



Hafif Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Sisteminin Tasarım, İmalat ve Performansının İncelenmesi

Gökhan SUR¹, İsmail KAYABAŞI^{2,*}

¹Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 78080, KARABÜK

²Kastamonu Üniversitesi, Küre Meslek Yüksek Okulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü 37902, Küre/KASTAMONU

Öz

Bu çalışmada, ergimiş metal karıştırma tekniği ile hafif metal matrisli parçacık takviyeli kompozit malzeme üretimine yönelik bir üretim sistemi tasarlanmış, imal edilmiş ve başarımı ile ilgili deneyler gerçekleştirilmiştir. Üretim sistemi tasarımında, benzerlerine kıyasla kullanım kolaylığı ve kullanım ergonomisinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu hedef doğrultusunda ergitme fırını ile karıştırma sistemi ebat ve konumu belirlenmiş, takviye elemanı ilave etme yeri ile ergitme potasının fırın içine/dışına hareketleri ile ilgili mekanik-elektrik bileşenlerden oluşan kompakt bir tasarım gerçekleştirilmiş ve üretilmiştir. Üretim sisteminin başarımlarında, matris malzemesini ergitme kabiliyeti ve kompozit malzeme üretiminde homojen parçacık dağılımının elde edilmesiyle ilgili bazı karakteristik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla; bir adet takviyesiz AA 6060 alüminyum alaşım malzemesi ve AA 6060/SiC parçacık takviyeli iki adet kompozit üretilmiştir. Kompozitlerin imalinde ortalama tane boyutu 200 mesh SiC parçacıkları kullanılmıştır. Takviye oranı ise hacimce %7 ve %10'dur. Üretim sisteminin başarımlarında, üretilen numunelerin mikroyapı, yoğunluk ve sertlik özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde kompozit numunelerde takviye elemanının kısmen homojen dağılım sergilediği görülmüştür. Yapılan sertlik ölçümleri hacimce %10 SiC içeren metal matrisli kompozitin en yüksek sertliğe sahip olduğunu göstermiştir. Yoğunluk ölçümleri, SiC takviyeli kompozitin takviye hacim oranı arttıkça, yoğunluğunun ve gözenek miktarının arttığını göstermiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 20/04/2018
 Düzeltilme: 08/01/2019
 Kabul: 10/01/2019

Anahtar Kelimeler

Kompozit malzemeler
 Metal matrisli kompozit
 Karıştırma döküm tekniği
 Mikroyapı
 Mekanik özellikler

Keywords

Composite materials
 Metal matrix composite
 Stir casting technique
 Micro structure
 Mechanical properties

Investigation of Design, Manufacturing and Performance of Light Metal Matrix Composite Material Production System

Abstract

In this study, a production unit for light metal based particle reinforced composite material with stir casting technique was designed, manufactured and experiments related to performance have been carried out. In production system design, it is aimed to provide ease of use and ergonomics of usage compared to similar ones. In line with this objective, the size and location of the melting furnace and the mixing system were determined, a compact design of the reinforcing element with mechanical and electrical components related to the movement of the melting pot in / out of the furnace. In the performance tests of the unit, the characteristics of melting the matrix material and obtaining homogeneous particle distribution in the production of composite material were investigated. For this purpose; one unreinforced AA 6060 aluminum alloy material and SiC particle reinforced AA 6060 matrix two composites were manufactured. Average particle size 200 mesh SiC particles were used in the production of composites. The volume of SiC reinforcing ratio of the manufactured composites is 7% and 10%. Microstructure, density and hardness properties of the produced samples were investigated in the direction of the unit's performance tests. According to the microstructure analysis, it has been observed that composite with metal matrix is homogeneous in part. According to the hardness analysis, it has been identified that metal matrix composite containing 10% SiC has the highest hardness. As a result of the density measurement, as the volume of the reinforcement ratio in the metal matrix composite with SiC reinforcement increases, the density and porosity of the material increases.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozit malzemeler, geleneksel malzemelere kıyasla dayanım/özlük ağırlık oranı yüksek malzemelerdir. Ayrıca, elastikiyet modülleri kendini oluşturan matris alaşımına kıyasla daha yüksektir. Birçok kompozit, kendisinden arzu edilen (aşınma ve korozyon direnci, elektriksel ve termal özellikler, servis sıcaklığı, vb.) özellikleri sergileyebilecek tarzda üretilebilmektedir. Kompozitlerin bu üstün özellikleri nedeniyle, son yıllarda otomotiv, havacılık, uzay sanayi ve nükleer enerji gibi alanlarda geleneksel malzemelere göre kullanım oranları giderek artmaktadır [1–4]. Bu alanlarda yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerden biri de metal matrisli kompozitlerdir (MMK). MMK'lar matris ve takviye elemanı olarak adlandırılan iki bileşenden meydana gelmektedir. MMK'larda alüminyum, magnezyum, bakır ve alaşımları gibi hafif metaller matris malzemesi olarak yaygın kullanıma sahiptir. MMK'larda sürekli elyaf veya sürekli olmayan elyaf/partikül biçiminde alümina, silisyum karbür, bor nitrid gibi seramikler takviye elemanı olarak kullanılmaktadır [5–8].

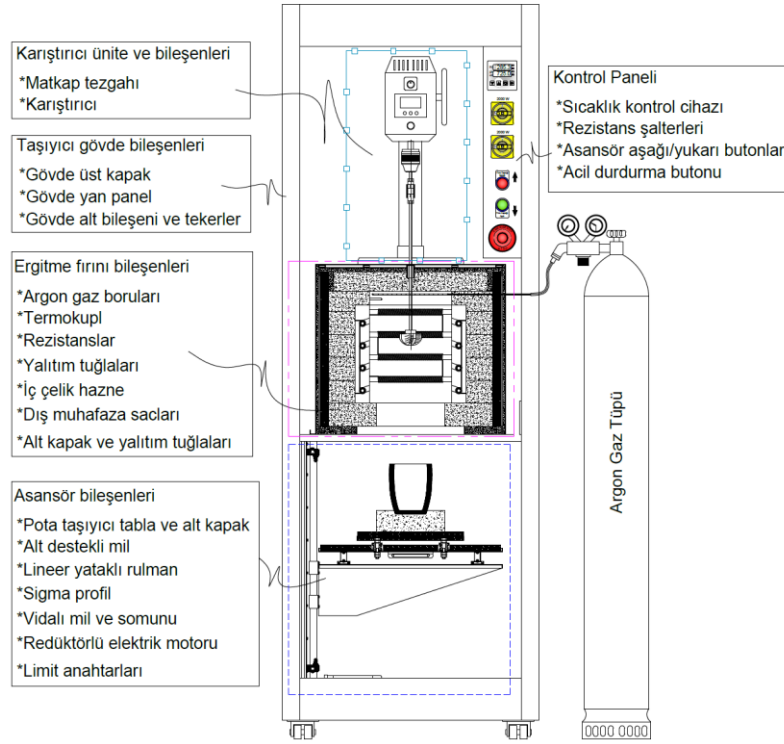
MMK'ların üretimi için çok farklı üretim yöntemleri kullanılmaktadır [9]. Bu üretim yöntemleri sıvı, katı-sıvı ve katı hal olarak üç ana başlık şeklinde sınıflandırılmaktadır [2, 10]. Her üretim yönteminin diğerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Sıvı hal üretim tekniklerinin diğer üretim tekniklerine kıyasla en önemli avantajları, düşük ilk yatırım ve hammadde maliyetleri ile birim ürün maliyeti düşük kompozitlerin üretilebilmesine olanak tanımları sayılabilir [11]. Karıştırmalı döküm, sıvı metal emdirme, püskürtme halinde biriktirmeli döküm ve denge halinde faz oluşturma (in-situ) yöntemi sıvı hal üretim tekniklerindedir [12]. Sıvı hal üretim yöntemlerinden karıştırmalı döküm yöntemi; büyük miktarlarda üretimin yapılabilmesi, üretimde esneklik ve üretim sadeliği gibi avantajlarından dolayı tüm dünyada ilgi çekmektedir. Literatürde, karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen MMK'larda takviye elemanı-matris arasındaki ıslatılabilirlik problemlerinden kaynaklanan kusurların oluştuğu ve döküm sonrası elde edilen yapı içerisinde gözenekliliğin kaçınılmaz olduğu belirtilmiştir. Fakat, bu problemlerin etkili karıştırma ve basınç altında döküm ile azaltılabildiği de vurgulanmaktadır [13–17].

Bu çalışmada, ergimiş metal karıştırma tekniği ile hafif metal matrisli kompozit malzeme üretiminde kullanılacak bir üretim sisteminin tasarımı ve imalatının yapılarak, performansının belirlenmesine yönelik çalışmaların yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, bir adet takviyesiz AA 6060 alüminyum alaşımı malzeme ve iki adet hacimce %7 ve %10 SiC takviye oranına sahip AA 6060 alüminyum alaşımlı kompozit imal edilmiştir. İmal edilen malzemelerin mikroyapı, yoğunluk ve sertlik özellikleri incelenmiştir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Sistemi Bileşenlerinin Tasarımı ve İmalatı (Metal Matrix Composite Material Production Unit Design and Produce of Components)

MMK üretim sistemi tasarlamak ve sistemi oluşturan elemanları belirlemek amacıyla literatür araştırması yapılmıştır. Yapılan literatür araştırması sonucunda üretim sisteminin; koruyucu atmosferli ergitme fırını, matkap tezgahı, karıştırıcı, taşıyıcı gövde, hidrolik pres ve kalıptan oluşturulması gerektiği tespit edilmiştir. Sistemin tasarımında, benzerlerine kıyasla kullanım kolaylığı ve kullanım ergonomisinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu hedef doğrultusunda ergitme fırını ile karıştırma sistemi ebat ve konumu belirlenmiş, takviye elemanı ilave etme yeri ile ergitme potasının fırın içine/dışına hareketleri ile ilgili mekanik-elektrik bileşenlerden oluşan kompakt bir tasarım yapılmış ve üretilmiştir. Tasarıma ait şematik görsel Şekil 1'de imalat süreçleri tamamlanmış kompozit malzeme üretim sistemine ait görsel ve teknik özellikler ise Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 1. MMK malzeme üretim sistemi ve malzeme üretiminde kullanılan yardımcı araç-gereçlere ait şematik görünüm



Teknik Özellikler	Değerler
Ergitme alanı boyutları, (en*boy*yükseklik):	25*25*34, (21,25 dm ³)
Dış hazne boyutları, (en*boy*yükseklik):	60*60*55 cm
En yüksek çalışma sıcaklığı:	1200 °C
Rezistans çapı ve sarım çapı:	1,5 mm, 16 mm
Rezistans toplam sarım boyu:	Her bir duvarda 1 m, toplam 4 metre.
Rezistans gücü:	Her biri 1000 W gücünde iki rezistans grubu birlikte devrede iken toplam güç: 2000 W
Atmosfer kontrolü:	Argon koruyucu atmosfer ortamının sağlanması için gerekli donanıma sahiptir.
Kapak şekli ve yeri:	Kare 22*22 cm boyutlarında, fırın alt kısmında yer almaktadır.
Kompozit malzeme üretim ünitesi dış boyutları, (en*boy*yükseklik):	80*80*220 cm
Pota alma sistemi:	DC elektrik motorlu, hareket hızı ayarlanabilir asansör sistemi
Dijital sıcaklık kontrolcü:	Elimko E72-4 PID kontrolcü 0,1°C ayar hassasiyeti
Termokupl:	PT100 K tipi
24 saat sürekli çalışmada dış yüzey sıcaklığı:	Yan duvarlar \approx 35°C Ön ve Arka kısımlar \approx Oda sıcaklığı
Dış gövde muhafaza sacları ve elektrik panosu:	Mevcut
Kompozit malzeme üretim ünitesi taşınma özelliği:	Gövde altı kilitli tekerlek sistemleri ile mümkündür.
Ek özellikler:	Karıştırıcı giriş deliği fırın üst kısmında iç çapı \varnothing 11 mm olan seramik boru ile sağlanmaktadır.

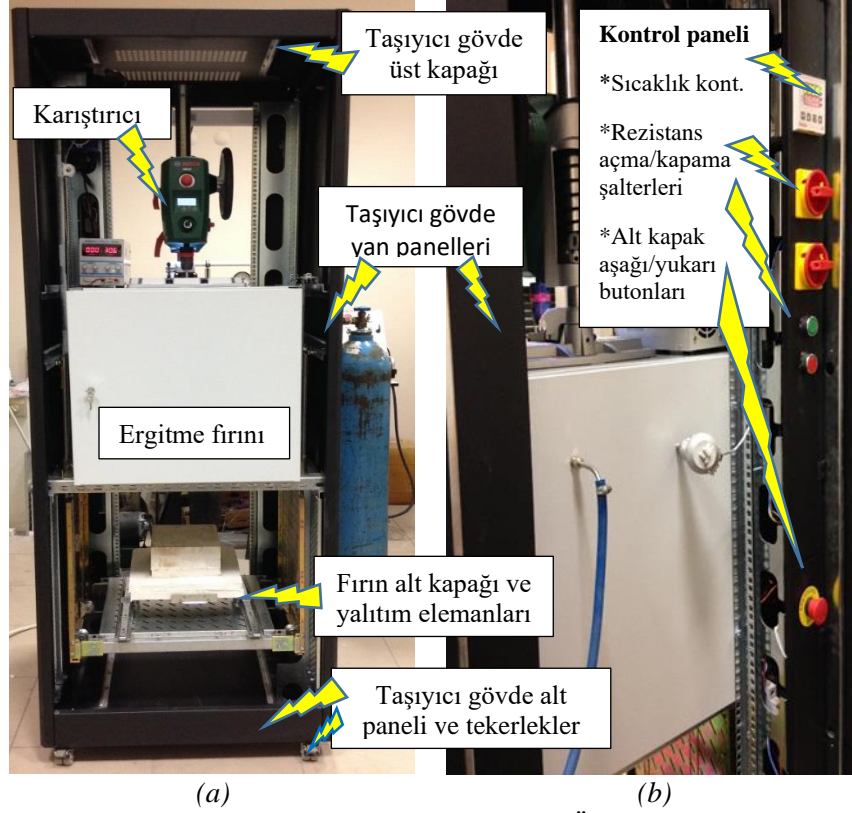
Şekil 2. İmalatı gerçekleştirilen MMK malzeme üretim sistemi ve teknik özellikleri

2.1.1. Taşıyıcı gövde (Carrier body):

Taşıyıcı gövde, hareket kabiliyetli, güvenlik açısından yan duvarları kapaklı, bünyesinde “Ergitme fırını”, “Kontrol ünitesi”, “Karıştırma ünitesi”, “Koruyucu atmosfer bileşenleri”, “Asansör sistemli pota yükleme/boşaltma ünitesi” ve kompozit malzeme ile ilgili yardımcı avadanlıkları barındıracak ve

taşıyabilecek dayanım özelliklerinde dizayn edilmiştir. Taşıyıcı gövde tasarımı ve yapı bileşenlerinin seçiminde standart insan vücut boyutları da göz önüne alınmış ergonomik bir yapı belirlenmiştir. Taşıyıcı gövde ve üretim sistemi geneli ile ilgili görseller Şekil 3’de sunulmuştur.

Kompozit üretim sistemi gövde aksamı, iki yönden müdahale edilebilir, alt tarafında yer alan tekerlekler sayesinde konumu ayarlanabilen, çelik muhafaza kabinli olarak üretilmiştir. Kabin ön paneli üzerinde, ergitme fırını için dijital sıcaklık kontrolcü, açma/kapama şalterleri, pota yükleme/boşaltma ünitesi aşağı/yukarı butonları ile tehlike anında acil durdurma işleminde kullanılan buton yer almaktadır.



Şekil 3. Taşıyıcı gövde ile ilgili görseller; a) Ön taraf, b) Arka taraf

2.1.2. Ergitme fırını (Melting furnace):

Hafif metal alaşımlarının (alüminyum, magnezyum, vb.) ergitilebilmesi için tasarlanan ergitme fırınlarının iç haznesinin, 1000°C sıcaklığa çıkabilmesi gerekir. Ayrıca, iç hazne sıcaklığının ayarlanan değerde $\pm 2\sim 5^\circ\text{C}$ hassasiyetinde, istenilen bekleme süresince kontrol edilmesi de gerekmektedir. Elektrikli ergitme fırınlarında sıcaklık rezistans telleri ile artırılır. Fırının çalışma sıcaklığı ve bu sıcaklığa ulaşma hızı ile çalışma ortamının koşulları rezistans telinin seçiminde önemli kriterlerdir. Rezistans telinin yapısında bulunan ana alaşım elementlerinin bileşim oranları, tel çapı ve uzunluğu ile sarım çapı arzu edilen özelliklerde bir ısıtma işlemi ve bu işlemin sürekliliği açısından önem taşımaktadır. Rezistans telinin alaşım malzemesinin seçiminde, telin sürekli çalışacağı en yüksek sıcaklık değerinde sergileyeceği dayanım özellikleri ve soğuma esnasında oluşacak büzülme ile çevresel etkenler ile olan etkileşim özellikleri (ortamdaki gazlara karşı reaksiyon duyarlılığı) belirleyicidir. Bu kıstaslar dikkate alınarak ergitme fırınının imalinde kullanılacak rezistans teli, “Kantal K1” sınıfı, $0,814 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ özdirençli, “25Cr5Al” alaşımli çelik tel olarak seçilmiştir. Tel çapı ise rezistansın uzun süre yüksek sıcaklıklarda dayanım sürekliliğinin sağlanması ve soğuma hızının etkilerinin en aza indirilmesi açısından $\varnothing 1,5 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Fırın iç haznesinin ısıtılmasında rezistans tellerine uygulanacak elektrik akımı 220 V AC’dir. Rezistansın en yüksek 2000 W gücünde ısıtma yapılabilmesi için gerekli tel boyu, Denklem 2.1-2.3’te verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{220^2}{2000} = 24,2 \Omega \quad 2.1$$

Denklem 2.1’de yer alan semboller; R; Rezistans tel direnci (Ω), V; Voltaj (V), P; Güç (W) anlamındadır.

$$S = \frac{d^2}{1,27} = \frac{1,5^2}{1,27} = 1,77 \text{ mm}^2 \quad 2.2$$

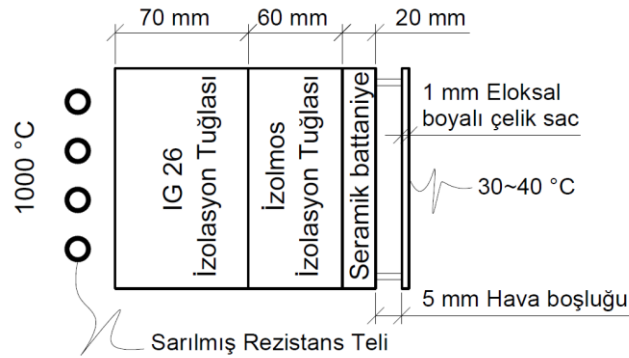
Denklem 2.2’de yer alan semboller; S; Rezistans teli kesit alanı (mm^2), d; Rezistans tel çapı (mm), anlamındadır.

$$L = \frac{R \times S}{\varphi} = \frac{24,2 \times 1,77}{0,814} = 52,62 \text{ m} \quad 2.3$$

Denklem 2.3’te yer alan semboller; L; Sarılmamış rezistans tel boyu (m), φ ; Rezistans teli öz direnci ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), R; Rezistans tel direnci (Ω), S; Rezistans teli kesit alanı (mm^2) anlamındadır.

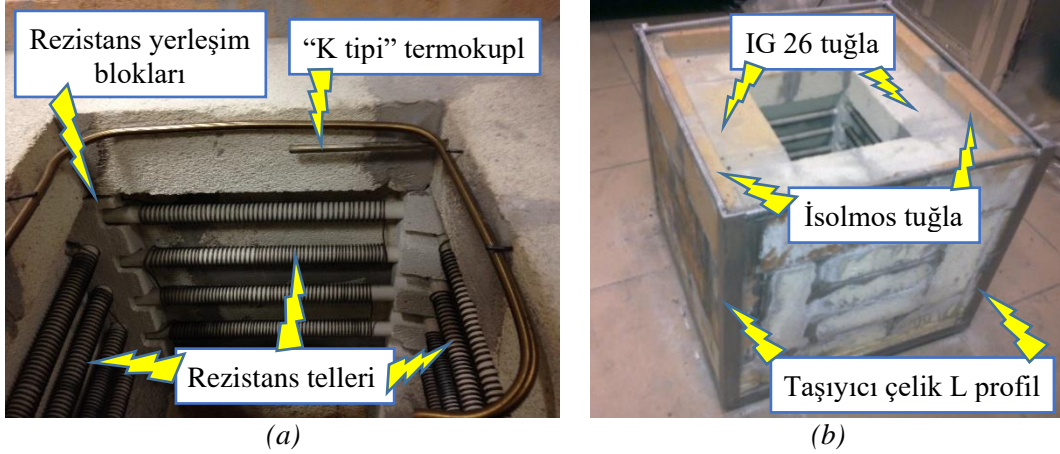
Yapılan hesaplamalar sonucunda arzu edilen özellikleri sergileyecek rezistans telinin en az 52,62 m uzunluğunda olması gerektiği tespit edilmiştir. Rezistans telinin bu boyutta fırın iç haznesi içerisine sığdırılması olanaksızdır. Bu nedenle belirli bir çapta sarmal hale getirilerek kullanılır. Sarım çapının belirlenmesinde, rezistans telinin sarım esnasında plastik deformasyonla şekillendirilmesinde herhangi bir kırılma veya yüzeyinde kılcal çatlak oluşumunun yaşanmayacağı en düşük sarım çapı değeri seçilir. Pratikte tel sarım çapının, tel çapının en az 10 (on) katı büyük bir değerde seçilmesi yeterlidir. Çalışmada sarım çapı 16 mm olarak seçilmiştir.

Rezistansların sıcaklık kontrolünün, K tipi termokupl ve PID sıcaklık kontrolcü ile gerçekleştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca ergitme fırını çalışırken, dış kabuk yüzeyinde oluşacak sıcaklık değerinin, çalışana zarar vermemesi için 30~40°C aralığında olması gerekir. Bu amaçla ısı yalıtım elemanlarının seçimi gerçekleştirilmiştir. Seçilen ısı yalıtım elemanları ve yerleşimi ile ilgili ergitme fırını yan duvar kesit görünüşü Şekil 4’de gösterilmiştir. Ergitme fırını alt ve üst yüzeyleri de yan duvarlara benzer, yalıtım elemanları ile kapatılmıştır.



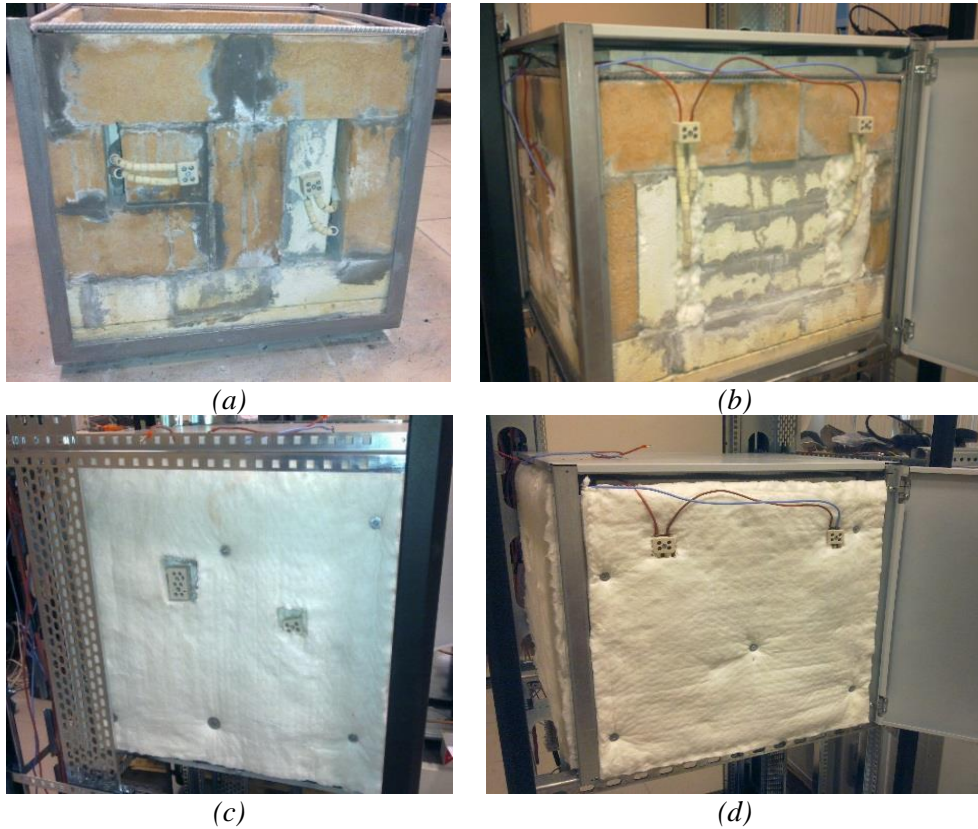
Şekil 4. Ergitme fırını yan duvar kesit görünüşü

Ergitme fırınlarında rezistanslar, elektrik yalıtımına sahip, pürüzlülüğü düşük ve yüksek sıcaklıklara dayanımlı, telin hareketini kısıtlayan seramik borular üzerine yerleştirilir. Yerleştirme işleminde tel sargılarının birbirine temas etmemesine dikkat edilir. Çalışmada ergitme fırını iç haznesi, dikdörtgenler prizması şeklinde dizayn edilmiştir. Rezistans teller her bir dikdörtgen duvarda, çapı 16 mm, boyu 280 mm olan 4 (dört) adet seramik boru üzerine yerleştirilmiştir. Toplamda 16 (onaltı) seramik boru üzerine, açılmış boyu 52,62 m, sarılmamış ve araları açılmış boyu 4 m olan rezistans tellerinin yerleşimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).

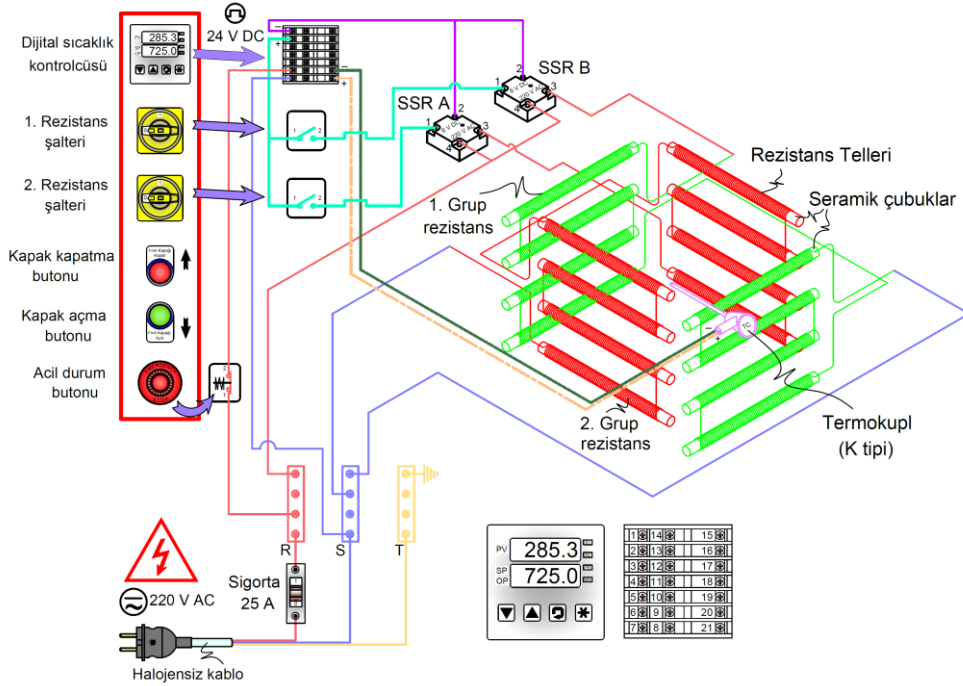


Şekil 5. Ergitme fırını; a) Rezistans yerleşim blokları ve rezistanslar, b) İzalasyon tuğla işlemleri tamamlanmış "L" profil kaynaklı ergitme fırını iç haznesi

Rezistanslar seramik yüzük ve klemens kullanılarak elektrik bağlantısına hazır hale getirilmiştir. Bu aşamadan sonra ergitme fırını dış muhafaza haznesi içerisine yerleştirilmiştir. Devamında taşıyıcı gövde üzerindeki yerine monte edilerek yalıtım işlemleri ile elektrik bağlantıları tamamlanmıştır (Şekil 6). Elektrik bağlantı şeması Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 6. Ergitme fırını; a),b) Rezistans klemens bağlantı şekli, c),d) Dış muhafaza haznesi içine ve taşıyıcı gövdeye yerleşimi



Şekil 7. Ergitme fırını kontrol paneli ve rezistans elektrik bağlantı şeması

Ergitme fırını bünyesinde yeralan iki ayrı rezistans grubu ayrı ayrı veya aynı anda çalıştırılabilmektedir. Rezistans gruplarının ayrı ayrı kontrol edilmesi ile aşağıdaki avantajların elde edilmesi amaçlanmıştır. Bunlar;

- ✓ Rezistans ömrünün uzatılması,
- ✓ Fırın iç haznesinin istenilen sıcaklık değerine güvenli (fazla akım çekmeden), ekonomik (tek rezistans çalışarak uzun sürede) çıkmasını sağlamak,
- ✓ Arzu edilen durumlarda ani sıcaklık artışının sağlanması amacıyla iki rezistansın birlikte çalıştırılabilmesi,
- ✓ Rezistans arızalarının fırın çalışma sürekliliğini engellememesi,

şeklinde.

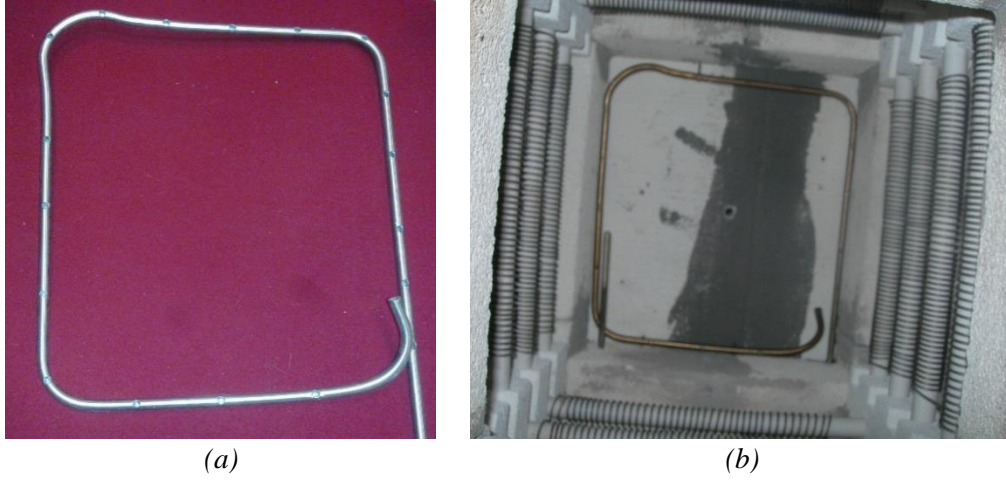
İmalatı tamamlanan ergitme fırını test amaçlı çalıştırıldığında fırın iç sıcaklığının 1200°C'ye çıkabildiği ve 24 saat süre boyunca dış kaplama sıcaklığının 30~40°C aralığında olduğu tespit edilmiştir [10].

2.1.3. Koruyucu atmosfer oluşturma ekipmanları (Protective atmospheric forming equipment):

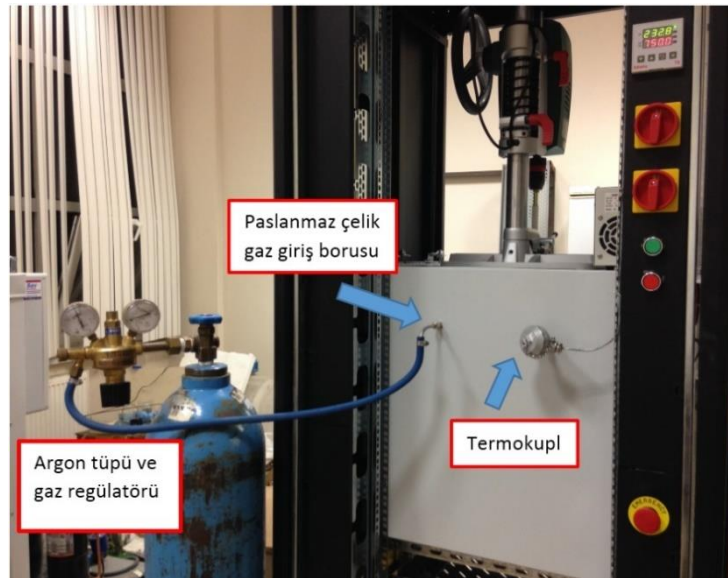
Alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda oksijen başta olmak üzere bulunduğu ortamda yeralan gazlara afinitesi oldukça yüksektir. Ergitilerek üretilmelerinde, yapı içerisinde arzu edilemeyen oksit bileşikleri ($MgAl_2O_4$, Al_2O_3 , MgO , SiO_2 , vb.) ve metal olmayan kalıntıların oluşumu oldukça sık karşılaşılan durumlardır. Ayrıca hem sıvı hem de katı alüminyum içerisinde çözünebilir gazlar da döküm sonrası yapı içerisinde gözenek oluşumunu arttırmaktadır. Arzu edilmeyen bu inklüzyonların giderilmesinde bazı yöntemler uygulanmaktadır. Bunlar; ergiyik içerisinde flakslama işlemi ve asal gaz ortamında ergitme işleminin gerçekleştirilmesine dayanır. Flakslama, inorganik tuz bileşiklerinin kullanıldığı kimyasal bir işlemdir. Alüminyum alaşımları için kullanılan dört tip ana flaks türü: örtü flaksları, temizleme flaksları, cüruf yapıcı flakslar ve inceltici flakslardır. Asal gaz ortamlarında gerçekleştirilen ergitme işlemlerinde genelde argon (Ar) ve azot (N_2) gazları kullanılmaktadır. Asal gaz olarak çoğu zaman en ağır gaz olması sebebiyle argon gazı tercih edilir. Bulduğu ortama çökerek diğer gazları ortamdaki uzaklaştırır. Böylelikle istenmeyen reaksiyonların oluşumunu en aza indirir [18–20].

Ergitme fırınında koruyucu atmosfer ortamının sağlanması için argon gazı kullanılmıştır. Argon gazı ergitme fırınının üst kısmına yerleştirilen iç çapı 5 mm olan paslanmaz çelik boru ile ortama taşınması sağlanmıştır (Şekil 8). Paslanmaz çelik boru ergitme haznesi formuna benzer bükülmüş ve üzerine 4 mm

çapında 30~35 mm aralıklarla delikler delinmiştir. Tüp ve fırın ara bağlantılarında plastik hortum, paslanmaz çelik rekor ve dirsekler ile argon gazına uygun gaz regülatörü kullanılmıştır (Şekil 9).



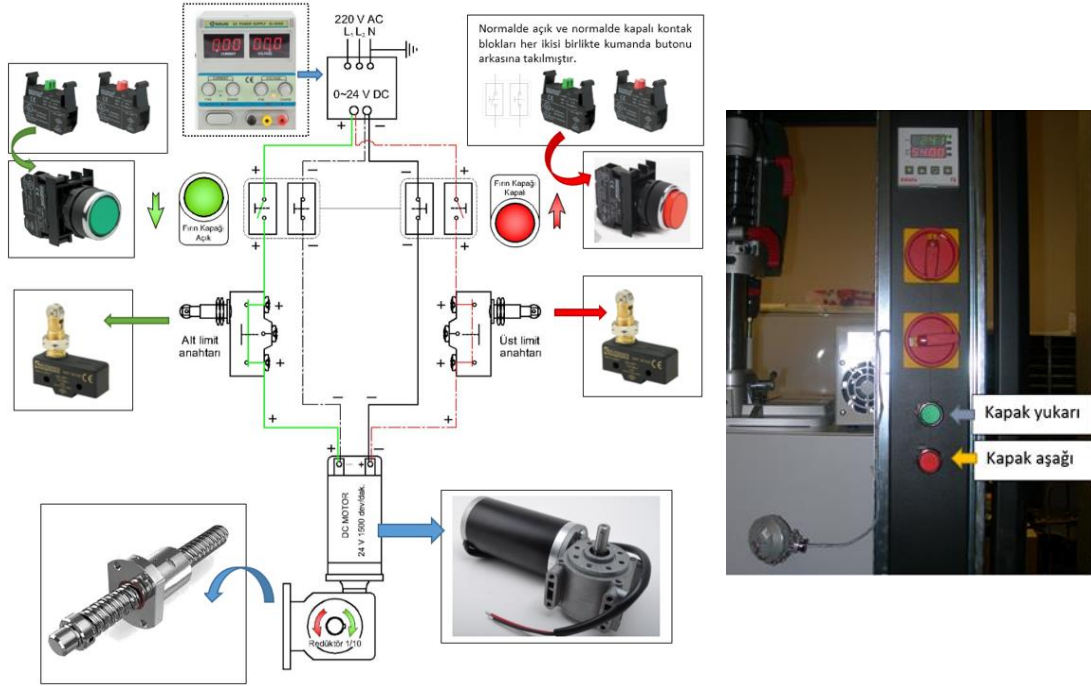
Şekil 8. a) Koruyucu atmosfer ortamı oluşturmada kullanılan paslanmaz çelik boru, b) Paslanmaz çelik boru fırın içi yerleşimi ve konumu



Şekil 9. Koruyucu atmosfer oluşturmada kullanılan bileşenler

2.1.4. Asansörlü pota yükleme/boşaltma ünitesi (Lift crucible loading / Unloading unit):

Kompozit malzeme üretiminde, ergimiş metal içerisine takviye elemanlarının ilave işleminden sonra karışım kalıp içerisine dökülerek nihai ürün elde edilmektedir. Bu döküm işleminde ergimiş haldeki karışımın sıcaklığının düşmemesi ve hava ile temas ederek istenmeyen reaksiyonların oluşmaması açısından, potanın kolay ve hızlı bir şekilde alınarak döküm işleminin gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir. Bu nedenle kompozit malzeme üretim sistemi, döküm işleminin kolayca gerçekleştirilebilmesi amacıyla, elektrikli asansör sistemi ile çalışan kapak ve mekanizmalarla, potayı fırın alt kısmından kolayca tahliye edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Ergitme fırını alt kısmında, potanın fırın içine/dışına hareketleri ile ilgili mekanik-elektrik bileşenlerden oluşan bir asansör sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Elektrik bağlantı şeması ve yapı bileşenleri ile ilgili görseller Şekil 10'da yer almaktadır.



Şekil 10. Asansör sistemi elektrik bağlantı şeması ve yapı bileşenleri

2.1.5. Karıştırma ünitesi tasarım ve imalatı (Design and manufacturing of mixing unit):

Ergimiş metal karıştırma yöntemiyle parçacık takviyeli kompozit malzeme üretiminde en önemli etkenlerden biri de homojen takviye fazı dağılımının elde edilmesidir. Homojen dağılımın eldesi üzerinde, matris-takviye fazı ıslatılabilirlik özellikleri, karıştırma işleminde kullanılan karıştırıcı formu, karıştırma işleminin şekli ile diğer üretim parametreleri (sıcaklık, koruyucu atmosfer özellikleri, vd.) etkilidir. Karıştırma sistemi aşağıdaki bileşenlerden oluşturulmuştur. Bunlar;

- 1) Karıştırıcının, dönme ve aşağı/yukarı hareketinin gerçekleştirilmesini sağlayan matkap tezgahı,
- 2) Karıştırıcı ve bağlantı mili,

şeklindedir.

Matkap Tezgahı (Drill Machine):

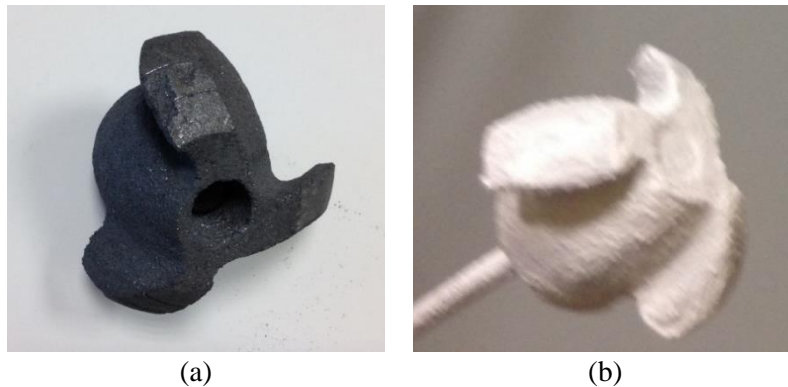
Karıştırma işleminde, “BOSCH PBD 40” marka masa üstü sütunlu matkap tezgahı kullanılmıştır. Cihaz, karıştırıcının istenilen devir sayısında dönmesini ve istenilen mesafeler arasında aşağı/yukarı hareket etmesini sağlamaktadır. Dijital göstergesi ve üzerinde yer alan potansiyometre sayesinde istenilen devir sayısı rahatlıkla ayarlanabilmektedir. Ayrıca, karıştırıcının konumu ve ne kadar mesafede hareket edebileceği de dijital ekran ve mekanik kısıtlayıcı ile kontrol edilebilmektedir. Bu özellik pota dip noktasından karıştırıcının ne kadar yüksekte karıştırma işlemini gerçekleştireceğini belirlemeye olanak sağlamaktadır. Hız ayarı iki ayrı vites seçeneği ile 1. viteste 200~850 rpm, 2. viteste ise 600~2500 rpm aralığında istenilen değere ayarlanabilmektedir. Cihazla ilgili görsel ve teknik özellikleri Şekil 11’de sunulmuştur.



Şekil 11. Karıştırma işlemi için kullanılan matkap tezgahı ve teknik özellikleri

Karıştırıcı (Mixer):

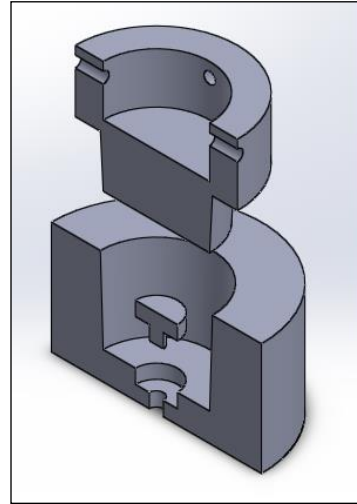
Ergimiş metal karıştırma yönteminde karıştırma işleminde kullanılacak karıştırıcı, karıştırma işlemi süresince matris ve takviye fazına herhangi bir zarar vermemeli ve sıcaklık ile kuvvetler etkisinde dayanım özelliğini ve formunu koruyabilmelidir. Karıştırıcı, özellikle matris malzemesi ile reaksiyona girmemeli, matris tarafından kolayca ıslatılmamalıdır. Ergimiş metal karıştırma tekniği ile kompozit malzeme üretiminde karıştırıcının malzemesi, formu ve dayanım özellikleri önem taşımaktadır. Karıştırıcının imalinde pota malzemesi olarak kullanılan preslenmiş SiC/Grafit malzeme kullanılmıştır. Karıştırıcı formu, yaklaşık 60° açılı 3 kanatlı olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Karıştırıcının aşınma direncini arttırmak ve soğuma işlemi esnasında hava ile temasının engellenip pullanarak deforme olmasını önlemek amacıyla yüzeyi “silika + α -Al₂O₃ (~1 μ m)” karışımı ile kaplanmıştır. Kaplanmış karıştırıcı, 200°C’de 2 saat tavllanmış ve fırın içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Karıştırıcının ilk formu ile yüzey kaplama ve tavlama işlemi sonrasındaki görüntüleri Şekil 12’de sunulmuştur.



Şekil 12. Karıştırıcı; a) İmalat sonrası ilk form, b) Yüzeyi kaplanmış ve tavllanmış kullanıma hazır form

2.1.6. Sıkıştırılmalı döküm kalıbı ve hidrolik pres tezgahı (Compression casting mold and hydraulic press machine):

Üretilen MMK'da gözenekli yapıyı en aza indirmek amacıyla sıkıştırılmalı döküm tekniği kullanılmıştır. Sıkıştırılmalı döküm işlemi için bir adet TS EN ISO 4957'ye göre "X40CrMoV5-1" sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş silindirik formda kalıp kullanılmıştır. Sıvı haldeki kompozitin kalıp içerisine dökülmesinden sonra sıkıştırılması için de en yüksek basma kuvveti 15 Ton olan hidrolik pres kullanılmıştır. Kalıp ve hidrolik pres ile ilgili görseller Şekil 13'te sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 13. Sıkıştırılmalı döküm işleminde kullanılan ekipmanlar; a) Kalıp (kesit), b) Hidrolik pres

2.2. Matris ve Takviye Elemanı (Matrix and Reinforcement Material)

MMK malzeme üretiminde matris malzemesi olarak T4 ısıl işlem uygulanabilen, korozyon direnci ve yorulma dayanımı yüksek, kaynak kabiliyeti iyi olan AA 6060 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. AA 6060 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. AA 6060 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (%)

Element	Al	Si	Mg	Fe	Ga	Zn
ort. %	98,28	0,786	0,4770	0,197	0,131	0,129

MMK üretiminde takviye elemanı olarak saflık derecesi %98, özgül ağırlığı $3,22 \text{ g/cm}^3$ olan ortalama tane boyutu 200 mesh boyutlarında SiC parçacıkları kullanılmıştır. Kullanılan SiC oda sıcaklığında katı halde bulunmaktadır ve koyu gri renktedir.

2.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi (Production of Metal Matrix Composites)

Bu çalışmada MMK imalatını gerçekleştirebilmek için üretim sistemi imal edilmiştir. İmal edilen üretim sisteminin çalışma verimliliğini belirlemek amacıyla; ergimiş metal karıştırma tekniği ile basınç altında döküm yöntemi kullanılarak bir adet takviyesiz AA 6060 alüminyum alaşım malzemesi ve iki adet SiC takviyeli AA 6060 MMK imal edilmiştir. İmal edilen MMK'larda SiC takviye elemanı oranı hacimce sırasıyla %7 ve %10 olarak belirlenmiştir.

Parçacık takviyeli MMK üretmek amacıyla kullanılan potanın içerisine belirlenen miktarda alüminyum eklenmiştir. Koruyucu atmosfer oluşturmak amacıyla ergitme haznesi içerisine argon gazı verilmiştir. MMK malzemenin dış ortamdan etkilenmesi en aza indirilmiştir. Ergitme fırınının sıcaklığı 750°C

ayarlanmış ve matrisin ergimesi için bu sıcaklık değerinde yaklaşık 1,5 saat bekletilmiştir. Alüminyum ergidikten sonra karıştırıcı açılmıştır. Karıştırıcının hızı, girdap oluşturmak amacıyla, başlangıç devri 350 rpm olarak ayarlanmıştır. SiC takviye elemanları alüminyum folyo içerisine yaklaşık 5 gr'lık paketler halinde sarılmıştır. Paketler ergitme fırını üstünde yer alan delik çapı 11 mm olan seramik borudan ergitme potası içerisine yaklaşık 5 dakika aralıkla atılmıştır. Karışımın homojen dağılımı için karıştırıcı belli aralıklarda aşağı yukarı hareket ettirilmiştir. Paket halinde takviye elemanlarının pota içerisine atılma işlemi tamamlandıktan sonra yaklaşık 15 dakika karıştırma işlemine devam edilmiştir. Son karıştırma işleminde, homojen parçacık dağılımının elde edilmesi amacıyla karıştırıcı devri 500 rpm değerine çıkarılmıştır.

SiC takviyeli AA 6060 alüminyum alaşım matrisli sıvı haldeki kompozitin, akışkanlığını artırarak dökümünü kolaylaştırmak amacıyla; döküm işlemine geçmeden önce ergitme fırınının sıcaklığı 800°C'ye çıkartılmıştır. Döküm işlemi için pota asansör vasıtası ile ergitme fırınının altına indirilmiştir. Potanın içerisindeki MMK yaklaşık 250°C sıcaklığa ısıtılan kalıbın içerisine dökülmüştür. Kalıbın içerisindeki MMK, 15 tonluk presle 2 MPa basma kuvvetiyle sıkıştırılarak üretimi tamamlanmıştır.

Üretilen MMK'ler ile AA 6060 alüminyum alaşım malzemesinin özelliklerinin karşılaştırılması amacıyla takviye elemanı olmayan AA 6060 alüminyum alaşım malzemesi de benzer koşullarda üretilmiştir. AA 6060 alüminyum alaşım malzemesi ergitildikten sonra kalıba dökülmüş ve MMK malzemelere benzer oranda basınç uygulanmıştır.

2.4. Mikroyapı İncelemesi, Yoğunluk, Gözenek ve Sertlik Ölçümünde Kullanılan Cihazlar (Micro structure Inspection, Density, Porosity and Hardness Measurement Devices)

Metalografik numune hazırlama işlemleri tamamlanan malzemelerin mikroyapı fotoğrafları "Nikon" marka optik mikroskopta çekilmiş ve "Clemex Yazılımı" ile bilgisayara aktarılmıştır. Mikroyapı fotoğraflarının çekilmesinde 50X, 100X, 200X ve 500X büyütme ölçeği kullanılmıştır.

Üretilen MMK'ların deneysel yoğunluk miktarlarının ölçümünde, 1 mg ölçüm duyarlı mekanik terazi kullanılmıştır. Gözenek miktarının belirlenmesinde, deneysel yoğunluk değerinden teorik olarak hesaplanan yoğunluk değeri çıkartılarak gözeneklilik yüzde oran değeri tespit edilmiştir. Teorik yoğunluk ve gözenek miktarı hesaplarında Denklem 2.4 ve Denklem 2.5'te verilen formüller kullanılmıştır.

$$\delta_T = [\text{Matris (Al) \% hacim oranı} \times \delta_{AA6060}] + [\text{Takviye el. (SiC) \% hacim oranı} \times \delta_{SiC}] \quad 2.4$$

Burada; δ_T : Teorik yoğunluk (g/cm³), δ_{AA6060} : AA 6060 alüminyum alaşımının özgül ağırlık değeri, δ_{SiC} : SiC takviye elemanının özgül ağırlık değerini belirtmektedir.

$$\text{Gözenek (\%)} = [(\delta_D - \delta_T) / \delta_D] \times 100 \quad 2.5$$

Burada; δ_D : Deneysel yoğunluk (g/cm³), δ_T : Teorik yoğunluk (g/cm³) anlamındadır.

Üretimi gerçekleştirilen matris malzemesi ile takviye oranı %7 ve %10 olan SiC takviyeli AA 6060 alüminyum alaşım MMK'nın sertlik ölçümü için "ADİO AHT 350 Leeb Hardness Tester" marka cihaz kullanılmıştır. Sertlik ölçüm deneyinde "Brinell" sertlik ölçüm metodu tercih edilmiştir. Her bir numunede 5 kez ölçüm yapılmış ve ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak sertlik değerleri belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Üretim Sistemi Performansı İle İlgili Sonuçlar (Results of Production System Performance)

Üretim sistemi ilk olarak alüminyum alaşım matris malzemesini ergitebilme kabiliyeti incelenmiştir. Üretim sistemi performans testlerinin göstergeleri olarak üretilen malzemelerin (AA 6060 alüminyum alaşım malzemesi ve iki adet SiC takviyeli AA 6060 MMK), mikroyapı, sertlik, yoğunluk ve yapı içerisindeki gözenek miktarı incelenmiştir.

Hafif metal matrisli, parçacık takviyeli kompozit malzeme üretmek için geliştirilen üretim sisteminin, başta alüminyum olmak üzere hafif metalleri (ergime sıcaklığı 1200°C'ye kadar) ergitebildiği gözlenmiştir.

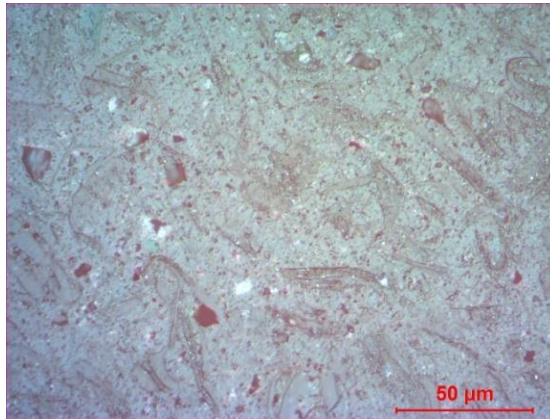
Tasarım ve imalat süreçleri tamamlanarak performans testleri gerçekleştirilen üretim sisteminin, literatürdeki benzerlerine kıyasla farklılığı/üstünlüğü aşağıda maddeler halinde sunulmuştur. Bunlar;

- MMK mazleme üretim sistemi tamamen kapalı iç haznesi sayesinde, koruyucu atmosfer ortamının sağlanmasını kolaylaştırmıştır,
- Karıştırma işleminde kullanılan matkap tezgahının ergitme fırını üzerine konumlandırılmasıyla, ergitme fırını içerisinde ergitme fırınının üst kapağı bile açılmadan ergimiş metalin karıştırma işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Literatürde yer alan üretim sistemlerinin bir çoğu ergitme fırını/potayı karıştırıcı sistem/makina altına taşıyarak veya fırın üst kapağı tamamen açılarak karıştırma işlemini gerçekleştirebilmektedir [6, 7, 9, 11–14, 18].
- Ergitme potasının asansör sistemli alt kapak vasıtası ile hızlı ve güvenli bir şekilde fırın dışına alınması ve döküm işlemine başlanması kolaydır,
- Ergitme işleminde sıcaklık artış hızı iki ayrı rezistans grubunun farklı şalterle kontrol edilmesi ile değiştirilebilmektedir. Bu durum hem enerji tasarrufu hemde sıcaklık kontrolünün sağlanması açısından önem arz etmektedir. Ayrıca rezistans tel gruplarından herhangi birisinin arızalanması durumunda üretime diğer rezistans grubu ile devam edilebilmektedir,
- Karıştırıcı milinin matkap tezgahının mandrenine takılmasında, daha düşük ısı iletim katsayılı malzeme (Al_2O_3 seramik boru) kullanılarak, metal-metal teması engellenmiştir. Geliştirilen seramik boru bağlantısı sayesinde, matkap tezgahı mandren ve iş milinin sıcaklık değeri en aza (yaklaşık $35^{\circ}C$) indirilmiştir,
- Takviye elemanlarının ilave şekli kolay, etkin ve operator açısından emniyetlidir,

şeklinde.

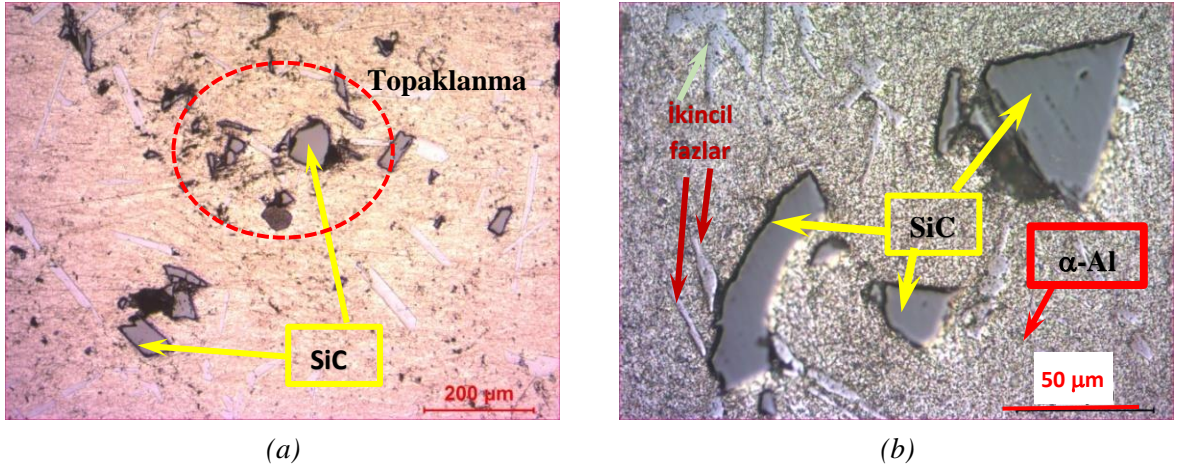
3.2. Mikroyapı İnceleme Sonuçları (Microstructure Review Results)

Metalografik incelemeler, üretimi gerçekleştirilen iki adet kompozit ve bir adet AA 6060 alüminyum alaşımı malzeme üzerinde gerçekleştirilmiştir. Metalografik incelemelerde; MMK içerisindeki parçacık dağılımı, gözeneklilik, kısmi bir bilgi elde edilecek olsa da takviye elemanı ile matris arası arayüzey bağı incelenmiştir. Metalografik incelemelerle elde edilen mikroyapı fotoğrafları Şekil 14 ile Şekil 16 arasında sunulmuştur.



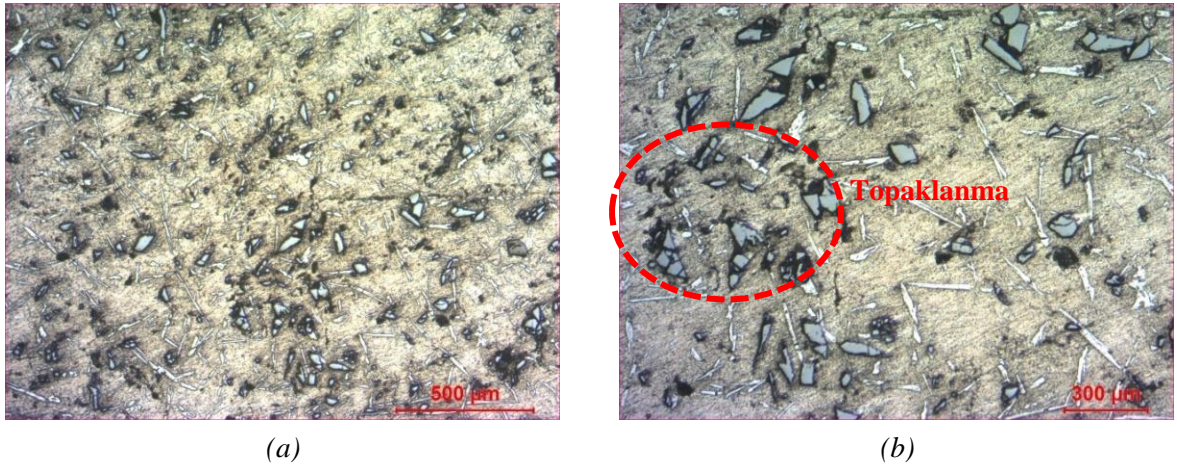
Şekil 14. AA 6060 alüminyum alaşım matrisin mikroyapı görüntüsü 200X

Şekil 14’de AA 6060 alüminyum alaşım matrisin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; α -alüminyum fazı ve ikincil silisyum dentritik yapıları gözlenmiştir.



Şekil 15. Hacimce %7 SiC takviyeli kompozit mikro yapı görüntüleri; a) 200X, b) 500X

Şekil 15 (a) ve (b)'deki %7 SiC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; kısmen homojen olduğu gözlenmiştir. Bazı bölgelerde topaklanmanın meydana geldiği görülmüş olmasına rağmen takviye elemanlarının aralarında boşluklar mevcut olduğu saptanmıştır.



Şekil 16. Hacimce %10 SiC takviyeli kompozit mikro yapı görüntüleri; a) 50X, b) 100X

Şekil 16 (a) ve (b)'deki %10 SiC takviyeli kompozitin mikro yapı görüntüleri incelendiğinde; kısmen homojen olduğu ve bazı yerlerde topaklanmaların meydana geldiği gözlenmiştir. AA 6060 alüminyum alaşımlı metal matrisin takviye elemanını tamamen sardığı belirlenmiştir. Buradan da; AA 6060 alüminyum alaşımı metal matrisin takviye elemanını iyi ıslatabildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca mikroyapı görüntülerinden imalat işlemlerinde kullanılan karıştırıcı ve karıştırma işleminde kullanılan devir sayısı ile karıştırıcının yukarı/aşağı hareketinin, parçacıkların nispeten homojen dağılımı için yeterli olduğu tespit edilmiştir.

Karıştırmalı döküm tekniğinde matris içinde takviye elemanının homojen dağılımını sağlamak oldukça zordur. MMK'nın bazı bölgelerinde SiC takviye elemanının daha yoğun olduğu görülmektedir. Parçacıkların matris içinde bir bölgede yoğunlaşmasının sebebi; MMK'nın katılaşma sırasında katı halde bulunan takviye elemanını irileşen dentritlerden katı sıvı faza yönelmeye zorlamasıdır [2].

3.3. Yoğunluk ve Gözeneklilik Ölçüm Sonuçları (Density and Porosity Measurement Results)

İmalatı gerçekleştirilen deney numunelerinin yoğunluk değerinin incelenmesinin amacı, malzemenin yoğunluk miktarına bağlı olarak gösterdiği dayanım karakteristiklerini saptamaktır. Diğer bir amacı ise; MMK'ların seçilen imalat metodunun sebep olduğu gözenek miktarını belirlemektir. Tablo 2'de imalatı gerçekleştirilen malzemelerin yoğunlukları ve gözenek miktarları gösterilmiştir.

Tablo 2. İmal edilen malzemelerin yoğunluk ve % gözenek miktarları

MMK Matris ve Takviye Elemanı Yoğunluk Değeri (δ), g/cm ³		Deneysel Yoğunluk (δ_D), g/cm ³	Teorik Yoğunluk (δ_T), g/cm ³	Yoğunluk Farkı ($\delta_D - \delta_T$), g/cm ³	Gözenek miktarı $\left[\left(\frac{\delta_D - \delta_T}{\delta_D} \right) \times 100 \right]$, %
AA 6060	SiC				
2,682	3,22				
Malzemelerin Hacim Oranları (%)					
%100 AA 6060		2,674	2,682	0,008	0,30
%93 AA 6060 + %7 SiC		2,707	2,719	0,012	0,44
%90 AA 6060 + %10 SiC		2,708	2,736	0,028	1,02

Tablo 2’de takviye elemanı hacim oranının artmasına bağlı olarak malzemenin yoğunluğu ve gözenek miktarının arttığı görülmektedir. Takviye elemanı (SiC) yoğunluğunun, matrisin yoğunluğundan fazla olması, ağırlıkça takviye oranlarının artmasıyla, kompozit malzemelerin yoğunluklarını da arttırmıştır. Gözenek miktarındaki artış, artan takviye elemanı hacim oranına bağlı olarak, yapı içerisindeki topaklanmış takviye elemanları etrafında oluşan gaz boşluklarının varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Döküm yoluyla üretim tekniğinde gözenekli yapı oluşumu kaçınılmazdır. Üretilen malzemelerin gözenek miktarı, geleneksel basınçsız döküm yöntemiyle üretilen malzemelerle (en az %2) kıyaslandığında, nispeten düşük değerlerdedir. Bunun en büyük nedeni döküm işleminin, hidrolik pres kullanılarak sıkıştırılmalı döküm tekniği ile gerçekleştirilmesidir [12]. Karıştırmalı döküm yöntemi ile imalatı gerçekleştirilen malzemelerde gözenek meydana gelmesinin nedenlerinden biri de alüminyum alaşımlarının sıvı halde ortamda bulunan gazları çözmesidir. Özellikle hidrojen gazı sıvı alüminyumda yaklaşık 1,4 ppm değerinde çözünebilmektedir [20]. MMK’ların döküm sırasında hava ile irtibatla bulunması ve döküm zamanı sıvı alüminyum içerisinde çözünen gaz haldeki elementleri arttırmaktadır. Bu durum katılma esnasında gözenekli yapı oluşmasına neden olmaktadır. MMK içinde gözenek miktarının yükselmesi, malzemenin mekanik karakteristiğini olumsuz yönde etkilenmektedir.

3.4. Sertlik Ölçüm Sonuçları (Hardness Measurement Results)

Matris malzemesi ve kompozitlerin sertlik ölçüm sonuçları Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3. İmalatı gerçekleştirilen malzemelerin sertlik değerleri

Deney Numunelerinin Sertlik Değerleri		
No	Malzeme içeriği, hacim oranı %	Sertlik Değeri, BHN
1.	%100 AA 6060	21
2.	%93 AA 6060 + %7 SiC	24
3.	%90 AA 6060 + %10 SiC	26

Tablo 3’te görüldüğü üzere; MMK’nın sertlik değerleri takviyesiz matris alüminyum alaşımına göre daha yüksektir. Numuneler arası yapılan karşılaştırmaya göre; takviye elemanının MMK içindeki hacimce yüzde oranı arttıkça, sertlik değerinin arttığı anlaşılmaktadır. Literatürde incelenen bazı çalışmalarda MMK’ların takviye oranı arttıkça malzemenin sertliğinin arttığı belirtilmiştir [18, 21–22].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Hafif metal matrisli parçacık takviyeli kompozit malzeme üretimine yönelik üretim sisteminin tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Üretim sistemi ile ilgili sonuçlar;

- Üretim sistemi ergimiş metal karıştırma tekniği ile kompozit malzeme üretiminde gerekli tüm bileşenleri (“Ergitme fırını”, “Kontrol ünitesi”, “Karıştırma ünitesi”, “Koruyucu atmosfer bileşenleri” ve “Asansör sistemli pota yükleme/boşaltma ünitesi”) bünyesinde barındırmaktadır,
- Ergitme fırını en yüksek 1200°C sıcaklığa çıkabilmekte ve koruyucu atmosfer ile kullanıma uygundur,
- Ayır ayrı çalıştırılabilen iki rezistans grubu ile sıcaklık artış hızı ve tükettiği enerji kontrol edilebilir,
- Üretim sistemiyle, ergimiş metal karıştırma tekniğiyle parçacık, partikül, kısa fiber ve kılcal kristal formu takviye elemanları kullanılarak kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilebilir,

- Asansör sistemli pota alma sistemi sayesinde döküm işlemine geçiş güvenli ve hızlıdır,
- Karıştırma sistemi ergitme fırını üzerinde konumludur. İstenildiği anda karıştırma işlemine hızlıca geçiş yapılabilir,

şeklindedir.

Üretim sistemi kullanılarak hacimce %7 ve %10 SiC takviyeli MMK malzemelerin üretiminin başarılı olduğu işlem parametreleri;

- Ergitme fırını sıcaklık değerinin 750°C'ye ayarlanması,
- Karıştırıcı devri tekviye elemanı ilave ederken; 350 rpm, döküm işlemi öncesinde homojen dağılım elde etmek amacıyla 15 dakika süre ve 500 rpm olması,
- Karıştırma işleminde karıştırıcının dönme eksenini boyunca aşağı/yukarı hareket ettirilmesi,
- Koruyucu atmosfer ortamının ergime işlemi başlamadan sıcaklık değeri 350°C'ye ulaştığında başlatılarak oluşturulması ve döküm işlemine kadar sürdürülmesi gerektiği,
- Takviye elemanının alüminyum folyo içerisine sarılmış 5 gr'lık paketler halinde 5 dakika aralıkla ilave edilmesi,
- Döküm işlemi öncesinde sıcaklığın 850°C'ye çıkarılması,
- Döküm işleminin yapılacağı çelik kalıbın 350°C'ye çıkarılması ve hidrolik pres altında 2 MPa basınçta sıkıştırılması,

şeklindedir.

İmal edilen MMK'larda aşağıdaki bulgular tespit edilmiştir. Bu bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Mikroyapı incelemelerinde, tüm kompozit numunelerde takviye elemanı dağılımının nispeten homojen olduğu görülmüştür.
- Takviye elemanı oranının artması, malzemelerin yoğunluk ve gözenekliliğini arttırmıştır. Üretilen kompozitlerde en yüksek gözeneklilik miktarı, %10 takviyeli kompozitte %1,02 değerinde tespit edilmiştir.
- Takviye hacim oranının artmasıyla malzemenin sertliği de artmıştır. Hacimce %10 SiC takviyeli numune, 26 BHN değerle en yüksek sertliğe sahip malzemedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Chaudhury, S. K., Singh, A. K., Sivaramakrishnan, C. S., and Panigrahi, S. C., "Wear and Friction Behavior of Spray Formed and Stir Cast Al-2Mg-11TiO₂ Composites", *Wear*, 258 (5-6): 759-767 (2005).
- [2] Çiftçi, İ., "Alüminyum Esaslı Kompozitlerde Takviye Oranı ve Boyutunun Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik Üzerine Etkisinin Araştırılması", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2003).
- [3] James, S. J., Venkatesan, K., Kuppan, P., and Ramanujam, R., "Comparative Study of Composites Reinforced With SiC and TiB₂", *Procedia Engineering*, 97: 1012-1017 (2014).
- [4] Gökmeşe, H. and Karadağ, H. B., "Toz Metal AA 2014-SiC-B4C Kompozit/Hibrit Malzemelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6 (2): 385-398 (2018).
- [5] Pul, M. and Şeker, U., "Vakumlu İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen Al-MgO Kompozitlerin Tornalanmak Suretiyle İşlenmesinde Farklı Kesici Takımların Aşınma Davranışlarının Değerlendirilmesi", *Journal of Engineering and Natural Sciences*, (Sigma 28): 179-187 (2010).

- [6] Kumar, A., Lal, S., and Kumar, S., "Fabrication and Characterization of A359/Al₂O₃ Metal Matrix Composite Using Electromagnetic Stir Casting Method", *Journal of Materials Research and Technology*, 2 (3): 250–254 (2013).
- [7] Bains, P. S., Sidhu, S. S., and Payal, H. S., "Fabrication and Machining of Metal Matrix Composites: A Review", *Materials and Manufacturing Processes*, 31 (5): 553–573 (2016).
- [8] Ragab, K. A., Abdel-Karim, R., Farag, S., El-Raghy, S. M., and Ahmed, H. A., "Influence of SiC, SiO₂ and Graphite on Corrosive Wear of Bronze Composites Subjected to Acid Rain", *Tribology International*, 43 (3): 594–601 (2010).
- [9] Nishida, Y., "Introduction to Metal Matrix Composites: Fabrication and Recycling", *Springer Science & Business Media*, 212 (2013).
- [10] Kayabaşı, İ., "Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Sistemi İmalatı ve Performansının İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük*, (2016).
- [11] Suresh, S., "Fundamentals of Metal-Matrix Composites", *Butterworth-Heinemann*, ISBN: 9780080523712, 320–353 (2013).
- [12] Sur, G., "Karma Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi, Mekanik Özellikler ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi", *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara*, (2008).
- [13] Hashim, J., Looney, L., and Hashmi, M. S. J., "Metal Matrix Composites: Production By The Stir Casting Method", *Journal Of Materials Processing Technology*, 92:931–937 (1999).
- [14] Seo, Y.H. and Kang, C.G., "The effect Of Applied Pressure On Particle-Dispersion Characteristics and Mechanical Properties in Melt-Stirring Squeeze-Cast SiCp/Al Composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 55 (3): 370–379 (1995).
- [15] Yue, T. M. and Chadwick, G. A., "Squeeze Casting of Light Alloys and Their Composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 58 (2): 302–307 (1996).
- [16] Dhanashekar, M. and Kumar, V. S. S., "Squeeze Casting of Aluminium Metal Matrix Composites-An Overview", *Procedia Engineering*, 97: 412–420 (2014).
- [17] Singh, M., Rana, R. S., Purohit, R., and Krishnkant, S., "Development and Analysis of Al-Matrix Nano Composites Fabricated by Ultrasonic Assisted Squeeze Casting Process", *Materials Today: Proceedings*, 2 (4): 3697–3703 (2015).
- [18] Sahin, Y., "Preparation and Some Properties of SiC Particle Reinforced Aluminium Alloy Composites", *Materials & Design*, 24 (8): 671–679 (2003).
- [19] Karbalaei Akbari, M., Baharvandi, H. R. and Shirvanimoghaddam, K., "Tensile and Fracture Behavior of Nano/Micro TiB₂ Particle Reinforced Casting A356 Aluminum Alloy Composites", *Materials & Design* (1980-2015), 66 (Part A): 150–161 (2015).
- [20] Mehmet Güler, "Alüminyum Alaşımlarında İnküzyon Çeşitleri ve Önleyici Faaliyetler", *Metalurji Dergisi*, (184): 36–42 (2017).
- [21] Bharath, V., Nagaral, M., Auradi, V., and Kori, S. A., "Preparation of 6061Al-Al₂O₃ MMC's by Stir Casting and Evaluation of Mechanical and Wear Properties", *Procedia Materials Science*, 6: 1658–1667 (2014).
- [22] Balasubramanian, I. and Maheswaran, R., "Effect of Inclusion of SiC Particulates on The Mechanical Resistance Behaviour of Stir-Cast AA6063/SiC Composites", *Materials & Design* (1980-2015), 65 (Supplement C): 511–520 (2015).