

*Derleme Makalesi*

# Plastik Atıkların Pirolizle Katma Değerli Ürünlere Dönüştürülmesi: Döngüsel Ekonomi Yaklaşımı

Eda Ergün Songül<sup>1,a,\*</sup>, Melek Cumbul Altay<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup> Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,  
İstanbul, Türkiye, 34320

<sup>a</sup>[eda.ergunsongul@iuc.edu.tr](mailto:eda.ergunsongul@iuc.edu.tr), <sup>b</sup>[mcumbul@iuc.edu.tr](mailto:mcumbul@iuc.edu.tr)

Geliş: 10.06.2025

Kabul: 11.07.2025

DOI: 10.55581/ejeas.1716406

**Öz.** Plastik atıkların çevresel etkileri ve artan miktarları, sürdürülebilir geri dönüşüm teknolojilerine duyulan ihtiyacı kritik hale getirmiştir. Bu çalışmada, plastik atıkların piroliz yöntemiyle değerlendirilmesi detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Piroliz, plastiklerin inert atmosfer altında ısı bozunmaya uğratılmasıyla gaz, sıvı ve katı ürünlerin elde edildiği, enerji geri kazanımı ve kimyasal hammadde üretimi açısından umut vadeden bir yöntemdir. Çalışmada; piroliz başlangıç malzemesi olarak farklı plastik türleri, piroliz parametreleri, reaktör sistemleri, ısıtma rejimleri ve ürün depolama teknikleri gibi değişkenlerin ürün verimleri üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Ayrıca, elde edilen ürünlerin (piroliz yağı, gaz fazı bileşenlerinden oluşan sentez gaz ve çar) fizikokimyasal özellikleri, potansiyel kullanım alanları ve rafinasyon gereksinimleri değerlendirilmiştir. Son yıllarda yapay zekâ destekli modelleme tekniklerinin süreç optimizasyonundaki rolü ve ko-piroliz uygulamaları ile sürdürülebilir yakıt üretimi üzerine yapılan çalışmalar da kapsamlı şekilde incelenmiştir. Bulgular, piroliz teknolojisinin döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda plastik atıkların dönüştürülmesinde etkin bir çözüm sunabileceğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Döngüsel ekonomi, Piroliz çar, Pirolitik yağ, Plastik atık, Reaktör sistemleri, Sentez gaz.

## Conversion of Plastic Waste into Value-Added Products through Pyrolysis: A Circular Economy Approach

**Abstract:** The environmental impacts of plastic waste, coupled with its increasing quantities, have rendered sustainable recycling technologies an imperative. The present study conducts a thorough examination of the evaluation of plastic waste through pyrolysis. Pyrolysis is a promising method for obtaining gas, liquid, and solid products through the thermal decomposition of plastics under an inert atmosphere, offering potential for energy recovery and the production of chemical raw materials. The present study examines the impact of various parameters on product yields, including different types of plastic feedstock, pyrolysis conditions, reactor systems, heating regimes, and product storage methods. Furthermore, the physicochemical properties, potential applications, and refining requirements of the obtained products (pyrolysis oil, synthesis gas consisting of gas phase components, and char) are evaluated. In recent years, the role of artificial intelligence-supported modelling techniques in process optimization and studies on co-pyrolysis applications for sustainable fuel production have also been comprehensively examined. The findings suggest that pyrolysis technology can provide an effective solution for converting plastic waste in accordance with circular economy principles.

**Keywords:** Circular economy, Pyrolysis char, Pyrolytic oil, Plastic waste, Reactor systems, Synthesis gas.

### 1. Giriş

Plastik atıklar, küresel çevresel sürdürülebilirlik açısından

ciddi bir tehdit oluşturmakta olup, fosil yakıt bazlı üretim süreçleriyle bağlantılı olarak hem doğal kaynakların

\*Sorumlu yazar

E-posta adresi: [eda.ergunsongul@iuc.edu.tr](mailto:eda.ergunsongul@iuc.edu.tr) (E. Ergün Songül)

tükenmesine hem de sera gazı emisyonlarının artmasına neden olmaktadır [1]. 2023 yılı itibarıyla küresel plastik üretimi 400 milyon tonun üzerindedir ve bu miktarın 2050 yılına kadar iki katına çıkması beklenmektedir [2]. Atık plastiklerin büyük bir kısmı geri dönüştürülemede, yakılmakta veya toprağa gömülmekte, bu da mikroplastik kirliliğini ve toksik bileşiklerin salınımı artırmaktadır [3]. Bu nedenle, plastik atıkların enerji ve değerli kimyasallara dönüştürülmesine yönelik çevre dostu ve ekonomik olarak uygulanabilir yöntemlerin geliştirilmesi kritik öneme sahiptir [4,5].

Piroliz, plastik atıkların oksijensiz ortamda ısı bozunmaya uğratılmasıyla sıvı, gaz ve katı ürünlerin elde edilmesini sağlayan umut verici bir termokimyasal dönüşüm yöntemidir [6]. Son yıllarda, piroliz teknolojisinin mikrodalga destekli, katalitik veya ko-piroliz gibi farklı varyantları geliştirilmiş olup, elde edilen sıvı ürünlerin yakıt kalitesinde olduğu gösterilmiştir [7,8]. Özellikle aktif karbon, zeolitler ve biyokömür gibi katalizörlerin kullanımı, piroliz sürecinde aromatik hidrokarbonların ve jet yakıtı aralığında ürünlerin seçici olarak elde edilmesini sağlamaktadır [9,10]. Ayrıca, bu katalizörler enerji verimliliğini artırmakta ve ürünlerin kalitesini iyileştirmektedir [11].

Atık plastikler; sıklıkla polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS) ve polietilen tereftalat (PET) gibi sentetik polimerlerden oluşmakta olup ve esasen uzun zincirli hidrokarbon bağ yapılarına sahiptirler [12]. Ayrıca plastikleştiriciler, stabilizatörler ve pigmentler gibi katkı maddeleri de içermektedirler [12]. Yenilenebilir bir kaynak olan biyokütleden farklı olarak, plastikler fosil yakıtlardan türetilmiş olup yenilenemezdir ve çevresel atık yükünü artırmaktadır [13]. Atık plastiklerin piroliz yoluyla değerlendirilmesi, yalnızca enerji geri kazanımı sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel yükün azaltılmasına ve döngüsel ekonomiye geçişe katkı da sunmaktadır [1,4,6,14].

Son yıllarda yapılan çalışmalar, piroliz ürünlerinin miktar ve özelliklerinin; hammadde oranı, piroliz sıcaklığı, ısıtma hızı ve bekleme süresi gibi operasyonel parametrelere önemli ölçüde bağlı olduğunu ortaya koymuştur [15,16]. Örneğin, 500 °C gibi yüksek sıcaklıklarda yapılan hızlı piroliz işlemleri, daha yüksek pirolitik yağ verimi (yaklaşık %60) sağlamaktadır [17,18]. Ayrıca, bazı araştırmalar pirolitik yağın yoğunluk, viskozite ve kalorifik değer gibi fiziksel özelliklerinin, plastik atık oranına ve piroliz koşullarına göre optimize edilebildiğini ortaya koymaktadır [1,19,20].

Literatürde ayrıca, yapay zeka destekli modelleme ve optimizasyon çalışmalarının piroliz süreçlerinin verimliliğini artırmada etkili olduğu belirtilmektedir [21,22]. Özellikle transfer öğrenme, derin sinir ağları ve kapalı döngü kalibrasyon yöntemleri, hem ürün kalitesini hem de verimini eş zamanlı olarak iyileştirilmesine olanak tanımaktadır [23-25]. Ayrıca, hidropiroliz gibi yeni nesil piroliz teknikleri, özellikle viskozitesi yüksek olan ağır biyo-yagların özelliklerini iyileştirmek ve daha temiz yakıtlar üretmek amacıyla umut vaat etmektedir [26]. Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), PS ve PP gibi yaygın plastik türlerinin hızlı piroliziyle jet yakıtı aralığında alkanlar ve aromatiklerin elde edilmesi üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda artış

göstermektedir [27,28]. Literatürde bildirilen bulgular, piroliz parametrelerinin (sıcaklık, katalizör türü ve yükleme oranı) optimize edilmesiyle %80'in üzerinde sıvı ürün verimi elde edilebildiğini ve bu ürünlerin bileşiminin yakıt uygulamalarıyla uyumlu olduğunu göstermektedir [29].

Plastik atıkların ve biyokütlenin birlikte pirolizi üzerine yapılan güncel çalışmalar, hem çevresel sürdürülebilirliği teşvik eden hem de alternatif enerji üretimine katkı sunan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır [30-34]. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, piroliz teknolojisinin daha geniş ölçekte uygulanabilirliğini ve gelecekte fosil yakıtların yerini alabilecek potansiyelini ortaya koymaktadır [1,4,25, 35-37].

Bu derleme çalışmasının temel amacı, plastik atıkların döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda değerlendirilmesine katkı sunmak üzere, piroliz teknolojisinin mevcut durumu ve gelişen uygulamalarını kapsamlı bir biçimde incelemektir. Çalışma kapsamında; farklı plastik türlerinin piroliz süreçlerine etkileri, reaktör sistemleri ve işlem parametreleri ile ürünlerin verimi ve özellikleri detaylı olarak ele alınmakta, ayrıca yapay zeka destekli modelleme yaklaşımları ve ko-piroliz uygulamaları üzerinden sürecin optimizasyonuna yönelik güncel gelişmeler değerlendirilmektedir. Böylece, plastik atıkların katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesine yönelik sürdürülebilir teknolojik yaklaşımlar bütüncül bir perspektifle sunulmaktadır.

## 2. Deneysel Yaklaşım

Deneysel düzeneğin tasarımı ve uygulanması, plastik atıkların pirolizi konusunda yapılan araştırmaların temelini oluşturmaktadır. Piroliz deney düzeneği, plastik atıkların laboratuvar ölçekli pirolizi için yaygın olarak kullanılan deneysel sistemlerin temel bileşenleri kullanılan reaktör tipi, ısıtma sistemi, gaz akış kontrolü ve ürün depolama üniteleri gibi çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır.

### 2.1. Reaktör Sistemi

Piroliz reaktörü, plastik atıkların ısı olarak parçalandığı ana ünitelerdir [38]. Laboratuvar ölçekli çalışmalarda genellikle yatay tüp fırınlar, dikey tüp fırınlar ya da sabit yataklı reaktörler kullanılmaktadır [39,40]. Deneysel çalışmaların yanı sıra endüstriyel olarak uygulanan piroliz işlemlerinde reaktör tipi değişkenlik göstermektedir [41]. Tablo 1'de piroliz teknolojisinde kullanılan reaktör çeşitleri, ölçeği, avantajları ve dezavantajları yer almaktadır. Bu fırınlar, yüksek sıcaklıklara numunelerin kontrollü bir sıcaklık rejiminde ısıtılmasını sağlamaktadır [42,43]. Reaktörün sıcaklık kontrolü, bir termokupl ve dijital sıcaklık kontrol ünitesi aracılığıyla sağlanmaktadır [44-46].

**Tablo 1.** Piroliz Teknolojisinde Kullanılan Reaktör Tipleri, Ölçeği, Avantajları ve Dezavantajları [1,39-46]

| Reaktör Tipi    | Üretim Ölçeği | Avantajlar                              | Dezavantajlar             |
|-----------------|---------------|-----------------------------------------|---------------------------|
| Yatay Tüp Fırın | Laboratuvar   | Basit tasarım, yüksek sıcaklık kontrolü | Sınırlı ölçeklenebilirlik |

| Reaktör Tipi            | Üretim Ölçeği      | Avantajlar                                      | Dezavantajlar                              |
|-------------------------|--------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Sabit Yataklı Reaktör   | Laboratuvar/ Pilot | Düşük maliyet, basit operasyon                  | Düşük ısı transferi, sınırlı verimlilik    |
| Akışkan Yataklı Reaktör | Endüstriyel        | Yüksek ısı transferi, homojen sıcaklık dağılımı | Karmaşık tasarım, yüksek işletme maliyeti  |
| Döner Fırın             | Endüstriyel        | Sürekli işlem, heterojen atık işleme yeteneği   | Yüksek enerji tüketimi, bakım gereksinimi  |
| Dikey Tüp Fırın         | Laboratuvar        | Kısa reaksiyon süresi, gaz ürün analizi         | Karmaşık operasyon, sınırlı uygulama alanı |

## 2.2. Piroliz Atmosferi ve Gaz Akış Hızı

Piroliz işleminin oksijensiz ortamda gerçekleşmesi gerektiğinden, sistem inert gaz (genellikle azot veya argon) ile beslenir [1,47]. Gazın debisi, bir akış ölçer yardımıyla kontrol edilmektedir [48]. Gaz akışı, reaktörün içine inert ortam sağlamakla kalmaz, aynı zamanda oluşan uçucu ürünlerin yoğunlaştırıcıya taşınmasını da sağlamaktadır [49].

## 2.3. Isıtma Rejimi

Isıtma rejimi, piroliz ürünlerinin oluşumunu belirleyen kritik bir parametredir [50]. Termogravimetrik analiz (TGA), piroliz deneylerinden önce plastiklerin bozunma sıcaklıklarını belirlemek için sıklıkla kullanılmaktadır [51,52]. İzotermal ısıtma rejiminde, reaktör belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta belirli bir süre termal parçalanmanın tamamlanması için beklenmektedir [50]. Dinamik ısıtma rejiminde ise sıcaklık, belirli bir hızla sürekli olarak artırılmaktadır [53].

## 2.4. Ürün Depolama/Toplama Üniteleri

Piroliz süreci sonunda gaz, sıvı ve katı olmak üzere üç ana ürün elde edilmektedir. Sıvı ürünler, yoğunlaştırıcı (kondenser) yardımıyla toplanmaktadır [54]. Gaz ürünler, doğrudan gaz analiz sistemlerine yönlendirilmektedir ya da Tedlar torbalarda toplandıktan sonra bileşim analizi yapılmaktadır [55]. Katı ürünler, piroliz tüpünden çıkarılarak faz ve mikroyapı karakterizasyon çalışmaları için hazırlanmaktadır. Elde edilen veriler, piroliz süreçlerinin optimizasyonu ve ürün kalitesinin artırılması için kritik öneme sahiptir [55].

## 3. Piroliz Ürünlerinin Sınıflandırılması

Sürdürülebilir atık yönetimi açısından piroliz sonucu edilen ürünlerin miktarı ve kimyasal yapısı, piroliz koşullarına ve hammadde olarak kullanılan plastik türüne bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir [56,57]. Pirolitik yağ, gaz (sentez gaz) ve pirolitik çarın uygulama alanları bu farklılıklara göre değişim göstermektedir.

### 3.1. Pirolitik Gaz Özellikleri ve Uygulama Alanları

Piroliz işlemi sonucunda ortaya çıkan gaz ürünler, plastik

atıkların inert atmosferde yüksek sıcaklıklara maruz kalmasıyla gerçekleşen termal bozunma reaksiyonlarının bir sonucu olarak oluşmaktadır [58]. Elde edilen gaz karışımı; başta hidrojen ( $H_2$ ), karbon monoksit ( $CO$ ), karbondioksit ( $CO_2$ ), metan ( $CH_4$ ), etan ( $C_2H_6$ ) ve propan ( $C_3H_8$ ) olmak üzere çeşitli hafif hidrokarbonları, azot oksitleri ( $NO_x$ ) ve kükürtlü bileşenleri içerebilmektedir [59]. Bu gazlar, yüksek enerji içerikleri sayesinde doğrudan yakma sistemlerinde yakıt olarak kullanılabilir gibi, içten yanmalı gaz motorlarında elektrik üretimi ve Fischer-Tropsch sentezi gibi ileri düzey kimyasal dönüşüm proseslerinde de değerlendirilebilmektedir [60]. Özellikle hidrojen açısından zengin piroliz gazları, sürdürülebilir enerji stratejileri kapsamında yeşil hidrojen üretim potansiyeli bakımından dikkat çekmektedir [61,62]. Piroliz koşullarının (sıcaklık, tutma süresi, plastik türü vb.) optimize edilmesi, gaz ürün fraksiyonunun artırılmasını ve bu fraksiyonun ısıl değerinin yükselmesini sağlamaktadır [63]. Elde edilen gaz ürünlerin analizi, genellikle gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (GC-MS), mikro-gaz kromatografisi (micro-GC) ileri karakterizasyon teknikleri ile gerçekleştirilmektedir [64,65]. Bu yönüyle, gaz fazı ürünler hem enerji geri kazanımı hem de alternatif kimyasal üretim yolları açısından stratejik öneme sahiptir [58].

### 3.2. Pirolitik Sıvı (Yağ) Özellikleri ve Uygulama Alanları

Plastik atıkların piroliziyle elde edilen piroliz yağı, fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından konvansiyonel dizel yakıtına benzerlik göstermektedir. Yüksek aromatik hidrokarbon içeriği nedeniyle koyu renkli ve viskoz bir sıvı olan bu yağ, yüksek alt ısıl değeri sayesinde enerji üretiminde doğrudan yakıt olarak kullanılabilir [66]. Piroliz yağı, damıtma işlemiyle daha hafif fraksiyonlara ayrılarak dizel motorlarında ve jeneratörlerde alternatif yakıt olarak değerlendirilebilmektedir [67]. Enerji üretiminin ötesinde, piroliz yağı kimya endüstrisinde sürdürülebilir monomer ve kimyasal üretimi için hammadde olarak kullanılmaktadır [68]. Ayrıca, çimento endüstrisinde alternatif yakıt olarak kullanımı, fosil yakıt tüketimini azaltarak çevresel faydalar sağlamaktadır [69]. Ancak, piroliz yağının doğrudan kullanımı öncesinde damıtma, hidrodesülfürizasyon veya katalitik kırma gibi rafinasyon işlemlerine tabi tutulması gerekmektedir. Bu işlemler, yakıtın kalitesini artırmakta ve kullanım alanlarını genişletmektedir [70].

### 3.3. Pirolitik Katı (Çar) Özellikleri ve Uygulama Alanları

Piroliz işlemi sonucunda elde edilen katı kalıntı, karbon açısından zengin, gözenekli yapıda ve yüksek yüzey alanına sahip bir malzemedir [71]. Bu özellikleri sayesinde, tarımsal verimliliği artırmak ve karbon sekestrasyonu sağlamak amacıyla toprağa karıştırılarak kullanılmaktadır [72]. Ayrıca, çarın adsorban olarak ağır metal ve organik kirleticilerin gideriminde etkin bir şekilde işlev gördüğü gösterilmiştir [73]. Plastik atıklardan elde edilen çarın, biyokütle kaynaklı biyoçara kıyasla daha düşük oksijenli fonksiyonel grup içeriğine sahip olması toprakla etkileşimini sınırlandırmaktadır [74]. Ancak, aktivasyon ve yüzey fonksiyonlandırma gibi modifikasyon yöntemleriyle bu sınırlamalar aşılabilmekte ve bu durum çarın kullanım alanları genişletmektedir [75].

Sonuç olarak, plastik atıkların piroliziyle elde edilen çar enerji geri kazanımı ve çevresel fayda sağlama potansiyeliyle çeşitli alanlarda değerlendirilebilmektedir [76]. Ancak, ürün kalitesi, piroliz sistem tasarımı ve proses optimizasyonu ile doğrudan ilişkili olduğundan endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğin artırılması adına ürün karakterizasyonu, saflaştırma ve entegrasyon süreçlerinin detaylı olarak ele alınması gerekmektedir.

#### 4. Piroliz Ürün Verimlerinin Değerlendirilmesi

Pirolitik ürünlerin verim oranları, proses koşullarının optimize edilmesiyle uygulama amacına göre yönlendirilebilmektedir [77,78]. Piroliz ürünlerinin dağılımını etkileyen temel parametreler arasında plastik türü (örneğin PE, PP, PS), işlem sıcaklığı, ısıtma hızı, inert atmosferdeki gaz debisi, bekleme süresi ve potansiyel katalizör kullanımı yer almaktadır. Genel olarak, yüksek sıcaklık uygulamaları gaz ürün miktarını artırırken; orta sıcaklık aralıkları sıvı ürün (piroliz yağı) verimini maksimize etmektedir. Öte yandan, katı kalıntı verimi genellikle düşük sıcaklıkta veya yetersiz termal ayrışma koşullarında daha yüksek olmaktadır [79].

Literatürde, farklı plastik türleri ve piroliz sistemleri kullanılarak elde edilen ürün verimleri Tablo 2’de genel aralıklar içerisinde rapor edilmiştir.

**Tablo 2.** Piroliz işlemi sonucunda elde edilen ürünlerin genel verim aralıkları (% ağırlıkça) [4,27,74]

| Ürün Türü     | Verim Aralığı (%) |
|---------------|-------------------|
| Gaz Ürünleri  | 2 – 47            |
| Pirolitik Çar | 0 – 16            |
| Piroliz Yağı  | 31 – 91           |

Verim dağılımlarındaki bu geniş varyasyon, piroliz prosesinin tasarımında operasyonel parametrelerin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Reaktör tipi (sabit yataklı, akışkan yataklı, mikrodalga destekli vb.), katalizör türü ve yükleme oranı ile plastik atıkların ön işlem basamakları gibi faktörlerin ürün verimi üzerinde belirleyici etkileri bulunmaktadır. Dolayısıyla hedef ürün kompozisyonuna göre prosesin yönlendirilmesi, hem ekonomik açıdan rekabetçi üretim sağlanması hem de çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir [63,80].

#### 5. Plastik Atıkların Küresel Ölçeği

Plastik atıkların piroliz yoluyla değerlendirilmesinin bir çözüm olarak önerilebilmesi için, plastik kirliliğinin temel yönleri detaylı biçimde analiz edilmeli, problemin tanımı net bir şekilde yapılmalı ve kapsamı doğru biçimde anlaşılmalıdır. Plastik atıkların kaynakları, çevresel etkileri ve küresel ölçekteki birikim düzeyi değerlendirildiğinde, piroliz teknolojisinin bu sorunun azaltılmasındaki potansiyeli daha açık biçimde ortaya çıkmaktadır.

Plastik atık sorununun ölçeği oldukça büyüktür ve giderek artmaktadır. Güncel projeksiyonlara göre, küresel plastik

talebinin 2050 yılına kadar yaklaşık 800 milyon metrik tona ulaşması beklenmektedir. Eğer mevcut atık yönetim eğilimleri sürdürülecek olursa, bu üretim artışının bir sonucu olarak yüzyıl ortasına kadar 9 ila 17 milyar ton plastik atığın çevreye veya düzenli depolama alanlarına bırakılması öngörülmektedir [4].

Plastik talebinin temel itici gücü, tek kullanımlık ürünlerdir. Ambalaj sektörü, küresel plastik pazarının yaklaşık %38’ini oluşturmakta iken ambalaj sektörünü inşaat (%23), tüketim ürünleri (%13) ve ulaşım sektörü (%3) izlemektedir. PE, PP ve PVC gibi polimerler en yaygın kullanılan türlerdendir [4]. Bu durum, mevcut geri dönüşüm teknolojilerinin kapasitesinin artırılması ve sürdürülebilir atık yönetim uygulamalarının yaygınlaştırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

2024 yılı itibarıyla plastik atık üretimi küresel ölçekte artış göstermektedir. Aynı yıl içinde, plastik geri dönüşüm kapasitesi açısından lider bölge OECD Avrupa’dır. Bu bölgede gelişmiş teknolojiye sahip tesisler, sıkı çevresel düzenlemeler ve yüksek geri toplama oranlarıyla geri dönüşüm faaliyetleri desteklenmektedir. Bu nedenle Almanya, Fransa, İtalya ve İspanya gibi ülkelerin katkısıyla Avrupa plastik atıkların toplanmasında lider konumunda bulunmaktadır. Buna karşılık, Orta Doğu, Afrika ve Amerika kıtalarında plastik atık üretimi ile geri dönüşüm kapasitesi arasında belirgin bir dengesizlik bulunmaktadır [4,81-84]. Tablo 3’ te 2024 yılı itibarıyla plastik atık üretiminin bölgelere göre dağılımını özet halinde verilmiştir. Bu veriler, Asya’nın plastik atık üretiminde lider olduğunu göstermektedir. Afrika kıtası da artan tüketim ve yetersiz atık yönetimi altyapısı nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu durum, plastik atık yönetimi stratejilerinin bölgeye özgü biçimde kurgulanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Düzenleyici düzeyde, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) Plastik Kirliliği Antlaşması ve Basel Sözleşmesi gibi uluslararası anlaşmalar, plastik üretiminin azaltılması ve geri dönüşüm oranlarının artırılması için daha sıkı önlemleri teşvik etmektedir [83-91]. Paris İklim Antlaşması kapsamında yapılan değerlendirmeler, plastik sektörünün mevcut eğilimlerle 2050 yılına kadar küresel karbon bütçesini üç kat aşabileceğini ve bu sınırın %16’sını tek başına oluşturabileceğini göstermektedir [4]. Dolayısıyla, plastik kullanımının %75 oranında azaltılması ve 2040 yılına kadar tek kullanımlık plastiklerin yasaklanması gerektiği vurgulanmaktadır.

**Tablo 3.** 2024 yılı itibarıyla plastik atık üretiminin bölgelere göre dağılımı [83-91]

| Bölge                       | Plastik Atık Üretimi<br>(Milyon Ton) |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Asya                        | 52                                   |
| Afrika                      | 17                                   |
| Latin Amerika ve Karayipler | 7,9                                  |
| Avrupa                      | 3,3                                  |
| ABD ve Kanada               | 0,3                                  |

## 5. Sonuç

Plastik atıkların hızla artan çevresel etkileri karşısında, bu atıkların katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi, sadece atık yönetimi açısından değil, aynı zamanda kaynak verimliliği ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda stratejik önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında derlenen literatür, piroliz teknolojisinin plastik atıkların termokimyasal dönüşümünde yüksek potansiyele sahip, esnek ve ölçeklenebilir bir yöntem olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Piroliz süreciyle elde edilen gaz, sıvı ve katı ürünlerin enerji ve hammadde olarak yeniden kullanımı, fosil kaynaklara olan bağımlılığı azaltmakta ve üretim-tüketim sisteminin kapalı bir döngüde işler hale gelmesini sağlamaktadır. Bu açıdan piroliz, plastik atıkların bertaraf edilmesini değil, bu atıkların ikincil kaynaklara dönüştürülmesini hedefleyen döngüsel ekonomi yaklaşımı ile güçlü bir uyum içindedir. Ürün verimliliği; plastik türü, işlem sıcaklığı, gaz atmosferi, katalizör kullanımı gibi proses parametrelerine doğrudan bağlıdır. Ayrıca, yapay zekâ destekli optimizasyon teknikleri, proses kontrolünü geliştirerek hem ürün kalitesini artırmakta hem de enerji verimliliğini iyileştirmektedir. Ko-piroliz uygulamaları ile biyokütle ve plastik atıkların sinerjik kullanımı ise, hem çevresel etkiyi azaltmakta hem de yeni nesil yakıt sentezi için uygun bileşimler sunmaktadır. Sonuç olarak, plastik atıkların piroliz yoluyla değerlendirilmesi; atıkların azaltılması, enerji ve hammadde geri kazanımı, çevresel kirliliğin önlenmesi ve sanayiye sürdürülebilir girdiler sağlanması bakımından döngüsel ekonominin temel hedefleriyle örtüşen bütüncül bir çözümdür. Bu dönüşümün endüstriyel ölçekte başarılabilmesi için ise ileri düzey rafinasyon teknikleri, proses tasarımı ve ürün standardizasyonuna yönelik çok disiplinli araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

## Yazar Katkısı

Veri iyileştirme - Eda Ergün Songül (EES); Biçimsel analiz - EES; Araştırma - EES; Veri toplama - EES; Veri işleme - EES; Literatür taraması - EES; Yazan – EES ve Melek Cumbul Altay (MCA); İnceleme ve düzenleme – MCA.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayınlanması ile ilgili olarak herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemiştir.

## Kaynaklar

- [1] Hasan, M. M., Haque, R., Jahirul, M. I., & Rasul, M. G. (2025). Pyrolysis of plastic waste for sustainable energy Recovery: Technological advancements and environmental impacts. *Energy Conversion and Management*, 326, 119511.
- [2] Vuppaladadiyam, S. S. V., Vuppaladadiyam, A. K., Sahoo, A., Urgunde, A., Murugavelh, S., Šrámek, V., ... & Pant, K. K. (2024). Waste to energy: Trending key challenges and current technologies in waste plastic management. *Science of The Total Environment*, 913, 169436.
- [3] Najahi, H., Banni, M., Nakad, M., Abboud, R., Assaf, J. C.,

Operato, L., ... & Hamd, W. (2025). Plastic pollution in food packaging systems: impact on human health, socioeconomic considerations and regulatory framework. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 100667.

[4] Saxena, S. (2024). Pyrolysis and beyond: Sustainable valorization of plastic waste. *Applications in Energy and Combustion Science*, 100311.

[5] Badejo, O., Hernández, B., Vlachos, D. G., & Ierapetrinou, M. G. (2024). Design of sustainable supply chains for managing plastic waste: The case of low density polyethylene. *Sustainable Production and Consumption*, 47, 460-473.

[6] Kusmiyati, K., & Fudholi, A. (2025). A Systematic Literature Review on The Pyrolysis of Plastic Waste and Waste Oil for Fuel Production: Targeted Waste Management Solution for Central Java, Indonesia. *Cleaner Waste Systems*, 100308.

[7] Hu, X., Ma, D., Zhang, G., Ling, M., Hu, Q., Liang, K., ... & Zheng, Y. (2023). Microwave-assisted pyrolysis of waste plastics for their resource reuse: A technical review. *Carbon Resources Conversion*, 6(3), 215-228.

[8] Fan, S., Zhang, Y., Cui, L., Maqsood, T., & Nizetić, S. (2023). Cleaner production of aviation oil from microwave-assisted pyrolysis of plastic wastes. *Journal of Cleaner Production*, 390, 136102.

[9] Martínez-Narro, G., Phan, H. H., Hassan, S., Beaumont, S. K., & Phan, A. N. (2024). Catalytic pyrolysis of plastic waste using metal-incorporated activated carbons for monomer recovery and carbon nanotube synthesis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2), 112226.

[10] Wang, Y., Biddle, T., Jiang, C., Luong, T., Chen, R., Brown, S., ... & Hu, J. (2023). Microwave-driven upcycling of single-use plastics using zeolite catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 465, 142918.

[11] Ding, K., Liu, S., Huang, Y., Liu, S., Zhou, N., Peng, P., ... & Ruan, R. (2019). Catalytic microwave-assisted pyrolysis of plastic waste over NiO and HY for gasoline-range hydrocarbons production. *Energy Conversion and Management*, 196, 1316-1325.

[12] Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of hazardous materials*, 344, 179-199.

[13] Jeswani, H., Krüger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony, F., Hann, S., & Azapagic, A. (2021). Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. *Science of the Total Environment*, 769, 144483.

[14] Arielle, D. T. L., Nalume, W. G., & Gilbert, Y. (2024). A Review of the Life Cycle Analysis for Plastic Waste Pyrolysis. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 14(3), 113-145.

[15] Xayachak, T., Haque, N., Parthasarathy, R., King, S.,

- Emami, N., Lau, D., & Pramanik, B. K. (2022). Pyrolysis for plastic waste management: An engineering perspective. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108865.
- [16] Junior, I. J. T., Alves, J. L. F., Brusamarello, C. Z., & Di Domenico, M. (2025). Impact of operational parameters on the yield of biochar, bio-oil, and pyrolytic gas in lignocellulosic biomass pyrolysis: A systematic review. *Bioresource Technology Reports*, 102155.
- [17] Maulinda, L., Husin, H., Rahman, N. A., Rosnelly, C. M., Nasution, F., Abidin, N. Z., & Yani, F. T. (2023). Effects of temperature and times on the product distribution of bio-oils derived from *Typha latifolia* pyrolysis as renewable energy. *Results in Engineering*, 18, 101163.
- [18] Huang, Z., Manzo, M., Xia, C., Cai, L., Zhang, Y., Liu, Z., ... & Lam, S. S. (2022). Effects of waste-based pyrolysis as heating source: meta-analyze of char yield and machine learning analysis. *Fuel*, 318, 123578.
- [19] Chen, W. H., Biswas, P. P., Kwon, E. E., Park, Y. K., Rajendran, S., Gnanasekaran, L., & Chang, J. S. (2023). Optimization of the process parameters of catalytic plastic pyrolysis for oil production using design of experiment approaches: A review. *Chemical Engineering Journal*, 471, 144695.
- [20] Quesada, L., Pérez, A., Godoy, V., Peula, F. J., Calero, M., & Blázquez, G. (2019). Optimization of the pyrolysis process of a plastic waste to obtain a liquid fuel using different mathematical models. *Energy conversion and management*, 188, 19-26.
- [21] Pang, D., Moliner, C., Wang, T., Sun, J., Zhang, X., Pang, Y., ... & Wang, W. (2025). A Mini Review on AI-driven Thermal Treatment of Solid Waste: Emission Control and Process Optimization. *Green Energy and Resources*, 100132.
- [22] Khandelwal, K., Nanda, S., & Dalai, A. K. (2024). Machine learning to predict the production of bio-oil, biogas, and biochar by pyrolysis of biomass: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(6), 2669-2698.
- [23] Cahanap, D. R., Mohammadpour, J., Jalalifar, S., Mehrjoo, H., Norouzi-Apourvari, S., & Salehi, F. (2023). Prediction of three-phase product yield of biomass pyrolysis using artificial intelligence-based models. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 172, 106015.
- [24] Akinpelu, D. A., Adekoya, O. A., Oladoye, P. O., Ogbaga, C. C., & Okolie, J. A. (2023). Machine learning applications in biomass pyrolysis: from biorefinery to end-of-life product management. *Digital Chemical Engineering*, 8, 100103.
- [25] Timilsina, M. S., Chaudhary, Y., Bhattarai, P., Uprety, B., & Khatiwada, D. (2024). Optimizing pyrolysis and Co-Pyrolysis of plastic and biomass using Artificial Intelligence. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100783.
- [26] Han, Y., Gholizadeh, M., Tran, C. C., Kaliaguine, S., Li, C. Z., Olarte, M., & Garcia-Perez, M. (2019). Hydrotreatment of pyrolysis bio-oil: A review. *Fuel Processing Technology*, 195, 106140.
- [27] Zhang, Y., Duan, D., Lei, H., Villota, E., & Ruan, R. (2019). Jet fuel production from waste plastics via catalytic pyrolysis with activated carbons. *Applied Energy*, 251, 113337.
- [28] Lin, X., Lei, H., Huo, E., Qian, M., Mateo, W., Zhang, Q., ... & Villota, E. (2020). Enhancing jet fuel range hydrocarbons production from catalytic co-pyrolysis of Douglas fir and low-density polyethylene over bifunctional activated carbon catalysts. *Energy Conversion and Management*, 211, 112757.
- [29] Tawai, A., Bardeeniz, S., Rochpuang, C., Amornraksa, S., Hussain, M. A., & Panjapornpon, C. (2025). Self-Driving Surrogate Modeling for Optimizing Targeted Bio-Oil Yield and Heating Value in Waste Biomass-Plastic Co-Pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107158.
- [30] Seah, C. C., Tan, C. H., Arifin, N. A., Hafriz, R. S. R. M., Salmiaton, A., Nomanbhay, S., & Shamsuddin, A. H. (2023). Co-pyrolysis of biomass and plastic: Circularity of wastes and comprehensive review of synergistic mechanism. *Results in engineering*, 17, 100989.
- [31] Nawaz, A., & Razzak, S. A. (2024). Co-pyrolysis of biomass and different plastic waste to reduce hazardous waste and subsequent production of energy products: A review on advancement, synergies, and future prospects. *Renewable energy*, 224, 120103.
- [32] Anshu, K., Kenttämä, H. I., & Thengane, S. K. (2024). A comprehensive review on co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and polystyrene. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 205, 114832.
- [33] Nawaz, A., Haddad, H., Shah, M. A., Uddin, S., Hossain, M. M., & Razzak, S. A. (2024). Fueling sustainability: Co-pyrolysis of microalgae biomass and waste plastics for renewable energy and waste mitigation. *Biomass and Bioenergy*, 187, 107303.
- [34] Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., McKay, G., Mackey, H., & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112715.
- [35] Bhushan, D., Hooda, S., & Mondal, P. (2025). Co-pyrolysis of biomass and plastic wastes and application of machine learning for modelling of the process: A comprehensive review. *Journal of the Energy Institute*, 101973.
- [36] Wang, Z., Burra, K. G., Lei, T., & Gupta, A. K. (2021). Co-pyrolysis of waste plastic and solid biomass for synergistic production of biofuels and chemicals-A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 84, 100899.
- [37] Mishra, R., Ong, H. C., & Lin, C. W. (2023). Progress on co-processing of biomass and plastic waste for hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 284, 116983.

- [38] Adhikari, S., Nam, H., & Chakraborty, J. P. (2018). Conversion of solid wastes to fuels and chemicals through pyrolysis. *Waste biorefinery*, 239-263.
- [39] Saravanathamizhan, R., Perarasu, V. T., & Vetrivelan, K. (2023). Thermochemical conversion of biomass into valuable products and its modeling studies. In *Green approach to alternative fuel for a sustainable future* (pp. 137-152). Elsevier.
- [40] Gerasimov, G., Khaskhachikh, V., Larina, O., Sytchev, G., & Zaichenko, V. (2021). Pyrolytic methods of converting municipal solid waste into biofuel. In *Handbook of Advanced Approaches towards Pollution Prevention and Control* (pp. 137-156). Elsevier.
- [41] Kumar, L. R., Adama, N., Yellapu, S. K., Yan, S., Tyagi, R. D., & Drogui, P. (2021). Technology Transfer From Bench to Industry: Closing Loop. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals* (pp. 699-720). Elsevier.
- [42] Qiu, B., Yang, C., Shao, Q., Liu, Y., & Chu, H. (2022). Recent advances on industrial solid waste catalysts for improving the quality of bio-oil from biomass catalytic cracking: a review. *Fuel*, 315, 123218.
- [43] Shah, A. T., Attique, S., Batool, M., Godini, H. R., & Goerke, O. (2021). Role of polyoxometalates in converting plastic waste into fuel oil. In *Advanced Technology for the Conversion of Waste into Fuels and Chemicals* (pp. 333-355). Woodhead Publishing.
- [44] Seo, M. W., Lee, S. H., Nam, H., Lee, D., Tokmurzin, D., Wang, S., & Park, Y. K. (2022). Recent advances of thermochemical conversion processes for biorefinery. *Bioresource technology*, 343, 126109.
- [45] Collard, F. X., Carrier, M., & Görgens, J. F. (2016). Fractionation of lignocellulosic material with pyrolysis processing. In *Biomass fractionation technologies for a lignocellulosic feedstock based biorefinery* (pp. 81-101). Elsevier.
- [46] Pattiya, A. (2018). Catalytic pyrolysis. *Direct thermochemical liquefaction for energy applications*, 29-64.
- [47] Marchetti, L., Guastaferrò, M., Annunzi, F., Tognotti, L., Nicoletta, C., & Vaccari, M. (2024). Two-stage thermal pyrolysis of plastic solid waste: Set-up and operative conditions investigation for gaseous fuel production. *Waste Management*, 179, 77-86.
- [48] Venturelli, M., Falletta, E., Pirola, C., Ferrari, F., Milani, M., & Montorsi, L. (2022). Experimental evaluation of the pyrolysis of plastic residues and waste tires. *Applied Energy*, 323, 119583.
- [49] Kim, D., Lee, S., Woo, S. Y., & Park, K. Y. (2025). Enhanced hydrogen production through temperature-optimized pyrolysis of mixed plastic waste for sustainable energy recovery. *Process Safety and Environmental Protection*, 196, 106934.
- [50] Krishna, J. J., Korobeinichev, O. P., & Vinu, R. (2019). Isothermal fast pyrolysis kinetics of synthetic polymers using analytical Pyroprobe. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 139, 48-58.
- [51] Mortezaeikia, V., Tavakoli, O., & Khodaparasti, M. S. (2021). A review on kinetic study approach for pyrolysis of plastic wastes using thermogravimetric analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 160, 105340.
- [52] Jakić, M., Vrandečić, N. S., & Klarić, I. (2013). Thermal degradation of poly (vinyl chloride)/poly (ethylene oxide) blends: Thermogravimetric analysis. *Polymer degradation and stability*, 98(9), 1738-1743.
- [53] Zhang, W., Jia, J., Ding, Y., Jiang, G., Sun, L., & Lu, K. (2022). Effects of heating rate on thermal degradation behavior and kinetics of representative thermoplastic wastes. *Journal of Environmental Management*, 314, 115071.
- [54] Yang, H., de Wild, P., Lahive, C. W., Wang, Z., Deuss, P. J., & Heeres, H. J. (2022). Experimental studies on a combined pyrolysis/staged condensation/hydrotreatment approach to obtain biofuels and biobased chemicals. *Fuel Processing Technology*, 228, 107160.
- [55] Akubo, K., Nahil, M. A., & Williams, P. T. (2019). Pyrolysis-catalytic steam reforming of agricultural biomass wastes and biomass components for production of hydrogen/syngas. *Journal of the Energy Institute*, 92(6), 1987-1996.
- [56] Demirbas, A. (2004). Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(1), 97-102.
- [57] Valizadeh, S., Valizadeh, B., Seo, M. W., Choi, Y. J., Lee, J., Chen, W. H., ... & Park, Y. K. (2024). Recent advances in liquid fuel production from plastic waste via pyrolysis: Emphasis on polyolefins and polystyrene. *Environmental Research*, 246, 118154.
- [58] Palos, R., Gutierrez, A., Vela, F. J., Olazar, M., Arandes, J. M., & Bilbao, J. (2021). Waste refinery: the valorization of waste plastics and end-of-life tires in refinery units. A review. *Energy & Fuels*, 35(5), 3529-3557.
- [59] Wang, Y., Huang, L., Zhang, T., & Wang, Q. (2022). Hydrogen-rich syngas production from biomass pyrolysis and catalytic reforming using biochar-based catalysts. *Fuel*, 313, 123006.
- [60] Steynberg, A. P. (2004). Introduction to fischer-tropsch technology. In *Studies in surface science and catalysis* (Vol. 152, pp. 1-63). Elsevier.
- [61] Tabu, B., Hydrogen production from polymeric organic solids via atmospheric pressure nonthermal plasma, (2023), PhD, University of Massachusetts Lowell, Massachusetts.
- [62] Al-Qadri, A. A., Ahmed, U., Ahmad, N., Jameel, A. G. A., Zahid, U., & Naqvi, S. R. (2024). A review of hydrogen generation through gasification and pyrolysis of waste plastic and tires: Opportunities and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 77, 1185-1204.
- [63] Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaiza, A. S., Rehan,

- M., & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822-838.
- [64] Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Alvarez, J., Bilbao, J., & Olazar, M. (2018). Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 576-596.
- [65] Beneroso, D., Bermúdez, J. M., Arenillas, A., & Menéndez, J. A. (2015). Microwave pyrolysis of organic wastes for syngas-derived biopolymers production. *Production of Biofuels and Chemicals with Microwave*, 99-127.
- [66] Faisal, F., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., & Chowdhury, A. A. (2023). Waste plastics pyrolytic oil is a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics. *Science of the Total Environment*, 886, 163756.
- [67] Faisal, F., Rasul, M. G., Chowdhury, A. A., Schaller, D., & Jahirul, M. I. (2023). Uncovering the differences: A comparison of properties of crude plastic pyrolytic oil and distilled and hydrotreated plastic diesel produced from waste and virgin plastics as automobile fuels. *Fuel*, 350, 128743.
- [68] Chai, C. H. T., Chan, C. Y., Heng, J. Z. X., Tang, K. Y., Loh, X. J., Li, Z., & Ye, E. (2023). Converting plastic waste to fuel and fine chemicals. In *Circularity of Plastics* (pp. 71-100). Elsevier.
- [69] Ayer, N. W., & Dias, G. (2018). Supplying renewable energy for Canadian cement production: Life cycle assessment of bioenergy from forest harvest residues using mobile fast pyrolysis units. *Journal of Cleaner Production*, 175, 237-250.
- [70] Onwudili, J. A., & Scaldaferri, C. A. (2023). Catalytic upgrading of intermediate pyrolysis bio-oil to hydrocarbon-rich liquid biofuel via a novel two-stage solvent-assisted process. *Fuel*, 352, 129015.
- [71] Li, F., Wang, N., He, X., Deng, M., Yuan, X., Zhang, H., ... & Ok, Y. S. (2025). Biochar-based catalytic upgrading of plastic waste into liquid fuels towards sustainability. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 329.
- [72] Al-Rumaihi, A., Alherbawi, M., McKay, G., Mackey, H., Parthasarathy, P., & Al-Ansari, T. (2023). Assessing plastic and biomass-based biochar's potential for carbon sequestration: an energy-water-environment approach. *Frontiers in Sustainability*, 4, 1200094.
- [73] Inyang, M. I., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., Zimmerman, A., Mosa, A., ... & Cao, X. (2016). A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(4), 406-433.
- [74] Adeniyi, A. G., Iwuzor, K. O., Emenike, E. C., Ajala, O. J., Ogunniyi, S., & Muritala, K. B. (2024). Thermochemical co-conversion of biomass-plastic waste to biochar: a review. *Green Chemical Engineering*, 5(1), 31-49.
- [75] Qu, J., Shi, J., Wang, Y., Tong, H., Zhu, Y., Xu, L., ... & Zhang, Y. (2022). Applications of functionalized magnetic biochar in environmental remediation: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 434, 128841.
- [76] Zein, S. H., Grogan, C. T., Yansaneh, O. Y., & Putranto, A. (2022). Pyrolysis of high-density polyethylene waste plastic to liquid fuels—Modelling and economic analysis. *Processes*, 10(8), 1503.
- [77] Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Chowdhury, A. A., & Ashwath, N. (2012). Biofuels production through biomass pyrolysis—a technological review. *Energies*, 5(12), 4952-5001.
- [78] 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(1), 233-248.
- [79] Syamsiro, M., Saptoadi, H., Norsujianto, T., Noviasri, P., Cheng, S., Alimuddin, Z., & Yoshikawa, K. (2014). Fuel oil production from municipal plastic wastes in sequential pyrolysis and catalytic reforming reactors. *Energy procedia*, 47, 180-188.
- [80] Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste management*, 29(10), 2625-2643.
- [81] Soomro, S. S., Hong, C., & Shaver, M. P. (2025). Quantification of recycled content in plastics: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 221, 108426.
- [82] Anwar, M. A., Suprihatin, S., Sasongko, N. A., Najib, M., Pranoto, B., Firmansyah, I., & Soekotjo, E. S. (2025). Sustainable waste management strategies for multilayer plastic in Indonesia. *Cleaner and Responsible Consumption*, 16, 100254.
- [83] Fayshal, M. A. (2024). Current practices of plastic waste management, environmental impacts, and potential alternatives for reducing pollution and improving management. *Heliyon*, 10(23).
- [84] Hendrickson, T. P., Bose, B., Vora, N., Huntington, T., Nordahl, S. L., Helms, B. A., & Scown, C. D. (2024). Paths to circularity for plastics in the United States. *One Earth*, 7(3), 520-531.
- [85] Dokl, M., Copot, A., Krajnc, D., Van Fan, Y., Vujanović, A., Aviso, K. B., ... & Čuček, L. (2024). Global projections of plastic use, end-of-life fate and potential changes in consumption, reduction, recycling and replacement with bioplastics to 2050. *Sustainable Production and Consumption*, 51, 498-518.
- [86] Agustina, E., Sembiring, E., Sakti, A. D., & Purba, L. H. F. (2025). Development of plastic waste generation distribution model using remote sensing data product and machine learning. *Cleaner Waste Systems*, 100324.
- [87] Fayshal, M. A. (2024). Current practices of plastic waste management, environmental impacts, and potential

alternatives for reducing pollution and improving management. *Heliyon*, 10(23).

[88] Tumu, K., Vorst, K., & Curtzwiler, G. (2023). Global plastic waste recycling and extended producer responsibility laws. *Journal of Environmental Management*, 348, 119242.

[89] Soares, S., Serralha, F., Paz, M. C., Carriço, N., & Galatanu, S. V. (2024). Unveiling the data: An analysis of plastic waste with emphasis on the countries of the E<sup>3</sup>UDRES2 alliance. *Heliyon*.

[90] Stoett, P., Srich, V. M., Elliff, C. I., Andrade, M. M., Grilli, N. D. M., & Turra, A. (2024). Global plastic pollution, sustainable development, and plastic justice. *World Development*, 184, 106756.

[91] Higuchi, C., & Isobe, A. (2024). Reduction scenarios of plastic waste emission guided by the probability distribution model to avoid additional ocean plastic pollution by 2050s. *Marine Pollution Bulletin*, 207, 116791.