

Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Sinterleme Sıcaklığının Kompozitlerin Yoğunluğuna, Gözenekliliğine, Sertliğine ve Mikroyapısına Olan Etkisinin İncelenmesi

Mahmut Can Şenel^{1*}, Mevlüt Gürbüz ve Erdem Koç¹

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

*Sorumlu Yazar: mahmutcan.senel@omu.edu.tr

+Konuşmacı : mahmutcan.senel@omu.edu.tr

Sunum Türü/Bildiri Türü: Sözlü/Tam Metin

Özet–Bu çalışmada, saf alüminyum ve ağırlıkça %0.1, %0.3 ve %0.5 oranında grafen nanotabaka (GNT) katkı alüminyum

(Al) matrisli kompozitler farklı sinterleme sıcaklıklarında ($T_S=550, 600, 630$ °C) toz metalurjisi metoduyla üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin deneysel yoğunluğu ve gözenekliliği Arşiment yoğunluk ölçüm kitiyle, Vickers sertliği mikro Vickers sertlik ölçme cihazıyla ve mikroyapısı taramalı elektron mikroskopuyla analiz edilmiştir. Test sonuçlarına göre; en iyi deneysel yoğunluk (2.52 g/cm³), gözeneklilik oranı (%6.7), Vickers sertliği (57 ± 2 HV) $T_S=630$ °C sinterleme sıcaklığında ve Al-%0.1GNT kompozit yapıda elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler–Alüminyum, grafen, yoğunluk, gözeneklilik, sertlik, mikroyapı

Abstract–In this study, pure aluminum and graphene nanoplatelets (GNPs) reinforced aluminum (Al) matrix composites with various graphene ratio (0.1, 0.3 and 0.5wt.%) and different sintering temperatures ($T_S=550, 600, 630$ °C) were fabricated by powder metallurgy method. Experimental density and porosity of the composites were performed by Archimedes' density meter kit. Also, Vickers hardness and microstructure of the composites were determined by micro Vickers hardness tester and scanning electron microscope, respectively. Test results showed that the best experimental density (2.52 g/cm³) and porosity (%6.7), and Vickers hardness (57 ± 2 HV) were obtained at the sintering temperature ($T_S=630$ °C) and Al-0.1%GNPs composite.

Keywords – Aluminum, graphene, density, porosity, hardness, microstructure

I. GİRİŞ

Günümüzde artan sanayileşmeyle birlikte malzemelerden istenen mekanik, ısı, elektriksel vb. özellikler giderek artmaktadır. Bu talebin karşılanması için kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin üstün özelliklerini tek bir malzemede toplamak amacıyla geliştirilen yeni bir malzeme grubudur [1]. Kompozit malzemeler; polimer, seramik veya metal matrisli kompozitler şeklinde sınıflandırılabilir. Metal matrisli kompozitler, metal veya metal alaşımından meydana gelen bir matris elemanı ile tanecik haldeki takviye elemanın karışımından oluşmaktadır. Bu kompozit yapılarda, matris malzeme olarak alüminyum, bakır, demir, magnezyum, titanyum ve alaşımları sıklıkla tercih edilmektedir. Tanecik takviye elemanı olarak ise; metal nitürler (Si_3N_4, TaN, ZrN, TiN), metal karbürler (B_4C, SiC, TaC, WC), metal oksitler ($Al_2O_3, ZrO_2, ThO_2, SiO_2$), metal borürler (TaB_2, ZrB_2, TiB_2, WB) ve karbon esaslı malzemeler (grafen nanotabaka (GNT), karbon nanotüp vb.) kullanılmaktadır [2]. Bu çalışmada, matris malzeme olarak alüminyum tozu ve takviye elemanı olarak grafen nanotabaka (GNT) tozu kullanılmıştır.

Alüminyumun günümüzde yoğun bir şekilde kullanılmasında, sahip olduğu yüksek korozyon direnci, iyi elektrik ve ısı iletkenliği ve kolay şekillendirilebilme gibi özellikler oldukça etkilidir. Günümüzde alüminyum ve

alaşımları, inşaat sanayi, otomotiv sanayi ile havacılık ve uzay sanayinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [3]. Takviye elemanı olarak kullanılan grafen, yaklaşık bir atom kalınlığında, elektrik, mekanik, termal ve optik özellikleri yeni keşfedilmiş bir karbon allotropudur. Karbon elementinin bal peteği örgülü yapıları olan grafen, iki boyutlu sp^2 bağlı karbon atomlarının hegzagonal latiste bir araya gelmesiyle oluşmuş tek tabakalı yapılardır. İdeal tek tabakalı grafenin yaklaşık yüzey alanı 2600 m²/g, kalınlığı $1-2$ nm, termal iletkenliği $4840-5300$ W/(m²K), teorik yoğunluğu 2.25 g/cm³ ve elastisite modülü 1 TPa'dır [4, 5].

Grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Li ve ark. [6] çalışmasında, nano yapılı Al-GNT kompozitlerin çekme dayanımını araştırmışlardır. Ağırlıkça %1 oranına kadar yapılan GNT katkılarında çekme dayanımının arttığı, %1'in üzerindeki GNT takviyesinde ise GNT'nin topaklanması sebebiyle, Al-GNT kompozitin çekme dayanımının düştüğü belirlenmiştir. Wang ve ark. [7] yürüttükleri çalışmada, toz metalurjisi metoduyla GNT katkı alüminyum matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Saf alüminyuma, ağırlıkça %0.3 oranında grafen katkısıyla alüminyum kompozitin çekme dayanımı %62 oranında artmıştır. Liu vd. [8] çalışmalarında, grafen oksit ve grafen takviyeli alüminyum matrisli

kompozitlerin mekanik özelliklerini (yoğunluk, sertlik vb.) incelemiştir. Saf alüminyuma (Al) göre ağırlıkça %0.3 grafen oksit katkılı alüminyum esaslı kompozitin sertliğinin %32, ağırlıkça %0.15 grafen katkılı alüminyum esaslı kompozitin sertliğinin %43 oranında arttığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, saf alüminyum ve ağırlıkça %0.1, 0.3, 0.5 oranında grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitler toz metalurjisi metoduyla üretilmiştir. Üretilen kompozitlerde sinterleme sıcaklığının; deneysel yoğunluğa, gözenekliliğe, Vickers sertliğine ve mikroyapıya olan etkisi incelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

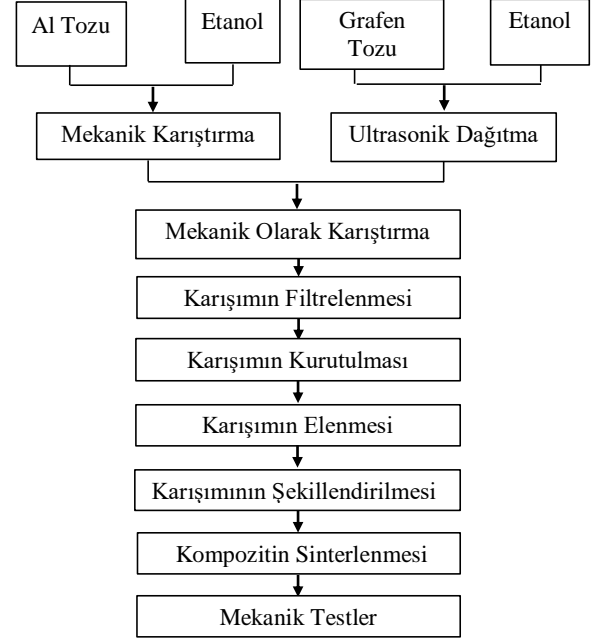
A. Materyal

Bu çalışmada matris malzeme olarak 7-15 µm boyut aralığında ve %99 saflıkta alüminyum tozu kullanılmıştır. Saf alüminyum, oda sıcaklığında yüzey merkezli kübik yapıda olup yoğunluğu 2.7 g/cm³, ergime sıcaklığı 660.37 °C, elastisite modülü 68.3 GPa, çekme dayanımı yaklaşık 80 MPa ve sertliği yaklaşık 28 HV'dir [9]. Takviye elemanı olarak ise grafen tozu kullanılmıştır. Grafen tozu, 120-150 m²/g yüzey alanına sahip olup 5-8 nm kalınlıkta, ve 5 µm çapındadır [10].

B. Metot

Grafen nanotabaka (GNT) takviyeli alüminyum matrisli kompozitler toz metalurjisi metoduyla üretilmiş olup kompozitlerin üretim aşamaları; ultrasonik dağıtma, mekanik karıştırma, öğütme, filtreleme, kurutma, eleme, presleme, sinterleme ve karakterizasyon şeklinde sıralanmaktadır (Şekil 1). İlk olarak alüminyum tozu etanol içerisinde mekanik olarak karıştırılır. Aynı zamanda grafen tozları, etanol içerisinde 0.1 A şiddetinde ultrasonik olarak dağıtılır. Daha sonra, grafen-etanol çözeltisi, damla damla Al-etanol çözeltisine eklenerek mekanik olarak karıştırılır. Karışım içerisinde etanolü uzaklaştırmak için karışım filtrelenip etüvde vakum altında 50°C sıcaklıkta bir gece boyunca kurutma işlemine tabi tutulur. Kurutma sonrası karışım 200 µm'lik elekte elenerek 600 MPa basınç altında tek eksenli preste şekillendirilir. Şekillendirilen ham numuneler, 630 °C sıcaklıkta ve 180 dk süresince vakuma alınabilen tüp fırında sinterlenir. Sinterleme çalışmaları Protherm PTF 12/50/450 tüp fırında gerçekleştirilmiştir.

Üretilen kompozitlerin deneysel yoğunluk ölçümü Arşimet yoğunluk ölçüm kitiyle ve sertlik ölçümü Vickers sertlik ölçme cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Vickers sertlik değeri, 200 gf yük altında, 15 s süresince ve en az 5 adet sertlik verisinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Kompozitlerin morfoloji ve mikroyapı analizleri, Jeol JSM 7001F model taramalı elektron mikroskopuyla; tozların ve üretilen kompozitlerin faz analizi ise Rigaku Smartlab model x-ışını kırınımı cihazıyla gerçekleştirilmiştir.

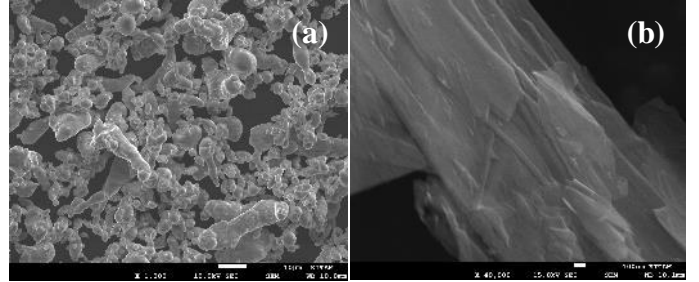


Şekil 1. Al-GNT kompozit malzeme üretim şeması

III. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

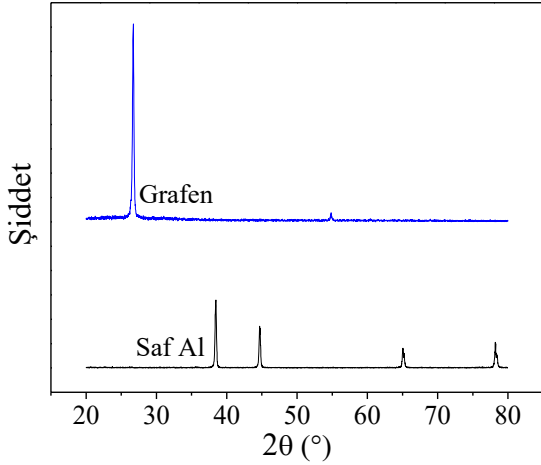
A. Tozların Karakterizasyonu

Bu çalışmada, saf alüminyum tozu matris malzeme, grafen tozu ise takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Alüminyum ve grafen tozlarına ait taramalı elektron mikroskopu görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. Şekilden, alüminyum tozlarının süngerimsi bir morfolojide olduğu görülmüştür. Al tozlarının ortalama tanecik boyutunun 10 µm olduğu tespit edilmiştir. Grafenin, x40000 büyütme görüntüsünden ise taneciklerin tabakalı ve plakamsı bir yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Saf Al (a) ve grafene (b) ait taramalı elektron mikroskopu görüntüleri

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan tozlara ait faz analizi, x-ışını kırınımı cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Grafen tozuna ait kırınım açısının $2\theta=26.5^\circ$ ve saf alüminyum tozuna ait kırınım açılarının $2\theta=38^\circ, 44^\circ, 65^\circ, 78^\circ$ olduğu görülmüştür (Şekil 3). Tozların faz analizi, sinterleme sonrası oluşabilecek ikincil fazların belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Saf alüminyum ve grafen tozlarına ait XRD faz analizi

B. Yoğunluk ve Gözeneklilik Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde, üretilen saf alüminyum ve Al-GNT kompozitlerde; sinterleme sıcaklığının (500, 550, 600 °C) ve grafen katkı oranının (ağırlıkça %0.1, 0.3, 0.5), teorik/deneysel yoğunluğa ve gözeneklilik oranına olan etkisi incelenmiştir.

Üretilen silindirik kompozit malzemelerin teorik yoğunlukları (ρ_T) Eşitlik (1)'den faydalanılarak belirlenmektedir.

$$\rho_T = m/V \quad (1)$$

Bu eşitlikte, m numunenin kütlesi (g), V silindirik numunenin hacmi (cm^3) olup $V=(\pi d^2 x L)/4$ formülüyle ifade edilebilmektedir. Kompozit numunelerin %teorik bağıl (kısmî) yoğunluğu ($\% \rho_T$) ise;

$$\% \rho_T = (\rho_T / \rho_K) \times 100 \quad (2)$$

şeklinde. Burada ρ_K toz karışımının yoğunluğu olup karıştırılan tozların ağırlıkça karışım oranlarına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin ağırlıkça %0.1 oranında grafen katkılı alüminyum matrisli kompozit üretildiğinde karışımın teorik yoğunluğu (ρ_K) aşağıdaki formül kullanılarak belirlenebilmektedir.

$$\rho_K = (0.999 \times \rho_{Al}) + (0.001 \times \rho_G) \quad (3)$$

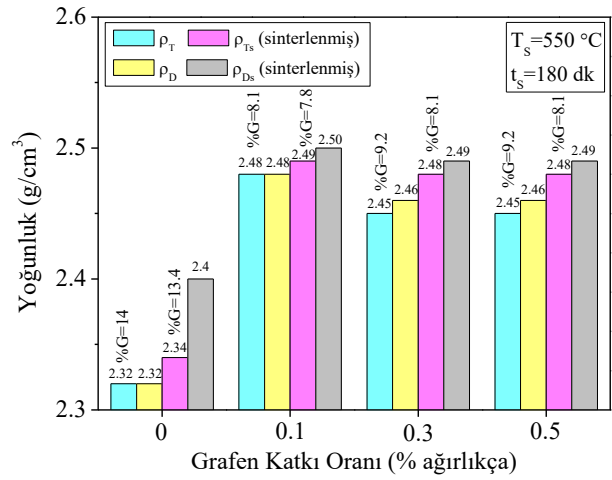
Toz metalurjisiyle üretilen parçalarda en önemli parametrelerden biri gözeneklilik oranı olup bu oran ile mekanik özellikler arasında doğrudan bir ilişki söz konusudur. Kompozit malzemelerde gözeneklilik oranı (%G);

$$\%G = (1 - \rho_T / \rho_K) \times 100 \quad (4)$$

Üretilen Al-GNT kompozitlerin deneysel yoğunluğu (ρ_D), Arşimet yoğunluk ölçüm cihazından faydalanılarak belirlenmektedir. Deneysel yoğunluk (ρ_D), Eşitlik (5)'de verilmiş olup kompozitlerin su içerisinde ölçülen asılı kütlesi (m_A), kuru kütlesi (m_K) ve sıvı içerisindeki suya doymuş kütlesi (m_D) belirlenerek hesaplanmaktadır [2].

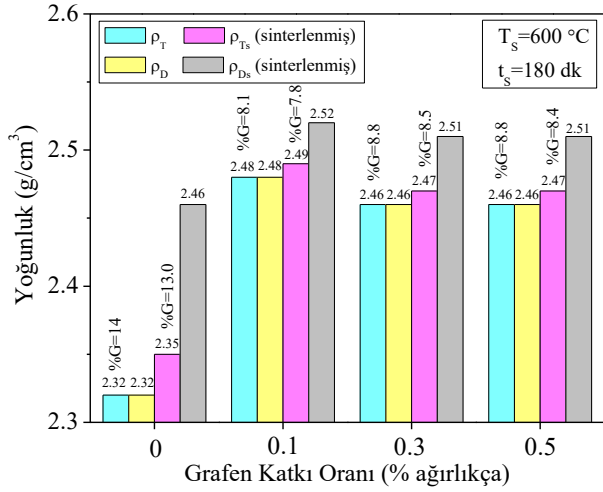
$$\rho_D = m_K / (m_D - m_A) \quad (5)$$

Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde, sinterleme süresi ($t_s=180$ dk) sabit tutularak $T_s=550, 600, 630$ °C sinterleme sıcaklıkları grafen katkı oranıyla sinterleme öncesi ve sonrası, teorik/deneysel yoğunluğun ve gözeneklilik oranının (%G) değişimi incelenmiştir. $T_s=550$ °C ve $t_s=180$ dk sinterleme koşullarında grafen katkı oranıyla yoğunluk ve gözeneklilik oranındaki değişim Şekil 4'de verilmiştir. Ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde kompozitin deneysel ham yoğunluğu (ρ_D) 2.48 g/cm^3 iken; sinterleme sonrası deneysel yoğunluk (ρ_{Ds}) 2.50 g/cm^3 'e yükselmiştir. Sinterlenmiş numunelerin yoğunluklarının, ham numunelerin yoğunluklarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Özellikle ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde yoğunluk değerlerinde, saf alüminyuma göre %4-6 oranında artış tespit edilmiştir. Benzer şekilde aynı katkı oranında en düşük gözeneklilik oranına (%7.8) ulaşılmıştır. Bu durum, kompozit yapıdaki grafen taneciklerin gözenekleri doldurmasından kaynaklanmaktadır.



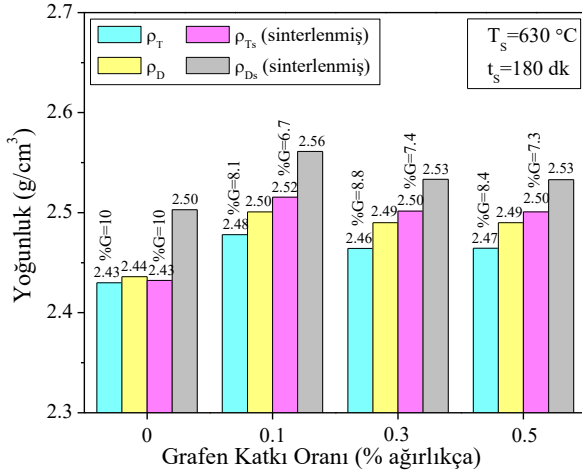
Şekil 4. Ham ve sinterlenmiş numunelerde $T_s=550$ °C, $t_s=180$ dk için grafen katkı oranıyla yoğunluğun ve gözenekliliğin değişimi

Üretilen ham ve sinterlenmiş numunelerde $T_s=600$ °C ve $t_s=180$ dk için grafen katkı oranıyla yoğunluk ve gözeneklilik oranındaki (%G) değişim Şekil 5'de verilmiştir. Tüm grafen katkı oranlarında sinterlenmemiş numunelerin teorik ve deneysel yoğunluklarının birbirine eşit olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça %0.1 grafen katkılı sinterlenmemiş ham kompozitin deneysel yoğunluğu (ρ_D) 2.48 g/cm^3 iken; aynı katkı oranında sinterlenmiş kompozitin deneysel yoğunluğu (ρ_{Ds}) 2.52 g/cm^3 'e kadar yükselmiştir. Sinterlemenin etkisiyle yoğunluğun arttığı, gözeneklilik oranının azaldığı tespit edilmiştir. Belirtilen sinterleme koşullarında ($T_s=600$ °C ve $t_s=180$ dk), en düşük gözeneklilik oranına (%7.8) ve en yüksek deneysel yoğunluğa (2.52 g/cm^3) Al-%0.1GNT kompozit yapıda ulaşılmıştır.



Şekil 5. Ham ve sinterlenmiş numunelerde $T_s=600$ °C ve $t_s=180$ dk için grafen katkı oranıyla yoğunluğun ve gözenekliliğin değişimi

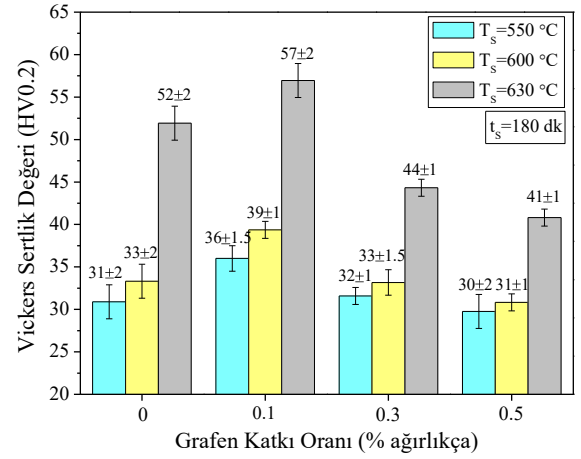
Ham ve sinterlenmiş numunelerde $T_s=630$ °C ve $t_s=180$ dk için grafen takviye oranıyla alüminyum matrisli kompozitlerin yoğunluğundaki ve gözeneklilik oranındaki değişim Şekil 6'da verilmiştir. Sinterlenmiş numunelerin yoğunluğunun, sinterlenmemiş numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. En düşük gözeneklilik oranı (%6.7), %0.1 grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozit yapıda elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığındaki artış, kompozitlerin yoğunluğunu artırırken gözeneklilik oranını düşürmüştür. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde düşük gözeneklilik oranı, yüksek mekanik özellikleri ifade etmektedir.



Şekil 6. Ham ve sinterlenmiş numunelerde $T_s=630$ °C ve $t_s=180$ dk için grafen katkı oranıyla yoğunluğun ve gözenekliliğin değişimi

C. Sertlik Ölçüm Sonuçları

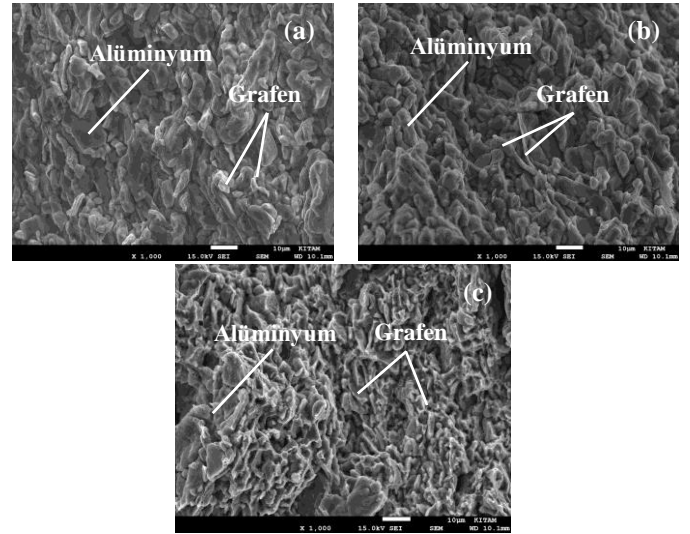
Farklı sinterleme sıcaklıkları (550, 600, 630°C) ve belirli bir sinterleme süresi ($t_s=180$ dk) için grafen katkı oranıyla Al matrisli kompozitlerin Vickers sertliğindeki (HV0.2) değişim Şekil 7'de verilmiştir. En yüksek sertlik değerine $T_s=630$ °C sinterleme sıcaklığında ve ağırlıkça %0.1 grafen katkısında ulaşılmıştır. $T_s=630$ °C, üretilen grafen katkılı alüminyum matrisli kompozitler için en uygun sinterleme sıcaklığı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 7. Farklı sinterleme sıcaklıkları için grafen katkı oranıyla ortalama Vickers yüzey sertliğinin değişimi

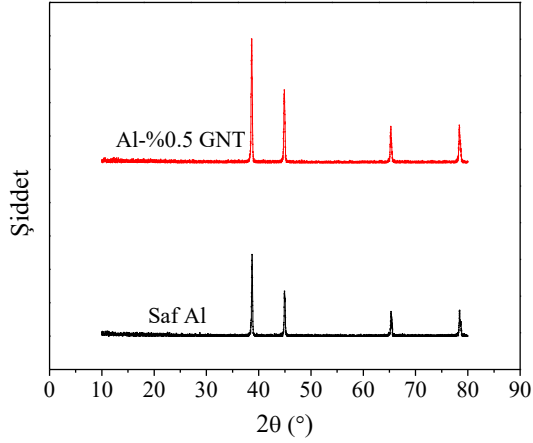
D. Üretilen Kompozitlerin Karakterizasyonu

$T_s=550, 600, 630$ °C sinterleme sıcaklıklarında sinterlenen Al-%0.1GNT kompozitlere ait kırık yüzey içyapı görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir. Artan sinterleme sıcaklığıyla birlikte kompozit yapının daha yoğun olduğu görülmüştür. Grafen tanecikler alüminyum tane sınırlarına yerleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca, taneler arası arayüz incelendiğinde; artan sinterleme sıcaklığıyla birlikte taneler arası etkileşimin arttığı görülmüştür.



Şekil 8. $T_s=550$ (a), 600 (b), 630°C (c) sıcaklıklarda sinterlenen Al-%0.1GNT kompozitlere ait kırık yüzey içyapı görüntüleri

Üretilen kompozitlerin faz analizi x-ışını kırınımı cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Saf alüminyum ve Al-%0.5GNT kompozitlerin XRD örgü deseni incelendiğinde tüm piklerin alüminyuma ait olduğu belirlenmiştir (Şekil 9). XRD faz analizinde, grafene ait pik oluşumu ($2\theta=26.5^\circ$) veya ikincil faz oluşumu (Al_4C_3) gözlenmemiştir. Burada grafenin oldukça düşük miktarlarda kullanılması ve cihazın düşük hassasiyeti sebebiyle grafen piki ($2\theta=26.5^\circ$) görülmemiştir.



Şekil 9. Saf alüminyum ve Al-%0.5GNT kompozite ait XRD örgü deseni

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, saf alüminyum ve ağırlıkça %0.1, 0.3, 0.5 grafen katkılı alüminyum matrisli kompozitler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş olup kompozitlerin yoğunluğu, gözenekliliği, sertliği ve mikroyapısı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Yürütülen yoğunluk, gözeneklilik ve sertlik ölçüm sonuçlarına göre; en iyi deneysel yoğunluk (2.52 g/cm^3), gözeneklilik oranı (%6.7) ve Vickers sertliği ($57 \pm 2 \text{ HV}$) $T_S=630 \text{ }^\circ\text{C}$ sinterleme sıcaklığında ve Al-%0.1GNT kompozit yapıda elde edilmiştir. Ağırlıkça %0.1'in üzerindeki grafen takviyesinde kompozitlerin yoğunluğunun düştüğü ve gözeneklilik oranının arttığı belirlenmiştir. Bu durum, grafenin alüminyum matris içerisinde homojen bir şekilde dağılmamasından kaynaklanmaktadır.
- Taramalı elektron mikroskopuyla yürütülen mikroyapı incelemelerinden, matris içerisindeki grafen taneciklerin varlığı ve dağılımı doğrulanmış olup grafenin alüminyum tane sınırlarında olduğu gözlemlenmiştir. Taneler arası arayüz incelendiğinde; artan sinterleme sıcaklığıyla birlikte taneler arası etkileşimin arttığı ve gözenekliliğin azaldığı görülmüştür.
- X-ışını kırınımıyla yapılan faz analizlerinden; Al-GNT kompozit yapılarda sinterleme sonrası alüminyum ve karbon arasında herhangi bir ikincil faz oluşumu (Al_4C_3) saptanmamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi PYO.MUH.1904.16.002 numaralı proje ile desteklenmiş olup katkılarından dolayı Ondokuz Mayıs Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] MC. Şenel, M. Gürbüz ve E. Koç, "Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler," *Mühendis ve Makine Dergisi*, cilt 56, sayı 669, s.36-47, 2015.
- [2] MC. Şenel, M. Gürbüz, and E. Koç, "Fabrication and Characterization of SiC and Si₃N₄ Aluminum Matrix Composites," *Universal Journal of Materials Science*, vol.5, no.4, p.95-101, 2017.
- [3] Tabandeh-Khorshid, M., Omrani, E., Menezes, P.L., Rohatgi, P.K. 2016b. Tribological performance of self-lubricating aluminum matrix nanocomposites: role of graphene nanoplatelets. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 19, 463-469.

- [4] W. Tian, S. Li, B. Wang, X. Chen, J. Liu, and M. Yu, "Graphene-reinforced aluminum matrix composites prepared by spark plasma sintering," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol.23, no.6, p.723-729, 2016.
- [5] SJ. Niteesh Kumar, R. Keshavamurthy, MR. Haseebuddin, and PG. Koppad, "Mechanical properties of aluminium-graphene composite synthesized by powder metallurgy and hot extrusion," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol.70, no.3, p.605-613, 2017.
- [6] JL. Li, YC. Xiong, XD. Wang, SJ. Yan, C. Yang, WW. He, JZ. Chen, and SQ. Wang, "Microstructure and tensile properties of bulk nanostructured aluminum/graphene composites prepared via cryomilling," *Materials Science&Engineering A*, no.626, p.400-405, 2015.
- [7] J. Wang, Z. Li, G. Fan, H. Pan, Z. Chen, and D. Zhang, "Reinforcement with Graphene Nanosheets in Aluminum Matrix Composites," *Scripta Materialia*, no.66, p.594-597, 2012.
- [8] J. Liu, U. Khan, J. Coleman, B. Fernandez, P. Rodriguez, S. Naher, and D. Brabazon, "Graphene oxide and graphene nanosheet reinforced aluminium matrix composites-powder synthesis and prepared composite characteristics," *Materials and Design*, no.94, p.87-94, 2016.
- [9] Y. Şahin, *Kompozit Malzemelere Giriş*, Seçkin Yayınevi, Ankara, 2006.
- [10] M. Gürbüz, MC. Şenel, and E. Koç, "The effect of sintering temperature, time and graphene addition on the mechanical properties and microstructure of aluminum composites," *Journal of Composite Materials*, vol.52, no.4, p.553-563, 2018.