdir. Mazkur cheklov jurnal ekspertizasi uchun oshkora ko‘rsatildi.

4.5. Tahlilning chegaralari va ma’lumotlarning ishonchliligi

Adabiyotlarda piroliz reaktorlari (davriy, uzluksiz, qatlamli yoki katalitik), xomashyo tarkibi, harorat, sovitish usuli va namunani saqlash sharoitlari farq qiladi. Shu sababli jadvallardagi eng kichik va eng katta qiymatlar bir necha ilmiy ishlarni umumlashtiradi, taqqoslashning statistik ishonch oralig‘i yoki texnik spetsifikatsiya emas. “Suv+cho‘kma” natijasi Karl Fisher usulidagi suv o‘lchovi bilan almashtirilmaydi; pH TAN bilan birlashtirilmaydi; GC–MS maydon foizi hamma hollarda massa foizi bo‘la olmaydi. O‘zbekiston bo‘yicha ochiq manbalarda poliolefin chiqindilarini bevosita piroliz qiluvchi korxonalar uchun verifikatsiya qilingan milliy ishlab chiqarish hajmlari topilmagani sababli bunday hajm maqolada to‘qib chiqarilmadi.

5. XULOSA

1. Polietilen va polipropilen pirolizidan olingan suyuq mahsulotlar tarkiban farqlanadi: PE-da chiziqli parafin va olefinlar, PP-da esa shoxlangan olefin va dienlarning ulushi yuqoriroq bo‘lishi mumkin. 2022-yilgi pilot tadqiqotda PP-ga boy moyda ~63% shoxlangan olefin va ~20% dien, PE-ga boy moyda esa ~34% chiziqli parafin va ~26% chiziqli olefin qayd etilgan [7].

2. Chop etilgan ayrim PE/PP piroliz moylari uchun zichlik 0,79–0,844 g/sm³ (15 °C), qovushqoqlik 1,25–6,54 mm²/s (usullari to‘liq bir xil emas) hamda HHV 41,2–47,1 MJ/kg oralig‘ida bo‘lgan. Bu raqamlar sifat standarti emas; xomashyo va tahlil harorati nazorat qilinishi shart [16, 18, 21].

3. Birlamchi PP moyini qayta ishlash misolida TAN 5,82 dan 0,54 mg KOH/g gacha pasaygan (qayta hisoblangan kamayish 90,7%). Biroq bir vaqtning o‘zida qovushqoqlik o‘sgan; shu sababli kislota soni bilan birga fraksion tarkib, suv, aromatiklar va ifloslantiruvchi elementlar tekshiriladi [21].

4. O‘zbekiston uchun yo‘nalish plastik chiqindilarni morfologik saralashdan boshlanib, qayta ishlashga yaroqsiz PE/PP oqimlari uchun pilot piroliz, fraksiyalash va kimyoviy xomashyo sifatini baholash bilan davom etishi lozim. Rasmiy manbalardagi 1,8 mln tonna/yil plastik chiqindi barcha turlarga tegishli; uni to‘liq PE/PP piroliz xomashyosi deb hisoblash mumkin emas [29, 30].

5. Neft-kimyo bug‘li pirolizi pirokondensati bilan plastik chiqindi piroliz moyi kelib chiqishiga ko‘ra boshqa-boshqa oqimlardir. Ularni faqat manba, tarkib va o‘lchash usullari mos bo‘lgandagina qiyoslash mumkin [24, 26].

6. Qo‘shimcha tahlil qilingan “Data233” FTIR spektrida 2920,40; 2852,92; 1460,20; 1376,92 va 722,20 sm^{-1} dagi signallar alifatik metilen va metil guruhlari mavjudligini ko‘rsatdi. Biroq spektr protokolida namunaning xomashyo manbasi va identifikatori yo‘qligi bois ushbu kuzatuv orqali aynan PE/PP pirolizi kelib chiqishi, individual uglevodorodlar ulushi yoki yonilg‘i standartlariga muvofiqligi tasdiqlanmadi. Ilmiy natijani mustahkamlash uchun ushbu namunaning GC–MS, zichlik (15 °C), qovushqoqlik (40 °C), kislota soni, suv miqdori va fraksion tarkibini aniqlash zarur.

MA’LUMOTLAR VA MUALLIFLIK BAYONOTI

Maqolada ilmiy adabiyotlar, rasmiy statistik ma’lumotlar va tadqiqot uchun taqdim etilgan bitta QATR–FTIR laboratoriya protokoli tahlil qilindi. “Data233” belgili spektrning raqamli to‘lqin sonlari dastlabki asbob chiqishidan olindi; namunaning identifikatori va xomashyo manbasi protokolda keltirilmagan. 4.3-bo‘limdagi foizli o‘zgarishlar boshqa mualliflar chop etgan qiymatlar asosida hisoblandi. Mazkur tadqiqot doirasida GC–MS, zichlik, qovushqoqlik, kislota soni, suv miqdori va fraksion tarkib bo‘yicha mustaqil o‘lchovlar ko‘rsatilmagan. Jurnalga topshirishda muallifning ish joyi, ORCID, spektrga egalik yoki foydalanish ruxsati, moliyalashtirish va manfaatlar to‘qnashuvi haqidagi ma’lumotlar to‘ldiriladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Anuar Sharuddin S. D., Abnisa F., Wan Daud W. M. A., Aroua M. K. A review on pyrolysis of plastic wastes. Energy Conversion and Management. 2016;115:308–326. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037
2. Maqsood T., Dai J., Zhang Y., Guang M., Li B. Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2021;159:105295. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105295
3. Gebre S. H., Sendeku M. G., Bahri M. Recent Trends in the Pyrolysis of Non-Degradable Waste Plastics. ChemistryOpen. 2021;10(12):1202–1226. https://doi.org/10.1002/open.202100184
4. Sekar M., Ponnusamy V. K., Pugazhendhi A., Nižetić S., Praveenkumar T. R. Production and utilization of pyrolysis oil from solid plastic wastes: A review on pyrolysis process and influence of reactors design. Journal of Environmental Management. 2022;302:114046. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114046
5. Jang J. H., Kim H. J., Kim J. H., Lee J. E., Jang H. S., Kang S. H. Evaluation of Waste-Plastic Pyrolysis Oil as a Potential Feedstock for Lubricant Base Oil Production via Hydroprocessing. Sustainability. 2026;18(5):2655. https://doi.org/10.3390/su18052655

6. Erkmen B., Ozdogan A., Ezdesir A., Celik G. Can Pyrolysis Oil Be Used as a Feedstock to Close the Gap in the Circular Economy of Polyolefins? Polymers. 2023;15(4):859. https://doi.org/10.3390/polym15040859
7. Kusenberg M., Zayoud A., Roosen M., et al. A comprehensive experimental investigation of plastic waste pyrolysis oil quality and its dependence on the plastic waste composition. Fuel Processing Technology. 2022;227:107090. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107090
8. Kusenberg M., Eschenbacher A., Djokic M. R., et al. Opportunities and challenges for the application of post-consumer plastic waste pyrolysis oils as steam cracker feedstocks: To decontaminate or not to decontaminate? Waste Management. 2022;138:83–115. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.009
9. Kusenberg M., Roosen M., Zayoud A., et al. Assessing the feasibility of chemical recycling via steam cracking of untreated plastic waste pyrolysis oils: Feedstock impurities, product yields and coke formation. Waste Management. 2022;141:104–114. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.01.033
10. Wu J., Jiang Z., Cecon V. S., Curtzwiler G., Vorst K., Mavrikakis M., Huber G. W. The effects of polyolefin structure and source on pyrolysis-derived plastic oil composition. Green Chemistry. 2024;26:11908–11923. https://doi.org/10.1039/D4GC04029E
11. Serras-Malillos A., Perez-Martinez B. B., Iriondo A., Acha E., Lopez-Urionabarrenechea A., Caballero B. M. Quantification of the composition of pyrolysis oils of complex plastic waste by gas chromatography coupled with mass spectrometer detector. RSC Advances. 2024;14:9892–9911. https://doi.org/10.1039/D4RA00226A
12. Gao W., Chang Y., Zhou Q., et al. Chemical recycling of polyolefin waste: from the perspective of efficient pyrolysis reactors. Frontiers of Chemical Science and Engineering. 2024;18(12):147. https://doi.org/10.1007/s11705-024-2498-x
13. Zeb W., De Somer T., Roosen M., et al. Fractional distillation of waste plastic pyrolysis oil for isolating narrow hydrocarbons cuts. Fuel. 2025;379:133055. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133055
14. Lee D., Nam H., Wang S., et al. Characteristics of fractionated drop-in liquid fuel of plastic wastes from a commercial pyrolysis plant. Waste Management. 2021;126:411–422. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.020
15. Wang S., Lee D., Kim H., Hwang B. W., Nam H., Ryu H.-J. Separation of MSW pyrolysis fuel using 20 kg scale vacuum distillation system and its potential application as petro-chemical substitute. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022;10(5):108416. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108416
16. Pumpuang A., Klinkaew N., Wathakit K., Sukhom A., Sukjit E. The influence of plastic pyrolysis oil on fuel lubricity and diesel engine performance. RSC Advances. 2024;14:10070–10087. https://doi.org/10.1039/D3RA08150H

17. Catizane C., Jiang Y., Sumner J. Improving plastic pyrolysis oil quality via an electrochemical process for polymer recycling: a review. Energy Advances. 2024;3:366–388. https://doi.org/10.1039/D3YA00389B

18. Palmay P., Haro C., Huacho I., Barzallo D., Bruno J. C. Production and Analysis of the Physicochemical Properties of the Pyrolytic Oil Obtained from Pyrolysis of Different Thermoplastics and Plastic Mixtures. Molecules. 2022;27(10):3287. https://doi.org/10.3390/molecules27103287

19. Nechipurenko S., Dossumova B., Efremov S., et al. Polyethylene and Polypropylene Pyrolysis Using Fe3+-Modified Kaolin Catalyst for Enhanced Gas and Pyrolysis Oil Production. Polymers. 2025;17(21):2963. https://doi.org/10.3390/polym17212963

20. Koti A., Khongprom P., Ratanawilai S. Catalytic Pyrolysis Oil from Landfilled Plastics through Ni/HZSM-5 and Co/HZSM-5 Catalysts. ACS Omega. 2025;10(6):5744–5755. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09247

21. Yadav A. K., Maity S., Yadav S. K., Madav V., Kumar G. N., Dutta S. Transforming plastic waste into liquid fuels: novel upgrading of polypropylene pyrolysis oil and its utilization in a diesel engine. RSC Advances. 2026;16:21693–21704. https://doi.org/10.1039/D5RA09026A

22. Yaqoob H., Ali H. M., Khalid U. Pyrolysis of waste plastics for alternative fuel: a review of key factors. RSC Sustainability. 2025;3:208–218. https://doi.org/10.1039/D4SU00504J

23. Ergashev Y., Saydaxmedov Sh. Maximizing Liquid Product Yield from Plastic Waste Pyrolysis through Experimental Optimization of Process Conditions. Qo‘qon DPI. Ilmiy xabarlar jurnali. 2026;8(8):451–460. https://doi.org/10.70728/a.series.tab.v08.i08.057

24. Jo‘rayeva L. R., Norqulov S., Rahmonov A. Uglevodorodlar pirolizi ikkilamchi mahsulotlarini qayta ishlash va ular asosida pirokondensatlar olish. Models and Methods in Modern Science. 2025. https://doi.org/10.5281/zenodo.15447905

25. Xushboqov A. B., Chorshanbiyev A. Z., Soatov E. H., Odinaboyev D. A. Piroliz moyining xossalari va tarkibini o‘rganish. Journal of Universal Science Research. 2024;2(6). https://inlibrary.uz/index.php/universal-scientific-research/article/view/34989

26. Джураева Л. Р., Кодиров О. Ш. Исследование химического состава пиролизного масла вторичного продукта производства СП ООО «Uz-Kor Gas Chemical». Universum: технические науки. 2022;4(97):44–48. https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13368

27. Путенихин И. О., Худобородова А. В., Шефиев А. М., Жагфаров Ф. Г. Состояние каталитического пиролиза в Российской Федерации. 2020. https://doi.org/10.24411/2310-8266-2020-10107

28. Сотникова В. Г., Загиров А. Н., Гурьянов Д. А., Ланкин К. А., Хабибуллина А. Р. Обзор существующих установок для производства пиролизного топлива. 2023;3:117–122. https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-3-117-122

29. O‘zbekiston Respublikasi Sanitariya va chiqindilarni boshqarish idorasi. “15% of Municipal Solid Waste in Uzbekistan Consists of Plastic Waste”. 2025. https://gov.uz/en/sanitation/news/view/102286 (murojaat: 20.10.2026).
30. O‘zbekiston Respublikasi Ekologiya vazirligi. “Waste recycling in Uzbekistan: a step towards a Green Economy”. 2025 (2024-yil bo‘yicha ma’lumot). https://gov.uz/en/eco/news/view/38417 (murojaat: 20.10.2026).
31. Nisar J., Aziz M., Shah A., Shah I., Iqbal M. Conversion of Polypropylene Waste into Value-Added Products: A Greener Approach. Molecules. 2022;27(9):3015. https://doi.org/10.3390/molecules27093015
32. Kasar P., Ahmaruzzaman M. Characterization of liquid products obtained from catalytic binary co-cracking of residual fuel oil with various waste plastics. Scientific Reports. 2022;12:10987. https://doi.org/10.1038/s41598-022-15371-8