T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASSAS DÖKÜM YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM A356 ALAŞIMDAN AÇIK GÖZENEKLİ (HÜCRELİ) METAL KÖPÜK ÜRETİMİ VE ISI EŞANJÖRÜNE UYGULANMASI

KORAY DÜNDAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2019

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASSAS DÖKÜM YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM A356 ALAŞIMDAN AÇIK GÖZENEKLİ (HÜCRELİ) METAL KÖPÜK ÜRETİMİ VE ISI EŞANJÖRÜNE UYGULANMASI

KORAY DÜNDAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. METİN USTA
II. DANIŞMAN
DR. LEVENT TURHAN

GEBZE
2019

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

PRODUCTION OF OPEN CELL METAL FOAM BY INVESTMENT CASTING METHOD FROM ALUMINIUM A356 ALLOY AND APPLICATION TO HEAT EXCHANGER

KORAY DÜNDAR

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. METİN USTA

II. THESIS SUPERVISOR

DR. LEVENT TURHAN

GEBZE

2019

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 24/12/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Koray DÜNDAR' ın tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) :Prof. Dr. Metin USTA

ÜYE :Doç. Dr. Kemal KORKMAZ

ÜYE :Dr. Öğretim Üyesi Işıl KUTBAY

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu çalışmada; metal köpük üretim metotları arasında yer alan hassas döküm yöntemiyle, alüminyum A356 (AlSi7Mg0,3) alaşımından 10 PPI gözenek yoğunluğunda açık gözenekli alüminyum köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Hassas döküm yöntemi kullanılarak 10 ppı gözenek boyutundaki açık gözenekli alüminyum köpüklerin üretimi Türkiye'de ilk defa TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü tarafından başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Üretilen alüminyum köpüklerin karakterizasyonu (makro-mikro yapı analizleri) ve EDS analizleri yapılmıştır. Ticari ürün ile karşılaştırma yapabilmek için Mayser firmasının 10 PPI gözenek yoğunluğunda açık gözenekli alüminyum köpüklerine sertlik ve basma testleri yapılarak üretilen alüminyum köpükler ile karşılaştırılmıştır. Sertlik testleri sonucuna göre Mayser firmasının alüminyum köpüklerinin ortalama sertlik değerleri 42,8 HV, üretilen alüminyum köpüklerinin ortalama sertlik değerleri 59,4 HV olarak ölçülmüştür. Basma test sonuçlarına göre Mayser köpükleri basma dayanımları 0,25 MPa, üretilen alüminyum köpükleri basma dayanımları 0,14 MPa olarak ölçülmüştür. Üretimi gerçekleşen açık gözenekli alüminyum köpükler, yüksek yüzey alanına (yaklaşık 400-450 m^2 / m^3) ve yüksek ısıl iletkenliğine (yaklaşık 160-170 W/mK) sahiptir. Bu tez çalışmasında bu amaca yönelik, ev tipi kombilerde kullanılan birincil ısı eşanjöründeki kanatçıklar yerine, üretilen bu açık gözenekli alüminyum köpükler yerleştirilerek ısıl performans testleri yapılmıştır. Türkiye'de ilk defa A356 alaşımdan açık gözenekli alüminyum köpüklü ve bakır borulu ısı eşanjörünün hassas döküm yöntemiyle birlikte üretimi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen alüminyum köpüklü ısı eşanjörünün ısıl performans testleri, TÜBİTAK UME' de mevcut rüzgar tünelinde gerçekleştirilmiştir. Bakır boru ile alüminyum köpük arasındaki mikro boşluklardan kaynaklanan temas problemlerinden dolayı oluşan ısıl dirence rağmen, ümit verici ısıl performans sonuçları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metal köpük, metalik köpük, gözenekli metal, açık gözenekli alüminyum köpük, açık hücreli alüminyum köpük, metal köküplü ısı eşanjörü, metal köpüklü ısı değiştirici.

SUMMARY

In this study; Open pore aluminum foam was produced from aluminum A356 (AlSi7Mg0,3) alloy with a pore density of 10 PPI (pore per inch) by investement casting method which is one of the metal foam production methods. The production of open-pore aluminum foam of 10 ppi pore size using a investment casting method was carried out successfully the first time by the Institute TÜBİTAK MAM in Turkey. Characterization of the produced aluminum foams (macro-micro structure analysis) and EDS analysis were performed. In order to make comparison with commercial product, hardness and compression tests were performed on open pore aluminum foams with M-Pore 10 product code of 10 PPI pore density of Mayser company and compared with produced aluminum foams. According to the results of the hardness tests, the average hardness value of the Mayer foams was 42.8 HV and the average hardness values of the produced aluminum foams was 59.4 HV. According to the compression test results, compressive strength of Mayser foams was measured 0.25 MPa and produced aluminum foams were measured 0.14 MPa. The open porous aluminum foams produced have high surface area (about 400-450 m^2 / m^3) and high thermal conductivity (about 160-170 W / mK). In this thesis, thermal performance tests were carried out by replacing the fins in the primary heat exchanger used in household type combi boilers with these open porous aluminum foams produced. Production method of investment casting with open-pore foamed aluminum and copper alloy tube heat exchangers of the first A356 was performed in Turkey. The thermal performance tests of the developed aluminum foam heat exchanger were carried out in the existing wind tunnel at TÜBİTAK UME. Despite thermal resistance due to contact problems caused by microcaps between copper tube and metal foam, promising thermal performance results have been achieved.

Keywords: Metal foam, metallic foam, porous metal, open porous aluminum foam, open cell aluminum foam, aluminum foam heat exchanger.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Metin USTA'ya ve ikinci danışmanım Dr. Levent TURHAN'a

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve proje ekibimde bulunan Dr. Ömer EKSİK'e, Yüksek Müh. Fatih GÜLER'e, Engin DURMAZ'a ve Yücel TAŞKIN'a

Döküm endüstrisine yıllarını veren, bilgi birikimlerini ve tecrübelerini benimle paylaşan Çan Döküm firma sahibi Sn. Şadi ÇAN'a ve CERTUS Hassas Döküm Alçısı firması sahibi Sn. Chris ÜRGÜPLÜOĞLU'na göstermiş olduğu desteklerinden dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

Fedakârlıklarını, maddi ve manevi desteklerini bana her zaman gösteren ve beni bu günlere getiren anneme, babama ve ablama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması bursiyer olarak yer aldığım TÜBİTAK ARDEB 1003-215M232 No'lu, "Düzenli Ve Açık Gözenekli Geometride Metal Köpüklü Akış Kanalına Sahip Yüksek Performanslı Kompakt lsı Eşanjörü Tasarımı Ve Geliştirilmesi" adlı TÜBİTAK-1003 Ar-Ge projeleri destekleme program kapsamında gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK ARDEB'e vermiş olduğu tüm destekler için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLOLAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. METAL KÖPÜKLER	3
2.1. Metal Köpüklerin Tarihsel Gelişimi	3
2.2. Metal Köpük Tanımı ve Mekanik Özellikleri	4
2.2.1. Elastik Modül	6
2.2.2. Basma Davranışı	8
2.2.3. Enerji Emilimi ve Darbe Davranışı	9
2.2.4. Gerinim Davranışı	11
2.2.5. Burulma Davranışı	13
2.2.6. Termal, Elektriksel ve Akustik Davranış	13
2.3. Alüminyum Köpükler ve Özellikleri	14
2.4. Hücre Yapısına Göre Metal Köpükler	14
2.4.1. Açık Hücreli Metal Köpükler ve Üretim Yöntemleri	15
2.4.1.1. Hassas Döküm Yöntemi (Polimer Replikasyon)	16
2.4.1.2. Boşluk Tutucu Tekniği ile Döküm Yöntemi	17
2.4.1.3. Metal Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi	18
2.4.1.4. Polimer Emdirme Yöntemi	18
2.4.2. Kapalı Hücreli Metal Köpükler ve Üretim Yöntemleri	19
2.4.2.1. Gaz Enjekte Ederek Üretim	21
2.4.2.2. Köpükleştirici Ajan Yardımıyla Üretim	22
2.4.2.3. Köpürme Özelliğine Sahip Malzemeler ile Üretim	23
2.5. Metal Köpük Uygulamaları ve Kullanım Alanları	23

2.5.1. Metal Köpüklerin Yapısal Uygulamaları 24
2.5.1.1. Otomotiv Endüstrisi 24
2.5.1.1.1. Hafif Yapılar 26
2.5.1.1.2. Darbe Enerjisi Sönümleme 26
2.5.1.2. Gürültü Kontrolü 27
2.5.1.3. Havacılık ve Uzay Sanayi 27
2.5.1.4. Gemi Endüstrisi 28
2.5.1.5. Demiryolu Endüstrisi 28
2.5.1.6. Yapı Endüstrisi 29
2.5.1.7. Spor Malzemeleri 29
2.5.1.8. Biyomedikal Uygulamalar 29
2.5.1.9. Makine Yapımı 30
2.5.2. Metal Köpüklerin Fonksiyonel Uygulamaları 30
2.5.2.1. Isı Eşanjörleri (Isı Değiştiriciler) 30
2.5.2.2. Filtreler 31
2.5.2.3. Su Arıtıcılar 31
2.5.2.4. Susturucular 31
2.5.2.5. Katalizör Destekleri 32
2.5.2.6. Alev Tutucular 32
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 34
3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Deneylerin Yürütülmesi 34
3.2. Açık Hücreli Alüminyum Köpüklerin Karakterizasyon Testleri 39
3.2.1. Makro Boyutta İncelemeler 39
3.2.2. Mikro Boyutta İncelemeler 39
3.2.3. Sertlik Testi 40
3.2.4. Basma Testi 40
3.3. Açık Hücreli Alüminyum Köpüğün Isı Eşanjörüne Uygulanması 40
3.3.1. Isı Eşanjörü Debi-Hız-Sıcaklık-Basınç Test Düzeneği 41
3.3.2. Numune Test Kademeleri 43
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 44
4.1. Makro Boyutta İnceleme Sonuçları 46
4.2. Mikro Boyutta İnceleme Sonuçları 46
4.3. Sertlik Test Sonuçları 49
4.4. Basma Testi Sonuçları 50

4.5. Açık Hücreli Alüminyum Köpüklü Isı Eşanjörü Döküm Sonuçları 55
4.6. Bakır Borulu Açık Gözenekli Alüminyum Köpüklü Isı Eşanjörü Performans Test Sonuçları 57
5. GENEL SONUÇLAR 62

KAYNAKLAR 64
ÖZGEÇMİŞ 68
EKLER 69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
Al	:	Alüminyum
Si	:	Silisyum
Mg	:	Magnezyum
Fe	:	Demir
Cu	:	Bakır
Mn	:	Mangan
Zn	:	Çinko
Ti	:	Titanyum
G	:	Kesme modülü
K	:	Kütle modulü
V	:	Elastik Poisson Oranı
$\rho *$	:	Hücresel Malzemenin Yoğunluğu
ρs	:	Duvarlardan Oluşan Malzemenin Yoğunluğu
Mm	:	Mikron
L	:	Litre
PPI	:	pore per inch (inch başına gözenek sayısı)
EDS	:	Energy Dispersive Spectrometry
SEM	:	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Miksroskobu)
HV	:	Hardness Of Vickers
kN	:	Kilo Newton
Dk	:	Dakika
Hz	:	Hertz
Mpa	:	Mega Pascal
UME	:	Ulusal Metroloji Enstitüsü
Min	:	Minute

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	Farklı iki enerji emiciye ait basma gerilim-gerinim eğrisi.	8
2.2:	Plastik dayanıma göre farklı alüminyumun değişen gerilim-gerinim.	10
2.3:	Alüminyum köpüklerin gerinimdeki hasar mekanizması.	12
2.4:	Yük kaldırma modülünün ve alüminyum köpüğün gerilim-gerinimi.	12
2.5:	Eksenel ve eksenel olmayan gerilim ile köpüğün gerilim-gerinim eğrisi.	13
2.6:	a)Açık hücreli alüminyum köpük b)Kapalı hücreli alüminyum köpük.	15
2.7:	Açık hücreli metal köpük örneği ve hücre yapısı.	16
2.8:	Kapalı hücreli metal köpük örneği ve hücre yapısı.	20
2.9:	Gaz enjekte ederek metal köpük üretimi.	22
2.10:	Köpükleştirici ajan yardımıyla metal köpük üretimi.	23
2.11:	Otomotiv endüstrisinde metal köpük malzeme uygulama alanları.	25
2.12:	Köpük malzemelerin Audi A8 karoseri üzerindeki uygulama yerleri.	26
2.13:	Viyadük altında ses emen levha yapı.	27
2.14:	Sandviç köpük panelden (AFS) yapılmış Ariane5 roket konisi.	28
2.15:	Metal köpük ısı eşanjörü (ısı değiştirici).	31
2.16:	Alüminyum köpük imali susturucu örnekleri.	32
2.17:	Alüminyum köpükten üretilmiş bir alev tutucu.	33
3.1:	Döküm yöntemiyle açık gözenekli metal köpük üretimi iş akış şeması.	35
3.2:	10 ppı gözenek boyutuna sahip preform modellerin dizimi.	35
3.3:	Delikli fanus (üst), dış tarafı bant ile sarılmış delikli fanus (alt).	36
3.4:	Vibrasyonlu ve vakumlu alçıya alma ünitesi.	37
3.5:	Kademeli alçı pişirme fırını	37
3.6:	Vakum Döküm Haznesi	38
3.7:	Kademeli alçı pişirme ve süngeri uzaklaştırma diyagramı.	39
3.8:	Isı Eşanjörü Test Düzeneği Şeması.	42
3.9:	Sıcaklık ve basınç ölçüm noktaları.	42
4.1:	Fanus içerisinden çıkarılan iç kısımları alçı dolu alüminyum köpükler.	45
4.2:	Yolluk ve besleyicileri kesilmiş açık gözenekli metal köpük.	45
4.3:	Üretilen 10 PPI gözenek yoğunluğunda A356 alaşımdan köpük yapısı.	46
4.4:	5X büyütme yapılmış A356 alaşımına ait köpük mikro yapı görüntüsü.	47

4.5: 10X büyütme yapılmış A356 alaşımına ait köpük mikro yapı görüntüsü. 47
4.6: A356 (AlSi7Mg0.3) alaşımına ait mikroyapı görüntüsü. 48
4.7: Açık gözenekli Al köpüklerin SEM görüntüsü. 48
4.8: Açık gözenekli Al köpüklerin EDS analizleri. 49
4.9: Mayser ve üretilen köpüklerini mikro sertlik test görüntüleri. 49
4.10: 10 ppı gözenek boyutunda A356 Al köpük basma testi numuneleri. 51
4.11: 10 ppı gözenek boyutuna sahip A356 alaşımlı Al köpük numuneleri. 51
4.12: Üretilen 10 PPI gözenek boyutundaki Al köpüklerin basma test grafiği. 52
4.13: Mayser-10 ppı gözenek boyutundaki Al köpüklerin basma test grafiği. 53
4.14: Mayser alüminyum köpüklerinin ligament kalınlıkları. 54
4.15: Üretilen alüminyum köpüklerinin ligament kalınlıkları. 54
4.16: Üretilen açık hücreli Al köpükte tespit edilen döküm hataları. 55
4.17: Bakır boru üzerine yerleştirilmiş 10 PPI preformun dizimi. 56
4.18: Bakır borulu açık hücreli alüminyum köpüklü ısı eşanjörü. 56
4.19: Üretilen bakır borulu açık hücreli alüminyum köpüklü ısı eşanjörü. 57

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		Sayfa
2.1:	Bazı hücresel malzemelere ait göreceli yoğunluklar.	7
3.1:	A356 alüminyum alaşım kimyasal kompozisyonu.	34
3.2:	Test düzeneğinde kullanılan ekipmanlar.	42
4.1:	Mayser ve üretilen Al köpük sertlik değerleri karşılaştırması.	50
4.2:	Mayser ve üretilen köpüklerin basma test sonuçlarının karşılaştırılması.	51
4.3:	Alüminyum köpüklü ısı eşanjörünün performans test sonuçları	59

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Metal köpük; yüksek dayanım ile düşük ağırlığın birleşmesi ya da yüksek gaz geçirgenliği ve ısıl iletkenliğin birlikte olması gibi mekanik ve fiziksel özelliklerin dikkat çeken kombinasyonlarına sahip olduğu bilinen malzemelerdir. Bu sebeple köpük metal malzemelere yönelik ilgi son dönemde giderek artmaktadır.

Yüksek oranda gözenekli (%80-95) olan metal köpükler çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılan yeni sınıf bir malzeme olarak sahip oldukları farklı özellikleriyle dikkat çekmektedir. Gözenekli metal yapılara yönelik birçok mevcut uygulama ile birlikte kimyasal süreçlerde ısı eşanjörü ya da filtre şeklinde kullanılmaları, otomotivde çarpışma/çarpma enerjisi sönümleme şeklinde ve savunma sanayinde zırhlarda hafifletme amaçlı kullanılmaları gibi birçok yeni kullanım alanları da oluşmaktadır. Gözenekli metalik malzemelerin değerli olmasını sağlayan en önemli özelliklerden bazıları; hafif yapıda olmaları, nispeten yüksek dayanımlı olmaları, lineer olmayan kendine özgü deformasyon davranışları olarak sıralanabilmektedir. Polimer köpük kullanılamayan özel ortamlar ile özel sıcaklıklar isteyen mühendislik uygulamalarında metal köpük malzemeler çok fazla avantajlar sunmaktadır.

Günümüzde döküm yöntemiyle açık gözenekli alüminyum köpük üretimi yapan çok az sayıda işletme mevcuttur. Ancak bu alandaki pazarın küçük olmasına karşın, kullanım alanlarının giderek yaygınlaşmasıyla yavaş yavaş genişlemeye başlamaktadır. Açık gözenekli alüminyum köpük özelliklerinin geliştirilmesi ve ürün süreçlerinin daha güvenilir duruma getirilmesi, tekrarlanabilirliğin artırılması amacıyla bilimsel araştırmalara devam edildiği görülmektedir. Bu kapsamda köpük stabilizasyonu konusunun çok iyi araştırılması ve bilinmesi önemlidir. Ancak döküm yöntemiyle açık gözenekli alüminyum köpük üretmenin deneysel çalışması üzerine yapılan araştırma sayısı oldukça sınırlı kalmıştır. Bu nedenle bu çalışmada açık gözenekli alüminyum köpük üretme üzerine araştırma yapılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde metal köpüklerin gelişimi açıklanmış, mekanik özellikleri ve davranışları incelenmiştir. Metal köpükler yapılarına göre tanımlanmış, açık ve kapalı gözenekli metal köpüklerin üretim metotları ortaya konmuştur. Ayrıca metal köpüklerin kullanım alanları ve fonksiyonel uygulamaları açıklanmıştır.

Bu çalışmada; metal köpük üretim metotlarından hassas döküm yöntemiyle üretilen açık gözenekli alüminyum köpüklerin karakterizasyonu işlemi yapılmıştır.

Ayrıca, ev tipi kombilerde mevcut durumda bakır borulu ve bakır kanatçıklı yapıdaki ısı eşanjörlerinde (ısı değiştirici) bulunan kanatçıkların (fin) yerine daha fazla yüzey alanına sahip açık gözenekli alüminyum köpük kullanılarak ısı eşanjörün performans testi yapılmıştır. İlk olarak, 10 PPI gözenek boyutunda poliüretan malzemeden imal edilmiş gözenekli preform model satın alınmıştır. Preform modeller uygun boyutlarda kesilerek dereceli hassas dökümde kullanılan fanus alt lastiğine salkım şeklinde dizilmiştir. Oluşturulan bu salkımlar delikli fanus içerisinde hassas döküm alçısına alınmıştır. Belirli bir süre alçının donması beklenmiş ve kademeli alçı pişirme diyagramına göre alçı pişirme fırınında yaklaşık 17 saat süreyle pişirilmiş ve preform uçurulmuştur. Bu işlemden sonra alçı içerisindeki boşluklara -1 bar vakum altında döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra fanus, döküm haznesinden çıkarılmış ve oda sıcaklığında kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır. Elde edilen alüminyum köpük içerisindeki alçı, basınçlı su yardımıyla temizlenmiştir. Son olarak yolluk ve besleyiciler tel erozyon yardımıyla kesilmiştir.

2. METAL KÖPÜKLER

2.1. Metal Köpüklerin Tarihsel Gelişimi

Metal köpük malzemelere yönelik çalışmalar 20. yüzyılın ilk yarısının sonlarında başlamıştır. Benjamin Sosnick, 1948 yılında cıvayı kullanarak alüminyumu köpürtmeyi denemiştir. Deneyde öncelikle yüksek basınç altındaki kapalı bir hacim içerisinde alüminyum ile cıva karışımı ergitilmiştir. Basıncın kaldırılmasıyla alüminyumun ergime sıcaklığında civanın buharlaşmaya başladığı ve köpük oluştuğu görülmüştür. 1950'lerde ise daha az risk içeren yöntemler geliştirilmiştir. Sıvı metalin, ergiyiği oksitlendirme ya da katı parçacıkların ilave edilmesi gibi ön işlemlere tabi tutularak özelliklerinin değiştirilmesiyle daha kolay bir biçimde köpük elde edilebildiği fark edilmiştir. 1950'li yıllarda Bjorksten Research Laboratories (BRL)'de William Elliott tarafından bir alüminyum köpürtme süreci geliştirilmiştir. Sonraki yıllarda BRL, kurşun, çinko vb. gibi metallerde köpürtme metotları ile alakalı çalışmıştır. Bu konuda o yıllarda iki metot kullanılmıştır. Birincisi, sürekli gaz enjeksiyonu, ikincisi ise bir karıştırıcı vasıtasıyla ergiyiğe gaz salınması olmuştur. Bu iki yöntem günümüzde de halen kullanılmaktadır. Metal köpük üretiminde alüminyumun daha elverişli malzemeler olduğu anlaşılmıştır. The Ethyl Corporation tarafından Ford Motor Company'e yüksek kaliteli metal köpük malzemeleri üretilmiş, ancak ilk zamanlarda çok fazla tutulmamıştır. O dönemlerde enerji kaynaklarının sınırsız gibi görülmesi, geri dönüşüm ve güvenlik konularının günümüzdeki kadar önemsenmemesi nedeniyle hafif malzemelerin kullanımına ihtiyaç duyulmamıştır. Bu nedenle 1975'ten sonra köpük metal malzeme geliştirilmesi faaliyetleri gün geçtikçe azalmıştır [Babcsan ve Banhart, 2006].

1980'li yılların sonlarında metal köpüğe yönelik araştırmalar tekrardan popüler hale gelmiştir. Bugünlerde Alporas süreci şeklinde bilinen yöntem Japon mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Kanada'da Alcan Corp ve Norveç'te Norsk Hydro. birbirlerinden bağımsız bir şekilde parçacık-stabilize ergiyik sürecini geliştirmişlerdir. 1950'li yıllarda Benjamin Allen'in geliştirdiği toz metalurjisi köpürtme yöntemi 1990'lı yıllarda yeniden keşfedilerek Alman Fraunhofer Laboratuvarı'nda çok kapsamlı hale getirilmiştir. Bugün bütün bu yöntemlerin geliştirilmesi faaliyetlerine devam edilmektedir [Babcsan ve Banhart, 2006].

Günümüzde alüminyum köpük üretimi yapan az sayıda şirket bulunmaktadır. Piyasa halen küçük olmasına karşın yine de ağır ağır genişlemeye başlamıştır. Köpük özelliklerinin geliştirilmesi ile ürün süreçlerinin daha güvenilir şekle getirilmesi maksadıyla bilimsel çalışmalar devam etmektedir. Bu yüzden köpük stabilizasyonunun iyi bilinmesi kaçınılmaz hal almıştır. Ancak maalesef metal köpürtme fiziği üzerine yapılan araştırmalar çok sınırlıdır [Babcsan ve Banhart, 2006].

2.2. Metal Köpük Tanımı ve Mekanik Özellikleri

Düşük yoğunluğa sahip köpüksü metaller mühendislik uygulamalarında iki yönden çok önemlidir: Birincisi, akma dayanımları ve göreceli olarak yüksek elastiklik modülü sayesinde, dış yüzeyi hacimli metal ile kaplanmış çok hafif yapılar üretilebilmesidir. İkincisi ise sabit basma geriliminde gösterdikleri yüksek yığılma kabiliyetlerinden dolayı mevcut yüksek enerjiyi emme kapasiteleri, çarpışmalarda ve darbelerde güvenilir bir şekilde kullanımlarına olanak sağlamasıdır [Bor vd., 2010].

Metalik köpükler, gözenekli yapıya sahip, doğal olmayan ürünlerdir. Gözenekli yapı, belirli işlemlerin uygulanması sonucunda meydana gelmektedir. Doğal köpük ile hiçbir alakası olmamasına karşın bazı özelliklerinden ve görünümünden dolayı "metalik köpük" ismiyle adlandırılmaktadır. Köpükler, tam olarak çözülmeyen bir gaz ve bir sıvının dağılımını kapsamakta, farklı işlemler ile oluşturulan iki faz karışımının sonucu olarak bilinmektedir. İşlem emülsiyon ile çok benzerlik göstermekte, ancak köpük içerisinde bulunan gaz fazından dolayı da farklılık göstermektedir [Çinici 2004; Hernández 2005].

Bütünüyle geri çevrilebilen malzemeler olan bu köpüklerin çevreye bilinen bir zararı yoktur. En önemli avantajı ise ağırlığının çok düşük olmasıdır. Buna ilave olarak titreşim ve darbe sönümleyebilmeleri ve elektromanyetik kalkan özellikleri gösterebilmeleri olumlu özellikleridir. Ergime noktaları, ısıl genleşme katsayıları, özgül ısıları, ateş ve ısıl şok dayanımları ve ısıl iletimi ile yüzey geçirgenliği önemli termal özelliklerindendir [Avarisli ve Uguz, 2003].

Metalik köpüklerin yüksek sıcaklıklarda iç yapılarını daha iyi koruyabilmeleri (stabil) diğer bir olumlu özellikleridir. Ergime noktaları köpük malzemenin oluşumunu sağlayan metal alaşımıyla yaklaşık olarak aynıdır. Ayrıca malzeme yüzeyi genellikle oksit bir tabakayla kaplıdır. Bu tabaka nedeniyle ergime noktası çok yüksektir. Bu tabaka yüzeyde bulunan gözeneklerin boyutlarını (çaplarını)

düşürmekte, ancak gözenek sayısının fazlalaşmasına sebep olmaktadır. Tabakanın kalınlaşmasıyla gözenekli yapı desteklenerek ergime sıcaklığının üst değerlere çıkmasını sağlar. Malzemenin yeterli bir süre içerisinde havada veya oksit banyosu içinde ısıtılması durumunda tabakanın daha fazla kalınlaşarak daha stabil hale geldiği görülür [Banhart, 2001].

Metal köpüklere ait özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir [Ozan ve Katı, 2011].

- Metalik köpük, polimerik olanları ile kıyaslandığında daha katı yapıya sahiptir. Yüksek sıcaklıkta iç yapısını iyi koruyabilen (stabil) ve toksik gazlar oluşturmayan, sıcaklık dirençleri yüksek yapılardır.
- Ağırlıklarının düşük olması sahip oldukları en önemli avantajlarıdır.
- Tamamen geri çevrilebilmekte ve çevreye zarar vermeyen malzemelerdir.
- Metal köpüklerin ergime noktaları alaşımınki ile aynı olmakla birlikte malzemenin yüzeyinde çoğunlukla oksit bir tabaka kaplıdır. Söz konusu tabaka nedeniyle ergime noktası çok yüksek olmaktadır. Bu tabaka, yüzeyde yer alan gözeneklerin boyutlarını düşürmesine karşın gözenek sayısında artışa neden olmakta, tabakanın kalınlaşmasıyla gözenekli yapı desteklenerek ergime sıcaklığı üst değerlere çekilmektedir. Malzemenin yeterli bir süre içerisinde havada veya oksit banyosu içinde ısıtılması durumunda tabakanın daha fazla kalınlaşarak daha stabil hale geldiği görülmektedir [Davies ve Zhen, 1983].
- Olumlu özellikleri olarak, yönden bağımsız bir şekilde titreşim ve darbe sönümleyebilmeleri ile elektromanyetik kalkan oluşturabilmeleri gösterilebilir.
- Normal içyapıya sahip bir malzeme ile kıyaslandığında, ısıl şok dayanımları daha yüksektir.
- Özgül ısısı önemli derecede düşüktür, bu özelliği düşük olan ısıl kapasitesinin istenilen uygulamalar için en önemli malzemeler olmasını sağlamaktadır [Davies ve Zhen, 1983].

Metal köpük ya da metalik köpük kavramlarının günümüz literatüründe boşluk içeren tüm metal yapılara yönelik olarak kullanılan terimler olduğu görülmektedir. Metalik köpük terimine ilave olarak gözenekli metal (porous metal), hücreli metal (cellular metal), metal sünger (metallic sponge) gibi terimler de köpük tanımlamaları için sıkça kullanılmaktadır. Bu terimlerin arasındaki temel ayrım gözeneklerin

morfolojilerinden kaynaklanmaktadır.. Kendi içerisinde düzenli gözenekler bulunan ve ayırt edilebilen yapılar hücreli metal veya köpük olarak sınıflandırılmakta, diğerleri sünger ya da gözenekli olarak nitelendirilebilmektedir. Bu sebeple, metalik köpüklerin tam anlamıyla ne olduğunu anlayabilmek maksadıyla değişik ifadelerin ayırt edilmesi faydalı olacaktır:

- Hücresel Metal: Kullanılmakta olan en genel terim hücresel metaller terimidir. Belirli gazların metalik gövdenin içerisinde dağılması sonucu boşluk oluşturduğu yapıları kapsamaktadır. Metalik fazlar, gaz fazları içermekte olan kapalı hücrelerden oluşmaktadır. Hücresel metaller çoğunlukla %70'ten daha çok boşluk içermektedir.
- Gözenekli Metal: Metal yapının çok fazla sayıda gözenekten oluştuğu yapılardır. Gözenekler çoğunlukla küreseldir ve birbirinden yalıtılmış bir halde bulunmaktadır. Gözeneklilik oranı (porozite) yaklaşık %20'den daha düşüktür.
- (Katı) Köpük Metal: Özel bir hücresel metal sınıfıdır. Hücreler kapalıdır, ayrıca çokyüzlü (polihedral) ya da küresel ve her birisi birbirinden ince filmle ayrılmıştır.
- Metalik Sünger: Genellikle birbirlerine bağlı gözenekten oluşmaktadır. Hücresel metalin yapıbilimidir.

Yukarıdaki terimler birbirlerinden bağımsız değillerdir. Örnek olarak köpük metaller, hücresel ve gözenekli bir yapıda olmakla birlikte sünger metaller hücresel bir yapıda olmak zorunda değillerdir. Bazen malzemelerin ayırt edilmesi çok kolay olmamaktadır [Banhart 2000; Babcsan vd., 2003; Banhart 2003].

2.2.1. Elastik Modül

Yapısal malzemelerin sahip oldukları özelliklerden en önemlisi, bir dizi modül şeklinde tanımlanmakta olan lineer elastik davranışlarıdır. İzotropik malzemelerde lineer elastik karşılıklarının karakterize edilebilmesi için iki modüle ihtiyaç vardır. Bunlar; kesme modülü G ve Young modülü E'dir. Üretim işlemleri nedeniyle köpüklerin bazıları izotropik değildir. Bu sebeple lineer elastik davranışın belirlenebilmesi için ikiden fazla modül ihtiyacı bulunmaktadır [Degischer ve Kristz 2002].

İzotropik durumdaki ve kapalı hücreli bazı metalik köpüklerin çok daha az ya da daha fazla izotropik olmaları sebebiyle Formül 2.1'deki Elastik modülü (E), kütle modülü (K), kesme modülü (G) ve elastik Poisson oranı (v) arasındaki ilişkinin iyi bilinmesi gerekmektedir.

$$G = \frac{E}{2\,(1+v)}\,,\; K = \frac{E}{3\,(1-v)} \tag{2.1}$$

Yapının, köpük ya da hücresel malzeme olması halinde "modül" ifadesinin kullanılmasının genellikle uygun olmadığı görülmektedir. Çünkü köpükler, iskelete benzer yapılardadır ve bu yüzden "sertlik" kullanılmalıdır. Fakat bir devamlılık olarak malzemeye ait yeni bir sınıf şu an olağan olarak dikkate alınmalıdır. Bu sebeple genel malzeme özelliği onları karakterize etmekte kullanılmaktadır. Hücresel bir yapıda Young modülü sabit olmayan bir parametredir ve esasında hücresel metal mimarisine bağlı olduğundan dikkat edilmesi gerekmektedir [Degischer ve Kristz 2002].

Metalik köpüklerin en önemli özelliği göreceli yoğunluktur (ρ*/ρs). Hücresel malzemenin yoğunluğu (ρ*), duvarlardan oluşan hücresel malzemelerin (ana metal malzeme) yoğunluğu ise (ρs)'dir. Bazı hücresel malzemelere ait göreceli yoğunluklar Tablo 2.1'de verilmiştir [Dumais 2009].

Tablo 2.1: Bazı hücresel malzemelere ait göreceli yoğunluklar.

Hücresel Malzeme	**ρ*/ρs**
Gözenekli katılar	> 0,3
Yumuşak ağaçlar	0,15-0,4
Mantar	0,14
Polimerik köpükler	0,05-0,2
Ultra düşük yoğunluklu köpükler	0,001

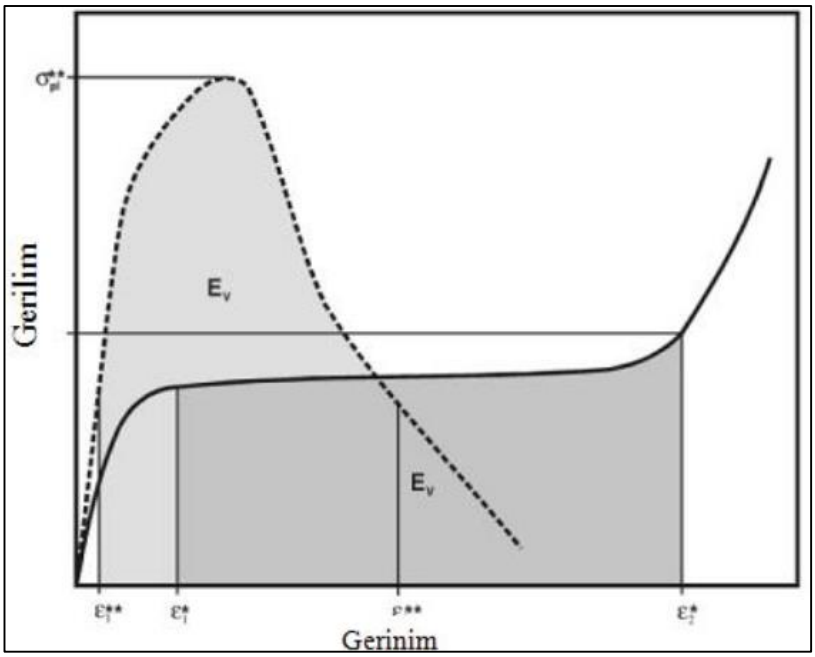
Kapalı gözenekli ve açık gözenekli yapıların arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Açık gözenekli köpük, bağlanmış sinir ağlarıyla temsil edilmektedir. Ana deformasyon mekanizması, daha yüksek köpük yoğunluğunda (ρ>0,1) gözenek duvarının eğilmesine ilave olarak kenarların uzaması ve basılmasıdır. Kapalı gözenekli köpüklerin hücre duvarları ise, yapıyla sıkışmış gözenek kenarlarının arasındandır. Gözenek kenarlarındaki uzama, eğilme ve sıkışmanın yanı sıra, ayrıca gözenek duvarındaki gerilim, deformasyon mekanizmasında büyük rol oynamaktadır. Bu gözenek duvarlarında meydana gelen daha yüksek olan sınırlamalar sebebiyle,

kapalı gözenekli yapılarda bulunan elastik modül, aynı göreceli yoğunluğa sahip açık gözenekli yapılarla karşılaştırıldığında teorik olarak daha büyüktür [Yıldırım 2010].

2.2.2. Basma Davranışı

Gözenekli metaller Şekil 2.1'deki basma testinde gösterildiği üzere bir "plato bölgesi" ile benzersiz bir "gerilim-gerinim eğrisi" sergilemektedir [Degischer ve Kristz, 2002]. Buna göre, gerinimin geniş bölümünde gerilim neredeyse eşittir. Bu davranışı, enerji emme veya sönümleme (absorblama) uygulamalarında sabit ve düşük gerilmeyle, deformasyonun büyük miktarının absorbe edilmesi sebebiyle gözenekli metalleri çok ilginç kılmaktadır. Köpüklerde, hangi malzemeden imal edilmesine bağlı olarak daha farklı deformasyon mekanizmalarının (sünek, elastomerik ve kırılgan davranış) gözlemlenebildiği görülmektedir. Metal köpükler çoğunlukla aşırı bir sünek davranışa sahiptirler [Yavuz, 2012].

Köpüklerin enerji emme kapasitelerine Plato gerilmesinin etkisi oldukça yüksektir. Mükemmel kapalı gözenekli köpüklerin yapılarında plastik deformasyon, gözenekler üzerinde uygulanmakta olan basma kuvvetine dik yönde gözenek duvarının genleşmesi biçiminde oluşmaktadır [Yavuz, 2012].



Şekil 2.1: Farklı iki enerji emiciye ait basma gerilim-gerinim eğrisi.

2.2.3. Enerji Emilimi ve Darbe Davranışı

Enerji emilim sistemleri içeren mevcut uygulamalar, metal köpükleri kullanabilmek adına büyük potansiyel sunmaktadırlar. Yüksek derecelerde gerilme ortaya koymayarak enerji absorblama özelliğinin bulunması, metal köpüklere çeşitli yapısal uygulamalarda kullanım imkânı sağlamaktadır. Metal köpükler verilen pik gerilme derecelerinde yoğun katılardan çok daha yüksek enerji absorbe edebilmektedirler. Metal köpükler, kendilerine has yüksek dayanım ve ayrıca yüksek oranda enerji verimliliği sergilemektedirler [Yu ve Banhart, 1997].

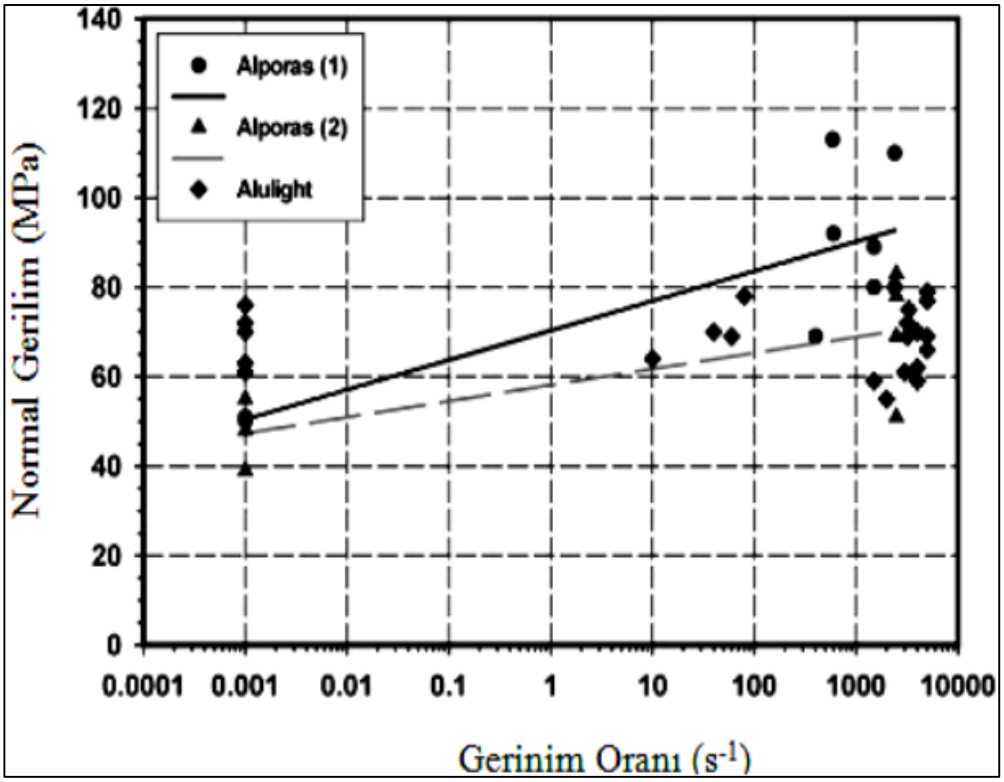
Geniş plato sistemleri sebebiyle hücresel metaller, iyi bir enerji emme kapasitesine ve verimine sahiptirler. Bir darbe esnasında, kinetik enerjinin absorbe edilmesi maksadıyla kuvvetler, gerilim seviyesince kontrol edilmektedir. Darbe kuvvetlerinin, bir parçanın zarar görmesinin ya da bir insanın yaralanmasının engellenmesi maksadıyla belirli bir değeri aşmaması gerekmektedir. Bu sebeple Şekil 2.1'deki grafikten de anlaşılacağı üzere enerji emiliminde, sadece enerji absorbsiyon kapasitesinin önemli olmadığı görülmekte, aynı şekilde malzemeye ait gerilim-gerinim eğrisinin de önemli bir rolünün olduğu görülmektedir. Grafikte gösterilen Ev, belirli bir gerinim aralığındaki hacim başına düşen emilmiş enerji miktarını ifade etmektedir ve 2 farklı emicide de aynıdır. Emici gerilim en yüksek noktasının plato bölgesi haricinde daha yüksek olması bu darbe kuvvetlerinin artmasını sağlamaktadır [Degischer ve Kristz, 2002].

Taşıma sistemlerinde kullanılan darbe emici hücresel metallerde sadece enerji absorbsiyon kapasitesinin önemli olmadığı aynı şekilde darbe davranışının da çok önemli olduğu bilinmektedir. Kaza durumlarında oluşabilecek aşırı deformasyon oranları, köpüklerde mekaniksel özelliklerin değişmesine sebebiyet verebilmektedir. Bu hususlara şu iki noktada dikkat edilmelidir.

- Kapalı gözeneklere sahip köpüklerin gözenekleri içerisindeki gaz akışı ile gaz basıncı.
- Gözenek kenarları ile gözenek duvarlarının eylemsizlik kütlesi.

Bu etkilerin her ikisi de akış gerilimini arttırabilmektedir. Bu sebeple, gerinim oranındaki artış ile birlikte köpüğün plato geriliminde de artma görülmektedir. Bu durumda, akış geriliminin artışının önemsiz olduğu açık gözenekli yapıda daha yüksek

oranda gözlemlenmektedir. Yapısal elementlerdeki eylemsizlik kütleleri akış geriliminde herhangi bir katkı sağlamamaktadır. Bu durum, metal köpüklerin bir kısmında gerilime-gerinime bağlılık göstermesi sebebiyle kapalı gözeneklere sahip köpüklerde farklıdır. Genelde, gerçek kapalı gözenekli metalik köpükler, sıklıkla üretim işlemlerinde oluşan hücre duvarlarında bazı başlangıç hatalarının içerilmesi sebebiyle tam olarak kapalı hücreye sahip yapılar değillerdir. Hatalara ilave olarak, hücre duvarlarının yırtılması da deformasyon işlemleri esnasında oluşmaktadır. Bu hatalar sebebiyle hücreler arasında oluşan gaz akışının, gerinim oranına bağlı olduğu bilinmektedir. Böylece, gözenekler içerisindeki gaz basıncı akış geriliminin de katkısı ile yüksek hızlı deformasyonu esnasında artar. Deformasyon bantlarında bulunan bölgesel gerinim sebebiyle, ilk küresel olarak ölçülen değere göre bölgesel gerinim oranının çok daha yüksek olduğu görülür. Dolayısıyla, gerinim oranının etkisi ile artacağı görülecektir. Alüminyum köpüklerde yapılan araştırmalar Şekil 2.2'de olduğu gibi, gerinim oranının 10^{-3}'den 10^{3}'e artması durumunda plato geriliminin %20–90 arasında artış gösterdiği görülmektedir. Gerinim oranı etkisinin genelde köpükten yapılmış alaşım ve hücre morfolojisince kontrol edildiği görülmektedir [Degischer ve Kristz, 2002].



Şekil 2.2: Plastik dayanıma göre farklı alüminyumun değişen gerilim-gerinim.

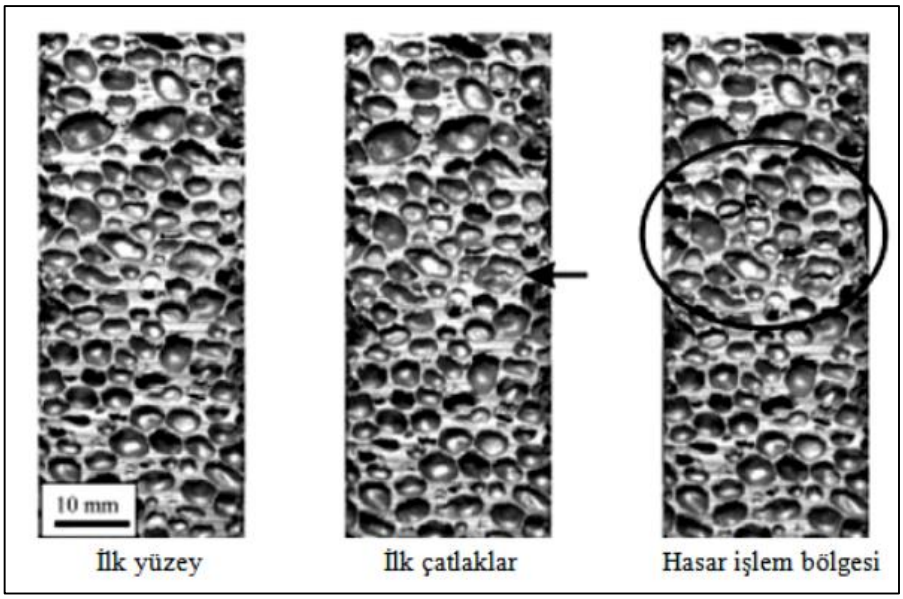
2.2.4. Gerinim Davranışı

Metal köpüklerdeki üretim işlemlerine yönelik iyileştirmeler, metal köpüğün kalitesini arttırarak gerçek yapısal malzemeler olarak birçok yeni uygulamanın ortaya çıkmasına neden olmuştur. Kendilerine has mekanik özellikler sebebiyle, kırılma ve gerinim gibi davranışlara ilave olarak basma ve enerji absorbsiyon performanslarının da bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır [Degischer ve Kristz, 2002].

Başlangıçta deformasyon modu, açık gözenekli köpüklerde bulunan gözenek kenarlarının esneme ve basma eğrisi, kapalı gözenekli köpüklerde bulunan gözeneklerin basma eğrisi ile çok benzerdir. Fakat akma sonrası aşamasında, deformasyon mekanizmalarının basmadan oldukça farklı olduğu görülmektedir. Basmada, gözenekteki kırılgan ya da plastik çöküş, eksenel yükleme ile dik biçimde deformasyon bantları içinde gerçekleşmektedir. Gerinimde, gözenek kenarları ve gözenek duvarları içerisinde çekme gerilimi baskın olması nedeniyle bu elementlerde burulma mümkün değildir [Degischer ve Kristz, 2002].

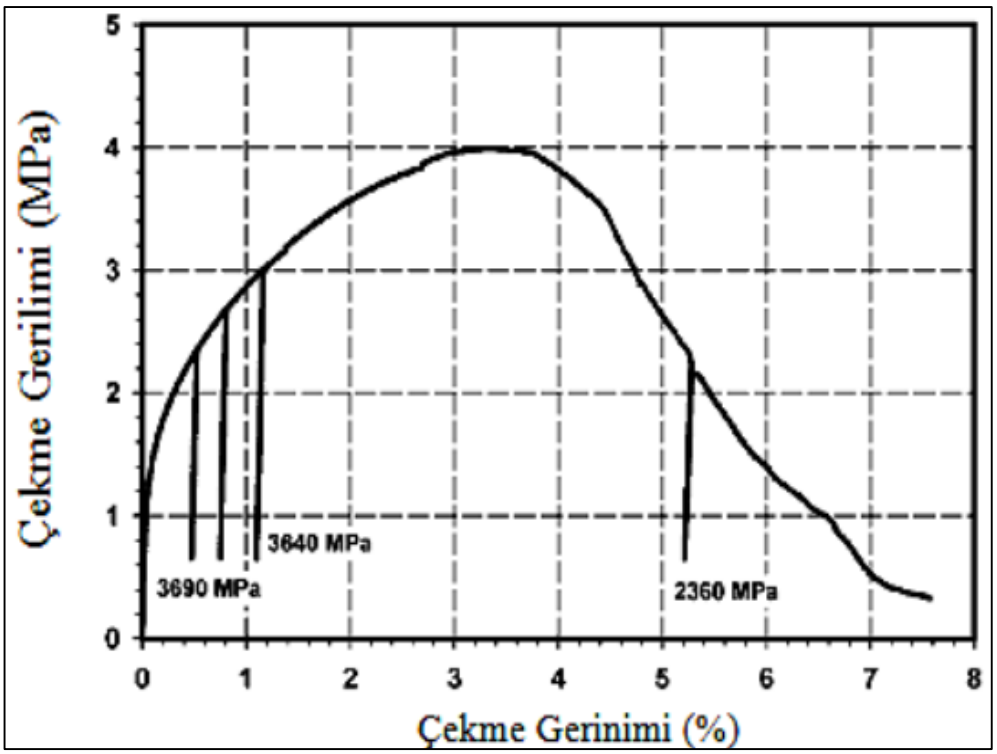
Sünek hücresel metalde (örnek: alüminyum köpükler), hücre duvarları ve hücre kenarlarının çatlaması, ana çatlağın yayılmasının başlaması öncesinde de görülebilmektedir. Hasar işlem bölgesinin, yoğunluğun ve deformasyonun artmasıyla gelişmeye başladığı görülmekte, kapalı gözenekli metalde bir kaç gözenek duvarının söz konusu hasar işlem bölgesinin içinde yırtıldığı görülmektedir [Degischer ve Kristz, 2002].

Ayrıca deformasyonlar, hücresel yapının içerisindeki zayıf bir yol boyunca ana çatlakta yayılma ve gelişmeye yol açmaktadır. Yalnızca güçlü hücre kenarlarının bozulmadığı, birlikte iki köpük parçasını tuttuğu görülür. Bu işlem, akış geriliminde düşüş meydana getirmektedir. Gerilim-gerinim eğrisi içerisindeki olaylar ile sünek bir kapalı gözenekli alüminyum köpüğündeki hasar mekanizması ve de ilgili deformasyon işlemi Şekil 2.3'te gösterilmektedir [Degischer ve Kristz, 2002].



Şekil 2.3: Alüminyum köpüklerin gerinimdeki hasar mekanizması.

Bazı zayıf olan hücre duvarlarında çatlaklar oluşmakta, sonrasında ise hasar işlem bölgesi gelişmektedir. Şekil 2.4'te söz konusu hasar bölgesine ait gerilim-gerinim eğrisi gösterilmektedir [Degischer ve Kristz, 2002].

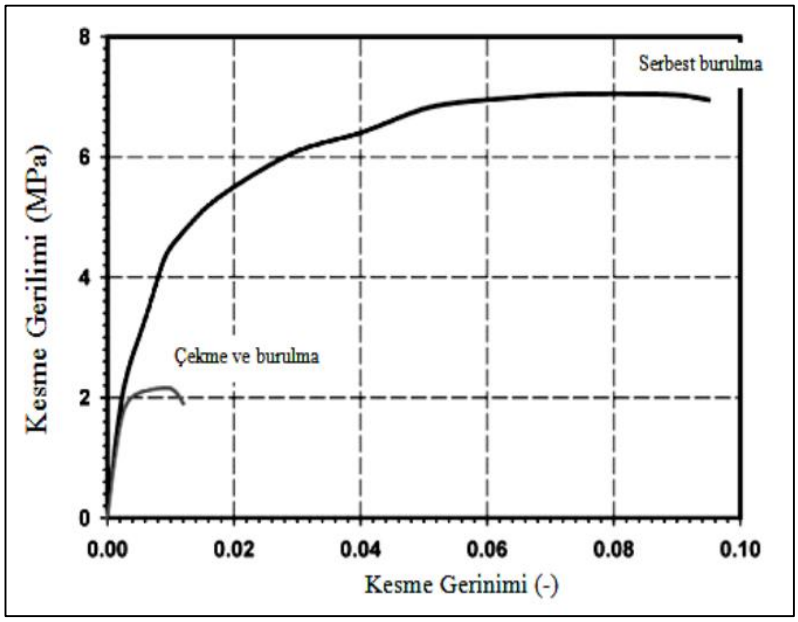


Şekil 2.4: Yük kaldırma modülünün ve alüminyum köpüğün gerilim-gerinimi

2.2.5. Burulma Davranışı

Burulmada, hücre kenarlarının eğilmeye, hücre duvarlarının da eğilme ile kesmenin kombinasyonu olan bir duruma maruz kaldığı görülmektedir. Kesme davranışının, malzeme yapılarının gelişiminde ve sandviç yapılardaki uygulamalarda önemli olduğu görülmektedir [Degischer ve Kristz, 2002].

Köpüklerin çoğu, çekme testleriyle karşılaştırıldıklarında serbest bükmede çok önemli seviyede deformasyon başarısızlıkları göstermektedir. Şekil 2.5'te tipik bir örnek gösterilmektedir. Numunenin kırıldığında bükme testi sırasında eksenel olarak sabitse, çekme gerilmeleri numunenin üzerinde oluşmuştur ve hasar için gerilim, gerinim testlerinde belirlenen seviyede azalır [Degischer ve Kristz, 2002].



Şekil 2.5: Eksenel ve eksenel olmayan gerilim ile köpüğün gerilim-gerinim eğrisi.

Numune içerisindeki gerilim bölgeleri, bükme testi sırasında numune üzerine basma ve çekme yükleri uygulanmasıyla elde edilmiştir [Degischer ve Kristz, 2002].

2.2.6. Termal, Elektriksel ve Akustik Davranış

Köpükler, belirli koşullarda sesi ve titreşimleri sönümleyebilmektedir. Ayrıca köpüklerde termal iletkenlik de düşüktür. Bu özellikleriyle üstün olmamakla beraber

köpüğün diğer özellikleriyle birleştirildiğinde faydalı olabilir (polimer köpük ses emici açısından daha iyidir) [Banhart, 2005].

Hücresel metallerde, polimerler ve daha seramik matrislerin, elektriksel iletkenliğinde farklılıklar vardır. Bu durum, büyük oranda tipik uygulamaları değiştirmektedir. Polimerik ve seramik köpükler, yalıtım ve yapısal muhafazalarda kullanılabilmektedir. Köpük metalin elektriksel iletkenliğinin gözeneklilik ile önemli derecede azalmasına karşın, hala iyi seviyede elektromanyetik dalgayı emme, elektriksel topraklama ya da düşük elektrik teması kapasitesini sağlamak maksadıyla oldukça yeterlidir. Açık hücreli yapıyla metalik süngerin olması halinde, büyük erişilebilir alandaki elektrik potansiyelinin dağıtılması için iletkenliğe izin vermekte ve bu durum onların pil elektrotları için cazip hale gelmesini sağlamaktadır. Bu tür uygulama alanında hücresel nikeller yaygın olarak kullanılmaktadırlar [Degischer ve Kristz, 2002].

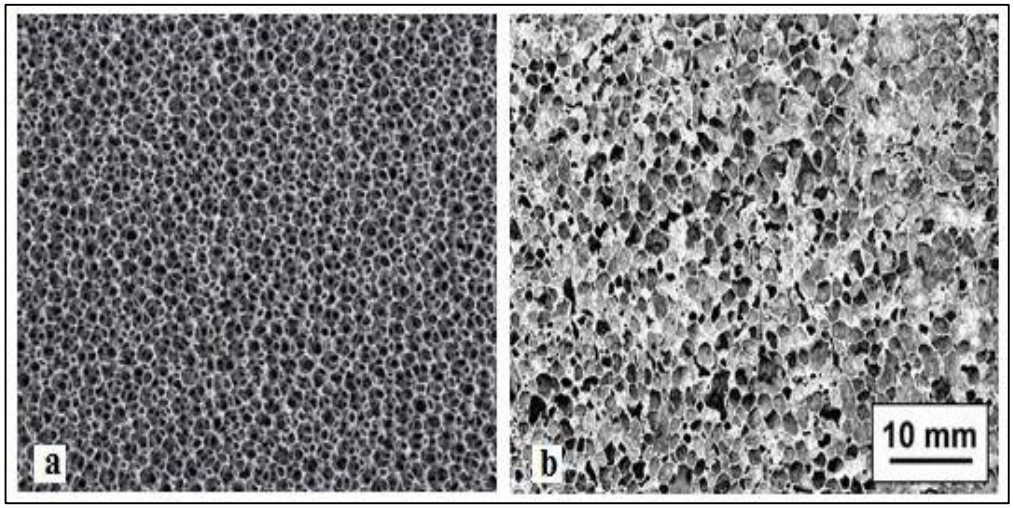
2.3. Alüminyum Köpükler ve Özellikleri

Alüminyum köpük malzemelerin son dönemde kullanım alanları arttığından önemleri de giderek artmaktadır. Titreşimi sönümlemesi, hafif olması, düşük ağırlıkta olması ve ısıl izolasyon sağlayabilmesi bazı önemli özellikleri arasında yer almaktadır. Bununla birlikte yüksek oranda enerji emme kapasitelerinin bulunması, düşük yoğunluklu olmaları, birim şekil değiştirme miktarına kadar kırılmadan deforme olmaları diğer özellikleridir. Alüminyum köpük malzemelerinin diğer metal malzemelerden birçoğuna göre darbe enerjisini sönümleyebilme konusunda daha iyi durumda oldukları bilinmektedir. Köpük metaller; asansörler, inşaat, demiryolu taşımacılığı, havacılık, otomotiv, gemi sektörü, zırh yapımı ile biyomalzemelerde kullanılmaktadır. Son dönemde metal köpük malzemenin üretim yöntemleri ile bunların özellikleri kapsamında yapılan geliştirme çalışmalarına devam edilmektedir. Alüminyum köpük malzemelerin hücre duvarının alüminyum oksit tabakası ile kaplı olması, alüminyum köpüklere ateşe dayanıklılık özelliğini sağlamaktadır [Dahil, 2017].

2.4. Hücre Yapısına Göre Metal Köpükler

Alüminyum köpüklerin hücre yapıları; kapalı ve açık hücre yapıları olmak üzere iki çeşittir. Açık hücre yapılarına ait fotoğraf görüntüleri Şekil 2.6'da görülmektedir

[Sertkaya, 2013]. Kapalı hücre yapıları köpük hücrelerinde, açık hücre yapıları da sünger hücrelerinde gözlemlenen yapıdadırlar. Köpüklerin kapalı hücre yapısındaki hücreler sıkı düzendeyken, açık hücre yapısındaki hücreler birbirleriyle bağlantılı durumda bulunmaktadırlar. Açık hücre yapısında bulunan hücreler arasındaki bağlantılar destek şeklinde adlandırılırlar. Kapalı köpük hücreler birbirinden hücre kenarlarıyla ayrılmaktadırlar. Metalik köpüklerde ise köpük yapısı hücreler arası sıralı birleşme yüzeyleriyle oluşmaktadır [Banhart, 2001; Ashby vd., 2000].

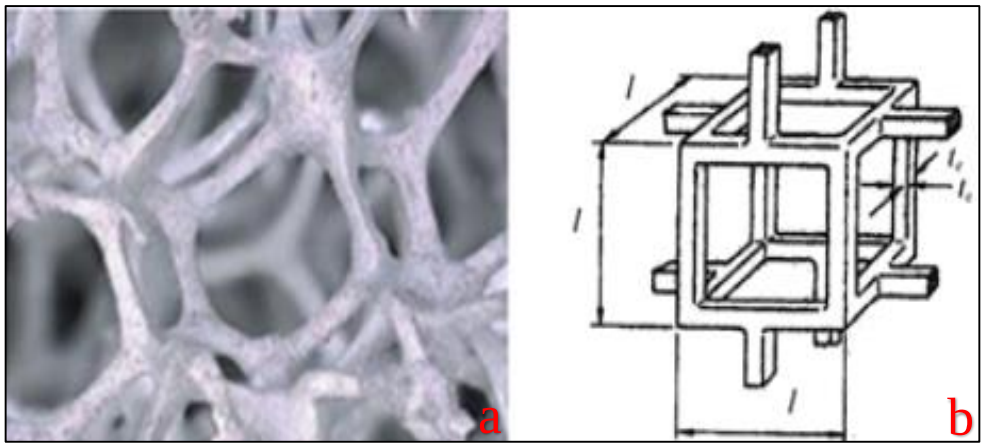


Şekil 2.6: a) Açık hücreli alüminyum köpük b) Kapalı hücreli alüminyum köpük.

İçyapısının köpük biçiminde olması darbenin yönü dikkate alınmadan yüksek darbe enerjisinin sönümlenmesini ve ayrıca hafif olmasını sağlamaktadır.

2.4.1. Açık Hücreli Metal Köpükler ve Üretim Yöntemleri

Açık hücreli metalik köpükte, hücrenin sadece kenarları bulunmakta olup, hücre duvarları bütünüyle kapanmayıp, yapısındaki boşluklar birbiri ile bağlantılıdır. Temsili olarak açık hücreli metalik köpük hücresi ve ERG Aerospace DUOCEL yöntemi ile üretilen bir açık hücreli alüminyum köpüğe ait SEM mikrografisi Şekil 2.7'de görülmektedir [Dumais 2009].



Şekil 2.7: a) Açık hücreli metal köpük örneği b) Hücre yapısı.

Filtrelerin, ısı eşanjörlerinin, katalizör desteklerinin, akışkan sönümleme kanallarının (farklı tipteki şok dalga yayılım cihazı dâhil), yakıt pillerinin, biyomedikal protezlerin, şekil hafızalı içten soğutmalı aktüatörlerin ve koruyucu geçirgen zar süzgeçlerin ve kılıflarını kapsayan güncel uygulamaların açık hücre yapısına sahip metalik köpükler ile üretilmesi mümkündür. Bu şekil fonksiyonel bileşenler sadece yapısal uygulamalara göre daha yüksek olan değerleri birleştirme eğilimindedirler ki, bu açık hücreli metalin üretimi genellikle daha yüksek olan maliyetler bakımından uygundur. Hücre yapısı ölçüsü, genellikle fonksiyonel karakteristikler açısından önemli olmaktadır. Bu elbette, sıvı akışını sınırlayan cihazlar ve filtreler için temel bir özelliktir. Fakat, protez implantların içinde kemik gelişimi nispeten kaba gözenekleri gerektirebilmektedir. Bu nedenle ince hücre boyutu, çoğunlukla ısı eşanjörler vb. (gözeneklerin tıkanma tehlikesiyle çeşitli sınırlamaların getirilmesi normaldir) için tercih edilebilir. Fakat bu özellikler çoğunlukla minimum süneklik ve dayanım gerektirmesiyle birlikte gerekecektir. Böylelikle görece ince, düzenli hücre yapısı ile hatasız olan hücre mikro yapıların bu bakımdan daha yararlı olabileceği görülmektedir. Çeşitli alaşım sistemlerinin, işlem optimizasyon konularını daha iyi anlayabilmek için daha da gerekli hale getirmesi nedeniyle metaller, açık hücreli metal uygulamaları için çok geniş yelpazede araştırılmaktadır [Degischer ve Kristz, 2002].

2.4.1.1. Hassas Döküm Yöntemi (Polimer Replikasyon)

Açık gözenekli metal köpük malzemeleri döküm yöntemiyle üretebilmek için polimer replikasyon olarak adlandırılabilecek bir yöntemle, başlangıç malzemesi

olarak hassas döküme uygun polimer esaslı malzemeden açık hücreli preform kalıplar (modeller) kullanılan bir hassas döküm yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemde polimer preform modelin açık hücrelerinin ısıya dayanıklı malzemeler ile (fenolik reçine, mullit, alçı, kalsiyum karbonat vb.) doldurulmasından sonra polimer preform ısıl işlem vasıtasıyla uzaklaştırılmaktadır. Daha sonra polimer preform model tarafından bırakılan boşluklar eriyik metalle doldurulmaktadır. Son işlem olarak basınçlı su ile model kalıp malzemesi çıkarılarak polimer preform modelin yerine geçen metal köpük elde edilmektedir [Banhart, 2000; Özer, 2005; Dündar, Turhan, vd., 2019].

Alüminyum alaşımları (6101, AlSi7Mg0,3), alüminyum, magnezyum ve bakır gibi düşük ergime derecesi olan ve hassas döküm yapılan metaller ve alaşımları bu yöntemden istifadeyle üretilebilmektedir. Bu yöntem vasıtasıyla üretilen açık hücre köpüklerin diğer açık hücre alüminyum köpükleri üretim yöntemlerine göre daha çok gözeneklilik (%80-97 porozite) içerdiği görülmektedir. Ancak ısıl işlemle uzaklaştırılan polimer modelin bıraktığı boşlukların dar olabildiği, bu nedenle de eriyik metalin bu boşluklardan geçişinde zorlanabildiği bilinmektedir. Bu durumlarda kalıbın ısıtılması veya basınç uygulanması gerekmektedir [Banhart, 2000], [Özer, 2005].

Güler, Turhan vd. (ALUS'09 Bildirisi) açık gözenekli (hücreli) metal köpük sınıfında niteledikleri açık gözenekli metal bal peteği ve kafes (lattice) yapılarının da, hassas döküm yöntemi ve yeni gelişmekte olan eklemeli (katmanlı) imalat teknolojilerinin birleşimi olan ve adını "Eklemeli imalat destekli hassas döküm yöntemi" verdikleri yeni bir yöntemle üretilebileceğini göstermişlerdir. Bu yeni yöntemde hazır preform kullanmak yerine, bal peteği veya lattice yapıda özgün tasarım preform, polimer esaslı Üç Boyutlu Yazıcı da üretilip, kullanılabilmektedir [Güler, 2019].

2.4.1.2. Boşluk Tutucu Tekniği ile Döküm Yöntemi

Boşluk tutucular etrafına döküm yönteminde; düşük yoğunluğa sahip organik ya da inorganik yuvarlak boşluk tutucular (ateş kili, alümina silikat, köpük cam küreler, çözülebilir tuzlar, alüminyum oksit küreler) eriyik vasıtasıyla emdirildikten sonra ısıl işlemle ya da suyla giderilmesiyle metalik köpük oluşmaktadır.

Alüminyum, çinko, magnezyum, kalay, kurşun gibi düşük ergime derecesine sahip pek çok metal bu yöntem ile üretilebilmektedir. Bu yöntemde boşluk tutucu kullanılması nedeniyle gözenek (pore) boyutu dağılımının kontrol edilmesi kolaydır, fakat bu yöntem ile üretilen köpüklerin en çok %80 gözeneklilik (porozite) içerdiği görülmektedir [Banhart, 2000].

2.4.1.3. Metal Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

Metal enjeksiyon kalıplama yöntemi; plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile geleneksel toz metalurjisi yönteminin birleşimi ile oluşmaktadır. Başlangıçta metal tozu ile bağlayıcı karıştırılmakta ve müteakiben yapı preslenmektedir. Daha sonra bağlayıcının yapıdan uzaklaştırılmasının ardından sinterleme yapılmaktadır. Ergime derecesi yüksek veya düşük olan; alüminyum, bakır, titanyum, seramik ve kompozitlere bu yöntem uygulanmaktadır [Thomsen vd., 2005].

Bu yönteme benzeyen diğer bir yöntem de "toz boşluk tutucu" yöntemdir. Bunun "metal enjeksiyon kalıplama" yönteminden farkı boşluk tutucu malzemelerin (karbamat, polimetil metakrilat, amonyum bikarbonat) de olmasıdır [Manonukul vd., 2009].

Bu yöntem aynı şeklide, ergime derecesi yüksek ve düşük olan; alüminyum, paslanmaz çelik, titanyum, bakır, nikel ve bunların alaşımlarına uygulanmaktadır. Bu iki yöntemin de karmaşık şekle sahip ürünlerin üretiminde mümkün olduğu bilinmekte ve işlevsel açıdan yüksek özelliğe sahip yapılar oluşmaktadır. Ancak "toz boşluk tutucu" yöntemi ile üretilen açık hücre köpüklerde hücre boyut-dağılımının kontrol edilmesi kolay değildir. Bu yöntem ile üretilen açık hücre köpükler %65'den daha az oranlarda porozite içerirler [Polat vd., 2010; Manonukul vd., 2009].

2.4.1.4. Polimer Emdirme Yöntemi

Literatürde; replika ve polimer emdirme yöntemi adlarıyla da bilinen ve başlangıçta açık gözenekli seramiklerin üretimi amaçlı olarak çamur köpüklendirme yöntemi olarak Schwartzwalder ve arkadaşlarınca 1963 yılında patentlenen bu yöntem, bir Toz Metalürjisi yöntemi olarak açık gözenekli metal köpüklerin de üretiminde de kullanılabilmektedir [Montanaro vd., 1998; Dressler vd., 2009].

Çamur köpüklendirme yönteminde sırasıyla aşağıdaki 3 aşama uygulanmaktadır.

- Çamur karışımın hazırlanması:
- Model malzemenin kaplanması,
- Model malzemenin yapıdan uzaklaştırılmasıyla sinterleme işlemi gerçekleştirilmesi.

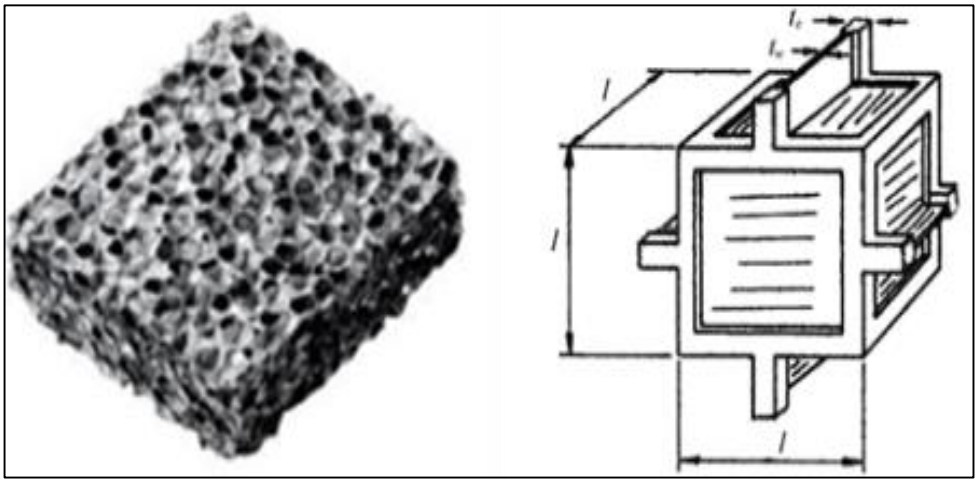
Bu yöntemde başlangıçta model malzemenin hazırlanan çamur karışımına daldırılarak belirli süre bekletilmesi sağlanır ve çamur karışımı ile model malzemenin homojen şekilde kaplanması gerekir. Çamur karışımıyla kaplanmış durumdaki model malzeme kurutma işleminden geçirilir ve sonra model malzemenin giderilmesiyle sinterleme işlemi yapılır. Bu yöntemde üretilmiş köpükler çoğunlukla açık hücrelidirler. Ancak yarı açık veya kapalı hücre köpük elde edilmesi de mümkündür. Bu yöntem çok pratik olmakla birlikte yöntemin kullanılmasında pahalı cihaz/ekipmanlara ihtiyaç duyulmamaktadır [Montanaro vd., 1998].

Bu yöntemi kullanarak küçük ölçekli olmak üzere açık gözenekli alüminyum köpük üretimine yönelik ülkemizde de çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bunlar arasında Yagşi ve Keleş [Yagşi, 2018], polimer emdirme yöntemi ile 6063 alüminyum alaşımından açık hücreli köpük üretimi gerçekleştirmiştir. Üretilen köpüklere mukavemet kazandırılması için sinterleme işlemleri gerçekleştirilmiş olup önce yapıdan model malzeme giderilmiş daha sonrasında ise sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu proses indüksiyon sinterleme yöntemi ile gerçekleştirilmiş olup kısa sürede mukavemeti ve sertliği yüksek köpükler elde edilmesi amaçlanmıştır.

2.4.2. Kapalı Hücreli Metal Köpükler ve Üretim Yöntemleri

Kapalı hücreli metal köpüklerin üretim çalışmaları 1960 ve 1970'li yıllara dayanmakla birlikte, hem yeterli tekrarlanabilir kalitede hem de ucuzlukta üretilemediği için o yıllarda gerçek endüstriyel uygulamalarda çok fazla yer alamamıştır. Fakat 1990 yılından sonra üretim yöntemlerindeki yeni gelişmelerle, kapalı hücreli alüminyum köpük malzemeler günümüzde daha yaygın üretilip, endüstride kullanılmaya başlanmıştır. . Bu köpüklerin genel üretim yöntemlerinde; eriyik metalin içerisine gaz enjekte edilmesi veya bir köpürtücü ajanın kullanılması gerekmektedir. Gözenek ya da hücre büyüklüklerinin

çoğunlukla 1-8 mm arasında olduğu görülmektedir. Gaz parçacıkları birbirinden katı veya sıvı porsiyonlarla ayrılmış durumdadır. Bu nedenle hücreler sıvı veya katı ile tamamen kaplanmışlardır ve birbirine bağlı değillerdir. Kapalı hücreli bir alüminyum köpük ile kapalı hücreli bir metal köpük hücre yapısının temsili resmi Şekil 2.8'de gösterilmektedir [Ergönenç 2008, Banhart, 2001].



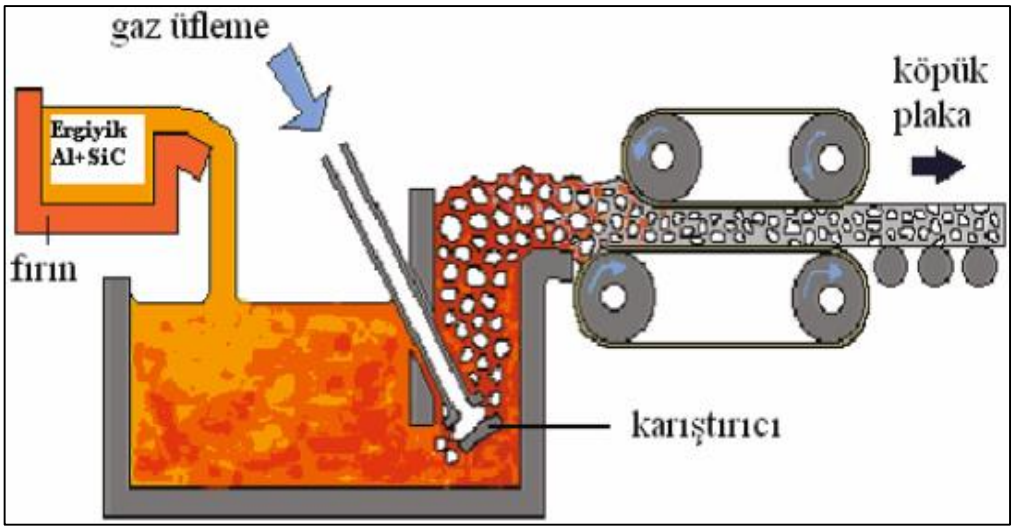
Şekil 2.8: Kapalı hücreli metal köpük örneği ve hücre yapısı.

Kapalı hücreli köpüğün üretilme eğiliminde, döküm malzemeleri ucuz üretildiğinden dolayı (çoğunlukla alüminyum), çoğu yapısal uygulamada bunların üzerine yoğunlaşılmaktadır. Farklı bileşenlerin kullanılmasıyla üretilen kapalı hücreli köpükler, düşük yükler (basma yükü) altında enerjinin kademeli şekilde absorbe edilmesi maksadıyla tasarlanmaktadır. Prensip olarak, katı metallerle karşılaştırıldığında, büyük plastik gerinimler, önemli derecede enerjinin emilimiyle akordiyona benzeyen deformasyon yoluyla gerçekleştirilmektedir. Fakat bu tür bileşenlerin performansında, örneğin eğme esnasında eğer bir kopma meydana gelirse bileşenlerin kolaylıkla kırılma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu kötü çekme yükünün, süneklik göstererek kesme bantları içerisinde oluşan erken hasarla çoğunlukla hayal kırıklığı yarattığı görülmektedir. Günümüzde hücre boyutunun, mm altı ölçülerde tercihen üniform olması sağlandığında, problemlerin büyük derecede azalmış olabildiği belirlenmiştir. Böylece ürün hacmi içerisindeki malzeme gibi toplu şekilde bu tür malzemeleri üretme kabiliyetine sahip olan işlem tekniğinin geliştirilmesini güçlü bir biçimde teşvik etmiştir. Bununla birlikte, bu köpüklerin hücre duvarları içinde, ince oksit filmler ve büyük seramik parçacıklar gibi ağır gevrekleştirici bileşenlerin bulunduğu görülmektedir. Bu tür bileşenlerin ergitme yönteminde viskozite arttırmak maksadıyla işlem sırasında bilerek katılmasıyla hücrenin

bozulmasına engel olduğu bilinmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, bu tarz bileşenlerin köpükteki mekaniksel özellikler üzerinde ileri derece zararlı etki oluşturduklarını ve bu yüzden mekanizmaların sorunlu olduklarını özetleyerek doğrulanmıştır. Hem işlem yönteminin geliştirilmesinde hem de söz konusu etkilerin daha ayrıntılı anlaşılmasında, bu bileşenlerin uygun bir biçimde değiştirilmesi ya da ortadan kaldırılması maksadıyla daha fazla çalışmanın yapılmasına ihtiyaç vardır. Aynı zamanda kapalı hücreli köpükler, uygulamanın diğer türlerinde (örnek: termal bariyerler) önemli bir konuma sahiptir. Bu yüzden çoğunlukla seramik malzeme tercih edilecektir [Degischer ve Kristz, 2002].

2.4.2.1. Gaz Enjekte Ederek Üretim

Cymat Aluminium Corp. Firmasının kullandığı bu yöntemde, köpük metal elde edilmesinde alüminyum ve alaşımları kullanılmaktadır. Silisyum karbür, magnezyum oksit ya da alüminyum oksit parçacıkları ergiyiğin viskozitesinin arttırılması ve köpük özelliklerinin iyileştirilmesi maksadıyla kullanılmaktadır. Parçacık boyutunun 5-20 µm arasında olduğu takviye parçacıklarında, hacimsel oran %10-20 arasında değişmektedir. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi ergiyik, gaz enjeksiyonuyla köpürtülmektedir [Varyoz vd., 2015]. Kullanılan gaz çoğunlukla hava, nitrojen veya argondur. Ergiyik içerisinde gaz üretilmesi ve de gözeneklerin düzenli şekilde dağılımının sağlanması maksadıyla özel tasarlanan pervaneler ya da titreşimli enjektörler kullanılmaktadır. Sonuçta meydana gelen viskoz gaz ile ergiyik karışımı sıvı yüzeyine doğru ilerleyerek düzgün bir sıvı köpüğe dönüşmekte, sıvı metal drenajları kaybolmaktadır. Malzeme soğutularak katılaştırılmaktadır (Babcsan vd., 2003).



Şekil 2.9: Gaz enjekte ederek metal köpük üretimi.

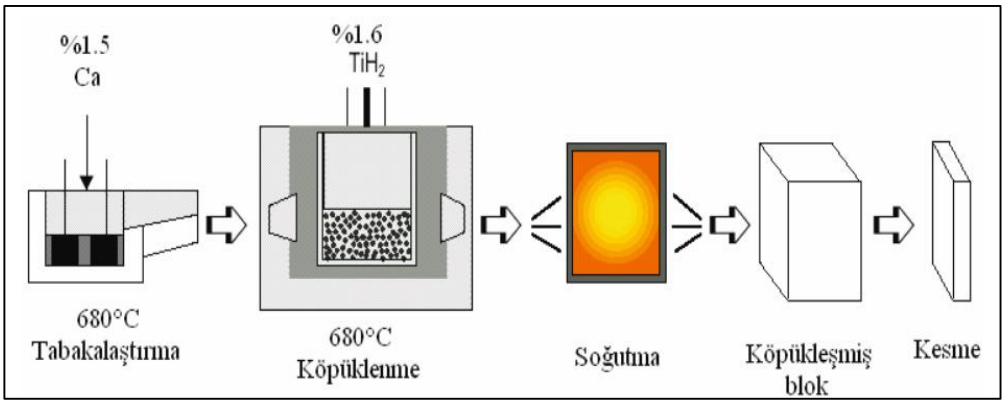
Enjekte edilen havayla, kabarcıklar ergiyik yüzeyine doğru yükselmekte, hücre duvarının ara yüzeylerinde bulunan katı seramik parçacıkların varlığı sıvı köpüğün oluşumunu stabilize etmektedir. Dengelenmiş sıvı köpüğün mekanik olarak ergiyik yüzeyi üzerine taşınarak soğutulmasıyla katı köpüğün oluşumu sağlanmaktadır. Alüminyum köpük üretiminde geliştirilen teknolojilerde, köpüğün fiziksel ve mekanik özelliklerinin hücre duvarı malzemesi ve köpük içerisindeki hacimsel katı oranının yanında hücre geometrisinden de yüksek oranda etkilendiği araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir. Hava enjeksiyonuyla alüminyum köpük üretilmesinde, köpürtme odasının şekli ve boyutları, katı parçacıkların hacimsel oranı ve büyüklüğü, havanın enjeksiyon hızı, köpürme sıcaklığı, pervane dizaynı ve hızı gibi süreç değişkenleri, hücre duvar kalınlıkları ve boyutları kontrol edilmektedir (Deqing vd., 2006).

Köpürtülen malzemeler kapalı dış bir yüzeye sahip olmakla birlikte istenen şeklin elde edilmesi maksadıyla köpürtme işlemi sonrasında şekillendirilmektedirler. Aşırı oranda seramik parçacık içermesi nedeniyle bu tarz köpüklerin işlenmesi sorunlu olabilmektedir. Direk köpürtme yöntemindeki avantaj, büyük hacimlerde köpüklerin devamlı olarak üretilebilmesi, düşük yoğunlukların elde edilebilmesidir (Banhart, 2005).

2.4.2.2. Köpükleştirici Ajan Yardımıyla Üretim

Köpükleştirici ajan yardımıyla alüminyum alaşımdan metal köpük üretiminde gaz üflemenin yerine, eriyiğe direkt bir şekilde köpükleştirici ajanın ilave edilmesi esastır. Etkili sıcaklıkta köpükleştirici ajan çözünerek gazın salınmasını ve ardından

köpükleşmeyi sağlamaktadır. Sisteme ait şematik görünüm Şekil 2.10'da verilmektedir [Varyoz vd., 2015]. Yöntemin ticari ismi "ALPORAS" olarak bilinir [Miyoshi vd., 2000]. Katkı malzemeleri nedeniyle bu yöntem pahalıdır. Bununla birlikte üretimde istenen son şekilde parçanın üretilmesi aşırı zordur.



Şekil 2.10: Köpükleştirici ajan yardımıyla metal köpük üretimi.

2.4.2.3. Köpürme Özelliğine Sahip Malzemeler ile Üretim

Toz metalürjisiyle köpük metal üretiminde, toz metal ile köpük yapıcı maddenin karıştırılmasının ardından presleme, ekstrüzyon, haddeleme vb. metal şekillendirmesi yöntemleriyle köpükleşecek yoğun yapıdaki yan ürün oluşmaktadır. Köpükleşecek yan ürünün, metalin erime sıcaklığı üstüne ısıtılmasıyla köpük yapıcı malzemenin bozunarak gaz açığa çıkardığı görülmektedir. Açığa çıkan bu gaz, erimiş metalin genişlemesi ve gözenekli yapı oluşmasını sağlamaktadır [Varyoz vd., 2015].

Bu yöntemde; çok büyük parçalar üretilmesi çok zor, tozların maliyeti çok yüksek, gözenek yapısındaki düzeni yetersiz ve işlem kontrolünün geliştirilmesi gerekmektedir.

2.5. Metal Köpük Uygulamaları ve Kullanım Alanları

Metalik köpükler ve gözenekli yapılara ilişkin sadece bilimsel çalışılmaların değil aynı şekilde endüstriyel uygulamalarla ilgili yapılan araştırmalarında da yararlı olduğu görülmüştür. Günümüz teknolojisinde bazı mühendislik problemlerinin gözenekli malzemelerin kullanılmasıyla çözüldüğü bilinmektedir [Banhart, 2005].

Metalik köpükler; fiziksel, akustik ve mekanik özellikleri çok iyi derecede olan bir malzeme grubu olarak öne çıkmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle fonksiyonel ve yapısal uygulamalarda çoğunlukla kullanılmaktadırlar. Bu malzemeler yapısal kullanım alanı olarak; demiryolu, otomotiv, inşaat endüstrisi, gemi yapımı, spor malzemesi yapımı, uzay araçları ile biyomedikal uygulamalarda; fonksiyonel kullanım alanı olarak ise; ısı eşanjörleri, filtreleme ve ayırma, soğutma sistemleri, su arıtma, elektrokimyasal uygulamalar, sıvı muhafazası ve iletimi vb. gibi uygulamalar gösterilebilmektedir.

2.5.1. Metal Köpüklerin Yapısal Uygulamaları

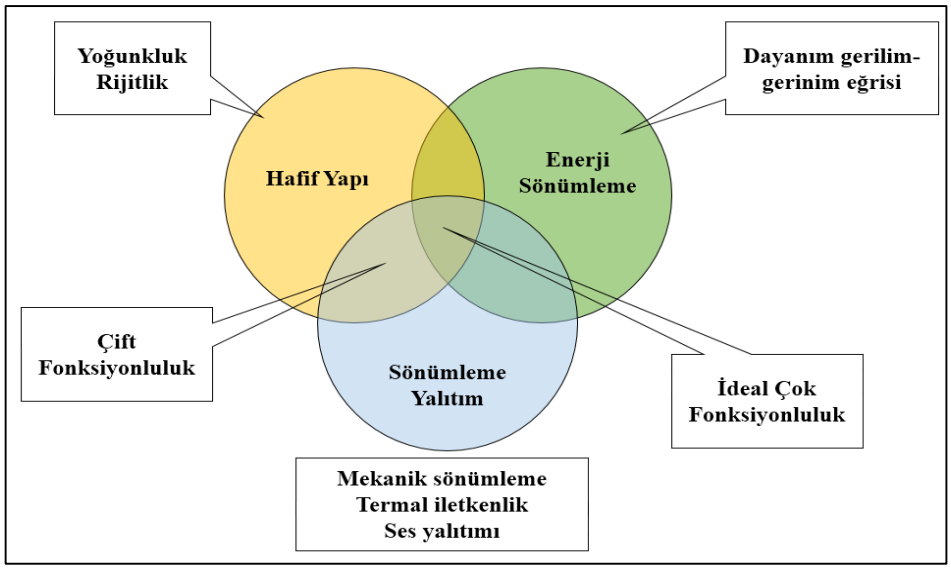
Kapalı hücre alüminyum köpükler;

- Otomotiv sanayiinde (araç motor kısımları ve sandviç panellerde),
- Uçak-uzay endüstrisinde (helikopter kuyruklarında, uzay araçlarını iniş takımlarında),
- İnşaat sektöründe (bina cephelerinde, viyadük altı ses emici bariyerlerde, çatı kaplamalarında),
- Denizcilik sektöründe

kullanılmaktadır [Polat, 2010; Yavuz, 2010; Banhart, 2000].

2.5.1.1. Otomotiv Endüstrisi

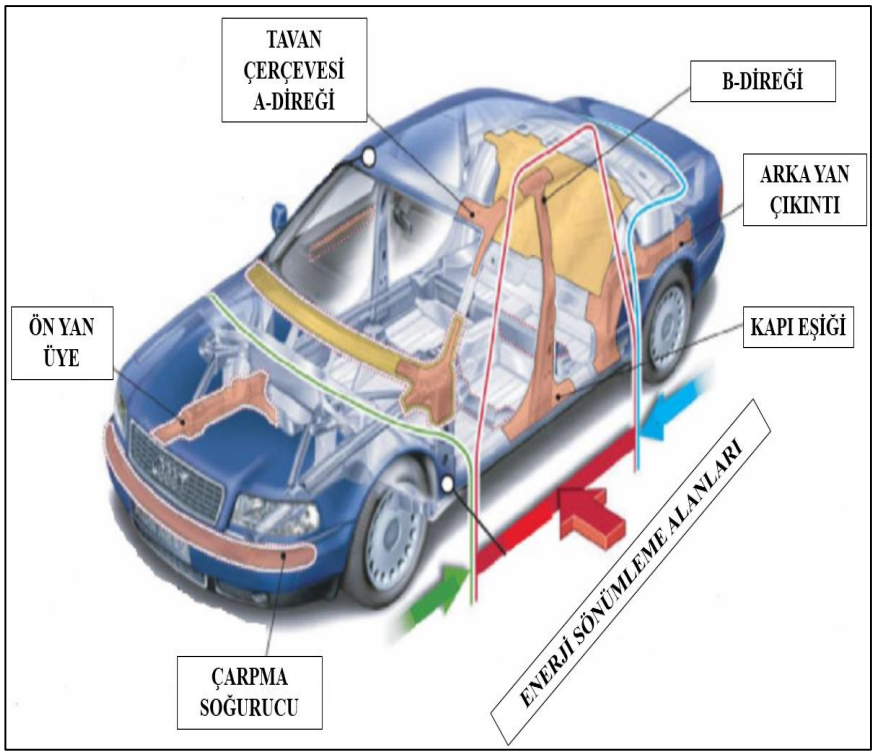
Son dönemde otomotiv endüstrisi kapsamında yolcu güvenliğinin arttırılması ve yakıt tasarrufu sağlanması konularında araştırmacılar daha güvenilir ve daha hafif yapılara yönelmiştir. Bu çerçevede metalik köpükler, diğer malzemeler arasında sahip oldukları hafiflik özelliği ile öne çıkmaktadır [Srivastava ve Sahoo, 2006].



Şekil 2.11: Otomotiv endüstrisinde metal köpük malzeme uygulama alanları.

Otomotiv endüstrisinde alüminyum, titanyum, magnezyum gibi hafif yapıdaki metaller, yakıt tasarrufunda gerekli olan hafif malzeme özelliği sayesinde kullanım alanı olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Güvenlikten ve konfordan ödün verilmeden, az yakıt tüketimi olan ve büyük otomobiller için hafif, ancak yüksek mukavemetli malzemelerin geliştirilmesi, otomotiv endüstrisinde otomobil üreten firmalar için önemli bir sorun alanı olmuştur [Güven, 2011].

Taşıtlarda sağlamlığın artırılması ve ağırlığın azaltılması istenmektedir. Bu yüzden düşük yoğunluk ve düşük yüklerde görece yüksek deformasyon enerjisini emme özelliğine sahip kapalı hücre alüminyum köpüklerine ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Enerji absorbe özelliğinin, tren ve otomobillerde çarpışma ihtimalinin yüksek olduğu bölgelerde maksimum çarpma enerjisinin dağıtılarak deformasyonun kontrol edilmesini mümkün hale getirdiği Şekil 2.12'de de görülmektedir [Degischer vd., 2002]. Bu uygulamada olabildiğince çarpışma esnasında kenar ve ön bölgelerin koruması amaçlanmaktadır. Bu çerçevede uygulama alanları olarak; otomobillerin çarpışması esnasında oluşacak darbe enerjisini emme kabiliyeti olan yapılarda tampon, kapı vb. alanlarda dolgu malzemesi olarak kullanılması söz konusu olabilmektedir [Güven, 2011].



Şekil 2.12: Köpük malzemelerin Audi A8 karoseri üzerindeki uygulama yerleri.

2.5.1.1.1. Hafif Yapılar

Arabaların ağırlıklarının azaltılması çalışmalarında, hafif ancak sağlam olan alüminyum sandviç yapıların, çok katkısı olmaktadır. Üç boyutlu sandviç panellerin, arabalarda bulunan orijinal çelik panellere göre yaklaşık 8 kat daha sağlam oldukları, ağırlıklarının ise %25 oranda daha az oldukları görülmektedir [Yu vd., 1998].

2.5.1.1.2. Darbe Enerjisi Sönümleme

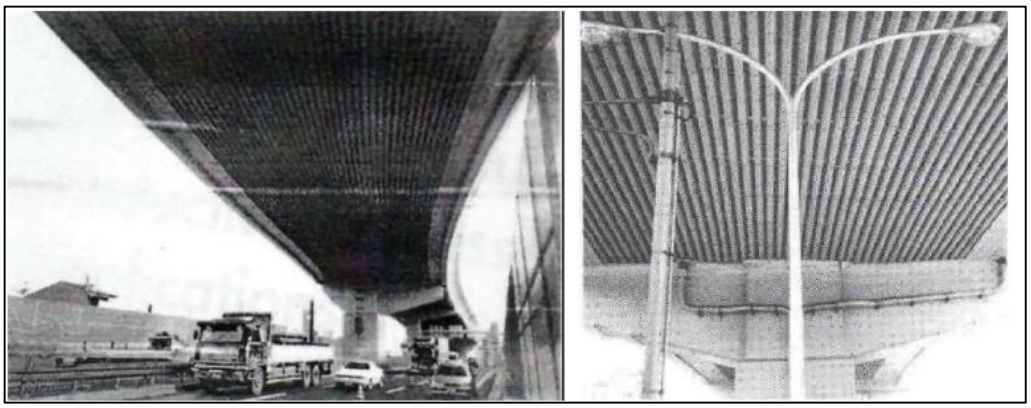
Otomotiv endüstrisinde metalik köpükler, hafif ağırlığa sahip yapıları sayesinde çarpma esnasında enerji sönümleme ve ses/ısı yalıtımı maksadıyla kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde metalik köpüklere yönelik yapısal uygulama alanları Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Bu üç özelliğe aynı anda sahip olan bu yapı kullanımı ideal olan yapıdır [Banhart, 2001].

Metalik köpük malzemesi otomobil endüstrisi içerisinde, araçların gövdesinde meydana gelebilecek çarpma darbelerinde oluşan kinetik enerjinin sönümlenmesi ile yolcuların yaralanma riskinin en aza indirgenmesi maksadıyla düşünülmüştür. Bunun sonucunda yapılan çarpışma kutuları, ön korkuluk ile darbe tamponu arasında

bulunmaktadır. Bu kutular 20 km/s'den daha düşük hızla olan çarpışmalarda tüm enerjiyi sönümlemekte ve deforme olmaktadırlar. Bu şekilde arabanın şasesinde oluşabilecek daha pahalı hasarları önlemektedirler [Banhart, 2003].

2.5.1.2. Gürültü Kontrolü

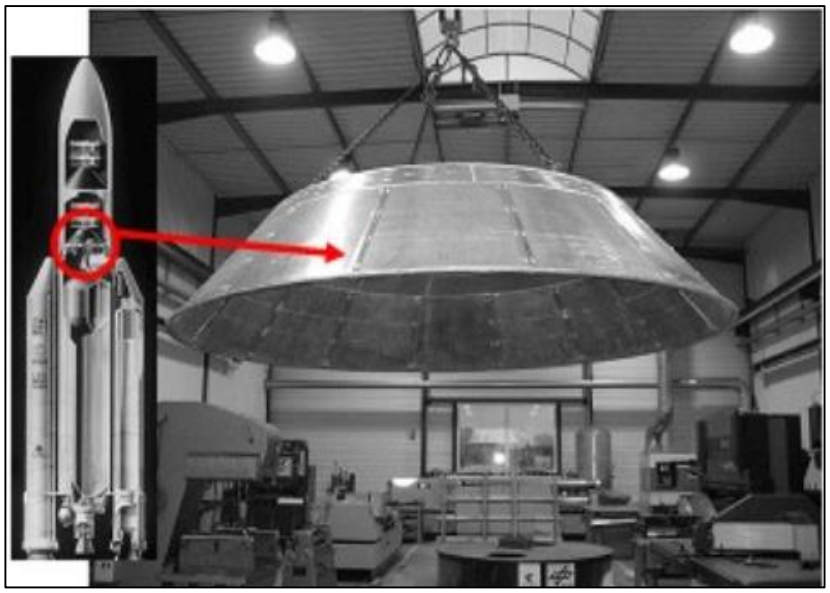
Ses yalıtımı ve emilimi otomotiv endüstrisinde çok önemli bir konudur. Alüminyum metal köpüklerin ses yalıtımlarının çok iyi olmasından dolayı otomotiv sektöründe kullanılmaktadırlar. Örneğin viyadüklerin altına levha şeklinde konan "ALPORAS köpük metal yapısı" viyadüklerin altlarından geçen araçların oluşturduğu sesleri emerek gürültü kirliliğinin ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır. Söz konusu levha yapısı Şekil 2.13'de gösterilmektedir [Yavuz, 2010].



Şekil 2.13: Viyadük altında ses emen levha yapı.

2.5.1.3. Havacılık ve Uzay Sanayi

Hafif yapı elemanları olan metal köpükler uzay sektöründe de kullanılmaktadır. Uzay uygulamaları içerisinde kullanılmakta olan alüminyum levhalar, metal köpük paneller ile değiştirilerek maliyeti azaltmakla birlikte daha yüksek performansa da imkân tanımaktadır. Mekanik özelliklerinin değiştirilmesine gerek duyulmadan bozulma ve darbeye karşı dayanıklı olan kompozit yapıların elde edilebilmesi durumu köpüklere ait en önemli özellik olarak gösterilebilir. Uzay teknolojisinde, yük taşıyan uyduların yükü takviye edebilmesi ve uzay araçlarına ait iniş takımlarında çarpma tesirinin azaltılması maksadıyla alüminyum köpük kullanılmaktadır [Banhart, 2000, Banhart ve Seeliger, 2008].



Şekil 2.14: Sandviç köpük panelden (AFS) yapılmış Ariane5 roket konisi.

2.5.1.4. Gemi Endüstrisi

Alüminyum köpüğün denizcilik sektöründe kullanımı kapsamında, sağladığı en önemli avantaj, korozyon direnci ve düşük yoğunluk sebebiyle hafif olmasıdır. Seri üretim şekli yerine özel üretim şeklinde faaliyet gösteren Denizcilik sektöründe alüminyum köpük, müşterinin arzu ettiği bütün spesifikasyonlar için şekillendirilebilen bir malzeme olarak öne çıkmaktadır [Polat vd., 2010, Banhart vd., 1999].

2.5.1.5. Demiryolu Endüstrisi

Otomotiv endüstrisindeki 3 ana uygulama alanında geçerli kuralların demiryolu metal köpük uygulamalarında da geçerli olduğu görülmektedir. Kentsel alanlardaki hafif demiryolu araçları için enerji absorbe hususu önemlidir. Japon trenlerinin çarpışma esnasında enerjinin absorbesini iyileştirmek üzere 2,3 metreküplük "Alporas" köpük bloklarıyla donatıldığı bilinmektedir. Köpürtülmüş düşük ağırlığa sahip elemanların demiryolu taşıtlarına sağladıkları avantajlar arabalardaki ile aynıdır. Esas fark demiryolundaki vagonlarda daha büyük boyuta sahip yapılar kullanılmaktadır [Banhart, 2001].

2.5.1.6. Yapı Endüstrisi

Bina endüstrisinde çok geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmaktadırlar. Balkon tırabzanları vb. gibi birçok destek elemanının alüminyum köpükten yapıldığı görülmektedir. Günümüzde kullanılmakta olan birçok materyal yeterince ağır olmakla birlikte yangına karşı da dayanıksızdır. Alüminyum köpük kullanımıyla çoğu problem çözülebilmektedir. Köpük paneller veya alüminyum köpük kullanımıyla asansörlerde enerji sarfiyatı azaltılabilmektedir. Yüksek hıza sahip modern asansörlerde yavaşlama ve ivmelenme için hafif yapıda olmaları önem arz etmektedir. Katılık ve enerji sönümleme özellikleri sebebiyle alüminyum köpükler tercih edilmektedirler. Alüminyumda ergime noktasının aşırı düşük olmasına rağmen alüminyum köpükler ateşe karşı oldukça kararlıdırlar [Giamei, 1997].

Hafifliğin ve ivmelenmenin çok önem arz ettiği asansörlerde alüminyum köpük ile köpük paneller kullanılabilmektedir. Bunula birlikte, yangın çıkışları ve yangın duvarlarında yangın direncine ve zayıf ısıl iletkenliğine sahip alüminyum köpük malzemeler tercih edilmektedir [Banhart, 2001].

İnşaatlarda beton kolonla duvarların arasında sıkıştırılması, metal köpüklere ait diğer bir uygulama alanıdır. Beton ile duvar arasındaki boşluğun doldurulmasında köpük malzeme boşluğun içerisine yerleştirilmekte ve bölgesel olarak ısıtılmaktadır. Isıtma boyunca köpük malzeme genişlemekte ve duvar ile beton kolon arası dolmaktadır [Çinici, 2004].

2.5.1.7. Spor Malzemeleri

Yüksek maliyetlerine karşın spor malzemeleri bu sektörde uygulama alanı olmuşlardır. Spor malzemelerinde örnek olarak futbolcuların kaval kemiğini koruyan “tekmelik” yapımı verilebilir. Alüminyum köpüğün iyi enerji emilimi bu alanda önemli özelliklerindendir [Yavuz, 2010].

2.5.1.8. Biyomedikal Uygulamalar

Geleneksel biyomalzeme implantlarının, uygun olmayan mekanik özellikleri, yüksek yoğunluğa sahip olmaları, kemik dokusu büyümesine imkan sağlamamaları ve ömürlerinin kısa olması gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmemektedirler. Bu

sorunları çözebilecek TiZr alaşımları vb. malzemelerin ayrıca doku büyümesine imkan verebilmeleri için boşluklu yapılarda üretilmesi gerekmektedir [Wen vd., 2006]. Bu kapsamda günümüzde metal köpükler, biyomedikal uygulamalarda kullanımı açısından araştırılmaktadır.

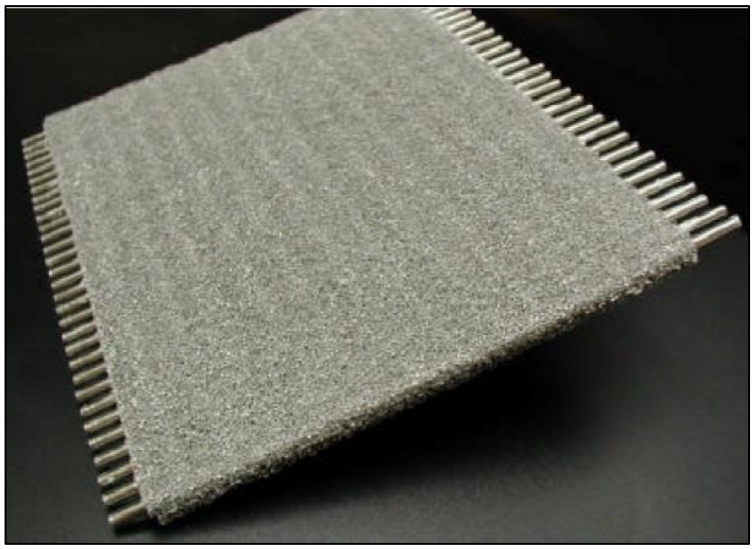
2.5.1.9. Makine Yapımı

Metalik köpükler makina yapımında bazı ilginç uygulamalara sahiptir. Halen geleneksel metaller ile yapılan rulolar, akslar ve platform malzemeleri, gelişmiş sönümleme yeteneği ve azaltılmış ataleti olan yoğun köpürtülmüş parçalar ile ya da içerisi köpük dolu sütunlarla değiştirilebilmektedirler. Bu tarz bileşenlerin sabit sondaj, baskı makinaları ve freze makinalarında da kullanımı mevcuttur. Öğütmeyi ya da delmeyi sağlayan küçük el aletlerinde gövde kısımları bu malzemelerden yapılmaktadır. Ayrıca alüminyum köpük teleskop aynalarının desteklenmesinde de kullanılmaktadır [Banhart, 2001].

2.5.2. Metal Köpüklerin Fonksiyonel Uygulamaları

2.5.2.1. Isı Eşanjörleri (Isı Değiştiriciler)

Yüksek ısıl (termal) iletkenliğe sahip olmak, ısı eşanjörlerinden beklenen en önemli özelliktir. Açık hücre alüminyum köpüklerde, yüzey alanının geniş olması sebebiyle termal iletkenlik yeterince yüksektir ve bundan dolayı ısı eşanjörü maksatlı kullanılmaktadır. Bu çerçevede söz konusu malzemeler; hava soğutmalı yoğuşturucularda (condenser), endüstriyel fırınlarda, bilgisayar çipleri ile elektronik parçalarda kullanılmaktadır [Polat, 2010, Yavuz, 2010]. Isı eşanjörü olarak metal köpük Şekil 2.15’te gösterilmekte olup, resimde metal köpük matrisi içerisine gömülen tüplerden oluşturulmuş gelişmiş yüksek sıcaklık radyatörü yer almaktadır [Yavuz, 2010].



Şekil 2.15: Metal köpük ısı eşanjörü (ısı değiştirici).

2.5.2.2. Filtreler

Filtreler; sıvı içinde dağılmış fiber veya katı parçacıkların birbirlerinden ayrılması ya da gaz içinde dağılmış sıvı veya katı parçacıkların ayrılması maksadıyla kullanılmaktadırlar. Açık hücre alüminyum köpükler; korozyon direnci, yüksek sıvı ve gaz geçirgenliği vb. gibi özellikleri nedeniyle ayırıcı ve filtre olarak kullanılabilmektedir [Degischer ve Krizszt, 2002].

2.5.2.3. Su Arıtıcılar

Suda çözülmüş istenmeyen iyonların yoğunluklarını azaltmak maksadıyla metal köpük malzemeler kullanılabilmektedir [Banhart, 2001].

2.5.2.4. Susturucular

Metal köpüklerden yapılan uygun susturucular, kompresör ve pnömatik aletlerin egzoz gürültülerini ve mekanik titreşimlerini azaltmak maksadıyla kullanılabilmektedir [Banhart, 2000].

Şekil 2.16: Alüminyum köpük imali susturucu örnekleri.

2.5.2.5. Katalizör Destekleri

Katalizin verimliliğinin; kataliz ile gazın veya sıvının reaksiyona girdiği ara yüzey genişliklerine bağlı olduğu bilinmektedir. Açık hücre köpüklerde mevcut süneklik ve ara yüzey genişliğine bağlı termal iletkenliği, katalizör olarak kullanılmalarını sağlamaktadır (Örnek: Egzoz dumanından azot oksitin uzaklaştırılması) [Degischer ve Krizszt, 2002].

2.5.2.6. Alev Tutucular

Yüksek termal iletkenliğe sahip olmaları nedeniyle açık hücre köpükler, alev önleyici biçiminde de kullanılmaktadırlar. ERG firmasınca üretilen alev tutucu örneği Şekil 2.17'te görülmektedir [Degischer ve Krizszt, 2002].

Şekil 2.17: Alüminyum köpükten üretilmiş bir alev tutucu.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yürütülen deneysel çalışmalar 4 ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, poliüretan malzemeden yapılmış açık gözenekli preform modelin istenilen boyutta kesilip fanus alt lastiği üzerine yolluk besleyiciler yardımıyla dizilmesidir. İkinci bölüm, dizimi yapılan preform modelin delikli fanus içerisinde alçıya alınması işlemidir. Üçüncü bölüm, alçının, kademeli alçı pişirme fırınında iyice pişirilmesi ve preform modelin uçurulmasıdır. Son bölümde, istenilen sıcaklığa ulaşan fanusu vakum döküm haznesine alarak ergimiş metalin vakum yardımıyla dökülmesidir.

3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Deneylerin Yürütülmesi

Döküm yöntemiyle açık gözenekli metal köpük üretiminde A356 Al alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan Al alaşımının kimyasal kompozisyonunu belirlemek için TÜBİTAK MAM ME'de bulunan Shimadzu XRD-6000 marka cihaz ile CuKα radyasyonunda 40 kV ve 40 mA'da 10-120° arasında, dakikada 2° hız ile XRD analizi yapılmıştır (Tablo 3.1). Analizi sonucunda alaşım içerisinde alüminyum ve silisyum fazları dışında başka bir fazın olmadığı gözlemlenmiştir.

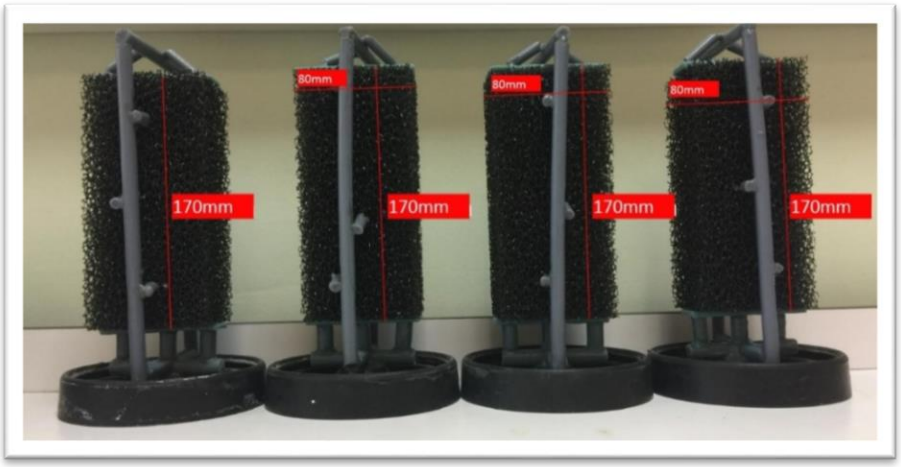
Tablo 3.1: A356 alüminyum alaşım kimyasal kompozisyonu.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
%7,25	%0,10	%0,0006	%0,0009	%0,34	%0,0056	%0,1059

Döküm yöntemiyle düzenli ve açık gözenekli yapıda metal köpük üretiminde Şekil 3.1'deki iş akış şeması izlenmiştir.

Şekil 3.1: Döküm yöntemiyle açık gözenekli metal köpük üretimi iş akış şeması.

Yurt dışında Sydney Heath firmasından 250*200*60 mm ebatlarında 10 PPI gözenek boyutunda preform modeller satın alınarak 170*80*60 mm ebatlarında kesilmiştir. Kesilen preform modeller dereceli hassas dökümde kullanılan fanus alt lastiği üzerine koçan kalıplarında hassas döküm mumundan basılan mum koçanlardan havya yardımıyla preform ve mumlar birleştirilerek dizimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: 10 ppı gözenek boyutuna sahip preform modellerin dizimi.

Dizimi yapılan preform modeller, 304L paslanmaz çelikten imal edilmiş 260 mm boyunda 120 mm çapında ebatlara sahip delikli fanusa (Şekil 3.3) yerleştirilmiştir.

Fanusun etrafı alçıya alma sırasında alçının deliklerden dışarı çıkmaması için etrafı bant ile sarılmıştır (Şekil 3.3).

Şekil 3.3: Delikli fanus (üst), dış tarafı bant ile sarılmış delikli fanus (alt).

Kalıp görevi görmesi için üretici firma tarafından önerilen sıcak su/alçı (38/100 g) oranı dikkate alınarak hazırlanan hassas döküm alçısı karıştırıcı yardımıyla vibrasyon ünitesi üzerinde karıştırılmıştır. Vibrasyon çalışır durumda iken alçı içerisinde hava kabarcığı kalmayana kadar yaklaşık 1,5-2 dk vakum ünitesinde vibrasyon ve vakum işlemi yapılmıştır (Şekil 3.4).

Şekil 3.4: Vibrasyonlu ve vakumlu alçıya alma ünitesi.

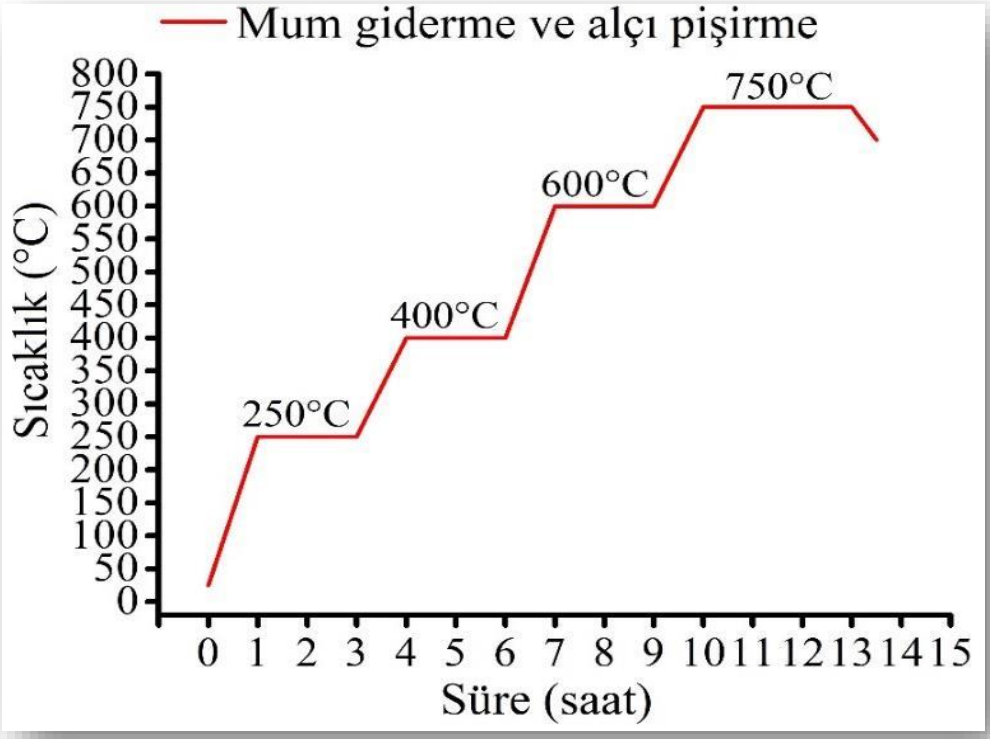
Vibrasyon ve vakum ünitesi içerisinde yaklaşık 1 saat alçının katılaşması beklenmiştir. İyice katılaşan alçının etrafındaki bant sökülüp fanus alt lastiği çıkarılmıştır. Katılaşan alçının pişirilmesi ve prefom modelin yapıdan uzaklaştırılması için kademeli alçı pişirme diyagramına (Şekil 3.7) göre alçı pişirme fırınında (Şekil 3.5) yaklaşık 17 saat süreyle pişirilmiştir.

Şekil 3.5: Kademeli alçı pişirme fırını

Bu süre içerisinde mum giderme ve preform uçurma işlemi de yapılmıştır. Elektrikli ergitme ocağında alüminyum A356 alaşımı ergitilmiştir. Alçı piştikten sonra sıcak iken fırın içerisinden alınıp döküm ağzı yukarıda kalacak şekilde vakum döküm haznesine (Şekil 3.6) yerleştirilmiştir. Hazne içerisinde bulunan piston yardımıyla sıcak fanus aşağı indirilip hazne içerisine hava almayacak şekilde yerleştirilmiştir. Vakum döküm haznesine bağlı bulunan 63 m^3/saat güce sahip vakum pompası çalıştırılarak -1 bar vakumlu ortama yaklaşık 700-710°C'de ergimiş haldeki sıvı alüminyum dökümü gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.6: Vakum Döküm Haznesi

Döküm işleminden sonra fanus içerisindeki alüminyumun katılaşması için vakum döküm haznesi içerisinde 1 saat bırakılmıştır. Daha sonra hazne içerisinden çıkarılan fanus o da sıcaklığında 3 saat kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan fanusun içerisindeki alçı basınçlı su yardımıyla temizlenmiştir. İç kısımlarda kalan alçılar iyice temizlendikten sonra yolluk ve besleyiciler Gebze Hasköy Sanayi Sitesi' nde bulunan MASK Tel Erezyon firmasında tel erozyon yardımıyla kesilmiştir.



Şekil 3.7: Kademeli alçı pişirme ve süngeri uzaklaştırma diyagramı.

3.2. Açık Hücreli Alüminyum Köpüklerin Karakterizasyon Testleri

Hassas döküm yöntemiyle üretimi yapılan açık hücreli alüminyum köpük yapılarının makro-mikro yapı incelemeleri ile mikro sertlik ve basma testleri yapılmıştır.

3.2.1. Makro Boyutta İncelemeler

Açık hücreli alüminyum köpüklerin makro boyutta yapı incelemesi ZEISS Stemi 2000-C marka stereo mikroskopta yapılmıştır.

3.2.2. Mikro Boyutta İncelemeler

Açık hücreli alüminyum köpüklerin mikro boyutta incelemeleri Jeol JSM-6510LV marka SEM cihazında ve Nikon Eclipse L150 marka optik mikroskopta

yapılmıştır. Mikroskopta inceleme yapmak için numuneler soğuk bakalite alınmıştır. Numuneler sırası ile 120, 240, 400, 800, 1200 ve 2500 grit zımpara ile zımparalanmıştır. Zımparalama sonrası numuneler 3 µm'lik 64 çuha kullanılarak elmas sıvı ve yağlayıcı ile parlatma işlemine tabi tutularak %0,5 HF içeren su çözeltisi ile 45 saniye boyunca dağlanmıştır. SEM incelemeleri öncesinde iletkenliğin artırılması için numunelerin yüzeyleri POLARON SPUTTER COOTER marka cihaz kullanılarak platin kaplanmıştır.

3.2.3. Sertlik Testi

Açık hücreli alüminyum köpüklerin mekanik özelliklerini incelemek için ISO 6507 standardına göre mikro sertlik testleri yapılmıştır. Nnumuneler bakalite alınarak, 200, 400, 800, 1200, 2500 gritlik zımparalar ile su altında zımparalanmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemine tabii tutularak 3 µm'lik çuha yardımıyla elmas sıvı ve yağlayıcı ile parlatma işlemi yapılmış ve %0,5 HF içeren su çözeltisi ile 45 saniye boyunca dağlanmıştır. Qness Q10 A+ marka mikro sertlik ölçüm cihazıyla ölçülen parçalara, 10-15 s aralığı boyunca ve 100 gf yük uygulanarak elmas Vickers ucu yardımıyla ölçüm yapılmıştır.

3.2.4. Basma Testi

Döküm yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen açık hücreli alüminyum köpüklerin sahip oldukları basma dayanımlarının belirlenmesi ve MAYSER (eski adı M-Pore) firması tarafından üretilen metal köpükler (m.pore 10 ürünü) ile karşılaştırılması amacıyla, 250 kN kapasiteli Zwick/Roell Z250 cihazında basma testleri yapılmıştır. Yapılan testler ISO 13314 (Metallerin Mekanik Testleri – Gözenekli ve Hücresel Metallerin Süneklik ve Basma Testi) standardına göre yapılmıştır.

3.3. Açık Hücreli Alüminyum Köpüğün Isı Eşanjörüne Uygulanması

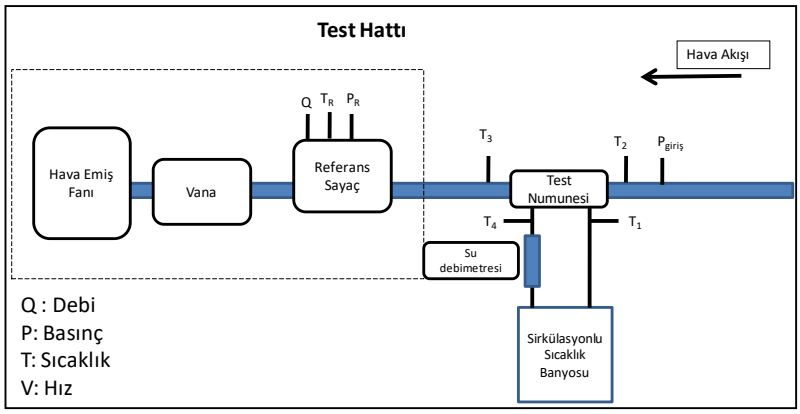
Ev tipi kombilerde kullanılan eşanjörlerin ısıl verimini artırmaya yönelik mevcut eşanjörlerin kanatçıklı yapısı yerine daha fazla ısı transfer yüzey alanına sahip açık hücreli alüminyum köpük uygulaması yapılmıştır. Eşanjörde bulunan bakır kanatçıklar

kaldırılıp onun yerine bakır boru üzerine yekpare açık hücreli alüminyum köpük döküm işlemi yapılmıştır. 10 PPI gözenek boyutundaki poliüretan malzemeden imal edilen preform model, bakır boru çapına uygun ve ev tipi kombilerde kullanılan eşanjör boyutunda kesilerek bakır boru üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 3.1' deki iş akış şeması uygulanarak üretim gerçekleşmiştir. Üretimi gerçekleştirilen bakır borulu yekpare açık hücreli alüminyum köpüklü eşanjör, TÜBİTAK UME'de bulunan Rüzgar Tüneli Test Düzeneği'nde testleri gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Isı Eşanjörü Debi-Hız-Sıcaklık-Basınç Test Düzeneği

10 PPI gözenek boyutundaki poliüretan malzemeden imal edilen preform model, bakır boru çapına uygun ve ev tipi kombilerde kullanılan eşanjör boyutunda kesilerek bakır boru üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 3.1' deki iş akış şeması uygulanarak üretim gerçekleşmiştir. Üretimi gerçekleştirilen bakır borulu yekpare açık hücreli alüminyum köpüklü eşanjör, TÜBİTAK UME' de bulunan Rüzgar Tüneli Test Düzeneği' nde testleri gerçekleştirilmiştir. Isı eşanjörünün ısıl performasını ölçmeye yönelik kullanılan Rüzgar Tüneli Test sistemi sıcak su dolaşım tarafında daha doğru sonuçlar alabilmek için ölçüm sensörlerinde bazı ilave değişiklikler yapılmıştır.

- Hava hızı: 0,5-10 m/s Belirsizlik < %1
- Test Hattı Numune Öncesi Uzunluk > 1 m
- Test Hattı Numune öncesi uzunluk > 1 m
- Test bölümü kesiti: 214 mm X 184 mm
- Çalışma Basıncı: Atmosferik basınç
- Çalışma Sıcaklığı: 60°C
- Sıcaklık Okuması: Numune Girişinde 1 adet PT 100 - Çıkışında 1 adet PT 100
  Belirsizlik < 0,02°C
  Numune üzerinde 7 adet Termokupl Belirsizlik < 0,05°C
- Basınç okuması**:** Giriş basıncı: 800-1000 mbar Belirsizlik < 0,1 mbar
- Debi Ölçüm Sistemi**:** Frekans kontrollü fan: 0-50 Hz Debi: 10-6500 m^3/h
  Debi ölçüm belirsizliği < %0,5



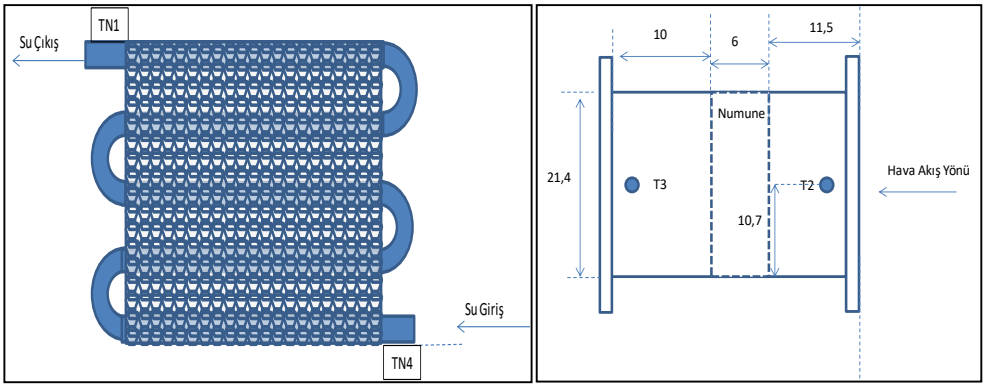
Şekil 3.8: Isı Eşanjörü Test Düzeneği Şeması.

Öncelikle ölçüm aralığı daha hassas olan bir dijital su debi ölçer (rotametre) alınarak eskisiyle değiştirilmiştir. Su giriş ve çıkış sıcaklıkları da bakır boru yüzeyinden termokupl ile ölçülmek yerine eşanjör su giriş ve çıkışlarına direk olarak bir T bağlantısı yapılarak bakır boru içindeki suyun sıcaklığı PT100 proplarla ölçülmüştür. Revize Test Düzeneği Şeması Şekil 3.8'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2: Test düzeneğinde kullanılan ekipmanlar.

Cihaz	Üretici	Model
Referans Sayaç	Vemm Tec	G1000
Basınç Ölçer	Keller	PAA-33X/80794
Referans Sıcaklık Ölçer	Fluke	1504
Data Logger-4 Adet PT100	Pico	PT-104
Atmosfer Şartları Ölçer	Testo	400
Su Debimetresi	S-meter	DI-flow

Isı eşanjörü ısıl performans ölçüm test düzeneğinde kullanılan ekipmanlar Tablo 3.2' de gösterilmektedir.



Şekil 3.9: Sıcaklık ve basınç ölçüm noktaları.

3.3.2. Numune Test Kademeleri

- Verilen numune UME tarafından hazırlanan test haznesine yerleştirilmiştir.
- Numune ölçüm haznesi bağlantısında hava sızdırmazlığı için gerekli önlemler alınmıştır.
- Sirkülasyonlu su banyosunun numune ile olan giriş-çıkış hortum bağlantıları yapılmıştır.
- Numune önüne ve arkasına 2 adet PT100 hatta yerleştirilmiştir.
- Numune giriş ve çıkışında su sıcaklığı ölçümü için hatta 2 adet PT100 yerleştirilmiştir.
- Numune önünde hava giriş basıncı bağlantısı yapılmıştır.
- Referans sayaç, Flow Computer okuma ünitesi ve frekans kontrolcüsü hazırlanmıştır.
- Sirkülasyonlu su banyosu sıcaklığı 60°C'ye set edilmiştir.
- Su debisi kaydedilmiştir.
- Set değerine ulaştıktan sonra stabil hale gelmesi için 10 dakika beklenilmiştir.
- Hava akışı verilmeden önce sıcaklık ve basınç ölçerler için ilk okuma değerleri kaydedilmiştir.
- Sıcaklık okumaları örnekleme zamanı 1'er saniye aralıklar ile 100 veri alınması şeklinde ayarlanmıştır.
- Frekans kontrolcü kullanılarak fandan hava akışı sağlanmıştır.
- 0,5 m/s ile 10 m/s aralığında yaklaşık 1 m/s artırımlarla 11 noktada hız okuması yapılmıştır.
- Her okuma arasında akış stabilitesi için 3 dakika beklenmiştir.
- Testler her bir hız için 3 kez tekrar edilmiştir.
- Excel veri formuna veriler aktarılarak sensör düzeltmeleri yapılmış olarak sonuçlar raporlanmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Ticari bir ürün olarak hassas döküm yöntemiyle dünyada sadece 2 firma (Amerikan ERG Aerospace Corp. ve Alman MAYSER firmaları) tarafından üretildiği bilinen açık gözenekli (hücreli) metal köpükler; TÜBİTAK ARDEB tarafından desteklenen ve TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü tarafından yürütülen 215M232- "Düzenli Ve Açık Gözenekli Geometride Metal Köpüklü Akış Kanalına Sahip Yüksek Performanslı Kompakt Isı Eşanjörü Tasarımı ve Geliştirilmesi" projesi kapsamında gerçekleştirilen bu tez çalışmasıyla, Türkiye'de ilk defa mukavemetle birlikte hafiflik gerektiren farklı uygulama alanlarında, enerji sönümleme ve ısı iletim özelliklerine sahip alüminyum A356 alaşımdan 10 PPI gözenek yoğunluğunda açık gözenekli metal köpük malzemelerin, hassas döküm yöntemiyle üretilmesi başarılmıştır.

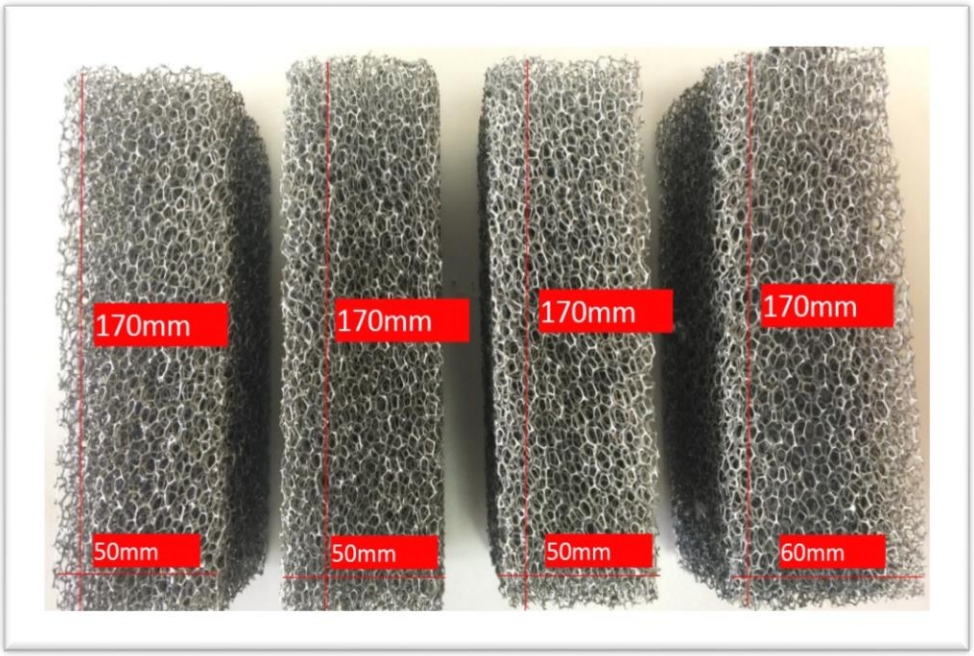
Döküm sıcaklığı, fanus sıcaklığı ve soğuma süresi yapılan deneme dökümleri sonucunda belirlenmiştir.

- Su/Alçı Oranı (g): 38/100
- A356 Al Alaşım Döküm Sıcaklığı: 700-710 $^{\circ}$C
- Fanus Sıcaklığı: 710 $^{\circ}$C
- Soğuma Süresi : 120 dk

Döküm sonrasında fanusun soğuması için belirli bir süre beklendikten sonra alüminyum köpükler fanus içerisinden çıkarılmıştır. İç kısımları alçı dolu olan alüminyum köpükler basınçlı su yardımıyla temizlenmiştir (Şekil 4.1).

Şekil 4.1: Fanus içerisinden çıkarılan iç kısımları alçı dolu alüminyum köpükler.

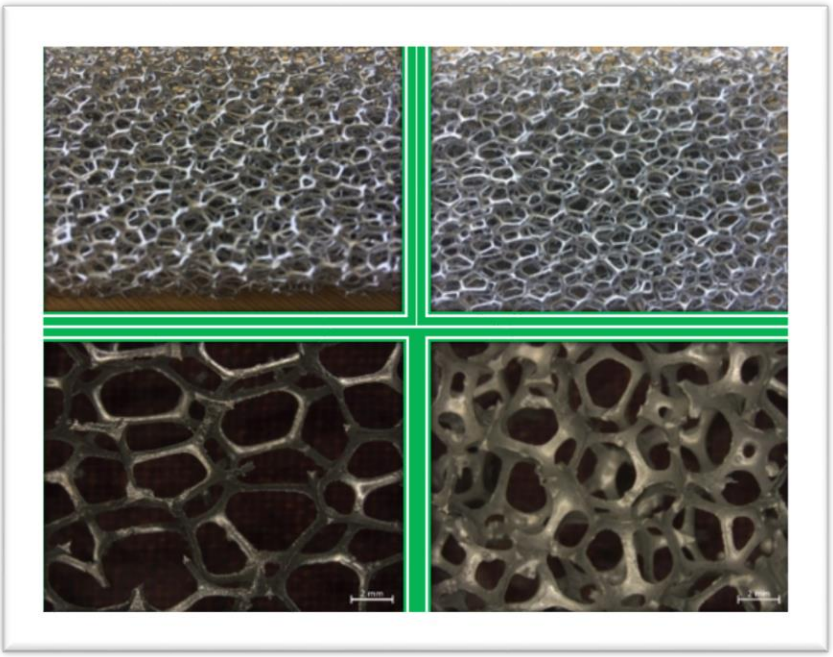
İç kısımları alçıdan tamamen temizlenen açık hücreli alüminyum köpüklerin yolluk-besleyici kısımları tel erozyon yardımıyla kesilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2: Yolluk ve besleyicileri kesilmiş açık gözenekli metal köpük.

4.1. Makro Boyutta İnceleme Sonuçları

Açık hücreli alüminyum köpüklerin stereo mikroskopta incelemesi yapılmış fakat mikroskoptan görüntü alınamamıştır. Bu nedenle üretilen açık hücreli metal köpüğün fotoğrafı çekilerek, açık hücre yapısı Şekil 4.3'te verilmiştir.

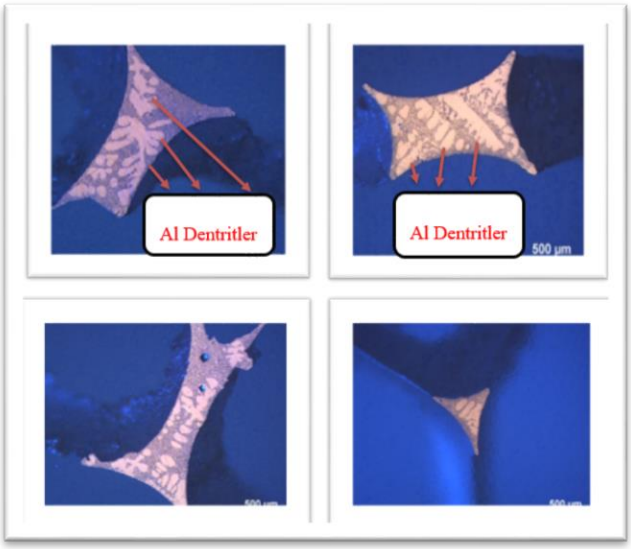


Şekil 4.3: Üretilen 10 PPI gözenek yoğunluğunda A356 alaşımdan köpük yapısı

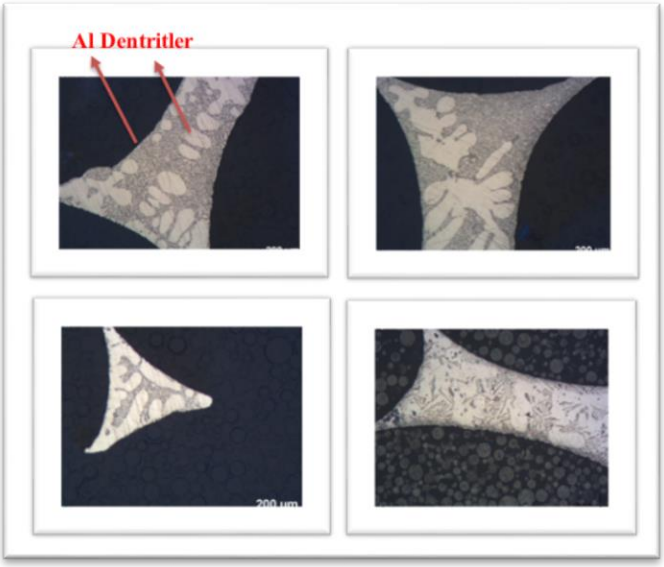
4.2. Mikro Boyutta İnceleme Sonuçları

Alüminyum-Silisyum alaşımlarının %10'dan daha az Si içerenlerin mikro yapısında, primer Al taneleri ve ötektik mikro yapısı görülür. Bu alaşımlar ''hypoeutectic'' olarak bilinir. %10-13 Si içeren alaşımlar ise ötektik alaşımlardır ve mikro yapıda tamamıyla ötektik gözlemlenir. %13 Si içeren alaşımlar ise ötektik üstü (hypereutectic) alaşımlardır ve mikro yapılarında ötektik ve primer Si bulunur.

Optik mikroskoptan alınan görüntülerde A356 (AlSi7Mg0.3) alaşımı kullanılarak yapılan döküm sonucu açık gözenekli alüminyum köpük numunelerin mikro yapılarında beklenildiği gibi alüminyum dentritler görülmüştür (Şekil 4.4 – Şekil 4.5).

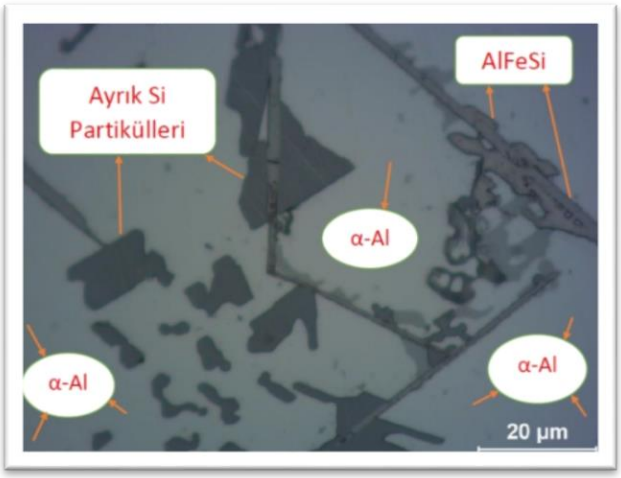


Şekil 4.4: 5X büyütme yapılmış A356 alaşımına ait köpük mikro yapı görüntüsü.



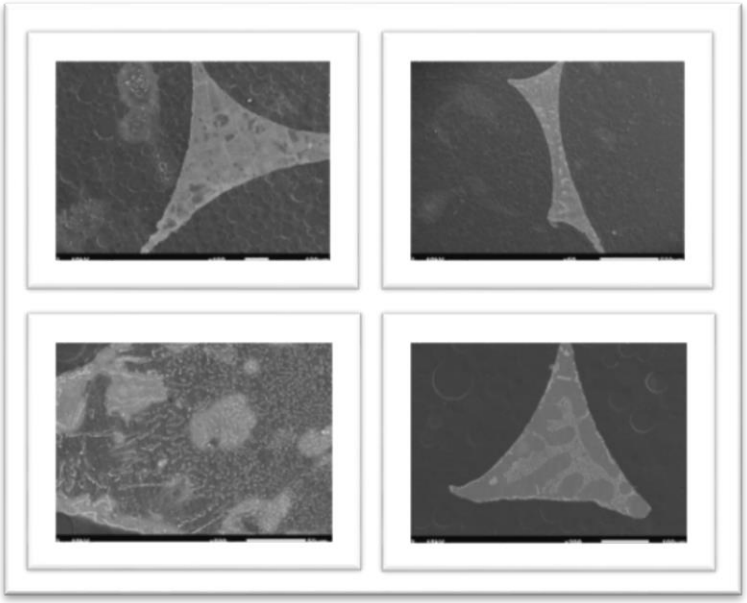
Şekil 4.5: 10X büyütme yapılmış A356 alaşımına ait köpük mikro yapı görüntüsü.

Dökümde kullandığımız alaşımdan dolayı alüminyum matrisi içerisinde oluşan ayrık silisyum fazları görülmüştür. Bazı bölgelerde Al–Si–Fe elementlerinin kendi içerisinde oluşturduğu intermetalikler görülmüştür. (Şekil 4.6)



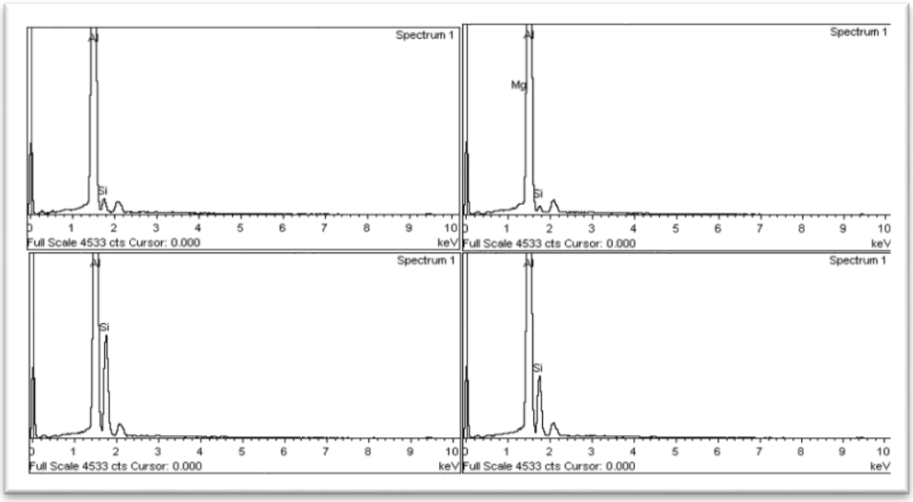
Şekil 4.6: A356 (AlSi7Mg0.3) alaşımına ait mikroyapı görüntüsü.

Hassas döküm (polimer replikasyon) yöntemi kullanılarak üretilen açık hücreli metal köpük numunelerin içyapıları SEM cihazı ile incelenmiştir. Şekil 4.7'de üretimi yapılan açık hücreli metal köpük numunelerine ait farklı büyütmelerde alınmış genel SEM görüntüleri verilmiştir. Numuneler üzerinde SEM cihazı ile yapılan incelemelerde dökümde kullanılan alüminyum A356 alaşımında olması gereken özellikleri yansıttığı görülmüştür.



Şekil 4.7: Açık gözenekli Al köpüklerin SEM görüntüsü.

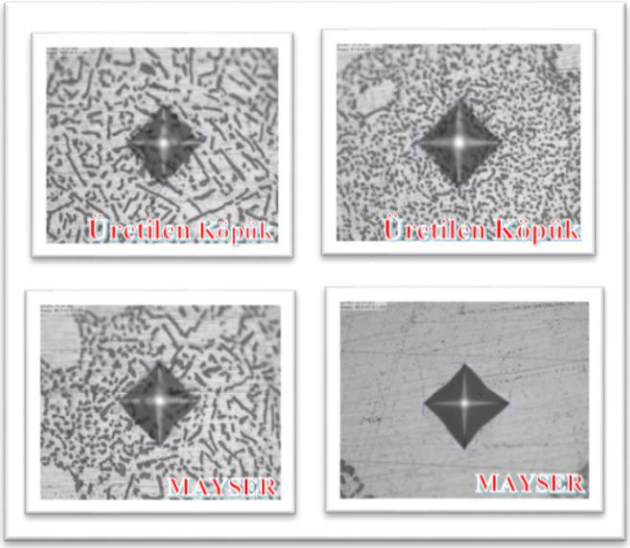
Mikro yapı incelemelerinde, EDS analizi yapılmış ve beklenildiği üzere alüminyum, silisyum ve magnezyum fazlarına rastlanmış olup, herhangi farklı bir faza rastlanmamıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: Açık gözenekli Al köpüklerin EDS analizleri.

4.3. Sertlik Test Sonuçları

Yapılan sertlik testi sonuçlarında Mayser firmasının açık hücreli Al köpüğü ile kendi üretmiş olduğumuz açık hücreli Al köpükler kıyaslandığında kendi ürettiğimiz açık hücreli Al köpüklerin ortalama sertlik değerlerinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak yapı içerisinde bulunan primer Al yapılarının daha fazla ve ince yapıda olduğu anlaşılmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9: Mayser ve üretilen köpüklerini mikro sertlik test görüntüleri.

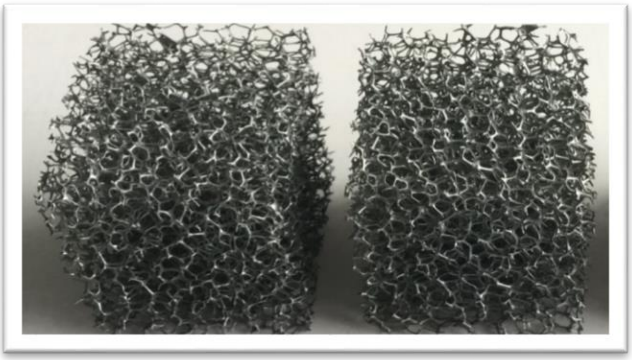
Mayser firmasına ait açık hücreli Al köpük numunelerinin ortalama sertlik değeri 42.8 HV iken kendi ürettiğimiz açık hücreli Al köpük numunelerinin ortalama sertlik değerleri 59.4 HV olarak ölçülmüştür (Tablo 4.1).

Tablo 4.1: Mayser ve üretilen Al köpük sertlik değerleri karşılaştırması.

Numune	Numune Adı	Sertlik Değeri (HV)	Numune	Numune Adı	Sertlik Değeri (HV)
1	Üretilen Köpük	59.2	1	Mayser	42.4
2	Üretilen Köpük	48.4	2	Mayser	40.2
3	Üretilen Köpük	68.2	3	Mayser	40.9
4	Üretilen Köpük	58.4	4	Mayser	47.6
5	Üretilen Köpük	59.7	5	Mayser	42.4
6	Üretilen Köpük	65.0	6	Mayser	41.6
7	Üretilen Köpük	61.9	7	Mayser	45.0
8	Üretilen Köpük	58.6	8	Mayser	44.2
9	Üretilen Köpük	74.3	9	Mayser	42.2
10	Üretilen Köpük	41.7	10	Mayser	41.3
Ort. Sertlik Değeri:		**59.4**			**42.8**

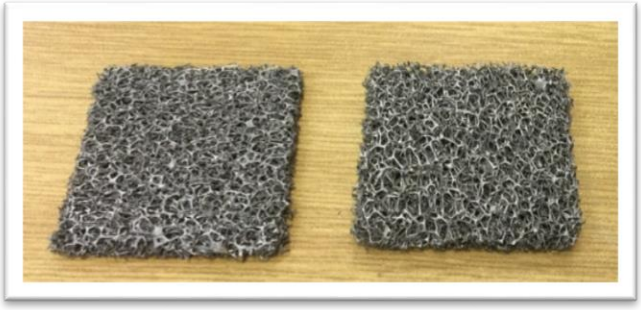
4.4. Basma Testi Sonuçları

Açık gözenekli yapıda Al köpüklerin kullanım alanlarına göre istenilen özelliklere sahip olması ve bu özelliklerin belirlenmesi için üretmiş olduğumuz açık hücreli Al köpüklere basma testi yapılmıştır. Ticari ürün ile kıyaslama yapmak açısından, Mayser firmasından satın almış olduğumuz açık hücreli Al köpüğe basma testi uygulanarak, köpüklerin basma dayanımları kıyaslanmıştır. En/boy/derinlik miktarlarının basma deneyi sonuçlarına olan etkisini görebilmek için öncelikli olarak kübik yapıdan farklı olan boyutlarda basılan numunelerden tutarlı sonuçlar alınamamıştır. Daha sonra ISO 13314 (Metallerin Mekanik Testleri – Gözenekli ve Hücresel Metallerin Süneklik ve Basma Testi) standardına göre tel erozyon ile kübik şekilde numuneler kesilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10: 10 ppı gözenek boyutunda A356 Al köpük basma testi numuneleri.

Hazırlanan bu numunelere 10mm/min test hızında ve 250 kN yük altında basma testi yapılmıştır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11: 10 ppı gözenek boyutuna sahip A356 alaşımlı Al köpük numuneleri.

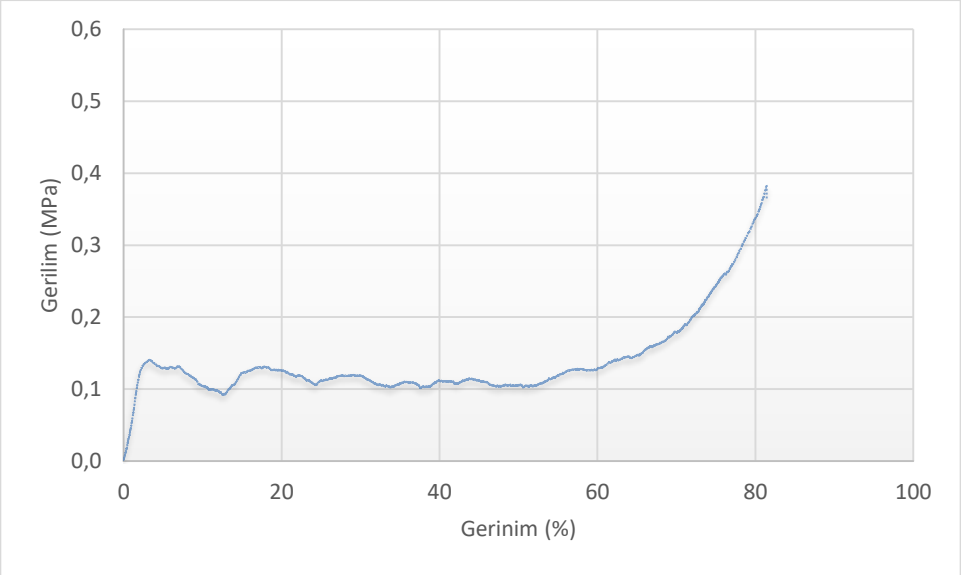
Basma deneyleri sonucunda Mayser firmasının ticari ürün olarak satılan açık gözenekli A356 Al alaşım köpüklerinin basma dayanımı 0.25 MPa, üretilen açık gözenekli Al köpüklerin basma dayanımı da 0.14 MPa olarak ölçülmüştür (Tablo 4.2).

Tablo 4.2: Mayser ve üretilen köpüklerin basma test sonuçlarının karşılaştırılması.

Numune Adı	**A0 mm**	**B0 mm**	**Yükseklik mm**	**σmax MPa**
Mayser Al (A356)	49,45	49,59	51,05	0.25
Üretilen Köpük (A356) – 1	39,96	40,19	40,89	0.14

Gözeneklerin duvarlarında kırılmalar başladığı anda basma dayanımları düşer ve bir sonraki gözenek duvarına gelindiğinde dayanım tekrar artmaktadır. Basma testi sırasında gözenek duvarlarının kademe kademe kapanması elastik deformasyondan sonra uzun bir plato şeklinde artmıştır (Şekil 4.12, Şekil 4.13). Grafikte oluşan plato

eğrisi boyunca gerilme değerlerinde yer yer artmalar ve azalmalar görülmektedir. Bu şekildeki bir eğrinin basma esnasında gözeneklerin açılması ve kapanmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu eğrinin altında kalan alan bize yapının enerji absorblama kapasitesini vermektedir.

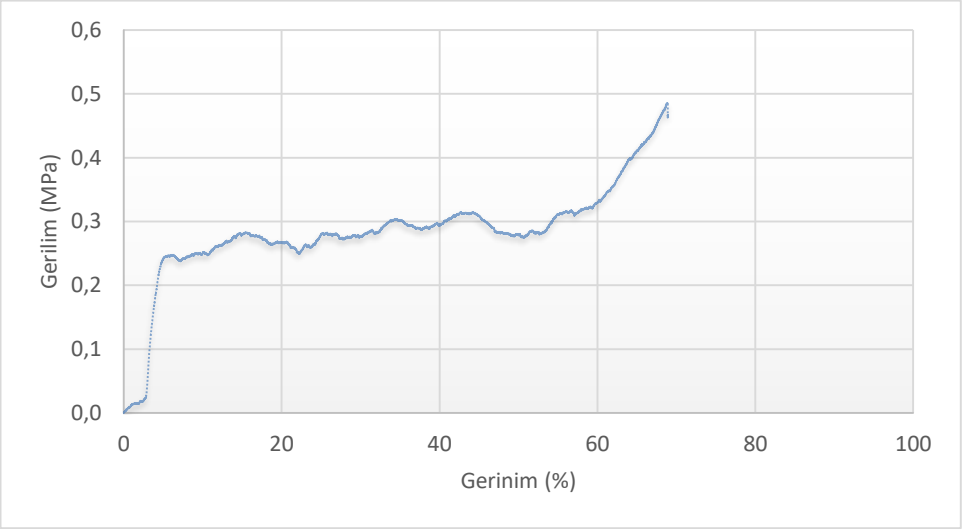


Şekil 4.12: Üretilen, 10 PPI gözenek boyutundaki Al köpüklerin basma test grafiği.

Ülkemizde, açık gözenekli alüminyum köpük üretim çalışmaları üniversiteler bünyesinde yapılmış halen de yapılmaya devam etmektedir. Bu çalışmalardan bazıları şu şekildedilr.

- Polimer emdirme yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada, 6063 alüminyum alaşımından açık hücreli köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem sonucunda elde edilen açık gözenekli alüminyum köpüklerlerin basma dayanım değerleri, döküm yöntemiyle üretmiş olduğumuz açık gözenekli alüminyum köpüklere göre daha düşük olduğu görülmüştür (Yagsi, C. 2018).
- Vakum döküm yöntemi ile açık gözenekli aluminyum köpük üretim parametrelerini incelemek ve üretilen köpüklerin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmada, NaCl taneleri boşluk tutucu malzeme olarak kullanılmış ve sonrasında çözündürme tekniği kullanılarak sıvı aluminyumun içinde gözenek/boşluk oluşumu gerçekleştirilmiştir. Farklı boyutta NaCl taneleri kullanılarak alüminyum köpük özelliklerindeki değişimler belirlenmiştir. Yoğunluk-dayanım ilişkisi değişen NaCl tane boyutuna göre belirlenmiştir. Sonuç

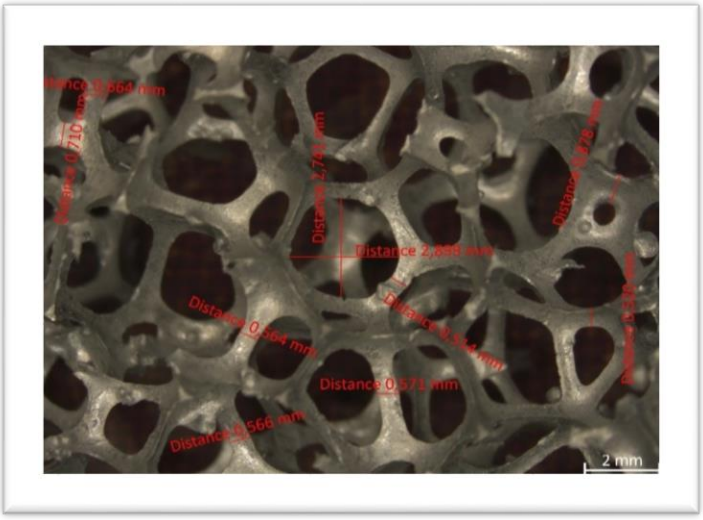
olarak, vakum döküm yöntemini boşluk tutucu ve çözündürme tekniği ile birleştirerek açık gözenekli alüminyum köpükleri üretilmiştir. Çalışma sonunda alüminyum köpüklerin %70,6 boşluk oranına ve homojen hücre yapısına sahip olduğu belirlenmiştir. Boşluk oranının düşük ve hücre yapısının homojen olması alüminyum köpüğün basma dayanımının üretmiş olduğumuz açık gözenekli alüminyum köpüklere göre yüksek olmasının sebebidir (Kalkan, Y. 2012).



Şekil 4.13: Mayser-10 ppı gözenek boyutundaki Al köpüklerin basma test grafiği.

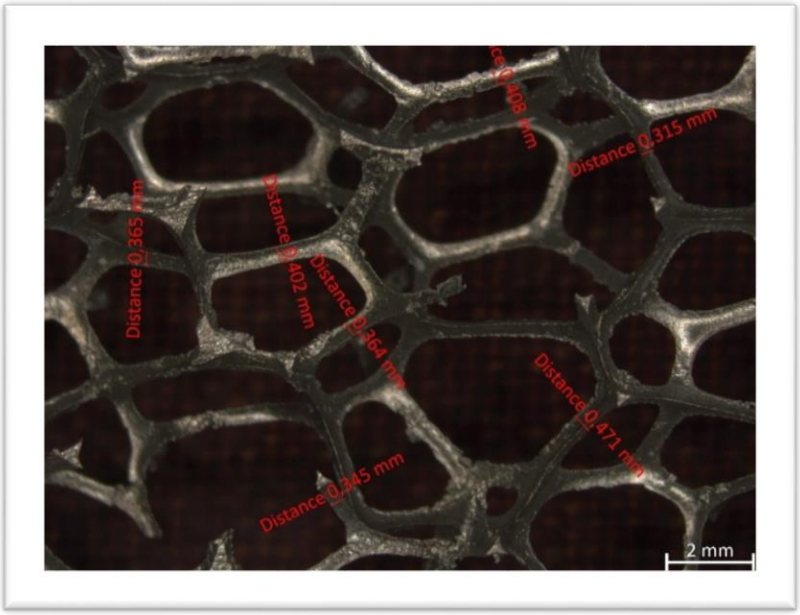
Elastik bölgeden sonra, artan birim şekil değiştirme değerleriyle birlikte uzun bir 'gözeneklerin yıkılması' eğrisi görülmektedir. Grafikte, son bölgede sabit birim şekil değiştirmeye giderken gerilme değerlerinde yukarı doğru bir artışın olduğu 'yoğunlaşma bölgesi' gözlenmektedir. Bu bölgedeki yoğunluğun sebebi, gözeneklerin neredeyse tamamen yıkılmasıyla, uygulanan yükün malzemenin kendisini sıkıştırmaya başlamasıdır.

Mayser firmasının açık hücreli Al köpüklerin ligament kalınlıklarının 0,5 mm ile 0,8 mm arasında değiştiği dolayısıyla göreceli yoğunluğunun (relative density, %6 gibi) daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 4.14).



Şekil 4.14: Mayser alüminyum köpüklerinin ligament kalınlıkları.

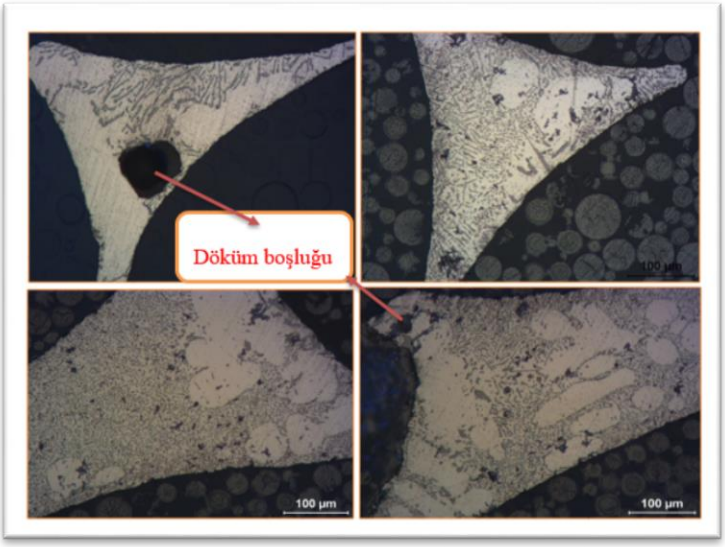
Üretilen alüminyum köpüklerinin ligament kalınlıklarının 0,3 mm ile 0,4 mm arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15: Üretilen alüminyum köpüklerinin ligament kalınlıkları.

Mayser ve üretilen alüminyum köpükleri arasındaki ortalama 0,3 mm ligament kalınlık farkının yapı boyunca tüm ligamentlerde olduğu düşünüldüğünde, bağıl yoğunluğun değiştiği ve üretilen alüminyum köpüklerinin Mayser alüminyum köpüklerine göre basma dayanımının daha düşük olmasının sebeplerinden birisi olduğu düşünülmektedir.

Üretilen alüminyum köpüklerinin Mayser alüminyum köpüklerine göre basma dayanımının düşük olmasının diğer bir sebebi olarak, mikro yapı incelemeleri sonucunda açık hücreli alüminyum köpük numunelerinin bazı bölgelerinde dökümün doğası gereği farklı nedenlerden dolayı oluşan boşluklara rastlanmıştır. Bu tip hassas yapıların üretiminde oluşan hatalar numunelerin mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu boşlukların oluşumunda alüminyumun ergimesi ve dökümü sırasında ortamda bulunan nemden kaynaklı sıvı metal içerisine hidrojen gazının hapsolmasıdır. Sıvı metal içerisinde hapsolan bu hidrojen gazının katılaşma sırasında metal soğurken sıcaklığın azalmasına bağlı olarak çözünürlüğü azalmıştır. Bundan dolayı, metal içerisindeki çözünmüş hidrojen atomlarının çökelmesi ile yapı içerisinde bu gözenek oluşumlarıyla karşılaşıldığı düşünülmüştür (Şekil 4.16).



Şekil 4.16: Üretilen açık hücreli Al köpükte tespit edilen döküm hataları.

4.5. Açık Hücreli Alüminyum Köpüklü Isı Eşanjörü Döküm Sonuçları

10 PPI poliüretan preform model 220*180*60 mm ölçülerinde kesilmiş ve bakır boruların çapında delikleri açılmıştır. Bakır borular, polyester ve epoksi reçine yapıştırıcı sprey kullanılarak yerleştirilmiştir. Yapıştırıcı sprey bir gün boyunca kurumaya bırakılarak yapının fanus alt lastiğe dizimi yapılmıştır (Şekil 4.17). Preform modeller dereceli hassas dökümde kullanılan fanus alt lastiği üzerine mum koçanlardan havya yardımıyla preform ve mumlar birleştirilerek dizimi

gerçekleştirilip hassas döküm alçısına alınmıştır. Alçıya alınan yapı kademeli alçı pişirme fırınında pişirilerek preform, alçı içerisinden uçurulmuş ve boş kalan yerlere 63 m^3/saat gücünde vakum motoru yardımıyla -1 bar vakum destekli döküm işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.18). Vakum döküm haznesi içerisinde 1 saat kadar alüminyumun katılaşması beklenmiştir. Daha sonra vakum döküm haznesi içerisinden çıkarılarak oda sıcaklığında 3 saat kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır. Alçı dolu kısımlar basınçlı su yardımıyla temizlenmiş ve yolluk-besleyiciler tel erozyon yardımıyla hassas bir şekilde kesilmiştir.

Şekil 4.17: Bakır boru üzerine yerleştirilmiş 10 PPI preformun dizimi.

Şekil 4.18: Bakır borulu açık hücreli alüminyum köpüklü ısı eşanjörü.

Testten önceki son adımda, bakır borulu açık hücreli alüminyum köpüklü ısı eşanjörünün sağ ve sol kısmına plakalar yerleştirilerek dirsekleri kaynak edilip teste hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.19). Bakır borulu açık hücreli alüminyum köpüklü ısı eşanjörü ev tipi kombilerde kullanılan eşanjörler ile aynı ölçülerdedir (210*170*50mm).

Şekil 4.19: Üretilen bakır borulu açık hücreli alüminyum köpüklü ısı eşanjörü.

4.6. Bakır Borulu Açık Gözenekli Alüminyum Köpüklü Isı Eşanjörü Performans Test Sonuçları

Hassas döküm yöntemiyle yekpare olarak üretimi gerçekleştirilen bakır borulu açık hücreli alüminyum köpüklü ısı eşanjörünün ısıl performasını ölçmeye yönelik TÜBİTAK UME'de kullanılan Rüzgar Tüneli Test sisteminde soğutmaya yönelik performans testleri yapılmıştır. Testte kullanılan sirkülasyonlu su banyosu.

Numune, hazırlanan test haznesine yerleştirilerek hava sızdırmazlığı için gerekli önlemler alınmıştır. Sirkülasyonlu su banyosunun (debi 10 L/min) numune ile olan giriş-çıkış hortum bağlantıları yapılarak numune önüne ve arkasına girş-çıkışlardaki su sıcaklığı ölçümü için hatta 2 adet PT100 yerleştirilmiştir. Referans sayaç, Flow Computer okuma ünitesi ve frekans kontrolcüsü hazırlanmıştır. Sirkülasyonlu su banyosu sıcaklığı 60°C'ye set edilerek su debisi kaydedilmiştir. Set değerine ulaştıktan sonra stabil hale gelmesi için 10 dakika beklenilmiştir. Hava akışı verilmeden önce sıcaklık ve basınç ölçerler için ilk okuma değerleri kaydedilmiştir. Sıcaklık okumaları örnekleme zamanı 1'er saniye aralıklar ile 100 veri alınması şeklinde ayarlanmıştır. Frekans kontrolcü kullanılarak fandan hava akışı sağlanmıştır.

0,5 m/s ile 10 m/s aralığında yaklaşık 1 m/s artırımlarla 11 noktada hız okuması yapılarak her okuma arasında akış stabilitesi için 3 dakika beklenmiştir. Testler her bir hız için 3 kez tekrar edilmiştir. Excel veri formuna veriler aktarılarak sensör düzeltmeleri yapılmış olarak sonuçlar raporlanmıştır (Tablo 4.3).

Tablo 4.3: Alüminyum köpüklü ısı eşanjörünün performans test sonuçları.

Ölçüm	Hız (m/s)	Debi (m3/h)	T2 (^{0}C)	T1(^{0}C)	T4(^{0}C)	T3 (^{0}C)	Pgirlş(mbar)	T atm (^{0}C)	Nem%	P atm (mbar)	DP (mbar)
1,1	0,48	67,42	20,90	58,62	59,88	30,16	997,75	20,60	45,30	998,20	0,06
1,2	0,47	67,27	20,65	58,62	59,89	30,32	997,77	20,60	45,30	998,20	0,06
1,3	0,47	67,15	20,57	58,60	59,91	30,39	997,77	20,60	45,30	998,20	0,06
2,1	1,10	155,80	20,52	58,54	59,96	28,19	997,75	20,60	45,00	998,20	0,30
2,2	1,10	155,57	20,46	58,54	59,98	27,45	997,77	20,60	45,00	998,20	0,30
2,3	1,10	155,90	20,51	58,54	59,99	27,30	997,77	20,60	45,00	998,20	0,30
3,1	1,77	251,28	20,66	58,46	60,03	27,18	997,86	21,20	45,10	998,20	0,60
3,2	1,78	251,90	20,63	58,44	60,03	27,16	997,87	21,20	45,10	998,20	0,60
3,3	1,77	251,08	20,57	58,45	60,05	27,12	997,85	21,20	45,10	998,20	0,60
4,1	2,32	329,03	20,57	58,38	60,05	25,93	997,87	21,20	47,70	998,20	1,01
4,2	2,32	328,89	20,52	58,39	60,05	25,81	997,90	21,20	47,70	998,20	1,01
4,3	2,33	330,34	20,61	58,38	60,05	25,85	997,91	21,20	47,70	998,20	1,01
5,1	3,34	474,07	20,66	58,29	60,06	24,90	997,87	21,20	46,20	998,20	2,05
5,2	3,34	473,89	20,60	58,30	60,08	24,84	997,90	21,20	46,20	998,20	2,05
5,3	3,34	474,16	20,62	58,29	60,07	24,84	997,91	21,20	46,20	998,20	2,05
6,1	4,95	701,87	20,64	58,20	60,08	24,04	997,85	21,20	46,80	998,20	4,40
6,2	4,95	702,31	20,72	58,21	60,09	24,09	997,87	21,20	46,80	998,20	4,40
6,3	4,95	701,88	20,78	58,18	60,08	24,13	997,88	21,20	46,80	998,20	4,40
7,1	6,94	983,09	20,71	58,14	60,10	23,63	997,84	21,20	46,70	998,20	8,45
7,2	6,95	984,62	20,73	58,14	60,10	23,64	997,85	21,20	46,70	998,20	8,45
7,3	6,94	984,17	20,68	58,16	60,12	23,62	997,88	21,20	46,70	998,20	8,45
8,1	7,89	1118,41	20,86	58,09	60,11	23,42	997,87	21,40	47,80	998,20	11,00
8,2	7,88	1117,50	20,88	58,10	60,11	23,42	997,87	21,40	47,80	998,20	11,00
8,3	7,88	1117,53	20,87	58,09	60,11	23,42	997,87	21,40	47,80	998,20	11,00
9,1	8,91	1263,46	21,00	58,03	60,11	23,22	997,87	21,40	46,10	998,20	13,55
9,2	8,90	1261,69	20,99	58,03	60,10	23,17	997,87	21,40	46,10	998,20	13,55
9,3	8,89	1260,88	21,02	58,02	60,12	23,22	997,87	21,40	46,10	998,20	13,55
10,1	9,61	1361,77	21,05	58,02	60,14	23,09	997,83	21,40	46,50	998,20	15,85
10,2	9,64	1365,87	21,03	58,01	60,12	23,07	997,84	21,40	46,50	998,20	15,85
10,3	9,63	1365,26	21,15	57,98	60,10	23,15	997,85	21,40	46,50	998,20	15,85
11,1	10,74	1522,19	21,18	57,87	60,15	22,77	997,60	21,40	48,00	998,20	20,00
11,2	10,76	1525,22	21,24	57,87	60,16	22,81	997,61	21,40	48,00	998,20	20,00
11,3	10,77	1527,22	21,25	57,87	60,15	22,83	997,64	21,40	48,00	998,20	20,00

Ev tipi kombilerde bulunan ana ısı eşanjörleri yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak ısıtma amaçlı kullanılmaktadır. Fakat üretimini başarılı bir şekilde gerçekleştirmiş olduğumuz açık gözenekli alüminyum köpüklü ısı eşanjörü testleri soğutmaya yönelik yapılmıştır. Bakır boru ile açık gözenekli alüminyum köpüğün, ısı iletiminin borulardan Al köpüğe veya Al köpükten borulara verimli bir şekilde sağlanması için boru ve Al köpük arasındaki temasın tam olması gerekmektedir. Üretim esnasında ve

sonrasında bu temas henüz %100 sağlanamadığı için eşanjör performansı istenilen seviyede çıkmamıştır. Bu durumda yapılacak işlem, döküm süreçlerinden sonra nihai aşamada bakır boru ile alüminyum köpüğün temasının tam sağlanması için brazing işleminin yapılması gerekmektedir.

Alüminyum malzeme hafif ve iyi bir ısıl iletkenliğe sahiptir. Bu özelliğinden dolayı pek çok uygulama için yeterli olması dikkate alındığında, etkin şekilde uygulama alanının, ısıtma amaçlı kombilerdeki yüksek sıcaklığa maruz kalan ısı eşanjörleri uygulamaları yerine, tam tersine soğutma amaçlı (hava veya soğutucu gazlarla) diğer eşanjör uygulamaları (krojenik soğutma, filtrelenmiş hava ile çevrim santrallerindeki hava soğutmalı su kulelerinde vb.) olabileceği ön görülmektedir.

Ülkemizde ve dünyada farklı üretim methodları ve gözenek yapılarında metal köpük üretim çalışmaları yapılmış ve farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bazı üretim methodları firmaların kendi isimleri ile özdeşleşmiş olup ticari amaçla satılmaktadır. Bu metal köpükler ve firmaların bazıları şu şekildedir:

- ALULIGHT ve FOAMINAL adlarıyla bilinen toz metalurjisi ile üretilen metal köpükler Fraunhofer-Institut (Bremen) tarafından patentlenmiştir (Haydn ve Wadley, 2002).
- FORMGRIP yöntemi Foaming Of Reinforced Metal by Gas Release In Precursor kelimelerinin baş harfleri kullanılarak isimlendirilmiştir. Bu yöntemde titanyum hidrat (TiH_2) ısıl işleme tabi tutulur ve bunun sonucunda yüzeyde titanyum oksit bir film tabakası oluşması muhtemeldir. Daha sonra hidrit ergiyik alüminyumla karıştırılır. Hidrit parçacıkların üzerindeki oksit tabakası çözünmeyi geciktirici bariyer rolü oynamaktadır. Bu da metal, köpürtücü ajan ve SiC'den yapılmış düşük oranda gözenekli öncü üretir (Gergely ve Clyne, 2000).
- Köpüren ergimiş metal oluşturmak için ikinci yol köpük yapıcı gaz üflemenin dışında ergimiş metalin içerisine doğrudan köpük yapıcı ajan ilave etmektir. Köpük yapıcı ajan belirli bir sıcaklıkta çözünerek ortamda gaz açığa çıkarmakta ve metalin köpükleşmesini sağlamaktadır. Yöntemin ticari adı "ALPORAS" olarak bilinmektedir (Miyoshi vd., 2000).
- Gaz üfleme ile alüminyum köpük üretim yöntemi HYDRO Aluminum (Norveç) ve Cymat Aluminium (Kanada) tarafından geliştirilmiştir. Ergimiş metalin içerisine SiC, Al_2O_3 veya MgO_2 tozları eriyiğin viskozitesini artımak için ilave

edilir. Daha sonra özel dizayn edilmiş bir nozül yardımıyla gaz üfleyerek üretim gerçekleşir (Banhart, J. 2001).

- Ticari adı “DUOCEL” olarak bilinen ve ERG Aerospace (ABD) ve Almanya MAYSER (M-pore) firması tarafından üretilen bu yöntemde açık gözenekli metal köpükler elde edilmektedir. Bu üretim methodunda, polimer malzemeden imal edilmiş preform seramik çamuru ile kaplanarak fırında pişirilir ve sonrasında döküm yapılır. Bu yöntemle alüminyum alaşımları dışında bakır ve magnezyum gibi diğer metallerle de üretim yapılabilmektedir (Banhart, 2001).

Bu tez çalışması kapsamında döküm yöntemiyle üretilen açık gözenekli alüminyum köpükler M.Pore 10 ve DUOCELL ticari ürün isimleri ile bilinen yurt dışı Mayser ve Erg Aerospace firmalarının kullandığı yönteme benzer bir yöntem kullanılarak üretilmiştir. Daha sonra mekanik özellikler Mayser firmasının açık gözenekli alüminyum köpüğü ile karşılaştırılmıştır. Köpüklerimizin sertlik değerleri ticari ürüne göre daha iyi olup basma dayanımları düşük çıkmıştır. Üretimini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiğimiz açık gözenekli alüminyum köpüklerin en önemli özelliği, %92-95 oranında boşluk içermesidir. Bu özelliğinden dolayı da yüzey alanı fazla olup yüksek gaz ve yüksek ısı geçirgenliğine sahiptir.

5. GENEL SONUÇLAR

- Döküm yöntemiyle 10 PPI gözenek boyutuna sahip açık gözenekli alüminyum köpük üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- Açık gözenekli alüminyum köpüklere mekanik testler (basma ve mikro sertlik testi) yapılmış, mikro yapı görüntüsü alınmış ve EDS analizi yapılmıştır.
- Mikro sertlik test sonuçları; Mayser firmasının ticari bir ürünü olarak satılan A356 alüminyum alaşım köpüklerin ortalama sertlik değeri 42.8 HV çıkarken, bu tez çalışmasında üretilen alüminyum köpüklerin ortalama sertlik değeri 59.4 HV çıkmıştır. Bunun sebebi, üretilen alüminyum köpüklerinde matris içerisinde dağılımının ve tanelerin inceliğinin daha iyi olmuş olmasıdır.
- Mayser firmasının alüminyum köpüklerinin basma gerilmesi sonuçları üretilen alüminyum köpüklerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Mayser firmasının basma gerilmesi sonuçlarının daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Bunun sebebi olarak, Mayser firmasının alüminyum köpüklerinin kullanmış oldukları preform modelden kaynaklı ligament kalınlığının, dolayısıyla göreceli yoğunluğun (relative density, %6) daha fazla olduğu ve üretilen alüminyum köpüklerde gaz boşluğu gibi döküm hatalarının olduğu anlaşılmıştır.
- Dökümde kullandığımız alüminyum A356 alaşımı, ötektik altı alaşım olduğundan dolayı yapı içerisinde bulunan primer Al yapısı master alaşımlar ile daha da inceltilebilir ve gaz boşluğunu gidermek için ergitme işlemi vakum altında yapılabilir. Bu sayede mekanik özellikler daha da iyileştirilebilir.
- EDS analizi sonucunda, dökümde kullandığımız alüminyum A356 alaşımında bulunan ortalama %7 Si ve %0,3 Mg elementleri olduğu gösterilmiştir. Başka bir faza rastlanmamıştır.
- Ev tipi kombilerde kullanılan bakır borulu ve bakır borulu (finli) ısı eşanjöründeki (ısı değiştirici) kanatçıklar (finler) yerine, yüzey alanı daha fazla olan açık gözenekli alüminyum köpük kullanılmıştır.
- Bakır borulu ve alüminyum köpüklü ısı eşanjörünün önüne ve arkasına paslanmaz çelik plakadan saclar yerleştirilip dirsekleri kaynak edilmiştir.
- Bakır borulu açık gözenekli alüminyum köpüklü ısı eşanjörünün soğutmaya yönelik performans testleri TÜBİTAK UME tarafından gerçekleştirilmiştir.

- Soğutmaya yönelik performans testleri sonucunda, bakır boru ile alüminyum köpük arasındaki temasın %100 olmaması, aralarında ısıl direnç oluşturacak hava boşluğunun kalması sebebiyle metal köpüklü ısı eşanjöründen beklenen verim artışı tam olarak gözlenememiştir.
- Bu bakır boru ve metal köpük kanatçıklar arasındaki temas probleminden kaynaklı ısıl direncin çözümüne yönelik olarak, sert lehimleme (brazing) adı verilen ve özel lehim teli, folyo veya macunun 425°C'nin üzerinde sıcaklıklarda atmosfer kontrollü fırınlarda gerçekleştirilen metal birleştirme işleminin uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Alüminyum köpüklü ısı eşanjörünün, atık ısı kazanımı amaçlı kombilerdeki, kalorifer peteklerinden geri dönen veya şebekeden gelen soğumuş suyun ön ısıtılması görevi gören ve nispeten düşük sıcaklıkta çıkan yanma gazları sıcaklığına (yaklaşık 150-200°C) maruz kalan reküperatör kısmında kullanılabileceği anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

Ashby M. F., Evans T., Fleck N. A., Hutchinson J. W., Wadley H. N. G., & Gibson L. J. (2000), “Metal foams: a design guide” Butterworth-Heinemann, Woburn, 12-13

Avarisli O., & Uğuz A. (2003), “Metalik köpük malzemelerin otomotiv endüstrisinde kullanılması”, VIII. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu, Bursa, 101-110.

Babcsan N., & Banhart J. (2006), “Metal Foams”, Cambridge University Press (2006) 445-499.

Babcsán N., Banhart J., & Leitlmeier D. (2003), “Metal foams–Manufacture and physics of foaming”, In Proceedings of the International Conference Advanced Metallic Materials, 5-15.

Banhart J., (2000), “Manufacturing Routes for Metallic Foams”, JOM, 22, December, 5, (12), 22-27

Banhart J., Ashby M. F., & Fleck N. (1999), “Metal foams and porous metal structures ”, Metall Innovation Technologie MIT, 83, 255.

Banhart J., & Seeliger H., W. (2008), Aluminium foam sandwich panels: Manufacture, metallurgy and applications. Advanced Engineering Materials, 10(9), 793-802.

Banhart J., (2001), “Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams”, Progress in Materials Science, 46, 559-632.

Banhart J., (2003), “Aluminium Foams: On the Road to Real Applications”, Mrs Bulletin, 290-295.

Banhart J., (2005), “Aluminium Foams for Lighter Vehicles”, International Journal of Vehicle Design, 37, 114-125.

Boomsma K., Poulikakos D., & Zwick F. (2003), “Metal foams as compact high performance heat exchangers”, Mechanics of Materials, 35 (12), 1161-1176.

Bor Ş., Tahran E., Esen Z., & Kotan G. (2007), “Toz metalurjisi yöntemiyle köpüksü saf titanyum ve Ti6AI4V alaşım üretimi ve karakterizasyonu”, TÜBİTAK Projesi, 104M121.

Çinici H., (2004), “Toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum esaslı metalik köpük üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.

Dâhil L., (2017), Alüminyum Köpük Malzemenin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17, 352-356.

Davies G. J., & Zhen S. (1983), Review MetallicFoams: Their Production, Propertiesand Applications, Journal of MaterialScience, 18 (1), 1899-1908.

Degischer H., P., & Kristz B. (2002), "Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications", Wiley Online Library.

Deqing W., Xiangjun M., Weiwei X., & Ziyuan S. (2006), "Effect of Processing Parameters on Cell Structure of an Aluminum Foam", Materials Science and Engineering, A420, 235–239.

Dressler M., Reinsch S., Schadrack R., & Benemann S. (2009), "Burnout Behavior of Ceramic Coated Open Cell Polyurethane Sponges", Journal of the European Ceramic Society, 29, 3333–3339.

Dumais J., (2009), "Lectures on Biomechanics, Lecture 3:Cellular Solids", Lesson notes.

Dundar K., Guler F., Turhan L., Usta M. (2019), Alüminyum Köpükler: Üretim Yöntemleri ve Uygulama Alanları, 9. Uluslararası Alüminyum Sempozyumu (ALUS'09), 39-46.

Ergönenç Ç., (2008), "Development and Design of Closed-Cell Aluminium Foam-Based Lightweight Sandwich Structures for Blast Protection", Master Thesis, Izmir Institute of Tecnology.

Haydn N., Wadley G. (2002), "Cellular Metals Manufacturing", Advanced Engineering Materials, (10):726-733.

Giamei A., (1997), "Aero-engine and naval applications for ultra-lightweight metals", In Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, Banhart J., Eifert Basimi H., Stanton, Delaware, Ekim, 7-8.

Gergely V., Clyne B. (2000), "The FORMGRIP Process:Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors", Advanced Engineering Materials, (4), 175-178.

Güler F., (2019), "Eklemeli İmalat Destekli Dereceli Hassas Döküm Yöntemi İle Bal Peteği Yapılarının Üretimi ve Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Üniversitesi.

Güler F., Dundar K., Turhan L., Keles O. (2019), "Eklemeli İmalat Destekli Hassas Döküm Yöntemiyle Alüminyum Alaşımlı Hücresel Bal Peteği ve Kafes Yapıların Tasarım, Üretim ve Karakterizasyonu", 9. Uluslararası Alüminyum Sempozyumu (ALUS'09), 182-186.

Güven Ş. Y., (2011), “Toz Metalurjisi ve Metalik Köpükler”, SDU Teknik Bilimler Dergisi, 1 (2), 22-28.

Hernández A. R. A., (2005), “Combined flow and heat transfer characterization of open cell aluminum foams”, Master of Science, University of Puerto Rico.

Kalkan Y., (2012), “Vakum Döküm Yöntemiyle Açık Gözenekli Alüminyum Köpük Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.

Manonukul A., Muenya N., Leaux F., & Amaranan S. (2009), “Effects of Replacing Metal Powder with Powder Space Holder on Metal Foam Produced by Metal Injection Moulding”, Journal of Materials Processing Technology, 210, 529-535.

Miyoshi T., Itoh M., Akiyama S., & Kitahara A. (2000), “ALPORAS aluminum foam: production process, properties, and applications”, Advanced engineering materials, 2(4), 179-183.

Montanaro L., Jorand O. Y., Fantozzi G. & Negroa A. (1998) “Ceramic Foams by Powder Processing”, Journal of the European Ceramic Society,18, 1339-1350.

Özer G., (2005), “Alüminyum Esaslı Metal Köpük Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Polat B. D., Keleş Ö., & Taptık Y., (2010), “Metalik Köpükler, Alüminyum Metalik Köpük ve Üretim Yöntemleri”, Metal Dünyası Dergisi, 205, 2-7.

Srivastava V. C., & Sahoo K. L. (2006), “Metallic Foams: Current Status and Future Prospects”, IIM Metal News, 9, 9-13

Thomsen O. T., Bozhevolnaya E., & Lyckegaard A. (2005), “Sandwich Structures 7:Advancing with Sandwich Structures and Materials”, Springer, Netherlands, 733-742.

Varyoz H., Dikdere O., Dinç A. M., Tiryaki M., & Aygahoğlu A, (2015), “Metal Köpükler”, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Özel Sayısı, 195-200.

Yagsi C., (2018), “Polimer Emdirme Yöntemiyle Alüminyum 6063 Alaşımı Esaslı Açık Hücreli Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Wen C. E., Yamada Y. & Hodgson, P.D. (2006), “Fabrication of novel TiZr alloy foams for biomedical applications”, Materials Science and Engineering, C 26, 1439 – 1444.

Yavuz İ., (2012), “Taşıtlarda Kullanılan Metal Köpüklerin Yapısal Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Doktora tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.

Yıldırım Ş., (2010), “Parçacık takviyeli alüminyum köpük metalinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.

Yu C. J. & Banhart J. (1997), “Mechanical properties of metallic foams”, Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, 37-48.

Yu C. J., Eifert H., Banhart J.& Baumeister J. (1998), “Metal Foams”, Advanced Materials&Processes, 45-47.

ÖZGEÇMİŞ

Koray DÜNDAR 1990 yılında Adana'da doğdu. 2011 yılında başladığı Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (%100 İng.) Bölümünü 2016 yılında başarıyla tamamladı. Aynı yıl Gebze' de bulunan Şirvanlı Alüminyum Döküm ve Metal İşleme San. Tic. A.Ş. firmasında 1 (bir) yıl Satış ve Proje Sorumlusu olarak çalıştı. 2017-2019 yılları arasında yüksek lisans eğitimini Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yapmıştır. Aynı yıllar arasında TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü'nde bursiyer olarak çalışmıştır. Eylül 2019 tarihinden itibaren ASAŞ Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş.' de Uzman AR&GE Mühendisi olarak çalışmaktadır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Dundar K., Guler F., Turhan L., Usta M., (2019), ‘’Alüminyum Köpükler: Üretim Yöntemleri ve Uygulama Alanları’’, 9. Uluslararası Alüminyum Sempozyumu (ALUS’09), 39-46, Bakırköy, İSTANBUL, 10-11 Ekim 2019

Guler F., Dundar K., Turhan L., Keleş Ö., (2019), ‘’Eklemeli İmalat Destekli Hassas Döküm Yöntemiyle Alüminyum Alaşımlı Hücresel Bal Peteği ve Kafes Yapıların Tasarım, Üretim ve Karakterizasyonu’’, 9. Uluslararası Alüminyum Sempozyumu (ALUS’09), 182-186, Bakırköy, İSTANBUL, 10-11 Ekim 2019