

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GENLEŞTİRİLMİŞ KİL TAKVİYELİ AL 7075 MATRİSLİ SİNTAKTİK
KÖPÜK METALİN BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ, FİZİKSEL
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmail Cem AKGÜN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ali GÖKŞENLİ

ŞUBAT 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GENLEŞTİRİLMİŞ KİL TAKVİYELİ AL 7075 MATRİSLİ SİNTAKTİK
KÖPÜK METALİN BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ, FİZİKSEL
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İsmail Cem AKGÜN
503191308**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ali GÖKŞENLİ

ŞUBAT 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503191308 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi İsmail Cem AKGÜN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GENLEŞTİRİLMİŞ KİL TAKVİYELİ AL 7075 MATRİSLİ SİNTAKTİK KÖPÜK METALİN BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ, FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ali GÖKŞENLİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi R. Murat TABANLI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ergin KOSA
Beykent Üniversitesi

Teslim Tarihi : 13.02.2022
Savunma Tarihi : 17.02.2022





Aileme,



ÖNSÖZ

Mühendislik metodolojisiinde tasarımıda karşılaşılan kısıtlamalar, verimliliği artırabilmek amacıyla başka alanlarda da araştırma ve geliştirme ihtiyacını doğurmuştur. Bu gerekçeyle mühendislik malzemeleri alanında yapılan araştırmaların bir kolu da 1900'lerin ortalarında araştırılmaya başlayan köpük metallerdir. Köpük metallerin bir alt kolu olan sintaktik köpük metallere ise akustik, ısı ve mekanik performansları sayesinde son yılların popüler araştırma konularından biri olmuştur. Yüksek dayanıma sahip hafif malzemeler olan sintaktik köpük metallere otomotiv, konstrüksiyon ve havacılık gibi endüstrilerde kendine yer edinmiştir.

Bu çalışmada, dolgu malzemesi olarak geliştirilmiş kil ve matris malzemesi olarak 7075 alüminyum kullanılarak sintaktik köpük metal üretimi sağlanmış, ardından yapılan testler ve analizlerle fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Tez çalışmamda bana her ihtiyacım olduğunda yol göstericilik yapan danışman hocam Doç. Dr. Ali Gökşenli'ye; üretim, test ve analizlerde desteğini esirgemeyen çalışma arkadaşım Araş. Gör. Çağın Bolat'a; numune hazırlama ve diğer teknik konularda tez çalışmamda destek veren İTÜ Makina Fakültesi teknisyenleri Vedat Ali Aksu ve Osman Çelebi'ye ve eğitim öğretim hayatım süresince maddi ve manevi desteklerini daima arkamda hissetmemi sağlayan aileme teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışmanın ilgili alanlarda çalışan üreticilere ve konu hakkında bilgi sahibi olmak isteyen araştırmacılara yardımcı olabildiğini temenni ederim.

Şubat 2022

İsmail Cem AKGÜN
İmalat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xviivii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Köpük Metallerin Tanımı	1
1.2 Köpük Metallerin Tarihçesi	1
2. KÖPÜK METALLER	3
2.1 Köpük Metallerin Sınıflandırılması	3
2.2 Köpük Metallerin Kullanım Alanları	3
2.2.1 İnşaat sektörü	3
2.2.2 Havacılık ve uzay sektörü	4
2.2.3 Otomotiv sektörü	4
2.2.4 Taşımacılık sektörü	5
2.2.5 Biyomedikal kullanım alanları	6
2.3 Köpük Metal Üretim Yöntemleri	6
2.3.1 Gözenek oluşturuıcı maddeyle üretim yöntemi (Alporas)	6
2.3.2 Gaz enjeksiyon yöntemi (Hydro/Alcan)	7
2.3.3 Gasar yöntemi	7
2.3.4 Boşluk tutan malzemeler üzerine döküm yöntemi	8
2.3.5 Toz metale köpürtücü malzeme ekleme yöntemi	8
2.3.6 Asal gaz genleşmesiyle üretim	8
2.4 Sintaktik Köpük Metaller	9
2.4.1 Sintaktik köpük metal üretim yöntemleri	10
2.4.2 Sintaktik köpük metallerle ilgili çalışma örnekleri	12
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	15
3.1 Sintaktik Köpük Metalin Üretilmesinde Kullanılan Malzemeler	15
3.1.1 Dolgu malzemesi ve özellikleri	15
3.1.2 Matris malzemesi ve özellikleri	16
3.2 Üretimde Kullanılan Cihazlar	16
3.2.1 Kamara fırın	16
3.2.2 İndüksiyon ertitme ocağı	17
3.2.3 Basınçlı döküm makinası	17
3.3 Üretim Proses Aşamaları	18
4. BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİYLE SİNTAKTİK KÖPÜK METAL ÜRETİMİ	21
4.1 Proses Parametrelerinin İncelenmesi	21
4.1.1 Enjeksiyon presinin basıncı	21
4.1.2 Enjeksiyon presinin hızı	22
4.1.3 Dolgu malzemesinin sıcaklığı	23
4.1.4 Kalıp sıcaklığı	23
4.1.5 Ergimiş alüminyumun döküm sıcaklığı	24

4.2 Üretilen Numuneler	25
4.2.1 Çökelme sertleşmesi ısıt işlemleri	25
4.3 Mikro Yapı Analizleri	26
4.4 Basma Deneyleri	28
4.4.1 Numune 1 ve 2'nin basma deneyleri.....	30
4.4.2 Numune 3 ve 4'ün basma deneyleri.....	32
4.4.3 Numune 5 ve 6'nın basma deneyleri.....	32
4.4.4 Numune 7 ve 8'in basma deneyleri.....	34
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	35
5.1 Sonuçlar	35
5.2 Öneriler.....	39
KAYNAKLAR.....	41
ÖZGEÇMİŞ	45



KISALTMALAR

ISO	: International Standards Office
SKM	: Sintaktik Köpük Metal
BŞD	: Birim Şekil Değişirme





SEMBOLLER

σ_{pl}	: Plateau gerilmesi
σ_{max}	: Maksimum basma gerilmesi
ρ	: Yoğunluk





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : LECAT genleştirilmiş kilin yüzdece kimyasal bileşimi.....	15
Çizelge 3.2 : 7075 Alüminyum kimyasal bileşimi.	16
Çizelge 3.3 : 7075 Alüminyum mekanik özellikleri.....	16
Çizelge 4.1 : Üretilen numunelerin boyutları ve yoğunluk değerleri.	25
Çizelge 4.2 : Üretilmiş numunelerin yoğunluk değerleri ve mekanik özellikleri.....	34





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Otomotiv sektöründe kullanılan bir panel (Ashby ve diğ, 2000)..Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	
Şekil 2.2 : Alporas yöntemiyle üretim (Ma ve Song, 2007).	6
Şekil 2.3 : Hydro/Alcan yöntemiyle üretim (Banhart, 2001).	7
Şekil 2.4 : Gasar yöntemiyle üretilmiş küresel (a), radyal (b) ve silindirik (c) boşluklu ürünler.	8
Şekil 2.5 : Metal (solda) ve mikrobalon (sağda) dolgu malzemeleriyle üretilmiş SKM'ler (Rohatgi ve diğ, 2011).	9
Şekil 2.6 : Alüminyum ve genleştirilmiş cam kullanılarak üretilmiş bir sintaktik köpük metal.	10
Şekil 2.7 : Basınçlı infiltrasyon yöntemiyle SKM üretimi (Zhang ve diğ, 2009).	11
Şekil 2.8 : Ters gravitasyon yönteminde kullanılan sistemin şematik gösterimi.	12
Şekil 2.9 : Sintaktik köpük metallerin mikroyapısı (Zhang ve Zao, 2007).	13
Şekil 3.1 : LECAT genleştirilmiş 2-4 mm boyutlarında genleştirilmiş kil.	15
Şekil 3.2 : Kamara fırının görünümü.	16
Şekil 3.3 : İndüksiyon ergitme ocağının görünümü.	17
Şekil 3.4 : Numune üretiminde kullanılan basınçlı döküm makinası.	17
Şekil 3.5 : Basınçlı döküm makinasının kontrol paneli.	18
Şekil 3.6 : Basınçlı döküm makinasının kalıbının açık hali.	19
Şekil 3.7 : Basınçlı döküm makinasının kalıplarının kapatılmış hali.	19
Şekil 3.8 : Makina yolluğuna eriyik madenin dökülmesi.	20
Şekil 4.1 : Yüksek basınç sebebiyle gereğinden fazla alüminyum içeren numune. ..	22
Şekil 4.2 : Düşük hız sebebiyle dolumun gerçekleşmediği bir numune.	23
Şekil 4.3 : Düşük küre sıcaklığı sebebiyle tam dolum sağlanamamış bir numune.	23
Şekil 4.4 : Düşük kalıp sıcaklığından ötürü tam dolum sağlanamamış bir numune. ..	24
Şekil 4.5 : Uygulanan T6 yapay yaşlandırma prosesi.	25
Şekil 4.6 : Al-Cu faz diyagramında çökeltme sertleşmesi safhaları (Askeland, 1998).	26
Şekil 4.7 : FORCIPOL 2V zımpara ve parlatma cihazı.Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	26
Şekil 4.8 : Nikon SMZ 800 optik mikroskop.Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	27
Şekil 4.9 : Sintaktik köpük metalin mikroyapısı.	27
Şekil 4.10 : Dartec 600 kN hidrolik pres.	28
Şekil 4.11 : Isıl işlem uygulanmış (altta) ve uygulanmamış (üstte) birer numune (üstten).	29
Şekil 4.12 : Isıl işlem uygulanmış (solda) ve uygulanmamış (sağda) birer numune (önden).	29
Şekil 4.13 : Gerilme-BŞD eğrisinde Plateau karakteristiği (Atenaiji ve diğ, 2014)..	30
Şekil 4.14 : Numune 1 ve 2'nin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafiği.	31
Şekil 4.15 : Numune 2'den deney esnasında kopan parça.	31
Şekil 4.16 : Numune 3 ve 4'ün Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafiği.	32

Şekil 4.17 : Numune 5 ve 6'nın Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafiği.	33
Şekil 4.18 : Numune 6'dan basma deneyi esnasında kopmuş ana parçalar.	33
Şekil 4.19 : Numune 7 ve 8'in Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafiği.	34
Şekil 5.1 : Tüm numunelerin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri.	35
Şekil 5.2 : Sintaktik köpük metalin iç yapısı.	36
Şekil 5.3 : Numunelerin Plateau dayanımları-yoğunluk grafiği.	36
Şekil 5.4 : Numunelerin maksimum gerilme-yoğunluk grafiği.	37
Şekil 5.5 : Plateau gerilmesi ortalama değerlerinin literatürdeki verilerle karşılaştırılması.	38
Şekil 5.6 : Ortalama maksimum basma dayanımının literatür verileriyle karşılaştırılması.	38



GENLEŞTİRİLMİŞ KİL TAKVİYELİ AL 7075 MATRİSLİ SİNTAKTİK KÖPÜK METALİN BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ, FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Tasarım metodolojisinde varılan ileri yaklaşımlarla birlikte malzemelerin geliştirilmesi amacıyla araştırma ihtiyacı doğmuştur. Düşük yoğunluklarda yüksek dayanım elde etmeyi hedefleyen köpük metaller de bu ihtiyacın bir çıktısı olarak literatürde yerini almıştır. Köpük metaller mekanik, ısı ve akustik açısından üstün özellikleri sayesinde başta otomotiv, inşaat ve havacılık olmak üzere birçok sektörde kendilerine yer bulmuştur. Karmaşık üretim yöntemleri ve yöntemlerin kısıtları, daha farklı üretim teknikleriyle üretilen sintaktik köpük metallerin araştırılmasına sebep olmuştur.

Temelde bir dolgu malzemesiyle matris malzemesinin birleşimi ile düşük yoğunlukta yüksek dayanımlara sahip ürünler elde edilmesi hedeflenen bir alt grubu olan sintaktik köpük metallerde (SKM) geleneksel köpük metallere göre daha farklı üretim yöntemleri uygulanıp daha farklı malzemeler kullanılmaktadır. Üretim yöntemleri infiltrasyonla üretim ve dağıtım ile üretim olmak üzere iki ana grupta incelenir. Dolgu malzemesi olarak ponza taşı, genleştirilmiş cam ve genleştirilmiş perlit gibi seramikler kullanılırken, matris malzemesi olarak da titanyum, alüminyum ve başka metal alaşımları kullanılmaktadır.

Sintaktik köpük metallerin gözenekli yapısı, bu ihtiyaçlara çözüm sağlamaktadır. Sintaktik köpük metallerin üretiminde kullanılan hammaddeler ve üretim parametreleri son ürünlerin yoğunlukları ve dolayısı ile mekanik özellikleri üzerinde etki sahibidir. Literatürde yapılan çalışmalarda bu farklılıklar görülmektedir. Bu tez çalışmasında dolgu malzemesi olarak genleştirilmiş kil küreler kullanılarak alüminyum matrisli sintaktik köpük metaller üretilmiştir. Üretilen numunelerin yoğunlukları $1,89 - 1,95 \text{ g/cm}^3$ aralığında çıkmıştır. Bu değer, yoğunluk değeri $2,81 \text{ g/cm}^3$ olan 7075 alüminyum alaşımı ve $1,068 \text{ g/cm}^3$ olan genleştirilmiş kil malzemelerinin arasında olup beklenen aralıklardadır.

Bu tez için üretilen sintaktik köpük metaller soğuk hazneli kalıba basınçlı döküm yöntemiyle üretilmiştir. Karmaşık olmayan bu yöntem, seri üretime uygunluğuyla ön plana çıkmaktadır. Üretim prosesi için dolgu malzemeleri 400°C sıcaklıkta 20 dakika

bekletildikten sonra döküm kalıbına yerleştirilmiş, sonrasında kalıp kapatılarak 800°C’de eritilmiş alüminyumun bir enjeksiyon silindiri yardımıyla kalıbın içine infiltrasyonu sağlanmıştır.

Tez çalışma kullanılacak numunelerin üretimi esnasında üretimde etkin olan diğer parametrelerin üretim sürecine etkisi gözlemlenmiştir. Dolgu malzemesinin ön ısıtma sıcaklığı olması gerekenden yüksek olduğu takdirde dolgu malzemesinde sinterlenmeler olduğu, düşük olduğu takdirde ise kalıp boşluğu içinde soğuk kürelerle temas eden erimiş metalin erken katılaştığı gözlemlenmiştir. Dolgu malzemesinin ön ısıtma sıcaklığı olarak 400°C olarak belirlenmiştir. Erimiş metalin kalıp içine infiltrasyonunda kullanılan enjeksiyon silindirinin basınç ve hız değerleri de üretim süreçlerine etki etmektedir. Olması gereken basınç ve hız değerlerinden daha yüksek basınç ve hız değerleri kullanıldığı takdirde istenen özelliklere sahip numuneler elde edilemediği tespit edilmiştir. Yapılan denemeler neticesinde uygun silindir basıncı 30 MPa ve piston hızı olarak 40 mm/s belirlenmiştir. Sintaktik köpük metal üretiminde bir diğer önemli parametre olan kalıp sıcaklığı 80°C olduğu takdirde numune üretimi sağlanamamış, 230°C’ye ısıtıldığı takdirde numune üretimi sağlanmıştır. 800°C’de dökümü yapılan erimiş metalin sıcaklığı daha düşük olduğu takdirde kalıp içinde tam dolum gözlenmezken, çinko kaybına mahal vermemek adına daha yüksek döküm sıcaklıklarına çıkılmamıştır. Tüm bu parametreler ışığında yürütülen üretim süreçleri neticesinde 45 mm çap ve 80 mm yüksekliğe sahip sintaktik köpük metal numuneler üretilmiştir.

Numuneler, üretim sonrasında makro ve mikro muayene işlemleri için zımparalanmış ve parlatılmıştır. Parlatılan numunelere yapılan makro ve mikro muayenelerde sintaktik yapı içinde en dar aralıklara kadar nüfuziyet sağlandığı gözlenmiştir. Yapıda döküm ve çekme boşlukları gözlemlenmiştir fakat bu boşluklar sintaktik yapının yoğunluğunu düşürmeye yardımcı olduklarından ötürü arzu edilen unsurlardır fakat çoğaldıkları takdirde yapının kırılma karakteristiğine etki ederek mekanik özelliklerde kayba yol açabilmektedir.

Üretim işleminden sonra numuneler yoğunluklar açısından küçükten büyüğe sıralanıp numaralandırıldıktan sonra yoğunlukları birbirine yakın numuneler ikiye bölünmüş olarak gruplandırılmıştır. Mekanik özelliklerdeki iyileştirmeyi incelemek adına bu numunelerin bazıları çökelme sertleşmesi işlemine tabi tutulmuştur. Çökelme sertleşmesi işlemi için numuneler önce 480°C’de 3 saat bekletilmiş, ardından su verildikten sonra 120°C’de 24 saat boyunca yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuştur.

ISO 13314 standardında yapılan deneyler sonucunda ısıt ışlemsiz numunelerin ortalama Plateau gerilmesi ve maksimum basma gerilmesi değerleri sırasıyla 34,1 MPa ve 93,05 MPa; ısıt ışlemlili numunelerin ortalama Plateau gerilmesi ve maksimum basma gerilmesi değerleri sırasıyla 52,55 MPa ve 131,65 MPa olarak tespit edilmiştir. Enerji absorpsiyon kapasiteleri ısıt ışlemsiz numunelerde ortalama 33,67 MJ/m³, ısıt ışlemlili numunelerde ortalama 41,04 MJ/m³ olarak hesaplanmıştır. İkilili gruplar arasında yapılan kıyaslamalarda ısıt ışlemlili numuneler ve ısıt ışlemsiz numuneler arasında Plateau gerilmeleri oranları ve maksimum basma gerilmesi oranları sırasıyla 1,55 ve 1,42 kat olarak hesaplanmış, ısıt ışlem vasıtasıyla numunelerin mekanik özelliklerinde olan iyileşme ispatlanmıştır.

Yapay yaşlandırma uygulanmış numunelerin maksimum basma dayanımları yüksek olsa da kırılma karakteristiklerinin farklılıkları sebebiyle bazı numunelerde Plateau bölgesindeki gerilme değerlerinde ani dūřüşler gözlemlenmiştir. Bu dūřüşlerin sebebi olarak metalin iç yapısının değişmesi ve yapı içindeki boşlukların arzu edilenden büyük olduğu takdirde sintaktik köpük metalin kırılma karakteristiğine etki ettiği tespit edilmiştir.

Özetle, bu tez çalışmasında soğuk haznelili kalıba basınçlı döküm yönteminde uygun parametreler belirlenerek genleştirilmiş kil takviyeli, 7075 alüminyum matrisli sintaktik köpük metal üretimi başarıyla sağlanmıştır. Üretim sonrasında numunelerin iç yapısı incelenip üretim başarısı gözlemlenmiştir. Numunelerin bazılarına çökeltme sertleşmesi uygulanarak ısıt ışlemlili ve ısıt ışlemsiz numuneler arasındaki Plateau gerilmesi, maksimum basma dayanımı ve enerji absorpsiyon kapasitesi gibi mekanik özellikler incelenerek ısıt ışlemlili ve ısıt ışlemsiz numuneler kıyaslanmıştır. Çökeltme sertleşmesi uygulanmış numunelerin daha iyi mekanik özellikler sergilediği görölmüştür. Çalışmanın sonuçları literatürdeki diğer çalışmalarla kıyaslanmış ve kullanılan malzeme ve üretim yönteminin üretilen numunelerin yoğunluğuna etki ettiği gözlemlenmiştir. Sintaktik köpük metallerin üretim yöntemlerine yenilikçi bir yaklaşım sergilenmesi hedeflenen bu tez çalışmasında elde edilen bulguların ileride bu alanda yapılacak başka çalışmaları destekler nitelikte olacağı düşünölmektedir.



PRODUCTION OF EXPANDED CLAY REINFORCED AL 7075 MATRIX SYNTACTIC FOAM BY DIE CASTING METHOD AND INVESTIGATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

SUMMARY

With the advanced approaches in engineering design, the need for research has arisen for the development of materials. Foam metals, which aim to achieve high strength values at low densities, have also taken their place in the literature as an output of this need. Due to their superior mechanical, thermal and acoustic properties, foam metals have found a place for themselves in many sectors, especially automotive, construction and aviation. Complex production methods and limitations of the methods have led to the investigation of syntactic foam metals produced with different production techniques.

Metal matrix syntactic foams (MMSFs), which are basically a subgroup that aims to obtain products with low density and high strength by combining a filler material and matrix material. Different production methods are applied and different materials are used compared to traditional foam metals. Production methods are examined in two main groups as production by infiltration and production by distribution. While ceramics such as pumice stone, expanded glass and expanded perlite are used as filler material in metal matrix syntactic foams, titanium, aluminum and other metal alloys are used as matrix material.

During the production of the samples to be used in the thesis study, the effect of other parameters that are effective on the production process was observed. It has been observed that if the preheating temperature of the filler material is higher than it should be, sintering occurs in the filler material and if it is low, the molten metal in contact with the cold filler materials in the mold and solidifies prematurely. The preheating temperature of the filling material was determined as 400°C. The pressure and speed values of the injection cylinder used in the infiltration of the molten metal into the mold also affect the product quality. It has been determined that samples with the desired properties cannot be obtained if pressure and velocity values higher than the required pressure and velocity values are used. As a result of the trials, the appropriate cylinder pressure was determined as 30 MPa and the piston speed was determined as 40 mm/s. Sample production could not be achieved if the mold temperature, which is another important parameter in syntactic foam metal production, was 80°C, and

sample production was provided if it was heated to 230°C. If the temperature of the molten metal cast at 800°C is lower, full filling is not observed in the mold, and higher casting temperatures are not reached in order to avoid zinc loss. As a result of the production processes carried out in the light of all these parameters, syntactic foam metal samples with a diameter of 45 mm and a height of 80 mm were produced.

The samples were sanded and polished for macro and micro inspection processes after production. In the macro and micro examinations made on the polished samples, it was observed that penetration was achieved up to the narrowest gaps in the syntactic structure. Casting and shrinkage voids have been observed in the structure, but these are desirable elements as they help to reduce the density of the syntactic structure, but if they grow larger than their maximum desired size, they can affect the fracture characteristics of the structure and cause loss of mechanical properties.

After the production process, the samples were sorted and numbered from the smallest to the largest in terms of densities, and then the samples with close densities were grouped in pairs. Some of these samples were subjected to precipitation hardening to examine the improvement in mechanical properties. For the precipitation hardening process, the samples were first kept at 480°C for 3 hours and then artificially aged at 120°C for 24 hours after quenching.

As a result of the tests performed in ISO 13314 standard, the average Plateau stress and maximum compressive stress values of the samples without heat treatment were 34,1 MPa and 93 MPa, respectively; Average Plateau stress and maximum compressive stress values of heat treated samples were determined as 52,6 MPa and 131,7 MPa, respectively. The energy absorption capacities were calculated as 33,7 MJ/m³ on average for untreated samples and 41 MJ/m³ for heat treated samples. In the comparisons made between the heat treated samples and the non-heat treated samples, Plateau stress ratios and maximum compressive stress ratios were calculated as 1,55 and 1,42 times, respectively. The improvement in the mechanical properties of the samples by heat treatment was proven.

Although the maximum compressive strength values of the heat-treated samples are high, sudden decreases in the stress values in the Plateau region were observed in some samples due to the differences in fracture characteristics. It has been determined that the reason for these decreases is the change in the internal structure of the metal and if the gaps in the structure are larger than desired, it affects the fracture characteristics of the syntactic foam metal.

In conclusion, the production of expanded clay reinforced, 7075 aluminum matrix syntactic foam metal was successfully achieved by determining the appropriate parameters in the cold chamber mold pressure casting method in this thesis study. After the production, the internal structure of the samples was examined and the production success was observed. By applying precipitation hardening to some of the samples, the mechanical properties such as Plateau stress, maximum compressive strength and energy absorption capacity between the heat-treated and as-cast samples were examined and the heat treated and non heat treated samples were compared. It was observed that the heat treated specimens exhibited better mechanical properties. The results of the study were compared with other studies in the literature and it was observed that the material and production method used affect the density of the produced samples. It is thought that the findings obtained in this thesis study, which aims to exhibit an innovative approach to the production methods of syntactic foam metals, will support other studies to be done in this field in the future.



1. GİRİŞ

1.1 Köpük Metallerin Tanımı

Günümüz mühendislik yaklaşımında maliyeti azaltma ve fonksiyonelliği artırma çalışmalarının sadece mekanik tasarım ile değil, aynı zamanda amaca uygun malzeme seçimi, gerektiği takdirde malzeme tasarımı ve malzeme özelliklerinin ihtiyaca uygun şekilde yönlendirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Arzu edilen mekanik özellikleri daha hafif malzemelerle sağlama yönünde çalışmalar geçtiğimiz yıllarda artış göstermiştir. Bu amaç güdülerek yapılan çalışmalarda araştırılan malzeme gruplarından bir tanesi de Sintaktik Köpük Metallerdir (SKM). Yapı içinde çeşitli dolgu ve matris malzemeleri kullanılmak suretiyle imal edilen kapalı hücreli SKM'lere ek olarak matris malzemesinin içinde boşluk oluşturmak suretiyle üretilen açık hücreli SKM'ler olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Arzu edilen fonksiyona ve kullanım amacına göre üretim yöntemi ve malzeme tasarımı tespit edilmektedir.

Dolgu malzemesi ve matris malzemesinin bir araya getirilmesi suretiyle oluşturulan kapalı hücre SKM'lerde dolgu malzemesi elde edilen yeni yapının yoğunluğunu matris malzemesinin altına çekmeye yardımcı olup matris malzemesinin basma yükü altında davranışını değiştirirken aynı zamanda basma dayanımının yoğunluğa olan oranını yüksek tutmaya ve aynı zamanda üretilen malzemenin enerji soğurma kapasitesini yüksek tutmaya yardımcı olmaktadır. Bahsi geçen avantajlar günümüzde yapılan optimizasyon çalışmaları neticesinde doğan hafif malzeme ihtiyacını mekanik ve fiziksel özelliklerden edilen feragatı en aza indirmeyi sağlar. Bu sebeple SKM'ler sağlık, inşaat, otomotiv ve havacılık gibi endüstrilerde kullanılmak üzere araştırılan malzemeler arasında yerini almıştır (Banhart, 2000).

1.2 Köpük Metallerin Tarihçesi

Metal köpükler 1940'larda araştırmacılar tarafından araştırılmaya başlanmıştır. Araştırmacı Benjamin Sosnick tarafından gerçekleştirilen bu ilk çalışmalarda alüminyum ve cıva basınç altında bir potada eritilmiş ve potadan basınç kaldırılınca

cıva, alüminyumun katılma sıcaklığında buharlaşmak suretiyle karışımından uzaklaşarak gözenekli yapının ilk eldesini sağlamıştır (Banhart, 2013). İlerleyen yıllarda William Elliot ve Stuart Fiedler tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda alüminyumun köpükleştirilmesi, eriyik metalin oksidasyonu ile gerçekleştirilerek ABD ordusu tarafından kullanılacak bir panel üretildi. Üretim süreçlerinin karmaşıklığı sebebiyle üretim maliyetini düşürmenin zorluğu, köpük metaller alanında yapılan çalışmaları haliyle kısıtladı.

1980’lerde Japon Shinko Wire adlı şirkette çalışan mühendisler ve Kyushu Ulusal Endüstriyel Araştırma Enstitüsü’ndeki araştırmacılar tarafından geliştirilen ürüne adını veren Alporas adlı üretim süreci, eriyik madene kalsiyum ilave edilmek suretiyle eriyiğin viskozitesini artırırken viskozitesi artmış eriyiğe titanyum hidrür eklenmek suretiyle köpük metal üretimini gerçekleştirmeyi hedeflemiştir. (Banhart, 2013).

2. KÖPÜK METALLER

2.1 Köpük Metallerin Sınıflandırılması

Köpük metaller, sahip oldukları hücre yapılarına göre açık hücreli ve kapalı hücreli olarak sınıflandırılırlar (Ashby ve Evans, 2000). Kullanım amacına göre tercih edilecek köpük metal sınıfı değişim gösterebilir. Akışkan geçirgenliğinin yüksekliği ve yalıtım özellikleri, açık hücreli köpük metalleri gemi endüstrisi ve çeşitli filtreleme uygulamalarında tercih edilebilir kılar. Bunun yanında otomotiv ve inşaat gibi yüksek dayanım ve düşük yoğunluğun arzu edildiği sektörlerde ise kapalı hücre köpük metaller kullanılmaktadır.

Yapı içindeki gözenekler eğer birbirleriyle birleşmişse, bir başka deyimle yapının bir tarafından tatbik edilen bir akışkanın yapı içinden geçmek suretiyle yapının diğer ucundan çıkması mümkün ise bu tip yapılar açık hücreli köpük metaller olarak isimlendirilirler.

Kapalı hücre köpük metallerde ise köpük yapı içindeki boşlukları oluşturan hücrelerin hepsi birbirinden bağımsızdır ve hücreler arasında geçiş yoktur. Genellikle kapalı hücre köpük metaller, açık hücre köpük metallere göre daha yüksek yoğunluğa ve dayanıma sahiptir.

2.2 Köpük Metallerin Kullanım Alanları

2.2.1 İnşaat sektörü

Köpük Metallerin kullanım alanlarından bir tanesi inşaat sektörüdür. Düşük ağırlık, yanma direnci, akustik izolasyon ve elektromanyetik dalgalara karşı yalıtım gibi

özellikleri inşaat sektöründe köpük metallerin kullanılma sebeplerinden bazılarıdır (Hipke ve diğ, 2014).

Yapılan çalışmalar neticesinde geleneksel metal plakalarla yapılan balkon inşaatlarında köpük metal tercihinin malzemenin hafifliği sayesinde nakil ve montaj maliyetlerinden kazanç sağladığı ortaya çıkarılmıştır (Smith ve diğ, 2012).

2.2.2 Havacılık ve uzay sektörü

Yüksek maliyetli petek levhalar, havacılık ve uzay sektöründe yerini görece daha düşük maliyetli köpük metallere bırakmıştır. Köpük metallerin hafifliğinin yanında mekanik açıdan sahip olduğu izotropik özellikler de bu malzemelerin havacılık ve uzay endüstrisi açısından tercih sebebi olmasında bir etkindir (Banhart, 2001).

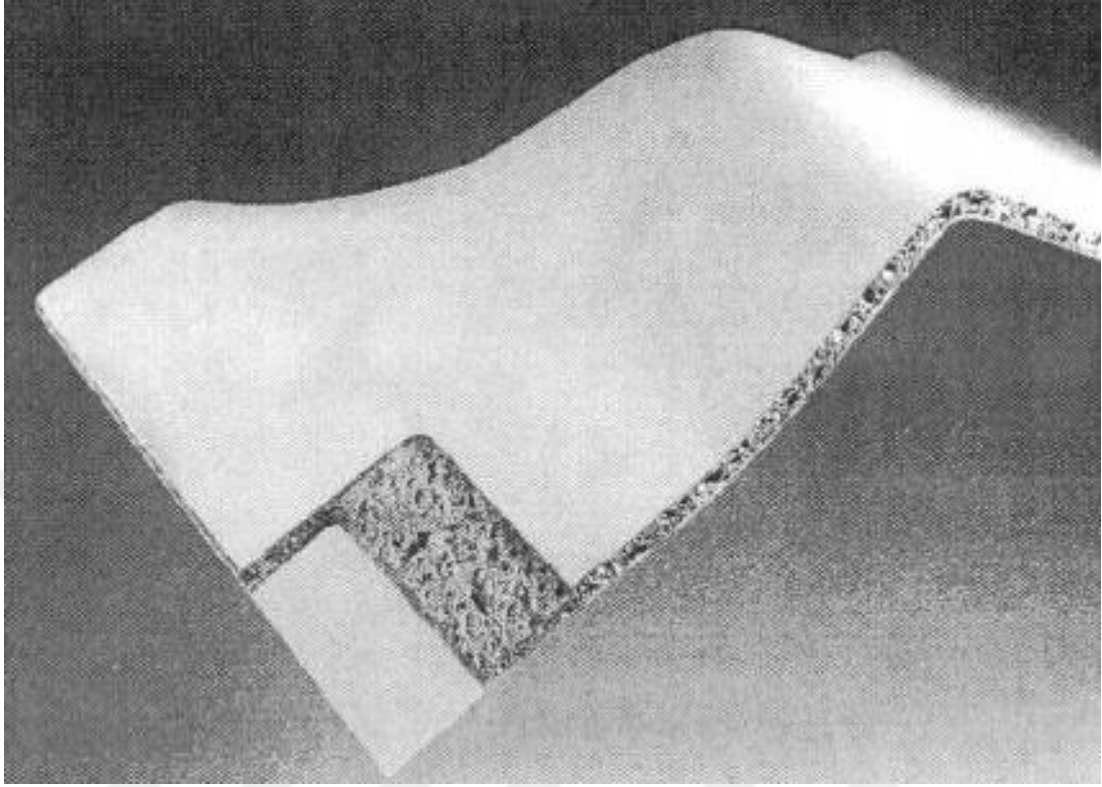
Boeing tarafından kullanılan üretim yöntemiyle üretilmiş parçalarda kavisli geometrilere imkan tanınması, helikopterlerin kuyruk bölümlerinde kullanılan bazı parçaların alüminyum bazlı köpük metaller olmasına olanak sağlamıştır. Aynı zamanda hava araçlarının iniş takımlarında enerji soğurma kapasitesi sebebiyle köpük metaller kullanılmaktadır. Uçak motorlarında kullanılan yağı filtrelemekle görevli makine elemanlarında açık hücreli köpük metalin alternatif malzeme olarak kullanıldığı çalışmalar icra edilmiştir (Nie ve diğ, 2018).

2.2.3 Otomotiv sektörü

Otomobil tasarımında hem üreticiye, hem de tüketiciye daha az maliyet oluşturma çabası, otomotiv sektöründe daha düşük yoğunluğa sahip yapısal parçaların kullanılması ihtiyacını doğurmuştur. Bu ihtiyaca ek olarak tasarımda otomobil kabininin akustik izolasyonunu iyileştirme çabası da köpük metalleri otomotiv sektörü açısından ihtiyaç duyulan bir malzeme haline getirmiştir (Banhart, 2001).

Otomotiv sektörü ile alakalı yapılan çalışmalarda geleneksel çelik paneller yerine köpük metaller kullanıldığı takdirde arzu edilen mekanik özelliklerin elde edilebildiği, yaklaşık on kat daha yüksek dayanıma sahip malzemelerin sadece yüzde yirmi maliyet

artışıyla üretildiği tespit edilmiştir (Eifert ve diğ, 1999). Şekil 2.1’de otomotiv sektörü için üretilmiş bir köpük metal görülmektedir.



Şekil 2.1: Otomotiv sektöründe kullanılan bir panel (Ashby ve diğ, 2000).

Araçlarda çarpışma enerjisini soğurması amacıyla muhtelif noktalara yerleştirilmiş olarak bulunan çarpışma kutularının köpük metal formunda üretildiği takdirde 2.2 kata kadar daha yüksek enerji soğurma kapasitelerine sahip olabildiği sonucuna varılmıştır (Srinath ve diğ, 2010).

2.2.4 Taşımacılık sektörü

Yüksek enerji soğurma kapasitesi, kent içinde hafif raylı ulaşım sistemlerinin kullanımında ortaya çıkabilecek olası kazalarda yaşanması muhtemel can ve mal kayıplarının önüne geçebilecek bir özelliktir. Bu gerekçeyle Japonya’da bazı trenlerin köpük metallerle güçlendirildiği gözlemlenmiştir (Banhart, 2001).

Gemilerin üretim sürecinde standart gövdelerden ziyade gemi inşaatı esnasında şekillendirilen parçaların kullanılması prosedürü, sahip oldukları yapı gerekçesiyle köpüklü metalleri bu sektörde tercih edilebilir bir malzeme haline getirmiştir. Aynı

zamanda köpük metallerin sahip olduğu korozyon direnci, köpük metalleri bu sektör için daha arzu edilir kılmıştır (Banhart ve diğ, 1998).

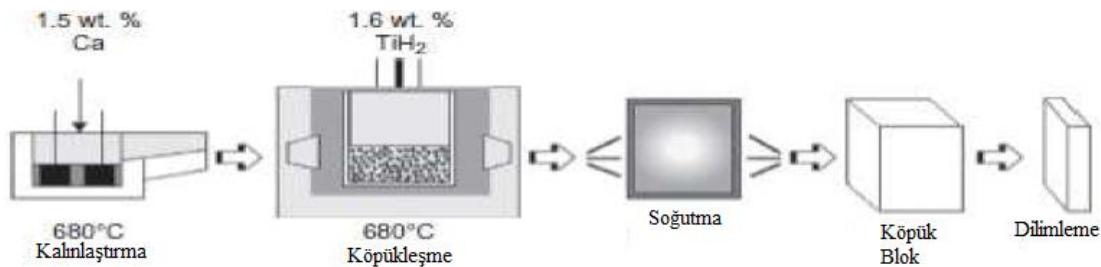
2.2.5 Biyomedikal kullanım alanları

Magnezyum matrisli ve cam küreler kullanılarak üretilmiş sintaktik köpük metaller üzerine yapılan bir çalışmada, ortaya çıkan ürünün saf magnezyum kullanılarak üretilen ürünlere kıyasla 2.5 kat daha fazla aşınma direncine sahip olduğu gözlenmiştir. İnsan vücudunun magnezyum ile uyum problemleri yaşamaması, zehirleyici olmaması ve hafifliği halihazırda bu madeni biyomedikal alanda tercih edilebilir bir malzeme yaparken magnezyum matrisli köpük metallerin korozyon direncinin yüksekliği bu köpük metalleri daha arzu edilir kılar. Mikro-ark oksidasyon yöntemiyle kaplanmış magnezyum matrisli köpük metallerin biyomedikal alanda kullanımı üzerine çalışmalar mevcuttur (Rua ve diğ, 2019).

2.3 Köpük Metal Üretim Yöntemleri

2.3.1 Gözenek oluşturmucu maddeyle üretim yöntemi (Alporas)

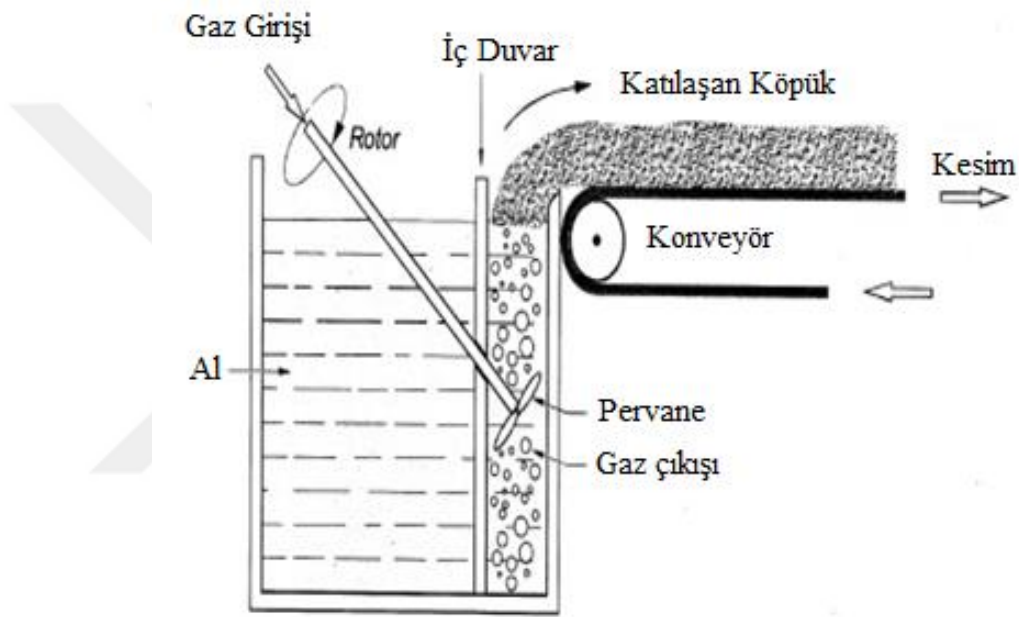
İlk üretilen ürüne de aynı zamanda adını vermiş olan Alporas yöntemi, Japonya menşeli Shinko Wire firması tarafından patentlenmiş ve 1985 yılı itibariyle kullanılmaya başlanmıştır (Miyoshi ve diğ, 1998). Şekil 2.2’de akış şeması belirtilen yöntem, temel olarak erimiş halde bulunan metal içerisine önce metalin viskozitesini artıracak bileşenler eklenerek metal stabilize edildikten sonra gaz çıkışı sağlayacak bileşenin eklenmesiyle gaz çıkışını ve bu vesileyle gözenekli bir yapı elde edilmesini hedefler. Elde edilen gözenekli yapı proses sonrasında dilimlenerek nihai ürün oluşturulur (Naboychenko ve Yefimov, 2018).



Şekil 2.2: Alporas yöntemiyle üretim (Ma ve Song, 2007).

2.3.2 Gaz enjeksiyon yöntemi (Hydro/Alcan)

1989 yılında Norveç menşeli Norsk Hydro ve Kanada menşeli Alcan firmaları tarafından patentlenip 2000'lerin başlarından itibaren kullanılmaya başlanan Hydro/Alcan yöntemi, stabilize edilmiş eriyik metalin içine bir karıştırıcı içinden üflenen hava veya başka gazlar vesilesiyle baloncuk üretilip eriyiği köpürterek köpük metal üretmeyi hedefler. Şekil 2.3'te şematik gösterimi yapılan bu yöntemle yüksek hacimde düşük yoğunluğa sahip metal köpüklerin üretilmesi mümkündür (Banhart, 2001).

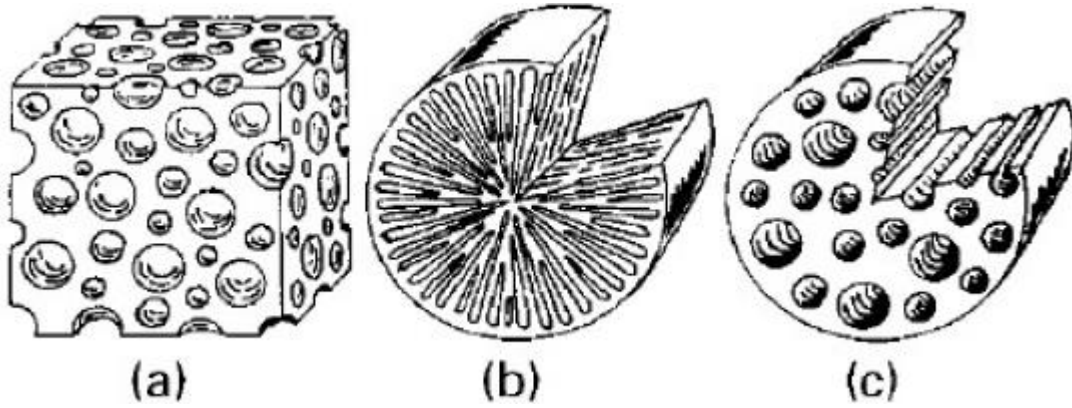


Şekil 2.3: Hydro/Alcan yöntemiyle üretim (Banhart, 2001).

2.3.3 Gasar yöntemi

Gasar yöntemi, 1990'larda Ukrayna'da geliştirilmiş bir yöntemdir. İlk etapta hidrojen gazının eriyik metale yüksek basınçla uygulanarak doygun bir çözelti eldesi sağlanır. Daha sonra sıcaklık düşürülmesiyle ötektik faz dönüşümünden faydalanılarak katı ve gaz içeren yeni formun eldesi sağlanır. Bu yöntemde kullanılan metallerin ısı iletim katsayısı önemlidir çünkü metal yavaş soğuduğu takdirde metalin içinde bulunan gözeneklerin boyutu istenen büyüklüğün üzerine çıkabilir (Drenchev ve diğ., 2006).

Eriyik maden içindeki hidrojen derişimi, soğutma hızı, maden içindeki alaşım oranları ve uygulanan basınç gibi parametreler oluşan gözenek sayısına ve gözenek geometrisine etki eden faktörlerden bazılarıdır. Şekil 2.4'te Gasar yöntemiyle elde edilen bazı formlar gösterilmiştir (Drenchev ve diğ., 2006).



Şekil 2.4: Gasar yöntemiyle üretilmiş küresel (a), radyal (b) ve silindirik (c) boşluklu ürünler.

2.3.4 Boşluk tutan malzemeler üzerine döküm yöntemi

Bu yöntemin temel amacı, ikame malzemeler üzerine eriyik madeni dökmek suretiyle gözenekli yapıya sahip köpük metal üretimidir. Prosesin ifası sonrasında yapı içinde boşluk yaratması için bulundurulmuş malzemeler çözelti, asitler veya ısıtma işlemleri yardımıyla uzaklaştırılmak suretiyle köpük formunda son ürün elde edilir. Yöntemin en büyük avantajı, proses öncesinde yerleştirilen ikame malzemelerin büyüklüğünü belirlemenin sağladığı gözenek dağılımını ve boyutunu kontrol edebilme esnekliğidir (Banhart, 2001).

2.3.5 Toz metale köpürtücü malzeme ekleme yöntemi

Bu yöntem, temelde toz formdaki metal veya alaşımların köpürtücü özelliğe sahip malzemelerle karıştırıldıktan sonra kompakt hale getirilerek yarı mamul üretimini sağlar. İlk aşama sonrasında yarı mamule ısıtma işlemi uygulanmak suretiyle köpürtücünün metal matris içinde homojen olarak dağıtılarak difüze olması hedeflenir. Hasıl olan gaz eriyiği genişleten bir kuvvet uygulayarak gözenekli bir yapının elde edilmesini sağlar. Alüminyumun yanında kalay, pirinç, altın gibi metallerden de köpük metal üretimi bu yöntem kullanılarak mümkün kılınır (Banhart, 2000).

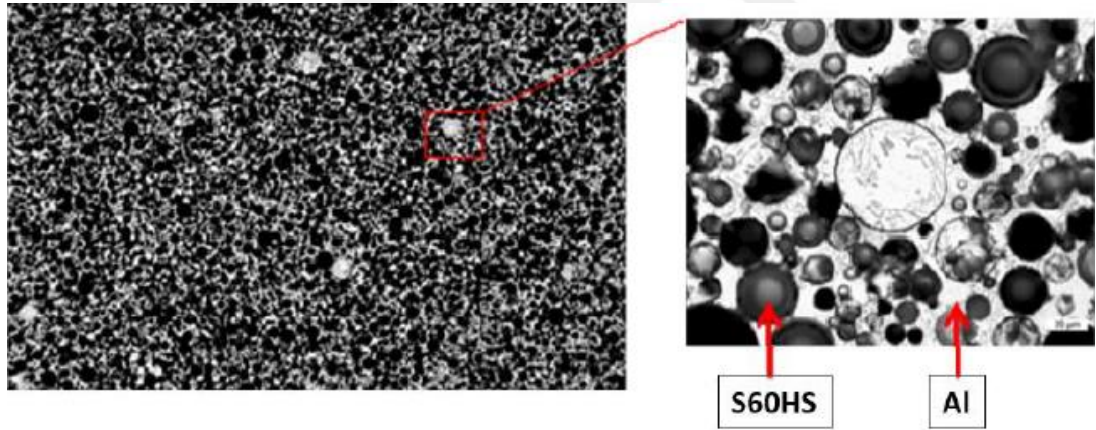
2.3.6 Asal gaz genişlemesiyle üretim

Boeing firması tarafından geliştirilen bu yöntem, asal gazları içinde bulunduran sızdırmaz bir kap içinde metal tozlarının basınçlanmasıyla ifa edilir. Titanyum, bakır ve nikel gibi elementlerin kullanıldığı bu yöntemin ilk aşamasında sızdırmaz kap metal tozları ile doldurulup vakumlanır. Ardından argon gazı kullanılarak sızdırmaz kaba

basınç uygulanır. İzostatik presleme işlemi uygulandıktan sonra erime sıcaklığının %60'ı mertebelerinde kap ısıtma işlemi bırakılır. Asıl gazın metal matris içinde yarattığı boşluk büyüdüktan sonra yarı mamul haddelemeye gönderilir (Banhart ve Baumeister, 1998).

2.4 Sintaktik Köpük Metaller

Geleneksel köpük metallerin üretim yöntemlerinin yüksek maliyeti, araştırmacıları daha düşük maliyetle ve daha kolay yöntemlerle köpük metal üretmeye itmiştir. Bu sebeple “Sintaktik Köpük Metaller” adı verilen ve temelde cam, seramik veya boş metal kürelerin matris malzemesiyle birleşerek yeni bir yapı hedeflenerek üretimi yapılan malzemeler geliştirilmiştir (Rohatgi ve diğ, 2011). Yapı içine yerleştirilecek dolgu malzemelerinin ve dolgu geometrilerinin çeşitliliği, sintaktik köpük metaller alanını yeni çalışmalara açık kılmıştır. Şekil 2.5'te farklı farklı tipte dolgu malzemeleri kullanılarak üretilen sintaktik köpük metallere iki örnek verilmiştir.



Şekil 2.5: Metal (solda) ve mikrobalon (sağda) dolgu malzemeleriyle üretilmiş SKM'ler (Rohatgi ve diğ, 2011).

Sintaktik köpük metallerde matris malzemesi olarak alüminyum (Tao ve diğ, 2009), titanyum (Mondal ve diğ, 2012), çinko (Yang ve diğ, 2018) ve magnezyum (Daoud ve diğ, 2007) gibi metallerin alaşımının kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar neticesinde matris malzemelerinin farklılıkları sebebiyle üretilmiş numunelerde farklı karakterler ve mekanik özellikler gözlemlenmiştir. Şekil 2.6'da Bolat ve diğ. (2021) tarafından matris malzemesi olarak 7075 alüminyum ve dolgu malzemesi olarak geliştirilmiş cam kullanılarak üretilmiş bir sintaktik köpük metal numunesi görülmektedir.



Şekil 2.6: Alüminyum ve genişletilmiş cam kullanılarak üretilmiş bir sintaktik köpük metal.

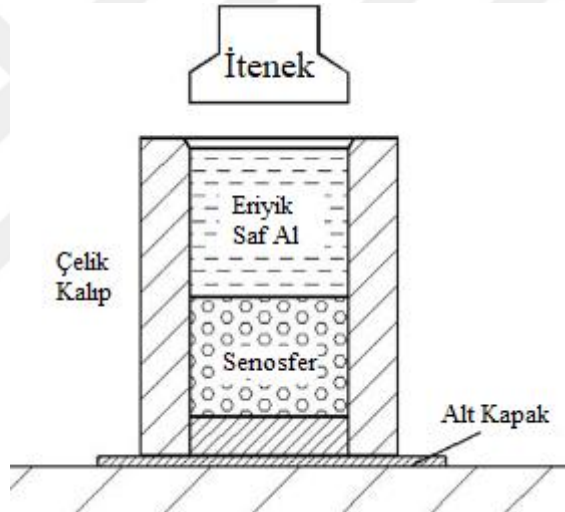
Dolgu malzemesi olarak seramikler (Balch ve Dunand, 2006), senosferler (Mondal ve diğ, 2009) ve metaller (Szlancsik ve diğ, 2015) kullanılmaktadır. Dolgu malzemeleri yapıları gereği içi boş cidarlı küresel ve içi dolu ve gözenekli yapıda olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. İçi boş yapılara örnek olarak Alüminadan üretilmiş baloncuk yapıya sahip malzemeler ve gözenekli yapıya örnek olarak bu çalışmada kullanılmış olan genişletilmiş kil malzemesi örnek gösterilebilir. Sintaktik yapı içinde kullanılacak dolgu malzemeleri son ürünün yoğunluğu ve mekanik özellikleri üzerinde dominant bir etkiye sahiptir.

2.4.1 Sintaktik köpük metal üretim yöntemleri

Sintaktik köpük metal üretim yöntemleri infiltrasyon ve dağıtımla üretim yöntemleri olarak sınıflandırılabilir. Temelde eriyik madenin bir kalıpta bulunan taneciklerin arasına sızdırılmasını baz alan infiltrasyonla üretim yöntemlerine örnek olarak basınçlı infiltrasyon yöntemi (Zhang ve diğ, 2009), ters gravitasyon yöntemi (Taherishargh ve diğ, 2015), gaz basıncıyla üretim yöntemi (Balch ve diğ, 2005), vakum destekli infiltrasyon yöntemi (Palmer ve diğ, 2007) ve yüksek basınçlı döküm yöntemi (Weise ve diğ, 2007) gösterilebilir. Dağıtımla üretim yöntemlerinde ise temel prensip, matris ve dolgu malzemelerinin karıştırıldıktan sonra yapı içinde homojen dağılımın

sağlanmasını amaçlamaktır. Bu yöntemlere örnek olarak karıştırmalı döküm yöntemi (Sahu ve diğ, 2020), merkezkaç döküm yöntemi (Ferreira ve diğ, 2010) ve matris malzemesi ve dolgu malzemesi arası yoğunluk farkını temel alan batmazlık yöntemi (Kim ve Plubrai, 2004) gösterilebilir.

Zhang ve diğ. (2009) tarafından uygulanmış basınçlı infiltrasyon yönteminde (Şekil 2.7) öncelikle dolgu malzemesi olan senosfer küreler 80 mm çapa sahip çelik kalıba yerleştirildikten sonra 0.5 MPa basınç uygulanarak 40 mm yüksekliğinde bir silindir oluşturacak şekilde bir ön form verilip bu form 600-650°C mertebelerinde bir ön ısıtmaya tabi tutulur. Saf alüminyum 800-850°C bandına ısıtılıp kalıba dökülür. Bu işlem sonrasında kalıp üstünden bir eleman yardımıyla 0.8 MPa basınç uygulanarak senosferden oluşturulmuş 40 mm yüksekliğindeki silindirik ön form içindeki boşluklara sızdırılarak sintaktik köpük üretilmiştir.

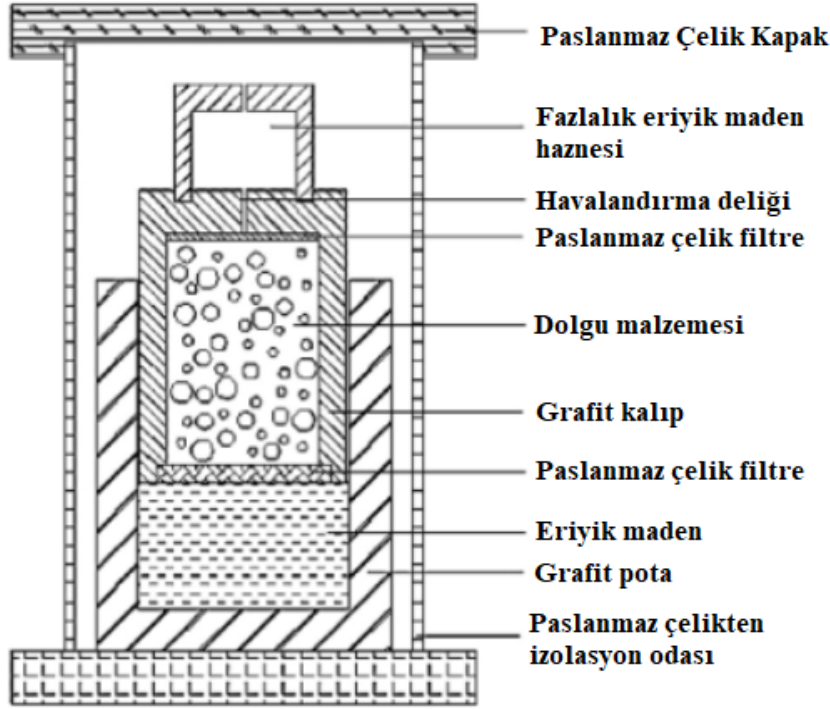


Şekil 2.7: Basınçlı infiltrasyon yöntemiyle SKM üretimi (Zhang ve diğ, 2009).

Bu yöntemin basit kalıp tasarımı ve sade üretim prosesinin yanında, homojen son ürün elde edilmesi gibi avantajları bulunmaktadır. Dezavantajları ise karmaşık geometrilere sahip ve küçük boyutlardaki dolgu malzemeleriyle üretim yapmanın zorluğudur.

Sintaktik köpük metallerin üretim yöntemlerine bir diğer örnek ise ters gravitasyon metodudur (Taherishargh ve diğ, 2014). Şekil 2.8’de şematik gösterimi yapılmış bu yöntemde kullanılan grafit kalıp, en sıkı dolgu malzemesi (genleştirilmiş cam) istifini sağlayabilmek adına her partiden sonra kalıba birer dakikalık titreşim vermek suretiyle beş aşamada doldurulur. Paslanmaz çelikten üretilmiş bir filtre, grafit kalıbın alt kısmına yerleştirilerek dolgu malzemelerinin hareketliliğini minimuma indirir. Tam infiltrasyon sağlandığından emin olmak adına dolgu malzemesinin hacimsel bazda iki

katına eşit olacak miktarda matris malzemesi, grafit pota içine oda sıcaklığında (A356) yerleştirilir. İlk aşamada hazırlanmış olan grafit kalıp, grafit pota üzerine ters şekilde oturtulur ve bu birleşim, paslanmaz çelikten bir odada Argon atmosferinde izole edilir. Kurulmuş bu sistem, oda sıcaklığından 720°C sıcaklığına yükseltilir ve bu sıcaklıkta 30 dakika boyunca bekletilir. Sonrasında sistem fırından alınıp paslanmaz çelik kapak açılır, grafit kalıbın, grafit pota içine ittirilerek yerçekiminin tersi yönde kuvvet uygulanması sağlanır ve bu şekilde infiltrasyon tamamlanır.



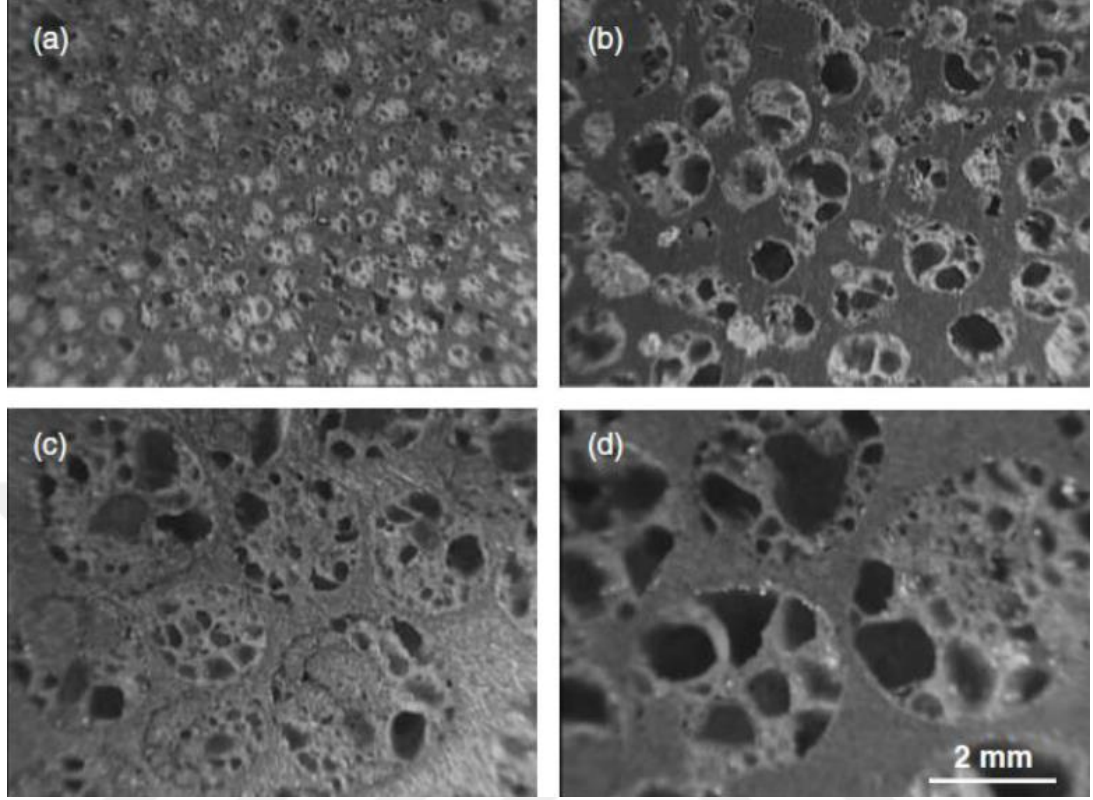
Şekil 2.8: Ters gravitasyon yönteminde kullanılan sistemin şematik gösterimi.

Bu yöntemin en büyük avantajı dolgu malzemesinin üniform dağılımı olsa da mikron boyutuna sahip dolgu malzemelerinde uygulanması zordur ve karmaşık geometriler elde edilememeye dezavantajına sahiptir.

2.4.2 Sintaktik köpük metallerle ilgili çalışma örnekleri

Zhang ve Zao (2007) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada seramik kürelerle doldurulan kalıba eriyik alüminyum eklendikten sonra alüminyumun üzerine yerleştirilen bir diskle basınç uygulanmak suretiyle üretim yapılmıştır. Dolgu malzemesi olarak 0,25-0,5 mm, 0,5-1 mm, 1-2 mm ve 2-4 mm çap aralığında silisyum oksit ve alüminyum oksit bazlı peteksi iç yapıya sahip seramik küreler ve matris malzemesi olarak alüminyum kullanılarak elde edilen SKM'nin mikroyapıları Şekil

2.9’da görülmektedir. Yoğunluk değerleri 1,38-1,88 g/cm³ aralığında numuneler elde edilmiş ve mekanik özellikler incelenmiştir.



Şekil 2.9: Sintaktik köpük metallerin mikroyapısı (Zhang ve Zao, 2007).

Bir başka çalışmada (Ramachandra ve Radhakrishna, 2005) karıştırma yöntemiyle üretim gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin avantajı son elde edilen yapı içindeki dolgu malzemesinin hacminin değiştirilebilmesi, dezavantajı ise matris dolgu malzemesinin yoğunluklarının farklılığından ötürü karışımında homojen dağılım elde etmenin zorluğudur.

İnfiltrasyonun basınçla sağlandığı yöntemlerle yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur. Rohatgi ve diğ. (1998) tarafından yapılan bir çalışmada senosfer dolgu malzemeli alüminyum matrisli sintaktik köpük metal üretimi basınçlı infiltrasyonla gerçekleştirilmiştir. Sonrasında Balch ve Dunand (2006) tarafından yapılmış bir başka çalışmada basınçlı döküm yöntemiyle seramik mikroküreler içeren sintaktik köpük metaller üretilmiştir. Palmer ve diğ. (2007) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise farklı alüminyum alaşımlarının matris malzemesi olarak kullanıldığı farklı sintaktik köpük metallerin mekanik özellikleri incelenmiştir.

Sintaktik köpük metaller üretilirken hem yapı içinde homojen dağılım elde edilmesi, hem de arzu edilen dayanıma sahip olmalarını sağlamak amacıyla üretim öncesinde,

esnasında ve sonrasında birtakım işlemlere tabi tutulurlar. Bazı çalışmalarda üretim öncesinde dolgu malzemesinin homojenliğini sağlamak amacıyla dolgu malzemesinin suda yüzdürüldüğü görülmüştür (Taherishargh ve diğ, 2015). Üretilmiş numunelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine yapılan uygulamalara bir örnek, yapay yaşlandırma işlemidir. 7000 serisi Alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlemine uygunluğu sebebiyle yapılmış bazı çalışmalarda tercih edildiği ve 7000 serisi Alüminyum alaşımlarıyla üretilmiş sintaktik köpük metallerin mekanik özelliklerinde iyileşme görülmüştür (Bilge, 2018).



3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda dolgu malzemesi olarak geliştirilmiş kil ve matris malzemesi olarak 7075 alüminyum alaşımı kullanılarak soğuk hazneli kalıpta basınçlı döküm yöntemiyle sintaktik köpük metal üretilmiştir. Üretilmiş olan sintaktik köpük metalin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemek için deneyler, analizler ve incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde sintaktik köpük metalin üretilmesi ve gerekli incelemelerin gerçekleştirilebilmesi amacıyla kullanılan cihazlar, yöntemler, malzemeler ve üretim proses aşamaları ayrıntılı bir şekilde tanıtılmıştır.

3.1 Sintaktik Köpük Metalin Üretilmesinde Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Dolgu malzemesi ve özellikleri

Üretim proseslerinde dolgu malzemesi olarak Şekil 3.1’de görülen Türkiye menşeli Söğüt Toprak Madencilik Sanayi A.Ş. tarafından üretilen LECAT marka, çapları 2-4 mm çapları arasında değişen $0,613 \text{ g/cm}^3$ istif yoğunluğuna ve $1,068 \text{ g/cm}^3$ parçacık yoğunluğuna sahip geliştirilmiş kil ürünler kullanılmıştır. Geliştirilmiş kilin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1: LECAT geliştirilmiş kilin yüzde kimyasal bileşimi.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	T.K.
64,83	15,05	7,45	2,55	3,67	2,98	1,1	0,13	0,63	0,13	1,37



Şekil 3.1: LECAT geliştirilmiş 2-4 mm boyutlarında geliştirilmiş kil.

3.1.2 Matris malzemesi ve özellikleri

Üretilen sintaktik köpük metallerde matris malzemesi olarak kullanılan 7075 alüminyum alaşımına dair kimyasal bileşenler Çizelge 3.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.2: 7075 Alüminyum kimyasal bileşimi.

Element	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Zr
%	0,18	1,2	0,5	2,1	0,3	0,4	0,2	5,1	0,05

Malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 3.3’te belirtilmiştir. Belirtilen değerler üreticiden alınmıştır.

Çizelge 3.3: 7075 Alüminyum mekanik özellikleri.

	T6-Isıl İşlemli	Isıl İşlemsiz
Akma Dayanımı [MPa]	500	105
Çekme Dayanımı [MPa]	560	225
Birim Uzama (%)	7	17
Brinell Sertlik Değeri	169	60

3.2 Üretimde Kullanılan Cihazlar

3.2.1 Kamara fırın

Üretim prosesi öncesinde takviye malzemesi küreleri ısıtma ve üretim sonrasında T6 yaşlandırma işleminin uygulanması amaçlı PROTHERM marka, PLF 110/6 model kamara fırın kullanılmıştır. Şekil 3.2’de belirtilmiş olan fırın 1100°C maksimum sıcaklığa çıkabilmektedir.



Şekil 3.2: Kamara fırının görünümü.

3.2.2 İndüksiyon ergitme ocağı

Şekil 3.3'te gösterilen alüminyumun ergitilmesinde kullanılan indüksiyon ergitme ocağı Sotec Kuyumculuk Mak. San. Ltd. şirketinden alınmıştır. Maksimum 1100°C sıcaklığa çıkabilen ergitme ocağı, kendinden su soğutmalıdır.



Şekil 3.3: İndüksiyon ergitme ocağının görünümü.

3.2.3 Basınçlı döküm makinası

Alüminyum matrise genişletilmiş kil takviyeli sintaktik köpük metallerin üretiminde, Türkiye menşeli OMT Otomasyon ve Makina Teknolojileri adlı firma tarafından üretilmiştir. Şekil 3.4'te belirtilen 2078 mm uzunluk, 1524 mm genişlik ve 1529 mm yükseklik boyutlarına sahip olan basınçlı döküm makinasının bazı özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- 5 tona kadar yük uygulama kapasitesi
- Hız ve basınç ayar üniteleri
- Güvenlik koranak ve düzenekleri



Şekil 3.4: Numune üretiminde kullanılan basınçlı döküm makinası.

Söz konusu makinenin kontrol panelinde enjeksiyon silindiri konumu, uyguladığı basınç değeri, uygulanan kuvvet, basınçta kalma süresi ve pistonun ilerleme hızının yanısıra testin başlangıç koşulları olan enjeksiyon silindiri konumu, kalıbın kapanmasını sağlayan kilit silindirin konumu ve hidrolik pompanın çalışma durumu kontrol listesi olarak mevcuttur. Şekil 3.5'te basınçlı döküm makinasının kontrol paneli görülmektedir.

7/18/2019		Çalışma Sayfası		4:19:13 AM	
"Test Çevrimi Devam Ediyor"					
Test Değerleri		Test Başlangıç Koşulları			
Enjeksiyon Cetvel	73.98mm.	Kilit Silindiri İleride			
Enjeksiyon Basınç	177.34bar	Enjeksiyon Başlangıç Konumunda			
Enjeksiyon Uygulanan Kuvvet	52678N	Hidrolik Pompa Devrede			
Baskıda Kalma Süresi (Set):	10.000Sn.				
Baskıda Kalma Süresi: (Anlık süre)	9.866Sn.				
ANA SAYFA	ELLE KONTROL	AYARLAR	KALİBRASYON	PLC GİRİŞLER	PLC ÇIKIŞLAR
		ALARMLAR	GRAFİK SAYFASI		

Şekil 3.5: Basınçlı döküm makinasının kontrol paneli.

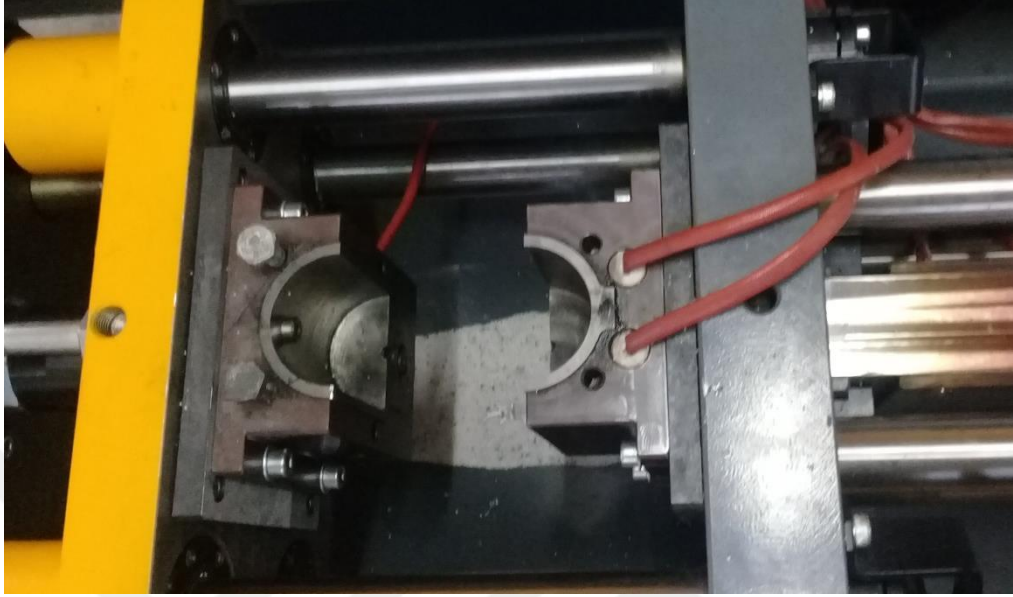
Başlangıç koşulları olarak öncelikle yolluğa dökülen eriyik Alüminyumun dışarı dökülmemesi adına enjeksiyon silindiri yolluk elemanının içine 2 mm kadar girmektedir. Bu konum, enjeksiyon silindiri için "başlangıç konumu" olarak ifade edilir. Üretim prosesi bittikten sonra "kilit silindiri" olarak adlandırılan ve kalıbın sol parçasını itme görevi gören silindir geri çekilir. Bu silindirin tekrar ileri konuma gitmesiyle kalıp kapanır ve bu da ikincil başlangıç koşuludur. Bu hazırlıklar tamamlandıktan sonra kalıp kapatılır ve pompa devreye alınır, ardından üretim gerçekleştirilir.

3.3 Üretim Proses Aşamaları

Alüminyum matrisli, genleştirilmiş kil parçacık takviyeli sintaktik köpük metalin üretimi aşağıda belirtilen proses aşamaları yardımıyla gerçekleştirilmiştir:

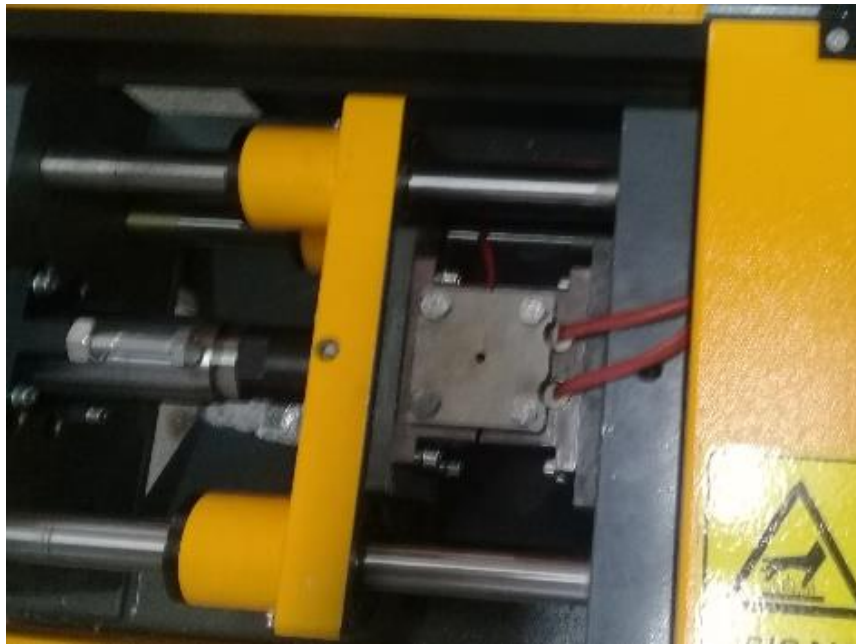
- Basınçlı döküm makinasının yolluğu ve kalıbı yaklaşık 230°C'ye kadar ısıtılır.
- Alüminyum 800°C'de indüksiyon ergitme ocağında eritilir.

- Genleştirilmiş kil parçacıklar kamara fırınında 400°C’de 20 dakika bekletilir.
- Üretim sonrası numunenin kalıplardan kolay ayrılması için basınçlı döküm makinasının kalıbı Şekil 3.6’da görüldüğü gibi açılıp yağlanır.



Şekil 3.6: Basınçlı döküm makinasının kalıbının açık hali.

- Fırından alınan ortalama 115 cm³ hacme sahip genleştirilmiş kil parçacıklar basınçlı döküm makinasının kalıbına yerleştirilir ve Şekil 3.7’de görüldüğü gibi üst kapak kapatılır.
- Kalıp kapatıldıktan sonra döküm makinasının yolluğuna Şekil 3.8’de belirtilen yolla 800°C’de eriyik alüminyum dökülür.



Şekil 3.7: Basınçlı döküm makinasının kalıplarının kapatılmış hali.

- Hidrolik piston yardımıyla 30 MPa basınç ve 40 mm/s hız uygulanarak eriyik alüminyumun kalıp içine enjeksiyonu sağlanır.
- Piston 10 saniye basınçta kaldıktan sonra kalıp açılır ve numune kalıptan alınır.



Şekil 3.8: Makine yolluğuna eriyik madenin dökülmesi.

4. BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİYLE SİNTAKTİK KÖPÜK METAL ÜRETİMİ

Bu bölümde basınçlı döküm yöntemi ile sintaktik köpük metalin üretimi ve üretilmiş olan SKM'lerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespit edilebilmesi için uygulanan testler, analizler ve sonuçları açıklanmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında SKM'lerin üretilebilmesi için proses parametreleri ve etki dereceleri ele alınmıştır. Üretimde kullanılan parametreler ise enjeksiyon presinin basıncı ve hızı, dolgu malzemesinin ön ısıtma sıcaklığı, döküm kalıplarının sıcaklığı ve eriyik madenin sıcaklığıdır. Yüksek basınç yüksek yoğunlukta numuneler elde etmemize yol açarken düşük basınç da kalıp içine yeterli alüminyum dolmamasından kaynaklı yapı içi istenmeyen düzensizliklere ve beklenenden düşük yoğunluk, gerilme ve enerji absorpsiyon değerlerine sebep olmaktadır. Bunun yanında düşük enjeksiyon hızı alüminyumun kalıba enjeksiyonu öncesinde katılaşmasına sebep olurken, yüksek enjeksiyon hızı ise kalıp içinde alüminyumun akışını yüksek hızlara çıkararak düzensizleştirip başarılı numune eldesini zorlaştırmaktadır. Düşük sıcaklıkta bekletilmiş kürelere kalıp içinde temas eden alüminyumun katılaşması hızlanmakta iken gerekenden yüksek sıcaklıklarda bekletilmiş küreler sinterlenerek istenen yapının eldesini zorlaştırmaktadır. Düşük kalıp sıcaklıkları, hem kalıbın içindeki kürelere temas ederek onların sıcaklığını düşürmekte, hem de alüminyumla temas ettiği zaman katılaşmayı hızlandırarak tam dolum sağlanmış başarılı bir son ürün eldesini zorlaştırmaktadır. Ergimiş metal gerekenden daha düşük sıcaklıkta olduğu takdirde kalıp boşluğunu tam dolduramamaktadır.

4.1 Proses Parametrelerinin İncelenmesi

4.1.1 Enjeksiyon presinin basıncı

Üretim için belirlenmesi gereken parametrelerden ilki, enjeksiyon basıncıdır. Enjeksiyon basıncı ilk denemelerde 170 MPa mertebelerinde tutulmuş, bu şekilde

Üretilmiş şekil 4.1’de gösterilmiş numunede beklenen değerlerden yüksek yoğunluk mertebeleri ($\sim 2,4 \text{ g/cm}^3$) elde edildikten sonra diğer parametreler sabit tutularak basınçta azaltmaya gidilmiştir. Kalıpta tam dolumun sağlanıp homojen yapıya sahip bir numunenin 30 MPa basınçta elde edildiği grlmştir.



şekil 4.1: Yüksek basınç sebebiyle arzu edilenden fazla alüminyum içeren numune.

4.1.2 Enjeksiyon presinin hızı

Üretimde etkin bir diğer parametre ise enjeksiyon presinin hızıdır. Başlarda 70 mm/s olarak belirlenen enjeksiyon hızında üretilen numunelerde kalıp boşluğuna eriyik madenin düzensiz bir akışta filtre ettiği ve hatta taneciklere zarar verdiği gözlemlenmiş, bu sebeple enjeksiyon hızında dşme gidilmiştir. Enjeksiyon hızının fazla düşmesi, şekil 4.2’de görüldüğü üzere yolluk elemanı içinde madenin katılaşmasına ve bu sebeple kalıp boşluğunun dolmamasına sebep olmuştur. Diğer parametreler sabit tutularak yapılan denemeler neticesinde uygun enjeksiyon hızı olarak 40 mm/s belirlenmiştir.



şekil 4.2: Düşük hız sebebiyle dolumun gerçekleşmediği bir numune.

4.1.3 Dolgu malzemesinin sıcaklığı

Üretim esnasında önemli parametrelerden biri de dolgu malzemesi olan kürelerin sıcaklığıdır. Tedarikçi firmanın sağladığı verilerde sinterlenmenin başladığı sıcaklık belirtilmediğinden ötürü yapılmış deneyler neticesinde 650°C mertebelerinde kürelerin sinterlendiği gözlemlenmiştir. Bu değer, çalışma esnasında partiküllerin sahip olabileceği sıcaklık mertebesi açısından bir üst sınır belirlemiştir. Diğer parametreler sabit tutulmak suretiyle 150°C sıcaklık değerinde 20 dakika bekletildikten sonra üretim prosesine alınmış kürelerle üretilmiş Şekil 4.3'te belirtilen numunede tam dolum gözlenmemiş olup, 400°C sıcaklık değerinde fırında 20 dakika bekletilmiş numunelerde tam dolum gözlenmiştir.



Şekil 4.3: Düşük küre sıcaklığı sebebiyle tam dolum sağlanamamış bir numune.

4.1.4 Kalıp sıcaklığı

Kalıbın sıcaklığı, üretilen numunenin kalitesine etki etmektedir. Bu etkiyi görmek amacıyla iki farklı kalıp sıcaklığında döküm yapılmıştır. Döküm makinasının kalıp ısıtıcıları açılmadığı zaman kalıp parçalarının sıcaklıkları 80°C, ısıtıcılar açıldığı

zaman kalıp parçalarının sıcaklıkları 230°C olarak tespit edilmiştir. Diğer parametreler sabit tutulurken kalıp 80°C iken yapılan dökümde, Şekil 4.4'te gösterilmiş olan numunede tam dolum gözlenmezken, kalıp sıcaklığı 230°C'ye çıkarılınca yapılan dökümlerde tam dolum gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4: Düşük kalıp sıcaklığından ötürü tam dolum sağlanamamış bir numune.

4.1.5 Ergimiş alüminyumun döküm sıcaklığı

Çalışmada kullanılan 7075 alüminyum alaşımının erime değeri 660°C olup, çalışmaların başında döküm sıcaklığı olarak 710°C belirlenmiştir. 710°C'de yapılan deneylerde eriyik maden yollukta katılaşp kalıp içine hatırı sayılır miktarda enjekte edilememiştir. Döküm için eriyik sıcaklığı 800°C seviyesine çıkarıldığı zaman başarılı numune elde edilmiş, eriyiğin kararsızlığını artırmamak adına daha yüksek sıcaklıklara çıkılmaya gerek görülmemiştir. Eriyik haldeki alüminyumun çok yüksek sıcaklıklara çıkarılmasında oksitlenme ve çinkosuzlaşma (çinko kaybı) problemleri oluşacaktır.

4.2 Üretilen Numuneler

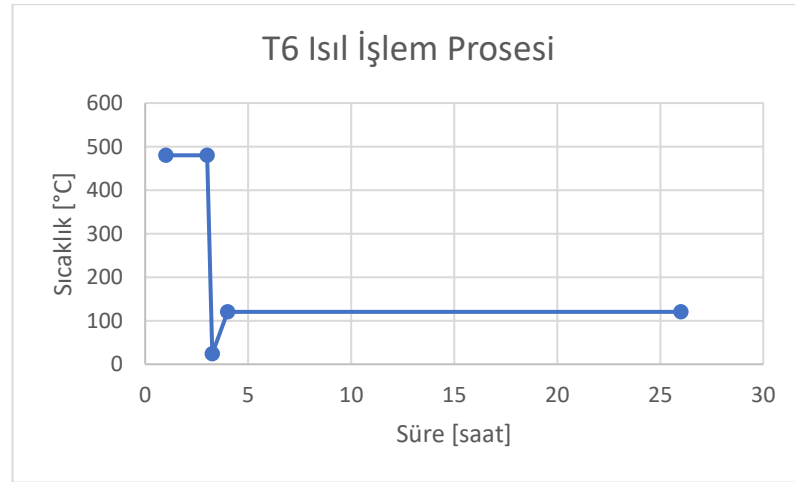
İlgili proses parametrelerinin tespit edilmesinden sonra seri bir şekilde sintaktik köpük metaller üretilmiştir. Üretilmiş olan SKM'lerin boyutları ve yoğunluk değerleri Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Çizelge 4.1: Üretilen numunelerin boyutları ve yoğunluk değerleri.

Numune	Boy [mm]	Çap [mm]	Kütle [g]	Yoğunluk [g/cm ³]
N1	76,94	44,48	226	1,89
N2 - T6	76,56	44,53	226	1,90
N3	76,71	44,57	229	1,91
N4 - T6	75,86	44,6	227	1,92
N5	76,13	44,59	229	1,93
N6 - T6	78,01	44,48	234	1,93
N7	77,05	44,63	234	1,94
N8 - T6	78,3	44,6	239	1,95

4.2.1 Çökelme sertleşmesi ısısı işlemi

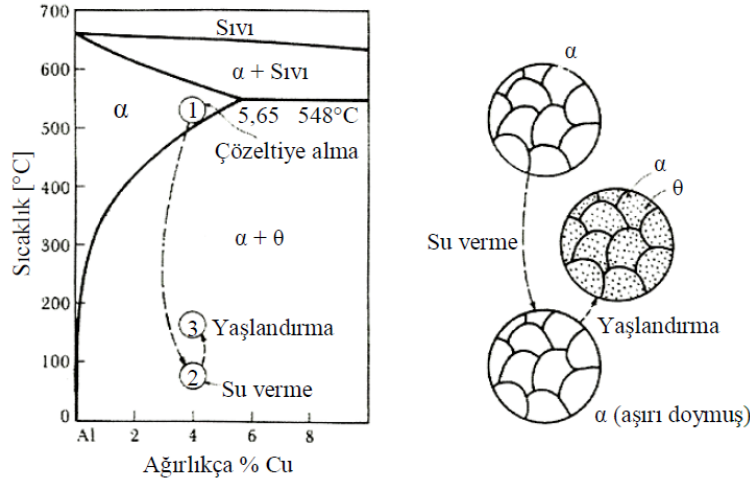
Üretilmiş olan SKM'lerin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla çökelme sertleşmesi ısısı işlemi uygulanmıştır. Üretilen numuneler, 3 saat 480°C'de bekletildikten sonra su vererek oda sıcaklığına indirildikten sonra 120°C'de 24 saat bekletilmek suretiyle Şekil 4.5'te grafiği belirtilen T6 yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.5: Uygulanan T6 yapay yaşlandırma prosesi.

Çökelme sertleşmesi prosesinde yumuşak ve sünek yapıya sahip alüminyum matrisi içine, tane sınırlarında yer alan sert yapıdaki çökeltilerin tane (matris) içinde üniform ve ince olarak dağılması sağlanmaktadır. Bu şekilde dislokasyon hareketini engelleyici

vazifesi gören sert ve ince çökeltiler (θ) metaller arası bileşik olup, alüminyum alaşımının dayanımını ve sertliğini arttırmaktadır. Şekil 4.6'da çökelme sertleşmesi safhaları ve Al-Cu faz diyagramı belirtilmiştir.



Şekil 4.6: Al-Cu faz diyagramında çökelme sertleşmesi safhaları (Askeland, 1998).

4.3 Mikro Yapı Analizleri

Mikro muayeneler yapılmadan önce numuneler Metkon firmasının Şekil 4.7'de görülen FORCIPOL 2V model zımpara ve parlatma cihazı kullanılarak 180, 240, 400, 600 ve 1000'lik boyutlarda silisyum karbür bazlı zımpara kağıtlarıyla beşer dakikalık periyotlarla zımparalandıktan sonra çuha üzerine alümina çözeltisi damlatılmak suretiyle yüzey parlatma işlemine tabi tutulmuştur.



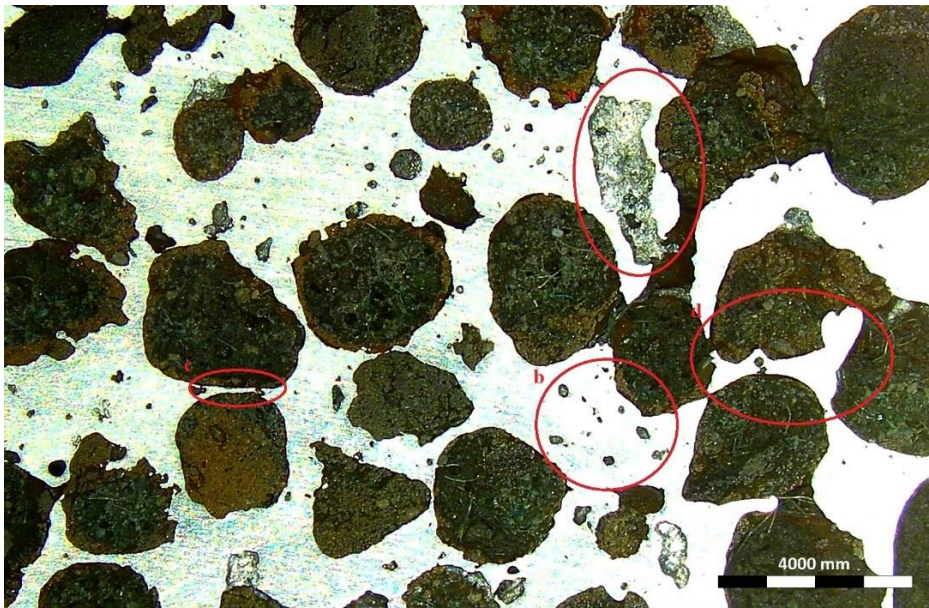
Şekil 4.7: FORCIPOL 2V zımpara ve parlatma cihazı.

Zımparalanıp parlatılan numuneler Şekil 4.8’de görülen Nikon firmasının SMZ 800 model optik mikroskopta 20x büyütme oranında incelemelere tabi tutulmuştur.



Şekil 4.8: Nikon SMZ 800 optik mikroskop.

Mikroskop altında yapılan incelemelerde yapı içinde Şekil 4.9a’da görülen döküm boşlukları ve Şekil 4.9b’de görülen çekme boşlukları gözlemlenmiştir. Şekil 4.9c’de dar alanlara sağlanan infiltrasyon ve Şekil 4.9d’de birbirlerine neredeyse yapışık denebilecek kadar yakın numunelerin arasına başarılı bir şekilde sağlanan infiltrasyon gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9: Sintaktik köpük metalin mikroyapısı.

4.4 Basma Deneyleri

Numunelere uygulanan basma deneyleri, ISO 13314 standardı uyarınca icra edilmiştir. Deneylerde Şekil 4.10'da görülen Dartec marka 600 kN yük üst sınırına sahip hidrolik pres kullanılmıştır. Deneyler, 3 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Numuneler yoğunluklarına göre sıralanmış ve birbirine yoğunluk bakımından yakın numuneler ikili olarak gruplandırılmıştır. Bu gruplandırmalar neticesinde her ikili gruptan bir numune ısıtılmış, bir numune ısıtılmamış olmak üzere toplamda sekiz numuneyle basma deneyi yapılmıştır.



Şekil 4.10: Dartec 600 kN hidrolik pres.

Numuneler üretildikten sonra, yapılacak basma deneylerinde yüzey paralelliğini sağlamak amacıyla üst ve alt taraflardan alın tornaya tabi tutulmuştur. Şekil 4.11'de alın torna sonrası basma deneyine hazırlanmış numuneler görülmektedir.



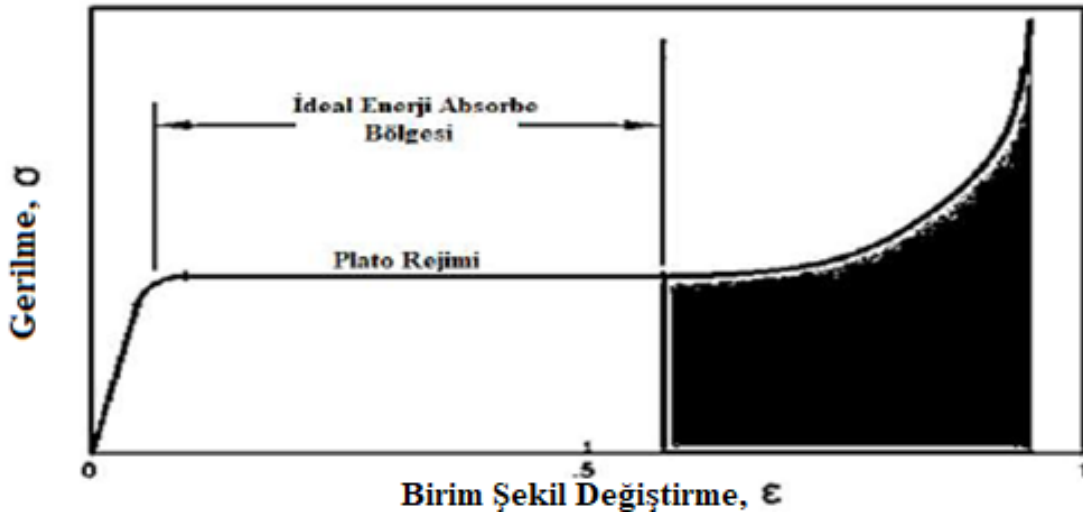
Şekil 4.11: Isıl işlem uygulanmış (sağda) ve uygulanmamış (solda) birer numune (üstten).

Numunelerin alt ve üst yüzeylerinin paralelliği sağlandıktan sonra kalıp birleşme çizgileri ve çap hattında kalan diğer çapakların alınması amacıyla numuneler hafifçe eğelenmiştir. Şekil 4.12’de basma deneyine hazırlanmış iki numunenin önden görüşleri verilmiştir.



Şekil 4.12: Isıl işlem uygulanmış (solda) ve uygulanmamış (sağda) birer numune (önden).

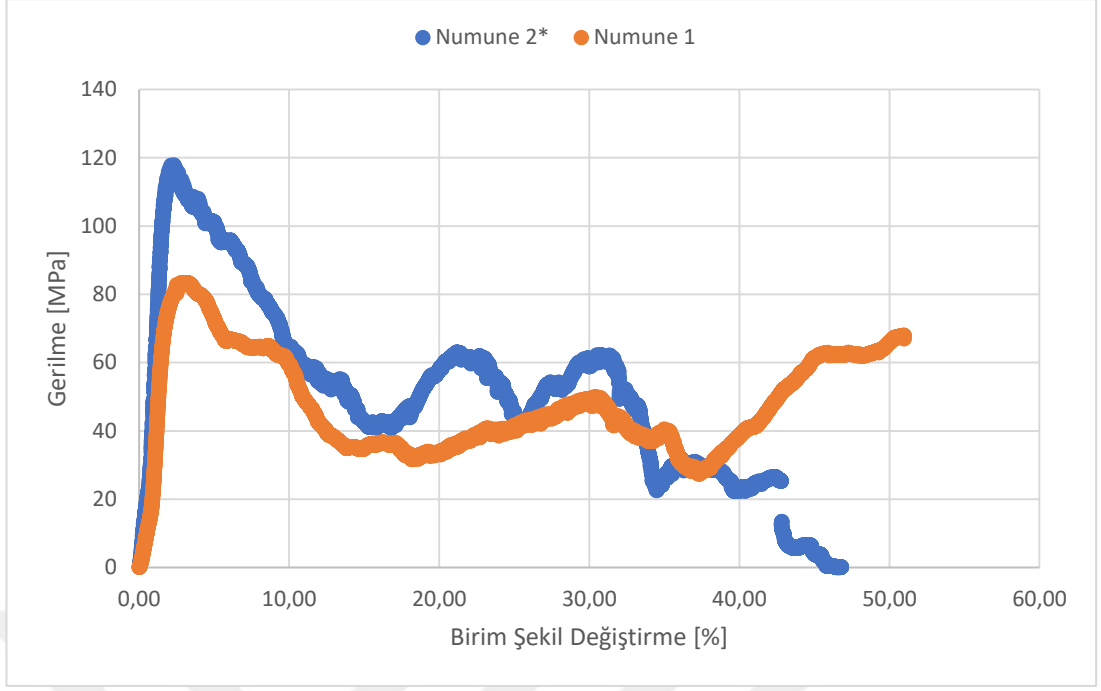
Sintaktik köpük üretiminde amaç düşük yoğunluğa erişirken dayanım mertebelerini en üst düzeyde tutmak ve bunu yaparken yüksek enerji absorpsiyonuna sahip ürünler elde etmektir. Geleneksel köpük metallerde ortaya çıkan düz Plateau bölgesi, sintaktik köpük metallerde de gözlemlenmektedir. Sintaktik köpük metallerin ideal enerji absorpsiyon bölgesi Plateau bölgesinin başlangıcından gerilme yoğunlaşmasının başladığı noktaya kadar olan bölgedir. Plateau gerilmesi, şekil değiştirme esnasında sintaktik köpük metalin kaldırabileceği maksimum gerilme değerini ifade eder. ISO 13314 standardı uyarınca Plateau gerilme değeri %20-%30 birim şekil değiştirme değerlerindeki gerilme değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Şekil 4.13'te Plateau karakteristiğine yer verilmiştir.



Şekil 4.13: Gerilme-BŞD eğrisinde Plateau karakteristiği (Atenaiji ve diğ, 2014).

4.4.1 Numune 1 ve 2'nin basma deneyleri

Şekil 4.14'te numune 1 ve numune 1'in yoğunluk bazında ısıtılmış muadili olan numune 2'nin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafiği görülmektedir. Numune 1'in yoğunluk değeri yapılan ölçümler neticesinde $1,89 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Basma değerleri neticesinde Plateau gerilmesi değeri 41,28 MPa, en yüksek basma gerilmesi değeri ise 83,37 MPa olarak ölçülmüş, numunenin enerji absorpsiyonu ise $37,27 \text{ MJ/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. T6 ısıtılmış uygulanmış olan numune 2'nin yoğunluğu $1,90 \text{ g/cm}^3$ olarak tespit edilmiştir. Plateau gerilmesi 59,04 MPa, en yüksek basma gerilmesi 117,81 MPa, enerji absorpsiyonu ise $31,11 \text{ MJ/m}^3$ olarak ölçülmüştür. T6 ısıtılmış, numune 1 ve numune 2 arasında Plateau gerilmesi açısından 1,43 katlık, maksimum basma gerilmesi açısından ise 1,41 katlık bir oran farkı oluşturmuştur.



Şekil 4.14: Numune 1 ve 2'nin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafiği.

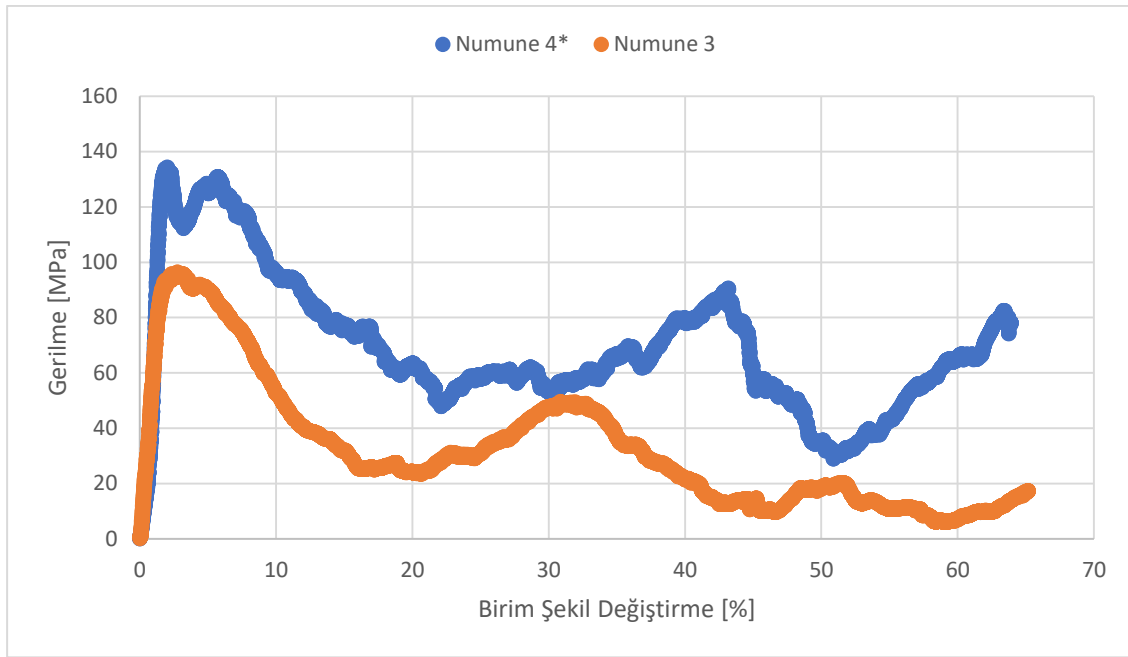
Numune 2'nin grafiğindeki kesiklik, söz konusu numunenin kırılma karakteristiği kaynaklı yapıdan büyük bir parça kopmasından ötürü oluşmuştur. Şekil 4.15'te belirtilen kopan büyük parça sonrası numune %50 birim şekil değiştirme değerini göremeden deney durdurulmuştur. ISO 13314 standardına göre hesaplamalar için ihtiyaç duyulan değerler elde edildiğinden ötürü numune geçerli kabul edilmiştir.



Şekil 4.15: Numune 2'den deney esnasında kopan parça.

4.4.2 Numune 3 ve 4'ün basma deneyleri

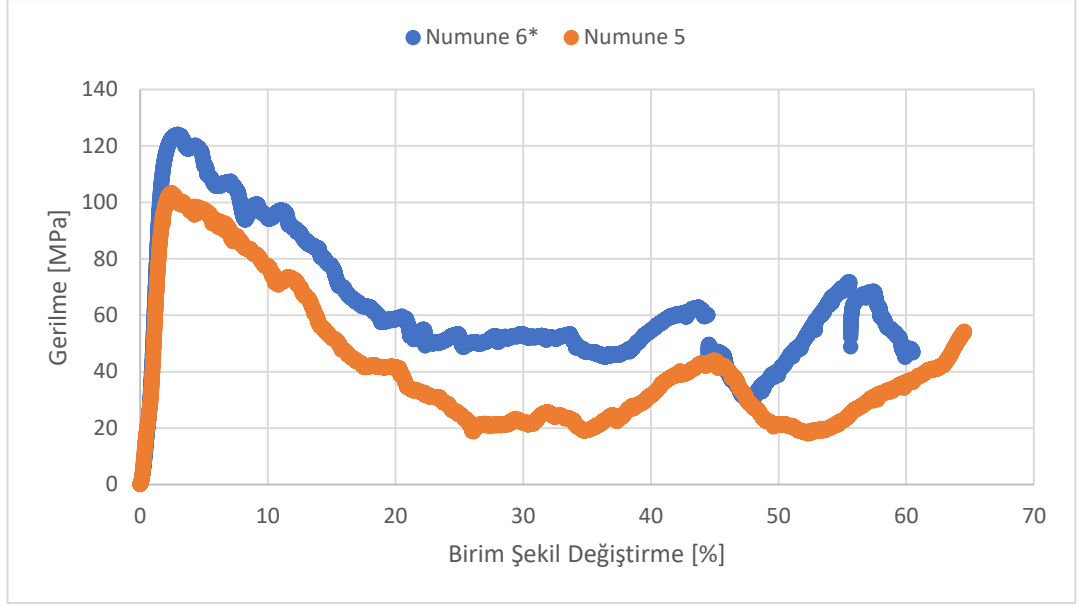
Numune 3 ve T6 uygulanmış numune olan numune 4'ün yoğunlukları sırasıyla 1,91 ve 1,92 g/cm³. Plateau dayanımları sırasıyla 35,94 MPa ve 54,55 MPa iken maksimum basma gerilmeleri ise 95,81 MPa ve 134,29 MPa olarak tespit edilmiştir. Enerji absorpsiyonları ise 27,25 ve 57,49 MJ/m³ olarak hesaplanmıştır. T6 uygulanmış numunenin Plateau dayanımının uygulanmamış numuneye oranı 1,52 iken maksimum gerilme oranı 1,40 olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.16'da Numune 3 ve ısıtılmış Numune 4'ün Gerilme-Birim Şekil Değiştirme eğrileri belirtilmiştir.



Şekil 4.16: Numune 3 ve 4'ün Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafiği.

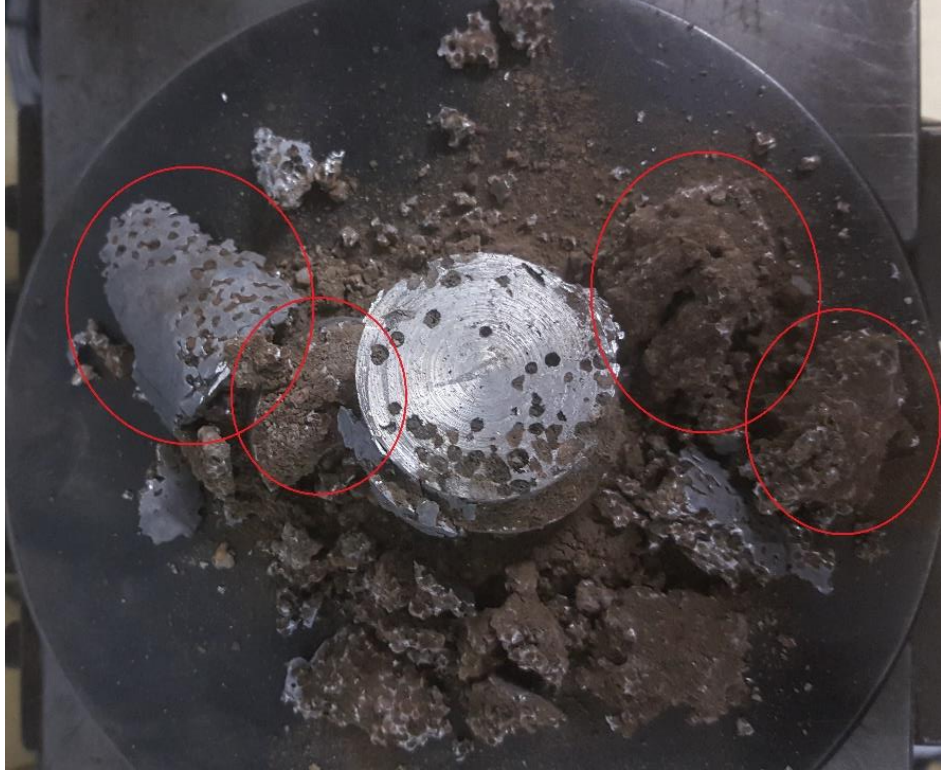
4.4.3 Numune 5 ve 6'nın basma deneyleri

Numune 5 ve T6 uygulanmış olan Numune 6'nın ikisinin de yoğunluğu 1,93 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Basma deneylerinin neticesinde Plateau dayanımları sırasıyla 31,79 MPa ve 55,9 MPa çıkmıştır. Maksimum basma gerilmeleri sırasıyla 102,96 MPa ve 124,03 MPa'dır. Enerji absorpsiyonları aynı sırayla 31,63 MJ/m³ ve 39,85 MJ/m³'tür. Isıl işlem uygulanmış numunelerin uygulanmamış numunelere Plateau gerilme oranları ve maksimum basma gerilmesi oranları sırasıyla 1,76 ve 1,20 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.17'de Numune 5 ve 6'nın Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafiklerine yer verilmiştir.



Şekil 4.17: Numune 5 ve 6'nın Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafiği.

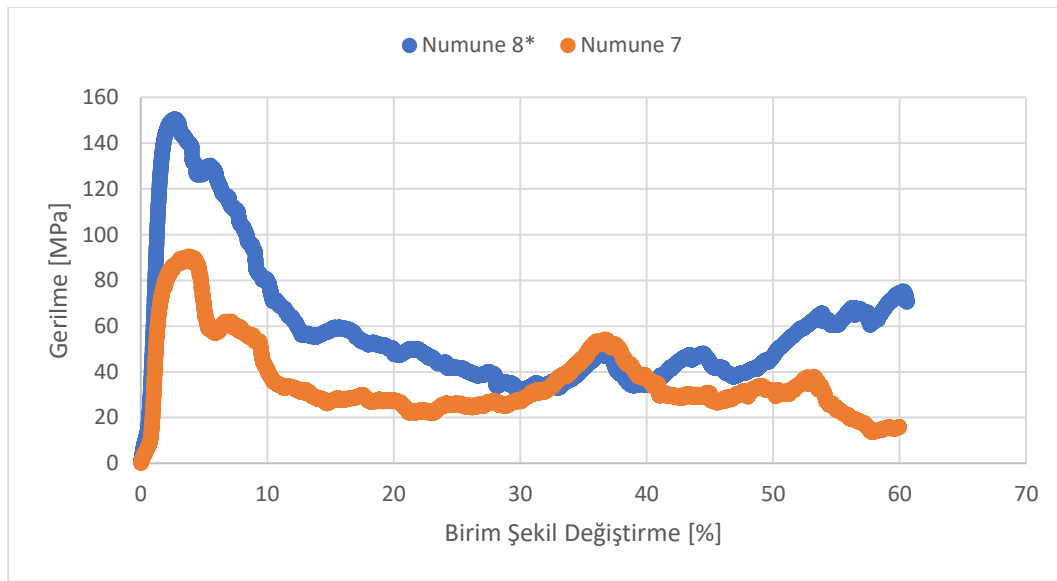
6 numaralı numunenin basma deneyleri esnasında %44'lük ve %54'lük birim şekil değiştirme noktalarında kırılma modlarından ötürü yapıdan büyük parçaların koptuğu görülmüştür. Bu sebepten ötürü grafikte dalgalanmalar oluşmuştur. Şekil 4.18'de bahsi geçen majör parça kopmaları görülmektedir. Numuneler ilk üretim sonrasında numaralandırılıp yoğunluk hesaplamaları sonrasında tasnif kolaylığı açısından tekrar sıralandığı için numune üzerinde "1" yazısı görülmektedir.



Şekil 4.18: Numune 6'dan basma deneyi esnasında kopmuş ana parçalar.

4.4.4 Numune 7 ve 8'in basma deneyleri

Numune 7 ve T6 uygulanmış Numune 8'in yoğunlukları sırasıyla 1,94 ve 1,95 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Basma deneylerinin neticesinde Plateau dayanımları sırasıyla 27,37 MPa ve 40,72 MPa olarak, maksimum basma gerilmeleri sırasıyla 90,04 MPa ve 150,47 MPa olarak tespit edilmiştir. Numunelerin enerji absorpsiyonları sırasıyla 38,53 ve 35,72 MJ/m³ olarak hesaplanmıştır. Isıl işlem uygulanmış numunelerin uygulanmamış numunelere olan Plateau gerilmesi ve maksimum basma gerilmesi oranları sırasıyla 1,55 ve 1,42'dir. Şekil 4.19'da numunelerin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri belirtilmiştir.



Şekil 4.19: Numune 7 ve 8'in Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafiği.

Çizelge 4.2'de üretilmiş numunelerin yoğunluk değerleri, Plateau gerilmesi değerleri ve maksimum basma gerilmesi değerleri belirtilmiştir.

Çizelge 4.2: Üretilmiş numunelerin yoğunluk değerleri ve mekanik özellikleri.

Numune	Yoğunluk [g/cm ³]	σ_{pl} [MPa]	σ_{max} [MPa]	Enerji Absorpsiyonu [MJ/m ³]
N1	1,89	41,28	83,37	37,27
N2 - T6	1,90	59,04	117,81	31,11
N3	1,91	35,94	95,81	27,25
N4 - T6	1,92	54,55	134,29	57,49
N5	1,93	31,79	102,96	31,63
N6 - T6	1,93	55,9	124,03	39,85
N7	1,94	27,37	90,04	38,53
N8 - T6	1,95	40,72	150,47	35,72

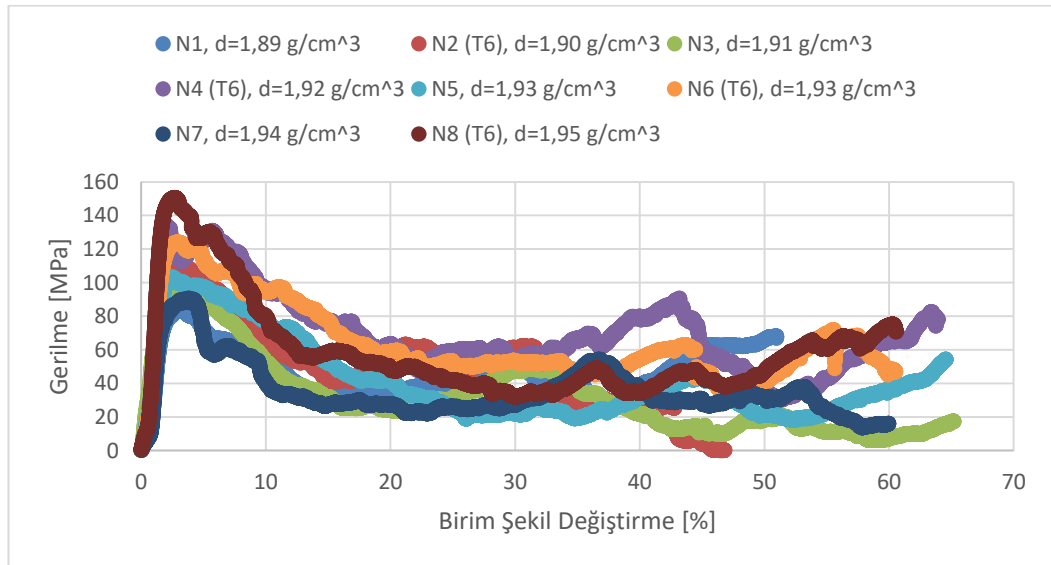
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde 7075 Alüminyum matrisli, genleştirilmiş kil takviyeli sintaktik köpük metal üretimi soğuk hazneli kalıba basınçlı döküm metoduyla başarıyla üretilebilmiştir. Söz konusu alaşım ve dolgu malzemesi Türkiye içinde tedarik açısından bir zorluk yaratmadığı için bu yöntemle yurt içinde seri üretime geçilmesini kolaylaştırmıştır.

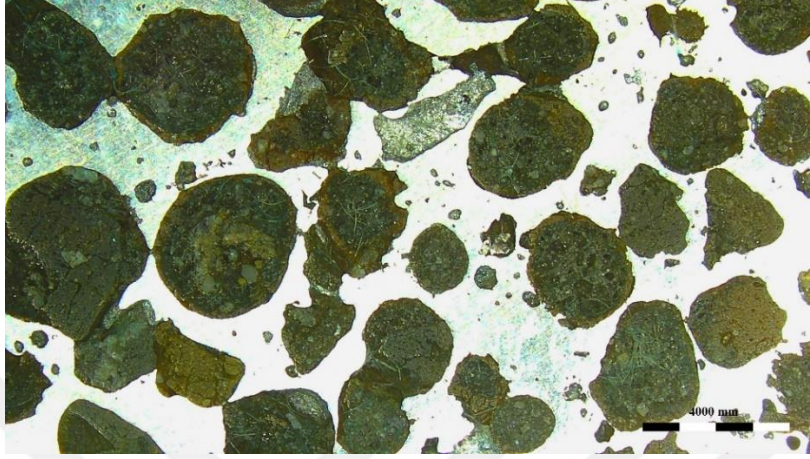
Başarıyla üretilmiş numunelerin iç yapıları analiz edilmiştir. Kesit yüzeyinde döküm boşlukları ve çekme boşluklarına ek olarak dar kesitlere kadar ergimiş alüminyumun nüfuz ettiği gözlemlenmiştir. 1,89-1,95 g/cm³ gibi dar bir yoğunluk aralığında, oldukça homojen numuneler elde edilmiştir.

Mekanik özellikleri iyileştirmek için, ısıtma işlemi uygulanarak mekanik özelliklerin gelişimi gözlemlenmiştir. Isıtma işlemi uygulamasından sonra numuneler ISO 13314 standardında basma deneyine tabi tutulmuştur. Basma deneyleri neticesinde ısıtma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin ortalama Plateau gerilme değerleri sırasıyla 52,55 MPa ve 34,1 MPa olarak tespit edilmiştir. Bunun yanında ısıtma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin maksimum basma gerilme değerleri ortalamaları sırasıyla 131,65 MPa ve 93 MPa olduğu gözlemlenirken, enerji absorpsiyon kapasiteleri sırasıyla 41,04 MJ/m³ ve 33,67 MJ/m³ olarak hesaplanmıştır. Tüm numunelerin grafikleri şekil 5.1’de belirtilmiştir.



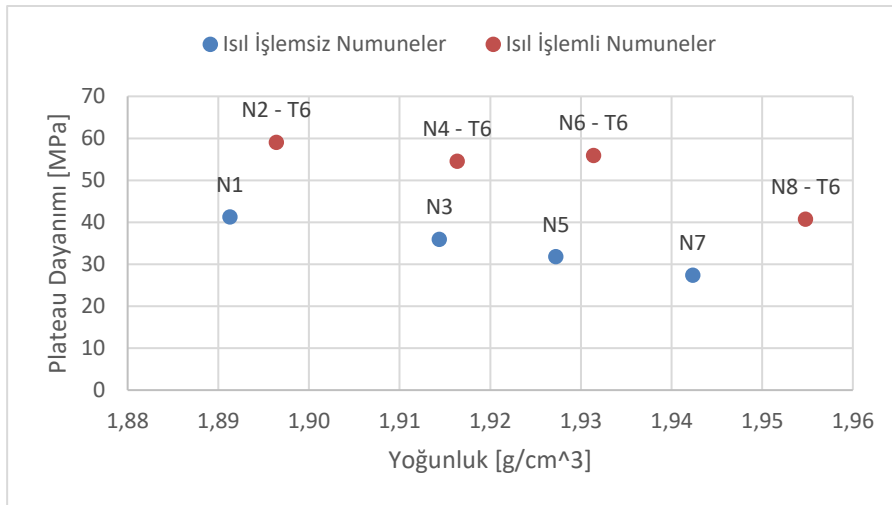
Şekil 5.1: Tüm numunelerin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri.

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere numunenin iç yapısında kalıp boşluğuna yerleştirilmiş genişletilmiş kil istifi içindeki en dar alanlara kadar erimiş metal nüfuziyeti gözlemlenmiştir. Karakteristik çekme ve döküm boşluklarının yanında tam dolum gözlemlenmiştir.



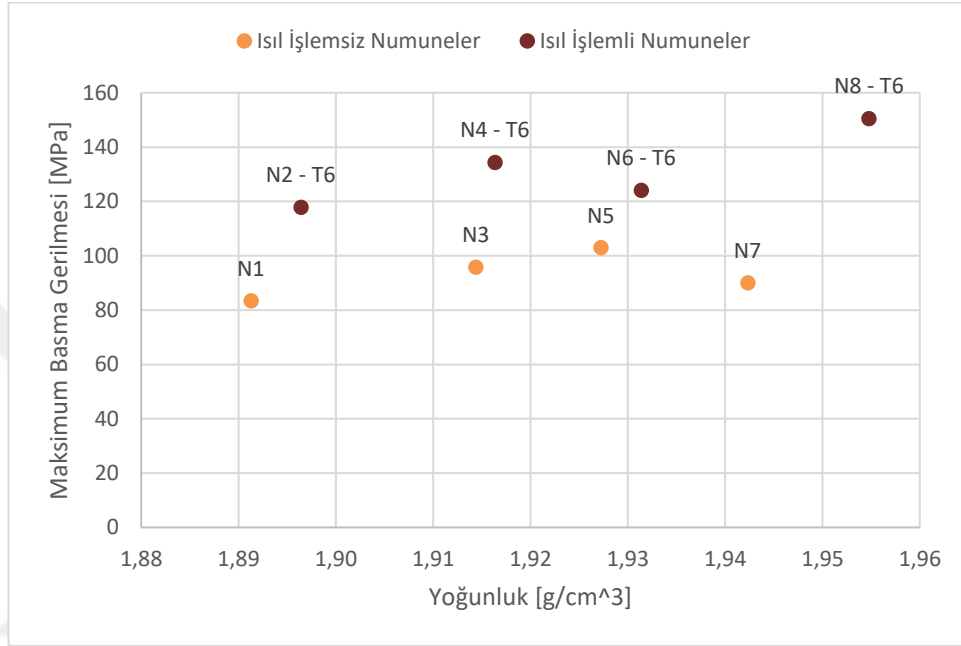
Şekil 5.2: Sintaktik köpük metalin iç yapısı.

Yapılan deneylerde yoğunluk artışıyla birlikte numunelerin Plateau dayanımı değerlerinde şekil 5.3’te belirtildiği üzere azalma gözlemlenmiştir. Yoğunluk artışının sebebi sabit hacimde dolgu malzemesi kullanılırken son ürün içindeki Alüminyum miktarına kesin olarak müdahale edilemiyor olmasıdır. Sintaktik yapı içinde Alüminyum oranında artış görülmesinin neticesinde dayanım mertebelerinde artışa vesile olması beklense de yapı içinde dolgu-matris-dolgu şeklinde tekrar etmesi öngörülen örüntünün beklendiği şekilde tekrar etmediğine yorumlanabilir. Matris malzemesinin sızma sağlayamadığı bölgelerin kırılma karakteristiğinde değişime sebep olması gövdeden büyük parçalar kopmasıyla sonuçlanmış olabilir.



Şekil 5.3: Numunelerin Plateau dayanımları-yoğunluk grafiği.

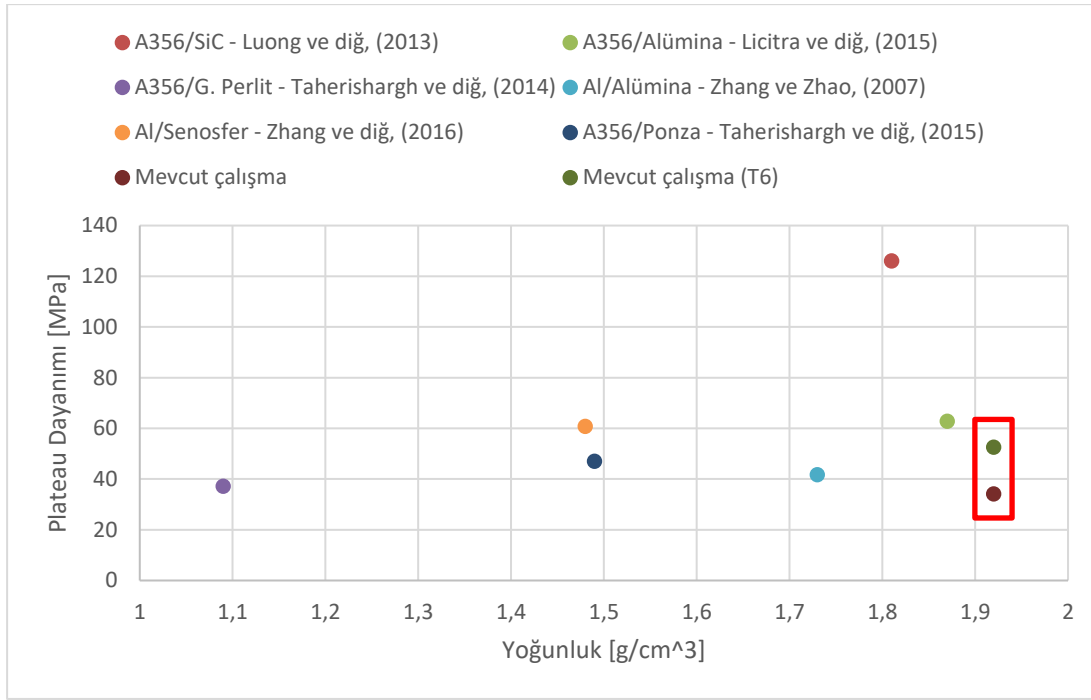
Şekil 5.4'te belirtilmiş grafikte görüldüğü üzere, numunelerin yoğunluğu arttıkça maksimum basma gerilmelerinde artış trendi gözlemlenmiştir. Bu artış, sintaktik yapı içinde matrisin oranının artmasıyla birlikte yapının saf Alüminyuma yaklaşan karakteristiğinin bir çıktısıdır. Matris oranının artışı, malzemenin daha yüksek dayanım mertebelerinde akmaya başlamasına sebep olarak maksimum basma dayanımı değerlerinde bir artışa vesile olmaktadır.



Şekil 5.4: Numunelerin maksimum gerilme-yoğunluk grafiği.

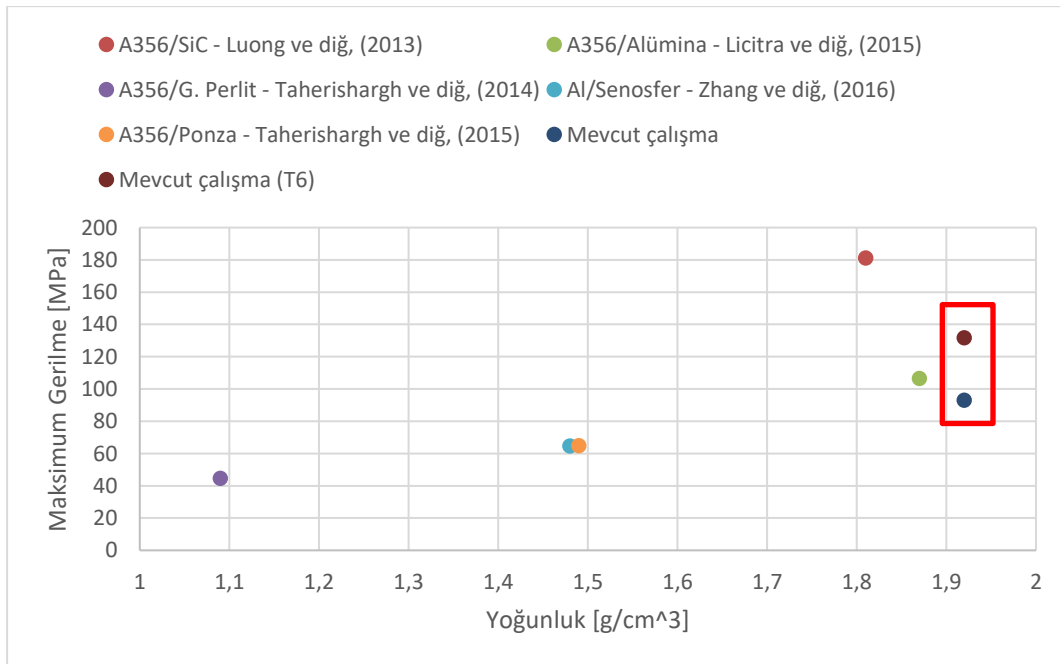
Yoğunluklarının birbirine yakınlığı açısından gruplandırılmış numunelerde ısıtılmış numunelerin ısıtılmamış numunelere göre olan Plateau gerilmesi artış ortalaması 1,55 kat ve maksimum basma gerilmesindeki artış ortalaması 1,42 kat olarak hesaplanmıştır. Dayanım mertebelerinde gözlemlenen bu artış, çökelme sertleşmesi işleminin belirlenen parametrelerle başarılı bir şekilde icra edildiğini göstermiştir.

Üretilen numunelerin ortalama yoğunluğu 1,92 g/cm³ ve ortalama Plateau dayanımı 34,1 MPa'dır. Bu değerlerinin literatürdeki bazı çalışmalarla karşılaştırıldığı grafik Şekil 5.5'te belirtilmiştir. Kullanılan malzemeler ve proseslerin farklılığı sebebiyle değerlerin değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan yöntemin bir avantajı diğer sintaktik köpük metal üretim yöntemlerine göre endüstriyel seri üretime daha uygun olmak iken bu durum aynı zamanda bu yöntemi diğer yöntemlere göre üretilen ürünlerin nihai iç yapısı hakkında daha az netliğe sahip kılması vesilesiyle aynı zamanda bir dezavantajdır.



Şekil 5.5: Plateau gerilmesi ortalama değerlerinin literatürdeki verilerle karşılaştırılması.

Üretilen numunelerin ortalama maksimum basma gerilmesi değerlerinin literatürdeki bazı çalışmalarla karşılaştırmasına Şekil 5.6'da yer verilmiştir. Numunelerin diğer sintaktik köpük metallere göre daha düşük Plateau dayanımı sergilerken daha yüksek maksimum basma dayanımı sergiliyor olması, yapı içinde Alüminyum artışıyla birlikte kırılma karakteristiğinin değişiyor olduğu savını desteklemektedir.



Şekil 5.6: Ortalama maksimum basma dayanımının literatür verileriyle karşılaştırılması.

5.2 Öneriler

Gelecekte konuyla alakalı yapılabilecek çalışmalara yönelik öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Farklı matris ve dolgu malzemeleri kullanılarak basınçlı dökümle üretilen sintaktik köpük metallerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi.
- Aynı malzemeler kullanılmak suretiyle farklı yöntemlerle üretilmiş sintaktik köpük metallerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi.
- Daha geniş yoğunluk skalasına sahip ürün grubu oluşturup dayanım ve yoğunluk ilişkisinin incelenmesi.
- Basınçlı döküm yöntemiyle üretilmiş sintaktik köpük metallerin talaş kaldırma esnasında takım etkileşiminin ve titreşim davranışlarının incelenmesi.
- Farklı geometrilere sahip sintaktik köpük metal üretimi.



KAYNAKLAR

- Altenaiji, M., Schleyer G.K., Zhao, Y.Y.,** (2014). Characterization of Aluminum Matrix Syntactic Foams Under Static and Dynamic Loading. *Applied Mechanics and Materials*. 564. 449-454. 10.4028/www.scientific.net/AMM.564.449.
- Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J, Hutchinson, J.W., & Wadley, H.N.G.** (2000). *Metal Foams: A Design Guide*. Butterworth-Heinemann, USA.
- Askeland, D.** (1998). *The Science and Engineering of Materials*. Monterey, CA.: Brooks/Cole Engineering Division.
- Balch, D. K., & Dunand, D. C.** (2006). Load partitioning in aluminum syntactic foams containing ceramic microspheres. *Acta Materialia*, 54(6), 1501-1511.
- Balch, D.K., O'Dwyer, J.G., Davis, G.R., Cady, C.M., Gray III, G.T., Dunand, D.C.** (2005). Plasticity and damage in aluminum syntactic foams deformed under dynamic and quasi-static conditions. *Materials Science and Engineering A*, 391: 408–417. doi:10.1016/j.msea.2004.09.012.
- Banhart, J.** (2000) Metallic foams: challenges and opportunities, *Eurofoam2000*, 13-20.
- Banhart, J.** (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, 46(6), 559-632.
- Banhart,J.** (2013). Light-metal foams – history of innovation and technological challenges, *Advanced Engineering Materials*, 15, 82-111.
- Banhart, J., & Baumeister, J.** (1998). Production methods for metallic foams. *MRS Online Proceedings Library Archive*.
- Banhart, J., Schmoll, C., & Neumann, U.** (1998). Light-weight aluminium foam structures for ships. *Proceedings of the Conference on Materials in Oceanic Environment* (pp. 55-63). Portugal: Lisbon, 22-24 July.
- Bilge, G.** (2018). *Ponza Taşı Takviyeli Sintaktik Köpük Metalin Üretimi, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Bolat, Ç., Akgün, İ.C. & Gökşenli, A.** (2021). Effect of Aging Heat Treatment on Compressive Characteristics of Bimodal Aluminum Syntactic Foams Produced by Cold Chamber Die Casting. *Inter Metalcast*. <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00629-0>
- Abrahart, R. J. & See, L.** (1998). Neural Network vs. ARMA Modelling: Constructing Benchmark Case Studies of River Flow Prediction. In J.Blenc, (Ed.), *GeoComputation '98. Proceedings of the Third*

International Conference on GeoComputation, (pp.145-154). United Kingdom : University of Bristol, September 17-19.

- Daoud, A., El-Khair, M. A., Abdel-Aziz, M., & Rohatgi, P.** (2007). Fabrication, microstructure and compressive behavior of ZC63 Mg-microballoon foam composites. *Composites Science and Technology*, 67(9), 1842-1853.
- Drenchev, L., Sobczak, J., Malinov, S., & Sha, W.** (2006). Gasars: a class of metallic materials with ordered porosity. *Materials science and technology*, 22(10), 1135-1147.
- Eifert, H., Yu, C. J., Banhart, J., Baumeister, J., & Seellger, W.** (1999). Weight savings by aluminum metal foams: production, properties and applications in automotive. *SAE transactions*, 108(5), 739-744.
- Ferreira, S.C., Velhinho, A., Silva, R.J.C.** (2010). Corrosion behaviour of aluminium syntactic functionally graded composites. *International Journal of Materials and Product Technology*.
- Hipke, T., Hohlfeld, J., & Rybandt, S.** (2014). Functionally aluminum foam composites for building industry. *Procedia Materials Science*, 4, 133-138.
- ISO** (2011). *Mechanical testing of metals -- Ductility testing -- Compression test for porous and cellular metals* (ISO 13314-2011). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/53669.html>
- Kim, H.S. & Plubrai, P.** (2004). Manufacturing and failure mechanisms of syntactic foam under compression. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35 (9). 1009-1015. doi:10.1016/j.compositesa.2004.03.013.
- Licitra, L., Luong, D.D., Strbik III, O.M., Gupta, N.** (2015). Dynamic properties of alumina hollow particle filled aluminum alloy A356 matrix syntactic foams. *Materials and Design*, 66 (B): 504–515. doi:10.1016/j.matdes.2014.03.041.
- Luong, D.D., Strbik III, O.M., Hammond, V.H., Gupta, N., Cho, K.** (2013). Development of high performance lightweight aluminum alloy/SiC hollow sphere syntactic foams and compressive characterization at quasi-static and high strain rates. *Journal of Alloys and Compounds*, 550: 412–422. doi: 10.1016/j.jallcom.2012.10.171.
- Ma, L., Song, Z.** (2007). Porous Metal and Metallic Foam. *Scripta Mater.*
- Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S. & Kitahara, A.** (1998). Aluminum Foam, “Alporas”: The Production Process, Properties and Applications. *MRS Proceedings*, 521, 133.
- Mondal, D. P., Das, S., Ramakrishnan, N., & Bhasker, K. U.** (2009). Cenosphere filled aluminum syntactic foam made through stir-casting technique. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(3), 279-288.
- Mondal, D. P., Majumder, J. D., Jha, N., Badkul, A., Das, S., Patel, A., & Gupta, N.** (2012). Titanium-cenosphere syntactic foam made through powder metallurgy route. *Materials & Design*, 34, 82-89.

- Naboychenko S. & Yefimov N.A.** (2018). *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*. USA.: Elsevier.
- Nie, Z., Lin, Y., & Tong, Q.** (2018). Numerical simulations of two-phase flow in open-cell metal foams with application to aero-engine separators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 917-932.
- Palmer, R.A., Gao, K., Doan, T.M., Green, L., Cavallaro, G.** (2007). Pressure infiltrated syntactic foams — Process development and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 464 (1-2): 85-92. doi:10.1016/j.msea.2007.01.116.
- Pan, L., Yang, Y., Ahsan, M. U., Luong, D. D., Gupta, N., Kumar, A., & Rohatgi, P. K.** (2018). Zn-matrix syntactic foams: Effect of heat treatment on microstructure and compressive properties. *Materials Science and Engineering: A*, 731, 413-422.
- Ramachandra M. & Radhakrishna K.**, (2005), Synthesis – microstructure – mechanical properties – wear and corrosion behaviour of an Al-Si (12%)– fly ash metal matrix composite. *J. Mater. Sci.* 40, 5989-5997, DOI 10.1007/s10853-005-1303-6.
- Rohatgi P. K., Guo R. Q., Iksan H., Borchelt E.J., Asthana R.**, (1998) Pressure infiltration technique for synthesis of aluminium – fly ash particulate composite, *Mater. Sci. Tech. A.* 244, 22-30, DOI 10.1016/S0921-5093(97)00822-8.
- Rohatgi P. K., Gupta N., Schultz B. F., Luong D.D.**, (2011), The synthesis, compressive properties, and applications of metal matrix syntactic foams. *JOM*, 63. pp. 36-42.
- Rúa, J. M., Zuleta, A. A., Ramírez, J., & Fernández-Morales, P.** (2019). Micro-arc oxidation coating on porous magnesium foam and its potential biomedical applications. *Surface and Coatings Technology*, 360, 213-221.
- Sahu, S., Zahid Ansari, M., Mondal, D.P.** (2020). Microstructure and compressive deformation behavior of 2014 aluminium cenosphere syntactic foam made through stircasting technique. *Materials Today*. doi:10.1016/j.matpr.2019.09.019.
- Smith, B. H., Szyniszewski, S., Hajjar, J. F., Schafer, B. W., & Arwade, S. R.** (2012). Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties. *Journal of Constructional Steel Research*, 71. 1-10.
- Srinath, G., Vadiraj, A., Balachandran, G., Sahu, S. N., & Gokhale, A. A.** (2010). Characteristics of aluminium metal foam for automotive applications. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 63(5), 765-772.
- Szlanicsik, A., Katona, B., Bobor, K., Májlínger, K., & Orbulov, I. N.** (2015). Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres. *Materials & Design*, 83, 230-237.
- Tao, X. F., Zhang, L. P., & Zhao, Y. Y.** (2009). Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres. *Materials & Design*, 30(7), 2732-2736.

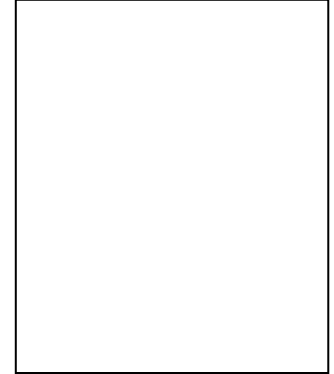
- Taherishargh, M., Belova, I.V., Murch, G.E, Fiedler, T.** (2014). Low-density expanded perlite–aluminium syntactic foam. *Materials Science & Engineering A*, 604: 127–134. doi:10.1016/j.msea.2014.03.003.
- Taherishargh, M., Belova, I.V., Murch, G.E., Fiedler, T.** (2015). Pumice/aluminium syntactic foam. *Materials Science & Engineering A*, 635: 102–108. doi:10.1016/j.msea.2015.03.061.
- Taherishargh, M., Linul, E., Broxtermann, S., Fiedler, T.** (2018). The mechanical properties of expanded perlite-aluminium syntactic foam at elevated temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, 737: 590-596. doi:10.1016/j.jallcom.2017.12.083.
- Weise, J., Zanetti-Bueckmann, V., Yezerska, O., Schneider, M. Haesche, M.** (2007). Processing, properties and coating of micro-porous syntactic foams. *Advanced Engineering Materials*, 9 (1-2): 52- 56. doi:10.1002/adem.200600198
- Zhang, L. P., & Zhao, Y. Y.** (2007). Mechanical response of Al matrix syntactic foams produced by pressure infiltration casting. *Journal of Composite Materials*, 41(17), 2105-2117.
- Zhang, B., Lin, Y., Li, S., Zhai, D., Wu, G.** (2016). Quasi-static and high strain rates compressive behavior of aluminum matrix syntactic foams. *Composites Part B: Engineering*, 98: 288-296. doi:10.1016/j.compositesb.2016.05.034.
- Zhang, Q., Lee, P.D., Singh, R., Wu, G., Lindley, T.C.** (2009). Micro-CT characterization of structural features and deformation behavior of fly ash/aluminum syntactic foam. *Acta Materialia* 57: 3003–3011. doi:10.1016/j.actamat.2009.02.048.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : İsmail Cem AKGÜN

Doğum Tarihi ve Yeri

E-posta



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, İmalat Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme ve İmalat Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Araştırma Görevlisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Ekim 2020-halen.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Bolat, Ç. , Akgün, İ. C. & Gökşenli, A.** (2020). On the Way to Real Applications: Aluminum Matrix Syntactic Foams . *European Mechanical Science* , 4 (3) , 131-141 . DOI: 10.26701/ems.703619
- **Bolat, Ç., Akgün, İ.C. & Gökşenli, A.** (2021). Effect of Aging Heat Treatment on Compressive Characteristics of Bimodal Aluminum Syntactic Foams Produced by Cold Chamber Die Casting. *Inter Metalcast* (2021). <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00629-0>
- **Bolat, Ç., Akgün, İ.C. & Gökşenli, A.** (2021) Effects of particle size, bimodality and heat treatment on mechanical properties of pumice reinforced aluminum syntactic foams produced by cold chamber die casting. *China Foundry* 18, 529–540. <https://doi.org/10.1007/s41230-021-1133-4>