

Ez zurekin, ez zu gabe, plastikoen dilema

(Neither with you nor without you... the plastics dilemma)

Alazne Gutiérrez*, David Trueba, Iratxe Crespo, Roberto Palos

Ingeniaritza Kimikoa Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea, Leioa

LABURPENA: Plastikoen erabilera-zikloa oso laburra da eta, haren hondakinak tratatzeko plana, eskasa. Bistan da, beraz, gure garaiko arazo sozio-ekonomiko zein ingurumen- eta osasun-arazo handienetako baten aurrean gaudela. Artikulu honetan begiratu orokorra eman zaio plastikoen merkaturari, non aurreko hamarkadetan plastiko-produkzioa izugarri handitu den. Merkatu horri lotutako bi arazo nagusiak jorratzen dira lan honetan, alegia, berotegi-efektuko gasen emisioa plastikoen ekoizpenean eta erregai fosilekiko mendekotasuna (deskarbonizaziotik aldenduz) eta kudeaketa negargarria duten hondakinen ekoizpena. Plastiko-hondakinen sorrera da arazo nagusia; izan ere, estatistikei kasu eginez gero, 2030 urterako 280 milioi tona plastiko egongo omen dira zabortegei zein itsasoetan, elikadura-katean sarturik, ez baitago sortutako hondakinei aurre egiteko estrategiarik. Lan honetan aurkezten den legez, ekoiztutako plastikotik % 30 bakarrik birziklatzen da, % 49,5 erraustu eta gainerako % 23,5 zabortegira bidaltzen da zuzenean. Beraz, ekonomia zirkularra izango omen da bidegurutze honetatik irteteko bide bakarra, alegia, plastikoa hondakin bihurtzeari utzea. Horiek horrela, handitu egin da interesa plastikoak balioberritzeko estrategia berrien inguruan. Egungo ikerkuntzak bi ildo nagusi erakusten ditu: batetik, prozesu termokimikoak, pirolisia eta gasifikazioa; eta bestetik, krakeoa eta hidrokrakeoa. Lan honetan, plastikoak balioberritzeko teknologia horiek erabiltzen dituzten adibide batzuk azaltzen dira.

GAKO-HITZAK: Ekonomia zirkularra, 5R, hondakin-plastikoak, birziklatze kimikoa, plastikoak berreskuratzea, plastikoen birziklapena.

ABSTRACT: The life cycle of plastic is very short and the treatment plan for its waste is scarce. It is therefore clear that we are facing one of the greatest socio-economic, environmental and health problems of our time. This article reviews the general situation of the plastics market, where in previous decades plastic production has increased drastically, and discusses the two main associated problems, (i) dependence on fossil fuels (moving away from decarbonization) and the consequent emission of greenhouse gases, and (ii) the production of waste, the management of which is disastrous. The main problem is the generation of plastic waste, since, for example, by 2030 there will be 280 million tons of plastics in landfills and seas, incorporating them into the food chain, as there is no strategy to deal with the waste generated. As presented in the paper, of the plastic produced only 30% is recycled, 49.5 % is incinerated and the remaining 23.5% is sent directly to landfills. Therefore, the circular economy will be the only way out of this crossroads, preventing plastic from becoming waste. Thus, interest in new strategies for the recovery of plastics is being encouraged. Current research has two main lines: thermochemical processes, pyrolysis and gasification, on the one hand, and cracking and hydrocracking, on the other. This paper reviews the latest research that has been carried out using these technologies in reference to the valorization of plastics.

KEYWORDS: circular economy, 5R, plastic waste, chemical recycling, plastics recycling, plastics recovery.

* **Harremanetan jartzeko/Corresponding author:** Alazne Gutiérrez, Ingeniaritza Kimikoa saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea, Sarriena auzoa, z/g (48940-Leioa).  <https://orcid.org/0000-0002-5252-6691>, alazne.gutierrez@ehu.es

Nola aipatu/How to cite: Gutiérrez, Alazne; Trueba, David; Crespo, Iratxe; Palos, Roberto (2025). «Ez zurekin, ez zu gabe, plastikoen dilema», *Ekaia*, 48, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1387/ekaia.27144>

Jasoa: abenduak 02, 2024; Onartua: martxoak 28, 2025

ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © UPV/EHU Press



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-PartekatuBerdin 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

Plastikoak material polimeriko organikoak dira, molekula organiko oso handiez osaturik daudenak. Plastikoeak askotariko forma eta propietateak izan ditzakete, ematen zaien fabrikazio- eta moldekatze-tratamenduaren arabera. Material horien propietateen artean azpimarratzekoak dira iraunkortasuna, korrosioarekiko erresistentzia eta isolamendu termiko eta elektrikorako gaitasuna [1]. Ezaugarri horiek direla eta, aplikazio ugari garatu dira azken urteotan nekazaritzan, industrian, eraikuntzan, ontzigintzan bai eta medikuntzan ere [2]. Gizartearen bizi-kalitatea nabarmen handitzen dutenez, plastikoaren industria nabariki garatu da azken mendean, dituzten propietateak optimizatu eta aplikazioak etengabe eguneratu nahian. Ondorioz, sektore hau oparo eta zabalduenetako bat bihurtu da mundu mailan. Hazkunde horren ondorio izan dira enpleguaren sorrera eta finantza publikoetarako ekarpena. Izan ere, plastikoaren industria, duen negozio-bolumen handia dela eta, industria-balio erantsiaren ekarpenaren buruan dago gaur egun.

Hala ere, plastikoen ugaritzeak hainbat ingurumen-arazo larri eragin ditu: ozeanoak eta gainerako ur-masak kutsatzea (ibaiak, aintzirak...), hondakin plastikoak zabortegetan pilatzea edo fauna basatia mehatxatzea, besteak beste. Problematika hori, gainera, areagotzen ari da etengabe, plastikoen erabilera handitzen duten hainbat faktorerengatik, besteak beste populazioa eta haren kontzentrazioa handitu direlako. 2020an munduak 7.700 milioi biztanle zituen, eta kopuru hori 2050ean 9.700 milioira iristea espero da, landa-eremuetatik hirietarako migrazioak bultzatuta, 1950ean % 30 izatetik 2023an % 68 izatera igaro baita. Kontsumo-gizartean oinarritutako egungo bizimoduak ere badu eragina; izan ere, ekoizpen masiboan eta balio-bizitza laburreko ondasunen kontsumoan oinarritutako eredu ekonomikoa du ezaugarri [3].

Hortaz, plastikoak gure bizitzak kolonizatu ditu eta plastikoz inguratuta gaude. Nonahi aurki ditzakegu plastikoak: etxean, ibilgailuetan, bulegoetan, ospitaleetan edo aisialdirako lekuetan. Hala ere, nonahiko presentzia horrek kostu esanguratsua du gure planetarentzako eta bertako biztanleen osasunerako. Artikulu honetan, plastikoen erabilera masiboak dituen ondorioak aztertuko ditugu, besteak beste klima-aldaketan, ozeanoen kutsaduran eta ingurumenaren degradazioan duen eragina; baita giza osasunerako arriskuak ere. Arazo global hori konpontzeko balio dezaketen hainbat neurri laburbiltzen ditugu hemen.

2. PLASTIKOEN INDUSTRIA ETA MERKATUA

Gaur egun, klima-aldaketa eta bestelako ingurumen- eta osasun-arazoak direla eta, arretaz ebaluatu behar da plastikoen industria. Izan ere, plastikoen ekoizpenak lehengai, prozesu eta amaierako gehigarri ugari har-

tzen ditu barne eta, beraz, hornikuntza-katearen atal guztiak aztertuko dituen ikerketa egin behar da [4]. Plastikoen birjinen ekoizpenak eragin nabarmena du petrolioaren ustiapenean. Adibidez, olefina arinen eskariaren erdia baino gehiago, etilenoarena eta propilenoarena kasu, plastikoen fabrikatzera bideratzen da [5]; eta olefina horiek gas naturalaren eta petrolio gordinaren prozesatze katalitikotik datoz, nagusiki [6, 7]. Are gehiago, CO₂-aren emisioen % 15 ekoizpen kimiko primariotik dator [8]. Plastikoen ekoizteko erabiltzen diren balio handiko produktu kimikoek (HCV) emisio horien % 27 sortzen dute; hau da, industria-emisio globalen % 4,05 gutxi gorabehera. HVC horiek etilenoa, propilenoa, bentzenoa, toluenoa, xilenoa eta estirenoa hartzen dituzte barne.

Plastikoen ekoizpena etengabe handitu da 1930eko hamarkadan merkatuan lehen aldiz agertu zirenetik. 2021an, 394,2 milioi tonara iritsi zen plastikoen munduko ekoizpena; 2022an, 400,4 milioi tonara; eta 2023an, 413,8 milioi tonara [9]. Hau da, plastikoen munduko ekoizpena % 3 inguru hazi da azken aldian, nahiz eta eskualde garatuak plastikoen birjinen murrizketaren abangoardian izan. Ekoizpen horrek lotura zuzena du petrolioaren inportazio handieneko eskualdeekin. Asia da nagusi plastikoen ekoizpenean, % 55,8rekin, eta Txina da munduko plastikoen ekoizpenaren % 33,3ren eragilea. Bestalde, Estatu Batuek, Mexikok eta Kanadak (USMCA) % 17,1 ekoizten dute, Europak % 12,3, eta gainerako ekoizpena Ekialde Hurbilaren, Afrikaren eta Latinoamerikaren artean banatzen da. Aipagarria da 2020an plastikoen ekoizpenaren hazkundera gelditu egin zela, COVIDaren ondorioz giza jarduera partzialki gelditu baitzen. Ekoizpena 367 Tm-ra mugatu zen. Hala ere, ekoizpenaren banaketa-mapan ez zen aldaketa nabarmenik izan.

Hala eta guztiz ere, plastikoen eskariari buruzko txostenek hazkunderako joera etengabea erakusten dute plastikoen eskarian. Hortaz, esku hartzen ez bada, hirukoiztu egingo da plastikoen erabilera etorkizun hurbilean, batez ere biztanleriaren hazkundera, diru-sarrerek eta gizartearen garapenak bultzatuta [10]. Adibide esanguratsua da 2020ko datuek erakusten dutela Europako 6 herrialde handienek plastikoen merkatuaren ia % 70 biltzen dutela. Gainera, merkatu horren eta industria-jardueraren artean lotura zuzena dagoela ondorioztatzen da, polimeroen eskaria sektoreka aztertuz gero: % 40,5 ontzietan metatzen da, % 20,4 eraikuntzarekin lotuta dago, % 8,8 automobilgintzak eskatzen du, eta gainerakoa sektore txikiagoen artean banatzen da, hala nola nekazaritzan eta eguneroko kontsumo-produktuetan.

3. PLASTIKOEN KONTSUMO MASIBOARI LOTUTAKO ARAZOAK

Esan bezala, plastikoen merkatua gorantz doan merkatua da, eta ez dirudi joera hori aldatuko denik, epe ertain-laburrean behintzat. Hori da

aurreikuspena, plastikoen salerosketa masiboari hainbat alde kaltegarri egotz badakizkioke ere.

Plastikoen produkzio masiboak petrolio-baliabideen ustiapen intentsiboa dakar, eta horrek deskarbonizaziorako helburuak oztopatzen ditu. Petrolio gordinetik plastikoak ekoizteak berriztagarriak ez diren baliabideak agortzen ditu, eta erregai fosilekiko mendekotasuna areagotzen du. Nazioarteko Energia Agentziaren txosten baten arabera [11], datozen hamarkadetan espero da industria petrokimikoa —plastikoen ekoizpena barne hartzen duen industria, alegia— eragile nagusia izatea petrolio gordina-ren eskariaren hazkundean. Horrek erregai fosilekiko mendekotasuna areagotzen du, eta horrez gain, ondorio larriak ditu energia-segurtasunean eta klima-aldaketan. Energia Segurtasunari buruzko Ikerketa Zentroak (CESE) [12] egindako ikerketa baten arabera, gero eta handiagoa da produktu petrokimikoen eta, bereziki, plastikoen eskaria, eta horrek areagotu egin dezake ekonomien kalteberatasuna petrolioaren prezioen aldakortasunaren aurrean eta energia-iturri ez-berriztagarriekiko mendekotasunaren aurrean. Are gehiago, plastikoen ekoizpena berotegi-efektuko gasen (BEG) emisioarekin ere lotuta dago, eta beraz, klima-aldaketarekin [13]. Izan ere, plastikoen fabrikazioak berotegi-efektuko gas ugari isurtzen ditu, eta lehengaiak erauzten direnetik plastikoak ekoizten eta garraiatzen diren arte energia kantitate handiak kontsumitzen dira eta CO₂ ugari askatzen da.

Bestalde, plastikoen ekoizpenak hondakin solidoen kantitatea handitza dakar ezinbestean. Plastikoen gehienak bizitza erabilgarria 1 eta 35 urte artekoa denez [14], plastiko-hondakinek ere gora egingo dute plastiko horien bizitza baliagarria bukatu ostean. Plastikoen eragindako kutsaduraren barnean kontuan hartu behar dira plastikoak biltegitratzen diren eremuaren ingurumenean eragin negatiboa duten jardura guztiak. Eragin negatiboa biodegradagarritasun txikiaren ondorioa da; izan ere, normalean erabili ohi diren plastikoetako bat bera ere ez da biodegradagarria. Plastikoen gure ekosisteman eragiten dituzten ondorio kaltegarriak askotarikoak dira, eragin zuzena izan baitezakete substantzia toxikoak askatuz edo inguruan dauden beste kutsatzaile batzuk garraiatuz [15]. Gainera, lurzoruen propietateak aldatzen dituzte, tokiko animalien eragin negatiboa dute [16] eta itsasoko populazioari kalte egiten diote [17]. Are gehiago, zabortegetan utzitako plastiko-hondakinak pixkanaka mikro- eta nanoplastikotan zatikatzen dira deskonposizio mekaniko eta mikrobianoaren, aire zabalaren, fotolisiaren eta urraduraren ondorioz. Mikroplastikoak (MP) 5 mm baino gutxiagoko diametroko partikulak dira, eta nanoplastikoak (NP), 0,001 mm baino gutxiagoko diametrokoak. Hondakin horiek larriagotu egiten dituzte aurrez aipatutako arazo guztiak, eta areagotu egiten dute giza osasunean eta lurreko eta uretako ekosistemetan duten eragina [18]. Ozeanoetan 243.000 Tm mikroplastiko daude, apurka eratorri direnak zabortegetan utzitako plastikoen zatikatzetik eta hainbat kontsumo-produktutatik, hala nola mikroperletatik,

kapsuletatik, zuntzetatik, kosmetikoetatik, garbiketa-produktuetatik, pintu-retatik [19]. Organismo biziek irensten dituzten material horiek azalera espezifikoa handia dute eta hidrofoboak dira. Horrek erraztu egiten du uretan dauden substantzia kimiko toxikoen eta agente patogenoen adsortzioa. Ezagunak dira uretako organismoengan mikroplastikoek dituzten ondorio kaltegarriak, hala nola hazkuntzaren eta garapenaren inhibizioa, erantzun neurotoxikoak, nahasmendu metabolikoak eta genotoxikotasuna [20, 21].

Argi dago mikroplastiko eta nanoplastikoekin kutsatutako elikagaiak jateak arrisku potentzialak dituela gizakientzat, horiek baitira kate trofiko azken elementuak. Aztertu da arrisku horiek nanoplastikoen eta mikroplastioen konposizioarekin eta kontzentrazioarekin duten mende-kotasuna [22]. Giza osasunerako beste hainbat arrisku ere ekar ditzake zabortegetan plastikoak pilatzeak, deskonposizio-gasen eta usaien eraginean egoteagatik, bai eta nanoplastiko eta mikroplastikoak arnasteagatik ere. Gainera, plastikoen pilaketarekin sustatu egiten da gaixotasunak transmitzeko arriskua areagotu dezaketen espezieen ugalketa, adibidez arratoiena eta eltxoena.

Ikuspuntu ekonomikotik, metaketa mugagabe horrek inpaktu bisual eta estetiko negatiboa sortzen du: paisaiaren ikuspegi desatsegina eta estetika gutxikoa sortzen du, izan ere. Hori dela eta, hurbileko propietateen balioa eta inguruko eremuen erakargarritasuna gutxitzen da. Gainera, baliabide baliotsuak alferrik galtzea dakar plastikoak zabortegetan uzteak, bai eta eraginkortasun eskasa ere baliabideen kudeaketan.

4. PLASTIKO-HONDAKIN MOTAK

Hiri-hondakin solidoen eremuan (HHS), polietilen tereftalatoa (PET), dentsitate handiko polietilenoa (HDPE), binil polikloruroa (PVC), dentsitate txikiko polietilenoa (LDPE), polipropilenoa (PP) eta poliestirenoa (PS) dira plastiko nagusiak. 1. taulan ikus daiteke haien oinarritzko osaera. Gehienek, PVCak izan ezik, karbono-eduki handia dute, eta hidrogenoa dute bigarren osagai nagusia. Konposizio horien arabera, plastiko-hondakinek bero-ahalmen handia dute, eta beraz, garrantzitsua da behar bezala kudeatzea haien bizitza baliagarria amaitutakoan [23]. Molekulak konplexuago bihurtu ahala, ordea, heteroatomo gehiago sartzen dira; adibidez, oxigenoa PETaren kasuan edo kloroa PVCn; eta horiek arriskutsuak edo toxikoak ere izan daitezke giza osasunerako eta ingurumenerako. Kontuan izan behar da, gainera, plastiko batzuek sufre-aztarnak izan ditzaketela. Izan ere, sufrea plastikoen jatorrizko konposizioaren parte ez izan arren, fabrikazio osteko tratamenduetan gehitu dakioke. Ez dago esan beharrik karbonoa (C) eta hidrogenoa (H) ez diren konposatu guztiek areagotu egiten dutela plastikoek eragindako kutsaduraren arazoa, eta zaildu egiten dutela

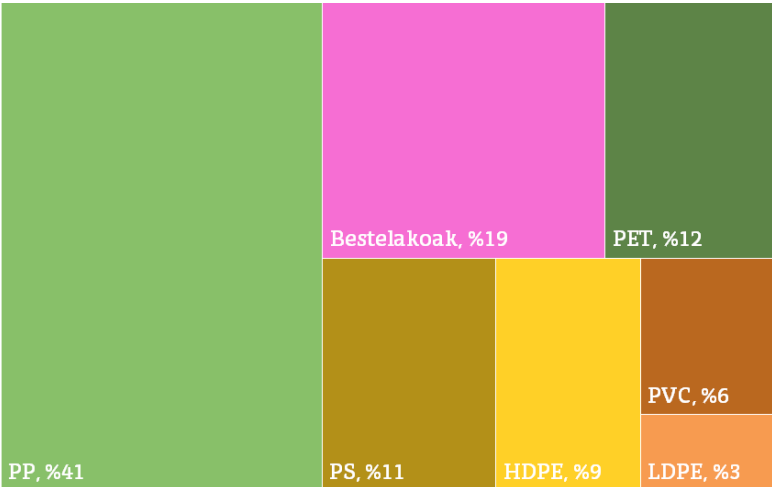
haien birziklatze-prozesua. Konposatu horiek plastikoen osaeran egon daitezke, edo bizitza baliagarrian atxiki dakizkieke.

1. taula. Cretako HHSetatik 2010 eta 2011an berreskuratutako plastiko batzuen oinarritzko osaera [24].

Materiala	C (% pisuan)	H (% pisuan)	N (% pisuan)	O (% pisuan)	S (% pisuan)
PET	61,4	4,3	0,05	32,7	0,17
HDPE	82,4	15,2	0,06	0,3	—
PVC	35,6	4,9	0,20	4,1	—
LDPE	87,3	15,2	0,06	0,2	—
PP	79,1	14,4	0,40	1,7	0,15
PS	93,5	8,5	0,06	0,2	—

PET: polietilen tereftalatoa; HDPE: dentsitate handiko polietilenoa; PVC: binil polikloruroa; LDPE: dentsitate txikiko polietilenoa; PP: polipropilenoa; PS: poliestirenoa.

Plastikoen banakako konposizioaren konplexutasunaz gain, garrantzitsua da kontuan hartzea HHSetan plastiko moten nahasketa heterogeneoa dagoela. HHSetan aurkitzen diren plastiko mota nagusien banaketa oso aldakorra da eta datu-iturriaren, eskualdearen edo erabilitako sailkapen-metodologiaren arabera alda daiteke. Adibide gisa, 1. irudian Europar Batasuneko HHSetako plastiko-hondakinen konposizioa agertzen da 2024 urterako.



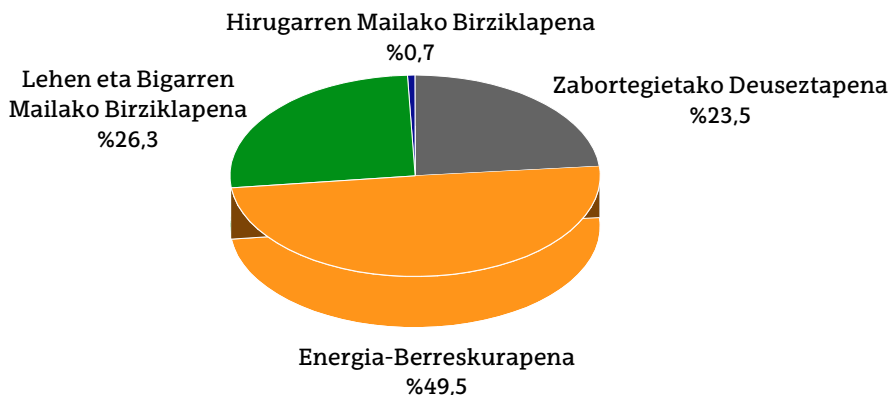
1. irudia. HHSetako plastiko-hondakinen konposizioa Europar Batasunean 2024. urtean [25].

Bestetik, HHSetan dauden plastikoak sintesi-metodoaren arabera ere sailka daitezke. Termoplastikoak, hala nola polietilenoa eta polipropilenoa, tenperatura altuetan ekoizten dira monomeroen polimerizazioaren bidez, eta, horri esker, behin baino gehiagotan urtu eta erreformatu daitezke. Polimeroak, beren aldetik, adizio- eta kondentsazio-polimeroetan bana daitezke. Adizio-polimeroak bigarren mailako produkturik sortu gabe lortzen dira; kondentsazio-polimeroek, berriz, molekula txikiak sortzen dituzte —ura edo azidoak, adibidez— polimerizazio-erreakzioan.

Bestalde, plastiko termoeگونkorrak, epoxi erretxinak eta erretxina fenolikoak barne, ontze-prozesu baten bidez lortzen dira. Prozesu horretan, beroak lotura kimiko itzulezinak eratzen ditu, eta, ondorioz, berriro urtu ezin diren egitura zurrunkak eratzen dira. Nahiz eta HHSetan kantitate txikiagoan egon, beste plastiko mota batzuk ere badaude; elastomeroak, esate baterako. Horiek propietate elastikoak dituzten polimeroak dira, eta prozesu espezializatuen bidez sintetizatzen dira, malgutasuna eta erresilientzia handitzeko.

5. PLASTIKO-HONDAKINEN EGUNGO KUDEAKETA

Plastiko-hondakinen kudeaketa gaur egungo ingurumen-erronka handienetako bat da. Garapen-bidean dauden herrialdeetan, hondakinen bolumenaren hazkunde azkarrak zaildu egiten du hondakin horiek biltzea, tratatzea eta ezabatzea [26]. Bestalde, herrialde garatuetan, plastikoen kontsumo osteko kudeaketa eskasa da arazo nagusia, berreskurapena oso mugatua baita. Izan ere, zaborte-gian uztearekin lotutako ingurumen-erronka garrantzitsuak egon arren, plastiko-hondakinen % 23,5 zaborte-gietan uzten da, 2. irudian erakusten den bezala.



2. irudia. Hondakin plastikoak kudeatzeko metodoen banaketa munduan, 2023. urtean [9].

Plastikoak tratatzeko lau ikuspegi nagusi daude: lehen mailako, bigarren mailako, hirugarren mailako eta laugarren mailako birziklapena. Lehen mailako birziklapena eragiketa mekanikoetan oinarritzen da jatorrizko plastikoaren antzeko ezaugarriak dituzten produktuak lortzeko. Metodo hori ekonomia zirkularraren printzipioan oinarritzen da, plastikoak berrerabiltzeko aukera ematen baitu haien konposizioa nabarmen aldatu gabe [27]. Industria mailan garatu den prozesu bakarra da, baina aplikazio mugatua du hainbat faktore mugatzailearen ondorioz: (i) HHSetan dauden polimeroen heterogeneotasuna, (ii) gehigarrien eta kutsatzaileen presentzia, eta (iii) material birziklatuen lehiakortasun txikiagoa, plastiko birjinekin alderatuta kalitate baxuagoa eta kostu handiagoa dutelako. Bigarren mailako tratamenduan, berriz, hondakin plastikoen fusioa egiten da, hainbat formatako eta aplikazio-espektroko produktuak ekoizteko. Birziklatutako plastikoen aplikazioak ez dira jatorriko plastikoaren berdinak. «Ur-jauzi» erako prozesua da, prestazio handiagoetatik prestazio txikiagoetara doana. Lehen mailako eta bigarren mailako birziklapen motek antzekotasun handia dutenez gero, argitaratutako datuetan ez da haien artean bereiztasunik egiten.

Bestalde, hirugarren mailako birziklapena edo birziklatze termokimikoa egungo plastiko-hondakinen % 0,7ri baino ez zaio aplikatzen, baina etorkizun handiko irtenbidea da. Prozesu horretan, plastikoak deskonposatu egiten dira beren lotura kimikoak apurtuz, eta plastiko edo erregai berriak sortzeko erabil daitezkeen hidrokarburo nahasteak sortzen dira. Industrian oraindik gutxi erabiltzen bada ere, birziklapen termokimikoa oso bide interesgarria da plastiko konplexu eta kutsatuek sortzen dituzten errokeni aurre egiteko.

Azkenik, laugarren mailako birziklapena energia berreskuratzekeo erraustetan datza eta gaur egun plastiko-hondakinak kudeatzeko prozesurik erabiliena da. Bi faktorek eragiten dute hori: (i) plastikoei energia ekoiztea ahalbidetzen duen bero-ahalmen handia dute, eta (ii) erraustetak izugarri murrizten du hiri-hondakin solidoen bolumena [28]. Erraustetan, plastikoak erre egiten dira lurruna eta energia elektrikoa sortzeko, % 23tik % 40ra bitarteko eraginkortasunarekin [29]. Ingurumen- eta osasun-arrisku handiak ditu erraustetak, ordea. Errekuntzan kutsatzaile atmosferikoak askatzen dira —dioxinak eta furanoak, esate baterako—, oso toxikoak eta iraunkorrak direnak. Isurtzen diren beste gas batzuek —sufre dioxidoa eta nitrogeno oxidoak, adibidez— smog-a eta euri azidoa eragiten dituzte, eta kalte egiten diote airearen kalitateari eta gizakien osasunari. Atmosferara askatu aurretik gasak garbitzeko, errausteta-unitateek partikula-iragazkiak eta «scrubber»-ak (gasak hezetasuna baliatuz garbitzeko sistemak) erabiltzen dituzte. Bestalde, gas azidoen isuria murrizteko prozesuak ere erabiltzen dira. Sufre dioxidoa ezabatzekeo, absortzioa erabili ohi da (karea-ekin edo kaltzio karbonatoarekin), eta nitrogeno oxidoak ezabatzekeo, erre-

dukzio katalitiko selektiboa (SCR) edo erredukzio ez-katalitiko (SNCR) erabili ohi dira. Gainera, errausketa-unitate aurreratuenek ikatz aktiboko iragazkiak edo katalizatzaileak erabiltzen dituzte kutsatzaileak adsorbatzeko eta haien isurketa murrizteko.

Are gehiago, erraustu aurretik plastiko-hondakinak modu desegokian kudeatuz gero, handitu egin daiteke substantzia arriskutsuen isurketa. Izan ere, ekidin egin beharko litzateke molekula toxikoak dituzten plastikoak erraustea, PVCa adibidez, baina ez da gainerako hondakin plastikoetatik bereizten. Horrek, ingurumen-arriskuak larriagotzeaz gain, beste erronka batzuk ere sortzen ditu, hala nola lurra eta ura kutsa ditzaketen erraustu toxikoak sortzea. Horretaz gain, errauste-plantetako langileek zein inguruko biztanleek partikula finak eta konposatu kimiko kaltegarriak arnas ditzakete, eta horrek nabarmenagoa bihurtzen du kudeaketa aukera jasangarriagoen beharra.

6. PLASTIKO-HONDAKINEN ARAZOA KONPONTZEKO IRTENBIDE IRAUNKORRAK

Berotze globalak eragindako gertaera klimatologikoen aurrean, gizarteak behingoz ulertu du ingurumena zaintzea beharrezkoa dela giza osasuna eta ongizatea zaintzeko. Horretarako, arduraz erabili behar dira baliabideak, eta hondakin oro apropos kudeatu behar da, plastiko-hondakinak barne. Hau dela eta, hondakinen sorrera murriztuko duten akordio eta lege berriak bilatzen ari dira etengabe, eta ingurumena babesteko eta birziklatzeko kultura indartuko duten esku-hartze politikoak ere ari dira ezartzen. Hala, sendotu egin dira herritarren eguneroko bizitzan 5R printzipioak (murrizketa, birprozesatzea, berrerabiltzea, birziklatzea eta berreskuratzea) eta baliabide berriztagarrien erabilera, eta ekonomia zirkularraren arabera arautu da jarduera industrial ororen jarduera.

Argi dago, beraz, printzipio horien arabera plastikozko produktuen kontsumoa murriztea dela arazoa konpontzeko lehen urratsa, eta hori lortzeko hainbat esparrutan egin behar da lan. Lehenengo eta behin, beharrezkoa da kontzientzia publikoa sustatzea. Erabilera bakarreko plastikoen kontsumoa murriztearen garrantzia ulertu behar du gizarteak eta gainerako produktu plastikoen berrerabilpena sustatu behar da. Horretarako, abian jar daitezke hezkuntza- eta sentsibilizazio-kanpainak eta informazioa zabal daiteke komunikabide, sare sozial, eskola eta programa komunitarioen bidez.

Halaber, erabilera bakarreko plastikozko produktu jakin batzuen fabrikazioa eta erabilera mugatzen edo debekatzen duten gobernu-politikak ezarri behar dira: plastikozko poltsak, lastotxoak eta erabili eta botatzeko tresnak, esate baterako. Munduko hainbat herrialde eta hiritan ezarri dira, dagoeneko, horren inguruko legeak. Adibidez, Europar Batasunean erabi-

lera bakarrekoko plastikoei buruzko zuzentarau bat ezarri zen: 2019/904 (EB) Zuzentaraua, hain zuzen. Hark debekatu edo mugatu egiten ditu erabilera bakarrekoko plastikozko hainbat produktu, hala nola lastotxoak, kotoizko makilatxoak eta plastikozko mahai-tresnak. Garrantzitsua da zehaztea erabilera bakarrekoko produktu plastikoak ordezkatzeko ezinbestekoa dela aukera ekologikoak, ekonomikoak, iraunkorrak eta errentagarriak izatea, hala nola poltsa berrerabilgarriak, ontzi konpostagarriak eta produktu biodegradagarriak. Gainera, beharrezkoa da industria horien garapena sustatzea eta aukera jasangarri horien eskuragarritasuna handitzea.

Bestalde, erabilera bakarrekoko plastikoei zergak edo tasak ere ezar daizkieke, haien kontsumoa gutxitzeko. Are gehiago, zerga horien dirua hondakinak kudeatzeko programak eta ingurumen-heziketarako programak finantzatzeko erabil liteke. Hainbat herrialdetan, Irlandan, Erresuma Batuan edo Espainian, kasurako, zergak ezarri zaizkie plastikozko poltsei. Beste batzuetan, Alemanian, Suedian edo Kanadan, esaterako, edarien ontziak bildu eta itzultzeko sistemei ezarri zaizkie sariak.

Horren haritik, funtsezkoa da plastikozko produktuak birziklatzen eta berrerabiltzen lagunduko duten gaikako bilketa-programa eraginkorrak ezartzea. Horrez gain, erabilera bakarrekoko produktu plastikoen ordezkatu berrerabilgarriak aukeratzen dituztenei pizgarri ekonomikoak ere eskaini beharko litzaizkieke, deskontuak edo sariak, adibidez.

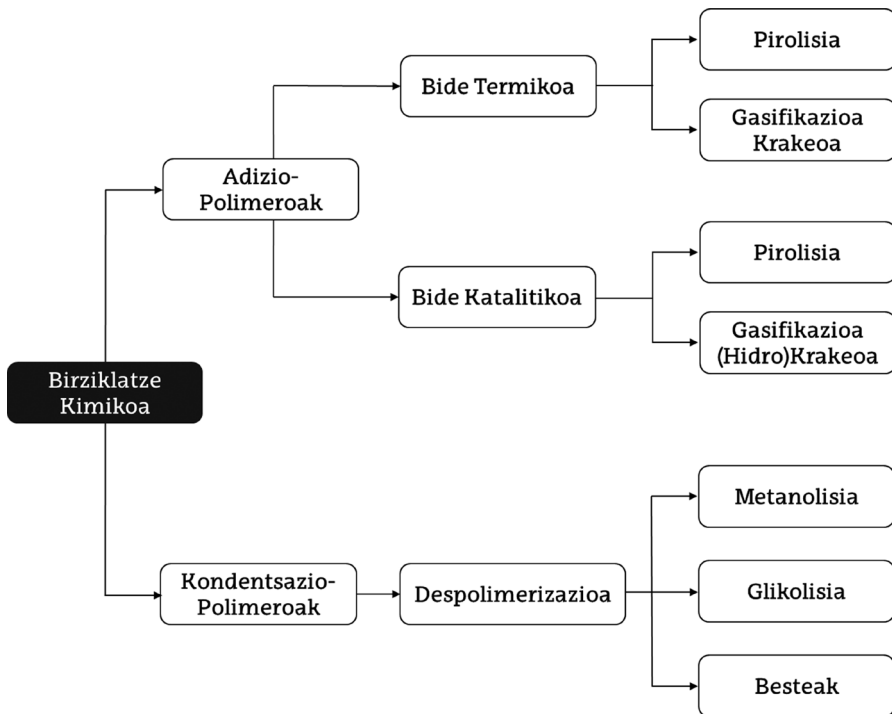
Azkenik, ezinbestekoa da industriarekin elkarlanean aritzea, ontzi eta produktu jasangarriagoen ekoizpena eta erabilera bultzatzeko. Nahitaezkoa da industria-ehun sendo eta errentagarria garatzea, erabilitako plastikoak biltzeko, tratatzeko eta birziklatzeko, eta iturri berriztagarrietatik datozen ordezkatu produktuak fabrikatzeko behar den azpiegitura bermatzeko.

Argi dago, erabilera bakarrekoko plastikoen erabilera murrizteaz eta aukera iraunkorrak sustatzeaz gain, funtsezkoa dela birziklatze-teknologiak garatzea, dauden hondakin plastikoak eta etorkizunean sortuko direnak kudeatzeko. Lehen aipatu den bezala, birziklatze mekanikoak (lehen eta bigarren mailako birziklapenek) muga nabarmenak ditu eta, horren ondorioz, azken urteotan gero eta ahalegin handiagoak egiten ari dira hirugarren mailako birziklapena bultzatzeko, haren bideragarritasun ekonomikoan eta ingurumenekoan arreta berezia jarrita.

Hirugarren mailako birziklatze-metodoen abantaila ekonomikoen artean, baliabideak berreskuratzea nabarmentzen da. Birziklatze termokimikoak (hirugarren mailako birziklapena) ahalbidetu egiten du lehengai baliotsuak ekoizpen-ziklora itzultzea eta, hala, baliabide birjinekiko menpekotasuna eta prezioen aldakortasuna murrizten dira. Gainera, merkatuaren hedapena bultzatzen da, aukera berriak irekitzen dira, berrikuntza eta lehiakortasuna sustatzen dira plastikoen industrian, eta hazkunde ekonomikoa eta enplegua sortzen dira.

Ingurumen-abantailei dagokienez, plastikoak zabortegian uzteari eta errausketari lotutako arazoak konpontzen ditu, haien ekoizpenetik eratorritako karbono-azterna globala murrizten du eta ekonomia zirkularra sustatzen du. Hondakin plastikoen zikloa ixten denez, planteamendu honek bat egiten du iraunkortasun-helburuekin, eta plastikoen erabilera eraginkorragoa eta arduratsuagoa sustatzen du.

Arlo honetan aztertutako teknologiak dira, besteak beste, birziklatze kimikoa, gasifikazioa, pirolisia, krakeo katalitikoa eta hidrokrakeoa. Sailkapen osoagoa ikus daiteke 3. irudian.



3. irudia. Birziklatze-metodo termokimikoen sailkapena.

Birziklatze kimikoa jatorrizko monomeroak berreskuratzean datza. Horretarako, polimeroaren despolimerizazioa egiten da agente despolimerizatzaile bat gehituz: glikola edo metanola, esaterako [30]. Hala ere, prozesu horrek muga handiak ditu hiri-hondakin solidoei aplikatzen zaizenean, plastiko termoplastikoen izaera dela eta. Termoplastikoak kimikoki birzikla daitezkeen arren, plastiko horien despolimerizazioa konplexuagoa izaten da askotan, haien egituren aniztasunagatik eta prozesu gehigarriak behar direlako materialak modu eraginkorrean deskonposatzeko. Hori

dela eta, termoplastikoak birziklatzeko, eraso kimiko handia behar da, eta horrek azpiproduktu ugari sortzen ditu eta helburu nagusitik urruntzen du prozesua: monomeroa berreskuratzea, hain zuzen [31].

Plastikoen gasifikazioak sintesi-gas ($H_2 + CO$) ugari duen gas-korrontea bihurtzen ditu hondakin horiek. 700 °C-tik gorako tenperaturak erabiltzen dira eta oxigeno kopurua kontrolatzen da plastikoek errekontzari gabe erreakzioa dezaten. Erabilitako tenperatura eta ekoitzitako gasaren konposizioa erabilitako gasifikazio-agentearen arabera aldatzen dira [32]. Airearen erabiliz, sintesi-gasaren ekoizpena bultzatzen da eta, lurruna erabiliz, berriz, hidrogenoaren ekoizpena optimiza daiteke [33, 34]. Gainera, prozesuak hidrokarburo arinak eta konposatu karbonodunak sortzen ditu azpiproduktu gisa. Gasifikazioak plastikoen lurrunkortasun-eduki handia baliatzen du eta, horri esker, gasen etekin onak lor daitezke. Hala ere, oso prozesu endotermikoa da, eta energia-kontsumo handikoa, baita hobekuntza teknologikoak inplementatzen direnean ere, hala nola plasma bidezko gasifikazioa [35].

Energia-eskakizunak murrizteko eta prozesuaren eraginkortasuna hobetzeko, beste estrategia batzuk aztertzen ari dira, hala nola kopirolisia eta gasifikazioa konbinatzea. Kopirolisian, plastikoak beste material karbonodun batzuekin batera (biomasa edo hondakin organikoak, esaterako) termikoki deskonposatzen dira, oxigenorik gabe. Estrategia horren bidez, lortutako produktuen banaketa aldatzen da eta prozesuaren eraginkortasuna hobetzen da. Bi teknologiak konbinatzean, hondakin moten arteko sinergiak baliatzen dira, eta horrela optimizatu egiten da sintesi-gasaren eta hidrogenoaren ekoizpena eta murriztu egiten da prozesuaren energia-eskari globala, pirolisian askatutako beroa gasifikazio-prozesuan erabil baitaiteke [36-38].

Pirolisi-prozesuetan, materialak beroaren bidez deskonposatzen dira tenperatura ertainetan (300-700 °C), oxigenorik gabeko ingurunean. Degradazio hori termikoa edo katalitikoa izan daiteke, eta lortutako produktuen errendimenduak zenbait faktoreren arabera dira: tenperatura, presioa eta prozesu-denbora, hain zuzen. Produktuak honela sailka daitezke: likidoak, lurrun kondentsagarriak eta olioak; solidoak, ikatza edo *char*-a; eta, azkenik, gas ez-kondentsagarriak [39].

Teorikoki behintzat, pirolisia gainerako teknologiei gailendu zaie hainbat arrazoiengatik [40]. Horietako bat da konposizio ezberdinetako plastikoak eta geruza anitzeko polimeroak tratatzeko duen gaitasuna, zailak baitira birziklatze mekanikoaren bidez prozesatzen. Gasifikazioa bezain heldua ez bada ere (zenbait hamarkadatan erabili izan da hondakinak sintesi-gas bihurtzeko industria eskalan) pirolisiak garapen maila handia lortu du erreaktoreen eta katalizatzaileen diseinuan, eta horrek prozesuaren efizientzia eta selektibitatea hobetu ditu. Gainera, katalizatzaileak erabiltzeak ere nabarmen murrizten du pirolisi-tenperaturak lortzeko behar den energia.

Hala ere, ikertzaile batzuen ustez, prozesua findu egin behar da oraindik, korrelazio handia baitago operazio-baldintzen —hainbat parametro eta katalizatzailea barne— eta lortutako produktuen konposizioaren eta selektibitatearen artean [41]. Egia esan, prozesua eskala errealean inplementatzeak hainbat erronka ditu, hala nola plastikoen itsaskortasuna eta bero-transferentziaren mugetatik eratorritako operazio-arazoak [37]. Hala eta guztiz ere, ikertzaile gehienek aurkezten dute pirolisia birziklatze kimikoko bide itxaropentsu gisa. 2. taulan laborategi-eskalan egindako hainbat ikerketa eta haien emaitza nagusiak jaso dira. Prozesuaren moldakortasun handia agerian uzteko helburuarekin egiten da hautaketa, balioberritu daitezkeen materialei eta erabil daitezkeen teknologiei dagokienez.

2. taula. Plastikoen pirolisiari buruzko laborategiko eskalako ikerketen hainbat adibide.

Materiala	Lan-baldintzak	Iturria
PET	450-560 °C, pirolisi termikoa, <i>spouted bed</i> erreaktorea.	[42]
HDPE	500 °C, HZSM-5 + SiO ₂ /Al ₂ O ₃ , <i>spouted bed</i> erreaktorea.	[43]
PS	400-700 °C, zeolitak, mikropirolizatzailea.	[44]
LDPE	550 °C, USY eta HZSM-5, ohandze finkoko erreaktorea.	[45]
Plastiko-nahasketa (PE, PP, PS, PET, PVC)	440-500 °C, HZSM-5/ buztin gorria, erdi-batch erreaktorea.	[46]
Plastiko-nahasketa (PE, HDPE, LDPE, PP, PVC, PS)	390 °C, zeolitak eta FCC katalizatzailea, ohandze jariakorra.	[47]

Niksiar-ek eta lankideek [42] frogatu zuten pirolisi termikoarekin PET gramo baten ia erabateko konbertsioa lor daitekeela, 480 °C-tik gorako tenperatura jarritz eta 30 g harea erabiliz fluidizaziorako. Elordik eta lankideek [43] HDPEa elikatu zuten era jarraituan, 500 °C-an eta zenbait katalizatzaileekin. Tamaina desberdinetakoa olefinak eta aromatikoak lortu zituzten, katalizatzailearen poroen tamainaren eta azidotasanaren arabera.

Ojha-k eta lankideek [44] poliestirenoaren konbertsioa frogatu zuten katalizatzaile zeolitiko bat erabiliz mikropirolizatzaile batean. Konfigurazio horrekin, BTEX frakzioko konposatuak lortu zituzten, pirolisi termikoan ohikoak diren monomeroen orde. Gainera, produktu kondentsatuen eraketa murrizteko eta selektibitatea handitzeko, katalizatzailearen eta plastikoaren arteko erlazioa zein katalizatzailearen propietate azidoak optimi-

zatu zituzten. Hala ere, katalizatzaile bat erabiltzeak karbonozko materiala —kokea— sortzea ere eragiten du. Testuinguru horretan, Marcilla-k eta lankideek [45] koke horrek katalizatzailearen desaktibazioan duen eragina aztertu zuten LDPEaren pirolisi jarraituan.

Pirolisia plastiko-nahasketei ere aplikatu zaie material zeolitikoak eta beste prozesuetako katalizatzaile birziklatuak erabiliz, hala nola buztin gorria [46] edo baztertutako FCC katalizatzailea [47]. Planteamendu horietan balio erantsiko hidrokarburu likido eta gaseosoen errendimendu altuak lortu ziren, 500 °C-ko tenperatura gainditu gabe. Horrela, saihestu egin zen gainkrakeoa —balio erantsi txikiko gasak sortzen dituen efektua—, bai eta ikatzaren sorrera, balio txikiko produktua.

Beste ikuspegi batetik, birziklatze kimikoa **findegietan** ere egin daiteke, hala nola krakeo katalitikoko eta hidrokrakeoko unitateetan. Unitate horiek oso ondo ezagutzen dira eta askotariko materialak prozesatzeko gaitasuna dute. Operazio-baldintzak doitu produktu-aniztasun handia lor daiteke eta horrek prozesuaren malgutasuna handitzen du. Gainera, dagoeneko amortizatuta dauden unitateak balia daitezke eta horrek gutxitu egiten du findegien instalazioetan eta azpiegituran aldaketa garestiak egiteko beharra. Horrela, optimizatu egiten dira eskura dauden baliabideak.

Krakeo katalitikoa pirolisiaren ordezkoko prozesu bideragarri gisa aurkezten da, produktuen distribuzio estuagoa eskaintzen duelako eta tenperatura baxuagoetan funtzionatzen duelako [48]. Molekula handiko lehengaiak tratatzeko erabili ohi da; izan ere, FCC unitateetan zeolita-azido doituak erabiltzen dira, indar azidoa eta dentsitate jakina dutenak, horrela selektibitatea kontrolatzeko [49]. Pirolisiaren zenbait zailtasun saihesteko erabili da krakeoaren eta pirolisiaren konbinazioa, hala nola erabili osteko katalizatzailea berreskuratzeko zailtasuna, plastikoei atxikitako konposatuak katalizatzaileara atxikitzea edo katalizatzailea desaktibatzea. 3. taulan, teknologia-nahaste hori erabili duten azterketa garrantzitsuenen laburpena ageri da.

3. taula. Plastikoari balio berria emateko pirolisi/(hidro)krakeoa erabiltzen duten zenbait azterketa.

Materiala	Lan-baldintzak	Iturria
LDPE	500 °C, Zn- eta H-ZSM-11, ohantze finkoko erreaktorea.	[50]
PP	450 °C, clinoptilolita, bi etapako <i>batch</i> eta ohantze finkoko erreaktoreak.	[51]
HDPE	500 °C, MCM-41 + ZSM-5, bi etapako ohantze finkoko erreaktoreak.	[52]
HDPE	350-550 °C, HZSM-5, <i>spouted bed</i> -ohantze finkoko erreaktoreen sistema.	[53]
HDPE ezkoak	500-560 °C, FCC katalizatzailea, <i>riser</i> simulagailua.	[54]

Renzini-k eta lankideek [50] aurrera eraman zuten LDPE-pelleten krakeo katalitiko zuzena. 500 °C-an, gasen eta likidoen errendimendu handia lortu zuten, ia % 100era irits daitekeena erabilitako katalizatzailea zein den, C₆-C₉ konposatuen proportzio handiarekin.

PPa balioberritzeko, Vasilkovova-k eta lankideek [51] krakeo termikoko sistema bat proposatu zuten errektore ez-jarrai batean, eta ondoren krakeo katalitikoa oherentze finkoko errektore batean. Oherentze finkoan klinoptilolita erabiltzen da katalizatzaile gisa eta gasolinaren tartean aurkitzen diren hidrokarburoen errendimendu altuak lortzen dira.

Ratnasari-k eta lankideek ere [52] emaitza oso onak lortu zituzten, HDPErako, oherentze finkoko errektore bikoitzeko sistema batean. MCM-41 eta ZSM-5 katalizatzaileak erabili zituzten eta % 100 inguruko likido-errendimenduak lortu, nagusiki konposizio monoaromatikoz. Artetxek eta lankideek [53] HDPEa bi etapatan balioztatzea ere proposatu zuten. Oherentze fluidizatuko errektore bat erabili zuten lehen etapan, eta bigarrean oherentze finkoko errektore bat, HZSM-5 zeolitarekin. Hala, konposizioa olefina arinen eta hidrokarburo ez-aromatikoen ekoizpenera ere bideratzen da.

Beste alde batetik, Rodríguez-ek eta lankideek [54] krakeoa eta pirolisia beste modu batean lotu zituzten. HDPEaren pirolisi-produktu likidoa elikatu zuten findegiko baldintzak simulatzen dituen FCC unitatearen simulagailu batera. Aurreko sistemetan baino tenperatura baxuagoak erabili ziren, 560 °C gehienez. Ohiko FCC katalizatzailea erabiliz olefinak sortu ziren, eta gasolinaren RONa hobetu zen, konposatu isoparafinkoak sortu baitziren. HDPEaren pirolisi-produktu likidoa hutseko gasolioarekin nahastuta ere elikatu zuten, hori baita FCCaren ohiko elikadura [55]. Emaitzek erakutsi zuten unitate horrek hondakin plastikoak balioberritzeko gaitasuna zuela, bitarteko destilatuak lortuta. Are gehiago, bi korranteak batera elikatzen direnean mekanismo sinergikoak sortzen direla bermatu zen.

Azkenik, **hidrokrakeoa** etorkizun handiko teknologia da plastikoen birziklatzean. Teknologia honek, plastikoak degradatzeaz gain, produktuen kalitatea hobetzen du, sufrea, nitrogenoa, oxigenoa, aromatikoak eta heteroatomak ezabatzen baititu. Prozesu horrek kate luzeko hidrokarburoen zatiketa eta produktu garbiagoak lortzea uztartzen ditu. Hala ere, prozesuan parte hartzen duten mekanismo konplexuen azterketa sakona egin behar da, prozesua optimizatzeko eta industria mailan aplikatu ahal izateko.

Alor honetan, Vela-k eta lankideek [56, 57] lehenengo hurbilketa bat egin dute plastikoen koelikadurara, hidrokrakeo-unitateetan hutseko gasolioa (VGO) poliolefinekin eta pirolisitik eratorritako likidoarekin elikatuz. Operazio-baldintzak eta katalizatzailea optimizatuz, prozesuaren bideragarritasuna berresten duten emaitzak lortu dira. Prozesuan, findegietako korranteekin nahasteko konposizio egokia duten nafta eta destilatu ertainen ekoizpena maximizatzen da.

7. ONDORIOAK

Laburbilduz, plastikoen arazoari ikuspegi integral eta iraunkor batetik heltzeko premia larria dago. Petroliotik eratorritako plastikoen ekoizpenaren eta kontsumo masiboaren ingurumen-inpaktu negatiboak gero eta nabariagoak dira, ozeanoen kutsaduratik eta biodibertsitatetik hasi eta berotegi-efektuko gasen isurketetaraino. Hala ere, irtenbide eraginkorrak ere badaudela frogatu da, hala nola erabilera bakarreko plastikoen kontsumoa murriztea, aukera jasangarriak sustatzea eta berrerabilpena eta birziklapena sustatzea. Birziklapenaren arloan, birziklatze kimikoak emaitza onak lortzen ditu. Honela, gasifikazioa, pirolisia, krakeoa eta hidrokrakeoa bezalako teknologiak erabili daitezke, kasuaren arabera, plastikoak birziklatzeko. Lankidetzak globala, legedi aurrerakoia eta gizartearen konpromisoa funtsezkoak dira plastikoak bidea egin dezan ingurumenerako eta giza osasunerako hain kaltegarria izango ez den etorkizunerantz. Erronka esanguratsua bada ere, ekintza hitzartua eta praktika arduratsuagoak bultzada handia izan daitezke kutsadura plastikoaren aurkako borrokan eta gure planetaren babesean.

ESKER ONAK

Artikulu hau honako finantza-laguntza honekin egin da: (i) PID2021-125255OB-I00 proiektua, MICIU/AEI/10.13039/501100011033 eta FEDER, EBk finantzatua; (ii) Europar Batasuneko Horizon 2020 ikerketa-eta berrikuntza-programa, HORIZON-MSCA-2023-SE-01 (101182827 proiektua); eta (iii) Eusko Jaurlaritza (IT1645-22 beka).

BIBLIOGRAFIA

- [1] SOARES, J., MIGUEL, I., VENÂNCIO, C., LOPES, I., OLIVEIRA, M. 2021. «Public views on plastic pollution: Knowledge, perceived impacts, and pro-environmental behaviours». *Journal of Hazardous Materials*, **412**, 125227.
- [2] YUE, X. H., ZHANG, F. S., WU, L. X., ZHANG, C. C., QIAN, P. 2022. «Up-cycling of blending waste plastics as flexible growing substrate with superabsorbing property». *Chemical Engineering Journal*, **435**, 134622.
- [3] KEDZIERSKI, M., FRÈRE, D., LE MAGUER, G., BRUZAUD, S. 2020. «Why is there plastic packaging in the natural environment? Understanding the roots of our individual plastic waste management behaviours». *Science of the Total Environment*, **740**, 139985.
- [4] KING, S., LOCOCK, K. E. S. 2022. «A circular economy framework for plastics: A semi-systematic review». *Journal of Cleaner Production*, **364**, 132503.
- [5] KUUSELA, K., UUSITALO, V., AHOLA, J., LEVÄNEN, J. 2021. «The transformation of plastics production from net positive greenhouse gas emissions to net

- negative: An environmental sustainability assessment of CO₂-based polypropylene». *Journal of CO₂ Utilization*, **52**, 101672.
- [6] LAVRENOV, A. V., SAIFULINA, L. F., BULUCHEVSKII, E. A., BOGDANETS, E. N. 2015. «Propylene production technology: Today and tomorrow». *Catalysis in Industry*, **7**, 175-187.
- [7] GAO, Y., NEAL, L., DING, D., WU, W., BAROI, C., GAFFNEY, A. M., LI, F. 2019. «Recent advances in intensified ethylene production - A review». *ACS Catalysis*, **9**, 8592-8621.
- [8] TOKTAROVA, A., GÖRANSSON, L., THUNMAN, H., JOHNSSON, F. 2022. «Thermochemical recycling of plastics – Modeling the implications for the electricity system». *Journal of Cleaner Production*, **374**, 133891.
- [9] PEMRG PLASTICS EUROPE'S MARKET RESEARCH AND STATISTICS GROUP. 2024. *Plastics the Fast Facts 2024*. Brussels.
- [10] ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICOS (OECD). 2022. *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060, Organisation for Economic Co-Operation and Development*. Paris.
- [11] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA (AIE). 2021. *The Furutre of Petrochemicals*. Paris.
- [12] CENTRO DE ESTUDIOS DE SEGURIDAD ENERGETICA (CESE). 2019. *Energy Security Implications of Petrochemical Expansion in the United States*. Washington D. C.
- [13] ANDRADY, A. L., NEAL, M. A. 2009. «Applications and societal benefits of plastics». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **364**, 1977-1984.
- [14] 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-A world prospective». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 233-248.
- [15] TONG, Y., LIN, L., TAO, Y., HUANG, Y., ZHU, X. 2023. «The occurrence, speciation, and ecological effect of plastic pollution in the bay ecosystems». *Science of The Total Environment*, **857**, 159601.
- [16] YADAV, V., SHERLY, M. A., RANJAN, P., PRASAD, V., TINOCO, R. O., LAURENT, A. 2022. «Risk of plastics losses to the environment from Indian landfills». *Resources, Conservation and Recycling*, **187**, 106610.
- [17] WILCOX, C., VAN SEBILLE, E., HARDESTY, B. D., ESTES, J. A. 2015. «Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, 11899-11904.
- [18] LETERME, S. C., TUURI, E. M., DRUMMOND, W. J., JONES, R., GASCOOKE, J. R. 2023. «Microplastics in urban freshwater streams in Adelaide, Australia: A source of plastic pollution in the Gulf St Vincent». *Science of The Total Environment*, **856**, 158672.
- [19] HOU, L., KUMAR, D., YOO, C. G., GITSOV, I., MAJUMDER, E. L. W. 2021. «Conversion and removal strategies for microplastics in wastewater treatment plants and landfills». *Chemical Engineering Journal*, **406**, 126715.

- [20] JÂMS, I. B., WINDSOR, F. M., POUEVIGNE-DURANCE, T., ORMEROD, S. J., DURANCE, I. 2020. «Estimating the size distribution of plastics ingested by animals». *Nature Communications*, **11**, 1-7.
- [21] PRATA, J. C., DA COSTA, J. P., LOPES, I., DUARTE, A. C., ROCHA-SANTOS, T. 2020. «Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects». *Science of The Total Environment*, **702**, 134455.
- [22] ZHANG, Y., PU, S., LV, X., GAO, Y., GE, L. 2020. «Global trends and prospects in microplastics research: A bibliometric analysis». *Journal of Hazardous Materials*, **400**, 123110.
- [23] BHOI, P. R., RAHMAN, M. H. 2022. «Hydrocarbons recovery through catalytic pyrolysis of compostable and recyclable waste plastics using a novel desk-top staged reactor». *Environmental Technology & Innovation*, **27**, 102453.
- [24] KOMILIS, D., EVANGELOU, A., GIANNAKIS, G., LYMPERIS, C. 2012. «Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes». *Waste Management*, **32**, 372-381.
- [25] BLASENBAUER, D., LIPP, A. M., FELLNER, J., TISCHBERGER-ALDRIAN, A., STIPANOVIĆ, H., LEDERER, J. 2024. «Recovery of plastic packaging from mixed municipal solid waste. A case study from Austria». *Waste Management*, **180**, 9-22.
- [26] PEMRG PLASTICS EUROPE'S MARKET RESEARCH AND STATISTICS GROUP. 2024. *The Circular Economy for Plastics. An European Analysis*. Brussels.
- [27] VAN DER HULST, M. K., OTTENBROS, A. B., VAN DER DRIFT, B., FERJAN, Š., VAN HARMELEN, T., SCHWARZ, A. E., WORRELL, E., VAN ZELM, R., HUIJBREGTS, M. A. J., HAUCK, M. 2022. «Greenhouse gas benefits from direct chemical recycling of mixed plastic waste». *Resources, Conservation and Recycling*, **186**, 106582.
- [28] HE, J., HONG, Y., KONG, L., DAN, Z., LV, X., CHEN, G., TANG, O., CHEN, D. 2022. «Spatial distribution and management of the energy potential of municipal solid waste incineration: A case study of Lhasa, China». *Journal of Environmental Management*, **322**, 116094.
- [29] CUDJOE, D., WANG, H. 2022. «Plasma gasification versus incineration of plastic waste: Energy, economic and environmental analysis». *Fuel Processing Technology*, **237**, 107470.
- [30] CRIPPA, M., MORICO, B. 2020. «PET depolymerization: a novel process for plastic waste chemical recycling». *Studies in Surface Science and Catalysis*, **179**, 215-229.
- [31] CHANDA, M. 2021. «Chemical aspects of polymer recycling». *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, **4**, 133-150.
- [32] FROLOV, S. M., SANTOS, S. M., ASSIS, A. C., GOMES, L., NOBRE, C., BRITO, P. 2022. «Waste Gasification Technologies: A Brief Overview». *Waste 2023, Vol. 1, Pages 140-165*, **1**, 140-165.
- [33] ARENA, U., DI GREGORIO, F. 2014. «Energy generation by air gasification of two industrial plastic wastes in a pilot scale fluidized bed reactor». *Energy*, **68**, 735-743.

- [34] LOPEZ, G., ERKIAGA, A., AMUTIO, M., BILBAO, J., OLAZAR, M. 2015. «Effect of polyethylene co-feeding in the steam gasification of biomass in a conical spouted bed reactor». *Fuel*, **153**, 393-401.
- [35] ZHANG, Y., CUI, Y., CHEN, P., LIU, S., ZHOU, N., DING, K., FAN, L., PENG, P., MIN, M., CHENG, Y., WANG, Y., WAN, Y., LIU, Y., LI, B., RUAN, R. 2019. «Gasification Technologies and Their Energy Potentials». *Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches* 193-206.
- [36] KERN, S. J., PFEIFER, C., HOFBAUER, H. 2013. «Cogasification of polyethylene and lignite in a dual fluidized bed gasifier». *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **52**, 4360-4371.
- [37] LOPEZ, G., ARTETXE, M., AMUTIO, M., BILBAO, J., OLAZAR, M. 2017. «Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **73**, 346-368.
- [38] QI, Y., MUHAMMAD, U., ZHANG, W., SONG, Y., ZHANG, M., WANG, M., XU, C., XU, Y., CAI, S., HAN, C., LI, J., WANG, C. 2025. «A comprehensive evaluation of recent advancement in municipal solid waste gasification: Research status, technical challenges and Perspectives». *Separation and Purification Technology*, **358**, 130443.
- [39] DOGU, O., PELUCCHI, M., VAN DE VIJVER, R., VAN STEENBERGE, P. H. M., D'HOOGHE, D. R., CUOCI, A., MEHL, M., FRASSOLDATI, A., FARAVELLI, T., VAN GEEM, K. M. 2021. «The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: state-of-the-art, challenges, and future directions». *Progress in Energy and Combustion Science*, **84**, 100901.
- [40] MARTÍNEZ-NARRO, G., PRASERTCHAROENSUK, P., DIAZ-SILVARREY, L. S., DIXON, L., PHAN, A. N. 2022. «Chemical recycling of mixed plastic waste via catalytic pyrolysis». *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **10**, 108494.
- [41] INAYAT, A., FASOLINI, A., BASILE, F., FRIDRICHOVA, D., LESTINSKY, P. 2022. «Chemical recycling of waste polystyrene by thermo-catalytic pyrolysis: A description for different feedstocks, catalysts and operation modes». *Polymer Degradation and Stability*, **201**, 109981.
- [42] NIKSIAR, A., FARAMARZI, A. H. A. H., SOHRABI, M. 2015. «Kinetic study of polyethylene terephthalate (PET) pyrolysis in a spouted bed reactor». *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **113**, 419-425.
- [43] ELORDI, G., OLAZAR, M., LOPEZ, G., AMUTIO, M., ARTETXE, M., AGUADO, R., BILBAO, J. 2009. «Catalytic pyrolysis of HDPE in continuous mode over zeolite catalysts in a conical spouted bed reactor». *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **85**, 345-351.
- [44] OJHA, D. K., VINU, R. 2015. «Resource recovery via catalytic fast pyrolysis of polystyrene using zeolites». *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **113**, 349-359.
- [45] MARCILLA, A., GÓMEZ-SIURANA, A., VALDÉS, F. J. 2009. «Evolution of the deactivation mode and nature of coke of HZSM-5 and USY zeolites in the

- catalytic cracking of low-density polyethylene during successive cracking runs». *Applied Catalysis A: General*, **352**, 152-158.
- [46] LÓPEZ, A., DE MARCO, I., CABALLERO, B. M., LARESGOITI, M. F., ADRADOS, A., ARANZABAL, A. 2011. «Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts: ZSM-5 zeolite and Red Mud». *Applied Catalysis B: Environmental*, **104**, 211-219.
- [47] LIN, Y. H., TSENG, C. C., WEI, T. T., HSU, C. T. 2011. «Recycling of dual hazardous wastes in a catalytic fluidizing process». *Catalysis Today*, **174**, 37-45.
- [48] LIMA, R. B., NETO, M. M. S., OLIVEIRA, D. S., SANTOS, A. G. D., SOUZA, L. D., CALDEIRA, V. P. S. 2021. «Obtainment of hierarchical ZSM-5 zeolites by alkaline treatment for the polyethylene catalytic cracking». *Advanced Powder Technology*, **32**, 515-523.
- [49] THIVASASITH, A., RODAUM, C., NUNTHAKITGOSON, W., ASSAVAPANUMAT, S., WATTANAKIT, C. 2022. «Fine-tuning the catalytic cracking-assisted synthesis of plastic-derived MWCNTs-supported metal oxides for methanol electrooxidation». *Carbon Trends*, **7**, 100158.
- [50] RENZINI, M. S., SEDRAN, U., PIERELLA, L. B. 2009. «H-ZSM-11 and Zn-ZSM-11 zeolites and their applications in the catalytic transformation of LDPE». *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **86**, 215-220.
- [51] VASILKOVÁ, B., HÁJEKOVÁ, E., HUDEC, P., ČESÁKOVÁ, J., HORŇÁČEK, M., KALIŇÁK, M., JORÍK, V. 2022. «Two-stage thermal and catalytic cracking of polypropylene using natural clinoptilolite in a catalytic step to petrochemicals and fuels». *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **167**, 105679.
- [52] RATNASARI, D. K., NAHIL, M. A., WILLIAMS, P. T. 2017. «Catalytic pyrolysis of waste plastics using staged catalysis for production of gasoline range hydrocarbon oils». *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **124**, 631-637.
- [53] ARTETXE, M., LOPEZ, G., AMUTIO, M., ELORDI, G., BILBAO, J., OLAZAR, M. 2012. «Light olefins from HDPE cracking in a two-step thermal and catalytic process». *Chemical Engineering Journal*, **207-208**, 27-34.
- [54] RODRÍGUEZ, E., GUTIÉRREZ, A., PALOS, R., VELA, F. J., ARANDES, J. M., BILBAO, J. 2019. «Fuel production by cracking of polyolefins pyrolysis waxes under fluid catalytic cracking (FCC) operating conditions». *Waste Management*, **93**, 162-172.
- [55] RODRÍGUEZ, E., PALOS, R., GUTIÉRREZ, A., TRUEBA, D., ARANDES, J. M., BILBAO, J. 2020. «Towards waste refinery: Co-feeding HDPE pyrolysis waxes with VGO into the catalytic cracking unit». *Energy Conversion and Management*, **207**, 112554.
- [56] VELA, F. J., PALOS, R., BILBAO, J., ARANDES, J. M., GUTIÉRREZ, A. 2020. «Effect of co-feeding HDPE on the product distribution in the hydrocracking of VGO». *Catalysis Today*, **353**, 197-203.
- [57] VELA, F. J., PALOS, R., TRUEBA, D., BILBAO, J., ARANDES, J. M., GUTIÉRREZ, A. 2021. «Different approaches to convert waste polyolefins into automotive fuels via hydrocracking with a NiW/HY catalyst». *Fuel Processing Technology*, **220**, 106891.