

Hurda alüminyumdan alümina takviyeli Al6013 matrisli kompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması

Production of alumina reinforced Al6013 matrix composites from scrap aluminum and investigation of their mechanical properties

Mahmut Can ŞENEL*¹ , Tolgahan ARAPOĞLU² 

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55210, Samsun

²Samsun Büyükşehir Belediyesi, Metal ve Ahşap Atölyeleri Birimi, 55210, Samsun

• Geliş tarihi / Received: 08.10.2024

• Kabul tarihi / Accepted: 16.05.2025

Öz

Bu çalışmada, azot gazı altında karıştırma döküm yöntemiyle alüminyum matrise farklı katkı oranlarında (ağırlıkça %3, 6, 9) alümina (Al_2O_3) takviyesi yapılarak Al6013- Al_2O_3 kompozitleri üretilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen kompozitlerin değişen takviye oranına göre mikroyapısı ve mekanik özellikleri (yoğunluk, Vickers sertlik, gözeneklilik oranı) detaylı bir şekilde incelenmiştir. Al6013- Al_2O_3 kompozitlere uygulanan mekanik testler neticesinde; en yüksek Vickers sertliği (153 ± 3 HV), en düşük gözeneklilik oranı (%5.86) ve en yüksek çekme dayanımı (458 ± 7 MPa) Al6013-%6 Al_2O_3 kompozitte tespit edilmiştir. SEM analizlerinde %9 Al_2O_3 takviye edildiğinde Al_2O_3 'ün topaklandığı gözlemlenmiştir. Bu topaklanma Al6013-%9 Al_2O_3 kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. Sonuç olarak Al6013 matrise belirli oranlarda (ağırlıkça %6'ya kadar) Al_2O_3 takviyesiyle malzemenin mekanik özelliklerinde iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca azot gazı altında karıştırma döküm yönteminin etkili bir üretim yöntemi olduğu kanıtlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Alümina, Dayanım, Hurda alüminyum, Karıştırma döküm, Mikroyapı

Abstract

In this study, Al6013- Al_2O_3 composites with different reinforcement ratios of alumina (Al_2O_3 : 3, 6, 9 wt.%) were produced via the stir casting technique under nitrogen gas. In this scope of work, the microstructure and mechanical properties (density, Vickers hardness, porosity ratio) of the produced composites were thoroughly investigated based on varying reinforcement ratios. According to the mechanical test results, the highest Vickers hardness (153 ± 4 HV), lowest porosity ratio (5.86%) and highest tensile strength (458 ± 7 MPa) were detected in the Al6013-6% Al_2O_3 composite among Al6013- Al_2O_3 composites. In SEM analyses, it was seen that Al_2O_3 was agglomerated when it was reinforced by 9%. As a result, it was determined that the mechanical properties of the material improved with the reinforcement of Al_2O_3 and graphene up to certain proportions (6 wt.%) into the Al6013 matrix. Furthermore, the stir casting method has proven to be an effective production method under nitrogen gas.

Keywords: Alumina, Strength, Scrap aluminum, Stir casting, Microstructure

*Mahmut Can ŞENEL; mahmutcan.senel@omu.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Mevcut zaman diliminde gelişen teknoloji ve artan sanayileşme, geleneksel yöntem ile üretilen malzemeler ile modern teknolojik taleplerin karşılanmasını mümkün kılmamaktadır. Katma değer açıdan yüksek ve üstün teknolojik malzemelerin ortaya çıkması için çalışmalar başlamış ve bu doğrultuda kompozit malzemelerin üretiminin yolu açılmıştır (Üstün, 2022).

Kompozit malzemeler, birden fazla malzemenin üstün olan özelliklerinin bir malzemede toplanması amacıyla oluşturulan malzemedir. Matris ana malzemesine göre kompozitler; metal, polimer ve seramik matrisli olarak sınıflandırılabilir (Şenel, 2018). Partikül yapıdaki malzemelerin belli oranlarda karışmasıyla metal matrisli kompozitler elde edilmektedir. Metal matrisli kompozitlerdeki (MMK'lerdeki) takviye elemanları; zirkonya (ZrO_2), silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum nitrür (Si_3N_4) gibi nitrür, oksit ve karbür formdaki seramikler olabilmektedir. Metal matrisli kompozitlerin üretiminde, magnezyum (Mg), titanyum (Ti) ve alüminyum (Al) gibi metaller ve alaşımları matris malzemesi olarak tercih edilmektedir. Malzemede matrisin seçiminde korozyon dayanımı, oksitlenme ve mekanik özellikler dikkate alınmaktadır (Şahin, 2015; Altunpak & Akbulut, 2019). MMK'ler bilimsel, teknolojik ve aynı zamanda ticari öneme de sahiptirler. Elyaf, kılcal kristal (whisker) ve parçacık türü takviyelerle güçlendirilen alüminyum matrisli kompozitler düşük yoğunluk, iyi aşınma direnci, yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü, yüksek elektrik ve ısı iletkenlik gibi birçok açıdan daha üstün yapıdadırlar. Parçacık takviyeli kompozitler; uçak, savunma, otomotiv ve elektronik endüstrilerinde ve yüksek sıcaklık dayanımı ile yüksek aşınma direnci gerektiren birçok sektörde kullanılmaktadır (Çanakçı, 2006; Kaya, 2016; Şimşek, 2019).

Alüminyum matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılan Al_2O_3 , kimya dünyasının önemli bir bileşeni olan alüminyum oksitinin diğer adıdır. Kimyasal sembolü Al_2O_3 olan bu bileşik, alüminyum ve oksijen elementlerinden meydana gelmektedir. Al_2O_3 , çeşitli endüstriyel alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle refrakter malzemelerin üretimi ve seramik endüstrisinde, metalürji gibi diğer birçok sektörde kullanılmaktadır. Dayanıklılığı, yüksek ergime noktası ve iletkenlik özellikleri, Al_2O_3 'ü endüstriyel süreçlerde ve çeşitli ürünlerin yapımında tercih edilen bir malzeme haline getirmektedir. Sertliği ve aşınma direnci yüksek bir malzeme olması sayesinde zımpara kağıtlarında, aşındırıcı malzemelerde ve kesici takımlarda kullanılmaktadır. Ayrıca Al_2O_3 , yapay mücevherlerin ve yarı iletkenlerin üretiminde de önemli bir rol oynar. Bu nedenle Al_2O_3 , modern endüstrinin vazgeçilmez bir bileşeni olarak karşımıza çıkmaktadır (Şenel, 2020; Şenel & Gürbüz, 2021; Demir, 2022).

Literatürde Al_2O_3 takviyeli alüminyum matrisli kompozitler üzerine birtakım çalışmaların olduğu görülmüştür. Alaneme & Bodunrin (2013), çalışmalarında Al6063 alüminyum alaşımına hacimsel olarak %6, 9, 15 ve 18 oranlarında Al_2O_3 ilave ederek karıştırma döküm yöntemiyle alüminyum esaslı kompozitler üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerde artan takviye oranıyla gözeneklilik oranının arttığı ve en yüksek gözeneklilik oranının %3.51 olduğu görülmüştür. Al_2O_3 katkısıyla kırılma tokluğu ve kopma uzaması düşerken çekme dayanımı, sertlik ve akma dayanımı yükselmiştir. Arık vd. (2017) yaptıkları çalışmada alüminyum matrise %15 oranında Al_2O_3 takviye ederek toz metalürjisi yöntemi ile kompozit malzemeler üretmiştir. Daha sonra numuneler sıcak presleme yöntemiyle işlenmiş olup mikro yapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak Al_2O_3 taneciklerinin malzeme içerisinde homojen dağılmasına rağmen ara yüzey bağlanmasının yetersiz olduğu gözlenmiştir. Saf alüminyuma kıyasla sertlik değeri %62 oranında iyileşmiştir. Bajaj (2011) çalışmasında karıştırma döküm yöntemiyle ağırlıkça %2.5-10 oranlarında Al_2O_3 , SiC ve SiC- Al_2O_3 katkılı alüminyum matris yapıları kompozit malzemelerin üretimini gerçekleştirmiştir. Üretilen numunelere çekme, darbe ve sertlik deneyleriyle numunelerin mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Takviye oranının artması ile sertlik, akma dayanımı ve darbe dayanımı artmıştır. Mekanik özelliklerdeki en yüksek artış 220 MPa akma dayanımı, 120 HRC sertlik değeri ve 9.36 Nm darbe dayanımı ile %10SiC-%10 Al_2O_3 takviyeli kompozitte gerçekleşmiştir. Devaraju vd. (2013) yürüttükleri çalışmada, karıştırma döküm tekniğiyle Al6061-T6 matris malzeme içerisine hacimce %8 oranında SiC-grafit ve hacimce %4 oranında SiC- Al_2O_3 takviyesi yaparak alüminyum hibrit kompozitler üretmişlerdir. Yürütülen testler sonucunda; Al6061 alaşımının sertliği 104 HV iken; Al-SiC-grafit kompozitte 108 HV'ye çıkarken Al-SiC- Al_2O_3 kompozitte 120 HV'ye yükselmiştir. Verma vd. (2017) çalışmalarında, karıştırma döküm metoduyla Al356 alaşımına ağırlıkça %10 SiC ve Al_2O_3 takviyeli kompozitlerin üretimini yapmışlardır. Al_2O_3 takviyeli kompozitin sertlik değeri (99.3 HRC) ve basma dayanımı (440 MPa) daha yüksek çıkarken; SiC takviyeli kompozitin çekme dayanımının (385 MPa), darbe dayanımının (8.6 Nm) ve kesme dayanımının (133 MPa) daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak bu çalışma kapsamında, Al6013 alaşımı matris malzeme olarak; Al₂O₃ tozu ise takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında ilk kez karıştırma döküm yöntemiyle hurda alüminyumdan Al6013 matrisli Al₂O₃ takviyeli kompozitler üretilerek numunelerin yoğunluğu, gözeneklilik oranı, sertliği, çekme dayanımı ve mikro yapısı incelenmiştir.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

2.1. Materyal

2.1. Material

Bu çalışmada, üretim metodu olarak azot gazı altında karıştırma döküm yöntemi kullanılmıştır. Karıştırma döküm yöntemi uygulanırken matris malzemesi olarak hurda Al6013 alaşımından, takviye elemanı olarak Al₂O₃ tozlarından faydalanılmıştır. Bu sayede Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozitler üretilmiştir. Tablo 1’de Al6013 alaşımının bileşenleri ve ağırlıkça katkı oranları verilmiştir. Alüminyum alaşımlardan 6xxx serisi olanlarda ana alaşım elementleri silisyum (Si) ve magnezyum (Mg) olup bu elementlerin dışında bakır (Cu), manganez (Mn), titanyum (Ti) ve çinko (Zn) elementleri de yer almaktadır.

Tablo 1. Al6013 alaşımının bileşenleri ve % ağırlıkça katkı oranları (Koçdağ, 2019)

Table 1. Components of Al6013 alloy and % weight contribution (Koçdağ, 2019)

Mn	Si	Cu	Mg	Ti	Zn	Fe	Cr	Al
0.2-0.8	0.6-1.0	0.6-1.1	0.8-1.2	0.1	0.25	0.5	0.1	Kalan

Tablo 2’de Al6013 alaşımının genel özellikleri verilmiştir. Bu alaşımın özellikleri incelendiğinde yoğunluğunun 2.72 g/cm³, elastisite modülünün 71 GPa, termal iletkenlik katsayısının 150 W/(m°K) ve çekme dayanımının 380 MPa olduğu görülebilmektedir.

Tablo 2. Al6013 alaşımının genel özellikleri (Aytekin, 2021)

Table 2. General properties of Al6013 alloy (Aytekin, 2021)

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2.72
Ergime sıcaklığı (°C)	579
Termal iletkenlik katsayısı (W/(m°K))	150
Çekme dayanımı (MPa)	380
Akma dayanımı (MPa)	350
Elastisite modülü (GPa)	71
Isıl genleşme katsayısı (°K ⁻¹)	21.7×10 ⁻⁶

Al₂O₃, sahip olduğu üstün özellikleri (yüksek sertliği, aşınma direnci vb.) sayesinde birçok endüstriyel uygulamada önemli rol oynamaktadır. Günümüzde yapay kemiklerde, yüksek dereceli porselenlerde, yarı iletkenlerde ve entegre devre yüzeylerinde kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, katkı malzemesi olarak Hindalco firmasından temin edilen %98 saflığa ve ~4 µm boyuta sahip Al₂O₃ tozu kullanılmıştır. Tablo 3’de Al₂O₃’ün genel özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. Al₂O₃’ün genel özellikleri (Kurt, 2010)

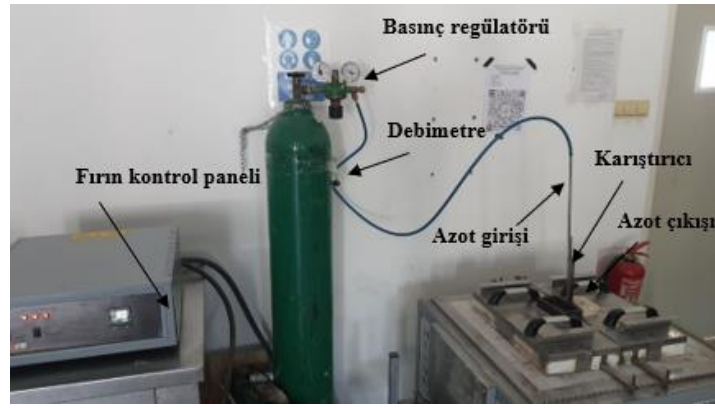
Table 3. General properties of Al₂O₃ (Kurt, 2010)

Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	3.98
Ergime sıcaklığı (°C)	2050
Termal iletkenlik katsayısı (W/(mK))	28
Elastisite modülü (GPa)	~360
Genleşme katsayısı (1/°C)	7-8.8×10 ⁻⁶
Molekül ağırlığı (g/mol)	101.96

2.2. Yöntem

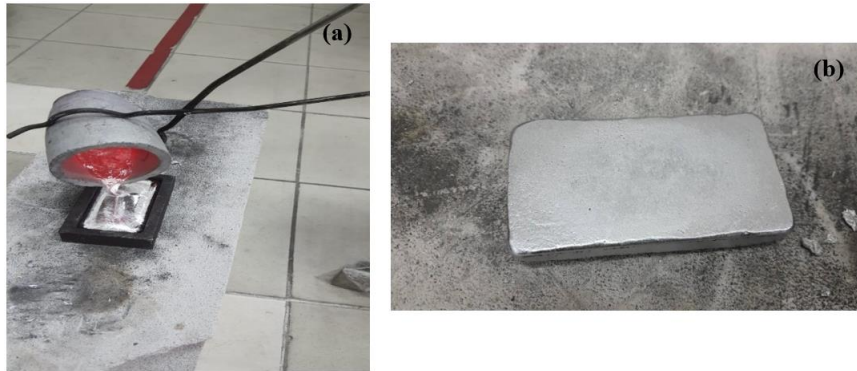
2.2. Method

Al6013-Al₂O₃ kompozitlerin karıştırma döküm yöntemiyle üretilmesi için ilk olarak Al6013 hurdasının ve Al₂O₃ tozlarının Radwag marka maksimum 220 g kapasiteli 1 mg ölçüm hassasiyetine sahip hassas terazide ağırlıkları ölçülmüştür. Al₂O₃'ün alüminyum matriste katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi için topaklanma oluşumlarının önlenmesi gerekmektedir. Al₂O₃ partiküllerdeki bu topaklanma oluşumlarını önlemek için, MTI marka yüksek enerjili bilyalı değirmen kullanılarak tozların karıştırılması sağlanmıştır. Sonrasında Al₂O₃ tozlara 400°C sıcaklıkta ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. Bu sayede döküm sırasında ergiyik içerisinde oluşabilecek segregasyonun (ayrışmanın) da önüne geçilmesi sağlanmaktadır. Fırın içerisine yerleştirilen yüksek sıcaklığa dayanıklı grafit döküm pota içerisinde ergitme işlemi yapılmaktadır. Hurda alüminyum ergitme fırınında ergitildikten sonra ön ısıtma işlemi uygulanan tozlar pota içerisine eklenerek mekanik karıştırıcıyla karıştırılmakta ve bu sayede daha homojen bir dağılım elde edilmektedir. Ergitme işlemi için 1100 °C sıcaklığa kadar çıkabilen Protherm marka ergitme fırını kullanılmıştır. Grafit potayı sabitlemek için yutong tuğla kullanılarak pota, fırın içerisine yerleştirilmiştir. Ergitme işlemi %99 saflığa sahip azot gazı altında yapılmış olup ergitme işleminde kullanılacak fırın ve azot gazı bağlama tertibatı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Ergitme fırını ve azot gazı bağlama tertibatı
Figure 1. Melting furnace and nitrogen gas connecting device

Fırın kapağı kapatıldıktan sonra ön ısıtma uygulanmış grafit pota içerisine hurda Al6013 eklenip ergitme ve karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işlemiyle birlikte azot gazı 0.2 m³/h hacimsel debide ergitilen malzemeye nüfus ettirilmiştir. Böylece oksidasyonun önlenmesi hedeflenmektedir. Karıştırma işleminde vorteks oluşumuna özellikle dikkat edilmiştir. Malzeme 700 °C'de yarı katı halde iken içerisine Al₂O₃ tozları ilave edilmiştir. Ergitme 800°C'de gerçekleştirilip eriyik hale gelen grafit pota içerisindeki karışım, maşa ile alınarak AISI1030 çelik döküm kalıba dökülmüştür (Şekil 2a). Eriyik haldeki malzeme kalıba döküldükten sonra belirli bir süre katılaşması için beklenmiştir. Daha sonra döküm kalıbında bulunan külçe dışarıya çıkartılıp 20 dk kadar soğutulmuştur. Şekil 2b'de karıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzeme külçesi gösterilmektedir.



Şekil 2. Eriyiğin kalıba dökülmesi işlemi (a) ve üretilen kompozit külçe (b)
Figure 2. The process of pouring the melt into the mold (a) and the produced composite ingot (b)

Döküm külçe çekme testleri için $100 \times 10 \times 10$ mm boyutlarında; sertlik ve yoğunluk ölçümü için $10 \times 10 \times 10$ mm boyutlarında kesilerek test numuneleri hazırlanmıştır. Sonrasında kesilen numuneler ani bir çekiç darbesiyle kırılarak mikroyapı incelemeleri için kırık yüzey numuneleri elde edilmiştir. Üretilen numunelerin zımparalanması ve yüzeylerinin parlatılması işlemleri Metkon marka zımparalama ve parlatma cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Öncelikle numune yüzeyindeki oksit tabakayı uzaklaştırmak için ilk olarak zımparalama işlemi yapılmıştır. İşlem sırasında sırasıyla; 100'lük, 600'lük ve 2000'lik SiC su zımparaları kullanılarak 10 dk boyunca numuneler zımparalanmıştır. Ardından alümina parlatma solüsyonu (toz boyutu: $1 \mu\text{m}$) elmas çuha üzerine damlatılarak her bir numunenin yüzeyi 15 dk boyunca parlatılmıştır. Yüzey üzerindeki solüsyon artıkları etil alkol ile temizlendikten sonra numuneler test ve karakterizasyon için hazır hale getirilmiştir.

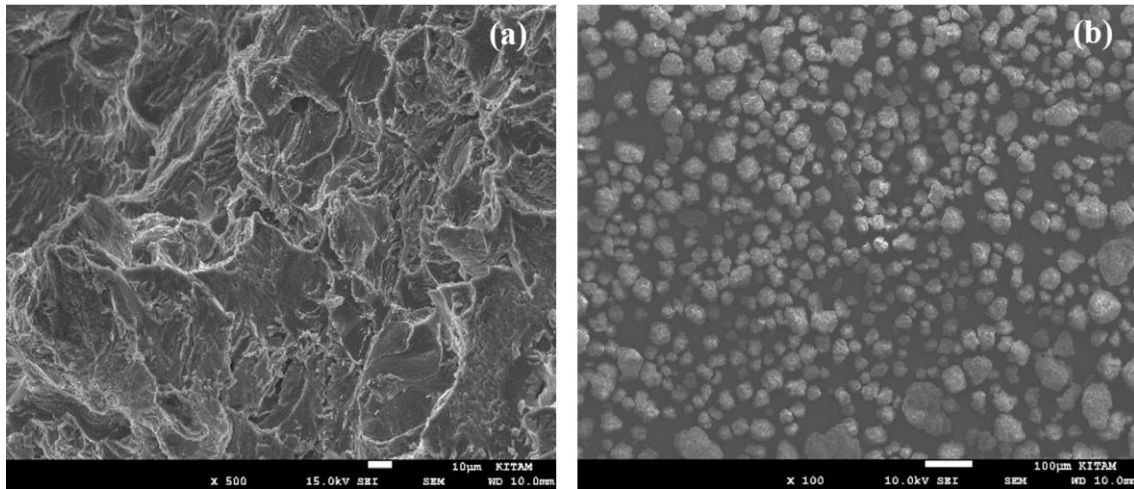
Üretilen numunelerin mekanik davranışını incelemek amacıyla numunelerin yoğunluk ölçümü, sertlik ölçümü ve çekme testi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin deneysel yoğunluğunu bulmak için Arşimet terazisi kullanılmıştır. Her bir seriden en az 5 numunenin yoğunluk ölçümü gerçekleştirilerek ortalama yoğunluk değeri belirlenmiştir. Vickers sertlik ölçümünde ise TmTeck marka mikro Vickers sertlik ölçme cihazından faydalanılmıştır. Test kapsamında ASTM E384 standardına göre numunelere 15 s süresince 1.961 N'luk (200 gf) yük uygulanmıştır. Numune üzerindeki iz mikroskop yardımıyla ölçülmüş ve bu değerler bilgisayara girilerek sertlik değeri belirlenmiştir. Numunenin yüzeyinden rastgele seçilen en az 5 sertlik değerinin ortalaması alınarak numunelerin ortalama sertlik değeri belirlenmiştir. Üretilen numunelerin çekme testi, ASTM E-8 standardına göre 10 ton kapasiteli universal test makinasıyla 3 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin çekme dayanımı değerlerinin tutarlı olması için çekme testleri en az 3 (üç) defa tekrar edilmiştir.

Bu çalışmada, tozların ve numunelerin X-ışını kırınımı (XRD) faz analizleri için Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi'nde bulunan Rigaku Smartlab model XRD cihazından faydalanılmıştır. Kullanılan XRD cihazı $2\theta=20-80^\circ$ tarama açısı aralığına, $2^\circ/\text{dk}$ tarama hızına, 40 kV, 150 mA çalışma koşullarına ve 154 nm dalga boyuna sahiptir. Tozların morfolojisinin ve üretilen numunelerin kırık yüzeylerinin analizi için Jeol JSM7001F model taramalı elektron mikroskobu (SEM) tercih edilmiştir. Numunelerin mikro yapısında yer alan elementlerin dağılımının tespiti için SEM cihazı Enerji Dağılım X-ışını (EDX) spektrometresinden faydalanılmıştır.

3. Bulgular ve tartışma

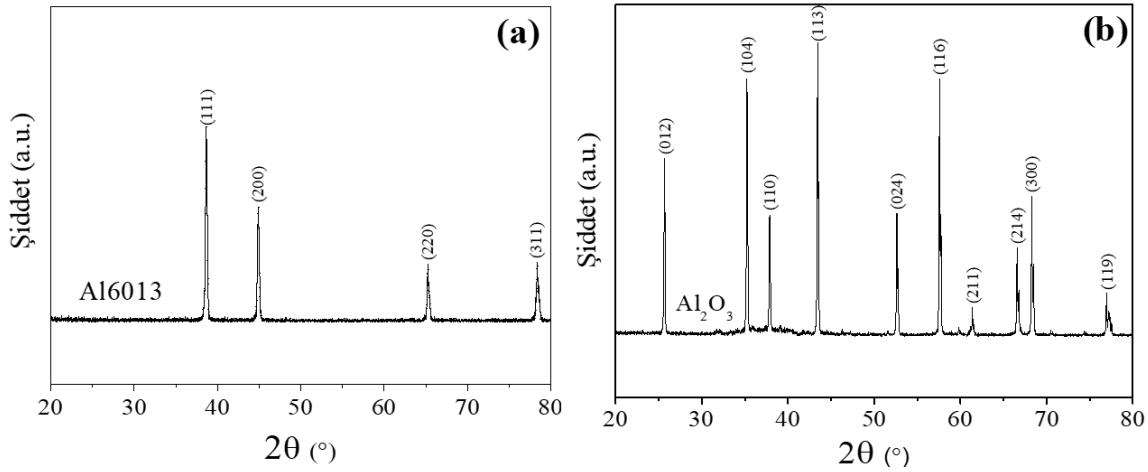
3. Results and discussion

Bu bölümde, hurda Al6013 alaşımı ve Al_2O_3 tozlarının görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Hurda Al6013 alaşımının 500 kat büyütme mikroskop görüntüleri incelendiğinde alüminyum tanelerinin $20 \mu\text{m}$ 'den daha küçük boyutlarda olduğu rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Al_2O_3 tozlarına ait 100 kat büyütme SEM görüntüsünde ise Al_2O_3 'ün küresel morfolojik bir yapıda ve partikül boyutunun $10 \mu\text{m}$ 'den küçük olduğu görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Hurda Al6013 alaşımı (a) ve Al_2O_3 tozlarına ait SEM görüntüleri (b)
Figure 3. SEM images of scrap Al6013 alloy (a) and Al_2O_3 powders (b)

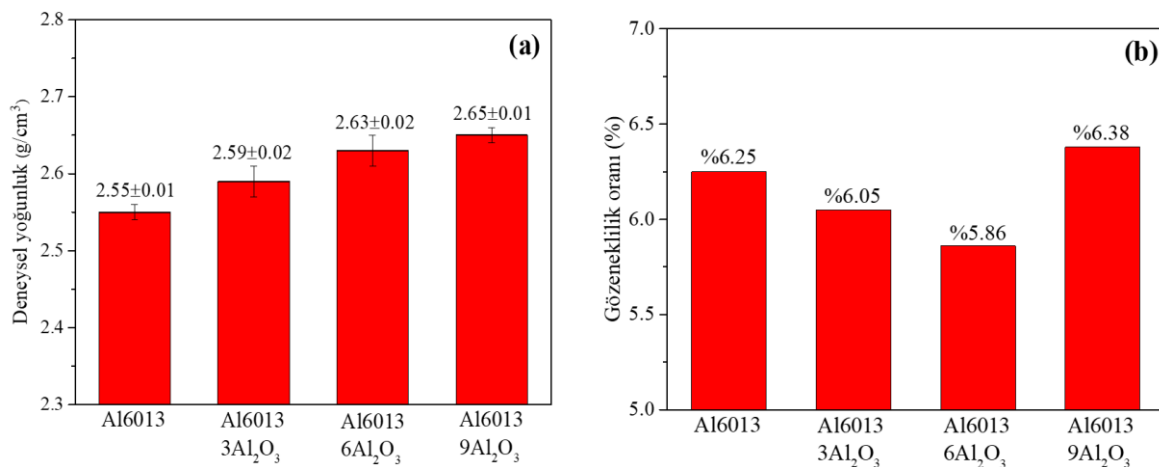
Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan hurda Al6013 alaşımı ve Al_2O_3 tozlarının X-ışını kırınımı (XRD) cihazı kullanılarak faz analizleri yapılmıştır. XRD kırınım desenleri incelendiğinde; Al6013 alaşımına ait kırınım açılarının (2θ) 38° , 45° , 66° , 78° ve Al_2O_3 tozuna ait kırınım açılarının (2θ) 26° , 36° , 38° , 44° , 57° , 63° , 67° , 69° , 78° olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4). Bu analizlerle kompozit yapı içerisinde bulunan alüminyumun ve Al_2O_3 'ün varlığı doğrulanabilmektedir (Şenel & Gürbüz, 2021). Üretilen kompozitlerde ana fazların ve ikincil fazların tespiti açısından bu analizler önem arz etmektedir.



Şekil 4. Hurda Al6013 alaşımına (a) ve Al_2O_3 tozlarına ait XRD kırınım desenleri (b)

Figure 4. XRD patterns of scrap Al6013 alloy (a) and Al_2O_3 powders (b)

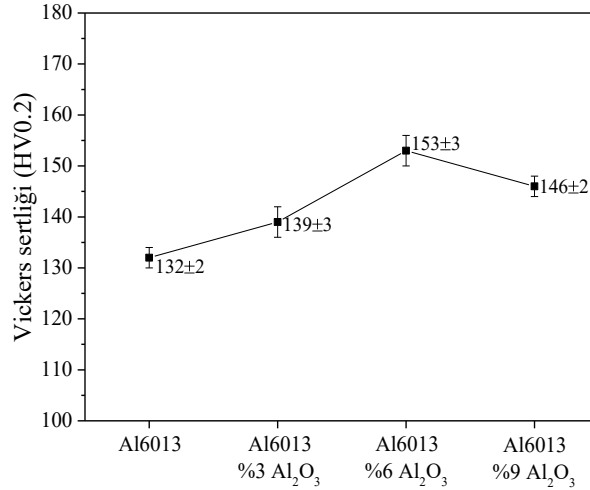
Al_2O_3 takviye oranına göre yoğunluk ve gözeneklilik oranı değişimi Şekil 5’de sunulmuştur. Al_2O_3 takviyesiyle deneysel yoğunluk düzenli olarak artmıştır. Gözeneklilik oranının ağırlıkça %6 Al_2O_3 takviyesine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Takviye oranı ağırlıkça %9’a çıkarıldığında ise gözeneklilik oranının arttığı tespit edilmiş olup bu durum Al_2O_3 ’ün muhtemel topaklanması sebebiyle gerçekleşmiştir. En yüksek yoğunluk Al6013-%9 Al_2O_3 ($2.65 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$) kompozitte ve en düşük yoğunluk ($2.55 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$) Al6013 alaşımında saptanmıştır. Bu durum, Al6013 alaşımına (2.72 g/cm^3) kıyasla Al_2O_3 ’ün (3.98 g/cm^3) yüksek teorik yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. En yüksek gözeneklilik oranı (%6.38) Al6013-%9 Al_2O_3 kompozitte ve en düşük gözeneklilik oranı (%5.86) Al6013-%6 Al_2O_3 kompozitte belirlenmiştir. Ağırlıkça %6 Al_2O_3 katkısına kadar kompozitin gözeneklilik oranının olumlu yönde etkilendiği görülmüştür. Ağırlıkça katkı oranı %6’nın üzerine çıkarıldığında topaklanmanın etkisiyle gözeneklilik oranının arttığı düşünülmektedir. Bu durumu destekleyen literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda matris malzemeye kıyasla partikül boyutu daha küçük bir takviye elemanının matrise eklenmesiyle mikroyapıda yer yer topaklanmaların oluştuğu ve bu topakların gözenekliliği artırarak mekanik özellikleri olumsuz etkilediği rapor edilmektedir (Şenel & Gürbüz, 2021; Işık, 2023; Taşkın, 2023).



Şekil 5. Al6013 alaşımı ve Al6013- Al_2O_3 kompozitlerde Al_2O_3 katkı oranıyla yoğunluk (a) ve gözeneklilik oranı (b) değerleri

Figure 5. Density (a) and porosity ratio (b) values of Al6013 alloy and Al6013- Al_2O_3 composites with Al_2O_3 reinforcement ratio

Al_2O_3 takviye oranına göre Al6013- Al_2O_3 kompozitlerin Vickers sertlik değerleri Şekil 6’da sunulmuştur. En yüksek Vickers sertlik değeri (153 ± 3 HV) Al6013-%6 Al_2O_3 kompozit malzemede tespit edilmiştir. En düşük sertlik değeri Al6013 alaşımında gözlemlenmiştir. Al6013- Al_2O_3 kompozit yapıda Al_2O_3 miktarı ağırlıkça %9’a çıkarıldığında sertlik değerinde (146 ± 2) düşüş meydana gelmiştir. Bu durumun nedeninin, ortalama 3-4 μm tanecik boyutuna sahip Al_2O_3 partiküllerinin matris içerisinde kümelenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sertliğin artışı, matris içerisinde Al_2O_3 ’ün daha homojen bir dağılım sergilemesinden, sert seramik yapısından ve sinterleme etkisiyle matris-takviye elemanı arasındaki arayüzey etkileşiminin daha etkin olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde bu konu üzerine yapılmış çalışmalar da bu durumu desteklemektedir (Demir vd., 2022; Demir vd., 2023; Işık, 2023).



Şekil 6. Al6013 alaşımında ve Al6013- Al_2O_3 kompozitlerde Al_2O_3 katkı oranıyla Vickers sertlik değerleri

Figure 6. Vickers hardness values of Al6013 alloy and Al6013- Al_2O_3 composites with Al_2O_3 reinforcement ratio

Takviye elemanının sertliği üretilen kompozit malzemelerin sertlik değerlerini doğrudan etkilemektedir. Takviye malzemesinin sertlik değerinin kompozitin sertlik değerine etkisi karışım kuralına göre Eşitlik (1)’de verilmiştir (Taşkın, 2023).

$$H_k = H_m f_m + H_r f_r \quad (1)$$

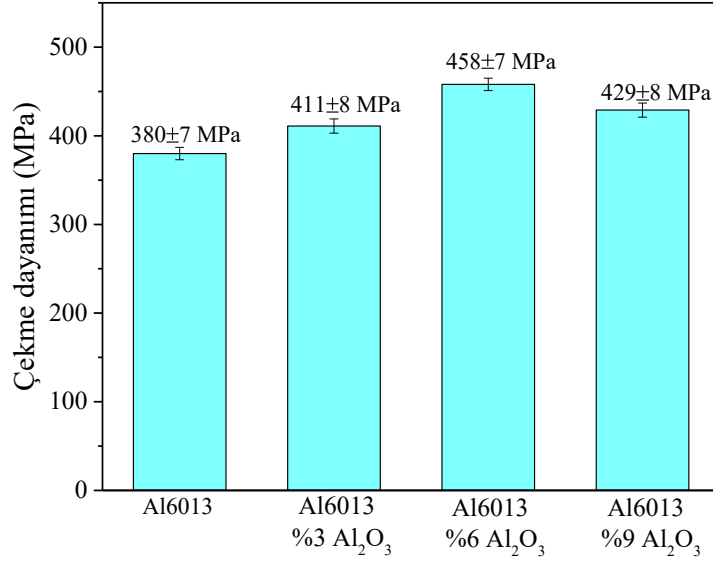
Bu eşitlikte, H_k , H_m , H_r kompozitin, matrisin, takviye elemanın sertliğini, f_m ve f_r matris ve takviye elemanının hacimsel katkı oranını ifade etmektedir.

Alüminyum matrisli kompozitin sertliğini, dislokasyon yoğunluğu mekanizması kontrol etmektedir. Al_2O_3 katkısıyla alüminyum esaslı kompozitin dislokasyon yoğunluğu artmaktadır. Al- Al_2O_3 kompozitlerin dislokasyon yoğunluğunun kareköküyle, Vickers sertliği arasında doğrudan bir ilişki olup Eşitlik (2)’de verilmiştir (Işık, 2023).

$$H = H^* + aGb\sqrt{\rho} \quad (2)$$

Burada, b Burger vektörünü, G kayma modülünü, ρ dislokasyon yoğunluğunu, a ve h ise malzeme sabitlerini ifade etmektedir. Bu eşitlik, dislokasyon yoğunluğuyla malzeme sertliği arasında lineer bir ilişki olduğunu göstermektedir. Dislokasyonların hareketinin zorlaşmasıyla dislokasyon yoğunluğu artmakta ve bu durum da kompozitin sertliğini artırmaktadır.

Şekil 7’de Al6013 alaşımının, Al6013-%3 Al_2O_3 , Al6013-%6 Al_2O_3 ve Al6013-%9 Al_2O_3 kompozitlerin çekme dayanımı verilmiştir. Yapılan testler neticesinde Al6013 alaşımının çekme dayanımı 380 ± 7 MPa iken; %6 Al_2O_3 katkılı alüminyum esaslı kompozitin çekme dayanımı 458 ± 7 MPa’a yükselmiştir. Bu durum, Al_2O_3 partiküllerinin engel bariyeri görerek dislokasyonların hareketini engellemesinden kaynaklanmaktadır. Dislokasyonların hareketinin engellenmesi, dislokasyon yoğunluğunu artırarak kompozit malzemenin dayanımını artırmaktadır. Bu durumu literatürdeki çalışmalar da desteklemektedir (Demir vd., 2022; Demir vd., 2023).

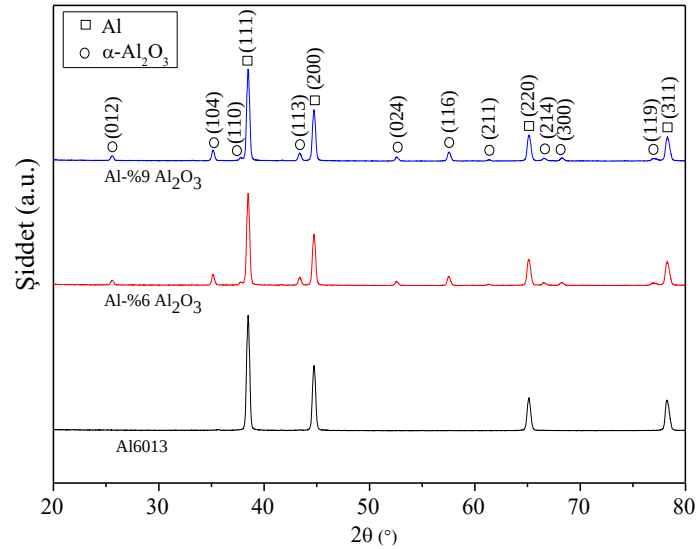


Şekil 7. Al6013 alaşımı ve Al6013-Al₂O₃ kompozitlere ait çekme dayanımı değerleri
Figure 7. Tensile strength values of Al6013 alloy and Al6013-Al₂O₃ composites

Tane sınırında bulunan takviye elemanları hem tane büyümesine engellemekte hem de dislokasyonlar için engel teşkil ederek mukavemette artış sağlamaktadır. Eşitlik (3)'de verilen Hall Petch denkleminde görüldüğü üzere tane boyutunun küçülmesi akma dayanımını (σ_A) artırmaktadır. Eşitlikteki d partikül boyutu, σ_A akma dayanımı ve K ise malzeme sabitidir. Bu eşitlik, daha küçük tane boyutlu bir katkı elemanının (Al₂O₃ gibi) matrise eklenmesinin kompozitin akma dayanımının artacağını ifade etmektedir (Işık, 2023).

$$\sigma_A = K \cdot d^{-1/2} \quad (3)$$

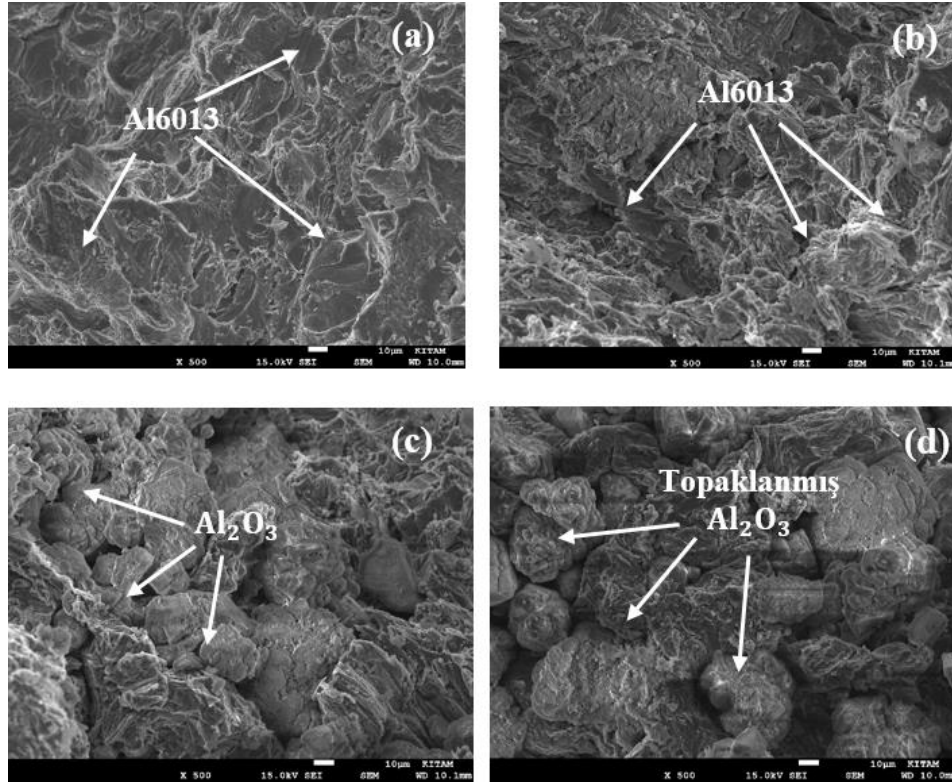
Karıştırma döküm yöntemi ile üretilen kompozitlerin faz yapısının tespiti için XRD analizi yapılmıştır. Al6013 alaşımı ve Al6013-Al₂O₃ kompozitlerin XRD pikleri Şekil 8'de sunulmuştur. XRD deseni incelendiğinde; kompozitlerde Al₂O₃ ve alüminyum piklerine rastlanmıştır. Bu durum da mikro yapıda alüminyumun ve Al₂O₃'ün varlığını doğrulamaktadır.



Şekil 8. Al6013 alaşımına ve Al6013-Al₂O₃ kompozitlere ait XRD desenleri
Figure 8. XRD patterns of Al6013 alloy and Al6013-Al₂O₃ composites

Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen Al6013 matrisli kompozitlerin mikro yapılarını incelemek amacıyla kırık yüzey SEM analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 9). Al6013-%3Al₂O₃ ve Al6013-%6Al₂O₃ kompozitlere ait SEM görüntüleri incelendiğinde, kompozit yapı içerisindeki Al₂O₃ partiküllerinin tane sınırlarına yerleşerek

homojene yakın bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Ağırlıkça %9Al₂O₃ takviyesi içeren kompozit malzemede ise Al₂O₃ taneciklerinde topaklanmaların meydana geldiği ve bu topaklanmaların etkisiyle mikroyapıda gözeneklerin oluştuğu belirlenmiştir. Bunun sonucunda üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin bozulduğu öngörülmektedir.



Şekil 9. Al6013 alaşımına (a), Al6013-%3Al₂O₃ (b), Al6013-%6Al₂O₃ (c) ve Al6013-%9Al₂O₃ kompozitlere (d) ait kırık yüzey SEM görüntüleri

Figure 9. Fracture surface SEM images of Al6013 alloy (a), Al6013-%3Al₂O₃ (b), Al6013-%6Al₂O₃ (c) and Al6013-%9Al₂O₃ composites (d)

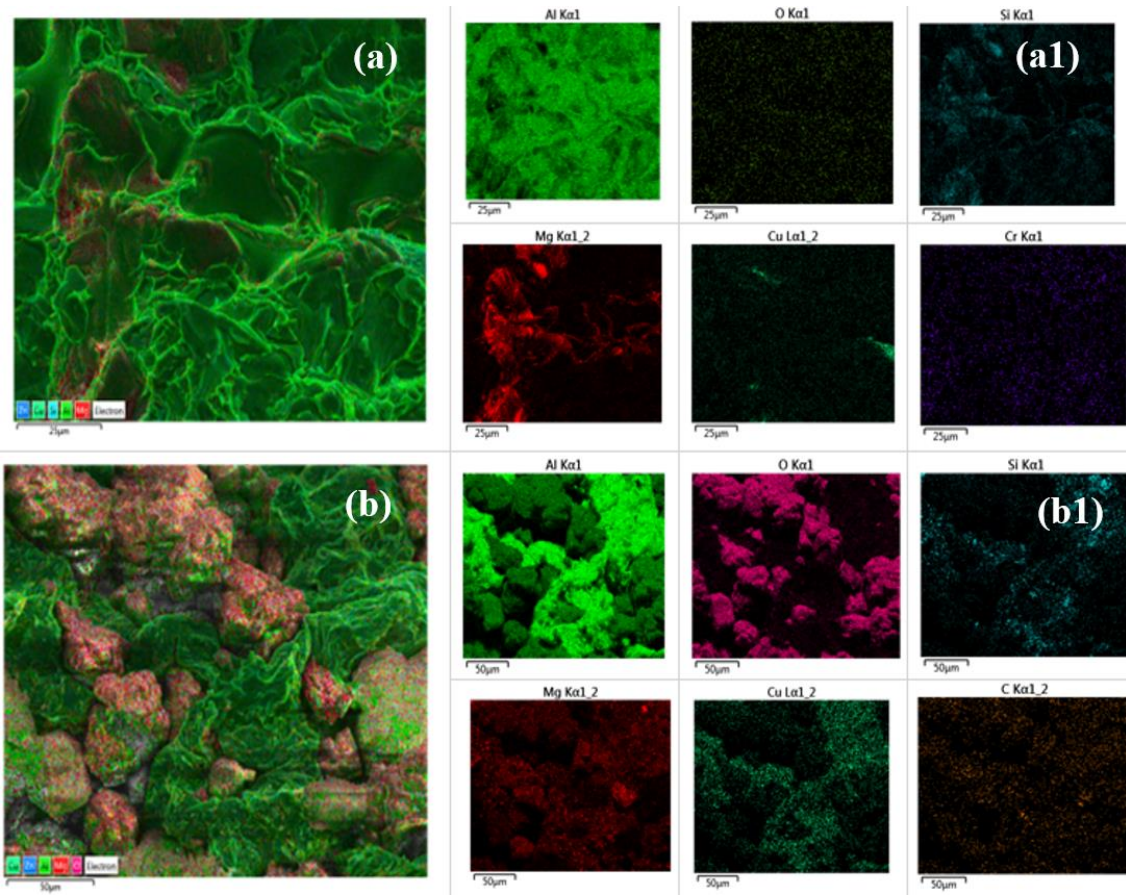
Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen Al6013 alaşımına ve Al6013-%9Al₂O₃ kompozit malzemesine ait element dağılım haritası ve SEM-EDX görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir. SEM-EDX analizlerinde her bir element farklı renk ile gösterilmiştir. SEM-EDX analizinde Al (yeşil dağılımlı), C (turuncu dağılımlı), Mg (kırmızı dağılımlı), O (pembe dağılımlı) ve Si (turkuaz dağılımlı) elementleri yapı içerisinde görülmektedir. Oksijen elementi iç yapıdaki oksit tabakanın varlığını ifade etmektedir. Al6013-%9Al₂O₃ kompozitin SEM-EDX element haritasından Al₂O₃'ün topaklandığı görülmektedir. Bu da mekanik özelliklerde bozulmalara sebep olmaktadır.

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Yürütülen çalışmada, Al6013 alüminyum matrise ağırlıkça %3, 6, 9 oranlarında Al₂O₃ takviyesi yapılarak azot gazı altında karıştırma döküm yöntemi kullanılarak malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen numunelerin gözenekliliği, yoğunluğu, sertliği, çekme dayanımı ve mikroyapısı incelenerek ulaşılan sonuçlar aşağıda özet halinde verilmiştir:

- En yüksek yoğunluk değeri (2.65 g/cm³) Al6013-%9Al₂O₃ kompozitte ve en düşük gözeneklilik oranı (%5.86) Al6013-%6Al₂O₃ kompozitte belirlenmiştir. Ağırlıkça %6'ya kadar Al₂O₃ katkısının kompozitin hem yoğunluk ve hem de gözeneklilik oranını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Buna karşın ağırlıkça %9Al₂O₃ takviyesinde üretilen numuneler içerisinde en yüksek gözeneklilik oranı elde edilmiştir. Bu durumun Al₂O₃ partiküllerin muhtemel topaklanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 10. Karıştırma döküm yöntemi ile üretilen Al6013 alaşımının SEM-EDX görüntüsü (a), element dağılım görüntüleri (a1) ve Al6013-%9Al₂O₃ kompozitin SEM-EDX görüntüsü (b), element dağılım görüntüleri (b1)
Figure 10. SEM-EDX picture (a), element distribution pictures (a1) of Al6013 alloy produced by stir casting method and SEM-EDX picture (b), element distribution pictures (b1) of Al6013-9%Al₂O₃ composite

- En yüksek Vickers sertlik değeri (153 ± 3 HV) ve çekme dayanımı (458 ± 7 MPa) Al6013-%6Al₂O₃ kompozit malzemede tespit edilmiştir. En düşük sertlik değeri (132 ± 2 HV) Al6013 alaşımında gözlemlenmiştir. Al6013 alaşımına kıyasla Al6013-%6Al₂O₃ kompozit yapıda sertliğin %16 oranında arttığı tespit edilmiştir. Al₂O₃ miktarı ağırlıkça %9'a çıkarıldığında sertlik değerinde (146 ± 2 HV) düşüş meydana gelmiştir. Bu durum, ortalama 3-4 µm tanecik boyutuna sahip Al₂O₃ partiküllerinin kümelenmesinden kaynaklandığı öngörülmektedir.
- XRD kırınım desenleri incelendiğinde; Al6013-Al₂O₃ kompozitlerinde alüminyum ve Al₂O₃ piklerine rastlanmıştır. Bu durum da mikro yapıda alüminyumun ve Al₂O₃'ün varlığını doğrulamaktadır.
- SEM analizlerinde, Al₂O₃ partiküllerinin Al6013-%3Al₂O₃ ve Al6013-%6Al₂O₃ kompozit yapılar da homojene yakın dağıldığı görülmüştür. Ancak SEM-EDX görüntüsünden de anlaşılabileceği üzere Al6013-%9Al₂O₃ kompozit yapıda Al₂O₃ partiküllerinin topaklandığı tespit edilmiştir.
- Yapılan ölçüm ve analizler sonucunda Al6013 alaşımın mekanik özelliklerini iyileştirmede Al₂O₃'ün iyi bir takviye elemanı olduğu görülmüştür. Ayrıca azot gazı altında karıştırma döküm yöntemiyle üretilen Al6013-Al₂O₃ kompozitlerde en uygun Al₂O₃ takviye oranı ağırlıkça %6 olarak belirlenmiştir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışmada, SEM ve XRD analizi konusunda vermiş olduğu destekten dolayı Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne (KİTAM) teşekkür ederiz. Yürütülen çalışma PYO.MUH.1901.22.008 kodlu proje ile Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından desteklenmiştir. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederiz.

Yazar katkısı*Author contribution*

Mahmut Can Şenel: Mikroyapı analizi, faz analizi ve eleştirel inceleme kapsamında katkı sunmuştur.
Tolgahan Arapoğlu: Literatür taraması ve mekanik testlerin yürütülmesi alanında katkı sunmuştur.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Alaneme, K. K., & Bodunrin, M. O. (2013). Mechanical behaviour of alumina reinforced AA 6063 metal matrix composites developed by two step-stir casting process. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, 6(3), 105- 110.
- Altunpak, Y., & Akbulut, H. (2019). δ - Al_2O_3 kısa fiber takviyeli LM 13 alüminyum alaşımının eğilme dayanımına yaşlandırma ısı işleminin etkisi. *ECJSE*, 6(1), 175-180. <https://doi.org/10.31202/ecjse.463790>
- Arık, H., Semerci, P., & Kırmızı, G. (2017). Sıcak presleme ile alüminyum matrisli ve Al_2O_3 takviyeli toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışlarının araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(4), 87-97. <https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.343115>
- Aytekin, S. (2021). *Al_2O_3 nano partikül takviyeli al matrisli kompozit malzemenin farklı kaynak akımları ve türlerinde oluşan mikroyapı ve sertlik özelliklerinin analizi* [Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Bajaj, P. (2011). *Mechanical behaviour of aluminium based metal matrix composites reinforced with SiC and alumina* [Yüksek Lisans Tezi, Thapar University, Üretim ve Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı].
- Çanakçı, A. (2006). AA2024 matrisli B_4C parçacık takviyeli kompozitlerin vorteks yöntemiyle üretimi ve özelliklerinin incelenmesi [Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Demir, M. (2022). *İndüksiyonla sıcak işlemin grafen ve/veya Si_3N_4/B_4C takviyeli Al6061 esaslı kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerine ve mikroyapısına olan etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Demir, M. E., Çelik, Y. H., & Kalkanlı, A. (2022). The effect of rolling and aging on mechanical and tribological properties in B_4C particle reinforced Al7075 matrix composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 16187-16208. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06891-6>
- Demir, M. E., Çelik, Y. H., Kilickap, E., & Kalkanlı, A. (2023). The effect of B_4C reinforcements on the microstructure, mechanical properties, and wear behavior of AA7075 alloy matrix produced by squeeze casting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237(6), 2574-2584. <https://doi.org/10.1177/09544089221139095>
- Devaraju, A., Kumar, A., & Kotiveerachari, B. (2013). Influence of addition of GMP/ Al_2O_3 with SiC_p on wear properties of aluminum alloy 6061-T6 hybrid composites via friction stir processing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 1275-1280. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62593-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62593-5)
- Işık, E. (2023). *Al7075- Al_2O_3 -grafen ve Al7075- ZrO_2 -grafen hibrit kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerinin ve mikroyapısının incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

- Kaya, A.İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite*, 38-45.
- Koçdağ, N. (2019). *6013 alüminyum alaşımının özelliklerine ısıtılma işlem ve deformasyon parametrelerinin etkileri* [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Kurt, H. (2010). *Al-Al₂O₃ kompozit malzeme üretiminde karıştırma tekniğinin kompozitin aşınma davranışı üzerine etkilerinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Şahin, Y. (2015). *Kompozit malzemelere giriş*. Seçkin Yayıncılık.
- Şenel, M. C. (2018). *Grafen-seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin toz metalürjisi metoduyla üretimi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi* [Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Şenel, M. C. (2020). Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen saf Al ve Al-B₄C, Al-Al₂O₃ kompozitlerin mekanik ve mikroyapı özelliklerinin karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 783-795. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.689359>
- Şenel, M. C., & Gürbüz, M. (2021). Investigation on mechanical properties and microstructures of aluminum hybrid composites reinforced with Al₂O₃/GNPs binary particles. *Archives of Metallurgy and Materials*, 66(1), 97-106. <https://doi.org/10.24425/amm.2021.134764>
- Şimşek, İ. (2019). Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen farklı miktarlarda ZrO₂ takviyeli Al-2Gr matrisli kompozit malzemelerin aşınma performanslarının incelenmesi. *ECJSE*, 6(3), 594-605. <https://doi.org/10.31202/ecjse.560741>
- Taşkın, A. (2023). *Al7075-Si₃N₄-grafen ve Al7075-B₄C-grafen hibrit kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Üstün, M. (2022). *Al-ZrO₂-grafen ve Al-SiO₂-grafen hibrit kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerinin ve mikroyapısının incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Verma, R., Sharma, S., & Kumar, D. (2017). Analysis of mechanical properties of aluminium based metal matrix composites reinforced with alumina and SiC. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6(3), 454-459.