



METALURJİK ATIK TAKVİYESİNİN HDPE VE LDPE POLİMER KOMPOZİTLER ÜZERİNE ETKİLERİ

Elif ULUTAŞ^{1a*}, Zeynep Hazal YAZĞAN^{1b}, Elif UZUN KART^{1c}, Münir TAŞDEMİR^{1d}

¹Marmara Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

^aelif.ulutas@marmara.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7753-8878

^bzeynepfazalyzgn@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3502-5545

^celif.uzun@marmara.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4950-2162

^dmunir@marmara.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8635-7251

ÖZET

Son yıllarda, endüstriyel gelişmelerin plansız olarak artışı, endüstriyel kirliliği de beraberinde getirmiştir. Bayer prosesi ile alümina üretimi esnasında ortaya çıkan kırmızı çamur yapı malzemeleri üretimi, demir-çelik üretimi, polimer veya metal matrisli kompozitler ve seramikler gibi farklı uygulama alanlarına sahiptir. Endüstriyel atık olarak bilinen kırmızı çamur bu çalışmada polimerler için takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) termoplastiklerine farklı oranlarda (%15, %30) ilave edilen kırmızı çamurun elde edilen polimer kompozitler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kırmızı çamur içeren LDPE ve HDPE esaslı kompozitler çift vidalı ekstrüzyon makinesinde granüle edilip ardından enjeksiyon makinesinde kalıplandı. Hazırlanan polimer kompozitlerin çekme dayanımı, kopma uzaması, darbe dayanımı, sertlik miktarı ve aşınma oranı gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Test sonuçlarına göre, artan kırmızı çamur miktarıyla sertlik, nem miktarı ve yoğunluk artmıştır, darbe dayanımı ve kompozitlerin uzaması düşüş göstermiştir. Ağırlıkça %15 kırmızı çamur içeren polimer kompozitler en yüksek çekme mukavemeti değerine sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Kırmızı çamur, polimer matrisli kompozitler, enjeksiyon kalıplama, mekanik özellikler

ABSTRACT

In recent years, the unplanned increase in industrial developments has brought industrial pollution. The red mud produced during alumina production with the Bayer process has different

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

Atıf (Citation): Ulutaş, E., Yazgan Z. H., Uzun Kart, E., Taşdemir, M., "METALURJİK ATIK TAKVİYESİNİN HDPE VE LDPE POLİMER KOMPOZİTLER ÜZERİNE ETKİLERİ", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 3(2): 33-46, 2021.

Geliş (Received): 31/05/2021

Kabul (Accepted): 30/10/2021

Yayın (Published): 31/12/2021

application areas such as production of building materials, iron-steel production, polymer or metal matrix composites and ceramics. Red mud known as industrial waste was used as reinforcement material for polymers in this study. It was investigated that the effect of red mud added in different proportions (15%, 30%) to high density polyethylene (HDPE) and low density polyethylene (LDPE) thermoplastics on the obtained polymer composites. LDPE and HDPE based composites containing red mud were granulated in a twin screw extruder and then molded in the injection machine. Mechanical properties of prepared polymer composites such as tensile strength, elongation at break, impact strength, hardness and wear rate were determined. According to the test results, hardness, moisture content and density increased with increasing amount of red mud, impact resistance and elongation of composites decreased. Polymer composites containing 15% red mud by weight have the highest tensile strength value.

Keywords: Red mud, polymer matrix composites, injection molding, mechanical properties

1. GİRİŞ

Kırmızı çamur, Bayer prosesi ile boksit cevherinden alümina üretimi sırasında açığa çıkan endüstriyel atık bir üründür [1,2]. Bir ton alümina üretiminde yaklaşık 1-1.5 ton arasında kırmızı çamur açığa çıkmaktadır ve dünya çapındaki kırmızı çamur rezervi 2.7 milyar tonun üzerindedir [3,4]. Kırmızı çamur boksit cevherinin, sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde çözünemeyen demir, titanyum, alüminyum minerallerini, silika, sodyum alüminyum hidrosilikatlarını, kalsiyum bileşiklerini ve nadir toprak elementlerini içerdiğinden dolayı atık olarak düşünülmemeli ve ikincil hammadde olarak kullanılabilir durumda olduğu unutulmamalıdır [1,5]. Kırmızı çamurun endüstriyel değerlendirilmesi; yol açtığı depolama ve çevre problemleri açısından son derece önemlidir. Bu sebeple çevreye duyarlı sistemlerin uygulanma ihtiyacının yüksek olduğu şu son günlerde kırmızı çamur atığının endüstriyel uygulamalarda değerlendirilmesi zorunluluğu doğmuştur [6]. Kırmızı çamurun depolanması, bertarafı, endüstriyel değerlendirilmesi ve kullanımına yönelik çalışmalar tüm dünyada yürütülmektedir [7,8].

Yapılan sektörel ve literatür araştırmaları sonucunda katma değeri yüksek bu atığın işlenmesi için çeşitli prosesler geliştirilmiş olmasının yanı sıra pratik bir uygulama ortaya konulamamıştır [9]. Kırmızı çamur değerlendirilmesi için tuğla, çimento, beton gibi yapı malzemeleri üretimi, seramik üretimi, zemin iyileştirme, katalizör, renklendirici madde, adsorban gibi birçok alan sağlanmış olsa da bu uygulamaların çok azının ekonomik olarak uygunluğu kanıtlanmıştır [10,11]. Zhang ve arkadaşları [12]; polipropylene (PP) kırmızı çamur

eklenmesiyle, kompozitlerin gerilme mukavemetini, eğilme özelliklerini ve termal özelliklerini iyileştirmeyi başarmıştır. Ağırlıkça %15 kırmızı çamur konsantrasyonunda çekme mukavemeti maksimum değere ulaşır, ancak çarpma özelliği, artan kırmızı çamur içeriği ile bozulur. Daha iyi genel mekanik ve termal özelliklere sahip PP/kırmızı çamur kompozitler, nispeten daha düşük kırmızı çamur içeriklerinde elde edilmiştir. Taşdemir ve Kurt [13]; akrilonitril bütadien stiren (ABS)/kırmızı çamur polimer kompozitlerinde takviye oranı (%10, 20, 30, 40, 50) ve UV tavlama işleminin (UV'siz, 100°C 100-200 saat) mekanik, termal ve morfolojik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Çekme testi sonuçları, numunelere uygulanan UV ısıtma işleminin ve ilave edilen kırmızı çamur oranının elastiklik modülü ve gerilme mukavemeti değerlerini etkilediğini göstermiştir. Her bir UV tavlama süresi için maksimum elastiklik modülü %50 kırmızı çamur içeren numunelerde görülmüştür. Bekleme süresi 200 saat UV tavlama işlemi ve %50 kırmızı çamur ilavesi ile maksimum sertlik elde edilmiştir. Kırmızı çamur miktarındaki artış HDT (Heat Deflection Temperature-Isıl Çarpılma Sıcaklığı) ve Vicat (Vicat Softening Temperature-Vicat Yumuşama Sıcaklığı) değerlerinin artmasına neden olurken, ergime akış indeksi ve Izod darbe dayanımı keskin bir düşüş göstermiştir. Shanmugavel ve arkadaşları [14]; sıkıştırma kalıplama düzeneği ile imal edilen kırmızı çamur takviyeli polipropilen kompozitlerin mekanik, erime ve kristal davranışını incelemiştir. Dijital Tarama Kalorimetresi (DSC) ile kristal davranışları incelenen polimer kompozitlerde kırmızı çamur ilavesinin kompozitlerin kristal davranışını etkilemediği belirlenmiştir. Artan kırmızı çamur içeriğine bağlı olarak kompozitlerin sertliğinin arttığı, çekme ve darbe dayanımının azaldığı görülmektedir. Kuşaklı ve arkadaşları çalışmalarında [15]; yanmazlık özelliğine sahip epoksi kompozit malzemeler hazırlamak için alev geciktirici olarak alüminyum hidroksit ($Al(OH)_3$) ve dolgu maddesi olarak kırmızı çamur atığı kullanmışlardır. Çalışmalarında epoksi içerisine ağırlıkça %10, 20, 30, 40, 50 oranlarında kırmızı çamur ilave ederek kompozitlerin mekanik ve alev geciktirici özellikleri incelemiştir. Test sonuçlarında; saf epoksiye ait 3.3 GPa Young modülünün, kırmızı çamur ilavesiyle 6.5 GPa'a kadar yükseldiği görülmektedir. Tüm kırmızı çamur takviyeli kompozitlerde, çekme mukavemeti ve Young modülü değerleri, saf epoksiden yaklaşık iki kat daha yüksek bulunmuştur. Çalışmamız ile benzer şekilde sonuçlanan çekme mukavemeti değeri %30 oranında kırmızı çamur ilavesi ile düşüş göstermiştir. Çekme mukavemetinde max. değer 149 MPa'dır (ağırlıkça %20 kırmızı çamur). Ağırlıkça %50 oranında kırmızı

çamur içeren kompozitlerin sertlik miktarı 82 Shore D'dir ve bu max. değerdir. Ayrıca tüm kompozitlerin hesaplanan LOI (limit oksijen indeksi) değerleri 26'nın üzerinde ölçülmüştür.

Kırmızı çamur küçük parçacık boyutuna ve yüksek özgül yüzey alana sahiptir. Bu sebeple, kompozit malzemelerin hazırlanmasında taşıyıcı olarak kullanılabilir. Ayrıca, kırmızı çamur, malzemenin performansını arttırırken kompozit malzemeleri sentezlemek için bir dolgu görevi de görebilir [16]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, katma değeri yüksek bu atığın polimerlerin mekanik özelliklerini arttırmak ve düşük maliyetli ürünler elde etmek amacıyla polimer matrisli kompozitler için takviye elemanı olarak kullanımı önerilmiştir [17]. Kompozitlerin endüstriyel uygulamalarında karşılaşılan yüksek maliyet problemleri, düşük maliyetli hazır bir takviye malzemesi ilavesiyle önemli ölçüde giderilecektir. Ayrıca ilave edilen takviye malzemelerinin maliyeti düşürmenin yanı sıra kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz etkilememesi gerekmektedir. Kırmızı çamur yapısında demir, titanyum, alüminyum minerallerini ve çeşitli bileşikleri barındırdığından dolayı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini arttıracığı düşünülmüştür. Bu sebeple kırmızı çamur, kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve araştırılmasında büyük öneme sahiptir. [5, 16]. Yapılan bu çalışmada endüstriyel açıdan değerlendirilmesi zorunlu hale gelen kırmızı çamur, polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi için HDPE ve LDPE termoplastik malzemelerine ilave edilmiştir. Elde edilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiş ve kullanılan iki farklı matris malzemesinde mekanik özelliklerin kıyaslaması yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

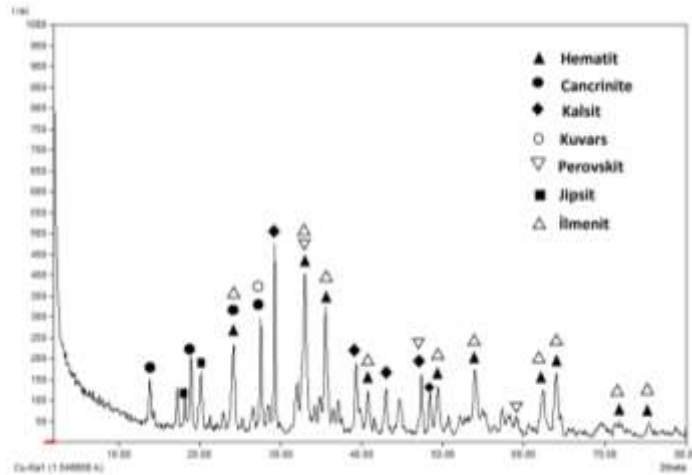
2.1 Kompozisyon ve Kullanılan Malzemeler

DeneySEL çalışmalarda matris malzemesi olarak Petkim-Türkiye'den alınan yoğunluğu 0.920 g/cm^3 , ergime akış indeksi $0.23-0.37 \text{ g/10dk}$ ($190^\circ\text{C}-2.16 \text{ kg}$), sertliği 47 Shore D olan LDPE termoplastığı ve Petkim-Türkiye'den alınan özgül ağırlığı 0.970 g/cm^3 , erime akış hızı 5.2 g/10dk ($190^\circ\text{C}-2.16 \text{ kg}$) akma dayanımı 28.0 MPa ve izod darbesi dayanımı (çentikli) (23°C) 12 kJ/m^2 olan HDPE (I 668 UV) termoplastığı kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak ise Seydişehir Alüminyum Tesisi'nden alınan ve $2.5-2.7 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip kırmızı çamur kullanılmıştır. Kırmızı çamur numunesindeki minerallerin kantitatif tayini $2-80^\circ$ 'lik açı ile 2θ aralığında Lab X marka X-Işınları Difraksiyonu (XRD) cihazı ile yapılmıştır. Kırmızı çamurun X-ışını kırınımı (XRD) deseni Şekil 1.'de verilmiştir. XRD

deseni incelendiğinde en güçlü yoğunluk değeri kalsite (CaCO_3) aittir. Demir, hematit yapısında görülürken, alüminyum, temel olarak jipsit [$\text{Al}(\text{OH})_3$] ve feldspatoid olan kanskrinit [$\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{CO}_3)(\text{H}_2\text{O})_2$] formlarında, silisyum ise kuvars (SiO_2) formunda bulunmaktadır. Titanyumun ise hematit ile birebir örtüşen piklere sahip olan ilmenit (FeTiO_3) ve perovskit (CaTiO_3) olarak bulunduğu gözlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan matris ve takviye malzemelerinin karışım oranları Çizelge 1.'de verilmiştir.

Çizelge 1. Hazırlanan kompozitlerin karışım oranları

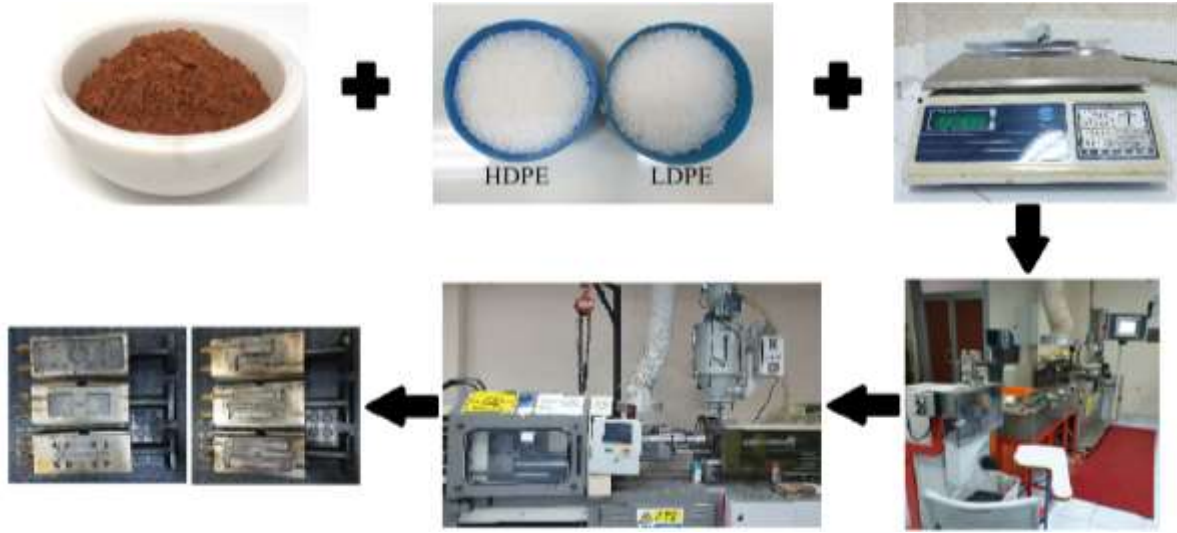
Gruplar	LDPE (%)	HDPE (%)	Kırmızı Çamur (%)
1. Grup	100	-	-
2. Grup	85	-	15
3. Grup	70	-	30
4. Grup	-	100	-
5. Grup	-	85	15
6. Grup	-	70	30



Şekil 1. Kırmızı çamurun X-ışını kırınımı (XRD) deseni

2.2 Kompozitlerin Hazırlanması

Polimer kompozitlerin belirtilen oranlarda hazırlanması için tartım işlemi; 0.5 gr hassasiyetle 5 kg kapasiteli tartım yapan DENSİ marka DS-05 model terazide yapılmıştır. Her bir deney koşulu için Çizelge 1.'de belirtilen oranlarda LB-5601 isimli katı karıştırıcıda (The Patterson-Kelley Co., Inc., USA) 15 dk boyunca karıştırılarak matris ve takviye malzemesinin homojenizasyonu sağlanmıştır.



Şekil 2. Polimer kompozitlerin üretim aşamaları



Şekil 3. Polimer kompozitlere ait test numuneleri

Hazırlanan karışımlar; Mikrosan marka çift vidalı bir ekstrüzyon makinesinde (Mikrosan Makine A.Ş., Türkiye) homojen hale getirmek için eriyik olarak karıştırılmış ardından kırıcıdan geçirilerek granül formuna getirilmiştir. Ekstrüzyon çalışma şartları LDPE/kırmızı çamur karışımları için; sıcaklık 130-190°C, basınç 25-35 bar, vida dönme hızı 80 dev/dk HDPE/kırmızı çamur karışımları için; sıcaklık 190-220°C, basınç 25-35 bar, vida dönme hızı 70 dev/dk olarak belirlemiştir. Ekstrüzyon makinesi yardımıyla elde edilen polimer kompozit granüllerininin 24 saat boyunca 105°C sıcaklıkta fiziksel suyu uzaklaştırılmıştır. Bu işlemin ardından granüller istenilen test numunelerine uygun boyutlarda 190-230°C sıcaklık, 100-110 bar basınç, 25 dev/dk vida dönme hızı olarak ayarlanan enjeksiyon makinesinde kalıplanmıştır.

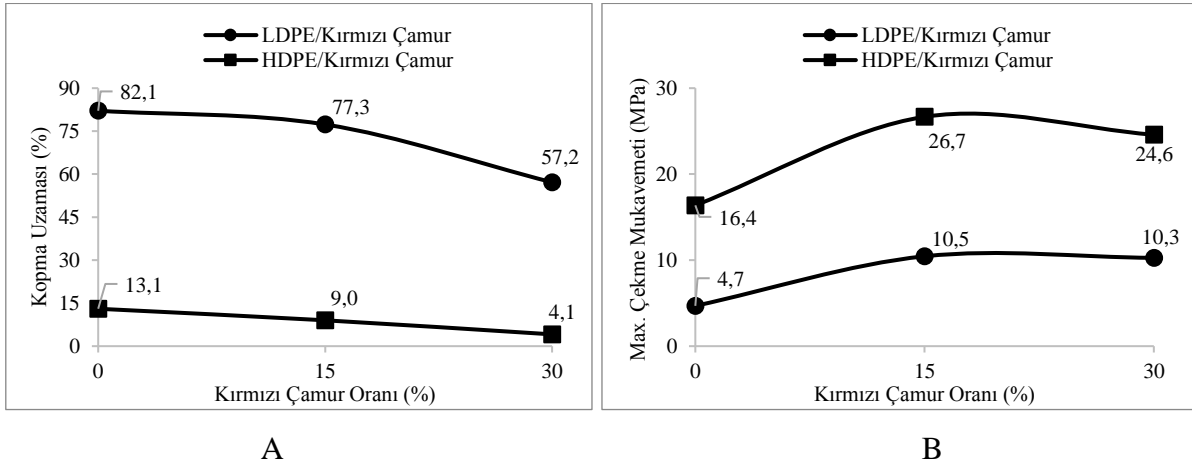
2.3 Test Yöntemleri

Hazırlanan kompozit numunelerine uygulanan çekme testleri, 10 kN yük kapasitesine sahip Zwick Z010 marka test cihazı kullanılarak 50 mm/dak çekme hızında ASTM D638 standartlarına göre altı adet çekme numunesinin ortalaması alınarak yapılmıştır. Yapılan test sonuçlarında polimer kompozitlerin max. çekme mukavemeti ve %uzama değerleri elde edilmiştir. Test numunelerinin kırılma davranışını incelemek için ASTM D256 yöntemine göre Izod darbe testi çentikli olarak oda sıcaklığında yapılmıştır. Darbe dayanımlarının ölçülmesi için kullanılan sarkaç 5.4 kJ olarak seçilmiştir. Numune boyutları ISO standardı Tip 1A 80x10x4 mm olarak tanımlanmış ve numunelere 2 mm derinliğinde çentik açılmıştır. Sert plastikler için kullanılan Shore D durometresi ile ASTM D-1706-67 test standardına uygun olarak sertlik testleri yapılmıştır. Nem tayini (ASTM D 6980) ve yoğunluk (ISO 2781) ölçümleri 3 adet numunenin ortalaması alınarak yapılmıştır. Aşınma testleri, Devotrans DA5 marka aşınma test ekipmanı (0.32 m/s aşınma hızı) ile DIN 53 516 standardına uygun iki adet numune kullanılarak yapılmıştır. Test numunelerinin kalınlığı 7 mm ve çapı 15.5 mm; tambur dönüş hızı 40 rpm ve yük (F) 10N olarak kullanılmıştır. Numuneler 20, 40, 60, 80 metrede zımpara üzerinde aşındırılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Hazırlanan polimer kompozitlere ait kopma uzaması değerleri ve kırmızı çamur oranı arasındaki ilişki Şekil 4A' da verilmiştir. LDPE ve HDPE matris içerisinde kırmızı çamurun uzamaya etkisi incelendiğinde; saf HDPE ve saf LDPE termoplastiklerine kıyasla takviye elemanı oranı arttıkça polimer kompozitlerde daha az uzama görülmüştür. HDPE termoplastiğinin kopma uzaması değeri kırmızı çamur ilavesine bağlı olarak %69 oranında düşüş göstermiştir. Qiu ve arkadaşları, kırmızı çamur miktarının klorlu polietilen kauçuğu üzerindeki etkilerini incelediklerinde benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Kauçuk içerisinde kırmızı çamur dolgusunun artmasıyla uzama miktarı hızla azalmıştır. Kırmızı çamur içeriği 40 phr (parts per hundred rubber-yüz kauçuk başına düşen parça miktarı) olduğunda minimum değere ulaşmış ve daha sonra kararlı olma eğiliminde bulunmuştur [18]. Benzer şekilde Kuşaklı ve arkadaşları yapmış oldukları testlerde, %0.8 oranında uzama gösteren saf epoksinin kırmızı çamur ilavesiyle uzama değerinin %0.5'e kadar düştüğünü gözlemlemişlerdir [15]. Kırmızı çamur konsantrasyonunun polimer kompozitlerin max.

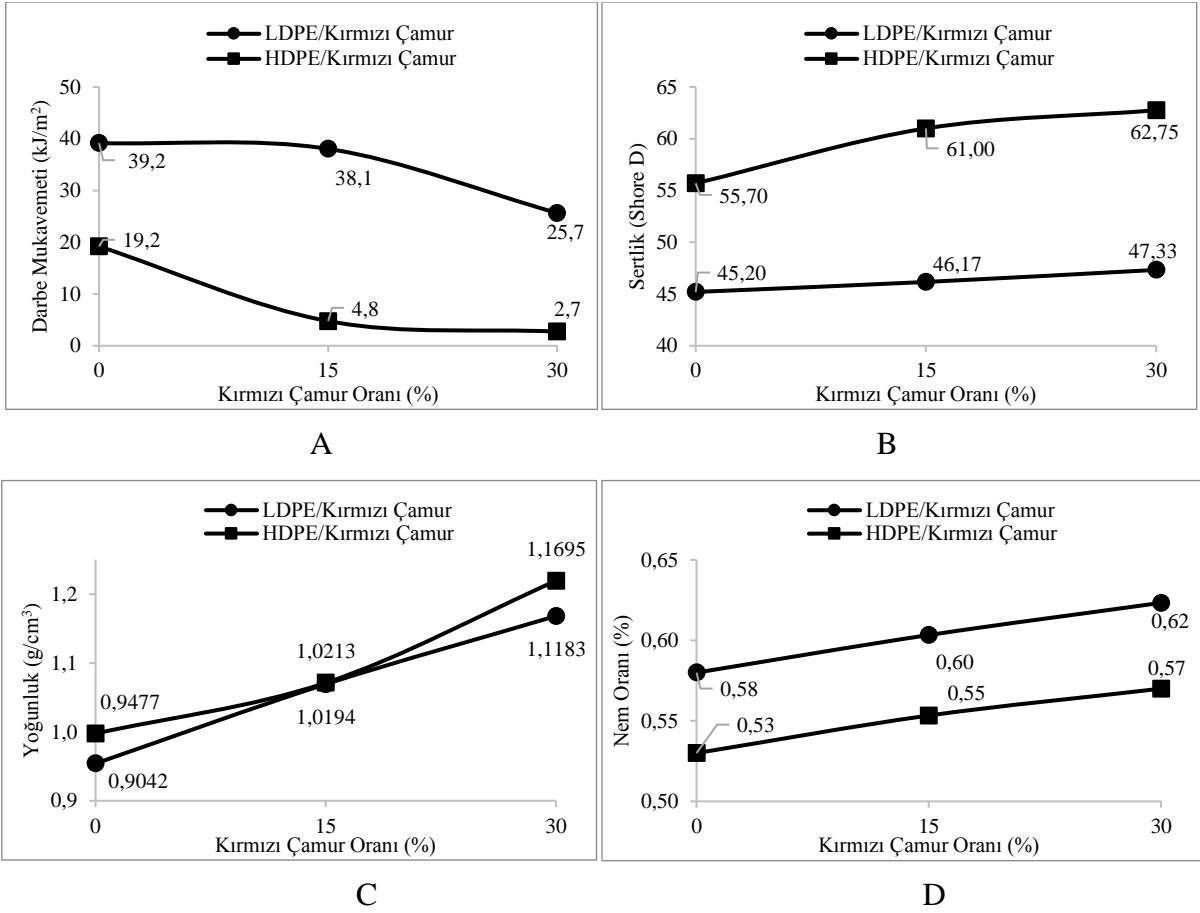
çekme mukavemeti üzerindeki etkisi Şekil 4B’de verilmiştir. Gerilme mukavemeti; LDPE matriste kırmızı çamur konsantrasyonu %0-15 aralığında artış, %15-30 aralığında ise düşüş göstermiştir. Takviye elemanının HDPE matris üzerindeki etkisi incelendiğinde; kırmızı çamurun %15 oranında ilavesi çekme mukavemeti değerini artırmıştır ancak %15-30 arasındaki artışı kayda değer bir etki sergilememiştir. Hendricks ve Buchanan kırmızı çamur-HDPE kompozitlerinin mekanik özelliklerini incelediği çalışmalarında, çekme mukavemetinde benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Ağırlıkça %10’a varan kırmızı çamur içeriği ile hem elastiklik modülünde hem de çekme mukavemetinde artış görülmüştür. Fakat kırmızı çamur oranının %25 çıkarılması bu değerleri düşürmüştür [19]. Çekme mukavemetindeki azalmanın nedeni kırmızı çamurun matris içerisinde heterojen boyut dağılımı ve aglomerasyonu olarak açıklanabilir.



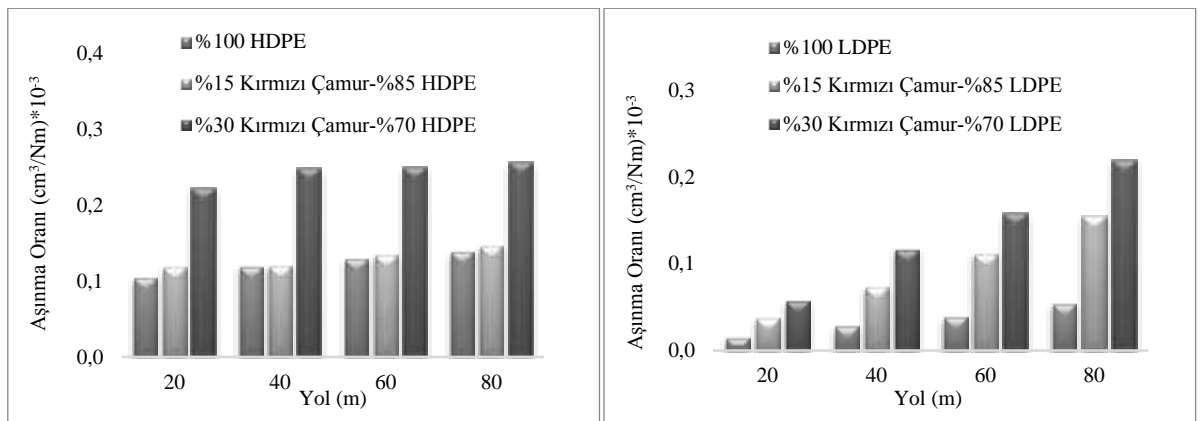
Şekil 4. LDPE/Kırmızı çamur ve HDPE/Kırmızı çamur polimer kompozitlerin çekme testi değerleri

Şekil 5A'daki kompozitlerdeki darbe mukavemeti ile kırmızı çamur oranı arasındaki ilişki verilmiştir. LDPE polimer kompozitlerde kırmızı çamur konsantrasyonu attıkça darbe mukavemeti yaklaşık olarak %35 oranında azalmıştır. Benzer etki HDPE polimer kompozitinde de görülmüştür ve en düşük darbe mukavemeti değeri %30 oranında kırmızı çamur içeren numunelerde 2.7 kJ/m² olarak ölçülmüştür. Darbe mukavemetindeki bu azalma Vander Waals kuvvetinden kaynaklanan matris ile dolgu malzemesi arasındaki düşük afinite ile açıklanabilir. Düşük afiniteye bağlı olarak kompozitlerin yük transfer kabiliyeti azalır ve dolgu malzemesi ani yüklemeye dayanamaz. Bunun sonucunda darbe dayanımı kademeli olarak azalır. Taşdemir ve Kurt; ABS/kırmızı çamur polimer kompozitlerinde kırmızı çamur miktarının artmasıyla darbe dayanımında keskin bir düşüş gözlemlemişlerdir [13]. Zhang ve

arkadaşları; PP/kırmızı çamur polimer kompozitinde, kırmızı çamur içeriğinin artmasıyla Izod darbe dayanımına benzer şekilde, Charpy darbe dayanımının da azaldığını gözlemlemişlerdir. PP matrisi ve kırmızı çamur dolgu maddeleri arasındaki düşük etkileşim, darbe özelliklerini etkileyen temel faktörlerden biridir ve sonuçlar, kırmızı çamurun darbe özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir [12]. HDPE ve LDPE matrise ait kırmızı çamur ile sertlik miktarı arasındaki ilişki Şekil 5B'de verilmiştir. Saf HDPE ve saf LDPE termoplastikleri, kırmızı çamur takviyeli polimer kompozitlere kıyasla daha düşük sertliğe sahiptir. Kırmızı çamur konsantrasyonundaki %30 artış HDPE polimer kompozitlerin sertlik miktarını 62.75 Shore D'ye, LDPE polimer kompozitlerin sertlik miktarını ise 47.33 Shore D'ye yükseltmiştir. Sertlik miktarındaki bu artış kırmızı çamur parçacıklarının polimere kıyasla daha rijit bir yapıya sahip olmasıyla açıklanabilir. Vingeshwaran ve arkadaşları, kırmızı çamurun doğal lif takviyeli polyester üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, sertlik testinde benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Polimer içerisine farklı oranlarda katılan kırmızı çamur miktarı arttıkça elde edilen kompozitin sertliği artmıştır. Kırmızı çamur ilavesiyle sertlik artışını, kırmızı çamurdaki ağır mineral oksitlerin varlığına dayandırmışlardır [5]. Yoğunluk değerleri incelendiğinde; kırmızı çamur ilavesinin her iki polimer kompozitin yoğunluğunu artırdığı ve en yüksek değerlerin %30 oranında kırmızı çamur içeren numunelerde olduğu görülmektedir. Yoğunluktaki değişiklik, kompozitin özelliklerini etkiler ve büyük ölçüde matris ve takviye malzemesine bağlıdır. Vigneshwaran ve arkadaşları polyester matriste dolgu olarak kırmızı çamur ve takviye olarak sisal lif kullanarak bir hibrit kompozit ürettikleri çalışmalarında kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Test sonuçları, %20-30 oranında kırmızı çamur ilavesiyle yoğunluğun arttığını ve aynı zamanda lif içeriğinin artmasıyla da yoğunluğun azaldığını göstermiştir. Kırmızı çamurun içinde bulunan sert malzemeler yoğunluktaki bu artışın ana nedenidir [20]. Dolgu maddesi olarak kırmızı çamur kullanılarak partikül takviyeli polyester kompozitlerin hazırlandığı bir başka çalışmada; polimer matrisine kırmızı çamur parçacıklarının dahil edilmesiyle kompozitin yoğunluğunun arttığı bulunmuştur. Satapathy ve Paynaik'e ait bu çalışmada üç farklı numunenin (ağırlıkça %10, 20 ve %30 kırmızı çamurlu) yoğunlukları sırasıyla 1.67, 1.81 ve 1.93 g/cm³ olarak ölçülmüştür [21]. Şekil 5D'de verilen nem tayini sonuçlarına göre kırmızı çamur, kompozit bünyesindeki suyu tutma kapasitesini artırmaktadır.



Şekil 5. LDPE/Kırmızı çamur ve HDPE/Kırmızı çamur polimer kompozitlerinin mekanik özellikleri



Şekil 6. Polimer kompozitlerin aşınma oranları

Aşınma oranı; test edilen malzemenin yoğunluğu, uygulanan yük ve numunenin aşındırıldığı yol gibi birçok değişkene bağlıdır. Uygulanan yük ve aşınma yolundaki artışla

kırmızı çamur ilaveli polimer kompozitlerde sürtünmeye bağlı ısı oluşumundan dolayı yumuşama gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda; doğası gereği kırılğan yapıya sahip olan kırmızı çamur partikülleri, matrisi kolayca yırtıp kayma yönünde kademeli olarak hizalanır ve bunu takiben şekil, boyut ve kırılğan davranışları nedeniyle kompozitlerin aşınma davranışını değiştirir. Farklı şekillerde dağılan ve topaklaşma oluşturan kırmızı çamur partikülleri daha uzun kayma süresine bağlı olarak aşınma kalıntılarının oluşmasına neden olur. Şekil 6'da verilen aşınma oranı sonuçları bu durumu doğrulamaktadır ve saf LDPE termoplastiğine kırmızı çamur ilavesi saf HDPE termoplastiğine kıyasla daha fazla aşınma oranı sergilemiştir. Örneğin; HDPE içerisinde kırmızı çamur konsantrasyonunun %30'a çıkarılmasıyla 20 metrede aşındırılan numunelerin aşınma oranı $0.2215 \text{ (cm}^3/\text{Nm)} * 10^{-3}$ kadar artmıştır. Aynı zamanda 20 m yolda aşındırılan LDPE polimer kompozitinin aşınma oranı %30 kırmızı çamur konsantrasyonu ilavesine bağlı olarak $0.0579 \text{ (cm}^3/\text{Nm)} * 10^{-3}$ kadar artış göstermiştir. Yapılan aşınma testlerinde aşındırma yolunun artışıyla kırmızı çamur konsantrasyonu en yüksek olan polimer kompozitlerin, daha yüksek aşınma oranına sahip olduğu görülmüştür.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, enjeksiyon kalıplama ile farklı konsantrasyonlarda üretilen kırmızı çamur ilaveli HDPE ve LDPE kompozitlerin mekanik ve aşınma davranışları belirlenmiştir.

- Çekme mukavemeti, ağırlıkça %15 kırmızı çamur konsantrasyonunda maksimum değere ulaşmıştır. Test sonuçlarına göre elde edilen polimer kompozitlerin, en iyi ara yüzey yapışmasına bu oranda sahip olduğu söylenebilir. Ancak artan kırmızı çamur içeriğine bağlı olarak uzama değeri bozulmuştur.
- Yapı içerisinde, kompozit işleme yönteminden ve nemin iç difüzyonundan kaynaklanan boşluklar bulunabilir ve buna bağlı olarak kompozitte gözenekli bir yapı oluşur. Mikroyapıdaki gözeneklilik, kırmızı çamur-polimer yapışmasının bağ mukavemetinde azalmaya sebep olan bir faktördür. Bu durum; çekme mukavemetinde, ağırlıkça %30 oranında kırmızı çamur ilavesiyle meydana gelen düşüşü açıklamaktadır.
- Ağırlıkça %15 kırmızı çamur konsantrasyonunda çekme mukavemeti maksimum değere ulaşmıştır ancak darbe mukavemeti artan kırmızı çamur miktarına bağlı olarak düşüş gösterir. Polimerik matris ve kırmızı çamur arasındaki Vander Waals kuvvetlerinin sebep olduğu düşük afinite darbe mukavemetindeki azalmayı açıklamaktadır. Bunun yanı sıra

takviye oranının artmasıyla daha rijit forma geçen polimer kompozitlerin darbeyi absorbe etmesi sınırlandırılmıştır.

- Yapısında bulundurduğu metal içerikleri nedeniyle kırmızı çamur doğası gereği ağırdır ve bu sebeple kırmızı çamurun HDPE ve LDPE matrise ilavesi kompozit yoğunluğunu artırır.
- Kırılgan ve rijit bir yapıya sahip olan kırmızı çamur takviyesi HDPE ve LDPE polimer kompozitlerin sertliğini ve aşınma oranını artırmıştır. Aşındırma yüzeyindeki artışa bağlı olarak en yüksek aşınma oranları 80 m yolda görülür.
- Nispeten daha düşük kırmızı çamur içeriklerinde mekanik özellikleri daha iyi olan kırmızı çamur takviyeli polimer kompozitler elde edilebilir.
- Kırmızı çamurun depolaması, geri dönüşümü, bertarafı ve neden olduğu endüstriyel kirlilik gibi olumsuz etkileri kaldırmanın bir yolu olarak kırmızı çamur polimerlerde takviye elemanı olarak kullanılabilir ve bunun yanı sıra kırmızı çamurun dolgu maddesi olarak kullanımı daha yüksek çekme dayanımına ve daha rijit bir yapıya sahip malzemeler üretilmesini mümkün kılar.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalar Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Plastik Teknoloji Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Anawati, J., Azimi, G., Recovery of scandium from Canadian bauxite residue utilizing acid baking followed by water leaching. *Waste Management*, 95, 549–559. 2019.
- [2] Demir, İ., Başpınar, MS., Kahraman, E., Kırmızı çamur katkılı tuğla üretiminin araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi (AKÜ FEMÜBİD)*, 14, 537-540. 2014.
- [3] Zhang, R., Zheng, S., Shuhua, M., Zhang, Y., Recovery of alumina and alkali in Bayer red mud by the formation of andradite-grossular hydrogarnet in hydrothermal process. *Journal of Hazardous Materials*, 189, 827-835, 2011.

- [4] Chen, C., Zhang, Y., Han, W., Qian, C., Luo, Y., Zhang, N., Incorporation of Xuan-paper waste residue in red mud/waste polyethylene composites. *Journal of Hazardous Materials*, 399, 2020.
- [5] Vingeshwaran, S., Uthayakumar, M., Arumugaprabu, Potential use of industrial waste-red mud in developing hybrid composites: A waste management approach. *Journal of Cleaner Production*, 276, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124278
- [6] Uzun, E., Zengin, M., Atılğan, İ., Improvement of selective copper extraction from a heat-treated chalcopyrite concentrate with atmospheric Sulphuric-Acid leaching. *Material in Tehnologije*, 50, 395-401, 2016.
- [7] Sutar, H., Mishra, SC., Sahoo, SK., Prasad chakraverty, A., Maharana, HS., Progress of Red Mud Utilization: An Overview. *American Chemical Science Journal*, 4(3), 255-279, 2014.
- [8] Taneez, M., Hurel, C., A review on the potential uses of red mud as amendment for pollution control in environmental media. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 22106-22125, 2019.
- [9] Tinkılıç N., ve Erdem, E., Kırmızı çamurdan demir (II) sülfat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) Üretimi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2, 135-137, 1996.
- [10] Wang, S., Ang H., ve Tade, M., Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes. *Chemosphere*, 72, 1621-1635, 2008.
- [11] Qiu, L., Phule, AD., Han, Y., Wen, S., Zhang, ZW., Thermal aging, physico-mechanical, dynamic mechanical properties of chlorinated polyethylene/red mud composites. *Polymer composites*, 41, 4740-4749, 2020
- [12] Zhang, Y., Zhang, A., Zhen, Z., Lv, F., Chu. PK, ve Ji, J., Red mud/polypropylene composite with mechanical and thermal properties, *Journal of Composite Materials*, 45(26), 2811–2816, 2011.
- [13] Taşdemir, M., Kurt, M., Acrylonitrile Butadiene Styrene/Red Mud Polymer Composites: Ultraviolet Annealing. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 8, 804–809, 2016.
- [14] Shanmugavel, R., Jayamani, M., Nagarajan, R., Irullappasamy, S., Cardona, F., Sultan, MTH., Processing and characterization of redmud reinforced polypropylene composites. *Materials Science and Engineering*, 152 (1), 012053, 2016. DOI: 10.1088/1757-899X/152/1/012053

- [15] Kuşaklı, S., Kocaman, S., Ceylan, AA., Ahmetli, G., Improving the flame retardancy and mechanical properties of epoxy composites using flame retardants with red mud waste. *Journal of Applied Polymer Science*, 138 (13), 2020. DOI: 10.1002/app.50106
- [16] Wang, S., Jin, H., Deng, Y., Xiao, Y., Comprehensive utilization status of red mud in China: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125136
- [17] Küçükdoğan, N., Aydın, L., Sütçü, M., Theoretical and empirical thermal conductivity models of red mud filled polymer composites. *Thermochimica Acta*, 665, 76-84, 2018.
- [18] Qiu, L., Phule, AD., Han, Y., Wen, S., Zhang, ZX, Thermal aging, physico-mechanical, dynamic mechanical properties of chlorinated polyethylene/red mud composites. *Polymer Composites*, 41 (11), 4740-4749, 2020. DOI: 10.1002/pc.25747
- [19] Hendricks, LH., Buchanan, VE., Effect of material parameters on the mechanical properties of chemically treated red mud HDPE composites. *Polymers and Polymer Composites*, 20 (10), 1-9, 2020. DOI: 10.1177/0967391120954064
- [20] Vigneshwaran, S., Uthayakumar, M., Arumugaprabu, V., Development and sustainability of industrial waste-based red mud hybrid composites. *Journal of Cleaner Production*, 230, 862-868, 2019.
- [21] Satapathy, A., Patnaik, A., Analysis of dry sliding wear behavior of red mud filled polyester composites using the taguchi method. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, 2010. DOI: 10.1177/0731684408092453