

ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİK VE POLİETİLEN TEREFTALAT (PET) ŞİŞE ATIKLARININ PİROLİZİNİN TASARLANAN YENİ BİR REAKTÖRDE KIYASLANMASI

Neslihan DOĞAN-SAĞLAMTİMUR^{1*}, Ahmet BİLGİL², Öznur ÇALIŞKAN¹, Türkan VURAL¹, Tuğçe AYKANAT¹, Funda YOLCU¹

¹Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye

Geliş / Received: 12.11.2016

Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 21.12.2016

Kabul / Accepted: 22.12.2016

ÖZ

Ömrünü tamamlamış araç lastiği (ÖTL) ve polietilen tereftalat şişe (PET) atıkları önemli çevresel problemlerdendir. Bu atıkların yeniden kullanımında önemli bir yöntem olan “piroliz” termokimyasal bir prosestir. Bu çalışma için öncelikle prototip bir piroliz reaktörü tasarlanmış, deney bekleme süresi ön denemelerle netleştirilmiş ve deneyler kurgulanmıştır. Çalışmada 4 kademeli ayrıştırma (200, 250, 300 ve 350°C), soğutucu motorlu 5 kademeli ön yoğunlaştırma (-20, -10, 0, +10 ve +20°C) ve son yoğunlaştırma uygulanmıştır. Reaktördeki piroliz hücresinde 300 g PET’e sırasıyla uygulanan dört ayrı ayrıştırma sıcaklığının hiçbirinde gazlaşma oluşmamış ve bu nedenle yoğunlaştırma gerçekleşmemiştir. Ayrıca 350°C ayrıştırma sıcaklığında PET borulardan geçerken, moleküllerinin lineer olması, ağ oluşturmaması ve kırılmaya karşı dayanıklı olması nedeniyle donmuş ve sistemde tıkanmaya yol açmıştır. ÖTL ve PET pirolizinin birlikte irdelenebilmesi için ÖTL pirolizi aynı koşullarla sınırlandırılmıştır. 300 g ÖTL piroliz hücresine yerleştirilmiş, sırasıyla 200 ve 250°C ayrıştırma sıcaklıklarında gazlaşma görülmediğinden, yoğunlaştırma meydana gelmemiştir. 300°C ayrıştırma sıcaklığında ÖTL hamursu kıvama gelmiş, ancak gazlaşmamış ve dolayısıyla yoğunlaşmamıştır. 350°C ayrıştırma sıcaklığında ise gazlaşma başlamış ve buna bağlı olarak dört yoğunlaştırma basamağında (-10, 0, +10 ve +20°C) sırasıyla katı ürün (karbon karası) 232-256 g aralığında artış göstermiş, sıvı ürün (pirolitik yağ) ise 50, 54, 32 ve 28 mL olarak elde edilmiştir. Lastiğin organik uçucu maddesinin (temelde kauçuk/plastik polimer/leri) düşük molekül ağırlıklı sıvı veya gazlara parçalanması sayesinde gerçekleşen ÖTL pirolizi ile 350°C ayrıştırma sıcaklığından sonra bu reaktörde üretim başlamıştır; PET pirolizi ise bu koşulda sona ermiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık, atık yeniden kullanımı, çevre, ömrünü tamamlamış lastik, polietilen tereftalat, piroliz

COMPARISON OF PYROLYSIS OF END-OF LIFE TIRES AND WASTE POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) BOTTLES IN A NEW DESIGNED REACTOR

ABSTRACT

End of life tires (ELTs) and waste polyethylene terephthalate (WPET) bottles are important environmental problems. “Pyrolysis”, which is a thermochemical process, is an important method to reuse of these waste materials. In this study, firstly, a prototype pyrolysis reactor was designed, experimental duration was determined by preliminary tests and experiments were planned. 4-stages decompositions (200, 250, 300 and

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 388 225 2229; e-mail/e-posta: nds@ohu.edu.tr

350°C), 5-stages pre-condensations (-20, -10, 0, +10 and +20°C) with a cooler engine and final condensations were carried out, respectively. In pyrolysis cell of this designed reactor, for 300 g WPET, no gasification occurred during any of the decomposition temperatures, therefore condensation was not observed. Moreover, linear, not forming a network and resistant to breakage WPET froze when passing through pipes during decomposition temperature of 350°C and led to a blockage in the system. ELT pyrolysis was limited to the same conditions to evaluate ELT and WPET's pyrolysis together. When 300 g ELT was placed in the pyrolysis cell, no gasification was obtained in 200 and 250°C decomposition temperatures, respectively, resulting in no condensation. In 300°C decomposition temperature, ELT became pastry and did not gasify in any decomposition temperatures; this led to no condensation. In 350°C decomposition temperature, gasification started. Therefore, the solid products (carbon black) were obtained in the range of 232-256 g and the liquid products (pyrolytic oil) were obtained as 50, 54, 32 and 28 mL, respectively, in the four condensation (-10, 0, +10 and +20°C) temperatures. In this reactor, we began to produce solid and liquid products in 350°C decomposition temperature, when WPET pyrolysis ended, by means of ELT pyrolysis, which results in volatile organic matter of tires (basically rubber/plastic polymer/s) decomposing to low molecular weight liquid or gas.

Keywords: Waste, reuse, environment, end of life tires, polyethylene terephthalate, pyrolysis

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların azalması, yakıt fiyatlarının artması ve emisyonlarla ilgili kısıtlamalardan dolayı yeşil yakıt alternatiflerine ihtiyaç vardır. Ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL) ve polietilen tereftalat (PET) şişe atıklarının pirolizle değerlendirilmesi ham petrol rezervlerinin hızlıca azalmasını önler, maliyeti ve olumsuz çevresel etkileri azaltır. ÖTL geri kazanım ve dönüşümünün sağlanması ekonomi ve çevre açısından çok önemlidir. Yaşam döngüsü sonuna ulaşan lastik, Dünya çapında yaklaşık 1-4 milyon ton aralığındadır [1, 2]. Pek çok ülkede ÖTL yönetmeliğine göre yeni lastik satın alınması durumunda, kullanılmayan lastikleri ücretsiz olarak alınan noktaya iade etme zorunluluğu vardır. Kullanılmış lastiklerin kontrol edilemeyen bir yöntemle ortadan kaldırılmaya çalışılması yasaktır. ÖTL yeniden kullanım ve kaplama (yapılabiliriyorsa) ile bertaraf edilebilir. Ancak bu lastik geri dönüşümü opsiyonlarında ÖTL tam olarak değerlendirilememektedir [3, 4].

ÖTL pirolitik yağı, kahverengi renkte olan ve güçlü asit kokusu salan, yağlı bir organik bileşiktir [5]. Pirolitik yağ, ısı enerjisi piyasasında diğer yakıtlarla rekabet edebilecek güçte önemli bir potansiyel göstermektedir. Bu pirolitik yağ, elde edildiği ÖTL'den (33 MJ/kg) daha yüksek kalorifik değere (yaklaşık 44 MJ/kg) sahiptir [6]. Bu yağın kalorifik değeri bitümlü kömür (28 MJ/kg) [7] ve odun kömüründen (30 MJ/kg) [8] de fazladır. ÖTL pirolizinden elde edilen yakıt, 10 numaralı fuel oile benzerdir [5]. Fuel oil yakıtlar kaynama noktası, kompozisyon ve amacına göre 1'den 6'ya kadar altı sınıfta sınıflandırılır. Pirolitik yağlar endüstriyel fırınlar, güç santralleri ve buhar kazanları için sıvı yakıt olarak kullanılabilir. Pirolitik yağlar dizel motorlarda, gaz ve buhar türbinlerinde ve jeneratörlerde elektrik enerjisine dönüştürülebilen yağlardır. Bu yağın kül içeriği düşüktür.

ÖTL'den elde edilen karbon karası ürünün çeşitli kirleticiler için adsorbant olarak kullanımı değerlendirilmiş ve başarılı bulunmuştur; bundan dolayı da birçok araştırmaya konu olmuştur. Aktif karbon fenoller, basit boyalar, metaller, p-klorofenoller, bütan ve doğal gazı adsorplamak için de kullanılabilir. Karbon karası, gaz ve sıvı haldeki hidrokarbonların eksik yanmasıyla elde edilen çok ince tanecikli elementer karbondur; tanecik çapı 25-400 µm arasındadır. Karbon karasının yazıcı mürekkep bazları ve geri dönüşmüş lastik dolgu maddesi olarak kullanımı, karakterizasyonu ve üretimi üzerine çalışılmıştır. Kauçuk endüstrisinde katkı maddesi olarak kullanılan karbon karası otomobil lastiği, makine parçaları, kablo, taşıyıcı bantlar, hortum, topuk ve taban lastiği yapımında, boya maddesi olarak kullanılan karbon karası ise renk verici olarak siyahlığı sağlamak amacıyla vernik, plastikler, matbaa mürekkebi, boya, siyah kağıt, kaplamalar, litografik ve klişe mürekkepleri, daktilo şeridi ve karbon kağıdı yapımında kullanılmaktadır [9].

Günümüzde ÖTL pirolizi üzerine çok fazla araştırma vardır. Dünya çapında ÖTL pirolizi üzerine çalışan 40 şirket belirlenmiştir [10] ve rakam artmaktadır. İngiltere'deki yarı ticari piroliz tesisi yıllık 1500 ton atık lastik ile uğraşmaktadır. Diğer yarı ticari tesisler Almanya, Güney Kore ve Tayvan'da işletilmektedir. Finansal zorluklardan dolayı birçoğu işlemi durdurmuşlardır. Son yıllarda yapılan piroliz tesislerinden biri de 2010'da Kıbrıs'ta kurulmuştur, aylık 150 ton karbon karası, 180 ton pirolitik yağ üretmektedir.

Dünya'da üretilen petrolün %4'ü plastik üretiminde kullanılmaktadır. Plastiklerin çok yönlü uygulanabilmeleri, fonksiyonel değerleri ve üretimleri sırasında diğer materyallere kıyasla göreceli olarak az miktarda enerjiye ihtiyaç duyulmasından dolayı modern toplumda kullanımının artması kaçınılmazdır. Plastikler metal, ahşap, kağıt, seramik ve cam gibi birçok materyal ile yer değiştirebilir [11].

ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİK VE POLİETİLEN TEREFTALAT (PET) ŞİŞE ATIKLARININ PİROLİZİNİN TASARLANAN YENİ BİR REAKTÖRDE KIYASLANMASI

Bir adet PET şişe ($\geq 0,5-1$ L hacim) üretimi için yaklaşık olarak 1,2 kg ham petrol kullanılmakta, en az 65 L su [12] ve diğer üretim prosesindeki tüketimler gerçekleşmektedir. PET, Dünya’da plastik hammaddelerin tüketiminde artış hızı en yüksek mamullerendir. Ülkemizde kişi başına plastik tüketimi 44 kg olup, atık üretimi kişi başı günlük 1,2 kg’dır. Bu oran, nüfus artışına bağlı olarak artmaktadır. Vahşi depolanan katı atıklarda plastikler ağırlıkça %5-9, hacimce ise %15-20 oranında bulunmaktadır. Bunların %5’ini PET atığı oluşturmaktadır ve her geçen gün miktarı artmaktadır [13, 14]. Burada önemli olan nokta, PET’in tamamen geri dönüştürülebilir olması nedeniyle en verimli plastik olmasıdır. PET geri dönüşümü, PET’in yapısının diğer plastiklerden farklı olması sebebiyle tüm Dünya’da kolaylıkla kabul görmüş ve yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Plastik pirolizi, makromoleküllerin fazla miktarda enerjiye ihtiyaç duymasına rağmen plastiğin oldukça düşük termal iletkenlik göstermesi gerçeğinden dolayı, oldukça karmaşıktır [15].

Araç lastiklerinin ülkemizde sektörel bazda kullanıldığı alanlar içinde otomotiv sektörü başta olmak üzere tekstil, ambalaj, inşaat, tarım, mobilya, tıp, makine ve imalat sektörü gelmektedir. Plastik malzemelerin en çok kullanıldığı alan ise ambalaj sektörüdür. Avrupa’da ambalajların %17’si, tüm tüketim malzemeleri ambalajlarının %50’si plastiktir. Ayrıca, hızla yaygınlaşan ürün çeşitliliği sayesinde, Araç lastiği ve PET’lerin kullanımı her geçen gün daha da artmaktadır. Ülkemizin Asya ve Avrupa geçişinde yer alması Türk lastik ve plastik endüstrisinin ihracatı için önemli bir avantajdır. Üretilen ürünler yaklaşık 130 ülkeye ihraç edilmektedir. Araç lastiği ve PET’ler polimer kaynaklı maddelerdir. Asfalt betonunda polimerlerin katkı maddesi olarak kullanımına yönelik olarak son 30 yılda yapılan çalışmalar ve bu çalışmaların sonuçları özetlenmiştir. Bilim adamlarınca yapılan çalışmalarda öğütülmüş ÖTL’ler asfalt betonuna katıldığında asfalt betonunun sıcaklığa bağlı özelliklerinde iyileşmeler gözlenmiştir [16].

“Avrupa Komisyonu Atık Depolama Direktifi” atıklar için azaltma, yeniden kullanma, geri dönüşüm ve sonuç olarak enerji kıymetlendirme prosesini uygulamayı önermiştir. Önerilen ilk üç prosesi uygulamak tercih edilse de -ÖTL ve atık PET miktarının çok fazla olmasından dolayı- bu atık türleri için enerji kıymetlendirme prosesinin kullanılması kaçınılmazdır. ÖTL, kömür veya biyokütleden daha yüksek kalorifik değere ve düşük katı kalıntı içeriğine sahiptir; ÖTL’nin uçuculuğu yüksektir. Bu özellikler ÖTL’yi termokimyasal işlemler (yakma, piroliz ve gazlaştırma) için ideal madde haline getirir. Bu 3 proses içinde piroliz, oluşan düşük emisyon ve endüstriyel ürün eldesi yönleriyle, değerli bir alternatif olarak da ön plana çıkar [2, 17-21]. Piroliz yöntemi, oksijensiz bir ortamda yüksek sıcaklıkta (250-900 °C) lastiğin kauçuğunun termal yol ile parçalanmasını içerir, vakum şartlarında veya atmosferik basınçta meydana gelebilir [20, 22]. ÖTL enerji elde etmek için özellikle çimento fabrikalarında kullanılan kömüre göre oranı daha düşük düzeyde sülfür içermesi ve aynı enerji değeri elde etmesi bakımından iyi bir yakıt olarak kabul edilmektedir. 1 ton ÖTL, 1 ton iyi kalitede kömür ya da 0,7 ton fuel oil ile eşdeğerdir. Bu özellikleri ile ÖTL 1992 yılında toplam enerji kaynakları içinde %14 oranında kullanılırken, 2006 yılında bu oran %34,6’ya yükselmiştir. Avrupa’da bugün 250-300 civarında çimento fabrikası, toplam atık lastik üretiminin %25’i oranındaki ÖTL’yi yakıt olarak kullanmaktadır. ÖTL yandığında belli bir enerji üretirken, aynı zamanda lastiğin içinde yer alan silika doğal kaynaklardan sağlanan cam kumunun yerini alarak ikinci bir hammadde olarak değer ifade etmektedir. ÖTL’lerin %20’si latekstir. Lateks, poliizopren (C_5H_8)’dir ve 88 C atomundan oluşmaktadır; 1 ton ÖTL yakılması sonucu doğaya 647 kilo CO_2 salınımı olur [3, 20-24].

Bu çalışmada; (a) enerji kaynağı olarak kullanılan fuel oil’e alternatif sıvı pirolitik yağ üretme, (b) farklı endüstriler için hammadde durumunda olan karbon karası üretme, (c) endüstriyel simbiyoz imkanı doğması, (d) ÖTL ve PET şişe atıklarının değerlendirilip yeniden kullanıma sürülmesinin sağlanması, (e) Dünya ve Türkiye’de mevcut sektörlerin yakıt, enerji ve karbon karasına olan ihtiyaçlarının ön plana çıkması göz önüne alınarak alternatif ÖTL ve PET şişe atık değerlendirme yöntemleri içinden piroliz yoluyla değerlendirme seçilmiştir. Çalışmada piroliz prosesi ile ÖTL’den pirolitik yağ ve karbon karası, atık PET’den ise PET yağı (pirolitik yağ) eldesi hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada ulusal çapta iş yapan ara toplayıcılardan ÖTL ve atık PET, hammadde/materyal olarak kullanılmak üzere, temin edilmiştir. Çalışma sürecinde öncelikle prototip bir piroliz reaktörü tasarlanmış ve deneyler (katı ve sıvı ürün verim belirlenmesi, sıvılaşmada değişik ayrıştırma ve soğutma alternatiflerinin denenmesi) kurgulanmıştır. Tasarlanan bu piroliz reaktöründe (Şekil 1) şu işlem basamakları yürütülmüştür: (a) Küçük parçacıklar halindeki 300 g ÖTL ve PET ayrı deney basamakları için modifiye edilmiş fırındaki piroliz hücresine yerleştirilmiş, (b) Farklı sıcaklıklarda 4 kademeli ayrıştırma (200, 250, 300 ve 350°C) ve soğutucu motorlu 5 kademeli ön yoğunlaştırma (-20, -10, 0, +10 ve +20°C) ve ardından son yoğunlaştırma gerçekleştirilmiş, (c) Piroliz hücresi -soğuduktan sonra- açılarak altta kalan tortu (karbon karası) alınarak katı

ürün miktarı tartılmış ve (d) Yoğunlaştırma kısımlarından gelen pirolitik yağ bir kaptan toplanarak ağırlıkça ve hacimce sıvı ürün miktarı belirlenmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılmak üzere tasarlanan piroliz reaktörü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen bulgular, Tablo 1’de verilmiştir. Tasarlanan reaktörde piroliz hücresinde 300 g PET’e sırasıyla uygulanan dört ayrı ayrıştırma sıcaklığının (200, 250, 300 ve 350°C) hiçbirinde gazlaşma oluşmamış ve bu nedenle yoğunlaştırma gerçekleşmemiştir. Üstelik 350°C ayrıştırma sıcaklığında PET borulardan geçerken donmuş ve sistemde tıkanmaya yol açmıştır. Bu duruma PET’in erime noktasının (kristalizasyon derecesi ve polimerizasyon derecesine bağlı olarak) 235 ve 260°C arasında olmasına rağmen, PET moleküllerinin lineer olması, ağ oluşturmaması ve kırılmaya karşı dayanıklı olmasının neden olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada PET pirolizinden pirolitik yağ üretimi (Tablo 1) gerçekleştirilememiştir.

Çalışma programında piroliz işlemindeki ayrıştırmanın 200-600°C aralığında 5 sıcaklık kademesinde ve yoğunlaştırmanın ise -20 ile +20°C aralığında 5 sıcaklık aşamasında yapılması planlanmıştır. PET ve ÖTL pirolizinin birlikte irdelenebilmesi için ÖTL pirolizi PET ile aynı koşullara (200-350°C aralığında 4 sıcaklık kademesinde ayrıştırma ve -20 ile +20°C aralığında 5 sıcaklık basamağında yoğunlaştırma) sınırlandırılmıştır. 300 g ÖTL piroliz hücresine yerleştirilmiş, ÖTL’de 300°C ayrıştırma sıcaklığına kadar herhangi bir ayrışma ve gaz çıkışı görülemediğinden yoğunlaşma oluşmamıştır. Bu nedenle ayrıştırma sıcaklığı 300°C’den başlatılmıştır (Tablo 1). Bu sıcaklıkta piroliz hücresindeki ÖTL incelendiğinde, atık lastikte yumuşama ve fiziksel özelliğinin bozulduğu, ancak lastiğin henüz karbon karası özelliklerine dönüşmediği gözlenmiştir. ÖTL pirolizinde 350°C ayrışma ve sırasıyla -10, 0, +10 ve +20°C yoğunlaştırma sıcaklıklarında gaz çıkışı ve yoğunlaşma olduğundan pirolitik yağ (sırasıyla 50, 54, 32 ve 28 mL, yoğunlaştırma sıcaklığı artışıyla azalma eğilimi göstererek) ve karbon karası (yoğunlaştırma sıcaklığıyla artarak, 232-256 g aralığında) elde edilebilmiştir. Bu durum tasarlanan yeni reaktörde yoğunlaştırma sıcaklığı artışının üretilen karbon karası miktarını artırdığını ortaya koymaktadır. Ancak 350°C ayrıştırma sıcaklığında piroliz sonucu oluşan gaz -20°C yoğunlaştırma sıcaklığında donma eğilimi gösterdiği için bu sıcaklık ÖTL pirolizinde değerlendirme dışı (DD) bırakılmıştır.

ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİK VE POLİETİLEN TEREFTALAT (PET) ŞİŞE ATIKLARININ PİROLİZİNİN TASARLANAN YENİ BİR REAKTÖRDE KIYASLANMASI

Lastiğin organik uçucu maddesinin (temelde kauçuk/plastik polimer/leri) düşük molekül ağırlıklı sıvı veya gazlara parçalanması sayesinde gerçekleşen ÖTL pirolizi ile 350 °C ayrıştırma sıcaklığından sonra bu reaktörde üretime başlanmıştır; PET pirolizi ise bu koşulda sonlanmıştır.

Tablo 1. ÖTL ve atık PET’e uygulanan pirolizin deney parametreleri/sonuçları

| Ayrıştırma Sıcaklığı (°C) | Yoğunlaştırma Sıcaklığı (°C) | Deney Süresi (dk) | ÖTL Değişken Çıktılar | | | PET Değişken Çıktılar | |
|---------------------------|------------------------------|-------------------|--|--|---|---|--|
| | | | Katı Ürün (Karbon Karası) Miktarı (Ağırlıkça, g) | Sıvı Ürün (Pirolitik Yağ) Miktarı (Ağırlıkça, g) | Sıvı Ürün (Pirolitik Yağ) Miktarı (Hacimce, mL) | Sıvı Ürün (PET Yağı) Miktarı (Ağırlıkça, g) | Sıvı Ürün (PET Yağı) Miktarı (Hacimce, mL) |
| 200 | -20 | 120 | - | - | - | - | - |
| | -10 | | - | - | - | - | - |
| | 0 | | - | - | - | - | - |
| | +10 | | - | - | - | - | - |
| | +20 | | - | - | - | - | - |
| 250 | -20 | 120 | - | - | - | - | - |
| | -10 | | - | - | - | - | - |
| | 0 | | - | - | - | - | - |
| | +10 | | - | - | - | - | - |
| | +20 | | - | - | - | - | - |
| 300 | -20 | 120 | - | - | - | - | - |
| | -10 | | - | - | - | - | - |
| | 0 | | - | - | - | - | - |
| | +10 | | - | - | - | - | - |
| | +20 | | - | - | - | - | - |
| 350 | -20 | 120 | DD | DD | DD | - | - |
| | -10 | | 232 | 44 | 50 | - | - |
| | 0 | | 236 | 48 | 54 | - | - |
| | +10 | | 250 | 28 | 32 | - | - |
| | +20 | | 256 | 24 | 28 | - | - |

4. SONUÇLAR

Doğal kaynakların hızla tüketilmesinin önüne geçilmesi ve üretilen atıkların çevre ve insan sağlığı için tehdit olmaktan çıkarılarak ekonomi için bir girdiye dönüştürülmesini amaçlayan atık yönetim stratejileri, tüm Dünya’da giderek öncelikli bir politika hedefi olarak benimsenen “sürdürülebilir kalkınma” yaklaşımının temelini oluşturmaktadır.

Literatürde atık pirolizi için laboratuvar ölçekli araştırmalardan ticari ölçekli tesise kadar çok farklı deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar piroliz prosesindeki kinetik, reaktör tasarımı, ürün karakterizasyonu ve ekonomik boyut gibi farklı kısımlara odaklanırlar. Elde edilen sonuçlar sadece hammadde ve deneylerde kullanılan işletim koşulları ile ilgili olmayıp, aynı zamanda reaktör ve ısı transferi etkinliği gibi özel karakteristiklerden de etkilenir. Laboratuvar ölçekli deneylerde ÖTL pirolizi birçok araştırmacı tarafından çalışılmış, ancak verimlilik değişken bulunmuştur, bazılarında çözüm konusunda sıkıntılar vardır [19].

ÖTL pirolizi sırasında farklı parçalanma sıcaklıkları mevcuttur. Kauçuk bozunması yaklaşık 200°C’de başlar; bu sıcaklığın üstünde önemli oranda uçucu verimi açığa çıkar. Piroliz genellikle 400-800°C arasında gerçekleşir [5]. ÖTL pirolizi sırasında 500°C’de tüm lastiğin dönüşümü meydana gelir [25]. Düşük piroliz sıcaklıkları genellikle daha fazla sıvı ürün oluşturur, ancak yüksek sıcaklıklarda gaz çıkışı artar. Prosesin hızı ve ısı transferinin oranı da ürün dağılımını etkiler. Hızlı soğutma genellikle gaz moleküllerini sıvıya yoğunlaştırarak sıvı ürün üretimini artırmak için kullanılır [5].

Bu çalışmada bütün bu piroliz proses bilgileri göz önünde tutularak yeni ve basit bir piroliz reaktörü tasarlanmıştır. Bu sistemde uygulanan 4 farklı ayrıştırma ve 5 farklı yoğunlaştırma sıcaklıklarında (iki aşamalı yoğunlaştırma) yapılan işlemler sonucunda sadece ÖTL’den 350°C sıcaklıkta yapılan ayrıştırma ve 4 kademeli (-10, 0, +10 ve +20°C) sıcaklıkta gerçekleştirilen soğutucu motorlu ön yoğunlaştırma ve son yoğunlaştırma sonrası ürün elde edilebilmiştir.

Sıcaklık değişimlerinden dolayı ürün akış hızı değişimleri oluşmuş, soğutucu ünitelerin birkaç basamaklı olmalarının etkisi ile sıvı verimliliği artmıştır. Bu çalışmada ÖTL’den basit bir reaktörle, 400 °C’nin altında

N. DOĞAN-SAĞLAMTİMUR, A. BİLGİL, Ö. ÇALIŞKAN, T. VURAL, T. AYKANAT, F. YOLCU

gerçekleştiği için düşük maliyetli, verimli katı ve sıvı ürünlerin üretimi sağlanmıştır; devam eden çalışmalarda 350 °C ayrıştırma sıcaklığından sonraki ardışık sıcaklıklarda üretim veriminin değişimi denenecektir. Bu koşullardaki PET pirolizinde bu reaktör sisteminde üretim yapılamamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma için 2209/B Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Tezi Destekleme Programı kapsamında proje desteği (1139B411502404) veren TÜBİTAK'a, tasarlanan piroliz reaktörünün yoğunlaştırma ünitelerini ve piroliz hücrelerini üreten ÇİMSA Çimento San. ve Tic. A.Ş. Niğde Fabrikası özelinde Fabrika Müdürü Dr. Adnan GÜVEN'e, malzeme temininde destek olan Ali Osman AĞIR ve Murat AYDIN'a, laboratuvar imkanlarını kullandığımız Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederiz. Çalışmanın özet kısmı, 3. Ulusal Çevre Kongresi Özet Kitabı'nda yayınlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] JUMA, M., KOREN'OVA, Z., MARKOŠ, J., ANNUS, J., JELEMENSKÝ, L., "Pyrolysis and Combustion of Scrap Tire", *Petroleum&Coal*, 48, 15-26, 2006.
- [2] UNDRI, A., ROSI, L., FREDIANI, M., FREDIANI, P., "Upgraded Fuel from Microwave Assisted Pyrolysis of Waste Tire", *Fuel*, 115, 600-608, 2014.
- [3] BOXIONG, S., CHUNFEI, W., CAI, L., BINBIN, G., RUI, W., "Pyrolysis of Waste Tyres: The Influence of USY Catalyst/Tyre Ratio on Products", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 78, 243-249, 2007.
- [4] KARTHIKEYAN, S., SATHISKUMAR, C., MOORTHY, R.S., "Effect of Process Parameters on Tire Pyrolysis: A Review", *Journal of Scientific and Industrial Research*, 71, 309-315, 2012.
- [5] NKOSI, N., MUZENDA, E., "A Review and Discussion of Waste Tyre Pyrolysis and Derived Products", *Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE 2014)*, Vol II, ISBN: 978-988-19253-5-0, London, UK, 2014.
- [6] ROY, C., CHAALA, A., DARMSTADT, H., "The Vacuum Pyrolysis of Used Tires: End-Uses for Oil and Carbon Black Products", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 51, 201-221, 1999.
- [7] LIN, H., *The Combustion of Anthracites and Low Grade Bituminous Coals*, International Conference on Coal Science, Pittsburgh, PA, USA, 1983.
- [8] ROY, C., DE CAUMIA, B., PAKDEL, H., PLANTE, P., BLACHETTE, D., LABRECQUE, B., *Vacuum Pyrolysis of Used Tires, Petroleum Sludges and Forestry Wastes: Technological Development and Implementation Perspectives*, Proceedings of the First Canada/European Community R&D Contractors Meeting: Biomass Thermal Processing, CPL Press, 109-122, Newbury, UK, 1990.
- [9] <http://www.marmore.com.tr/kutuphane-pirolitik-yag> (erişim tarihi 20.12.2016)
- [10] ZANETTI, M.C., GENON, G., "Recycle of Used Tyres: Cryogenic Disintegration and Reuse of the Obtained Products", *Sustainable Waste Management and Recycling: Used/Post-Consumer Tyres*, 119-126, 2004.
- [11] ÇİT, İ., SINAĞ, A., YUMAK, T., UÇAR, S., MISIRLIOĞLU, Z., CANEL, M., "Comparative Pyrolysis of Polyolefins (PP and LDPE) and PET", *Polymer Bulletin*, 64, 817-834, 2010.
- [12] [https://www.makinaturkiye.com/pet-sise-imalat-makinasi\(-01-05-lt\)-p-88518](https://www.makinaturkiye.com/pet-sise-imalat-makinasi(-01-05-lt)-p-88518) (erişim tarihi 20.12.2016)
- [13] <http://asyasu.com.tr/ambalaj.html> (erişim tarihi 20.12.2016)
- [14] TAYYAR, A.E., ÜSTÜN, S., "Geri Kazanılmış Pet'in Kullanımı", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 53-62, 2010.
- [15] YOSHIOKA, T., GRAUSE, G., EGER, C., KAMINSKY, W., OKUWAKI, A., "Pyrolysis of Poly(ethylene terephthalate) in a Fluidised Bed Plant", *Polymer Degradation and Stability*, 86, 499-504, 2004.
- [16] KARACASU, M., BİLGİÇ, Ş., "Atık Lastik Katkısının Sıcak Asfalt Özelliklerine Etkisi", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 45-64, 2009.
- [17] PHADKE, A.A., BHATTACHARYA, S.K., CHAKRABORTY, S.K., "Studies of Vulcanization of Reclaimed Rubber", *Rubber Chemistry and Technology*, 56, 726-736, 1983.
- [18] ISLAM, M.R., TUSHAR, M.S.H.K., HANIU, H., "Production of Liquid Fuel and Chemicals from Pyrolysis of Bangladesh Hibicycle/Rickshaw Tire Wastes", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82, 1, 96-109, 2008.

ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİK VE POLİETİLEN TEREFTALAT (PET) ŞİŞE ATIKLARININ PİROLİZİNİN TASARLANAN YENİ BİR REAKTÖRDE KIYASLANMASI

- [19] AYLÓN, E., FERNÁNDEZ-COLINO, A., MURILLO, R., NAVARRO, M.V., GARCIA, T., MASTRAL, A.M., “Valorisation of Waste Tyre by Pyrolysis in a Moving Bed Reactor”, *Waste Management*, 30, 1220-1224, 2010.
- [20] JAHIRUL, M.I., RASUL, M.G., CHOWDHURY, A.A., ASHWATH, N., “Biofuels Production through Biomass Pyrolysis-A Technological Review”, *Energies*, 5, 4952-5001, 2012.
- [21] WILLIAMS P.T., “Pyrolysis of Waste Tyres: A review”, *Waste Management*, 33, 1714-1728, 2013.
- [22] BEECHAM, M., *Global Market Review of Automotive Tyres-Forecasts to 2014*, Pub ID, Aroq Limited, Bromsgrove, UK, 2008.
- [23] LEUNG, D.Y.C., “Kinetic Study of Scrap Tyre Pyrolysis and Combustion”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 45, 153-169, 1998.
- [24] BRIDGWATER, A.V., CZERNIK, S., PISKORZ, J., *An Overview of Fast Pyrolysis, in Progress in Thermochemical Biomass Conversion*, Blackwell Science Ltd., Oxford, UK, 2001.
- [25] MARTÍNEZ, J.D., PUY, N., MURILLO, R., GARCÍA, T., NAVARRO, M.V., MASTRAL, A.M. “Waste Tyre Pyrolysis-A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 179-213, 2013.