

Enerji ve Ulaşım da Yeni Yakıt Arayışları: İçten Yanmalı Motorlarda Polietilen Türevli Yakıtların Testleri ve Optimizasyonu

Sedat Şen¹

Özet

Yirmi birinci yüzyılın karşı karşıya olduğu en önemli iki küresel sorun, sürdürülebilir enerji kaynaklarına duyulan artan ihtiyaç ile giderek derinleşen atık yönetimi krizidir. Fosil yakıt kullanımına olan yüksek bağımlılık, başta iklim değişikliği ve çevresel bozulmalar olmak üzere çeşitli ekolojik sorunlara yol açmaktadır. Eş zamanlı olarak, özellikle tek kullanımlık plastiklerin yaygınlaşmasıyla birlikte, dünya genelinde devasa boyutlara ulaşan plastik atık yığınları, ekosistemler için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu iki sorunun kesişim noktasında, yeşil kimya ve döngüsel ekonomi prensipleriyle uyumlu, yenilikçi çözümler ortaya çıkmaktadır. Atık plastiklerin kimyasal geri dönüşüm yöntemleriyle sıvı yakıtlara dönüştürülmesi, bu çözümlerin en umut verici olanlarından biridir. Bu bölümde, polietilen atıklarından piroliz yöntemiyle elde edilen sıvı yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanımı kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Polietilen türevli yakıtların fizikokimyasal özellikleri, motor performansı ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri güncel literatür ışığında analiz edilmiş ve bu yakıtların kullanımını daha verimli ve çevre dostu hale getirmek için uygulanan optimizasyon çalışmalarından bahsedilmiştir. Çalışmalar bu yakıtların ısı değerlerine bağlı olarak, motorun özgül yakıt tüketimi ile fren efektif verimi üzerinde olumlu ya da olumsuz değişimler gözlemlenebileceğini, özellikle is emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip olduğunu diğer zararlı emisyonların ise polietilen türüne göre farklılıklar oluşturabileceğini göstermektedir. Bu yakıtların kullanımı ile oluşabilecek dezavantajları ortadan kaldırmak ve motorun verimli, ekonomik ve çevre dostu çalışmasını sağlamak için motor parametrelerinin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Optimizasyon çalışmaları ile yakıt tüketimi minimuma indirilirken efektif verim maksimuma, kirlenici emisyonlar ise minimuma indirilebilmektedir.

1 Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri, Makine, Tokat, 60200, Türkiye, sedat.sen@gop.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-7575-6927>

1. Giriş

Plastikler petrokimyasallardan elde edilen ve diğer kimyasallar ile birleştirilen monomerlerin polimerizasyonu ile geliştirilen sentetik malzemelerdir. Dünyada yıllık plastik üretimi 359 milyon tonun üzerindedir [1]. Üretilen bu miktarın 218 milyon tonu atık haline gelmekte iken sadece %15 kadarı geri dönüştürülebilmekte yaklaşık % 40 kadarı çeşitli yollar ile çevreye karışmaktadır [2]. Bu devasa atık miktarı, okyanuslar, toprak ve hava için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Piroliz yöntemi, mekanik geri dönüşüme uygun olmayan veya kontamine olmuş plastik atıkların değerlendirilmesinde özellikle etkilidir. Geleneksel geri dönüşüm yöntemlerine kıyasla piroliz, plastik atıkların kimyasal yapısını tamamen değiştirerek yüksek değerli ürünlere dönüştürebilmesi, daha az ön işlem gerektirmesi ve çeşitli plastik türlerini işleyebilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır [3].

Polietilen (PE), dünya plastik üretiminin büyük bir bölümünü oluşturan en yaygın polimer türüdür ve bu nedenle atık akışında önemli bir yer tutar. PE atıklarının termokimyasal bir süreç olan piroliz yoluyla sıvı hidrokarbonlara dönüştürülmesi hem atık yönetimine katkı sağlayan hem de konvansiyonel dizel yakıtı alternatif olabilecek bir yakıt kaynağı yaratan bir stratejidir. Elde edilen bu pirolitik yağ, içten yanmalı motorlarda (İYM), özellikle de sıkıştırma ile ateşlemeli (dizel) motorlarda kullanıma potansiyeline sahiptir [4]. Plastik atıklar, yüksek oranda karbon ve hidrojen içeriği nedeniyle piroliz yoluyla sıvı yakıt üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Polietilen bazlı yakıtlar, atık plastiğin geri dönüşümü ve enerji sürdürülebilirliği açısından önemli bir potansiyele sahiptir [5]. İYM'lerde yapılan testler, bu yakıtların termal verimlilik ve emisyon azaltımı açısından avantajlar sunabildiğini göstermektedir. Ayrıca çalışmalarda optimizasyon yapılarak giriş parametrelerini optimize etmek motor performansı maksimuma çıkarırken tüm emisyonları minimize etme noktasında faydalı model olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu bölümün amacı, polietilen atıklarından piroliz yöntemiyle elde edilen sıvı yakıtların (PE-türevli yakıt) içten yanmalı motorlardaki kullanımını kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bu bağlamda, PE-türevli yakıtların temel özellikleri, motor performansı ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri güncel literatür ışığında analiz edilecek ve bu yakıtların kullanımını daha verimli ve çevre dostu hale getirmek için uygulanan optimizasyon çalışmaları ile detaylandırılacaktır.

2. Polietilen Atıklarından Pirolitik Yakıt Üretimi ve Yakıt Özellikleri

2.1. Piroliz Yöntemi ve Proses Parametreleri

Atık plastiklerden yakıt üretimi için en yaygın kullanılan termokimyasal yöntem pirolizdir. Piroliz, oksijensiz veya oksijençe fakir bir ortamda, yüksek sıcaklıklar (genellikle 400-600°C) uygulanarak polimer zincirlerinin termal olarak parçalanması sürecidir [6,7]. Polietilenin pirolizi sonucunda üç ana ürün fraksiyonu elde edilir: sıvı (pirolitik yağ), gaz ve katı (karbon siyahı veya char). Sıvı ürün, benzin ve dizel yakıt aralığındaki hidrokarbonların karmaşık bir karışımıdır ve bu bölümün odak noktasını oluşturur. Piroliz prosesinin verimliliği ve elde edilen ürünlerin özellikleri, sıcaklık, ısıtma hızı, reaktör tipi ve katalizör kullanımı gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda (350-450°C) gerçekleştirilen piroliz, daha yüksek oranda sıvı ürün oluşumunu teşvik ederken, yüksek sıcaklıklar (>500°C) gaz ürün verimini artırır [8]. Katalitik piroliz, zeolitler, alümina veya silika-alümina gibi katalizörlerin kullanımıyla gerçekleştirilir ve daha yüksek kalitede sıvı ürün elde edilmesini sağlar [9].

2.2. PE-Türevli Yakıtların Fizikokimyasal Özellikleri ve Kimyasal Kompozisyonu

PE-türevli pirolitik yağın bir motorda yakıt olarak kullanılabilirliği, fizikokimyasal özelliklerine doğrudan bağlıdır. Bu özellikler, standart dizel yakıt ile karşılaştırıldığında önemli farklılıklar gösterebilir [3,4]. PE-türevli yakıtların yoğunluğu (780-820 kg/m³) standart dizel yakıtı (820-845 kg/m³) göre daha düşüktür, bu da birim hacimde daha az enerji içeriği anlamına gelmektedir. Son yıllarda yapılan detaylı kimyasal analizler, PE-türevli yakıtların kompozisyonunu daha iyi anlamamızı sağlamıştır. (PE) temelde karbon (C) ve hidrojenden (H) oluşan bir polimerdir. PE, polietilen ve polipropilen (PP) gibi poliolefinler arasında yer almaktadır. Chen ve arkadaşları (2024), çalışmalarında kullandıkları PE'nin elemen içeriğini %80.3 Karbon (C), %12.82 Hidrojen (H), %6.88 Oksijen (O) olarak belirtmişlerdir [10]. Bu içerikler, yakıtın yanma özelliklerini doğrudan etkilemektedir. PE-türevli yakıtın en belirgin avantajları yüksek ısı değeri ve düşük kükürt içeriğidir. Ancak, standart dizele göre genellikle daha düşük olan setan sayısı ve viskozitesi, yine motorun yanma süreci ve emisyonları üzerinde doğrudan etkili olan parametrelerdendir [2,11].

Tablo 1: Standart Dizel Yakıt ve Tipik PE Türevli Piroлитik Yakıtların Bazı Özelliklerinin Karşılaştırılması [12].

	Standart Dizel (EN590)	HDPE	LDPE
Yoğunluk (kg/m³)	0,8-0,9	0,8-0,9	0,7-0,8
Setan Sayısı	46-52	31,05	-
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	43	40,5	39,5

3. İçten Yanmalı Motorlarda Performans Yanma ve Emisyon Testleri

PE-türevli yakıtların dizel motorlardaki etkisini değerlendirmek için yapılan çalışmalar genellikle bu yakıtların saf dizel ile farklı oranlarda karıştırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Bu bölümde motor performansı parametrelerinden fren özgül yakıt tüketimi ve fren efektif verim üzerinde durulmuştur.

3.1. Motor Performansı

Fren Özgül Yakıt Tüketimi (FÖYT): Motor performansı genellikle fren efektif verimi ve fren özgül yakıt tüketimi ile ölçülebilmektedir. Literatürdeki çalışmalar, PE-türevli yakıt karışımlarının kullanımının motor performansı üzerinde değişken etkileri olduğunu göstermektedir.

Daha düşük bir özgül yakıt tüketimi değeri, motorun yakıtı daha verimli kullandığını göstermektedir. Birçok çalışma, PE-türevli yakıt karışımlarının özgül yakıt tüketiminin saf dizel yakıtına göre bir miktar arttığını rapor etmektedir. Bu duruma, yakıt karışımlarının daha düşük alt ısıl değerlerinin sebep olduğu düşünülmektedir. Daha düşük ısıl değere sahip olan test yakıtları ile yapılan çalışmalarda aynı efektif güce ulaşmak için yanma odasına daha fazla yakıt enjekte edilmek zorundadır.

Kumar ve arkadaşları (2013), yüksek yoğunluklu polietilen plastiklerden piroliz ile alternatif yakıt elde etmişlerdir. Elde ettikleri yakıtı farklı oranlarda dizel yakıtı ile karıştırarak değişken yüklere sahip 4 zamanlı direk enjeksiyonlu dizel motorda test etmişlerdir. Yakıt karışımlarındaki PE türevli yakıt konsantrasyonu arttıkça özgül yakıt tüketiminin arttığını bildirmişlerdir. Bu durum, PE türevli yakıtın dizelden daha düşük kalorifik değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır, bu da motorun daha fazla yakıt tüketmesine neden olmaktadır [13]. Bir başka çalışmada Muthukumar ve Kasiraman (2024), düşük yoğunluklu polietilenden piroliz sonucu elde ettikleri yakıtın test edilen tüm yakıt karışımları arasında en yüksek FÖYT

değerine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durumun nedeni olarak ise PE türevli yakıtın yine dizel yakıta kıyasla düşük kalorifik değeri olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum, yakıtın buharlaşmasını ve atomizasyonunu geciktirerek daha kötü bir yanmaya ve dolayısıyla daha fazla yakıt tüketimine yol açmaktadır [14].

Fren Efektif Verim (FEV): FEV, yakıtın kimyasal enerjisinin ne kadarının faydalı işe dönüştürüldüğünün bir ölçüsüdür. PE-türevli yakıtların ısı değerinin dizel yakıtına yakın olması nedeniyle, FEV değerleri genellikle saf dizelinkinden düşük olmakla birlikte yakın seviyelerdedir.

Panda ve arkadaşları (2016), Farklı karışım oranlarının motor performansına etkisi incelendiğinde, P10 (10% PE-türevli yakıt + 90%dizel) karışımının optimum performans sunduğu görülmektedir. Tam yük koşullarında yapılan testlerde, P10 karışımı ile fren ısı veriminde (BTE) sadece %0.2'lik bir düşüş gözlemlenirken, P20 ve P30 karışımlarında sırasıyla % 0.7 ve % 1.4'lük düşüşler kaydedilmiştir. Bu durum, düşük oranlı karışımların motor performansını önemli ölçüde etkilemeden kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, orta yüklerde (50-75%) P10 karışımı, daha iyi atomizasyon sayesinde saf dizel yakıtına kıyasla %1-2 daha yüksek BTE değerleri sergileyebilmektedir [15]. Bir başka çalışmada Mani ve arkadaşları (2011), tek silindirli bir dizel motorda yaptıkları çalışmalarında tam yükte, PE türevli dizel yakıt karışımları ve saf PE türevli yakıtın fren termal verimliliğinin saf dizel yakıtından düşük olduğunu bildirmişlerdir. Tam yükte dizel yakıtı için %28 olan fren efektif verim, %100 PE türevli yakıt için %27.4'e düşerken %1.9'luk bir azalma gözlemlemişlerdir. Bu düşüşün, PE türevli yakıt karışımlarının toplam ısı salınımlarının dizel yakıtından daha az olması ve yine tam yükte daha yüksek egzoz gazı sıcaklıkları oluşumundan kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir [16].

3.2. Yanma Karakteristikleri

Silindir içindeki yanma sürecini etkileyen en önemli unsurlardan biri, silindir içi gaz basıncıdır. Silindir içi gaz basıncı yakıtın miktarı, setan sayısı, ısı değeri, viskozitesi, yoğunluğu, motorun yük durumu ve çalışma devri, ateşleme gecikmesi süresi ve yakıtın atomizasyon kalitesi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Dizel motorlarda maksimum silindir basıncı ise, ani yanma sürecinin şiddeti, yanmış yakıt oranı ve yanma hızı gibi parametrelerden etkilenir. Tutuşma gecikmesi süresi, karışım oluşumunu doğrudan etkileyen yakıtın fizikokimyasal özelliklerinden etkilenmektedir. Özellikle setan sayısı, yoğunluk ve viskozite, tutuşma gecikmesi süresi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. PE türevli yakıtlar, düşük setan sayısı ve yüksek hidrokarbon

içeriği nedeniyle tutuşma gecikmesi süresini artırmaktadır. Bu durum, silindir içinde daha fazla yakıtın birikmesine ve ardından hızlı yanmaya neden olmaktadır. Pumpuang ve arkadaşları (2024), Polietilen (PE) türlerinden, Yüksek Yoğunluklu Polietilenden elde edilen piroliz yakıtının dizel motorlarındaki yanma karakteristikleri incelenmiştir. HDPE ile çalışmada, dizel yakıtına kıyasla düşük setan indeksi nedeniyle tüm motor yükleri için dizel yakıtından daha düşük ısı salınımları ve silindir içi basınçları elde ettiklerini bildirmişlerdir [17]. Alrazen ve arkadaşları (2023), çalışmalarında düşük yoğunluklu polietilen karışımlarının saf dizel yakıtı kıyasla dizel yakıtı kıyasla daha düşük silindir içi basınçlar ve düşük yüklerde daha düşük ısı salınımları meydana getirdiğini bildirmişlerdir [18].

3.3. Emisyon Karakteristikleri

PE türevi yakıtların dizel motorlarındaki NO_x emisyonları üzerindeki etkileri, kullanılan plastik türüne ve motor çalışma koşullarına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Genel olarak yapılan birçok çalışmada, dizel yakıtı kıyasla daha yüksek NO_x emisyonları gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni, yakıtın düşük setan sayısının tutuşma gecikmesi periyodunu uzatmasıdır. Uzayan tutuşma gecikmesi, silindir içinde daha fazla yakıt-hava karışımının birikmesine ve ardından ani ve hızlı bir yanmaya neden olur. Bu durum, silindir içi sıcaklık ve basıncın hızla yükselmesine yol açar ki bu da termal NO_x oluşumu için ideal koşulları oluşturmaktadır.

Düşük yoğunluklu polietilen atıklarından elde edilen pirolitik yağ ile motorun çalıştırılması, dizele kıyasla en yüksek is emisyonuna yol açmaktadır. Bu durum, PE türevli yakıtın daha yüksek viskozitesi ve daha düşük uçuculuğu nedeniyle silindir içindeki karışım kalitesinin düşmesine ve yakıt tüketiminin artmasına bağlanmaktadır, bu da is oluşumunu artırmaktadır. Bununla birlikte, PE-türevli yakıt ile dizel yakıtın belirli oranlarda harmanlandığı bazı çalışmalarda farklı sonuçlar da elde edilmiştir. Örneğin, %70 dizel ve %30 PE-türevli yakıt içeren bir karışım kullanıldığında, saf dizele kıyasla daha düşük is emisyonu gözlemlenmiştir. Bu durum, karışım oranlarının ve yakıt özelliklerinin is emisyonları üzerindeki çok boyutlu ve karmaşık etkileşimini göstermektedir [19].

PE türevi yakıtlar, dizel yakıtla kıyaslandığında genellikle daha yüksek HC emisyonlarına neden olur; bu durum, yakıtın yüksek viskozitesi ve yetersiz atomizasyonundan kaynaklanan zayıf hava-yakıt karışımından ileri gelmektedir. Hem Yüksek Yoğunluklu Polietilen piroliz yağı karışımlarında hem de Düşük Yoğunluklu Polietilen piroliz yağı kullanımında, yakıt karışım oranı arttıkça HC ve CO emisyonları yükselme eğilimindedir. Ancak bazı

çalışmalarda CO emisyonları dizele nazaran PE türevli yakıtlarda daha düşük seyredebilir karışım oranı arttıkça, daha yüksek uçuculuk ve daha düşük viskozite nedeniyle ve de yakıt atomizasyonu ve buharlaşmasının artması CO emisyonunun azalmasına sebep olabilmektedir [1].

Chaitanya ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan çalışmada, P10 ve P20 karışımları için CO emisyonlarında %5-10 azalma gözlemlenirken, P30 karışımı için düşük yüklerde %3-5 artış rapor edilmiştir. Araştırmacılar, yüksek karışım oranlarında ve düşük yüklerde yanma verimliliğinin düşebileceğini ve bunun emisyon değerlerini olumsuz etkileyebileceğini belirtmişlerdir [20]. Tablo 2. de polietilenden elde edilen yakıtların dizel yakıtına kıyasla performans, yanma ve emisyon karakteristikleri belirtilmiştir.

Tablo2. Polietilenden Elde Edilen Yakıtların Dizel Yakıtına Kıyasla Performans, Yanma ve Emisyon Karakteristikleri

Referanslar	Motor Tipi	Motor Performansı		Yanma Karakteristikleri		Emisyon				
		FEV	FÖYT	Silindir İçi Gaz Basıncı	Isı Açığa Çıkış Oranı	İs	NO _x	CO	HC	
21	4 zamanlı, Tek silindirli, su soğutmalı, doğal emişli, 3,7 kW 1500 dev/dak	↓	↑	—	—	↑	↑	↑	↑	HDPE
22	4 zamanlı, Tek silindirli, su soğutmalı, doğal emişli, 3,7 kW 1500 dev/dak	↓	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑	HDPE
23	4 zamanlı, 1 silindirli, su soğutmalı, doğal emişli, 4,4 kW	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	HDPE
24	4 zamanlı, Tek silindirli, su soğutmalı, doğal emişli, 3,7 kW 3000 dev/dak	↓	↑	↓	—	—	↓	↑	↑	LDPE
25	4 zamanlı, 4 silindirli, DI, su soğutmalı, doğal emişli, 68 kW 1500 rpm	↓	↓	↓	—	—	↓	↑	↑	LDPE
26	4 zamanlı, Tek silindirli, su soğutmalı, doğal emişli, 3,7 kW 3000 dev/dak	↓	↑	↓	—	↑	↓	↑	↑	LDPE

4. Optimizasyon Çalışmaları

İçten yanmalı motorlarda optimizasyon yapılması, motorun verimliliğini artırmak, yakıt tüketimini azaltmak ve zararlı emisyonları minimuma indirmek için gereklidir. Optimizasyon sayesinde hem performans hem de çevreye olan olumsuz etkiler aynı anda iyileştirilebilir. Doğru optimizasyon, motorun ömrünü uzatır ve yasal emisyon sınırlarına uyumu kolaylaştırır. Sonuç olarak, optimizasyon hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük avantajlar sağlamaktadır.

DeneySEL çalışmalarda, daha çok sıkıştırma oranı, enjektör basıncı, motor yükü, karışım oranı gibi parametrelerin etkisi, çeşitli optimizasyon teknikleriyle analiz edilmektedir. Bu teknikler sayesinde, farklı parametrelerin motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkisi nicel olarak belirlenebilmekte ve ideal çalışma şartları elde edilebilmektedir.

Polietilen türevi yakıtlarda yapılan çalışmalarda optimizasyon çalışmaları oldukça sınırlıdır. Kumar ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilenden elde edilen piroliz yağı yüzdesinin, Al_2O_3 nanopartikül (NP) konsantrasyonunun, sıkıştırma oranının (SO) ve enjeksiyon zamanlamasının dizel motorlarda yanma, performans ve emisyon üzerindeki etkilerinin optimizasyonu amacıyla optimizasyon çalışması yapılmıştır. Deneyler; %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında plastik piroliz yağı; 0, 25, 50, 75 ve 100 ppm Al_2O_3 ilavesi; 16, 17, 18, 19 ve 20 sıkıştırma oranı ile 17°, 19°, 21°, 23° ve 25° enjeksiyon avansları kullanılarak %80 motor yükü altında gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda, 18,06 sıkıştırma oranı, %16,56 PPY, 53,53 ppm Al_2O_3 ve 20,95° enjeksiyon avansı, optimum çalışma koşulları olarak belirlenmiştir. Bu optimum koşullar altında, FEV, ısı açığa çıkış oranı, silindir içi gaz basıncı, FÖYT, karbon monoksit (CO), azot oksit (NO_x) ve hidrokarbon (HC) emisyonu gibi yanıtların R^2 değerlerinin %95'in üzerinde olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, optimizasyon sonuçlarının deneySEL verilerle karşılaştırılması sonucunda, elde edilen motor performans ve emisyon değerlerinin %5'ten daha düşük hata ile tahmin edilebildiği ve optimizasyon çalışmasının etkili bir yöntem olduğu ifade edilmiştir [27]. Bir diğer çalışmada Jena ve arkadaşları (2024) düşük yoğunluklu polietilenden elde ettikleri PE türevi yakıtı hacimce %10, %20, %30 ve %40'lık saf dizel yakıtı ile karıştırmışlar farklı motor yüklerinde, sıkıştırma oranlarında ve motor yüklerinde test etmişlerdir. RSM optimizasyonu sonrası %40 WPO karışimli PE türevi yakıtın tam yükte (12 kg) ve 15,4 sıkıştırma oranındaki optimum parametreler olduğunu bildirmişlerdir. PE türevi bu yakıtın optimum koşullarda dizel yakıtın yerine ikame olarak kullanılabileceğini bildirmişlerdir [28].

5. Uzun Dönemli Motor Dayanıklılığı Ve Ekonomik Analiz

5.1. PE-Türevli Yakıtların Motor Bileşenleri Üzerindeki Uzun Dönemli Etkileri

PE türevli yakıtların motor bileşenleri üzerindeki uzun dönemli etkileri, bu yakıtların pratik uygulamaları için kritik bir faktördür. Mevcut araştırmalar, PE-türevli yakıtların motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerini incelerken, motor bileşenlerinin uzun dönemli aşınma ve dayanıklılığına dair bulgular bulunmamaktadır. Sonraki çalışılması gereken konuların başında bu yakıtların içten yanmalı motorlarda uzun dönemli etkileri olmalıdır.

5.2. Ekonomik Fizibilite ve Yaşam Döngüsü Analizi

PE türevli yakıtların ticari uygulanabilirliği, ekonomik fizibilite ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kapsamlı bir değerlendirmeyi gerektirir. Yakıt üretim maliyetleri; atık toplama ve taşıma, piroliz tesisi kurulum ve işletme giderleri, yakıt iyileştirme ve dağıtım süreçlerini kapsayan bütünleşik bir ekonomik yapıyı içermektedir. Ekonomik analizler, PE-türevli yakıt üretiminin, özellikle atık bertaraf teşviklerinin bulunduğu ve petrol fiyatlarının yüksek seyrettiği bölgelerde ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, ekonomik fizibilite; atık toplama altyapısının gelişmişliği, yerel düzenleyici çerçeve ve fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar gibi bölgesel faktörlere önemli ölçüde bağlıdır. Yaşam Döngüsü Analizi perspektifinden değerlendirildiğinde, PE-türevli yakıtların çevresel etki profili, geleneksel yakıtlara kıyasla daha olumlu sonuçlar ortaya koymaktadır. Çalışmalar genel olarak, PE atıklarından yakıt üretiminin, atıkların depolanması veya doğrudan yakılması gibi alternatif bertaraf yöntemlerine kıyasla sera gazı emisyonlarında önemli oranda azalma sağladığını göstermektedir [29].

Ekonomik fizibilite analizinde, PE-türevli yakıt üretiminin maliyet-fayda karşılaştırması önemlidir. Bu ekonomik göstergeler, özellikle atık yönetimi politikalarının sıklaştığı ve fosil yakıt fiyatlarının yükseldiği günümüz koşullarında, PE-türevli yakıt üretiminin ekonomik açıdan cazip bir yatırım olabileceğini göstermektedir.

6. Endüstriyel Uygulamalar ve Gelecek Perspektifleri

6.1. Laboratuvarından Endüstriyel Ölçeğe Geçiş: Zorluklar ve Fırsatlar

PE-türevli yakıtların laboratuvar ölçeğinden endüstriyel ölçeğe geçişi, çeşitli teknik, ekonomik ve düzenleyici zorlukları beraberinde getirmektedir.

Ancak, dünya genelinde artan plastik atık sorunu ve sürdürülebilir yakıt arayışı, bu alanda önemli fırsatlar da sunmaktadır.

Teknik Zorluklar: Endüstriyel ölçekte en büyük teknik zorluklar arasında, atık plastiğin heterojen yapısı, kirletici maddelerin varlığı ve sürekli işlem gerektiren büyük ölçekli piroliz reaktörlerinin tasarımı yer almaktadır.

Ekonomik ve Düzenleyici Faktörler: Endüstriyel uygulamanın ekonomik fizibilitesi, atık toplama ve işleme maliyetleri, enerji fiyatlarına bağlıdır. Birçok ülkede, plastik atıkların kimyasal geri dönüşümünü teşvik eden düzenlemeler ve finansal destekler uygulanmaya başlanmıştır. Ölçek büyütme sürecinde karşılaşılan teknik zorlukların başında, atık plastiklerin heterojen yapısı ve içerdikleri katkı maddeleri gelmektedir [30]. Özellikle klorlu bileşikler, metal katkılar ve boya pigmentleri, piroliz sürecini olumsuz etkileyebilir ve ekipman korozyonuna neden olabilir. Bu sorunun çözümü için gelişmiş ön işleme teknolojileri geliştirilmelidir. Polietilen atıklardan elde edilen yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanılması, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin multidisipliner bakış açısıyla ele alınmasının önemli bir örneğidir; zira bu alan, kimya, makine, çevre ve enerji mühendisliği disiplinlerinin kesişiminde yer almaktadır.

6.2. Gelecek Araştırma Yönelimleri ve Potansiyel Uygulama Alanları

PE-türevli yakıtların gelecekteki gelişimi hem teknolojik ilerlemeler hem de pazar dinamikleri tarafından şekillendirilecektir. Araştırmacılar ve endüstri paydaşları, aşağıdaki alanlara odaklanmaktadır:

İleri Katalizör Teknolojileri: Daha düşük sıcaklıklarda çalışan, seçiciliği yüksek ve uzun ömürlü katalizörler, piroliz sürecinin enerji verimliliğini artırabilir ve daha yüksek kalitede yakıt üretimini sağlayabilir.

Karışık Plastik Atıkların İşlenmesi: Gelecekteki araştırmalar, PE ile birlikte PP, PS ve diğer plastik türlerini etkili bir şekilde işleyebilen ve yüksek kaliteli yakıt üretebilen sistemlerin geliştirilmesine odaklanmaktadır.

Endüstri 4.0 teknolojilerinin piroliz tesislerine entegrasyonu, proses optimizasyonu, kalite kontrolü ve bakım planlaması açısından önemli avantajlar sağlayabileceği düşünülmektedir. Katalizör geliştirme çalışmalarında, son yıllarda özellikle hibrit katalizör sistemleri üzerinde durulmaktadır. Hibrit yakıt sistemleri konusunda ise, PE türevli yakıtların biyodizel veya etanol, metanol, izobütanol gibi yenilenebilir yakıtlarla karıştırılması üzerine çalışmalar artış göstermiştir. Bu karışımlar, PE türevli

yakıtların oksijen içeriğini artırarak yanma verimliliğini iyileştirmekte ve emisyonların azalmasına yardımcı olabilmektedir.

7. Sonuç

Polietilen atıklarından elde edilen pirolitik yakıtlar, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma ve plastik atık sorununa çözüm bulma potansiyeli taşıyan, değerli bir alternatif enerji kaynağıdır. Bu yakıtlar, dizele benzer ısı değerleri ve dizel yakıtı ile karşılaştırılabilir yakıt özellikleri sebebiyle dizel yakıtına alternatif olma potansiyelini taşımaktadır. Polietilen kaynaklı yakıtların sürdürülebilir enerji geçişindeki rolü hem atık yönetimi hem de alternatif yakıt üretimi açısından giderek önem kazanmaktadır. Bu yakıtlar, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, artan plastik atık sorununa çözüm sunarken, enerji güvenliğine de katkı sağlama potansiyeline sahiptir. Polietilen kaynaklı yakıtların sürdürülebilir enerji geçişindeki rolü hem atık yönetimi hem de alternatif yakıt üretimi açısından giderek önem kazanmaktadır. Bu yakıtlar, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, artan plastik atık sorununa çözüm sunarken, enerji güvenliğine de katkı sağlama potansiyeline sahiptir. Bu sebeple PE türevli yakıtlarla ilgili içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımı ile ilgili gerekli yasal düzenlemeler yapılmalı ve kullanımı teşvik edilmeli ve kamu-özel sektör iş birliklerinin desteklenmesi önemlidir. Sonuç olarak, PE-türevli yakıtlar hem atık yönetimi hem de sürdürülebilir enerji üretimi açısından umut verici bir çözüm sunmaktadır. Optimizasyon stratejilerinin etkin uygulanması ve teknolojik ilerlemelerle, bu yakıtlar, içten yanmalı motorlarda daha temiz ve verimli bir alternatif olarak konumlanabilir. Bu alandaki araştırma ve geliştirme çalışmaları, döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynayacaktır. Çevresel sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği açısından kritik bir dönemeçte bulunduğumuz bu dönemde, PE türevli yakıtlar gibi yenilikçi çözümler hem plastik kirliliğiyle mücadelede hem de fosil yakıtlara alternatif oluşturmada çift yönlü fayda sağlama potansiyeline sahiptir. Gelecekte, bu teknolojilerin daha da geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, küresel ısınma ve atık yönetimi gibi çağımızın en büyük çevresel sorunlarına karşı etkili bir yanıt oluşturabilir.

Teşekkür

Bu bölümün hazırlanmasındaki akademik gelişimime sunduğu değerli katkılar için danışman hocam Prof. Dr. Mustafa Bahattin Çelik'e içten teşekkür ederim.

Kaynaklar

1. Pilapitiya, P. N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, Article 100220. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100220>
2. Ragossnig, A. M., & Agamuthu, P. (2021). Plastic waste: Challenges and opportunities. *Waste Management & Research*, 39(5), 629–630. <https://doi.org/10.1177/0734242X211013021>
3. Şen, S., & Çelik, M. B. (2024). Modeling the effect of plastic oil obtained from XLPE cable waste on diesel engine performance and emission parameters with the response surface method. *Science, Technology, Energy, Transition*, 79, Article 58. <https://doi.org/10.2516/stet/2024059>
4. Rahman, M. H., Bhoi, P., & Menezes, P. (2023). Pyrolysis of waste plastics into fuels and chemicals: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, Article 113799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113799>
5. Al-Salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of Environmental Management*, 197, 177–198. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
6. Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2017). Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste. *Energy Conversion and Management*, 148, 925–934. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.046>
7. Kunwar, B., Cheng, H. N., Chandrashekar, S. R., & Sharma, B. K. (2016). Plastics to fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.015>
8. Yaqoob, H., Ali, H. M., Sajjad, U., & Hamid, K. (2024). Investigating the potential of plastic pyrolysis oil-diesel blends in diesel engine: Performance, emissions, thermodynamics and sustainability analysis. *Results in Engineering*, 24, Article 103336. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103336>
9. Mani, M., Subash, C., & Nagarajan, G. (2009). Performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil. *Applied Thermal Engineering*, 29(13), 2738–2744. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.01.007>
10. Chen, Z., Erwin, B. J., & Che, L. (2024). Recycling the polyethylene into fuels via an olefin-intermediate tandem catalysis over Fe₂O₃/USY catalysts. *Journal of the Energy Institute*, 116, Article 101748. <https://doi.org/10.1016/j.joci.2023.101748>
11. Faisal, F., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., & Chowdhury, A. A. (2023). Waste plastics pyrolytic oil as a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics. *Science*

- of the *Total Environment*, 886, Article 163756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163756>
12. Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Schaller, D., Khan, M. M. K., Hasan, M. M., & Hazrat, M. A. (2022). Transport fuel from waste plastics pyrolysis – A review on technologies, challenges and opportunities. *Energy Conversion and Management*, 258, Article 115451. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115451>
 13. Kumar, S., Prakash, R., Murugan, S., & Singh, R. K. (2013). Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine. *Energy Conversion and Management*, 74, 323–331. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.028>
 14. Muthukumar, K., & Kasiraman, G. (2024). Utilization of fuel energy from single-use low-density polyethylene plastic waste on CI engine with hydrogen enrichment – An experimental study. *Energy*, 289, Article 129926. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129926>
 15. Panda, A. K., Murugan, S., & Singh, R. K. (2016). Performance and emission characteristics of diesel fuel produced from waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste polypropylene. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(4), 577–585. <https://doi.org/10.1080/15567036.2013.800924>
 16. Mani, M., Nagarajan, G., & Sampath, S. (2011). Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Energy*, 36(1), 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.049>
 17. Pumpuang, A., Klinkaew, N., Wathakit, K., Sukhom, A., & Sukjit, E. (2024). The influence of plastic pyrolysis oil on fuel lubricity and diesel engine performance. *RSC Advances*, 14(14), 10070–10087. <https://doi.org/10.1039/D4RA00856D>
 18. Alrazen, H. A., Aminossadati, S. M., Mahmood, H. A., Hasan, M. M., Abdulkreem-Alsultan, G., & Konarova, M. (2023). Theoretical investigation of combustion and emissions of CI engines fueled by various blends of depolymerized low-density polythene and diesel with co-solvent additives. *Energy*, 282, Article 128754. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128754>
 19. Rajasekaran, S., Damodharan, D., Gopal, K., Kumar, B. R., & De Pours, M. V. (2020). Collective influence of 1-decanol addition, injection pressure and EGR on diesel engine characteristics fueled with diesel/LDPE oil blends. *Fuel*, 277, Article 118166. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118166>
 20. Chaitanya, A. V. K., & Mohanty, D. K. (2022). Experimental investigation on combustion, performance, and emission characteristics of a CRDI engine with 1-pentanol blended waste plastic oil with EGR. *Energy*, 256, Article 124606. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124606>

21. Kaimal, V. K., & Vijayabalan, P. (2016). A study on synthesis of energy fuel from waste plastic and assessment of its potential as an alternative fuel for diesel engines. *Waste Management*, 51, 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.022>
22. Kaimal, V. K., & Vijayabalan, P. (2016). An investigation on the effects of using DEE additive in a DI diesel engine fuelled with waste plastic oil. *Fuel*, 180, 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.030>
23. Karisathan, S. N., & Ramachandran, B. A. (2016). Experimental investigation on thermocatalytic pyrolysis of HDPE plastic waste and the effects of its liquid yield over the performance, emission, and combustion characteristics of CI engine. *Energy & Fuels*, 30(7), 5379–5390. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00507>
24. Singh, T. S., Verma, T. N., & Singh, H. N. (2020). A lab scale waste to energy conversion study for pyrolysis of plastic with and without catalyst: Engine emissions testing study. *Fuel*, 277, Article 118176. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118176>
25. Kalargaris, I., Tian, G., & Gu, S. (2017). Experimental evaluation of a diesel engine fuelled by pyrolysis oils produced from low-density polyethylene and ethylene–vinyl acetate plastics. *Fuel Processing Technology*, 161, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.03.014>
26. Singh, T. S., Rajak, U., Dasore, A., Muthukumar, M., & Verma, T. N. (2021). Performance and ecological parameters of a diesel engine fueled with diesel and plastic pyrolyzed oil (PPO) at variable working parameters. *Environmental Technology & Innovation*, 22, Article 101491. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101491>
27. Kumar, A., Pali, H. S., & Kumar, M. (2024). Effective utilization of waste plastic derived fuel in CI engine using multi-objective optimization through RSM. *Fuel*, 355, Article 129448. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129448>
28. Jena, S. P., Mahapatra, S., & Acharya, S. K. (2021). Optimization of performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with Karanja biodiesel using Grey-Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 41, 180–185. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.077>
29. Kumar, S., & Singh, R. K. (2011). Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28(4), 659–667. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322011000400012>
30. Tumu, K., Vorst, K., & Curtzwiler, G. (2023). Global plastic waste recycling and extended producer responsibility laws. *Journal of Environmental Management*, 348, Article 119242. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119242>