



**ALÜMİNYUM 5083 ALAŞIMININ İNFİLTRASYON
YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN METAL KÖPÜKLERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Tugay FIRAT

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI**

**ALÜMİNYUM 5083 ALAŞIMININ İNFİLTASYON YÖNTEMİYLE
ÜRETİLEN METAL KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Tugay FIRAT

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI**

**KARABÜK
Ocak 2021**

Tugay FIRAT tarafından hazırlanan “ALÜMİNYUM 5083 ALAŞIMININ İNFİLTASYON YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN METAL KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlık bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI

.....

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 07/01/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Yunus TÜREN (KBÜ)

.....

KBÜ Lisanüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Tugay FIRAT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ALÜMİNYUM 5083 ALAŞIMININ İNFİLTRASYON YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN METAL KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Tugay FIRAT

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Hayretin AHLATCI

Ocak 2021, 40 sayfa

Bu çalışmada, 5083 alüminyum alaşımı kullanılarak, infiltrasyon yöntemiyle açık gözenekli metal köpükler üretilmiştir. İnfiltrasyon yönteminden yararlanılarak, tuz boyutuna göre küçük ve büyük gözenekli olmak üzere iki tür alüminyum köpük üretilmiştir. Bunun yanı sıra, Alüminyum 5083 alaşımıyla birlikte perlit eklenerek de kompozit bir form üretimi de gerçekleştirilmiştir. Üretilen bu numunelere T6 ısıl işlem uygulanarak, sertlik, basma, darbe ve korozyon testleri yapıp, mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan sertlik, basma ve darbe testlerinde alüminyum-perlit kompozit malzemenin sertliği ve dayanımı en yüksek, küçük gözeneğe sahip köpüğün sertliği ve dayanımı ise en düşük olarak ölçülmüştür. Korozyon testlerinde ise en fazla ağırlık kaybına uğrayan küçük gözenekli alüminyum köpük olmuştur.

Anahtar Sözcükler : 5083 Alüminyum Alaşımı, Alüminyum Esaslı Metal Köpük,
Mekanik Özellikler.

Bilim Kodu : 91519

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM 5083 ALLOY METAL FOAM PRODUCED By INFILTRATION METHOD

Tugay FIRAT

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI

January 2021, 40 pages

In this study, metal foams with open pores were produced by infiltration method using 5083 aluminum alloy. Using the infiltration method, two types of metal foam were produced, small and large porous depending on the salt size. In addition, another composite form was produced by adding perlite together with Aluminum 5083 alloy. By applying T6 heat treatment to these produced samples, hardness, compression, impact and corrosion tests were performed and their mechanical properties were examined. In the hardness, compression and impact tests, the hardness and strength of the aluminum-perlite composite material was measured as the highest, and the hardness and strength of the small pore foam was measured as the lowest. In corrosion tests, aluminum foam with small pores has the most weight loss.

Key Word : 5083 Aluminium Alloy, Aluminium Based Metal Foam, Mechanical Properties.

Science Code : 91519

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında TÜBİTAK ARDEB 215M233 nolu, “Düzenli ve Açık Gözenekli Geometride Metal Köpüklü Akış Kanalına Sahip Yüksek Performanslı Kompakt Isı Değiştirici Tasarımı ve Geliştirilmesi” adlı TÜBİTAK-1003 Ar-Ge projeleri destekleme program kapsamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında bana maddi açıdan destekleyen TÜBİTAK'a ve Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında bursiyer olarak görev yaptığım TÜBİTAK ARDEB 215M233 nolu, “Düzenli Ve Açık Gözenekli Geometride Metal Köpüklü Akış Kanalına Sahip Yüksek Performanslı Kompakt Isı değiştirici Tasarımı Ve Geliştirilmesi” projesinde Proje Yürütücüm Sayın Prof. Dr. Mustafa YAŞAR'a ve Sayın Prof. Dr. Melik Çetin hocalarıma desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmam boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda olduğunu bildiğim Sayın Arş. Gör. Abdurrahim TEMİZ hocama, son olarak maddi ve manevi desteklerini bana her zaman gösteren anneme ve babama bu vesile ile bir kez daha teşekkür etmek isterim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
METALİK KÖPÜKLER	3
2.1. METALİK KÖPÜKLERİN TANIMI.....	3
2.1.1. Açık ve Kapalı Gözenekli Metal Köpükler.....	5
2.2. AÇIK GÖZENEKLİ METAL KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ	7
2.2.1. Hassas Döküm Yöntemiyle Polimer Malzemedен Açık Gözenekli Metal Köpük Üretimi.....	7
2.2.2. Boşluk Tutucuların Uzaklaştırılmasıyla Açık Gözenekli Metal Köpük Üretimi	8
2.2.3. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Açık Gözenekli Metal Köpük Üretimi	9
2.2.4. Polimer Emdirme Yöntemiyle Açık Gözenekli Metal Köpük Üretimi	9
2.2.5. Düzenli Yapıda Açık Gözenekli Metal Köpük Üretimi.....	10
2.3. METALİK KÖPÜKLERİN ENDÜSTRİYEL ALANDAKİ YAPISAL UYGULAMALARI	12

	<u>Sayfa</u>
2.3.1. Otomotiv Endüstrisi	12
2.3.2. Hafif Konstrüksiyon.....	13
2.3.3. Ses Yalıtımı.....	14
2.3.4. Havacılık Endüstrisi	14
2.3.5. Gemi Yapım Endüstrisi.....	14
2.3.6. İnşaat ve Yapı Endüstrisi	14
2.3.7. Demir Yolu Endüstrisi	15
BÖLÜM 3	16
LİTERATÜR TARAMASI.....	16
BÖLÜM 4	19
MATERYAL VE YÖNTEM	19
4.1. ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER	19
4.2. İNFİLTASYON YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİ.....	20
4.3. DENEYLERDE KULLANILAN ÖLÇÜM CİHAZLARI VE YÖNTEMLER	
.....	24
BÖLÜM 5	28
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	28
5.1. MİKRO SERTLİK DENEY SONUÇLARI.....	28
5.2. MİKROYAPI DENEY SONUÇLARI.....	29
5.3. BASMA DENEYİ SONUÇLARI.....	32
5.4. DARBE DENEYİ SONUÇLARI	33
5.5. KOROZYON DENEYİ SONUÇLARI.....	35
BÖLÜM 6	36
SONUÇ VE ÖNERİLER	36
KAYNAKLAR	38
ÖZGEÇMİŞ	40

SEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Metal köpüklerin endüstride kullanım alanları.	4
Şekil 2.2.	Zn köpük ve CO ₂ sayesinde kabarmış ekmek [2].	4
Şekil 2.3.	6061 alüminyum alaşımının sıklık-gözenek boyutu grafiği [2].	5
Şekil 2.4.	Açık hücreli metal köpük şekli ve DOUCELL yöntemiyle üretilmiş metal köpük görünümü [3].	6
Şekil 2.5.	Kapalı hücreli metal köpük şekli ve kapalı hücre yöntemiyle üretilmiş metal köpük görünümü [3].	6
Şekil 2.6.	Polimer köpük ile hassas döküm yöntemi [6].	7
Şekil 2.7.	Boşluk tutucular ile metal köpük üretim yöntemi [6].	8
Şekil 2.8.	Toz metalürjisi yöntemiyle metal köpük üretim şeması.	9
Şekil 2.9.	Replikasyon yöntemiyle açık gözenekli metal köpük üretim şeması [7].	10
Şekil 2.10.	Maça kalıbı ve üretimi yapılmış olan düzenli yapıda Shell maça görünümü.	11
Şekil 2.11.	Yüksek besleyicili flanşlı döküm kalıbı görünümü.	11
Şekil 2.12.	Üretimi yapılan düzenli yapıda eşanjör köpük görünümü.	12
Şekil 2.13.	Metalik köpüklerin otomotiv endüstrisindeki yapısal uygulamaları [6].	13
Şekil 2.14.	Alüminyum esaslı sandviç panel görünümü [6].	13
Şekil 2.15.	Demir yolu endüstrisinde metal köpük kullanımı [8].	15
Şekil 4.1.	a) 2 ±0,5 mm boyutlu NaCl, b) 3 ±0,5 mm boyutlu NaCl ve c) 3 ±0,5 mm boyutları arasındaki perlit görünümü.	20
Şekil 4.2.	İnfiltrasyon yöntemiyle Al köpük üretim sistemi.	21
Şekil 4.3.	İnfiltrasyon kalıbı ve bileşenleri.	21
Şekil 4.4.	Kokil külçe kalıbı ve Al külçe görünümü.	22
Şekil 4.5.	Laboratuvar tipi fırın görünümü.	23
Şekil 4.6.	5083 Al alaşımlı köpük görünümleri a) büyük gözenekli Al köpük b) küçük gözenekli Al köpük.	23
Şekil 4.7.	Manyetik karıştırıcı görünümü.	24
Şekil 4.8.	Isıl işlem fırını görünümü.	24
Şekil 4.9.	Optik mikroskop görüntüsü.	25
Şekil 4.10.	Mikrosertlik cihaz görünümü.	26
Şekil 4.11.	Mekanik basma test cihazı görünümü.	26

Sayfa

Şekil 4.12. Mekanik darbe test cihazı görünümü.	27
Şekil 4.13. Hassas terazi görünümü.	27
Şekil 5.1. 5083 Al alaşımlı malzemelerin sertlik-yaşlandırma grafiği görünümü. .	28
Şekil 5.2. 5083 Al alaşımlı malzemelerin x500 mikroyapı görüntüleri.	30
Şekil 5.3. 5083 Al alaşımlı malzemelerin x1000 mikroyapı görüntüleri.	31
Şekil 5.4. 5083 Al alaşımlı KGGK malzeme x500 görüntüsü.	31
Şekil 5.5. a) STEM parçacık görüntüsü, b) Al, Mg, Mn ve Si EDS görüntüsü, c) STEM parlak alanların görüntüsü, d) a'daki parçanın büyütülmüş TEM görüntüsü, e) Mg ₂ Siparçacığının STEM görüntüsü ve f) Çökelti katmanı EDS sonuçları [20].	32
Şekil 5.6. Test numunelerine ait ortalama grafik sonuçları.	33
Şekil 5.7. Deney numunelerine ait darbe testi sonuçları.	34
Şekil 5.8. Deney numunelerine ait darbe test grafiği sonuçları.	34
Şekil 5.9. Deney numunelerine ait yüzdece azalış sonuçları.	35

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. 5083 Al alaşımı spektral analiz sonucu.	19
Çizelge 4.2. Keller reaktif çizelgesi.	25
Çizelge 5.1. KGK malzeme sertlik sonuçları.....	29
Çizelge 5.2. BGK malzeme sertlik sonuçları.	29
Çizelge 5.3. PK malzeme sertlik sonuçları.	29
Çizelge 5.4. Deney numunelerine ait korozyon testi sonuçları.....	35

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al : alüminyum

Mg : magnezyum

Fe : demir

Si : silisyum

Cu : bakır

Mn : mangan

Cr : krom

Ti : titanyum

Zn : çinko

Ar : argon

N : azot

TiH₂ : titanyum hidrit

NaCl : sodyum klorür

Ni : nikel

k : termal iletkenlik (W/mK)

µm : mikrometre

°C : santigrat

STEM : scanning transmission electron microscopes

KISALTMALAR

KGK : Küçük Gözenekli Köpük Malzeme

BGK : Büyük Gözenekli Köpük Malzeme

PK : Alüminyum-Perlit Kompozit Malzeme

3D : 3 Boyut

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son yıllarda, yeni malzemelerin gelişmesiyle birlikte birçok mühendislik uygulamalarında giderek daha fazla önem kazanmıştır. Bu gelişmenin sebebi, daha hafif ve güçlü malzemelere duyulan ihtiyaçtır. Daha hafif ve güçlü malzemelerin en büyük avantajı ise malzemenin mukavemetinden ödün vermeden yapılmasıdır. Bu doğrultuda alüminyum köpükler ön plana çıkmaktadır. Alüminyum köpüklerin başlıca avantajları şunlardır;

1. Çok hafiftirler.
2. Çok gözenek sayısına sahiptirler.
2. Yüksek enerji sönümlemesine sahiptirler.
3. Birim hacim başına yüksek yüzey alanına sahiptirler.
4. Düşük termal iletkenliğe sahiptirler.
5. Düşük özgül ağırlığa sahiptirler.
6. Hurdadan geri kazanım vardır.

Metal köpükler gözenek yapısına göre açık gözenekli ve kapalı gözenekli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kapalı gözenekli metal köpüklerde, her bir hücre metal tabaka ile korunurken, açık gözenekli metal köpüklerde ise tek tek hücreler birbirine bağlantısı vardır ve hava veya herhangi bir sıvının metal köpük içerisinden geçmesine imkan sağlar. Kapalı gözenekli metal köpükler genellikle hafif yapılarda kullanırken, açık gözenekli metal köpükler ısı transfer olaylarında veya geçirgenliğin ve gözenekliliğin istendiği yerlerde gereklidir.

Metal köpükler genellikle sıvı metal içerisinde gaz kabarcıkları hapsederek üretilmektedir. Ayrıca diğer üretim yöntemleri, replikasyon yöntemi (metal süngere çamur emdirme), yer tutucu ve şişirici maddeler (TiH_2) gibi birçok yöntemlerle de üretilmektedir.

Alüminyum; havacılık, otomotiv ve gemi-inşaat gibi birçok endüstri alanında hafif özelliği sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum yalnızca metal köpükte kullanılmaz, aynı zamanda birçok mühendislik alanında geliştirilerek çok sayıda metal matrisli kompozit olarak da kullanılmaktadır.

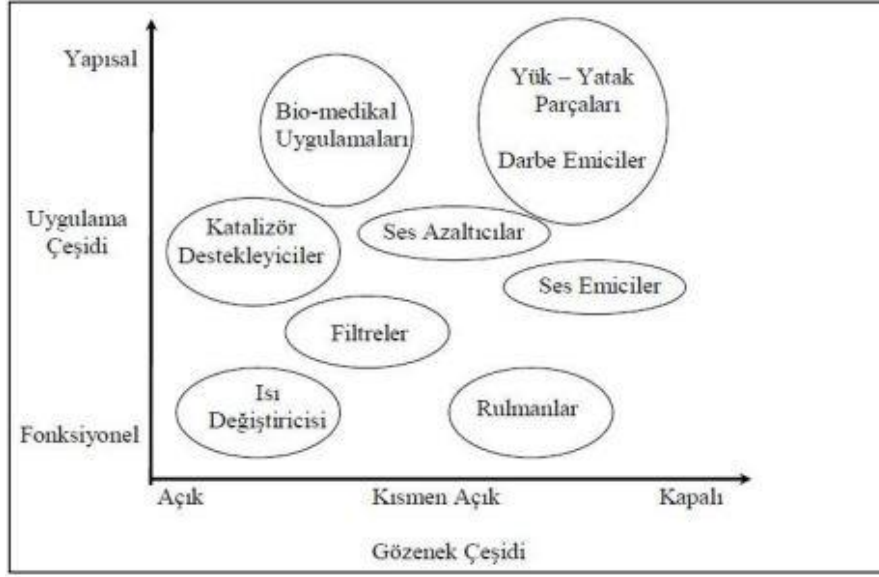
Alüminyum alaşımlı köpükler, düşük maliyeti, nispeten kolay üretim süreci, diğer metallere kıyasla düşük ergime sıcaklığı ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Ülkemizde savunma ve havacılık sanayisinde kullanılan 5083 alüminyum alaşımına yapmış olduğum literatür taramasında hiç ısıl işlem uygulamasına rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında, 5083 hurda alüminyum alaşımı kullanarak, açık gözenekli alüminyum köpük üretilip, ısıl işlem sonrası mekanik özelliklerinin incelenmesi yapılmıştır.

BÖLÜM 2

METALİK KÖPÜKLER

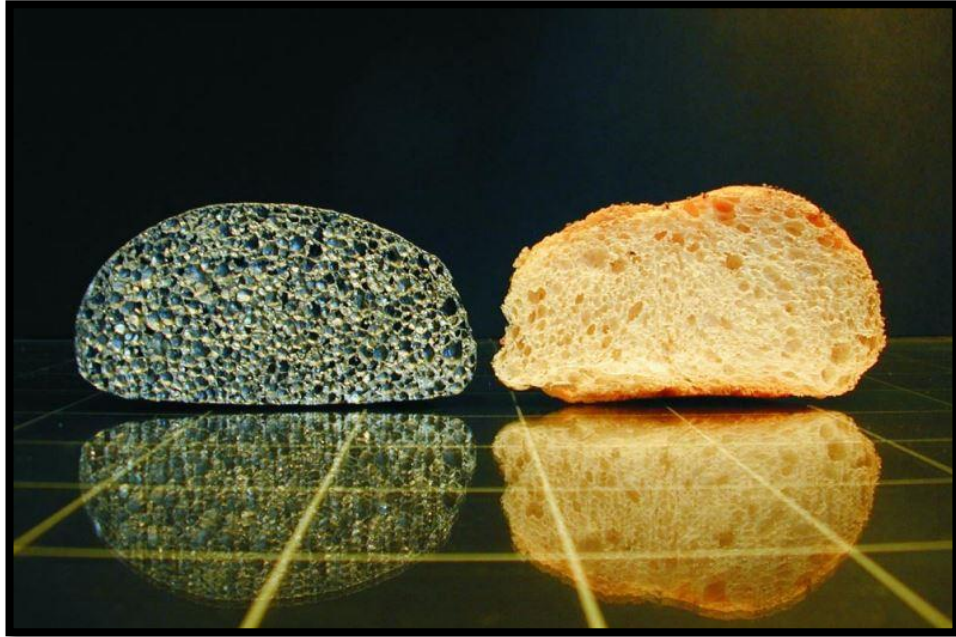
2.1. METALİK KÖPÜKLERİN TANIMI

Ahşap, mantar, bal peteği, kemik, bitki parankiması (yaprağın enine kesiti) ve sünger gibi köpük benzeri yapılar dahil olmak üzere doğada birçok gözenekli yapı vardır. Bu yapılar, hafif olmaları ve doğal yükleme gereksinimlerini karşılayan mükemmel mekanik özellikleri bir araya getirir. Bu doğal olarak oluşan gözenekli yapılardan esinlenerek, araştırmacılar metallerin uygulama alanlarını genişletmek için gözenekli metal yapılar elde etmişlerdir. Genel olarak, gözenekli metalleri iki gruba ayırabiliriz. İlk grup, kapalı gözenekli metaller, bir diğeri ise açık gözenekli metaller olarak adlandırılmaktadır. Alüminyum, Magnezyum, Titanyum, Demir vb. gibi birçok metal gözenekli yapı olarak üretilebilmiştir. Alüminyum, zengin rezervleri, düşük yoğunluğu, iyi sünekliği ve yüksek korozyon direnci gibi birçok avantajı nedeniyle mühendislikte en yaygın kullanılan demir dışı metaldir. Bundan dolayı, alüminyum köpükler en popüler ve en çok incelenen metal köpüklerden biri haline gelmiştir. Alüminyum köpükler, enerji emme, titreşim sönümleme, ses soğurma ve ısı yalıtımı ve dağıtımı ile birçok mekanik özelliğe sahiptirlerdir. Bundan dolayı alüminyum köpükler, havacılık, otomobil, petrokimya endüstrisinde ve inşaat malzemeleri vb. gibi birçok alanda kullanılma potansiyeline sahiptirler (Şekil 2.1) [1].



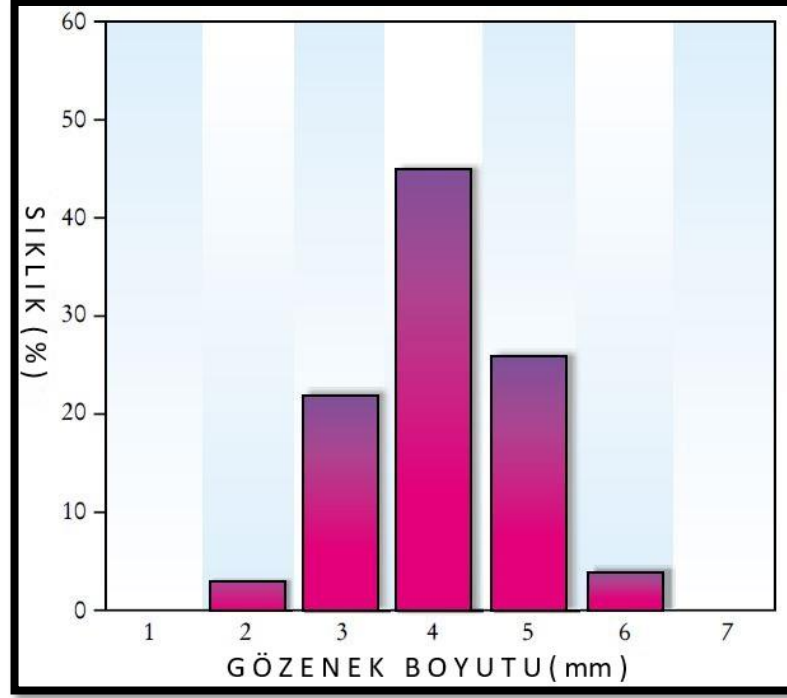
Şekil 2.1. Metal köpüklerin endüstride kullanım alanları.

Şekil 2.2’de çinko köpük ve ekmek görülmektedir, ikisi de birbirine çok benzer ve 8 cm genişliğindedir. Çinko köpüğün gözenekleri hidrojen gazının içeride kalmasıyla oluşurken, hamur ise mayalanarak CO₂ salınımı ile fırında ekmek halini alarak gözenekleri oluşmuştur [2].



Şekil 2.2. Zn köpük ve CO₂ sayesinde kabarmış ekmek [2].

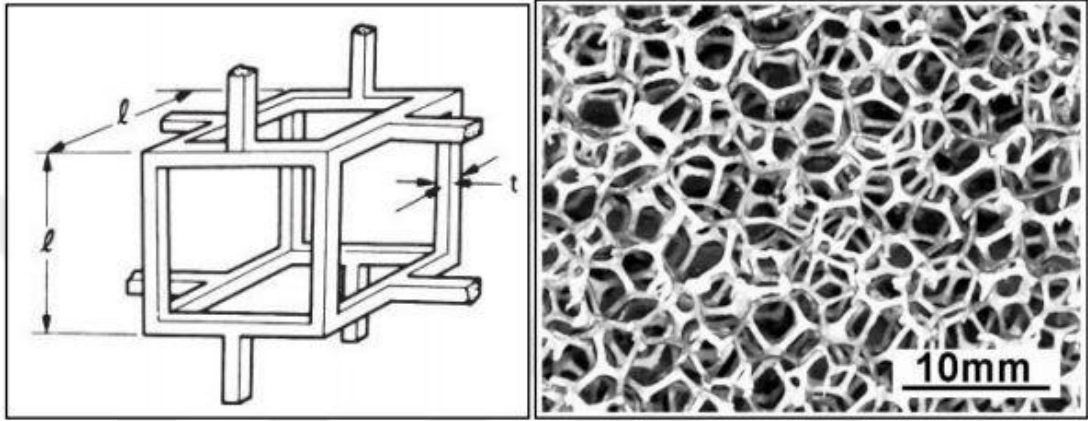
Hem işlevsel hem de yapısal uygulamalar için, gözenek boyutu, şekli ve gözenekler arasındaki kanalın homojenliği son derece önemlidir. Gözenek oluşumu genellikle gaz kabarcıklarıyla veya replikasyon yöntemiyle oluşturulmaktadır. Şekil 2.3'te 6061 alüminyum alaşımının sıklık ve gözeneklilik grafiği verilmiştir [2].



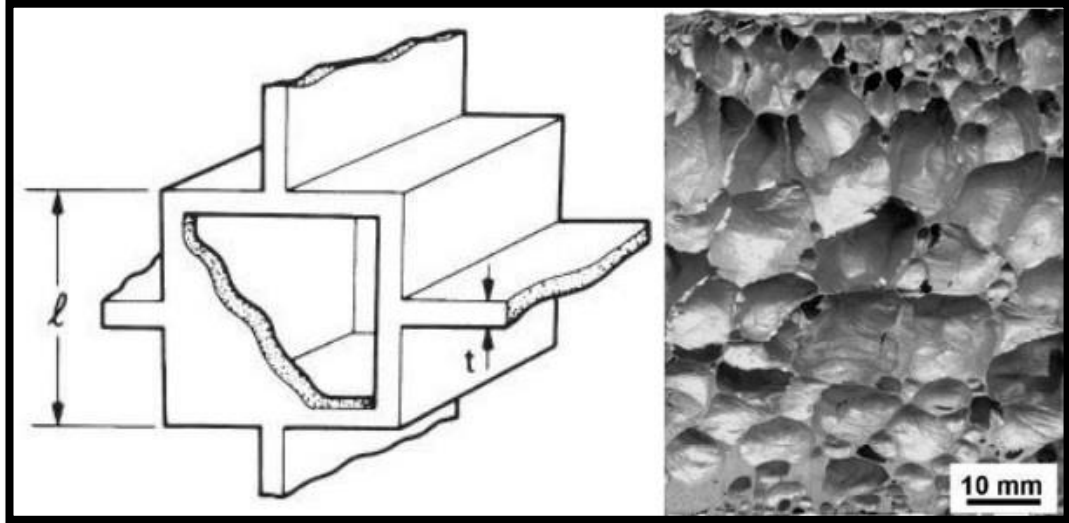
Şekil 2.3. 6061 alüminyum alaşımının sıklık-gözenek boyutu grafiği [2].

2.1.1. Açık ve Kapalı Gözenekli Metal Köpükler

Metal köpükler gözenek yapısına göre açık gözenekli ve kapalı gözenekli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kapalı gözenekli metal köpüklerde, her bir hücre metal tabaka ile korunurken, açık gözenekli metal köpüklerde ise tek tek hücreler birbirine bağlantısı vardır ve hava veya herhangi bir sıvının metal köpük içerisinden geçmesine imkan sağlar. Kapalı gözenekli metal köpükler genellikle hafif yapılarda kullanırken, açık gözenekli metal köpükler daha çok ısı transfer olaylarında veya geçirgenliğin ve gözenekliliğin istendiği yerlerde kullanılmaktadır [3].



Şekil 2.4. Açık hücreli metal köpük şekli ve DOUCELL yöntemiyle üretilmiş metal köpük görünümü [3].



Şekil 2.5. Kapalı hücreli metal köpük şekli ve kapalı hücre yöntemiyle üretilmiş metal köpük görünümü [3].

Son on yılda, hafif yapı malzemelere olan talebin artmasıyla, metal köpükler gelişmesine yol açmıştır. İlk olarak, açık gözenekli metal köpükler vardı ve hücreleri tüm yapı boyunca birbirine bağlıydı. Bu açık gözenekli metal köpükler daha ağırlıklı olarak ısı eşanjörleri, ısı alıcılar ve katalitik yüzeyler gibi uygulamalarda kullanılmıştır. Diğer bir türü kapalı gözenekli metal köpüktür. Kapalı gözenekli metallerde hücreler ince bir hücre yüzeyi ile ayrılır ve boyutları değişebilir [4].

Açık ve kapalı gözenekli metaller arasındaki farklılık, malzeme dağılımından da anlaşılabilir. Mekanik özellikleri bakımından kapalı gözenekli metal köpük yüksek

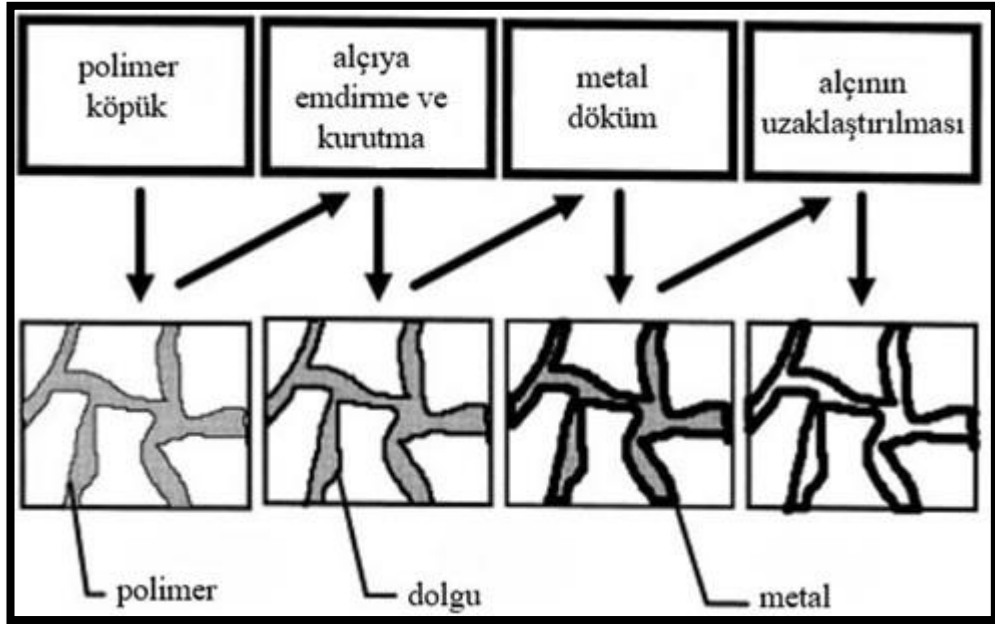
hızlı bir darbede içinde hava boşlukları bulunduğundan dolayı açık gözenekli köpüğe göre dikkate değer bir farklılık gösterebilir [5].

2.2. AÇIK GÖZENEKLİ METAL KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Açık gözenekli metal köpük üretim yöntemlerinin bazıları aşağı verilmiştir.

2.2.1. Hassas Döküm Yöntemiyle Polimer Malzemedan Açık Gözenekli Metal Köpük Üretimi

Polimer köpük ile hassas döküm yönteminde, ilk olarak açık gözenekli polimer köpük kuyumcu alçısına daldırılır ve kurutmaya bırakılır. Daha sonra eriyik metal dökülerek polimer süngerin yerini alır. Alçı basınçlı su yardımıyla veya ısıl işleme uzaklaştırılır ve açık gözenekli köpük elde edilir (Şekil 2.6).



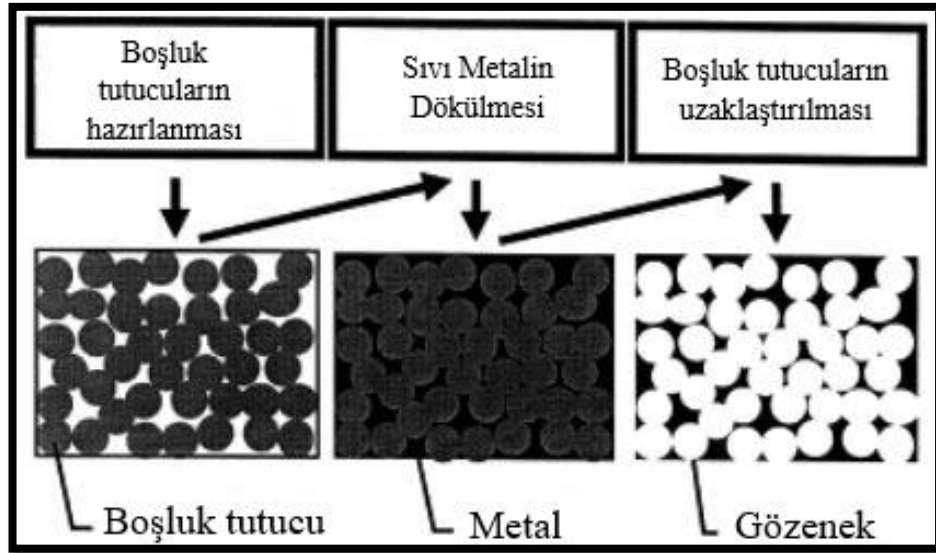
Şekil 2.6. Polimer köpük ile hassas döküm yöntemi [6].

Ergime derecesi düşük birçok demir dışı (Al, Mg gibi) bu yöntemle üretilebilmektedir. Gözenek boyutu yaklaşık olarak %80 ile %97 arasındadır. Ancak, polimer köpüğün bıraktığı boşluk çok ince cidarlı olduğu için sıvı metalin geçmesi zor olabilir. Böyle

durumlar inert gaz (Ar veya N) yardımıyla ve ön ısıtma ile döküm yapılması tavsiye edilir [6].

2.2.2. Boşluk Tutucuların Uzaklaştırılmasıyla Açık Gözenekli Metal Köpük Üretimi

Bu yöntem, sıvı eriyik metalin içinde (tuz, alüminyum oksit vb.) gibi organik veya inorganik maddelerin hapsedilmesiyle oluşur. Hapsedilen boşluk tutucular inert gaz sayesinde homojen bir karışım elde edilmesi amaçlanır. En son aşamada boşluk tutucular, su vb. bir madde yardımıyla uzaklaştırılarak metal köpük elde edilir (Şekil 2.7).

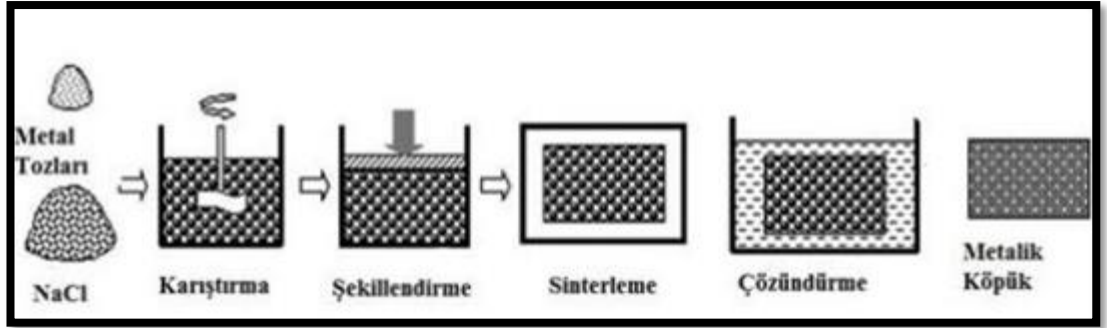


Şekil 2.7. Boşluk tutucular ile metal köpük üretim yöntemi [6].

Düşük ergime sıcaklığına sahip birçok demir dışı metaller bu yöntem ile elde edilebilir. Yüksek sıcaklıklara çıkıldığında tuz eridiği için (801°C) metal köpük üretimi olmaz. Maksimum gözenek boyutu yaklaşık %80 civarındır.

2.2.3. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Açık Gözenekli Metal Köpük Üretimi

Bu döküm yönteminde, metal tozu ve boşluk tutucu malzeme birbirine karıştırılır. Daha sonra şekillendirmek için preslenir ve sinterleme işlemi için fırına konulur. Fırından çıkarılan metal içerikli malzeme, su vb. maddeler yardımıyla boşluk tutuculardan uzaklaştırılır ve metal köpük elde edilir (Şekil 2.8). Boşluk tutucu tuz olursa su yardımıyla uzaklaştırılırken, tuz yerine uçucu maddeler kullanılarak sinterleme işleminde uçuşması sağlanır, bu sayede su ile uzaklaştırma yöntemini uygulamaya gerek kalmaz. Gözenek boyutu, tuzun boyutuna göre ayarlanabilir.

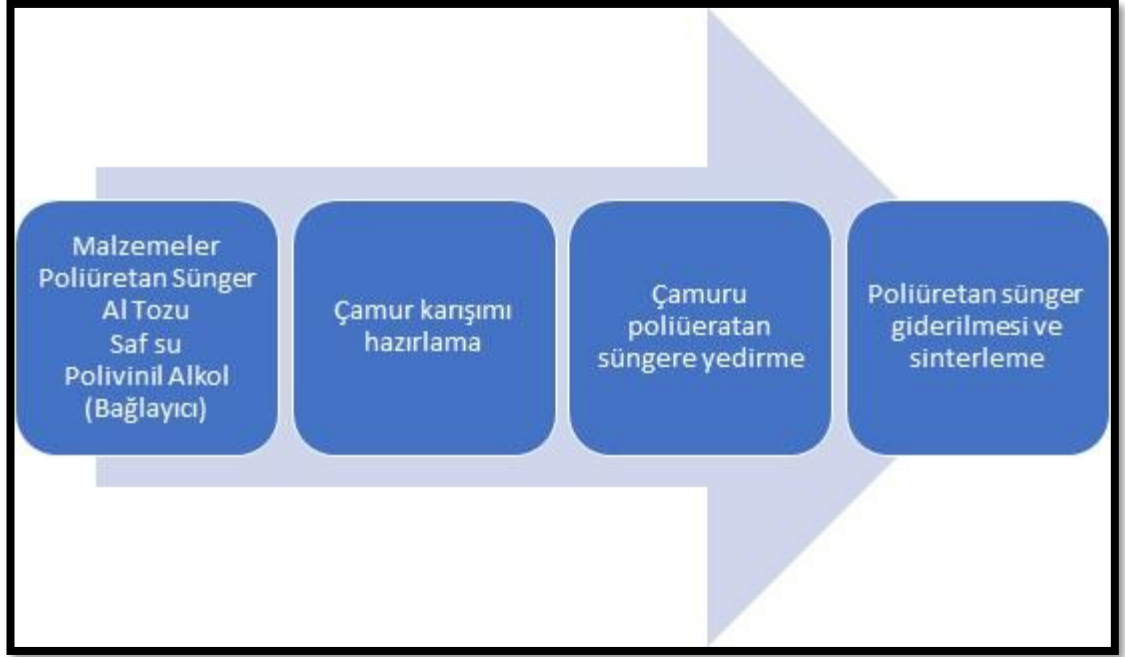


Şekil 2.8. Toz metalurjisi yöntemiyle metal köpük üretim şeması.

2.2.4. Polimer Emdirme Yöntemiyle Açık Gözenekli Metal Köpük Üretimi

Polimer emdirme yöntemi replika yöntemi olarak da bilinmektedir. Bu yöntem, 3 aşamada gerçekleşmektedir. Birinci aşama, çamur hazırlama, ikinci aşama model malzemeyi çamura yedirme, üçüncü aşama model malzemenin uçuşmasını sağlamak ve sinterleme işlemidir (Şekil 2.9) [7].

Model malzeme olarak genellikle poliüretan sünger kullanılır. Poliüretan süngerin boyutuna göre gözeneklilik boyutu değişebilir. Yöntemin en zor kısmı çamur hazırlamaktır. Çamur katı konsantrasyonu %50 ile %70 arasında olmalıdır. Az olduğunda çamur akışkan olacağı için metal süngere tutunması zor olacaktır. Çok katı olduğunda da çamuru metal süngere yedirmek zor olacaktır [7].



Şekil 2.9. Replikasyon yöntemiyle açık gözenekli metal köpük üretim şeması [7].

2.2.5. Düzenli Yapıda Açık Gözenekli Metal Köpük Üretimi

Metal köpükler düzenli veya düzensiz yapıda üretilebilirler. Düzensiz yapıdaki metal köpükler gelişmiş güzel homojen bir şekilde dağılmakta olup, düzenli yapıdaki ise belirli bir düzen içerisindedir.

Düzenli yapıda eşanjör köpük üretiminin en önemli 3 aşaması şu şekildedir;

- 1- Maça kalıbı tasarımı
- 2- Maça basımı
- 3- Döküm çalışması

Üretilen maça kalıbı Şekil 2.10'da görüldüğü gibidir. Prototipi üretilmiş ve üretilen bu kalıp ile maça basım çalışmaları yapılmıştır. Maça üretimi yaklaşık 275 °C'de 10 dakika pişirilerek üretilmiştir.



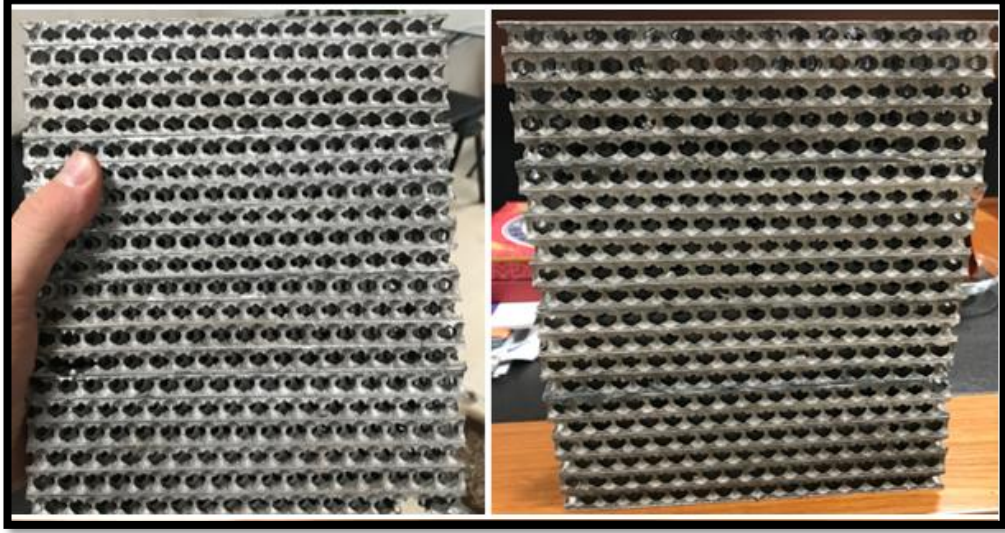
Şekil 2.10. Maça kalıbı ve üretimi yapılmış olan düzenli yapıda Shell maça görünümü.

Üretilen maçalar üst üste konup sabitlenerek döküm için hazırlanmıştır. Maçalar arasındaki sıvı metalin geçeceği gözenekler küçük olduğu için büyük besleyici kullanılarak yer çekimi kuvvetinden de faydalanılmıştır. Şekil 2.11’de de görüldüğü gibi yüksek besleyicili flanşlı kalıp görülmektedir.



Şekil 2.11. Yüksek besleyicili flanşlı döküm kalıbı görünümü.

Yapılan döküm çalışmasından sonra Shell maça uzaklaştırılması için 300 °C’de 1-2 saat arasında tutulup, maçanın yapısı bozularak uzaklaştırılmıştır. Isıl işlem sonrasında da üretilen parça frezede işlenerek nihai ürün halini almıştır (Şekil 2.12).

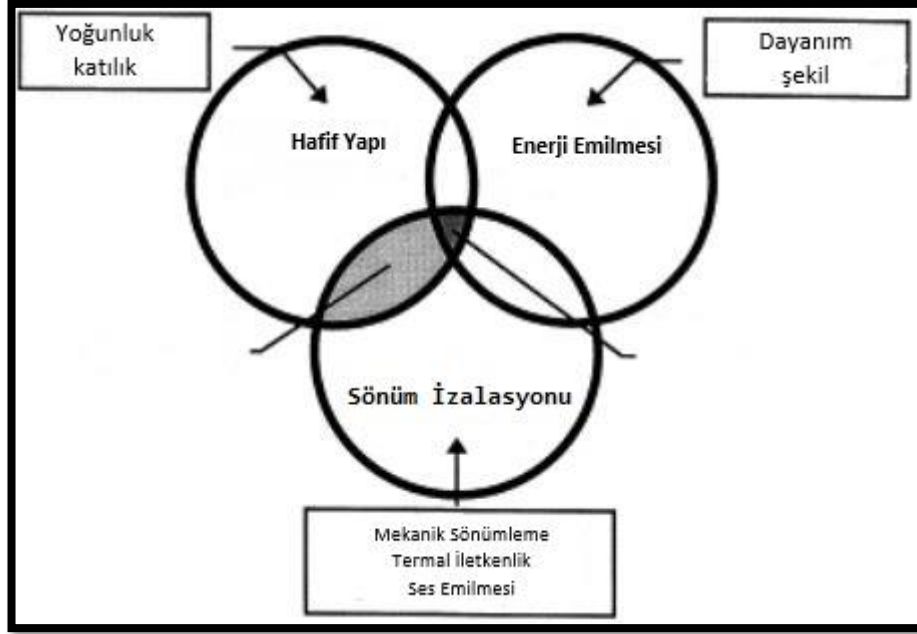


Şekil 2.12. Üretimi yapılan düzenli yapıda eşanjör köpük görünümü.

2.3. METALİK KÖPÜKLERİN ENDÜSTRİYEL ALANDAKİ YAPISAL UYGULAMALARI

2.3.1. Otomotiv Endüstrisi

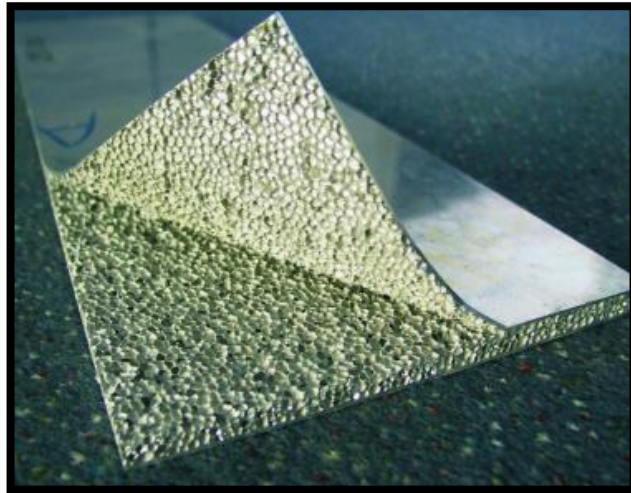
Otomobillerde güvenliğe artan talep doğrultusunda, araçlardaki ağırlık ile doğru orantılı şekilde artış göstermiştir. Fakat ağırlığın artmasıyla yakıt tüketimi de artmıştır. Avrupa ve Japonya’da kısa araç kullanılmaktaydı, fakat bu konfordan ödün vermekteydi. Kısa araçların kullanılma amacı çarpışma bölgelerini kısaltmaktaydı, bu da motor ve parçalarının birbirine çok yakın olması sebebiyle ısınma problemlerinden kaçınılması imkansız hale geliyordu. Metal köpükler, bu sorunlara çözüm sunabilmektedir. Hafif olmaları, çarpışma veya darbelerde anında enerji emici olmaları ve ısı soğurması gibi birçok özelliğiyle kullanılabilir malzemelerdir (Şekil 2.13) [6].



Şekil 2.13. Metalik köpüklerin otomotiv endüstrisindeki yapısal uygulamaları [6].

2.3.2. Hafif Konstrüksiyon

Alüminyum köpükten yapılmış sandviç paneller, hafif ve sert yapılarıyla arabalarda ağırlığı azaltmak için kullanılabilir. Alman üretici Karmann (Osnabrück) yarış arabalarında, çelik levhalar yerine sandviç paneller kullanmıştır (Şekil 2.14). Böylelikle, ağırlıkta azalış ve dayanıklılıkta ise bir artış olduğu görmüştür [6].



Şekil 2.14. Alüminyum esaslı sandviç panel görünümü [6].

2.3.3. Ses Yalıtımı

Polimer köpükler, genellikle ses yalıtımında kullanılırlar. Gözenekli bir yapıya gelen ses dalgaları kısmen yansıtılır veya gözenekler içine girer. Yapıya giren ses dalgası, gözenek kanalları birbirine bağlıysa yoğunlaşır. Köpükler 1-5 kHz aralığındaki ses dalgalarında, yaklaşık olarak %99'a kadar soğurma yapabilir [6].

Japonya'da otoyollarda, otomobillerden kaynaklanan gürültüyü azaltmak için metal köpükler kullanılmıştır. Ayrıca kamu binalarında da ses soğurması özelliğe sayesinde köpük paneller de kullanılmıştır [6].

2.3.4. Havacılık Endüstrisi

Köpüklü metallerin hafif yapısal yönü, havacılık ve otomotiv sektöründe çok benzerdir. Havacılık uygulamalarında, pahalı bal peteği yapılarının köpük alüminyum levhalar veya metal köpük sandviç panellerle değiştirilmesi, daha düşük maliyetlerle daha yüksek performans sağlayabilmektedir. Bazı helikopter üreticisi firmalar, helikopterlerin bazı yerlerinde alüminyum köpük kullanmayı denemektedirler [6].

2.3.5. Gemi Yapım Endüstrisi

Gemi yapımında hafif yapı çok önemlidir. Modern yolcu gemilerinde, alüminyum ekstrüzyonlardan, alüminyum levhalardan ve alüminyum petek yapılardan yapılabilmektedir. Bu yapıların yerine çekirdekli büyük alüminyum köpük paneller tercih edilecektir. Eğer, yüzeylerine poliüretan yapıştırıcı yapıştırılırsa, daha sert ve hafif yapılar elde edilir [6].

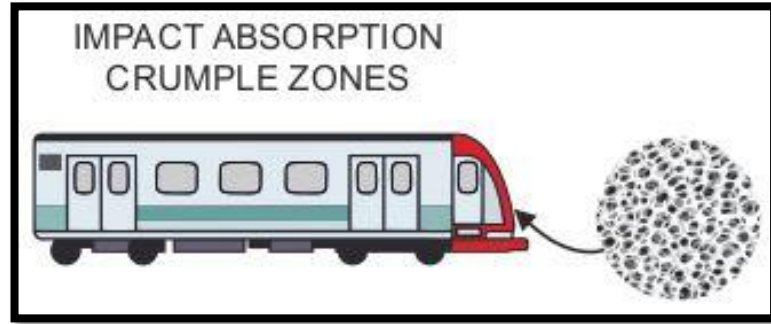
2.3.6. İnşaat ve Yapı Endüstrisi

İnşaat sektöründe geniş bir uygulama yelpazesi vardır. Modern ofis binaları betondan yapıldığından, cepheleri betonu gizleyen ve binanın görünümünü iyileştiren panellerle dekore edilmiştir. Bu paneller hafif, sert ve yangına dayanıklıdır. Bu panellerin bir kısmı yerine alüminyum köpük kullanılabilir [6].

Modern asansörlerde, sık hızlanma ve yavaşlama olduğundan dolayı hafif yapı çok önemlidir. Fakat hafif yapılar da güvenlikten ödün vermektedir. Alüminyum köpükler, hafif olmaları, darbe emici özelliği ve sert olmalarıyla kullanılabilirler [6].

2.3.7. Demir Yolu Endüstrisi

Tren ve tramvaylarla, arabaların çarpışma ihtimali olabileceği için enerji absorbe etmek hayati önem taşımaktadır. Çarpışmadaki enerjiyi soğurması için tren, tramvay ve otomobil gibi birçok alanda metal köpükler tercih edilmiştir (Şekil 2.15) [6].



Şekil 2.15. Demir yolu endüstrisinde metal köpük kullanımı [8].

BÖLÜM 3

LİTERATÜR TARAMASI

Sosnick vd. 1943 yılında Al metali ve Hg metalleri sayesinde metal köpük üretmeyi başarmışlardır. Al yaklaşık olarak 660 °C ergimekte, Hg ise yaklaşık 356 °C kaynamaktadır, Al ergimesi sırasında kaynama derecesine gelen Hg buharlaşarak sıvı Al içerisinde gaz boşlukları oluşturarak metal köpük elde etmişlerdir [9].

Eski yıllarda metal köpük üretmek için iki yol kullanıldı. Birincisinde, sürekli olarak gaz verilerek metal köpük üretildi. İkinci yöntemde ise şişirici maddeler (TiH₂ vb.) kullanıldı. Alüminyumun köpük üretimine oldukça uygun olduğu bulunmuştur. Ethyl Corp, 1972 yılları civarında, Ford Motor Company şirketine oldukça yüksek kalitede alüminyum köpük üretmeyi başarmıştır [2].

Metal köpükler yüksek enerji emme potansiyeline sahiptirler. Metaller ve polimerler dahil olmak üzere birçok malzeme köpük şeklinde üretilebilir. Alüminyum köpükler, yüksek termal stabilitiye ve iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Peroni vd. 2007 yılında yaptıkları araştırmada, alüminyum esaslı metal köpüğün mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan incelemede araçlarda enerji emilimini arttırmak için alüminyum köpük kullanmışlardır. Yapılan testler sonucunda hem aksenel sıkıştırmada hem de bükülmede köpüğün çok büyük katkı sağladığını görmüşlerdir [10].

Costanza vd. 2020 yılında, çizimi yapılan 3D yazıcı prototip bir metal köpük oluşturmuşlardır. Oluşturulan metal köpük alçı kalıba alındıktan sonra 600 °C fırına koymuşlardır ve PLA malzemesini yakarak uzaklaştırmışlardır. Son aşamada ise uzaklaştırılan PLA malzemesi yerine sıvı Al metal dökülerek nihai ürün elde etmişlerdir. Bu yöntem ile istenilen gözenek boyutu çizim yapılarak, metal köpüğün gözenek boyutu ayarlanabilir [11].

Jiang vd. 2016 yılında, karbon (C) ve zirkonyum (Zr)'dan yeni çok yüksek sıcaklıklara dayanan seramik köpük üretmişlerdir. Elde edilen ZrC köpüğü, gözenek çapı ortalama 400 ile 520 µm arasında değişmektedir, düşük yoğunluklu ve açık hücreli yapısıyla makro gözeneklidir. Açık gözeneklilik %75,38 ve yoğunluk 1.35 g/cm³ olan kompozit köpük, 26,5 ± 6,28 Mpa yüksek bir basınç dayanımına sahiptir. Ayrıca, ZrC köpüğünün termal iletkenliği 40.411 W/mK ile 9.102 W/mK'dir [12].

Pimiento vd. 2015 yılında, infiltrasyon yoluyla metal köpük üretmeyi başarmışlardır. Kontrollü atmosferli fırın kullanmak yerine, oksidasyonu önlemek için inert gaz kullanmışlardır. Bu çalışmada, %98,8 saflıkta külçe Al ve üç farklı boyut da boşluk tutucu olarak NaCl kullanılmışlardır. I. aralık 4,7 – 4,0 mm, II. aralık 4,0 – 3,3 ve III. aralık 3,3 – 2,0 mm arasındadır. Maksimum porozite %73,7 ve minimum yoğunluk ~ 0.71 g / cm³ olarak bulmuşlardır [13].

Matsushita vd. 2017 yılında, toz sinterleme yöntemiyle kemik dokusu mühendisliği için farklı yapılarda titanyum köpükler ürettirler. Bu yöntemde, Ti metal tozu ve amonyum hidrojen karbonat granül karışımı bir kalıpta preslendi ve 10-5 Torr vakum altında 1200-1400°C arasında değişen sıcaklıkta 2 saat ısıl işleme tabi tutuldu. Amonyum hidrojen karbonat, ısıl işlem sırasında buharlaştırılarak, gözenekler meydana geldi. Oluşan Ti köpükler tavşan ve köpeklerde implant edilerek test edildi [14].

Xiong vd. 2008 yılında, kemik dokusu için TiNi metal köpükler üretmişlerdir. TiNi köpük numunelerinin mekanik özelliklerine bakılmıştır. Basınç altındaki köpüklerin gözeneklerinin artmasıyla birlikte plato gerilmelerinin ve elastik modülün azaldığını görmüşlerdir. Numuneler arasında, %71 gözenekliliğe sahip TiNi alaşımlı köpük,

sırasıyla 860 MPa ve 38,3 MPa olan en yüksek elastik modül ve plato stresini sergiler. TiNi köpüklerinin mekanik özellikleri, kemiğe yakın olduğunu söylemişlerdir [15].

Broxtermann vd. 2016 yılında, perlit ve A356 alüminyum alaşımını infiltrasyon yöntemiyle, yüksek gözenekli bir perlit-metal köpük üretmişlerdir. Üretim öncesinde tek ve çift aşamalı olmak üzere sıkıştırma uygulamışlardır. Bu metal matrisli köpük ortalama %79 gözeneklilik ve 0.72 g/cm³ düşük bir yoğunluğu vardır. Çift aşamalı sıkıştırma yapılan metal matrisli köpüğün enerji soğurmasının daha fazla olduğu görülmüştür. Gözenekliliğin artmasıyla basma sırasında kaymaya neden olduğu gözlemlenmiştir [16].

Orta frekans bantlarında kompozit yapı açık hücreli köpük malzemenin akustik özelliklerini anlayabilmek için Liang vd. 2020 yılında bazı çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada, 16 adet kompozit yapı açık hücreli köpük üretmeyi başarmışlardır. Ürettiklerin numunelerden 500Hz, 800Hz, 1000Hz, 1250Hz, 1600Hz'deki ses yalıtımlarını AWA8551 empedans tüpü ile ölçülmüşlerdir. Sonuç olarak, kompozit yapı açık hücreli köpüklerin ses yalıtımı sağladığını bulmuşlardır [17].

Rossi vd. 2017 yılında, alüminyum köpüklere camsı emaye tabakası kaplayarak koruyucu bir bariyer haline getirmişlerdir. Alporas yöntemiyle üretilen alüminyum köpüklerin bükülme, ateşe karşı dayanıklılık ve korozyon direncini arttığını gözlemlenmiştir. Ek olarak da bükülme direncinin cam emaye içindeki partiküllerin boyutuna bağlı olduğunu bulmuşlardır [18].

Yağış yapmış olduğu tez çalışmasında, polimer emdirme yöntemiyle açık hücreli alüminyum köpük üretmeyi başarmıştır. Ana malzemeleri alüminyum tozu, bağlayıcı, dağıtıcı ve saf su yardımıyla çamur hazırlamıştır. Hazırlanan çamura metal sünger daldırılmış ve 24 saat oda sıcaklığında kurutmaya bırakmıştır. Kuruyan sünger 120°C'de, 6 saat vakumlu fırında bekletilmiştir. Son aşamada mukavemet kazandırmak için sinterleme işlemi yapıp, mekanik özelliklerini incelemiştir [7].

BÖLÜM 4

MATERYAL VE YÖNTEM

Deneysel çalışmalar iki bölümden oluşmaktadır. Deneysel çalışmaların ilk bölümünde infiltrasyon yöntemiyle Al esaslı metal köpükler üretilmiştir. İkinci bölümünde ise üretilen Al köpüklerin; ısıl işlem, görüntü, sertlik, basma, darbe ve korozyon deneyleri yapıp, özellikleri karşılaştırılmıştır.

4.1. ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER

İnfiltrasyon yöntemiyle üretilen metal köpüklerin ana malzeme olarak 5083 alaşım Al kullanılmıştır. Kullanılan ana malzemenin spektral analiz Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. 5083 Al alaşımı spektral analiz sonucu.

%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Zn	%Ni	%Al
0,30	0,30	0,260	0,40	3,00	0,10	0,080	0,0080	95,30

Metal köpük üretiminde gözenek oluşturmak için boşluk tutucu olarak NaCl (Sodyum klorür) kullanılmıştır. Farklı boyutlarda üretimi sağlanan metal köpüklerin, yaklaşık $2 \pm 0,5$ mm boyutunda olanlara küçük gözenekli, $3 \pm 0,5$ mm boyutundakilere ise büyük gözenekli olarak adlandırılmıştır. Bunun yanı sıra farklılık katmak için yaklaşık olarak $3 \pm 0,5$ mm arasındaki perlit malzemesi de NaCl yerine kullanılarak kompozit bir malzeme olarak başarılı bir şekilde üretimi sağlanmıştır. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi sırasıyla $2 \pm 0,5$ mm boyutunda NaCl, $3 \pm 0,5$ mm NaCl ve $3 \pm 0,5$ mm arasında perlit görülmektedir.

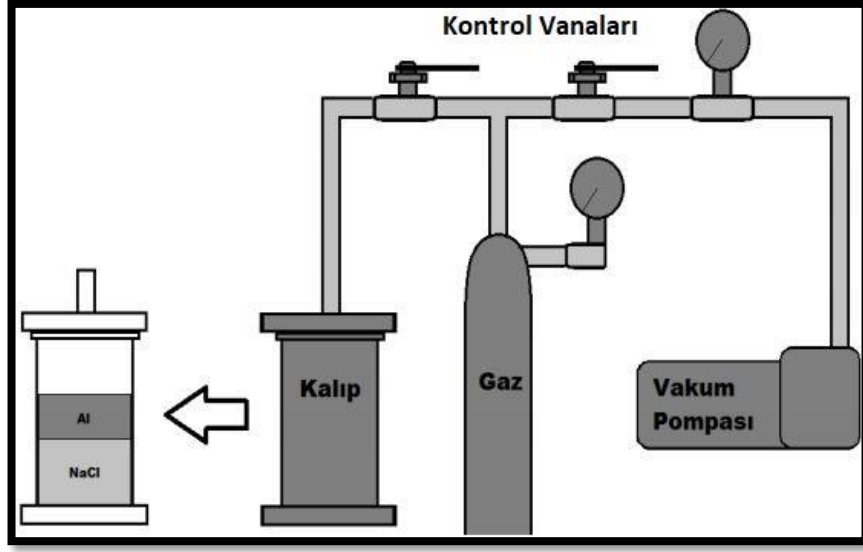


Şekil 4.1. a) $2 \pm 0,5$ mm boyutlu NaCl, b) $3 \pm 0,5$ mm boyutlu NaCl ve c) $3 \pm 0,5$ mm boyutları arasındaki perlit görünümü.

4.2. İNFİLTASYON YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİ

Metal köpük üretiminde 5083 alüminyum alaşımlı demir dışı metal seçilmiştir. Alüminyum seçilmesinin nedeni hafiflik ve düşük ergime sıcaklığı gibi birçok özelliğe sahip olmasındandır. Alüminyum malzemesi $650-750^{\circ}\text{C}$ ergimekte olup, NaCl ise yaklaşık 810°C sıcaklığından ergimektedir. Döküm işleminden NaCl'ün ergime sıcaklığı, Al malzemesinin ergime sıcaklığından yüksek olduğu için yer tutucu olarak kullanabilmektedir.

İnfiltrasyon yöntemiyle alüminyum köpük üretim sistemi Şekil 4.2'de, Şekil 4.3'te ise infiltrasyon kalıbı ve bileşenleri görülmektedir. İnfiltrasyon yöntemiyle döküm sisteminde kullanılan malzemeler kalıp, argon tüpü, kontrol vanaları, manometre ve kül fırınıdır. İnfiltrasyon sistemindeki vakumun ve N gazının tahliyesi kontrol vanalarıyla yapılmaktadır ve basıncın ayarlanması manometre ile sağlanmaktadır. Vakum pompası Rotary tip olup yaklaşık 2×10^{-3} mbar vakum kapasitesine sahiptir.



Şekil 4.2. İnfiltrasyon yöntemiyle Al köpük üretim sistemi.

Alüminyum külçe ve boşluk tutucu (NaCl) malzemesini içinde bulunduran kalıp 304 kalite paslanmaz çelikten üretimi yapılmıştır. Kalıptan alüminyum köpük rahat çıkarılabilmesi için alt plaka, üst plaka ve dikey silindir hazne olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır. Kalıbın yüksekliği 225 mm, iç çapı 95,6 mm ve et kalınlığı 5 mm olup Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. İnfiltrasyon kalıbı ve bileşenleri.

Hurda alüminyumların infiltrasyon kalıbına rahat bir şekilde girebilmesi için alüminyum külçeler oluşturulmuştur. Şekil 4.4'te görülen iki parça halindeki kalıpta döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Yolluk ve besleyicileri kesilerek 90 mm çap ve 40 mm uzunluğa sahip alüminyum külçeler oluşturulmuştur.



Şekil 4.4. Kokil külçe kalıbı ve Al külçe görünümü.

İnfiltrasyon yöntemi için ilk olarak NaCl parçacıkları veya perlit malzemesi kalıbın en alt kısmına konular ve üzerine alüminyum külçe yerleştirilir. Alt ve üst plakada herhangi bir sızdırma olmaması için mastik sıkılır ve kalıp kapatılır. İnfiltrasyona hazır olan kalıp Şekil 4.5'teki fırına yerleştirilir ve vakum altında Al metalinin ergimesi için beklenir. Fırının kontrol panelinden takip edilerek istenilen sıcaklığa gelindiğinde vakum kapatılarak, 1 dakika boyunca 2 bar basınçta Ar gazı verilir. Bu sayede hem karışım sağlanacak hem de oksitlenmesi önlenecektir. Kalıbın soğumasıyla birlikte Al köpük kalıptan çıkarılmıştır. Daha sonra köpük malzemenin alt ve üst kısımları kesilerek Şekil 4.6'daki gibi tam bir silindir haline getirilmiştir.



Şekil 4.5. Laboratuvar tipi fırın görünümü.



Şekil 4.6. 5083 Al alaşımlı köpük görünümleri a) büyük gözenekli Al köpük b) küçük gözenekli Al köpük.

Döküm işleminden sonra köpük malzemesi içerisinde bulunan NaCl tanelerini çözündürerek boşluklar elde edilmiştir. Çözündürme işlemi Şekil 4.7'deki ısıtıcı manyetik karıştırıcı ile 2 litre su içerisinde, 80-90°C arasındaki sıcaklıklarda yapılmıştır. Her köpük malzemesi için 2 saat çözündürme işlemi uygulanıp, ilk 1 saat sonrasında su değişimi olmuştur. Perlit malzemesi için çözündürme işlemi uygulanmamış döküm içerisinde bırakılmıştır.



Şekil 4.7. Manyetik karıştırıcı görünümü.

4.3. DENEYLERDE KULLANILAN ÖLÇÜM CİHAZLARI VE YÖNTEMLER

Üretimi yapılan alüminyum köpükler ısıtılma tabii tutulmuştur. Isıl işlem 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, Resim 4.8'deki fırında 500°C'de 24 saat homojenleştirme işlemi daha sonra 2 saat çözeltiyeye alma işleminden hemen sonra köpük numuneye su verme işlemi uygulanmıştır. Son aşamada ise yaşlandırma ısıtılma işlemi yapılmıştır, 120°C'de 4h-8h-16h-24h-32h-48h-56h olmak üzere 7 farklı zaman parametresinden oluşmuştur.



Şekil 4.8. Isıl işlem fırını görünümü.

Köpük malzemelere Şekil 4.9’da görülen optik mikroskop sayesinde mikro yapısal incelemeler yapılmıştır. İlk olarak 200-2200 mesh arası zımpara işlemi, daha sonra alümina solüsyonu ile parlatma ve son olarak Keller kimyasalı ile dağlama işlemi yapılmıştır. Keller dağlayıcısı bileşimi Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Mikro görüntü alma işlemi Nikon Epiphot 200 seri markalı mikroskop ile yapılmıştır.

Çizelge 4.2. Keller reaktif çizelgesi.

HNO₃	HCl	HF	H₂O
2,5 ml	1,5 ml	1 ml	95 ml



Şekil 4.9. Optik mikroskop görüntüsü.

Mikro sertlik için Shimadzu markalı cihazda, 500 gr yük altında, 20 saniye boyunca uygulanarak ölçülmüştür. Testler 3 defa tekrarlanıp, aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Mikrosertlik ölçümleri Şekil 4.10’daki cihaz üzerinde yapılmıştır.



Şekil 4.10. Mikrosertlik cihaz görünümü.

Basma testleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde yapılmıştır. Şekil 4.11’de görülen Zwick/Roell 600kN kadar yük uygulanabilme kapasitesine sahip mekanik cihaz kullanılmıştır. Basma numuneleri 10x10x10 mm boyutlarında olup, basma hızı 0.005 s^{-1} olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.11. Mekanik basma test cihazı görünümü.

Darbe testleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde bulunan Zwick/Roell Rkp450 çentik darbe cihazında yapılmıştır. Darbe enerjisi 450 joule'lük enerji kapasitesine sahip sarkaç tipi bir dinamik test cihazıdır. Darbe testleri Şekil 4.12'de görülen cihazda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.12. Mekanik darbe test cihazı görünümü.

Korozyon deneyi %96,5 saf su ve %3,5 NaCl karışımı ile köpük numunelerdeki azalışı gözlemlenmiştir. Deney toplam 12 saat sürüp, 3 saat de 1 ağırlık kayıpları Şekil 4.13'te görülen hassas teraziyle 3'er defa ölçülüp aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.13. Hassas terazi görünümü.

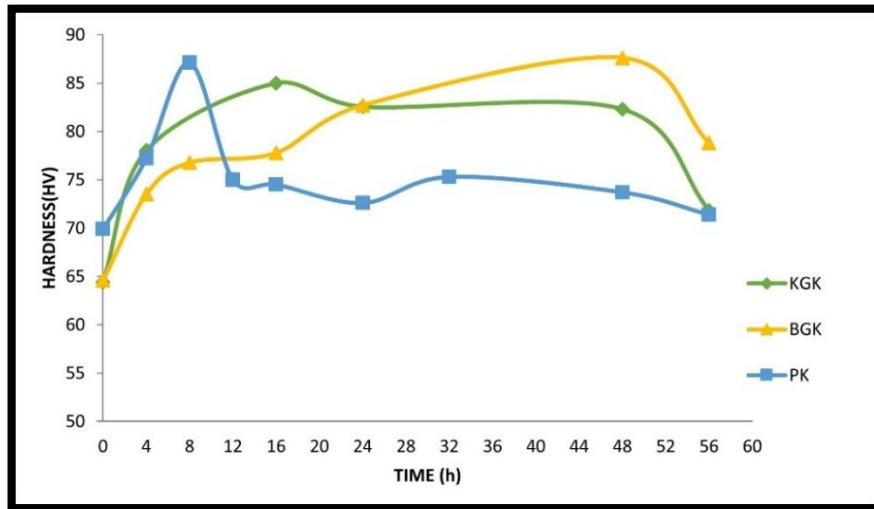
BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Deney sonuçları daha kolay bir şekilde yorum yapılabilmesi için numune isimleri kodlanarak kısaltılmıştır. Buna göre, küçük gözenekli köpük malzemeye “KGK”, büyük gözenekli köpük “BGK” ve alüminyum-perlit kompozit malzemeye ise “PK” harfi ile kodlanmıştır.

5.1. MİKRO SERTLİK DENEY SONUÇLARI

Sertlik sonuçları, 3 farklı bölgeden yapıp, aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Sertlik değerleri, KGK’de 64,4 HV, BGK’de 64,6 HV ve PK malzemede ise 69,9 HV olduğu bulunmuştur. Çözeltiyeye alma işleminden sonra sertlik değerleri KGK’de 84,7 HV, BGK’de 86,1 ve PK malzemede ise 87,1 olduğu belirlenmiştir. 56 saate kadar yaşlandırma ısıl işlemi sonrasındaki sertlik değerleri sonuçları Şekil 5.1’de ve tüm sertlik değerleri sonuçları Çizelge 5.1., Çizelge 5.2. ve Çizelge 5.3.’de verilmiştir.



Şekil 5.1. 5083 Al alaşımlı malzemelerin sertlik-yaşlandırma grafiği görünümü.

Çizelge 5.1. KGK malzeme sertlik sonuçları.

Yaşlandırma Süresi	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Sonuç
4	71,8	88,1	74,2	78,0
8	72,9	73,3	77,8	74,6
16	85,9	82,8	85,6	84,7
24	83,3	82,8	81,6	82,5
32	65,1	71	69,7	68,6
48	82,7	80,7	83,5	82,3
56	76,1	71,5	67,9	71,8

Çizelge 5.2. BGK malzeme sertlik sonuçları.


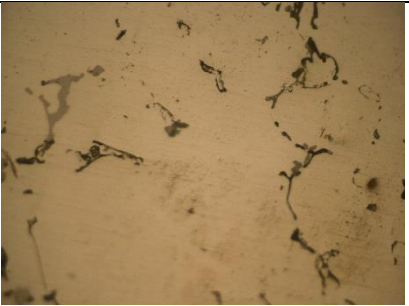
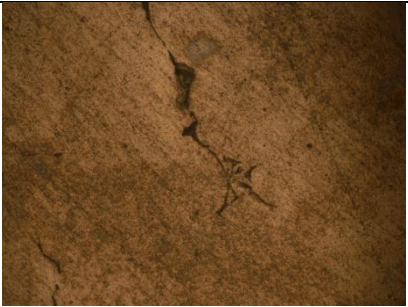


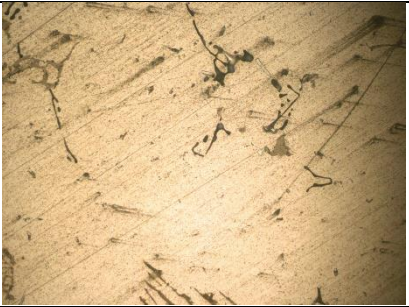
Yaşlandırma Süresi	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Sonuç
4	70,5	77	73	73,5
8	76	79,8	74,5	76,7
16	78	76,9	78,4	77,7
24	83,6	82,2	82,3	82,7
32	78	75,4	79	74,4
48	85,5	86,2	86,6	86,1
56	78,4	78,9	79,1	78,8

Çizelge 5.3. PK malzeme sertlik sonuçları.





Yaşlandırma Süresi	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama Sonuç
4	75,5	77,7	78,5	77,2
8	85,8	87,7	87,8	87,1
16	72,7	74,9	76	74,5
24	70,8	71,5	75,7	72,6
32	74,3	75,9	75,9	75,3
48	73	73,5	74,7	73,7
56	70,5	71,5	72,2	71,4

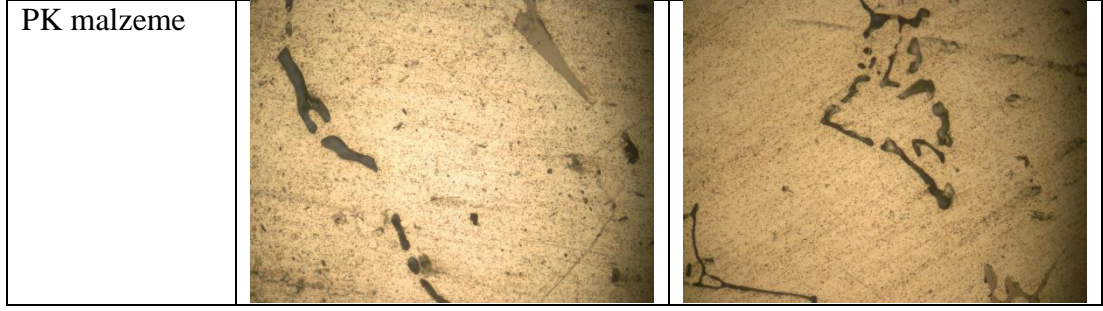
5.2. MİKROYAPI DENEY SONUÇLARI

Bu deney çalışmasında infiltrasyon yöntemiyle üretilen 5083 Al alaşımlı köpük malzemelerin mikroyapıları incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri Nikon Epiphot 200 markalı optik mikroskopta yapılmış olup, x500 ve x1000 mercekleriyle incelenmiştir. Şekil 5.2. ve Şekil 5.3'de görüldüğü gibi ana malzeme ve mikrosertlik test sonuçlarında en sert çıkan yaşlandırılmış numunelerin görüntüleri alınmıştır.

Numune İsmi	Ana malzeme	Yaşlandırma
BGK malzeme		
KGK malzeme		
PK malzeme		

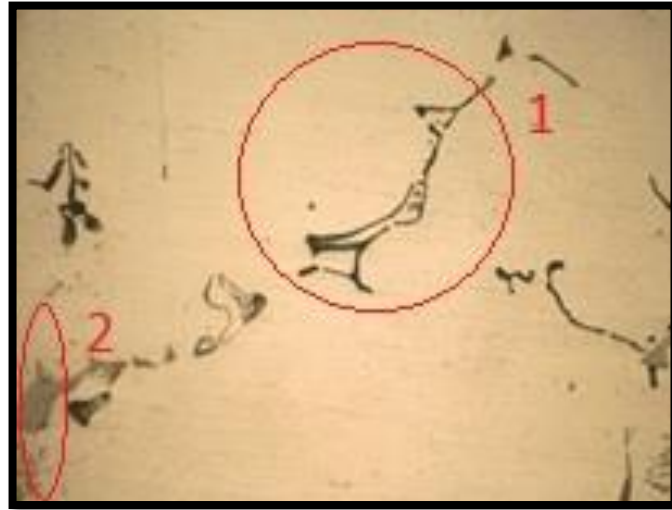
Şekil 5.2. 5083 Al alaşımlı malzemelerin x500 mikroyapı görüntüleri.

Numune İsmi	Ana malzeme	Yaşlandırma
BGK malzeme		
KGK malzeme		



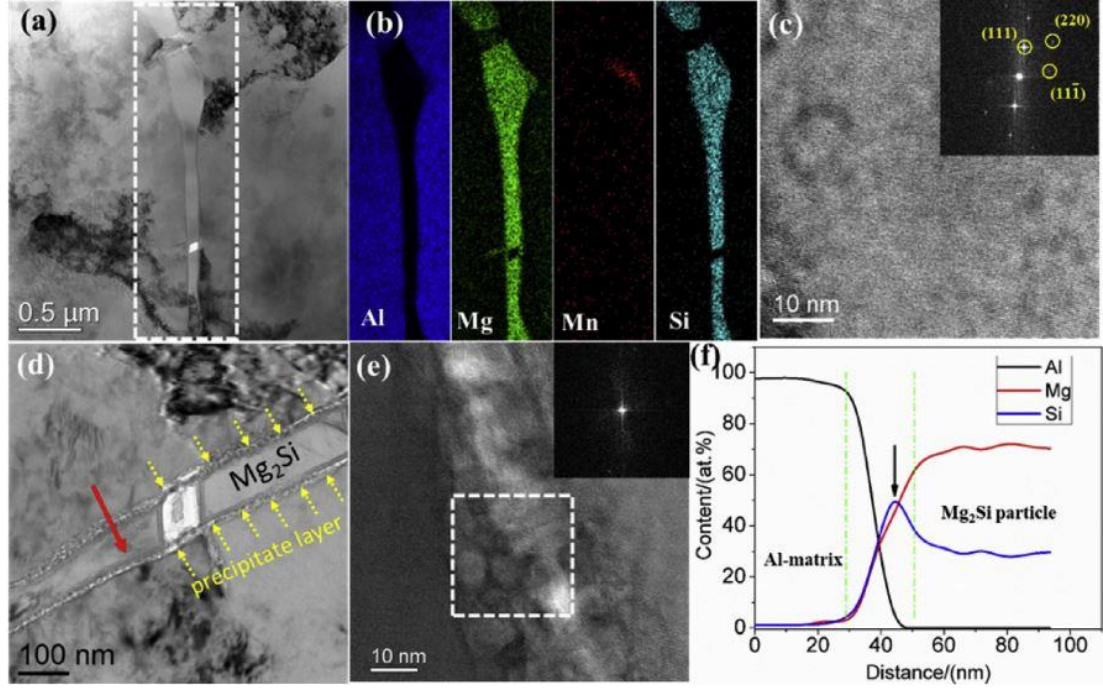
Şekil 5.3. 5083 Al alaşımlı malzemelerin x1000 mikroyapı görüntüleri.

Daha önceki yaptığımız çalışmalar sonucuna göre; Şekil 5.4'te görülen 5083 Al alaşımlı KGK malzemenin mikro görüntüsüne göre 1 numaralı koyu renkli fazın Mg_2Si fazı olduğu, 2 numaralı açık renkli fazın ise Fe ve Mn'ca zengin Al-Si alaşımı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.4. 5083 Al alaşımlı KGK malzeme x500 görüntüsü.

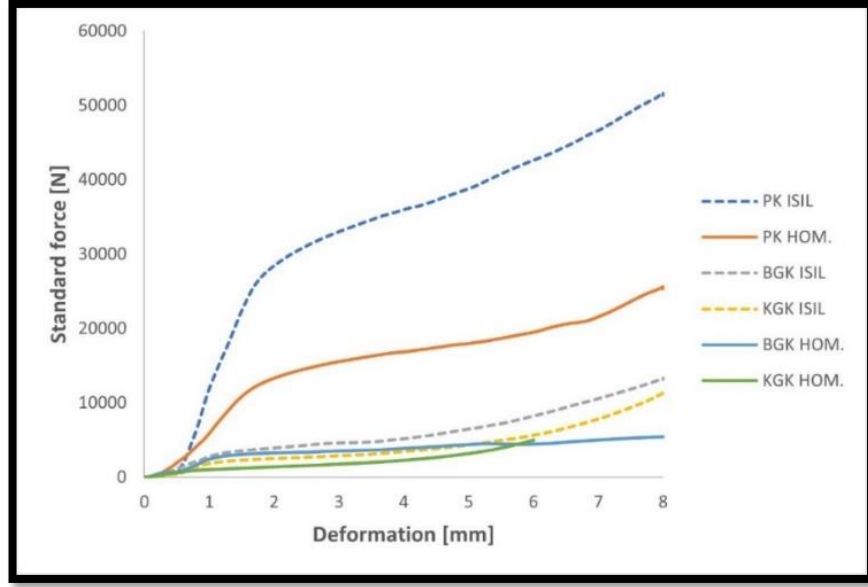
Al 5083 alaşımından üretilen köpük numunelerin mikroyapı görüntülerinde oluşan inklüzyonların varlığını göstermek için yapılmış olan TSEM-EDX görüntüleriyle örtüştüğü görülmektedir. Şekil 3(a) ve Şekil 3(b)'de EDS sonuçlarına göre Mg ve Si zengin olduğu ortaya konulmuştur. Al 5xxxx serili alaşımlarda $1\ \mu m$ 'den büyük Mg_2Si parçacıkları gözlenmiştir, fakat bu fazlardan çok az olarak da Mn ve Fe fazları da mevcuttur. Şekil 3(d)'de görülen çökelti tabakanın Mg_2Si fazı olduğu tespit edilmiştir [20].



Şekil 5.5. a) STEM parçacık görüntüsü, b) Al, Mg, Mn ve Si EDS görüntüsü, c) STEM parlak alanların görüntüsü, d) a'daki parçanın büyütülmüş TEM görüntüsü, e) Mg_2Si parçacığının STEM görüntüsü ve f) Çökelti katmanı EDS sonuçları [20].

5.3. BASMA DENEYİ SONUÇLARI

Basma dayanım testlerinde homojenleştirme ve yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulmuş olan numunelerin mikro sertlik sonucuna göre en sert olanları karşılaştırılmıştır. BGK, KGK ve PK malzemelerin homojenleştirme ve yaşlandırma işlemlerinin ortalama basma dayanımı sonuçları Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Test numunelerine ait ortalama grafik sonuçları.

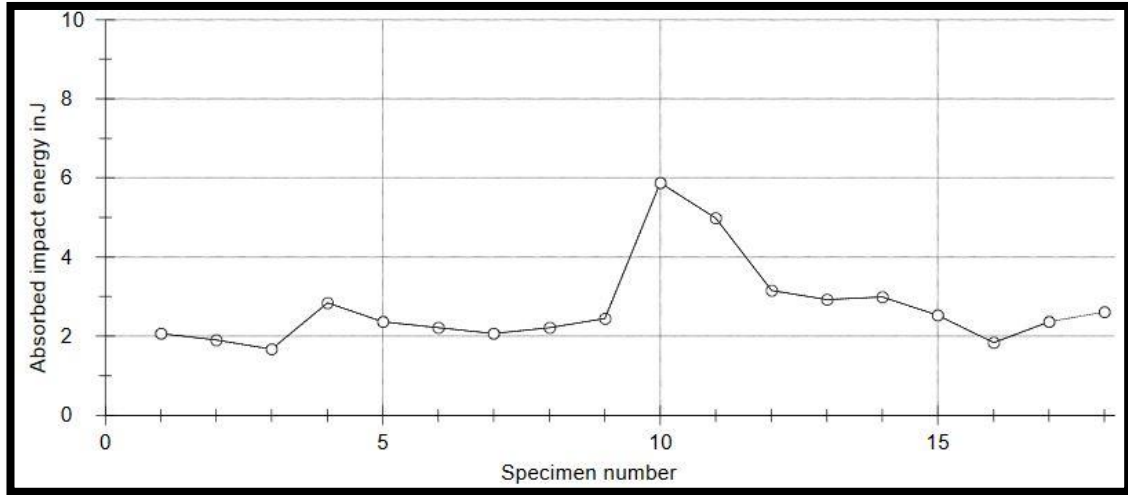
Basma test sonuçları, köpük malzemelerle yakın sonuçlar vermesine rağmen, plastik bölgede plato bölgelerinden dolayı yatayda benzerlik görülememiştir. Çünkü; basma testi boyunca hücre duvarlarında kırılma ve çökmeler meydana gelmiştir [18]. Yapılan basma testi sonuçlarında en yüksek dayanım PK malzemelerde olduğu görülmektedir. Bunun sebebi PK malzemesinde gözenek ve plato bölgelerinin olmayışından dolayı hücre duvarlarında çökme ve kırılma meydana gelmemesidir. BGK ve KGK numunelerde ise ısıtılma tabii tutulmuş olanların dayanımının daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise 5083 Al alaşımındaki Mg₂Si fazından oluşan çökeltilerden meydana geldiği düşünülmektedir. Isıtılmanın etkisiyle akma noktası artma meydana gelmiştir, fakat kırılma noktasında artmasıyla hücre duvarlarında yüksek basmadan dolayı çökmeler ve kırılmalara da sebep olmuştur.

5.4. DARBE DENEYİ SONUÇLARI

Darbe deneyi testlerinde, homojenleştirme ve yaşlandırma ısıtılma tabii tutulmuş olan numunelerin mikro sertlik sonucuna göre en sert olanları karşılaştırılmıştır. 10x10x55 mm boyutundaki numuneler Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de görüldüğü gibi aynı malzeme 3 kez darbe testine tabii tutulmuştur. Darbe testinde köpük malzemelere gözenekli yapılarından dolayı çentik açılmamıştır.

No.	Total mass kg	Width mm	Height in notch base mm	Height mm	T _{Specimen} °C	W J	ak J/mm ²	Details about break
1	32,85	10,9	11,5	11,5	22	2,06144	0,02	KGK Yaşlandırma-1
2	32,85	9,8	10,2	10,2	22	1,90669	0,02	KGK Yaşlandırma-2
3	32,85	10,6	10,7	10,7	22	1,67518	0,01	KGK Yaşlandırma-3
4	32,85	10,9	11,4	11,4	22	2,84011	0,02	BGK Yaşlandırma-1
5	32,85	10,6	11,5	11,5	22	2,37193	0,02	BGK Yaşlandırma-2
6	32,85	9,8	11,6	11,6	22	2,21652	0,02	BGK Yaşlandırma-3
7	32,85	10,8	11,4	11,4	22	2,06144	0,02	BGK Homojenleştirme-1
8	32,85	9,8	10,4	10,4	22	2,21652	0,02	BGK Homojenleştirme-2
9	32,85	8,7	11,3	11,3	22	2,44976	0,02	BGK Homojenleştirme-3
10	32,85	10,7	11,9	11,9	22	5,87314	0,05	PK Yaşlandırma-1
11	32,85	9,7	12,7	12,7	22	4,98315	0,04	PK Yaşlandırma-2
12	32,85	10,5	12,5	12,5	22	3,15387	0,02	PK Yaşlandırma-3
13	32,85	9,4	10,4	10,4	22	2,91843	0,03	PK Homojenleştirme-1
14	32,85	10,5	10,4	10,4	22	2,99683	0,03	PK Homojenleştirme-2
15	32,85	10,3	10,5	10,5	22	2,52767	0,02	PK Homojenleştirme-3
16	32,85	9	11,5	11,5	22	1,82944	0,02	KGK Yaşlandırma-1
17	32,85	10,7	12,5	12,5	22	2,37193	0,02	KGK Yaşlandırma-2
18	32,85	11,2	11,9	11,9	22	2,60566	0,02	KGK Yaşlandırma-3

Şekil 5.7. Deney numunelerine ait darbe testi sonuçları.



Şekil 5.8. Deney numunelerine ait darbe test grafiği sonuçları.

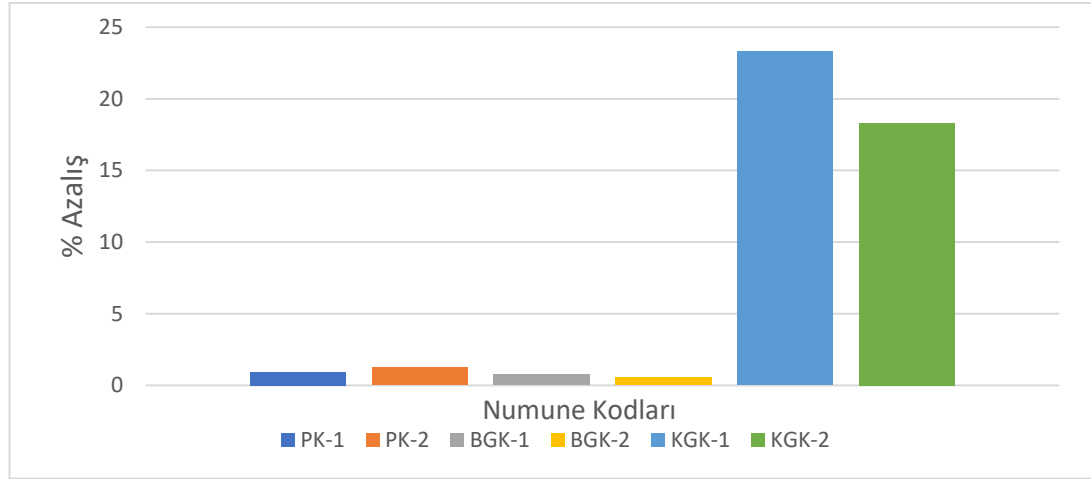
Darbe test sonuçlarına göre, darbe sönümlenme enerjisi en fazla PK malzemesinde olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, gözenek olmamasından dolayıdır. Buna göre, gözeneklerin artmasıyla enerji absorbe etme enerjisi azalmakta, sertliğin artmasıyla da absorbe edilen enerji miktarında artış olduğu görülmüştür.

5.5. KOROZYON DENEYİ SONUÇLARI

Korozyon deneyi testinde, yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulmuş olan numunelerin sonuçlarına göre en sert olanları karşılaştırılma yapılmıştır. Numuneler 3'er defa hassas terazide tartılıp aritmetik ortalaması alınarak ağırlık kayıpları bulunmuştur. Çizelge 5.4'te görüldüğü gibi 0-12 saat arasında 3'er saat ara ile ortalama ağırlık kayıpları verilmiştir. Şekil 5.8'de deney numunelerine ait yüzdece azalış tablosu görülmektedir.

Çizelge 5.4. Deney numunelerine ait korozyon testi sonuçları.

Numune Kodu	0 Saat	3 Saat	6 Saat	9 Saat	12 Saat
PK-1	7,1133	7,0729	7,0504	7,0487	7,0463
PK-2	6,4121	6,3542	6,3356	6,3340	6,3323
BGK-1	3,9434	3,9220	3,9184	3,9144	3,9131
BGK-2	3,0430	3,0370	3,0335	3,0368	3,0257
KGK-1	3,9005	3,7032	3,3825	3,0619	2,9916
KGK-2	3,3240	3,1145	2,7256	2,7376	2,7142



Şekil 5.9. Deney numunelerine ait yüzdece azalış sonuçları.

Korozyon deneyi sonuçlarına göre en fazla ağırlık kaybı gösteren KGK malzemedir. Bunun sebebi, küçük gözenek boyutları ve mikro sertlik sonucuna bağlı olduğu düşünülmektedir. PK ve BGK malzemelerin ağırlık kayıplarının neredeyse birbirine yakın olduğu görülmektedir. PK malzemede perlitlerin korozyona uğramadığı gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 5083 alüminyum alaşımını kullanarak kokil kalıp yardımıyla külçeler oluşturulmuştur. Oluşturulan külçeler kalıba konularak infiltrasyon yöntemiyle açık gözenekli alüminyum köpükler ve alüminyum-perlit kompozit malzemelerin üretimi sağlanmıştır. Üretilen numuneler T6 ısıtma işlem parametresinde homojenleştirme ve yaşlandırma ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler arasındaki farklılıklara bakmak için sertlik, basma, darbe ve korozyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan tüm çalışma sonuçlarına göre;

- 1) İnfiltrasyon döküm yöntemini kullanılarak açık hücreli alüminyum köpük ve alüminyum-perlit kompozit malzemelerin üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir.
- 2) 5083 alüminyum alaşımına yapılan spektral analiz sonucuna göre %95,3 Al, %3 Mg içerdiği bulunmuştur.
- 3) 5083 alüminyum alaşımındaki numunelerin mikroyapı sonuçlarına göre, koyu renkli fazların Mg_2Si fazları olduğu, açık renkli Çin yazısına benzer yerlerinde Al-Si alaşımı olduğu düşünülmektedir.
- 4) Termomekanik ve yapay yaşlandırma işlemleri uygulanan malzemenin mikro yapı analizi sonucuna göre döküm halinin mikro yapısı ile kıyaslandığında kaba taneli fazların çözeltiye alma ve yaşlandırma sonrası incelendiği ve yapı içerisinde çözündüğü düşünülmektedir.

5) 5083 alüminyum numunelerin mikroyapı görüntülerinde oluşmuş çökeltilerde Çin el yazısı olarak adlandırılan formlarda β fazı oluşumları mevcuttur. Yaşlandırılmış olan numunelerde tane içerisinde ayrı bir faz görünümünde olan ve segregasyon olması muhtemeldir. Mikroyapı karşılaştırmalarında intermetalik fazların çözeltiye alma işleminde hacimce küçülmeye uğradığı ve yapı içerisinde Çin yazısına benzer yapıları oluştuğu görülmektedir [19].

6) Üretilen numunelerin ısı işleme tabi tutulduktan sonra sertlik değerlerinde artış sağlanmıştır. BGK malzemede 48 saat yaşlandırma işleminde 86,1 HV, KGK malzemede 16 saat yaşlandırma işleminde 84,7 HV ve PK malzemede ise 8 saat yaşlandırma 87,1 HV en yüksek sertlik değerleri olduğu bulunmuştur.

7) Basma test sonuçlarına göre, en fazla dayanım gösteren PK malzeme olmuştur. Bunun sebebi, PK malzemesinde, köpük malzemelerdeki gibi plato bölgelerinin olmayışıdır, bu sayede kırılma ve çökme görülmemiştir.

8) Darbe testi sonuçlarına göre, darbe sönümlenme enerjisi en fazla olan PK malzemedir. Bunun sebebi, gözeneklerin artmasıyla enerji absorbe etme enerjisinin azaldığı düşünülmektedir.

9) Korozyon deneyi testinde en çok ağırlık kaybı olan KGK malzeme olmuştur. Bunun sebebinin, gözenek boyutları ve mikro sertlik sonucuna bağlı olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Wan, T., Liu, Y., Zhou, C., Chen, X. And Li, Y., “Fabrication, properties, and applications of open-cell aluminum foams: A review”, *Journal of Materials Science & Technology.*, 62: (2020).
2. Banhart, J. And Weaire, D., “On the road again: metal foams find favor”, *Physics Today*, 55(7): 37-42 (2002).
3. Despois, J. F., Marmottant, A., Salvo, L. And Mortensen, A., “Influence of the infiltration pressure on the structure and properties of replicated aluminium foams”, *Materials Science and Engineering: A*, 462(1-2), 68-75 (2007).
4. Broxtermann, S., Su, M. M., Hao, H. And Fiedler, T., “Comparative study of stir casting and infiltration casting of expanded glass-aluminium syntactic foams”, *Journal of Alloys and Compounds*, 155415 (2020).
5. García-Moreno, F., “Commercial applications of metal foams: Their properties and production”, *Materials*, 9(2): 85 (2016).
6. Banhart, J., “Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams”, *Progress in materials science*, 46(6): 559-632 (2001).
7. Zaman, E., “Açık Hücreli Alüminyum Köpük Üretimi Ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2011).
8. İnternet: Taze Mühendis, “Metal Köpük Kullanım Alanları”, <https://tazemuhendis.net/2020/07/metalik-kopuk-nedir-kullanim-alanlari-nelerdir.html> (2020).
9. Sosnick, B., “Process for making foamlıke mass of metal”, *USA Patent*, Washington, 1948 (1943).
10. Peroni, L., Avalle, M. And Peroni, M., “The mechanical behaviour of aluminium foam structures in different loading conditions”, *International Journal of Impact Engineering*, 35(7), 644-658 (2008).
11. Costanza, G., Tata, M. E. And Trillicoso, G., ”Al foams manufactured by PLA replication and sacrifice”, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4(1), 62-66 (2020).

12. Jiang, J., Wang, S., Li, W., & Chen, Z., "Fabrication and characterization of ZrC foam by melt infiltration", *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 2295-2300 (2017).
13. Báez-Pimientoa, S., Hernández-Rojasb, M. E., & Palomar-Pardave, M. E., "Processing and characterization of open-cell aluminum foams obtained through infiltration processes", *Procedia Mater. Sci*, 9, 54-61 (2015).
14. Matsushita, T., S. Fujibayashi, And T. Kokubo. "Titanium foam for bone tissue engineering.", *Metallic Foam Bone. Woodhead Publishing*, 111-130 (2017).
15. Xiong, J. Y., Li, Y. C., Wang, X. J., Hodgson, P. D. And Wen, C. E., "Titanium–nickel shape memory alloy foams for bone tissue engineering", *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 1(3), 269-273 (2008).
16. Broxtermann, S., Taherishargh, M., Belova, I. V., Murch, G. E. And Fiedler, T., "On the compressive behaviour of high porosity expanded Perlite-Metal Syntactic Foam (P-MSF).", *Journal of Alloys and Compounds*, 691, 690-697 (2017).
17. Liang, L., Guo, W., Zhang, Y., Zhang, W., Li, L., & Xing, X., "Radial Basis Function Neural Network for prediction of medium-frequency sound absorption coefficient of composite structure open-cell aluminum foam", *Applied Acoustics*, 170, 107505 (2020).
18. Şahin, O., "Döküm Yöntemi İle Alüminyum Metal Köpük Üretimi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2017).
19. Yılmaz, Ç. "5083 Kalite Alüminyum Alaşımının Homojenize Edilerek Sertlik Değerlerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trakya (2011).
20. Yi, G., Sun, B., Poplawsky, J. D., Zhu, Y. And Free, M. L. "Investigation of pre-existing particles in Al 5083 alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, 740: 461-469 (2018).

ÖZGEÇMİŞ

Tugay Fırat 1992 yılında Kadıköy’de doğdu. İlk ve orta öğretimini Moda İlköğretim Okulunda tamamladı. İstanbul Kadıköy Lisesi Fen Bilimleri Alanından mezun oldu. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde lisans öğrenime başlayıp, 2018 yılında onur derecesi ile mezun oldu. 2018 yılında Karabük Üniversitesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliğinde yüksek lisansa başladı. 2018 yılında “Düzenli ve Açık Gözenekli Geometride Metal Köpüklü Akış Kanalına Sahip Yüksek Performanslı Kompakt Isı Eşanjörü Tasarımı Ve Geliştirilmesi” adlı TÜBİTAK 1003 Projesi’nde bursiyer olarak görev aldı.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: 100 Yıl Mahallesi 1062 Sokak Enerler Yapı No:18 Merkez/KARABÜK

Tel: (0535) 860 93 34

E-posta: tfrt92@gmail.com