<u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>

AÇIK HÜCRELİ ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ Elvan ZAMAN

Anabilim Dalı : İleri Teknolojiler

Programı: Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

HAZİRAN 2011

<u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ 🛧 FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>

AÇIK HÜCRELİ ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ Elvan ZAMAN (521081008)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :06 Mayıs 2011Tezin Savunulduğu Tarih :14 Haziran 2011

Tez Danışmanı :Doç. Dr. Özgül KELEŞ (İTÜ)Diğer Jüri Üyeleri :Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK (İTÜ)Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU (YTÜ)

HAZİRAN 2011

Aileme ve tüm sevdiklerime,

ÖNSÖZ

Bu çalışma kapsamında, açık hücreli metal köpük üretme yöntemlerinden olan çamur köpüklendirme (polimer emdirme) yöntemi ile açık hücreli alüminyum ve bakır takviyeli alüminyum köpük üretilmiş ve üretilen köpüklerin karakterizasyonları deneysel yöntemler kullanılarak yapılmıştır.

Tez çalışmamın şekillenmesi ve tamamlanması sürecinde, beni yapıcı fikirleri ve değerli birikimleriyle yönlendiren, moralimi her zaman yüksek tutmam için beni motive eden, bana tez çalışmam boyunca her türlü desteği veren sayın hocam Doç. Dr. Özgül KELEŞ'e en derin şükranlarımı sunarım.

Hem akademik çalışma anlamında, hem de bireysel olarak her zaman yanımda olan, göstermiş olduğu samimi desteği çalışmamın her aşamasında hissettiğim, tez çalışmasının düşünsel sürecine katkıda bulunabilmek için değerli vaktini bizler için harcayan sayın hocam Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK'a ve desteklerinden ötürü Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN'e ve Yrd. Doç. Dr. Nuri SOLAK'a, en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun geçen tez çalışmam süresince her zaman yardımıma koşan, kendi çalışmalarının yanı sıra benim tez çalışmam için de ellerinden geleni yapan, laboratuarımızdaki fedakar çalışma arkadaşlarım Emel DANACI ve Feyza DENİZLİ'ye; ayrıca tezime değerli görüşleri ile katkıda bulunan Sedat İHVAN'a, Deniz YILMAZ'a ve Arş. Gör. B. Deniz POLAT'a teşekkürü bir borç bilirim.

Cihazlarını tez çalışmam için kullanımıma açan bütün hocalarıma, özellikle bu anlamda bizden desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Oya ATICI'ya ve Arş. Gör. Cüneyt H. ÜNLÜ'ye ve bu cihazlardan sorumlu tüm arkadaşlara, tez çalışmamın her aşamasındaki yardımlarından ötürü Turgay GÖNÜL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca yanımda olan ve beni seven bütün arkadaşlarıma, her zaman arkamda olduğunu bildiğim, desteğini hissettiğim Ergin KORKMAZ'a, son olarak fedakarlıklarını, maddi ve manevi desteklerini bana her zaman gösteren ve beni bu günlere getiren anneme, babama; ayrıca ev arkadaşım, ablam ve her daim dostum olan Çiğdem ZAMAN'a bu vesile ile bir kez daha teşekkür etmek isterim.

Haziran 2011

Elvan ZAMAN Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

<u>Sayfa</u>

ÖNSÖZ	v
İCİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
CIZELGE LISTESI	xi
ŚEKIL LISTESI	xiii
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİS	1
2. METÁLÍK KÖPÜKLER	3
2.1 Metalik Köpükler ve Gözenekli Malzemeler	
2.1.1 Kapalı hücreli köpükler	4
2.1.2 Acık hücreli köpükler	5
2.2 Metalik Köpüklerin Kullanım Alanları ve Uygulamaları	5
2.2.1 Metalik köpüklerin yapısal uygulamaları	5
2.2.2 Metalik köpüklerin fonksiyonel uygulamaları	6
2.2.2.1 Isı değistiriciler	6
2.2.2.2 Filtreler	6
2.2.2.3 Su ariticilar	6
2.2.2.4 Susturucular	6
2.2.2.5 Katalizör destekleri	7
2.2.2.6 Alev tutucular	7
2.2.2.7 Biyo Medikal Uygulamalar	8
2.3 Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri	
2.4 Alüminyum Köpükler	10
2.4.1 Alüminyum köpüklerin özellikleri	10
2.4.2 Açık hücreli alüminyum köpük üretim yöntemleri	11
2.4.2.1 Polimer köpük ile hassas döküm	11
2.4.2.2 Boşluk tutucular etrafına döküm	12
2.4.2.3 Metal enjeksiyon kalıplama ve toz boşluk tutucu yöntemi	12
2.4.2.4 Çamur köpüklendirme (polimer emdirme) yöntemi	13
2.4.3 Partikül takviyeli alüminyum köpükler	21
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
3.1 Deneylerin Yürütülmesi	25
3.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler	26
3.2.1 Alüminyum ve bakır tozu	26
3.2.2 Bağlayıcı	28
3.2.3 Model malzeme	28
3.3 Çamur Karışımı Hazırlama ve Karakterizasyonu	28
3.3.1 Çamur karışımı hazırlama	28
3.3.2 Sedimentasyon testi ve viskozite ölçümü	29

3.4 Emdirme ve Kurutma	29
3.5 Model Malzemenin Giderilmesi ve Sinterleme	30
3.6 Açık Hücreli Metalik Köpüklerin Karakterizasyonu	30
3.6.1 Yoğunluk ölçümü ve porozite tayini	30
3.6.2 Makro yapı incelemeleri	31
3.6.3 Mikro yapı incelemeleri	31
3.6.4 XRD analizi	32
3.6.5 Sertlik deneyi	32
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	
4.1 Çamur Karakterizasyonu	33
4.2 Yoğunluk Ölçümü ve Porozite Tayini	
4.3 Makro Yapı İncelemeleri	
4.4 Mikro Yapı İncelemeleri	41
4.4.1 Işık mikroskobu incelemeleri	41
4.4.2 Taramalı elektron mikroskobu incelemeleri	47
4.5 XRD Analizi	58
4.6 Sertlik Ölçümleri	61
5. GENEL SONUÇLAR	65
KAYNAKLAR	67
EKLER	73

KISALTMALAR

tal Köpürtme

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Sayfa</u>

Çizelge 2.1 : Açık hücreli alüminyum köpüklerin kullanım alanları	8
Cizelge 2.3 : Ticari olarak üretilen alüminyum köpüklerin fiziksel ve mekanik	9
özellikleri	10
Cizelge 2.4 : Camur köpüklendirme yönteminin avantaj ve dezavantajları	18
Cizelge 2.5 : Camur köpüklendirme vöntemi ile üretilen seramik köpükler,	
sinterleme proses akışı, fiziksel ve mekanik özellikleri	20
Cizelge 2.6 : Alüminvum köpüklere ilave edilen metalik ve seramik takvive	
elemanları	23
Cizelge 3.1 : Alüminvum ve bakır tozlarının partikül boyut analizi sonucları	27
Cizelge 3.2 : Alüminvum camur karısımlarının saf su, metalik toz ve bağlavıcı	
oranları	29
Cizelge 3.3 : Bakır takviyeli alüminyum camur karısımlarının saf su metalik	>
toz ve bağlavıcı oranları.	29
Cizelge 3.4 : Karakterizasyonu vanlan acık hücreli könüklerin sinterleme	>
sıcaklık ve süreleri	30
Cizelge 4.1 : Alüminyum camur karısımlarının sedimentasyon testi sonucu	
cökme miktarı ve vişkozite değerleri	34
Cizelge 4.2 : Bakır takviyeli alüminyum camur karısımlarının sedimentasyon	
testi sonucu cökelme miktarı ve vişkozite değerleri	36
Cizelge 4.3 • Acık hücreli alüminyum könüklerin yoğunluk ve % porozite	
değerleri	37
Cizelge 4.4 • Acık hücreli %2 hakır takviyeli alüminyum könüklerin yoğunluk	
ve % norozite değerleri	38
Cizelge 4.5 • Acık bücreli %4 bakır takviyeli alüminyum könüklerin yoğunluk	
ve % porozite değerleri	38
Cizelge 4.6 \cdot 25 ve 40 ppi model malzemesi kullanılarak üretilen 4 ve 7 saat	
sinterlenen acik hücreli alüminyum könüklerin ortalama mikro ve	
makro gözenek hüvüklükleri	57
Cizelge 4.7 \cdot 25 ve 40 nni model malzemesi kullanılarak üretilen 4 ve 7 saat	
sinterlenen acik hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum könüklerin	
ortalama mikro ve makro gözenek hüvüklükleri	57
Cizalga 4.8 \cdot 25 ve 40 nni model malzemesi kullanılarak üretilen 4 ve 7 saat	
sinterlenen acik hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum könüklerin	
ortalama mikro ve makro gözenek hüvüklükleri	58
Cizelge 4.9 \cdot 25 ye 40 nni model malzemesi kullanılarak üretilen normal	50
atmosfer sartlarında 4 ve 7 saat sinterlenen asık hücreli alüminyum	
könüklerin ortalama sertlik değerleri	67
Kopukierin ortaiama sertiik degeneri	02

Çizelge 4.10	25 ve 40 ppi model malzemesi kullanılarak üretilen, normal	
	atmosfer şartlarında ve argon atmosferinde 4 ve 7 saat sinterlenen	
	açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin ortalama	
	sertlik değerleri	62
Çizelge 4.11	25 ve 40 ppi model malzemesi kullanılarak üretilen, normal ve	
	argon atmosferinde 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır	
	takviyeli alüminyum köpüklerin ortalama sertlik	
	dağarlari	63

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sayfa</u>

Şekil 2.1 : Bir fazın diğer faz içerisinde dağılımıyla meydana gelen yapılar
Şekil 2.2 : (a) Kapalı hücreli metalik köpük (b) kapalı hücreli köpük modeli
Şekil 2.3 : (a) Açık hücreli metalik köpük (b) Açık hücreli köpük modeli
Şekil 2.4 : Metal köpük ısı değiştirici
Şekil 2.5 : Alüminyum köpükten yapılmış susturucular
Şekil 2.6 : Alüminyum köpükten yapılmış alev tutucu
Şekil 2.7 : Polimer köpük ile hassas döküm yöntemi
Şekil 2.8 : Boşluk tutucular etrafina döküm yöntemi
Şekil 2.9 : Metal enjeksiyon kalıplama ve toz boşluk tutucu yöntemi
Şekil 2.10 : Çamur köpüklendirme yöntemi (a) Model malzeme (b)Model
malzemenin çamur karışımına daldırılması (c) Model malzemenin
çamur karışımı ile kaplanması (d) Kurutma+ model malzemenin
giderilmesi+ sinterleme (e) Sinterlenmiş ürün 14
Şekil 2.11 : Çamur köpüklendirme yöntemi ile üretilen köpükleri etkileyen
parametrelerin balık kılçığı modeli ile gösterimi
Şekil 2.12 : Çamur karışımındaki dağıtıcı miktarı ile viskozite değişimi
Şekil 3.1 : Tez çalışmasının proses akış şeması25
Şekil 3.2 : Deneyde kullanılan alüminyum tozlarının SEM görüntüsü26
Şekil 3.3 : Deneyde kullanılan alüminyum tozunun partikül boyut analizi26
Şekil 3.4 : Deneyde kullanılan bakır tozlarının SEM görüntüsü
Şekil 3.5 : Deneyde kullanılan bakır tozunun partikül boyut analizi27
Şekil 3.6 : PU süngerin argon atmosferi altında 800 ^o C sıcaklığa kadar
TGA ve DTA sonuçları28
Şekil 4.1 : Sedimentasyon testinde kullanılan mezur içerisindeki 3 numaralı
karışımın 24 saat sonundaki çökelme miktarı
Şekil 4.2 : Çamur karışımlarının viskozite değerlerinin % katı oranıyla değişimi35
Şekil 4.3 : Çamur karışımlarının 24 saat sonundaki çökme miktarları
Şekil 4.4 : (a) 25 ppi (b) 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme
kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum
köpüğün stereo mikroskop görüntüsü
Şekil 4.5 : (a) 25 ppi (b) 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme
kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır
takviyeli alüminyum köpüğün stereo mikroskop görüntüsü40
Şekil 4.6 : (a) 25 ppi (b) 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme
kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli % 4 bakır takviyeli
alüminyum köpüğün stereo mikroskop görüntüsü40
Şekil 4.7 : Deneylerde üretilen açık hücreli alüminyum ve bakır takviyeli
(%2 ve %4 Cu) alüminyum köpükler40

Şekil 4.8: 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen
ve 4 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün farklı
bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü
Şekil 4.9 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen
ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün ışık
mikroskop görüntüsü42
Şekil 4.10: 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen
ve 4 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpükten alınan ışık
mikroskop görüntüsü42
Şekil 4.11 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen
ve 4 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum
köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü43
Şekil 4.12 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen
ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum
köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü43
Şekil 4.13 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen
ve 4 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum
köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü44
Şekil 4.14 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen
ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum
köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü44
Şekil 4.15 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen
ve 4 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum
köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü45
Şekil 4.16 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen
ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum
köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü45
Şekil 4.17 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen
ve 4 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum
köpüğün ışık mikroskop görüntüsü46
Şekil 4.18 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen
ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum
köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mıkroskop görüntüsü46
Şekil 4.19 : 40 ppi gözenek boyutundakı model malzemesi kullanılarak üretilen
ve argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır
takviyeli alüminyum köpüğün farklı bölgelerinden alınan işik
mikroskop görüntüsü
Şekil 4.20 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen
ve 4 saat sinterlenen açık hucreli aluminyum kopugun (a)-(b) SEM
goruntusu (c) Şekil 4.20a dan alınan EDS analizi
Sekil 4.21 : 25 ppi gozenek boyutundaki model maizemesi kullanilarak uretilen
ve / saat sinterienen açık nucreli aluminyum kopugun (a)-(b)SEM
goruntusu (c) Şekii 4.21a dan alınan EDS analızı
Sekii 4.22 : 40 ppi gözenek böyutundaki mödel maizemesi kullannarak uretilen
ve 4 saat sintenenen açık nuclen alunninyum kopugun SEM
Sakil 4 23 • 40 ppi gözonak havatundaki madal makamasi kullanılarak üratilar
ye 7 saat sinterlanan asik hüarali alüminyum känüğün. SEM
ve / saat sinterenen açık nücren alunmiyuni köpügün SEIVI görüntüsü 50
goruntusu

Şekil 4.24 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen	
ve 4 saat sinterlenen açık hücreli % 2 bakır takviyeli alüminyum	
köpüğün (a)-(b) SEM görüntüsü (c) Şekil 4.24a'dan alınan EDS	
analizi	51
Şekil 4.25 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen	
ve / saat sinterlenen açık hücreli % 2 bakır takviyeli alüminyum	
kopugun (a)-(b) SEM goruntusu (c) Şekil 4.256 den alınan EDS	50
Sakil 4.26 • 40 nni gözenek hevyytundeki medel melzemegi kullenderek üretilen	52
ye A saat sinterlenen asik hücreli % 2 bakır takviyeli alüminyum	
könüğün SEM görüntüsü	52
Sekil 4 27 • 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen	
ve 7 saat sinterlenen acik hücreli % 2 hakır takviyeli alüminyum	
könüğün SEM görüntüsü	53
Sekil 4.28 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen	
ve 4 saat sinterlenen acık hücreli % 4 bakır takviveli alüminvum	
köpüğün (a) SEM görüntüsü (b) Sekil 4.28a'dan alınan EDS	
analizi	53
Şekil 4.29 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen	
ve 7 saat sinterlenen açık hücreli % 4 bakır takviyeli alüminyum	
köpüğün (a)-(b)-(c) SEM görüntüsü (d) Şekil 4.29c'den alınan	
EDS analizi	54
Şekil 4.30 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen	
ve 4 saat sinterlenen açık hücreli % 4 bakır takviyeli alüminyum	
köpüğün SEM görüntüsü	54
Şekil 4.31 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen	
ve / saat sinterlenen açık hücreli % 4 bakır takviyeli alüminyum	
Kopugun SEM goruntusu	
Sekii 4.52 : 40 ppi gözenek böyutundaki mödel malzeme kullanliarak uretilen	
ve normar armosrer şartıarında / saat sinterienen açık nucren 764 bakır takviyali alüminyum könüğün yüzayi zımparalanarak parlatılmı	C
haldeki geri saçılmış (back scattered) görüntüsü	ې 55
Sekil 4 33 · Sekil 4 32'deki SFM görüntüsündeki (a) 1. Bölgeden	
(b) 2 Bölgeden (c) 3 Bölgeden alınan EDS analizleri	56
Sekil 4.34 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak, argon	
atmosferinde 7 saat sinterlenen acık hücreli % 4 bakır takviyeli	
alüminyum köpüğün yüzeyi zımparalanarak parlatılmış (a) SEM	
görüntüsü (b) Şekil 4.34a'dan alınan EDS analizi	56
Şekil 4.35 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen	
ve normal atmosfer şartlarında 7 saat sinterlenen açık hücreli	
alüminyum köpüğün XRD analizi	59
Şekil 4.36 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen	
ve normal atmosfer şartlarında 7 saat sinterlenen açık hücreli %4	
bakır takviyeli alüminyum köpüğün XRD analizi	59
Şekil 4.37 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen	
ve argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır	
takviyeli alüminyum köpüğün XRD analızı	60

Şekil 4.38 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen argon atmosferinde ve normal atmosfer sartlarında. 7 saat sinterlenen	
acık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin normalize	
edilmiş dataları	
Şekil A.1: 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen	
(a) 4 saat (b) 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün EDS	
analizi74	-
Şekil A.2: 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen	
(a) 4 saat (b) 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli	
alüminyum köpüğün EDS analizi74	-
Şekil A.3: 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen	
(a) 4 saat (b) 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli	
alüminyum köpüğün EDS analizi74	-
Şekil A.4 : Normal atmosfer şartlarında sinterlenen açık hücreli alüminyum	
köpüklerin XRD analizleri75	j
Şekil A.5 : %2 ve %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin XRD analizleri)
Şekil A.6 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve	
argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli	
köpüğün XRD analizi77	1

AÇIK HÜCRELİ ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Son yıllarda metalik köpükler, özellikle alüminyum köpükler, düşük yoğunlukları, enerji, ses ve titreşimleri soğurmaları, yüksek darbe direnci, yüksek gaz geçirgenliği ve ısı yalıtımı gibi özellikleri ile önemli ölçüde dikkat çekmişlerdir. Metalik köpükler gözeneklerinin yapısına göre açık ve kapalı olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Metalik köpükler, yapıdaki gözenekler birbirinden duvarlarla ayrılmışsa kapalı hücreli köpük, yapıdaki gözenekler birbirleriyle bağlantılı bir şekilde bulunuyorsa açık hücreli köpük olarak adlandırılırlar. Açık hücreli köpükler; yüksek gaz ve ısı geçirgenliği gibi özelliklerinden ötürü; filtreler, ısı değiştiriciler, su arıtıcılar gibi ürünlerde fonksiyonel amaçlar için kullanılırlar. Açık hücreli alüminyum köpükler; polimer köpük ile hassas döküm, boşluk tutucular etrafına döküm, metal enjeksiyon kalıplama, toz boşluk tutucu ve çamur köpüklendirme yöntemleri ile üretilmektedirler. Bu üretim yöntemlerinden; ayarlanabilir gözenek boyutu ve pratiklik gibi özelliklerinden dolayı pek çok avantaja sahip olan çamur köpüklendirme yöntemi, genellikle seramik ve titanyumlara ve son zamanlarda da alüminyumlara uygulanmaktadır.

Bu çalışmada; çamur köpüklendirme (polimer emdirme) yöntemi kullanılarak açık hücreli alüminyum ile %2 ve %4 bakır takviyeli alüminyum köpük üretilmiş ve üretilen köpüklerin karakterizasyonları yapılmıştır. İlk olarak; belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılan saf su içerisinde polivinil alkol çözündürüldükten sonra metal tozları da eklenerek bir çamur karışımı hazırlanmıştır. Belirli ebatlarda kesilen açık hücreli poliüretan sünger bu karışıma daldırılarak çamur karışımı ile kaplanmıştır. Çamur karışımı ile kaplanan köpükler önce oda sıcaklığında, ardından da etüvde kurutulmuş ve son olarak da poliüretan sünger giderilerek, yapı sinterlenmiştir.

Çalışmada, %51-%60 katı oranına sahip çamur karışımları hazırlanmış, yapılan viskozite ve sedimentasyon testleri sonucunda en ideal çamur reçetesinin % 60 katı oranına sahip olan çamur karışımına ait olduğu tespit edilmiştir. Bu ideal çamur karışımı kullanılarak üretilen açık hücreli köpüklerin arşimet prensibine göre yoğunlukları 0,12-0,19 gr/cm³ arasında ve porozite değerleri % 93,2-%95,5 arasında hesaplanmıştır. Makro ve mikro yapıları incelenen açık hücreli köpüklerin XRD analizleri yapılarak; bakır takviyeli alüminyum köpüklere normal atmosfer şartlarında yapılan sinterlemeler sonucunda bakır takviyeli alüminyum köpüklerin yapılarında; CuO ve Cu₂O oluştuğu, argon atmosferinde yapılan sinterlemelerde ise bu bakır oksit yapılarının azaldığı görülmüştür. Son olarak açık hücreli alüminyum köpüklerin Vickers sertlikleri 30,6-34,7 HV aralığında ölçülmüştür.

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF OPEN CELL ALUMINUM FOAMS

SUMMARY

Metalic foams, especially aluminum foams, have received considerable amount of attention in recent years because of their low density, energy sound and vibration absorbant, high impact energy, high gas permeability and heat insulator. Metalic foams are divided into two groups according to their porosities. They are; open cell metalic foams and closed cell metalic foams. If adjacent cells seperated by cell walls or faces it is known as closed cell foam, if pores are related each other it is known as open cell foam. Open cell foams are used for functional uses such as filters, heat exchanger, water purifications owing to high gas and heat permeability. Open cell aluminum foams can be produced by using; investment casting with polymer foams, casting around space holder materials, metal injection moulding, powder space holder technique and slurry method (polymer impregnation). Among these methods, the slurry method which has lots of advantage as; controllable pore size, practicability are processed generally on ceramics, titanium and additionally in recent years on aluminum.

In this study we produced open cell aluminum, %2 and %4 copper additional aluminum foam with slurry method (polymer impregnation) and were characterised. In this method; we solubilized polyvinyl alcohol in distile water which is heated at specified temperature then we added metal powder in this mixture and made a slurry. Polyurethane foam which is cut at specified dimensions was impregnated in the slurry and polyurethane foam was coated. The coated foams were dried at room temperature then in drying oven. Lastly polyurethane burned out and metal foam was sintered.

In this study, %51-%60 solid ratio slurries have been prepared. As a result of viscosity and sedimentation test, % 60 solid ratio slurry have been determined as optimal slurry receipt. Open cell foams densities by principal of Archimed have been calculated in the range of 0,12-0,19 gr/cm³ and the porosity values have been calculated within % 93,2- %95,5 which are produced with optimal slurry receipt. Macro and micro structures of open cell foams have been examined. As a result of XRD analyses, in the structure of copper reinforced aluminium cell foams, the occurence of CuO and Cu₂O in the normal atmosphere conditions and the decrease of the ratios of CuO and Cu₂O in the argon atmosphere were determined during sintering. Vickers hardness of open cell aluminum foams have been calculated within 30,6-34,7 HV.

1.GİRİŞ

Alüminyum köpükler; sahip oldukları fiziksel özellikleri (ses, enerji ve titreşimleri absorblama; düşük ergime sıcaklığı), mekanik özellikleri (spesifik mukavemet, darbe mukavemeti), korozyon dayanımı, işlenebilirlik ve sektörel avantajları (düşük hammadde maliyeti, bulunabilirlik) sayesinde en yaygın olarak üretilen köpüklerdir [1] . Hücre yapısına göre açık ve kapalı olmak üzere ikiye ayrılan alüminyum köpüklerden açık hücreli alüminyum köpükler; yüzey alanlarının fazla olmasından kaynaklanan yüksek ısıl iletkenlik, gözeneklerinin birbirleriyle bağlantılı olmasından kaynaklanan yüksek sıvı/gaz geçirgenliği gibi özellikleri sayesinde özellikle fonksiyonel amaçlar için kullanılmaktadırlar [1,2].

Açık hücreli alüminyum köpük üretim yöntemleri başlangıç metalin fiziksel formuna göre; toz formda katı metalden üretim (metal enjeksiyon kalıpma, toz boşluk tutucu ve çamur köpüklendirme) ve ergiyik metalden üretim (polimer köpük ile hassas döküm, boşluk tutucular etrafına döküm) olmak üzere ikiye ayrılır [2].

Bu yöntemlerden çamur köpüklendirme yöntemi ilk olarak seramiklere, daha sonra titanyum ve alaşımlarına, son yıllarda ise alüminyumlara uygulanmaktadır [3,4,5]. Yöntem; metalik toz, bağlayıcı ve çözücüden oluşan bir çamur karışımı hazırlanması, açık hücreli model malzemenin bu karışım ile kaplanması ve model malzemenin yapıdan giderilerek metal yapının sinterlenmesi esasına dayanmaktadır [6].

J. Banhart çamur köpüklendirme yöntemi ile rijit metalik köpük üretilebileceğini belirtmiştir (manufact char. 589). Montanaro [7], Luyten [8], Akil [9], Dressler [10], Li [11,12], Lee [4] yaptıkları çalışmalarda; bu yöntem ile üretilecek köpüklerin gözenek boyutlarının ayarlanabilir olması ve yüksek oranda gözeneğe sahip olması, bu yöntemle açık ve kapalı hücreli köpükler üretilebilmesi, yöntemin pratik olması gibi birçok avantajının olduğunu vurgulamışlardır. N. Michailidis ve arkadaşları bu yöntem ile alüminyum köpükler üreterek bu köpüklerin görüntü temelli 3D geometrisinin ve malzeme tepkisinin FEM modeli üzerinde çalışma yapmışlardır [5].

Bu çalışmada; çamur köpüklendirme yöntemi ile açık hücreli alüminyum ve bakır takviyeli (%2 ve %4) alüminyum köpüklerin üretimi ve karakterizasyonu amaçlanmıştır.

Çalışmada ilk olarak; manyetik karıştırıcı kullanılarak saf su, bağlayıcı (polivinil alkol) ve metalik tozlardan oluşan bir çamur karışımı hazırlanmıştır. Bu karışım içerisine belirli ebatlarda kesilen model malzeme (poliüretan sünger) daldırılarak homojen bir şekilde kaplama gerçekleştirilmiştir. Kaplamadan sonra bir gün oda sıcaklığında ardından da 100 °C sıcaklıkta 6 saat kurutma yapılmıştır. Son olarak model malzeme giderme ve sinterleme işlemleri yapılarak saf alüminyum ile %2 ve %4 bakır takviyeli alüminyum köpükler üretilmiştir.

Üretilen metalik köpüklerin; fiziksel özellikleri (bağıl yoğunluk ve porozite ölçümü) belirlenmiş, makro ve mikro yapısal analizleri, kimyasal analizleri (XRD) ve mekanik (mikrosertlik deneyi) karakterizasyonları yapılmıştır.

2. METALİK KÖPÜKLER

2.1 Metalik Köpükler ve Gözenekli Malzemeler

Köpükler ve yüksek porozite içeren hücresel malzemeler yeni bir malzeme grubunu oluşturur. Bu malzemeler kapalı hücreli ise; yüksek mukavemete ve düşük özgül ağırlığa açık hücreli ise; yüksek gaz geçirgenliği ve yüksek ısıl iletkenliğe sahiptir. Ahşap, kemik, bal peteği gibi yapılar doğada bulunan gözenekli malzemelere örnek olarak verilebilir [13].

Sekil 2.1'de bir faz içerisindeki diğer bir fazın dağılımı ile oluşan yapılar görülmektedir. Burada; sıvı içinde çözünmüş gaz boşlukları köpük yapısını ifade eder. Metalik köpüğü tanımlamak için hücresel metalleri, gözenekli metalleri, katı metalik köpükleri ve metal süngerleri ayırt etmek gerekir.

Hücresel metaller : içerisinde birçok gaz boşluğu bulunan metalik bir yapıyı tanımlayan en genel ifadedir.

Gözenekli metaller : birbirini metal plakalarla veya payandalarla destekleyen ve yüksek oranda boşluk içeren metal, seramik ya da polimer malzemelerden oluşan yapılardır. Gözenekli metaller hücresel metallerin özel bir türüdür. Metalik faz, gaz fazı içeren kapalı hücrelerle bölünmüştür.

Metal köpükler : gözenekli yapılar ailesinin bir alt grubunda yer alır. Hücre şekilleri üretim ya da soğuma sekline bağlı olarak değişen çok yüzlü hücrelerden oluşurlar ve esasen köpük terimi sıvı haldeyken köpük yapısında olan metaller için kullanılır.

Metal süngerler : Genellikle boşlukları birbiri ile bağlantılı olan hücresel bir metal biçimidir [14].

Dolayısıyla gözenekleri çeşitli yöntemlerle üretilmiş her boşluklu yapı köpük olarak değerlendirilemez. Metalik köpükler hücre yapısına göre açık hücreli ve kapalı hücreli olmak üzere iki gruba ayrılır. [14,15].





2.1.1 Kapalı hücreli köpükler

Hücrelerin her birinin içerisinde gaz hapsedilmiş ve hücreler birbirinden sızdırmazlık derecesinde duvarlarla ayrılmış ise bu tür köpüklere "kapalı hücreli köpük" denir [16]. Şekil 2.2a'da kapalı hücreli metalik köpüğe örnek bir yapı ve Şekil 2.2b'de hücreleri birbirinden duvarlarla ayrılmış kapalı hücreli köpük modeli görülmektedir. Kapalı gözenekli metalik köpüklerin açık gözenekli yapılara nazaran darbe ve ses sönümleme kabiliyetleri daha iyidir. Ayrıca yüksek mukavemet, rijitlik ve darbe dayanımına sahip olduklarından yapısal amaçlar için kullanılırlar [17].



Şekil 2.2 : (a)Kapalı hücreli metalik köpük (b) kapalı hücreli köpük modeli [18].

2.1.2 Açık hücreli köpükler

Gözenekler birbiri ile bağlantılı bir halde ise bu tür köpüklere "açık hücreli köpük" denir [16]. Şekil 2.3a'da açık hücreli köpüğe örnek bir yapı, Şekil 2.3b'de ise hücre duvarları açık, açık hücreli köpük modeli görülmektedir. Açık hücreli köpüklerin gözenekleri arasındaki boşluklar ve yüzey alanının fazla olmasından dolayı, bu malzemelerin ısıl iletkenlik katsayıları oldukça yüksektir. Açık hücreli köpüklerin en önemli özellikleri yüksek gaz ve ısı geçirgenliğidir. Mekanik özellikleri kapalı hücreli köpüklere nazaran daha düşük olduğundan dolayı fonksiyonel amaçlar için kullanılırlar [17,19].



Şekil 2.3 : (a) Açık hücreli metalik köpük (b) Açık hücreli köpük modeli [18].

2.2 Metalik Köpüklerin Kullanım Alanları ve Uygulamaları

Metalik köpükler sahip oldukları sıvı/gaz geçirgenliği, termal iletkenlik, enerji, ses ve titreşim absorblama özellikleri sayesinde geniş kullanım alanına sahiptirler. Bu kullanım alanlarını; yapısal ve fonksiyonel olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür [1].

2.2.1 Metalik köpüklerin yapısal uygulamaları

Kapalı hücreli alüminyum köpükler otomotiv sanayisinde (araçların motor kısımlarında, sandviç panellerde), uçak-uzay endüstrisinde (helikopterlerin kuyruklarında, uzay araçlarının iniş takımlarında), inşaat sektöründe (viyadük altında ses emici bariyerlerde, çatı kaplamalarında, bina cephelerinde) ve denizcilik sektöründe kullanılmaktadırlar [1,20].

2.2.2 Metalik köpüklerin fonksiyonel uygulamaları

2.2.2.1 Isı değiştiriciler

Isı değiştiricilerinde aranan en önemli özellik yüksek termal iletkenliktir. Açık hücreli alüminyum köpüklerin yüzey alanlarının geniş olmasından dolayı termal iletkenlikleri oldukça yüksektir ve bu nedenle ısı değiştiricisi olarak kullanılmaktadırlar. Bu malzemeler; endüstriyel firinlarda, hava soğutmalı kondansatörlerde, kimyasal elektronik reaktörlerde, bilgisayar çiplerinde ve elektronik parçalarda kullanılmaktadırlar [1,20]. Şekil 2.4'te metal köpük ısı değiştiricisi görülmektedir.



Şekil 2.4 : Metal köpük ısı değiştirici [20].

2.2.2.2 Filtreler

Sıvı içerisinde dağılmış fiber ya da katı parçacıkları birbirinden ayırmak veya gaz içerisinde dağılmış katı ya da sıvı parçacıkları ayırmak için filtreler kullanılmaktadır. Açık hücreli alüminyum köpükler; yüksek sıvı/gaz geçirgenliği, korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı filtre ve ayırıcı olarak kullanılmaktadır [21].

2.2.2.3 Su arıtıcılar

Açık hücreli köpükler sıvı akışını sağlayabildikleri için suda çözünmüş istenmeyen iyonların konsantrasyonunu azaltmak amacıyla su arıtıcılarında kullanılmaktadırlar [21].

2.2.2.4 Susturucular

İlk olarak geleneksel malzemelerden yapılan susturucular; uygun fiyat aralıkları ve sesi absorbe etme özelliklerinden dolayı yerini açık hücreli köpüklere bırakmışlardır [1,20]. Şekil 2.5'te açık hücreli alüminyum köpükten yapılmış susturucular görülmektedir.



Şekil 2.5 : Alüminyum köpükten yapılmış susturucular [20].

2.2.2.5 Katalizör destekleri

Katalizin verimliliği; kataliz ile sıvı ya da gazın reaksiyona girdiği arayüzey genişliğine bağlıdır. Açık hücreli köpükler; süneklik ve ara yüzey genişliğine bağlı termal iletkenliklerinden dolayı katalizör olarak (örn: Nitrojen oksitin egzos dumanından uzaklaştırılması) kullanılırlar [21].

2.2.2.6 Alev tutucular

Açık hücreli köpükler yüksek termal iletkenliklerinden dolayı, alev önleyici olarak kullanılmaktadırlar. Şekil 2.6'da ERG firması tarafından yapılan alev tutucu görülmektedir [21].



Şekil 2.6 : Alüminyum köpükten yapılmış alev tutucu [22].

2.2.7 Biyo medikal uygulamalar

Açık hücreli titanyum köpükler; biyo uyumluluk, korozyona dayanıklılık ve düşük özgül ağırlık gibi özellikleriyle biyo medikal uygulamalarda kullanılmaktadırlar [21].

Açık hücreli metalik köpüklerin ihtiyaç duyulan uygulama alanına göre kullanım alanları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Uygulama ihtiyacı	İstenilen belirgin özellik	Örnek uygulamalar		
Suda çözünmüş iyon konsantrasyonunu azaltmak	Sıvı/gaz geçirgenliği	Su ariticilar		
Gürültüyü azaltma	Sesi absorbe etme	Susturucular		
Biyo uyumlu ara bağ aparatı	Biyo uyumluluk özelliği	İmplant malzeme, kalça, protezler		
Isı ile etkileşimi	Açık hücreli yapılar özellikle daha fazla yüzey alanına sahip olduklarından yüksek ısı iletim özelliklerine sahiptirler.	Isı değiştiriciler, katalizör destekleticiler, alev tutucular		
Filtreler	Yüksek sıcaklık gaz ve sıvıların filtrasyonunda	kimyasal filtre, ayırıcı		

Çizelge 2.1 : Açık hücrel	i alüminyum köpüklerin	kullanım alanları	[1,20,21]
---------------------------	------------------------	-------------------	-----------

2.3 Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri

Metalik köpük üretim yöntemleri başlangıç metalin fiziksel formuna göre; toz formda katı metalden, ergiyik metalden, metal buharından ve metal iyonlarından metalik köpük üretimi olmak üzere dörde ayrılır. Her bir üretim yöntemi ile üretilmiş malzemeler farklı yoğunluğa, farklı hücre boyutuna ve farklı hücre topolojisine sahiptir. Bu üretim yöntemlerinden bazıları ile uzun panel ve kütükler üretilirken bazılarıyla da küçük boyutlu kompleks şekilli parçalar üretilmektedir. Yer tutucu yöntemi ile düşük porozite değerli köpükler üretilirken; elektrolitik kaplama, buhar biriktirme gibi yöntemler ile yüksek porozite değerli köpükler üretilmektedir [13]. Açık hücreli metal köpüklerin üretim yöntemleri Çizelge 2.2'de açıklanmıştır. Yer tutucu, hassas döküm içi boş tozların sinterlenmesi, elektrolitik kaplama, buhar biriktirme, püskürtmeli biçimlendirme ve çamur köpüklendirme yöntemleri ile açık hücreli köpükler üretilmektedirler [13].

Başlatıcının fiziksel formu	Toz (katı/toz)	Eriyik döküm	Katı (toz)	Metal iyonları	Buhar (plazma)	Ergiyik metal	Ergiyik metal	Katı (toz)
Yöntem	Yer tutucu (space holder) Tuz ön kalıpla metal tozu karıştırılıp, ön preslenir, kalıp kaldırıldıktan sonra sinterlenir	Harcanabilir polimer önkalıba hassas döküm yapılır "Duocel"	İçi boş tozlar sinterlene rek sağlamla ştırılır (Hollow spheres)	Elektrolitik kaplama	Gaz fazından harcanabilir polimer köpük kaplanır CVD yöntemi kullanılır. "Incofoam"	Polimer ön kalıp (harcanabi lir kalıp) "Lattice Block Material"	Metal eriyik sürekli atomize olur ve spreyle yüzeye püskürtülür. "Spray forming"	Polimerik süngerin metalik çamura daldırılması ve yapının sintyerlenmesidir.
Köpük yapısının özellikleri	Birbirine bağlı yapılar elde edilir	Birbirine bağlı, yüksek kalitede, homojen por yapısı	Birbirine bağlı sentetik kompozit yapılar elde edilebilir.	Birbirine bağlı yapılar 400-500µm hücre boyutu	Birbirine bağlı rastgele bulunan yapılar 20- 400 µm hücre boyutu	Birbirine bağlı düzenli poroz yapılar	Birbirine bağlı uniform, dağılıma sahip olmayan poroz yapılar	
Prosesin özellikleri	Ucuz Boyutları kontrol edilemez	Köpükleşme oranı fazladır.	Kolay bir prosestir	Verimli bir prosestir	Mekanik olarak daha kuvvetli ve pürüzsüz yüzeye sahip yapı eldesi	Yaygın kullanımı yoktur	Oksit/karbür/s af metal ekleyerek farklı alaşımlara ait köpük elde edilir	
Köpürme oranı	<% 65	% 80-97	<%80	%92-95	%92-97	<%60	<%60	>%70
Uygulandığı metaller	Al/Zn/Pb/ Cu	Al/Zn	Çelik	Ni/Cu	Ni/Ni-Cr/Cu	Al/Zn	Çelik/Cu	Ti ve alaşımları, Al

Çizelge 2.2 : Açık hücreli metalik köpük üretim yöntemleri [1].

2.4 Alüminyum Köpükler

2.4.1 Alüminyum köpüklerin özellikleri

Alüminyum köpükler; düşük yoğunluğa, yüksek ısıl iletkenliğe, enerji ses ve titreşimleri sönümleme kabiliyetine, yüksek sıvı ve gaz geçirgenliğine, yüksek korozyon direncine sahiptirler. Farklı alüminyum köpük üretim yöntemleri ile farklı özelliklere sahip alüminyum köpükler üretilmektedir. Çizelge 2.3 'de farklı firmaların (Cymat, Alulight, Alporas ve ERG) değişik üretim yöntemleri kullanarak ticari olarak ürettikleri alüminyum köpüklerin fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir. Ticari olarak üretilen alüminyum köpükler 0,07-0,56 gr/cm³arası değişen yoğunluk ve 0,05-35 MPa arası değişen sertlik değerlerine sahiptirler [2].

Çizelge 2.3 : Ticari olarak üretilen alüminyum köpüklerin fiziksel ve mekanik özellikleri [2].

Gözenek yapısı	Kapalı Hücreli	Kapalı Hücreli	Kapalı Hücreli	Açık Hücreli
Mekanik veya fiziksel özellik	Cymat	Alulight	Alporas	ERG
Yoğunluk (gr/cm³),p	0,07-0,56	0,3-1,0	0,2-0,25	0,16-0,25
Elastisite modülü (GPa), E	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3
Kayma modülü (GPa), G	0,001-1,0	0,6-5,2	0,3-0,35	0,02-0,1
Poisson oranı (v)	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34
Çekme dayanımı (MPa) σ _t	0,05-8,5	2,2-30	1,6-1,9	1,9-3,5
Sertlik (MPa), H	0,05-10	2,4-35	2,0-2,2	2,0-3,5

2.4.2 Açık hücreli alüminyum köpük üretim yöntemleri

2.4.2.1 Polimer köpük ile hassas döküm

Polimer köpükler ile hassas döküm yönteminde Şekil 2.7'de görüldüğü gibi başlangıç malzemesi olarak açık hücreli polimer köpük kullanılır. Köpüğün açık hücreleri ısıya dayanıklı malzemelerle (mullit, fenolik reçine, kalsiyum karbonat, alçı) doldurulduktan sonra polimer köpük ısıl işlem ile uzaklaştırılır. Polimer köpüğün bıraktığı boşluklar eriyik metal ile doldurulur. Son olarak basınçlı su yardımıyla kalıp malzemesi çıkarılır ve polimer köpüğün yerini metal köpük alır [13,24].

Alüminyum, alüminyum alaşımları (6101, AlSi7Mg), bakır ve magnezyum gibi hassas döküm yapılabilen düşük ergime derecesine sahip metal ve alaşımları bu yöntemle üretilebilmektedir Bu yöntem ile üretilen açık hücreli köpükler diğer açık hücreli alüminyum köpük üretim yöntemlerinden daha fazla (% 80-97) porozite içermektedir. Fakat ısıl işlem ile uzaklaştırılan polimer köpüğün bıraktığı boşluklar dar olabilir, bu nedenle eriyik metal bu boşluklardan geçerken zorlanabilir (geçemez). Böyle durumlarda kalıbı ısıtma ya da basınç uygulamak gerekir [13,24].



Şekil 2.7 : Polimer köpük ile hassas döküm yöntemi [13].

2.4.2.2 Boşluk tutucular etrafına döküm

Boşluk tutucular etrafina döküm yönteminde; düşük yoğunluklu organik veya inorganik yuvarlak boşluk tutucular (alümina silikat, ateş kili, çözülebilir tuzlar, köpük cam küreler, alüminyum oksit küreler) eriyik ile emdirildikten sonra su ya da ısıl işlemle giderilerek metalik köpük elde edilir (Şekil 2.8).

Alüminyum, magnezyum, çinko, kurşun, kalay gibi ergime derecesi düşük birçok metal bu yöntemle üretilebilir. Yöntemde boşluk tutucu kullanılmasından dolayı por boyutu dağılımını kontrol etmek kolaydır ancak bu yöntemle üretilen köpükler en fazla % 80 porozite içermektedir. [13].



Şekil 2.8 : Boşluk tutucular etrafina döküm yöntemi [13].

2.4.2.3 Metal enjeksiyon kalıplama ve toz boşluk tutucu yöntemi

Metal enjeksiyon kalıplama yöntemi, geleneksel toz metalurjisi yöntemi ile plastik enjeksiyon kalıplama yönteminin birleşiminden oluşan bir yöntemdir. İlk olarak bağlayıcı ile metal tozu karıştırılır ve ardından yapı preslenir. Daha sonra bağlayıcı yapıdan uzaklaştırılır ve ardından sinterleme yapılır (Şekil 2.9).

Bu yöntem yüksek ve düşük ergime derecesine sahip; alüminyum, titanyum, bakır, seramik ve kompozitlere uygulanır [25].

Bu yönteme benzer bir diğer yöntem ise "toz boşluk tutucu yöntemidir". Bu yöntemin metal enjeksiyon kalıplamadan farkı boşluk tutucuların (polimetil metakrilat, karbamit, amonyum bikarbonat) da olmasıdır. (Şekil 2.9) [26].

Bu yöntem de yüksek ve düşük ergime derecesine sahip; paslanmaz çelik, alüminyum, bakır, titanyum, nikel ve bu metallerin alaşımlarına uygulanır. Her iki yöntemde de karmaşık şekilli ürünlerin üretimi mümkündür ve işlevsel olarak yüksek özellikte yapılar oluşur. Fakat toz boşluk tutucu yöntemiyle üretilen açık hücreli köpüklerin hücre boyut-dağılımını kontrol etmek kolay değildir ve bu yöntemle üretilen açık hücreli köpükler %65'den az oranlarda porozite içermektedirler. [1,26].



Şekil 2.9 : Metal enjeksiyon kalıplama ve toz boşluk tutucu yöntemi [15].

2.4.2.4 Çamur köpüklendirme (polimer emdirme) yöntemi

Çamur köpüklendirme yönteminin patenti 1963 yılında Schwartzwalder ve arkadaşları tarafından alınmıştır [7,10]. Bu yöntem literatürde; polimer emdirme ve replika yöntemi olarak da bilinmektedir.

Çamur köpüklendirme yöntemi; çamur karışımının hazırlanması, model malzemesinin kaplanması ve model malzemesinin yapıdan uzaklaştırılarak sinterleme işleminin gerçekleştirilmesi olmak üzere 3 aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak model malzeme hazırlanan çamur karışımının içerisine daldırılarak belirli bir süre bekletilir ve model malzeme çamur karışımı ile homojen bir şekilde kaplanır. Çamur karışımı ile kaplanan model malzemeye yapılan kurutma işleminin ardından

model malzeme giderilerek sinterleme işlemi gerçekleştirilir (Şekil 2.10). Bu yöntemle üretilen köpükler genellikle açık hücrelidir fakat yarı açık ve kapalı hücreli köpük elde etmek de mümkündür (Çizelge 2.4). Yöntem pratiktir. Bu yöntemi kullanırken pahalı cihaz ve ekipmanlara gerek yoktur (Çizelge 2.4) [7].



Şekil 2.10 : Çamur köpüklendirme yöntemi (a) Model malzeme (b) Model malzemenin çamur karışımına daldırılması (c) Model malzemenin çamur karışımı ile kaplanması (d) Kurutma+ model malzemenin giderilmesi+ sinterleme [27] (e) Sinterlenmiş ürün.


Şekil 2.11 : Çamur köpüklendirme yöntemi ile üretilen köpükleri etkileyen parametrelerin balık kılçığı modeli ile gösterimi.

Şekil 2.11'de verilen balık kılçığı modelinde; çamur köpüklendirme yöntemi ile üretilen alüminyum ve bakır takviyeli alüminyum köpüklerin özelliklerini etkileyen parametreler gösterilmektedir. Buna göre; çamurun viskozitesi, polimer köpüğün yoğunluğu, model malzemesinin gözenek büyüklüğü gibi parametreler bu yöntem ile üretilen köpüklerin özelliklerini etkilemektedir [9].

Model Malzeme : Çamur köpüklendirme yönteminde model malzeme olarak; poliüretan, selüloz, polivinil klorit, polistiren ve lateks gibi polimer köpükler kullanılmaktadır. Dayanıklılık, hidrofobik davranış, düşük sıcaklıkta yapıdan uzaklaşma, çamur karışımı ile kaplanabilme ve erişim kolaylığı gibi özelliklerinden dolayı en sık kullanılan model malzemesi; poliüretan köpüktür [7].

Model malzemesi üretilecek olan köpüğün gözenek boyutunu etkilemektedir. Bu nedenle model malzemesini değiştirerek istenilen gözenek boyutunda köpük üretmek mümkündür (Çizelge 2.4) [8].

Çamur Karışımı Hazırlama : Bu yöntemin en önemli ve zor noktalarından biri uygun çamur reçetesinin bulunmasıdır (Çizelge 2.4) [7]. Hazırlanan çamur karışımının model malzeme duvarlarına üniform bir şekilde tutunması ve sinterlendikten sonra geride yoğun bir yapı bırakması istenir. Genellikle % 50-70 oranında katı içeren çamur karışımları bu yöntem için idealdir. Bundan daha az viskoz karışımlarda karışımın model malzemeye tutunmasında zorluklar yaşanır. Bundan daha fazla viskoz karışımlarda ise karışım model malzemesinin her noktasına homojen bir şekilde nüfuz edemez [7].

Üretilecek seramik ya da metalik köpüğe göre çamur karışımına farklı ilaveler katılmaktadır. Genellikle hepsinde ortak olarak; metal ya da seramik toz, çözücü ve uygun bağlayıcı kullanılmaktadır. Bunun yanında gerekli görüldüğünde çamur karışımına; seyreltici, ıslatıcı ajanlar ve viskozite ayarlayıcılar da katılmaktadır [28].

a) Çözücü : Çamur reçetelerini kullanılan çözücüye göre sulu ve susuz olarak ikiye ayırmak mümkündür. Genellikle çamur karışımlarında çözücü olarak saf su kullanılmaktadır. Saf su kullanılmasının nedeni; çamur karışımını safsızlıklardan arındırmaktır. Susuz yapılan çamur karışımlarında ise çözücü olarak; trikloretan, etanol kullanılmaktadır [28].

b) Metal/seramik toz : Model malzeme duvarlarını daha homojen kaplaması için 45 μm' den daha küçük boyutlardaki tozlar ve sinterleme aşamasında tozların birbirleri ile daha iyi bağ yapmaları açısından genellikle eşeksenli tozlar kullanılır [7].

c) Bağlayıcı : Bağlayıcı ile yapıda kurutma sonrası dayanıklılık sağlanarak, model malzeme giderme işleminde organik kısmın buharlaşması esnasında yapının çökmesi engellenmektedir. Bunun yanında bağlayıcı, çamur viskozitesini ayarlamaya yardımcı olur. Üretilecek metal ya da seramik köpüğe göre farklı özellikte ve viskozite değerlerinde bağlayıcılar kullanılmaktadır. Kullanılan bağlayıcı miktarı arttıkça viskozitede artışlar meydana gelmektedir [7,11,12,29].

d) Dağıtıcı Madde : Dağıtıcı madde ilavesi ile çamur içindeki toz parçacıklarının topaklanarak çökelmesi önlenerek metal ya da seramik tozlarının homojen bir şekilde askıda kalması sağlanır. Dağıtıcı madde miktarı arttıkça viskozite önce azalmakta ve belirli bir değere geldikten sonra artmaktadır (Şekil 2.12) [12].





Model Malzemenin Kaplanması : İstenilen ebatlarda kesilen model malzeme çamur karışımına daldırılarak kaplama gerçekleştirilir. Çamur karışımının model malzemesinin her bölgesine nüfuz etmesi için model malzemesi çamur karışımının içerisinde 10-15 dakika bekletilmektedir [30]. Bu emdirme işleminden sonra model malzeme sıkıştırılarak üzerindeki fazla çamur ve içerisindeki hava giderilir. Bu işlem birkaç kez tekrarlanır [7]. Bir diğer çamur giderme yöntemi ise haddelemedir. Haddeleme ile çamur karışımı ile kaplanan model malzeme merdaneler arasından geçirilerek fazla çamur giderilmektedir [31].

Kurutma : Çamur karışımı ile kaplanan model malzemede, çamur karışımı içerisindeki suyu gidermek için kurutma yapılır. Kurutma prosesinde; yapıdaki suyun kademeli olarak yapıdan uzaklaşması ve yapıda çatlaklar bırakmaması istenir. Bu nedenle; ilk olarak çamur içerisindeki suyun bir kısmı oda sıcaklığında kurutma yapılarak giderilir ve ardından etüvde yapılan kurutma ile yapıdaki suyun tamamı uzaklaştırılır. Etüvde yapılan kurutmalarda, suyun buharlaşarak yapıyı terk edeceği sıcaklık (100 0 C civarında) kurutma işlemi için yeterlidir [7,10].

Model Malzemenin Giderilmesi ve Sinterleme : Çamur karışımı ile kaplanan model malzemeye yapılan kurutmanın ardından model malzeme sinterleme işlemi ile ortamdan uzaklaştırılır. Model malzeme giderme sıcaklığı, model malzemesinin yoğunluğuna göre farklılık göstermekle birlikte genellikle 450-600 °C arasındadır [32-37]. Model malzeme giderme işlemi oldukça kritik bir işlemdir çünkü model malzeme sistemden çok hızlı veya çok yavaş uzaklaştırıldığında yapıda çökmeler gerçekleşmektedir. Bu nedenle model ısıtma hızı optimize edilmelidir [10-12].

Model malzeme giderme işleminin ardından metal ya da seramik tozların birbirleri ile birleşmesini sağlamak ve kademeli bir şekilde tozlar arasındaki gözenek hacmini azaltmak amacıyla sinterleme işlemi yapılmaktadır [15]. Çamur köpüklendirme yönteminin doğası gereği metal ya da seramik tozların preslenmesi söz konusu olmadığından tozlar birbirleri ile sinterleme aşamasında bağ yapabilmektedir [7,10].

Avantajları	Dezavantajları		
-Açık, kapalı ve yarı açık hücreli köpük elde etmek mümkündür.	-Uygun çamur reçetesinin bulunması zordur.		
-Bu yöntemle seramik ve metalik köpük elde edilebilir.	-Yöntemin doğası gereği model malzemenin giderilmesi ile yapıda boşluklar kalmaşı ve yöntemde presleme		
-Model malzemeyi değiştirerek gözenek boyutunu değiştirmek mümkündür.	olmadığı için metal ya da seramik tozların yalnızca sinterleme ile bağ yapmalarından dolayı düşük mekanik özellikte köpükler		
-Pratik bir yöntemdir	üretilir.		
-Pahalı cihaz ve ekipmanlara gerek yoktur.			

Çizelge 2.4 : Çamur köpüklendirme yönteminin avantaj ve dezavantajları [7,8].

Çamur köpüklendirme yöntemi; yüksek ve düşük ergime sıcaklığına sahip metal ve seramiklere uygulanmaktadır (Çizelge 2.4). Yöntem, ilk olarak seramiklere (alfaalümina, alümina-silikat, zirkonya, mullit, kalsiyum alüminat, kaolin, hematit...) daha sonra titanyum ve alaşımlarına uygulanmıştır [3]. Bununla birlikte yöntem, son zamanlarda da alüminyumlara uygulanmaktadır. Çizelge 2.5 'de çamur köpüklendirme yöntemi ile yapılan çalışmalar gösterilmiştir.

Montanaro ve arkadaşları iki çeşit çamur reçetesi hazırlayarak açık hücreli alümina köpük üretmişlerdir. Bu reçetelerden birinde çözücü olarak saf su, diğerinde ise 90 trikloretilen-10 etanol kullanarak, % 82 katı oranında çamur karışımları hazırlamıştır. Bu karışımların % katı oranlarının model malzemeyi kaplamadaki etkileri ve çamur karışımlarına ilave edilen farklı oranlardaki katkı maddeleri viskozite ile ilişkilendirilmiş ve % 87 porozite içeren seramik köpükler üretmişlerdir [7]. Richardson ve arkadaşları ise katalizör olarak kullanılacak alümina köpükleri % 80 katı içeren çamur karışımı ile üretmiştir [28]. Kuebler ve arkadaşları 80 ve 90 ppi gözenek boyutundaki model malzemeleri sırasıyla % 70 ve 75 alümina içeren çamur karışımları ile kaplayarak % 87 oranında porozite içeren köpükler üretmişlerdir [32]. Akil ve arkadaşları yine bu yöntemle % 70 oranında porozite içeren, kil kaolin ve kuvars karışımlarından oluşan köpük üreterek, üretilen köpüklerin mikro yapılarını analiz etmiş ve köpüklere basma testi uygulamıştır [9]. Dressler ve arkadaşları ise % 65 katı oranına sahip çamur karısımı ile açık hücreli kalsiyum potasyum sodyum ortafosfat (Ca₂KNa(PO₄)₂) köpük üreterek ve köpük model malzemesi olan poliüretan süngerin, yanarak yapıyı terk etme davranışını incelemiştir [10].

Titanyum köpük üretimi için Li ve arkadaşları; çamurun reolojik özelliklerini etkileyen faktörleri inceleyerek üretilen Ti-6AI-4V köpüğün karakterizasyonunu yapmışlardır ve ürettikleri köpüklerin porozitesini % 90 olarak hesaplamışlardır [11,12]. Cachinho ve arkadaşları seyreltici türü (dispex ve dolapix) ve viskozite arttırıcı maddenin (carrageenan) çamur reolojisi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. En ideal bulunan çamur konsantrasyonu (% 45 katı) ile üretilen titanyum hidrür (TiH₂) köpüklerin; mekanik, korozyon ve in vitro (yapay ortam) davranışlarını incelemiş ve köpüklerin porozitelerini % 75 olarak hesaplamışlardır [38,39]. Zhao ve arkadaşları titanyum köpük üreterek köpüğün biyo aktivitesini arttırmak için titanyum köpüğü kalsiyum fosfat ile kaplamıştır ve ürettikleri köpüklerin porozitesini % 78 olarak hesaplamışlardır [40]. Ahmad ve arkadaşları ürettikleri % 72 oranında porozite içeren titanyum köpüklerin; basma dayanımlarını ölçmüş, mikro yapılarını ve XRD analizlerini incelemiştir [41]. Lee ve arkadaşları çözücü olarak alkol kullanarak %

70 oranında porozite içeren titanyum köpük üzerine hidroksiapatit /TiO₂ kaplayarak, köpüklerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. [4].

Son olarak alüminyum köpük üretimi için Michailidis ve arkadaşları da bu yöntemle alüminyum köpük üreterek, açık hücreli alüminyum köpüklerin görüntü temelli 3D geometrisinin ve malzeme tepkisinin FEM modeli üzerinde çalışma yapmışlardır [5].

Akil ve Michailidis'in yaptığı çalışmalar dışında bütün çalışmalarda iki ya da daha fazla kademeli sinterleme yapılmıştır. Sinterlemenin ilk aşamasında model malzeme giderilerek diğer aşamalarında metal/seramik yapı sinterlenmiştir [4,5,7,9-12,38-41].

Çizelge 2.5 : Çamur köpüklendirme yöntemi ile üretilen seramik köpükler, sinterleme proses akışı, fiziksel ve mekanik özellikleri [4,5,7,9-12,32,38-41].

Çalışma grubu	Üretilen köpük	Kullanılan malzemeler	Sinterleme proses akışı	Mekanik ve fiziksel özellikler
Montanaro ve grubu, 1998	Al ₂ 0 ₃	Al ₂ 0 ₃ (%47), C ₂ O ₃ (%13), kaolin (%3,5), bentonit (%1), suda kolloidal Al fosfat (%14,5) -% 82 katı Al ₂ O ₃ (%47,5),90 trikloretilen-10 etanol (% 47,5),	$0 {}^{0}C \underline{-5 C'dk}{500 C} 500 C \underline{-12'dk}{1350^{0}C} (5 sa)$	P:%87
		Butvar B-76(bağlayıcı) (%1,9) Carbowax PEG-300 (%1), Ucon 50-HB-2000 (%1.9), Sarkosyl O (% 0,1) (seyreltici), MgO(%0,2)		
Richardson ve grubu, 2000	Al ₂ 0 ₃	10 ppi PU, Al ₂ O ₃ ,SiC, ,bentonit, silika sol (bağlayıcı),poli etilenimin (viskozite ayarlayıcı)-% 80 katı	$0{}^{0}C\frac{1\ C/dk}{1}600{}^{0}C\frac{5}{2}$ $\frac{C/dk}{1}1350^{0}C\ (1\ sa)$	D:0,30 gr/cm ³ ,σ _{basma} : 2,89Mpa
Kuebler ve grubu, 2006	Al ₂ 0 ₃	80 ppi PU, % 75 Al ₂ O ₃ ,fosforik asit 90 ppi PU, % 70 Al ₂ O ₃ ,fosforik asit	0 ⁰ C <u>0.7 C/dk</u> 500 ⁰ C <u>1.3 C/dk</u> 1000 ⁰ C	P:%87
Akil ve grubu, 2008	Seramik	Kil(%10), kaolin (%40), kuvartz (%30), feldspat (%20), saf su	$0 {}^{0}C \frac{5 C/dk}{(2 sa)} 1250 {}^{0}C$	P:%70,6, d:0,59-1,18 gr/cm ³ σ _{basma} : 2,6-23,07Mpa
Dressler ve grubu,2009	Ca ₂ KNa (PO ₄) ₂	90 ppi PU, Ca ₂ KNa(PO ₄) ₂ -% 65 katı	0 °C→260 °C (6 dk)→500 °C (1 sa)	-

Çalışma grubu	Üretilen köpük	Kullanılan malzemeler	Sinterleme proses akışı	Mekanik ve fiziksel özellikler
Li ve grubu, 2004	Ti6Al4V	Ti6Al4V tozu, PEG4000, MC, Dolapix, Amonyum çözeltisi,1-oktanol	$0 {}^{0}C \rightarrow 500 {}^{0}C \rightarrow$ 1250 ${}^{0}C$ (2 sa) vakum firin	P: %90 ; Por Boyutu: 400-700 μm ; σ _{basma} : 10,3 ±3,3 Mpa; E: 0,8±0,3 GPa
Cachinho ve grubu, 2008	TiH2	TiH2 toz, Dispex A40, k- Carrageenan	0 °C→500 °C (2 sa) →1000 °C (4 sa) vakum firin	P: %75; σ _{basma} : 23.72 ±1,12 Mpa; E: 0,3±0,003 GPa
Zhao ve grubu, 2008	Ti	Ti toz, PVA	0 °C→600 °C →1300 °C (2 sa) vakum firm	P: %78; Por Boyutu:500-800 μm; max σ _{basma} : 8,6Mpa
Ahmad ve grubu,2008	Ti	Ti toz, PEG, CMC	0 0 C→600 0 C (1 sa) →1250 0 C (2 sa)	P: %72; Por Boyutu: 300-500 μm ; σ _{basma} : 14,85Mpa
Lee ve grubu, 2009	TiH ₂	TiH ₂ toz: 60gr, etil alkol:200 ml, PVB:3g TEP: 3g	Vakum firin 0 0 C→800 0 C (3 sa) →1300 0 C (2 sa)	P: % 70 σ _{basma} : 18 ±0.3 MPa
Michailidis ve	Al	PU (850 μm) ,Al (4 μm),	Vakum firin 0 ºC→450 ºC	_
grubu, 2009		organik solüsyon		

Çizelge 2.5 : Çamur köpüklendirme yöntemi ile üretilen seramik köpükler, sinterleme proses akışı, fiziksel ve mekanik özellikleri [4,5,7,9-12,32,38-41] (devam).

2.4.3 Partikül takviyeli alüminyum köpükler

Alüminyum, yüksek elektronegatif potansiyele sahip bir metal olmasına rağmen metal yüzeyinde oluşan oksit filmi sayesinde; dış hava şartlarına, suya, birçok nötr ve zayıf asit çözeltilerine karşı oldukça yüksek dayanıma sahiptir. İlk oluşmaya başladığında gözenekli ve yumuşak olan oksit filmi, alüminyum oksit filmi haline geldiğinde sertleşerek yoğun bir oksit filmi oluşturur [42,43].

Alüminyum alaşımlı toz ya da granüllerden metal köpük üretilirken alüminyum yüzeyinde yoğun bir oksit tabakası oluşur ve metal köpük üretimi zorlaşır bu nedenle; alüminyum içerisine partikül takviyesi yapılarak metal köpük üretilebilmektedir. Alüminyum köpüğe yapılan takviyeler; metalik (bakır, silisyum, magnezyum, kalay) ve seramik (Y₂O₃, SiC) takviyeler olmak üzere ikiye ayrılır [13].

Alüminyum köpüğe yapılan; bakır, silisyum ve magnezyum gibi metal partikül takviyeleri 595-625 ⁰C sıcaklıklarda ötektik sıcaklarını düşürerek alaşımları oluştururlar [13]. Banhart ve arkadaşları Al, Si ve Cu'yu karıştırarak AlSi6Cu4 alüminyum alaşımını oluşturmuşlar ve köpürtücü ajan ilayesi ile kapalı hücreli alüminyum alaşımlı köpüğü üretmişlerdir [44,45]. Raj ve arkadaşları ise 6061 alüminyum alaşımına %4 bakır takviyesi ile 730 ⁰C'de yapı içerisinde Al₂Cu intermetalik bileşiklerini oluşturarak dayanımı arttırmayı amaçlamışlardır [46-48]. Bafti ve arkadaşları boşluk tutucu yöntemi ile ürettikleri alüminyum köpüklere yaptıkları; magnezyum (%1) ve kalay (%1) takviyesi ile alüminyum köpüğün sinterlenmesi esnasında oluşan oksit filmini parçalayarak sinterlenmeye olanak sağlamışlar ve köpüklerin dayanımını arttırmışlardır [49]. Surace ve arkadaşları alüminyum köpüğe % 0,15 oranında Mg ilave ederek sinterleme sırasında oksidasyonu önlemişlerdir [50]. Sun ve arkadaşları ise % 0-0,6 Mg ilaveli alüminyum köpüklerin oksidasyonunu inceleyerek, Mg ilavesinin alüminyum köpükte oluşacak oksidasyonu önlediğini ve köpüğün enerji absorblama özelliğini arttırdığını tespit etmişlerdir [51].

Zhao ve arkadaşları boşluk tutucu yöntemi ile ürettikleri alüminyum köpüklere Y_2O_3 takviyesi yaparak; alüminyum partiküllerinin neden olduğu oksit tabakasını parçalayıp sinterleme aşamasında alüminyum partikülleri arasında bağlanmayı sağlayarak mekanik özellikleri arttırmayı amaçlamışlardır. % 0,3; %0,5; %0,8 ve % 1,2 oranlarında Y_2O_3 ile takviyelendirilerek üretilen köpüklerden %0,5 Y_2O_3 içeren alüminyum köpüğün en iyi partiküller arası bağ yaptığı ve sertlik değerlerinin de diğer takviyelilere göre daha iyi olduğu görülmüştür [52]. Mu ve arkadaşları köpüklerin titreşim sönümleme kabiliyetini arttırmak için alüminyum köpüklere bakır kaplı SiC karbon fiberler takviyesi yapmışlar ve bu takviye elemanının oda sıcaklığında alüminyum köpüklerin sönümleme kabiliyetine etkisini araştırmışlardır [53]. Çizelge 2.6'da literatürde alüminyum köpüklere ilave edilen takviye elemanlarını ve takviye edilme nedenleri açıklanmaktadır.

Takviye çeşidi	Takviye elemanları	Amaç
	Bakır	Oksidasyonu önlemek, dayanımı arttırmak
	Silisyum	Oksidasyonu önlemek
Metal	Magnezyum	Sinterleme esnasında oluşan oksit filmini parçalayarak sinterlemeye olanak sağlamak, dayanımı arttırmak, köpüğün enerji absorblama özelliğini arttırmak.
	Kalay	Dayanımı arttırmak
	Y ₂ O ₃	Sinterleme esnasında partiküller arası bağlanmayı sağlayarak sertliği arttırmak
Seramik	SiC	Titreşim sönümleme kabiliyetini arttırmak, oksidasyonu önlemek

Çizelge 2.6 :	Alüminyum köpüklere ilave edilen metalik ve seramik takviye
	elemanları [44-53].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Deneylerin Yürütülmesi

Açık hücreli metalik köpüklerin üretiminde yöntem olarak Şekil 3.1'de verilen proses akış şeması izlenmiştir. Köpük üretimi; çamur karışımı hazırlanması; metalik köpüklerin üretiminde kullanılan model görevi gören poliüretan süngere, hazırlanan çamurun emdirilmesi; poliüretan süngerlerin sistemden uzaklaştırılması ve sinterleme olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1'de verilen proses akışında aynı zamanda karakterizasyon çalışmaları da yapılmıştır. İlk karakterizasyon aşamasında deneylerde kullanılan malzemeler analiz edilmiş, sonrasında hazırlanan çamur karışımı incelenmiş ve son aşamada üretilen açık hücreli köpüklerin morfolojik, yapısal, kimyasal ve mekanik özellikleri incelenmiştir.



Şekil 3.1 : Tez çalışmasının proses akış şeması.

3.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler

3.2.1 Alüminyum ve bakır tozu

Deneylerde metalik toz olarak % 99,5 saflıkta alüminyum tozu (Alfa Aesar) ve % 99+ saflıkta bakır tozu (Sulzer Metco) kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan alüminyum tozu (Şekil 3.2) ve bakır tozunun (Şekil 3.4) toz boyutu ve morfolojisi taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.



Şekil 3.2 : Deneyde kullanılan alüminyum tozlarının SEM görüntüsü.





Deneyde kullanılan metalik tozların SEM analizlerine göre; alüminyum tozunun küremsi püskürtme toz, bakır tozunun da küresel toz olduğu görülmüştür. Metalik tozların partikül boyut analizleri Mastersizer 2000 marka partikül boyut ölçüm cihazında ölçülmüştür. Şekil 3.3 ve 3.5'de sırasıyla alüminyum ve bakır tozlarının partikül boyut dağılımı verilmiştir. Buna göre; alüminyum tozu $d_{(50)}$ değerinin 10,81 µm ve bakır tozu $d_{(50)}$ değerinin 9,43 µm olduğu saptanmıştır. Çizelge 3.1 de partikül boyut analizi sonuçları detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3.4 : Deneyde kullanılan bakır tozlarının SEM görüntüsü.



Şekil 3.5 : Deneyde kullanılan bakır tozunun partikül boyut analizi.

Çizelge 3.1 : Alüminyum ve bakır tozlarının partikül boyut analizi sonuçları.

Analiz sonuçları	Al tozu	Cu tozu
Partikül yüzey alanı (m ² /g)	1,24	1,34
Ortalama partikül boyutu (µm)	11,56	15,96
d(0,1) (μm)	1,99	1,59
d(0,5) (μm)	10,81	9,43
d (0,9) (µm)	21,40	35,07

3.2.2 Bağlayıcı

Deneyde bağlayıcı olarak ticari ismi Mowiol 5/88 olan polivinil alkol kullanılmıştır.

3.2.3 Model malzeme

Model malzeme olarak kimyasal formülü C₂₅H₄₂N₂O₆ olan 25 ve 40 ppi gözenek boyutunda açık hücreli poliüretan sünger kullanılmıştır. Bu süngerlerin sistemden uzaklaştırılıma davranışları Perkin ElmerTM Diamond marka Termo Gravimetrik Analiz (TGA) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) cihazı ile incelenmiştir. Süngerler argon atmosferi altında 800 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Şekil 3.6' da TGA ve DTA sonuçları gösterilmektedir. Bu süngerlerin, argon atmosferi altında TGA ve DTA analizi ile 250 °C civarındaki sıcaklıktan 400 °C sıcaklığa kadar çok yüksek bir ağırlık kaybına uğradığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.6 : PU süngerin argon atmosferi altında 800 °C sıcaklığa kadar TGA ve DTA sonuçları.

3.3 Çamur Karışımı Hazırlama ve Karakterizasyonu

3.3.1 Çamur karışımı hazırlama

Metalik köpüklerin üretimi için Çizelge 3.2 ve 3.3'de gösterilen oranlarda 6 değişik konsantrasyonda çamur karışımı hazırlanmıştır. Hassas terazide (Precisa XB220A) tartılan polivinil alkol ile 95 ^oC'ye kadar ısıtılan saf su manyetik karıştırıcıda (IKA RH Basic) 1000 devir /dak hızla, 30×6 mm boyutundaki manyet balıkla 1 saat karıştırılmıştır. Polivinil alkolün saf su içerisinde çözüldüğü sıcaklık 95 ^oC olduğu

için, karışım boyunca bu sıcaklığın muhafaza edilmesine dikkat edilmiştir. Tartılan metal tozları, polivinil alkol-su karışımının içerisine ilave edilerek 2 saat daha manyetik karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılmıştır.

Karışım no	Üretilen köpük	Saf su miktarı (ml)	Alüminyum toz miktarı (gr)	Mowiol (PVAL) miktarı (gr)
1	Alüminyum	50	46	6
2	Alüminyum	45	46	6
3	Alüminyum	50	60	6
4	Alüminyum	50	70	6

Çizelge 3.2 : Alüminyum çamur karışımlarının saf su, metalik toz ve bağlayıcı oranları.

Çizelge 3.3 : Bakır takviyeli alüminyum çamur karışımlarının saf su, metalik toz ve bağlayıcı oranları.

Karışım no	Üretilen köpük	Saf su miktarı (ml)	Alüminyum toz miktarı (gr)	Bakır toz miktarı (gr)	Mowiol (PVAL) miktarı (gr)
5	%2 bakır takviyeli alüminyum	50	68,6	1,4	6
6	%4 bakır takviyeli alüminyum	50	67,2	2,8	6

3.3.2 Sedimentasyon testi ve viskozite ölçümü

Deneylerde hazırlanan 4, 5 ve 6 numaralı çamur karışımları (Çizelge 3.2 ve 3.3) 10 ml'lik cam mezürler içersine koyularak; 0, 30, 60, 120, 180 dk ve 24 saat bekleme sürelerinde mezür içersinde çöken madde miktarları gözlenmiştir.

Aynı çamur karışımlarının viskoziteleri Brookfield model DV-2 marka viskozimetre cihazında SC 14 spindle ile ölçülmüştür.

3.4 Emdirme ve Kurutma

Karıştırma tamamlandığında belli büyüklüklerde kesilen 25 ve 40 ppi gözenek boyutundaki poliüretan süngerler, hazırlanan çamur karışımlarına 20 dakika boyunca emdirilmiş ve çamur karışımının poliüretan süngere homojen şekilde nüfuz ederek kaplanması sağlanmıştır. Kaplanan numuneler 1 gün oda sıcaklığında, ardından etüvde 100 ⁰C'de 6 saat kurutulmuştur.

3.5 Model Malzemenin Giderilmesi ve Sinterleme

Açık hücreli metalik köpükler normal atmosfer şartlarında ve argon atmosferli vakumlu ortamda 500 0 C'de poliüretan süngerleri giderilerek 620 0 C'de 4 ve 7 saat sinterlenmiştir (Çizelge 3.4).

Sinterlenen açık hücreli köpük	Model malzeme gözenek boyutu (ppi)	Sinterleme süresi (saat)	Sinterleme sıcaklığı (⁰ C)	Sinterleme proses akışı	Fırın atmosferi
Alüminyum	25-40	4	620	$\begin{array}{c} 0 \ {}^{0}\mathrm{C} \frac{2 \ \mathrm{sa}}{620} 500 \ {}^{0}\mathrm{C} \frac{10 \ \mathrm{dk}}{620} \\ \end{array}$	Normal atmosfer
Alüminyum	25-40	7	620	$\begin{array}{c} 0 \ {}^{0}\mathrm{C} \frac{2 \ \mathrm{sa}}{620} 500 \ {}^{0}\mathrm{C} \frac{10 \ \mathrm{dk}}{620} \\ \end{array}$	Normal atmosfer
%2 Bakır takviyeli	25-40	4	620	$0\ {}^{0}\mathrm{C}\frac{2\ \mathrm{sa}}{620}\ {}^{0}\mathrm{C}\frac{10\ \mathrm{dk}}{620}$	Normal atmosfer
%2 Bakır takviyeli	25-40	7	620	$0\ {}^{0}\mathrm{C}\frac{2\ \mathrm{sa}}{620}\ {}^{0}\mathrm{C}\frac{10\ \mathrm{dk}}{0}$	Normal atmosfer
%2 Bakır takviyeli	40	7	620	$\begin{array}{c} 0 \ {}^{0}\mathrm{C} \frac{2 \ \mathrm{sa}}{620} 500 \ {}^{0}\mathrm{C} \frac{10 \ \mathrm{dk}}{620} \\ \end{array}$	Argon atmosferli
%4 Bakır takviyeli	25-40	4	620	$0\ {}^{0}\mathrm{C}\frac{2\ \mathrm{sa}}{620}\ {}^{0}\mathrm{C}\frac{10\ \mathrm{dk}}{10\ \mathrm{dk}}$	Normal atmosfer
%4 Bakır takviyeli	25-40	7	620	$0\ {}^{0}\mathrm{C}\frac{2\ \mathrm{sa}}{620}\ {}^{0}\mathrm{C}\frac{10\ \mathrm{dk}}{62}$	Normal atmosfer
%4 Bakır takviyeli alüminyum	40	7	620	$0\ {}^{0}\mathrm{C}\frac{2\ \mathrm{sa}}{620}\ {}^{0}\mathrm{C}\frac{10\ \mathrm{dk}}{620}$	Argon atmosferli vakumlu ortam

Çizelge 3.4 : Karakterizasyonu yapılan açık hücreli köpüklerin sinterleme sıcaklık ve süreleri.

3.6 Açık Hücreli Metalik Köpüklerin Karakterizasyonu

3.6.1 Yoğunluk ölçümü ve porozite tayini

Üretilen açık hücreli alüminyum ve bakır takviyeli alüminyum köpüklerin yoğunlukları Arşimet (Archimedes) prensibine göre ölçülmüştür. Kuru ağırlıkları ölçülen açık hücreli metalik köpükler, vakum yağı ile mühürlendikten sonra havadaki ve saf su içerisindeki ağırlıkları da ölçülerek yoğunlukları ve % porozite değerleri hesaplanmıştır.

Arşimet prensibine göre yoğunluk hesaplanırken aşağıdaki formüllerden yararlanılmıştır.

 $d=M1 \times dw/(M2-M3)$ (3.1)

(3.2)

dw= 1,0017- 0,0002315T

Bu formüllerdeki;

M1: Kuru olarak tartılan numune,

M2: Soğuk bakalit ile kaplanmış olarak tartılan numune,

M3: Soğuk bakalit ile kaplanmış olarak sıvı içinde askıda tartılan numune,

dw: Ölçüm sıcaklığında sıvının yoğunluğudur.

T: Ölçüm sıcaklığı

d: Açık hücreli köpüğün yoğunluğu

Açık hücreli metalik köpüklerin % porozite değeri aşağıdaki formüllerden yararlanılarak hesaplanmıştır.

$d=1-d_{rel}$	(3.3)
$d_{rel} = d_{k\ddot{o}p\ddot{u}k}/d_{bulk}$	(3.4)
Bu formüldeki;	
1 4 1 1 1 1	

d_{köpük}: Açık hücreli köpüğün yoğunluğu,

d_{bulk}:Metalin yoğunluğu,

d_{rel}: Relatif yoğunluktur.

3.6.2 Makro yapı incelemeleri

Açık hücreli metalik köpüklerin makro yapı incelemeleri stereo mikroskopta (Leica MZ 125) yapılmıştır.

3.6.3 Mikro yapı incelemeleri

Köpüklerin mikro yapı incelemeleri ışık (Leica) ve taramalı elektron (JEOL JSM 5410) mikroskobunda yapılmıştır. Işık mikroskobunda inceleme yapmak üzere soğuk bakalite alınan köpükler, sırasıyla 240, 320, 600, 800, 1200 ve 2500 mesh'lik zımpara ile zımparalama ve parlatma cihazında (Struers LaboPol-5) su altında zımparalandıktan sonra 3 μ m'lik ve 1 μ m'lik elmas pasta ile parlatılmış ve Keller solüsyonu (2 ml HF, 5 ml HNO₃, 3 ml HCl, 190 ml su) ile dağlanmıştır. Metalik köpüklerin hücre duvarları ve hücre köşeleri analiz edilmiş, çatlaklı yapılar bulunmuş, makro ve mikro gözenek boyutları ölçülmüştür.

3.6.4 XRD analizi

Metalik köpüklerin XRD analizleri Rigaku MiniFlex marka XRD cihazında CuK α radyasyonu ile 30 kV ve 15 mA'de ve 3°/dak ile 10-70° arasında, dakikada 3° hız ile yapılmıştır.

3.6.5 Sertlik deneyi

Köpüklerin mekanik özelliklerini belirlemek için köpüklerin açık gözenekleri reçine ile doldurulmuş ve yüzeyleri zımparalanarak parlatılmıştır. Köpüklerin sertlikleri Leica marka mikro sertlik cihazında, köpüklere 12 saniye boyunca 25 gf yük uygulanarak elmas Vickers ucu kullanılarak ölçülmüştür.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1 Çamur Karakterizasyonu

Şekil 4.1'de sedimentasyon testinde kullanılan mezür içerisindeki çamur karışımında, 24 saat sonra meydana gelen çökme gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Sedimentasyon testinde kullanılan mezur içerisindeki 3 numaralı karışımın 24 saat sonundaki çökelme miktarı.

Su ve metal toz oranları farklı, bağlayıcı (PVAL) oranları aynı olan alüminyum çamur karışımlarından (Çizelge 4.1), 24 saat sonunda en fazla çökme gösteren ve en az kararlı olan karışım %51 katı oranına sahip 1 numaralı karışım, en az çökme gösteren ve en kararlı olan ise % 60 katı oranına sahip 4 numaralı karışımdır. Cachinho ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda; çamur içerisindeki % katı oranı az olduğunda çözelti içerisindeki partiküller birbirinden uzak ve partiküller arası Van der Waals kuvvetlerinin zayıf olduğunu, % katı oranı fazla olan karışımda ise partiküller arası mesafe yakın olduğu için Van der Waals kuvvetlerinin güçlü

olduğunu vurgulamıştır [39]. Bu nedenle; % katı oranı en az dolayısıyla partiküller arası Van der Waals kuvvetleri en zayıf olan 1 numaralı karışım, sedimentasyon testinde 24 saat sonunda en fazla çökme gösteren karışımdır. % Katı oranı en fazla dolayısıyla partiküller arası Van der Waals kuvvetleri en zayıf olan 4 numaralı karışım, sedimentasyon testinde 24 saat sonunda en az çökme gösteren karışımdır.

Alüminyum çamur karışımlarından viskozitesi en düşük dolayısıyla akışkanlığı en fazla olan çamur karışımı 1 numaralı, viskozitesi en yüksek olan dolayısıyla akışkanlığı en az olan çamur karışımı ise 4 numaralı çamur karışımı olarak tespit edilmiştir. Alüminyum çamur karışımların viskozitelerini büyükten küçüğe doğru sıraladığımızda; % 60 katı içeren 4 numaralı karışım> % 56 katı içeren 3 numaralı karışım> % 54 katı içeren 2 numaralı karışım> % 51 katı içeren 1 numaralı karışım olduğu görülür (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 : Alüminyum çamur karışımlarının sedimentasyon testi sonunda çökme miktarları ve viskozite değerleri.

Karışım no	Saf su miktarı	Al toz miktar	PVAL miktarı	Metalik çamur miktarı (ml)				% katı oranı	Viskozite (Cp)
	(ml)	1 (gr)	(gr)	0 dk	30dk	3 sa	24 sa		
1	50	46	6	10	9,5	9,5	8,5	51	400
2	45	46	6	10	10	9,9	9,0	54	3461
3	50	60	6	10	10	9,5	9,0	56	6432
4	50	70	6	10	10	10	9,4	60	10263

Bakırın molekül ağırlığının alüminyumun molekül ağırlığından fazla olmasından dolayı aynı katı oranlarına sahip çamur karışımlarında (4,5 ve 6 numaralı karışımlar) bakır miktarı arttıkça viskozitenin de artması beklenilmektedir [54]. Fakat aynı katı oranına sahip bu karışımlara yapılan %2 (5 numaralı karışım) ve %4 (6 numaralı karışım) oranlarındaki bakır takviyesinin viskoziteyi önemli ölçüde arttırmadığı görülmüştür.

Karışımların %katı değerlerine bakıldığında beklenildiği gibi viskozite değerleriyle orantılı sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 4.2). % Katı oranı en az olan çamur karışımın (1 numaralı karışım) viskozitesi en düşük olan karışım; %katı oranı en fazla olan karışımların (4,5,6 numaralı karışımlar) ise viskoziteleri en yüksek olan karışımlar olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.2 : Çamur karışımlarının viskozite değerlerinin % katı oranıyla değişimi.

4, 5 ve 6 numaralı karışımların % katı oranları aynı ve viskoziteleri birbirine yakındır. Bu üç karışımın sedimentasyon testi sonuçlarına bakıldığında da çökme miktarlarında belirgin farklılıklar olmadığı dolayısıyla, 5 ve 6 numaralı karışımlara %2 ve %4 oranlarında yapılan bakır takviyesinin çökmeyi etkilemediği görülmüştür (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 : Çamur karışımlarının 24 saat sonundaki çökme miktarları.

4, 5 ve 6 numaralı karışımların % katı oranlarının aynı olmasına rağmen viskozite değerlerinde az oranda farklılık gözlenmiştir (Çizelge 4.1 ve 4.2). Bu üç karışım arasında en fazla bakır tozu içeren karışımın (6 numaralı karışım) viskozitesi en yüksek, bakır tozu içermeyen karışımın (4 numaralı karışım) viskozitesi en düşüktür. Bakırın yoğunluğu (8,94 gr/cm³), alüminyumun yoğunluğundan (2,7 gr/cm³) daha fazla olduğu ve yoğunluğun viskozitesi nin de yüksek olduğu görülmüştür.

Karışı m no	Saf su miktarı	Al toz miktarı	Cu toz miktarı	PVAL miktarı	Metalik çamur miktarı (ml)				% katı	Visko zite
	(ml)	(gr)	(gr)	(gr)	0 dk	30dk	3 sa	24 sa	oranı	(Cp)
5	50	68,6	1,4	6	10	9,6	9,6	9,5	60	10384
6	50	67,2	2,8	6	10	9,8	9,8	9,5	60	10504

Çizelge 4.2 : Bakır takviyeli alüminyum çamur karışımlarının sedimentasyon testi sonunda çökme miktarları ve viskozite değerleri.

1 numaralı alüminyum çamur karışımının içerisindeki metal toz miktarının az olmasından dolayı, çamur karışımı poliüretan süngerin şeklini alamamıştır. 2 ve 3 numaralı alüminyum çamur karışımları ise 1 numaralı çamur karışımına göre poliüretan süngere daha iyi tutunmuştur. Fakat poliüretan sünger çamur karışımı ile kaplandıktan sonra, model malzeme giderme aşamasında metalik yapıda çöküntüler meydana gelmiştir [12]. 4 numaralı alüminyum çamur karışımı poliüretan süngeri homojen bir şekilde kaplamış ve bu çamur karışımı ile kaplanan yapı sinterlemeden sonra dağılmadan, daha mukavim bir özellik sergilemiştir.

4 numaralı karışımla aynı % katı oranlarına sahip 5 ve 6 numaralı bakır takviyeli alüminyum çamur karışımları da poliüretan süngeri homojen bir şekilde kaplayarak, sinterlemeden sonra mukavim bir özellik sergilemişlerdir.

Bu sonuçlara göre % 60 katı içeren karışımların alüminyum ve bakır takviyeli alüminyum köpükler için optimum karışımlar olduğu tespit edilmiş, bu çamur karışımları ile üretilen köpüklerin karakterizasyonlarının yapılmasına karar verilmiştir.

4.2 Yoğunluk Ölçümü ve Porozite Tayini

Açık hücreli alüminyum, %2 bakır takviyeli alüminyum ve % 4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin yoğunlukları ve % porozite değerleri sırasıyla Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'de gösterilmiştir.

Çamur köpüklendirme yöntemi ile üretilen alüminyum köpüklerin Arşimet prensibine göre yoğunlukları 0,12±0,01-0,15±0,01 gr/cm³ aralığında hesaplanmıştır (Çizelge 4.3).

Model malzeme gözenek boyutu (ppi)	Açık hücreli köpük	Sinterlem e süresi (saat)	Ortam (atmosfer)	d (gr/cm ³)	% porozite
25	Al	4	Normal	0,12±0,01	95,5±0,26
25	Al	7	Normal	0,14±0,01	94,8±0,14
40	Al	4	Normal	0,12±0,01	95,5±0,13
40	Al	7	Normal	0,15±0,01	94,4±0,25

Çizelge 4.3 : Açık hücreli alüminyum köpüklerin yoğunluk ve % porozite değerleri.

Banhart, sıvı metal kullanılarak üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluklarının 0,1-0,4 gr/cm³ aralığında, toz metal kullanılarak üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluklarının ise 0,3-1 gr/cm³ aralığında değiştiğini belirtmiştir [55]. Buna göre deneylerde üretilen köpüklerin yoğunlukları; sıvı metal kullanılarak üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluğuna daha yakın, toz metal kullanılarak üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluğundan daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni; çamur köpüklendirme yöntemi doğası gereği (diğer metal toz kullanılan yöntemlerden farklı olarak) metal tozlara presleme uygulanmadığından yoğun bir yapı elde edilememesi ve yapıda mikro gözeneklerin oluşmasıdır. Sıvı metal ile üretilen (polimer köpük ile hassas döküm) ticari adı Duocel olan açık hücreli alüminyum köpüklerin yoğunluklarının (0,12-0,19 gr/cm³), deneylerde üretilen açık hücreli alüminyum köpüklerin yoğunluklarına yakın değerlerde olduğu görülmüştür (bknz Çizelge 2.3). Deneyler sonucunda üretilen açık hücreli alüminyum ve bakır takviyeli alüminyum köpüklerin % 93,2-95,5 aralığında hesaplanan porozite değerleri (Çizelge 4.3, 4.4 ve 4.5) Montanaro [7], Li [11,12] ve Kuebler [32]'in çamur köpüklendirme yöntemi ile ürettikleri açık hücreli köpüklerin porozite değerlerine (%87-90) yakın değerlerde; Lee[4], Akil [9], Cachinho [39], Zhao[40] ve Ahmad [41]'ın çamur köpüklendirme yöntemi ile ürettikleri açık hücreli köpüklerin porozite değerlerine (% 70-78) daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

_	-	-				
-	Model malzeme gözenek boyutu (ppi)	Açık hücreli köpük	Sinterleme süresi (saat)	Ortam (atmosfer)	d (gr/cm ³)	% porozite
	25	%2 Cu takviyeli	4	Normal	0,13±0,00	95,3±0,05
	25	%2 Cu takviyeli	7	Normal	0,13±0,01	95,3±0,25
	40	%2 Cu takviyeli	4	Normal	0,17±0,01	93,9±0,25
	40	%2 Cu takviyeli	7	Normal	0,19±0,00	93,2±0,08
	40	%2 Cu takviyeli	7	Ar +vakum	0,18±0,01	93,6±0,26

Çizelge 4.4 : Açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin yoğunluk ve % porozite değerleri.

Çizelge 4.5 : Açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin yoğunluk ve % porozite değerleri.

Model malzeme gözenek boyutu (ppi)	Açık hücreli köpük	Sinterleme süresi (saat)	Ortam (atmosfer)	d (gr/cm ³)	% porozite
25	%4 Cu takviyeli	4	Normal	0,15±0,01	94,8±0,20
25	%4 Cu takviyeli	7	Normal	0,16±0,01	94,5±0,24
40	%4 Cu takviyeli	4	Normal	0,19±0,00	93,5±0,15
40	%4 Cu takviyeli	7	Normal	0,18±0,01	93,8±0,36
40	%4 Cu takviyeli	7	Ar+ vakum	0,18±0,01	93,8±0,24

25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilmiş açık hücreli köpüklerin ortalama porozite değeri (% 95,1), 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilmiş açık hücreli köpüklerin ortalama porozite değerine (% 93,9) yakın değerde bulunmuştur. Aynı şekilde 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli metalik köpüklerin porozite değerlerinde de hissedilir farklılıklar görülmemiştir. Dolayısıyla 4 saat sinterlemeden sonra sinterleme süresi artışının tozlar arasındaki bağlanmayı belirgin ölçüde arttırmadığı söylenebilir.

Normal atmosfer şartlarında ve argon+vakumlu (vakum mertebesi) atmosferde sinterlenen aynı gözenek boyutlu model malzeme (40 ppi) kullanılarak üretilen aynı bakır oranına sahip alüminyum köpüklerin birbirine yakın değerlerde poroziteye sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5).

Bakır yoğunluğunun, alüminyumun yoğunluğundan fazla olmasından dolayı metalik köpüklerin içerisindeki bakır miktarı arttıkça yoğunluğun da arttığı gözlemlenmiştir (Çizelge 4.3, 4.4 ve 4.5).

4.3 Makro Yapı İncelemeleri

Alüminyum ile %2 ve %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin stereo mikroskobundaki üç boyutlu görüntülerine göre köpüklerin, açık hücreli köpük yapısında olduğu görülmektedir (Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6). 25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen köpüklerin (Şekil 4.4a, 4.5a ve 4.6a) makro gözeneklerinin, 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen köpüklerin (Şekil 4.4b, 4.5b ve 4.6b) makro gözeneklerinden daha büyük boyutlarda olduğu görülmüştür. Bakır takviyeli açık hücreli alüminyum köpüklerin makro yapıları (Şekil 4.5 ve 4.6) açık hücreli alüminyum köpüklerin makro yapılarına (Şekil 4.4) benzerlik göstermektedir. Şekil 4.7'de deneylerde üretilen açık hücreli alüminyum ve bakır takviyeli (%2 ve %4 Cu) alüminyum köpüklerin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.4 : (a) 25 ppi (b) 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün stereo mikroskop görüntüsü.



Şekil 4.5 : (a) 25 ppi (b) 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün stereo mikroskop görüntüsü.



Şekil 4.6 : (a) 25 ppi (b) 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli % 4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün stereo mikroskop görüntüsü.



Şekil 4.7 : Deneylerde üretilen açık hücreli alüminyum ve bakır takviyeli (%2 ve %4 Cu) alüminyum köpükler.

4.4 Mikro Yapı İncelemeleri

4.4.1 Işık mikroskobu incelemeleri

25 ve 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen normal atmosfer şartlarında 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum, bakır takviyeli alüminyum köpükler ile 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli bakır takviyeli alüminyum köpükler ışık mikrobunda incelenerek; mikro ve makro gözenekler, hücre duvarları, alüminyum içerisindeki bakır tozu dağılımları, model malzemenin yapıdan uçtuğu bölgeler tespit edilmiştir.

25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüklerin ışık mikroskobundan alınan görüntüleri sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Şekil 4.8a-b'de ve diğer ışık mikroskop görüntülerinde; parlak beyaz olarak görülen bölgeler alüminyum metali, koyu gri (siyah) olan bölgeler ise reçineli kısmı oluşturmaktadır. Şekil 4.8b'de alüminyum metali içerisinde görülen siyah üçgenimsi yapılar poliüretanın yapıyı terk etmesiyle oluşan boşluklardır. Çamur köpürtme yönteminin doğası gereği oluşan üçgenimsi boşluklar, bu yöntemle üretilen bütün köpüklerde görülmektedir. Bu boşluklar metalik köpüklerin dayanımını negatif yönde etkilemektedirler [7].

Yine Şekil 4.8a'da ve 4.9'da alüminyum metali içerisinde görülen siyah yuvarlak yapılar mikro gözeneklerdir. Mikro gözeneklerin oluşumu; çamur karışımının hazırlanması esnasında gaz kabarcıklarının oluşmasından veya sinterleme esnasında birbirleri ile bağ yapamayan metal tozlardan kaynaklanmaktadır [11,12].



Şekil 4.8 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü.



Şekil 4.9 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün ışık mikroskop görüntüsü.

40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün ışık mikroskobundan alınan görüntüleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Alüminyum metali ile çevrelenmiş, mikro gözeneklerden daha büyük olan gözenekler makro gözenek denir. İki makro gözenek arasında kalan metal kısmın bulunduğu yerlerde oluşan yapılara ise hücre duvarı denir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpükten alınan ışık mikroskop görüntüsü.

25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin ışık mikroskobundan alınan görüntüleri sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de gösterilmiştir. %2 Bakır takviyeli köpüklerde de alüminyum metali içerisindeki poliüretan süngerin yapıyı terk ettiği bölgeler ve mikro gözenekler görülmektedir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü.

Şekil 4.12'ye göre; bakır tozlarının alüminyum tozundan daha büyük boyutlarda ve turuncu renkte olduğu görülmektedir. Yapılan partikül boyut analizi sonucunda da bakır tozunun alüminyum tozundan daha büyük boyutllarda olduğu görülmüştür. Şekil 4.12a'da bakır tozlarının alüminyum metali içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Dolayısıyla çamur hazırlama prosesinde dağıtıcı kullanılmadan homojen bir karışım elde edildiği ve bu karışımın model malzeme olarak kullanılan poliüretan süngerin üstünde birikerek, poliüretan süngeri kapladığı belirlenmiştir.



Şekil 4.12 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü.

40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün ışık mikroskobundan alınan görüntüleri Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Şekil 4.13'de, Şekil 4.10'daki görüntüye benzer bir görüntü görülmektedir. Burada da 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen %2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün makro gözenekleri ve hücre duvarları görülmektedir.



Şekil 4.13 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün farklı bölgelerinden alınan metal ışık mikroskop görüntüsü.

40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün ışık mikroskobundan alınan görüntüleri Şekil 4.14 a ve b'de gösterilmiştir. Burada, Şekil 4.8b'de görülen poliüretan köpüğün yapıyı terk ettiği üçgenimsi bölgeler görülmektedir.



Şekil 4.14 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü.

25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün ışık mikroskobundan alınan görüntüleri Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Şekil 4.15a ve b'de bakır partikülünün yüzeyinde ve iç bölgelerinde alüminyumun varlığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni; küçük boyutta ve daha yüksek yüzey enerjisine sahip alüminyum partiküllerinin, sinterleme aşamasında meydana gelen yüksek sıcaklık etkisiyle bakır arayüzeyine difüzyonudur (Bknz. Şekil 3.4).



Şekil 4.15 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü.

25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün ışık mikroskobundan alınan görüntüleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Şekil 4.8a ve 4.9'da görülen mikro gözenekler Şekil 4.16a'da da görülmektedir. Şekil 4.16b'de alüminyum tozları içerisindeki bakır tozu görülmektedir. Çamur köpüklendirme yönteminin doğası gereği metal tozlara presleme uygulanmadığından, metal tozlar yalnızca atomik difüzyon sonucunda gerçekleştirilen metal tozlar arasında bağlanma prosesi olan sinterleme aşamasında meydana gelen yüksek sıcaklıklarda birbirleri ile bağ yaparak metal köpüğün dayanımını sağlamaktadırlar. Birbirleri ile bağ yapamayan metal tozları açık hücreli metalik köpüklerin yapısında mikro gözenekleri oluştururlar [11,12] (Şekil 4.16). Şekil 4.17'de alüminyum tozları arasında dağılmış olan bakır tozu görülmektedir.



Şekil 4.16 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü.



Şekil 4.17 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün ışık mikroskop görüntüsü.

40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün ışık mikroskobundan alınan görüntüleri Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Şekil 4.18a'da alüminyum metalinin hücre duvarları, poliüretan malzemenin yapıyı terk ettiği yerler ve alüminyum metali içerisindeki bakır tozu görülmektedir. Şekil 4.18b'de yine bakır tozunun farklı bir görünümü gösterilmiştir.



Şekil 4.18 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü.

40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak, argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün ışık mikroskop görüntüleri Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Şekil 4.19 a ve b incelendiğinde normal atmosfer şartlarında sinterlenen açık hücreli köpüklerin (bknz Şekil 4.9, 4.12a ve 4.16a) mikro yapılarına benzer yapılar görülmektedir. Normal atmosfer şartlarında sinterlenen saf alüminyum ve bakır takviyeli alüminyum köpüklerde bulunan mikro

gözenekler argon atmosferinde sinterlenen köpüklerde de görülmüştür. Şekil 4.19 a ve b'de bakır partiküllerinin, normal atmosfer şartlarında gerçekleştirilen sinterleme sonrasında elde edilen açık hücreli bakır takviyeli alüminyum köpüklere göre (bknz Şekil 4.15a ve b, 4.17, 4.18b), sinterlemeden önceki partikül formunu daha iyi koruduğu görülmektedir.



Şekil 4.19 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün farklı bölgelerinden alınan ışık mikroskop görüntüsü.

4.4.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri

25 ve 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak normal atmosfer şartlarında, 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum, bakır takviyeli alüminyum köpükler ile 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli bakır takviyeli alüminyum köpükler taramalı elektron mikroskobunda incelenerek; makro gözeneklerin (stereo mikroskobunda görüldüğü gibi) birbirleriyle bağlantılı olduğu yani köpüklerin açık hücreli yapıda olduğu bir kez daha tespit edilmiştir.

25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 4 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün SEM görüntüleri ve EDS analizi Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Şekil 4.20a'da açık hücreli alüminyum köpüğün makro gözenekleri, Şekil 4.20b'de poliüretan süngerin yapıyı terk ettiği bölge üç boyutlu olarak görülmektedir. 25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 4 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün EDS analizine göre yapıda sadece alüminyuma rastlanmıştır (Şekil 4.20c).



Şekil 4.20 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün (a)-(b) SEM görüntüsü (c) Şekil 4.20a'dan alınan EDS analizi.

25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün SEM görüntüleri ve EDS analizi şekil 4.21'de gösterilmiştir.

Şekil 4.21a'da Şekil 4.20a'daki görüntüye benzer olarak makro gözenekler görülmektedir. Şekil 4.21b'de 3 tane makro gözeneğin yan yana geldiği yerde oluşan hücre köşesi ve 2 tane makro gözeneğin arasındaki metal toz içeren kısımda oluşan hücre duvarı üç boyutlu olarak görülmektedir. Bu açık hücreli alüminyum köpükten alınan EDS analizine göre; sinterlemenin normal atmosfer şartlarında yapılması ve alüminyumun oksijene olan afinitesinden dolayı yapıda alüminyum ve düşük miktarlarda oksijene rastlanmıştır. 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüklerin EDS analizlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir (Ek A-1).



Şekil 4.21 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün (a)-(b)SEM görüntüsü (c) Şekil 4.21a'dan alınan EDS analizi.

40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 4 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün SEM görüntüleri Şekil 4.22'de ve 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen, 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün SEM görüntüleri Şekil 4.23'de gösterilmiştir. 25 ve 40 ppi gözenek boyutlarındaki model malzeme kullanılarak üretilen köpüklerin aynı büyütmedeki SEM görüntülerine bakıldığında (Şekil 4.20a ve Şekil 4.22) 25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen köpüğün gözeneklerinin daha büyük ve daha az sayıda olduğu, 40 ppi ile üretilen köpüğün gözeneklerinin ise daha küçük ve daha fazla sayıda olduğu görülmektedir. 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak interlenen açık hücreli alüminyum köpüklerin SEM görüntüleri karşılaştırıldığında; makro porozite ve hücre duvarı yapılarında belirgin farklılıklar olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.22 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün SEM görüntüsü.



Şekil 4.23 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün SEM görüntüsü.

25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 4 saat sinterlenen açık hücreli % 2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün SEM görüntüleri ve EDS analizi Şekil 4.24'de gösterilmiştir. Şekil 4.24b'de açık renkli görülen küresel yapıdaki bakır tozları kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Açık hücreli köpüğün yüzeyinde görülen mikro gözenekler (Şekil 4.24a); köpüklerin mekanik özelliklerini düşürdükleri için yapıda istenmeyen yapılardır. Sinterlenen köpüğün EDS analizine göre köpüğün yapısında; alüminyum, bakır ve oksijene rastlanmıştır (Şekil 4.24c). 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli % 2 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin EDS analizlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir (Ek A-2).


Şekil 4.24 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli % 2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün (a)-(b) SEM görüntüsü (c) Şekil 4.24a'dan alınan EDS analizi.

25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 7 saat sinterlenen açık hücreli % 2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün SEM görüntüleri ve EDS analizi Şekil 4.25'de gösterilmiştir. Şekil 4.25a'da görülen çatlaklı yapı; poliüretan süngerin homojen olarak kaplanamamasından kaynaklanır. Homojen kaplama elde edilememesinin nedenlerinden biri; poliüretan süngerdeki fazla çamurun giderilmesi aşamasında uygulanan fazla basınç ve sıyırma nedeniyle poliüretan süngeri kaplayacak yeterli çamurun kalmaması, bir diğeri ise; çamur karışımının viskozitesinin yüksek olmasıdır [7].

Şekil 4.25b'deki görüntüden alınan EDS analizine göre yapıda; alüminyum, bakır ve açık hücreli saf alüminyum köpüklerde oluşan oksijen miktarından daha fazla oksijene rastlanmıştır (Şekil 4.25c).



Şekil 4.25 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli % 2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün (a)-(b) SEM görüntüsü (c) Şekil 4.25b'den alınan EDS analizi.

40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen, 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.26 ve 4.27'da gösterilmiştir. Her iki şekilde de yapıda % 2 oranında bulunan bakır tozlarının, köpük yüzeyine homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür.



Şekil 4.26 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli % 2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün SEM görüntüsü.



Şekil 4.27 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli % 2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün SEM görüntüsü.

25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 4 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün SEM görüntüleri ve EDS analizi Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Şekil 4.28a'da, Şekil 4.24a'daki görüntüye benzer olarak mikro gözeneklere rastlanmıştır. Sinterlenen köpüğün EDS analizine göre köpüğün yapısında; alüminyum, bakır ve oksijene rastlanmıştır (Şekil 4.28b). 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpükten alınan EDS analizlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir (Ek A-3).



Şekil 4.28 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli % 4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün (a) SEM görüntüsü (b) Şekil 4.28a'dan alınan EDS analizi.

25 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün SEM görüntüleri ve EDS analizi Şekil 4.29'de gösterilmiştir. Şekil 4.29a'da, Şekil 4.25a'daki görüntüleye benzer olarak çatlaklı yapı görülmüştür. Şekil 4.29c'deki görüntüden alınan EDS analizinde, Şekil 4.25b'deki görüntünün EDS analizine benzer olarak yapıda; alüminyum, bakır ve oksijene rastlanmıştır.



Şekil 4.29 : 25 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli % 4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün (a)-(b)-(c) SEM görüntüsü (d) Şekil 4.29c'den alınan EDS analizi.

40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.30 ve 4.31'de gösterilmiştir. %4 bakır takviyeli alüminyum köpükler (Şekil 4.30 ve 4.31), %2 bakır takviyeli alüminyum köpüklere göre (Şekil 4.25a) daha fazla çatlak içermektedir. Bu durum; viskozite değeri %2 bakır takviyeli köpüklerin çamur karışımlarından daha yüksek olan %4 bakır takviyeli çamur karışımı ile üretilen köpüklerin, model malzeme kaplama aşamasında poliüretan süngere iyi tutunamamasından kaynaklanabilir.



Şekil 4.30 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 4 saat sinterlenen açık hücreli % 4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün SEM görüntüsü.



Şekil 4.31 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen ve 7 saat sinterlenen açık hücreli % 4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün SEM görüntüsü.

Şekil 4.32'de 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve normal atmosfer şartlarında 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün yüzeyi zımparalanarak parlatılmış haldeki geri saçılmış (back scattered) görüntüsü ve Şekil 4.33'de bu görüntüden alınmış EDS analizleri görülmektedir.

Bu analizlere göre; 1 numaralı bölgede alüminyum, bakır ve oksijen (Şekil 4.33a); 2 numaralı bölgede alüminyum, az miktarda oksijen ve ağırlıklı olarak bakır (Şekil 4.33b); 3 numaralı bölgede bakır, oksijen, karbon ve yüksek miktarda alüminyum (Şekil 4.33c) bulunduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre; sinterleme aşamasında, alüminyum partiküllerinin bakır partikülü içerisine difüzyona uğradıkları tespit edilmiştir.



Şekil 4.32 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve normal atmosfer şartlarında 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün yüzeyi zımparalanarak parlatılmış haldeki geri saçırılmış (back scattered) görüntüsü.



Şekil 4.33 : Şekil 4.32'deki SEM görüntüsündeki (a) 1. bölgeden (b) 2. bölgeden (c) 3. bölgeden alınan EDS analizleri.

Şekil 4.34 a ve b'de 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak, argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün SEM görüntüsü ve EDS analizi gösterilmiştir. Şekil 4.34a'da yüzeyi zımparalanmış olan bakır partikülü, ışık mikroskobundan alınan görüntüleriyle (Şekil 4.19) eşdeğer olarak, sinterlenememiş bakır partikülünün formuna daha yakın bir görüntü sergilemiştir. Şekil 4.34a'daki SEM görüntüsünden alınan EDS analizine göre yapıda; bakır, alüminyum ve normal atmosfer şartlarında sinterlenen %4 bakır takviyeli alüminyum köpükten (Şekil 4.33a) daha az miktarda oksijene rastlanmıştır.



Şekil 4.34 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak, argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli % 4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün yüzeyi zımparalanarak parlatılmış (a) SEM görüntüsü (b) Şekil 4.34a'dan alınan EDS analizi.

25 ve 40 ppi model malzemesi kullanılarak üretilen, 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum ve bakır takviyeli alüminyum köpüklerin ortalama mikro ve makro gözenek büyüklükleri Çizelge 4.6, Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

Sinterleme süresi (saat)	Model malzeme gözenek boyutu (µm)	Mikro gözenek büyüklüğü (µm)	Makro gözenek büyüklüğü (µm)
4	25	53,4 ±1,6	747,9 ±61,1
4	40	67,2 ±2,4	617,1 ±50,1
7	25	74,4 ±2,3	802,5 ±76,6
7	40	59,4 ±2,1	538,5 ±43,6

Çizelge 4.6 : 25 ve 40 ppi model malzemesi kullanılarak üretilen, 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüklerin ortalama mikro ve makro gözenek büyüklükleri.

Çizelge 4.7 : 25 ve 40 ppi model malzemesi kullanılarak üretilen, 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin ortalama mikro ve makro gözenek büyüklükleri.

Sinterleme süresi (saat)	Model malzeme gözenek boyutu (µm)	Mikro gözenek büyüklüğü (µm)	Makro gözenek büyüklüğü (µm)
4	25	62,4 ±1,0	1153,9 ±87,5
4	40	63,5 ±3,4	575,0 ±29,9
7	25	$60,5 \pm 1,0$	920,1 ±73,7
7	40	77,6 ±7,5	654,9 ±14,2

Sinterleme süresi (saat)	Model malzeme gözenek boyutu	Mikro gözenek büyüklüğü (µm)	Makro gözenek büyüklüğü (µm)
4	25	54,9 ±3,9	1033,6 ±61,8
4	40	58,7 ±1,6	557,1 ±10,6
7	25	67,2 ±1,4	1098,0 ±88,0
7	40	60,9 ±1,3	570,2 ±36,1

Çizelge 4.8 : 25 ve 40 ppi model malzemesi kullanılarak üretilen, 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin ortalama mikro ve makro gözenek büyüklükleri.

Açık hücreli alüminyum ve bakır takviyeli alüminyum köpüklerin 53,4±1,6-77,6±7,5 μ m arasında değişen boyutlarda mikro gözeneğe sahip oldukları görülmektedir (Çizelge 4.6,4.7 ve 4.8). Ortalama 2963,2±87,4 μ m olarak ölçülen 25 ppi gözenek boyutundaki poliüretan süngerin gözenek büyüklüğü, alüminyum ve bakır takviyeli alüminyum çamur karışımları ile kaplanıp sinterlendikten sonra 747,9±61,1-1153,9±87,5 μ m arası değişen büyüklüklere düştüğü; ortalama 1545,5±53,7 μ m olarak ölçülen 40 ppi gözenek boyutundaki poliüretan süngerin gözenek büyüklüğü ise, alüminyum ve bakır takviyeli alüminyum çamur karışımları ile kaplanıp sinterlendikten sonra 538,5±43,6-654,9±14,2 μ m arası değişen büyüklüklere düştüğü görülmüştür (Çizelge 4.6, 4.7 ve 4.8). Makro gözenek büyüklüğündeki bu düşüş; çamur karışımı ile kaplanan poliüretan süngerin duvar kalınlığının artmasından kaynaklanmaktadır.

4.5 XRD Analizi

40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak, normal atmosfer şartlarında 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün XRD analizi Şekil 4.35'de gösterilmiştir. Şekil 4.35'e göre alüminyumun kübik yapıda olduğu ve sadece alüminyum içerdiği görülmüştür. 25 ve 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak, normal atmosfer şartlarında 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüklerde de benzer analiz sonuçları görülmüştür (Ek A-4).



Şekil 4.35 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve normal atmosfer şartlarında 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün XRD analizi.

40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak, normal atmosfer şartlarında 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün XRD analizi sonuçlarına göre (Şekil 4.36) yapıda; alüminyum, Cu₂O ve CuO'ya rastlanmıştır. 25 ve 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak, normal atmosfer şartlarında 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli bakır takviyeli (%2 ve %4 Cu) alüminyum köpüklerde de benzer analiz sonuçları görülmüştür (Ek A-5). Bakırın yüzeyinde oluşan oksit tabakası, alüminyum yüzeyinde oluşan oksit tabakasından daha poröz bir yapıda olduğundan; bakır yüzeyinde oluşan oksit tabakası oksijenin difüzyonuna izin vermiştir [56]. Normal atmosfer şartlarında aynı sürelerde sinterlenen bakır takviyeli alüminyum köpüklerde bakır miktarının artmasına bağlı olarak bakır oksit pik şiddetlerinin de arttığı görülmüştür (Ek A-5).



Şekil 4.36 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve normal atmosfer şartlarında 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün XRD analizi.

Normal atmosfer şartlarında sinterleme sonucu, bakır takviyeli alüminyum köpüklerde oluşan bakır oksit fazlarını engellemek amacıyla bakır takviyeli (%2 ve %4 Cu) alüminyum köpükler argon atmosferinde 7 saat sinterlenmiştir. 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün XRD analizine göre yapıda; alüminyum, bakır, Cu₂O ve CuO'ya rastlanmıştır (Şekil 4.37). 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak, argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 ve CuO'ya rastlanmıştır (Şekil 4.37). 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak, argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpükte de benzer analiz sonuçları görülmüştür (Ek A-6).



Şekil 4.37 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün XRD analizi.

Argon atmosferinde ve normal atmosfer şartlarında 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin normalize edilmiş verileri kıyaslandığında; kırmızı renk ile gösterilen argon atmosferinde sinterlenen köpüğün Cu₂O ve CuO pik şiddeti, mavi renk ile gösterilen normal atmosfer şartlarında sinterlenen köpüğün Cu₂O ve CuO pik şiddetinden daha düşüktür. Argon atmosferinde sinterlenen köpüğün bakır pik şiddeti ise, normal atmosfer şartlarında sinterlenen köpüğün bakır pik şiddeti ise, normal atmosfer şartlarında sinterlenen köpüğün bakır pik şiddeti ise, normal atmosfer şartlarında sinterlenen köpüğün bakır pik şiddeti ise, normal atmosfer şartlarında sinterlenen köpüğün bakır pik şiddeti ise, normal atmosfer şartlarında sinterlenen köpüğün bakır pik şiddetlerindeki yükselme, argon atmosferinde yapılan deneylerde oksit miktarlarının düştüğünü dolayısıyla bakır miktarının da arttığını göstermektedir.



Şekil 4.38 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen argon atmosferinde ve normal atmosfer şartlarında 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin normalize edilmiş dataları.

4.6 Sertlik Ölçümleri

25 ve 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen, normal atmosfer şartlarında 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüklerin 30,3±3,15- 34,7 ±7,27HV arasında değişen ortalama sertlik değerleri Çizelge 4.9'da gösterilmiştir. Buna göre üretilen açık hücreli alüminyum köpüklerin sertlikleri; ERG firmasının polimer köpük ile hassas döküm yöntemi kullanarak ürettiği ticari adı "Duocel" olan açık hücreli köpüklerin sertliğine (35 HV) ve Alporas firmasının ergiyik içerisine köpürtücü ajan ilavesi yöntemiyle ürettiği kapalı hücreli alüminyum köpüklerin sertliğine (30,5 HV) yakın değerlerde olduğu, Alulight firmasının toz metalurjisi yöntemi ile ürettiği kapalı hücreli alüminyum köpüklerin sertliğinden (54,8 HV) daha düşük değerlerde olduğu tespit edilmiştir [57,58]. Çamur köpüklendirme yöntemi ile üretilen alüminyum köpüklerin, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen alüminyum köpüklerin sertlik değerlerine sahip olmasının nedenleri; yapılarında bulunan mikro gözenekler, poliüretan süngerin yapıyı terk ettiği yerlerde meydana gelen boşluklar olduğu tahmin edilmektedir.

Çizelge 4.9, Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11'e göre; 4 saat sinterlenen açık hücreli köpüklerin sertlikleri ile 7 saat sinterlenen açık hücreli köpüklerin sertlikleri arasında hissedilir bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Alüminyum köpüklere yapılan bakır takviyesinin de köpüklerin sertliklerini önemli ölçüde arttırmadığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.9, 4.10 ve 4.11).

Çizelge 4.9 : 25 ve 40 ppi model malzemesi kullanılarak üretilen, normal atmosfer şartlarında 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüklerin ortalama sertlik değerleri.

Ortam	Sinterleme	Model malzeme	Sertlik (HV)
(atmosfer)	süresi (saat)	gözenek boyutu	
		(ppi)	
	4	25	30,6 ±4,87
Normal	4	40	$30,5\pm 6,54$
atmosfer şartı	7	25	30,3 ±3,15
	7	40	34,7 ±7,27

Bakır takviyeli alüminyum köpüklerin sertlik değerlerinin, saf alüminyum köpüklerin sertlik değerlerine benzer olarak, sinterleme süresi ile değişmediği gözlenmiştir (Bknz Çizelge 4.9, 4.10 ve 4.11). Normal atmosfer şartlarında ve argon atmosferinde sinterlenen aynı bakır oranlarına sahip açık hücreli köpüklerin ortalama sertliklerinde de hissedilir bir fark olmadığı görülmüştür (Bknz Çizelge 4.10 ve 4.11).

Çizelge 4.10 : 25 ve 40 ppi model malzemesi kullanılarak üretilen, normal atmosfer şartlarında ve argon atmosferinde 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin ortalama sertlik değerleri.

Ortam	Sinterleme	Model malzeme	Sertlik (HV)
(atmosfer)	süresi	gözenek boyutu	
	(saat)	(ppi)	
Normal	4	25	35,7 ±6,5
Normal	4	40	$34,5 \pm 2,7$
Normal	7	25	$33,0 \pm 3,4$
Normal	7	40	37,8 ±5,3
Argon	7	40	34,0±3,3

Ortam	Sinterleme	Model malzeme	Sertlik (HV)
(atmosfer)	süresi	gözenek boyutu	
	(saat)	(ppi)	
Normal	4	25	37,4 ±2,8
Normal	4	40	31,0 ±2,0
Normal	7	25	35,6 ±7,2
Normal	7	40	$34,6\pm 1,1$
Argon	7	40	37,9±2,8

Çizelge 4.11 : 25 ve 40 ppi model malzemesi kullanılarak üretilen, norma ve argon l atmosferinde 4 ve 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin ortalama sertlik değerleri.

5. GENEL SONUÇLAR

• Çamur köpüklendirme yöntemiyle 25 ve 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak açık hücreli saf alüminyum ile %2 ve %4 bakır takviyeli alüminyum köpükler üretilmiştir.

•Açık hücreli saf alüminyum ile %2 ve %4 bakır takviyeli alüminyum köpükler için optimum çamur reçetesinin; manyetik karıştırıcıda, 1000 devir/dak hızla 3 saat yapılan karıştırma ve % 60 katı oranına sahip çamur karışımlarından oluştuğu tespit edilmiştir.

• Çamur köpüklendirme yönteminde, model malzeme giderme ve sinterleme aşamalarında ideal proses parametrelerinin; normal atmosfer koşullarında 500 0 C'de model malzeme giderme ve 620 0 C'de 4 ve 7 saat sinterleme olduğu belirlenmiştir.

• Çamur köpüklendirme yöntemi ile; porozite değerleri % 94,4-95,5 aralığında, yoğunluğu 0,12-0,15 gr/cm³ aralığında, sertlik değerleri 30,6-34,7 HV aralığında değişen açık hücreli alüminyum köpükler üretilmiştir. Açık hücreli alüminyum köpüklere yapılan %2 ve %4 bakır takviyesinin alüminyum köpüklerin sertliklerini hissedilir oranda arttırmadığı görülmüştür.

• 25 ve 40 ppi gözenek boyutundaki poliüretan süngerlerin çamur karışımı ile kaplandıktan sonra, duvar kalınlıklarının artmasına bağlı olarak, makro gözenek boyutlarının azaldığı görülmüştür.

• %2 ve %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerde, bakırın aglomere olmadan yapıya homojen bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir.

• %2 ve %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklere normal atmosfer şartlarında yapılan sinterlemelerde, bakırın beklendiği gibi oksitlendiği gözlenmiştir. Ancak argon atmosferi altında vakum kullanılarak yapılan deneylerde %2 ve %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerde oksit miktarının azaldığı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Polat, B. D., Keleş, Ö. ve Taptık, Y., 2010. Metalik Köpükler, Alüminyum Metalik Köpük ve Üretim Yöntemleri, *Metal Dünyası Dergisi*, 205, 2-7.
- [2] Ashby, M., F., Evans, A., Fleck, N. A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W. and Wadley H.N.G., 2000. Metal Foams A Design Guide, Elsevier Science, USA, 6-23,20,44.
- [3] Twigg M.V. and Richardson, J.T. 1995. Preparation and Properties of Ceramic Foam Catalyst Suppots, *Proceedings of the Sixth International Symposium*, 91, 345-359.
- [4] Lee, J.H., Kim, H. and Koh, Y.H., 2009. Highly Porous Titanium (Ti) Scaffolds With Bioactive Microporous Hydroxyapatite/TiO₂ Hybrid Coating Layer, *Materials Letters*, 63, 1995-1998.
- [5] Michailidis, N., Stergioudi, F., Omar, H. and Tsipas, D.N., 2009. An Image Based Reconstruction of the 3D Geometry of an Al Open-Cell Foam and FEM Modeling of the Material Response, *Mechanics of Materials*, 42, 142-147.
- [6] **Banhart, J. and Baumeister, J.,** 1998. Deformation Characteristics of Metal Foams, *Journal of Materials Science*,**33**, 1431-1440.
- [7] Montanaro, L., Jorand, O.Y., Fantozzi G. and Negroa, A., 1998. Ceramic Foams by Powder Processing, *Journal of the European Ceramic Society*, 18, 1339-1350.
- [8] Luyten, J., Mullens, S., Cooymans, J., Wilde, A.M., Thijs, I. and Kemps, R., 2008. Different Methods to Synthesize Ceramic Foams, *Journal of the European Ceramic Society*, 29, 829–832.
- [9] Nor, M.A., Hong, L.C., Ahmad, Z.A. and Akil, H.M., 2008. Preparation and Characterization of Ceramic Foam Produced via Polymeric Foam Replication Method, *Journal of Materials Processing Technology*, 207, 235–239.
- [10] Dressler, M., Reinsch, S., Schadrack, R. and Benemann, S., 2009. Burnout Behavior of Ceramic Coated Open Cell Polyurethane Sponges, *Journal of the European Ceramic Society*, 29, 3333–3339.
- [11] Li, J.P., Li, S. H., Blitterswijk, C.A.V. and Groot, K., 2004. A novel porous Ti6Al4V: Characterization and cell attachment, *Wiley Interscience*, doi: 10.1002, 223-233.
- [12] Li, J.P., Blitterswijk, C.A.V., and Groot, K., 2004. Factors having influence on the rheological properties of Ti6Al4V slurry, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 15, 951-958.

- [13] Banhart, J., 2000. Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metal and Metal Foams, *Progress in Materials Science*, 46, 559-632, 587-588.
- [14] Url-1 http://www.metalfoam.net, alındığı tarih 21.09.2010.
- [15] **İhvan, S.,** 2008. Metal Enjeksiyon Kalıplama ile Gözenekli Metal Üretimi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, 22-23.
- [16] Sertkaya, A.A., 2008. Alüminyum Köpüğün Isi Değiştiricisi Olarak Tasarımı ve Isi Transferi Modeli, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, 2-3.
- [17] Uzun, A., 2009. TM Yöntemi ile Alüminyum Esaslı Küresel Şekilli Metalik Köpük Üretimi ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 3-7.
- [18] Url-2 http://www.diva.eng.cam.ac.uk/energy/acoustics/images/metalic_foam.gif, alındığı tarih 12.09.2010.
- [19] Jiang, B., Zhao, N.Q., Shi, C.S., Du, X.W., Li, J.J. and Man, H.C. 2005. A Novel Method Making Open Cell Aluminium Foams by Powder Sintering Process, *Journal of Materials Letters*, 59, 3333-3336.
- [20] Yavuz, İ. 2010. Metalik Köpük Malzemeler ve Uygulama Alanları, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 49-58.
- [21] Degischer H.P. and Krizszt, B., 2002. Handbook of Cellular Metals; Production, Processing, Applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 3-527-60055-8, 315-319.
- [22] Url-3 http://www.ergaerospace.com/Material-Applications-guide.html, alındığı tarih 28.06.2011.
- [23] Körner, C., and Singer, R.F., 1999. Processing of Metal Foams- Challenges and Opgözenektunities, Metal Matrix Composites and Metallic Foams, Euromat, 5, 3-14.
- [24] Özer, G., 2005. Alüminyum Esaslı Metal Köpük Üretimi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, 28-29.
- [25] Thomsen O.T., Bozhevolnaya E. and Lyckegaard A., 2005. Sandwich Structures 7:Advancing with Sandwich Structures and Materials, *Springer*, Netherlands, 733-742.
- [26] Manonukul, A., Muenya, N., Leaux, F. and 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.
- [27] **Url-4** *http://www.nabertherm.com/produkte/details/en/labordental_muffeloefen,* erişim tarihi 24.06.2011.
- [28] Twigg, M.V. and Richardson, J.T., 2006. Structured Ceramic Foams as Catalyst Supports for Highly Exothermic Processes, *Proceedings of the Nineth International Symposium*, 162, 135-142.

- [29] Banhart, J., 2000. Manufacturing Routes for Metallic Foams, *Solidification Science Overview*, **52**, 22-27.
- [30] Zhu, X., Jiang D. and Tan, S., 2002. The Control of Slurry Rheology in the Processing of Reticulated Porous Ceramics, *Materials Research Bulletin*, 37, 541-553.
- [31] Zhu, X., Jiang, D. and Tan, S., 2001. Reaction Bonding of Open Cell SiC-Al₂O₃ Composites, *Materials Research Bulletin*, 36, 2003-2015.
- [32] Lemster, K., Delporte, M., Graule, T. and Kuebler, J., 2006. Activation of Alumina Foams for Fabricating MMCs by Pressureless Infiltration, *Ceramics International*, 33, 1179–1185.
- [33] Oliveira, F.A.C., Dias, S., Vaz, M.F. and Fernandes, J.C., 2006. Behaviour of Open-Cell Cordierite Foams Under Compression, *Journal of the European Ceramic Society*, 26, 179–186.
- [34] Ramay, H.R. and Zhang, M., 2003. Preparation of Porous Hydroxyapatite Scaffolds by Combination of the Gel-Casting and Polymer Sponge Methods, *Biomaterials*, 24, 3293–3302.
- [35] Fu, Q., Rahaman, M.N., Bal, B.S., Brown, R.F. and Day, D.E., 2008. Mechanical and In Vitro Performance of 13–93 Bioactive Glass Scaffolds Prepared by a Polymer Foam Replication Technique, *Acta Biomaterialia*, 4, 1854–1864.
- [36] Fu, H., Fu, Q., Zhou, N., Huang, W., Rahaman, M.N., Wang, D. and Liu, X., 2009. In Vitro Evaluation of Borate-Based Bioactive Glass Scaffolds Prepared by a Polymer Foam Replication Method, *Materials Science and Engineering*, 29, 2275–2281.
- [37] Teixeira, S., Rodriguez, M.A., Pena, P., Aza, A.H.D., Aza, S.D., Ferraz, M.P. and Monteiro, F.J., 2009. Physical Characterization of Hydroxyapatite Porous Scaffolds for Tissue Engineering, *Materials Science and Engineering*, 29, 1510–1514.
- [38] Cachinho, S.C.P. and Correia, R.N., 2008. Titanium scaffolds for osteointegration: mechanical, in vitro and corrosion behavior, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, **19**, 451-457.
- [39] Cachinho, S.C.P. and Correia, R.N., 2007. Titanium porous scaffolds from precursor powders: rheological optimization of TiH₂ slurries, *Powder Technology*, 178, 109-113.
- [40] Zhao, J., Lu, X. and Weng, J., 2008. Macroporous Ti-based composite scaffold prepared by polymer impregnating method with calcium phosphate coatings, *Materials Letters*, **62**, 2921-2924.
- [41] Ahmad, S., Muhamad, N., Muchtar, A., Sahari, J. and Jamaludin, K.R., 2008. Producing of titanium foam using titanium alloy (Al₃Ti) by surry method, *Brunei International Conference of Engineering and Technology (BICET)*, Brunei Darulssalam, 3-4 November.
- [42] Pasinli, A. ve Köksal, N.S., 2009. Sıcak Daldırma Yöntemi ile Alüminyum Kaplanan Çelik Malzemelerde Yüksek Sıcaklık Oksidasyonunun İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 31, 1-2.

- [43] Kasaplar, G., 2007. Alüminyum Yüzeyindeki Oksit Tabakasının Okzalik Asit Anodizing Yöntemiyle Geliştirilmesi, Çukurove Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 14.
- [44] Lux, B.M., Banhart, J., Fiechter, S., Görke, O. and Wanderka, N., 2006. Modification of Titanium Hydride for Improved Aluminium Foam Manufacture, *Acta Materialia*, 54, 1887-1900.
- [45] Mukherjee, M., Ramamurty, U., Moreno, G.F. and Banhart, J., 2010. The Effect of Cooling Rate on the Structure and Properties of Closed-Cell Aluminium Foams, Acta Materialia, 58, 5031-5042
- [46] Raj, R.E. and Daniel, B.S.S., 2007. Structural and Compressive Property Correlation of Closed-Cell Aluminum Foam, *Journal of Alloys and Compounds*, 467, 550-556
- [47] Raj, R.E. and Daniel, B.S.S., 2008. Prediction of Compressive Properties of Closed-Cell Aluminum Foam Using Artificial Neural Network, *Computational Materials Science*, 43, 767-773.
- [48] Raj, R.E. and Daniel, B.S.S., 2010. Customization of Closed-Cell Aluminum Foam Properties Using Design of Experiments, *Materials Science and Engineering*, A 528, 2067-2075.
- [49] Bafti, H. and Habibolahzadeh, A., 2010. Production of Aluminum Foam by Spherical Carbamide Space-Holder Technique Processing Parameters, *Materials and Design*, 31, 4122-4129.
- [50] Fuerstner, I., 2010. Advanced Knowledge Application in Practice, In Tech, 106-107
- [51] Sun, D.X. and Zhao, Y.Y., 2002. Static and Dynamic Energy Absorption of Al Foams Produced by the Sintering and Dissolution Process, Metallurgical and Materials Transactions, 34B, 69-74.
- [52] Zhao, N.Q., Jiang, B., Du, X.W., Li, J.J., Shi, C.S. and Zhao, W.X. 2005. Effect of Y₂0₃ on the Mechanical Properties of Open Cell Aluminum Foams, *Materials Letters*, **60**, 1665-1668.
- [53] Mu, Y., Yao, G., Zu, G. and Cao, Z., 2010. Influence of Strain Amplitude on Damping Property of Aluminum Foams Reinforced with Copper Coated Carbon Fibers, *Materials and Design*, 31, 4423-4426.
- [54] Beer, M.U., Wood, P.J. and Weisz, J., 1998. A Simple and Rapid Method of Evalution Mark–Houwink–Sakurada Constants of Linear Random Coil Polysaccharides Using Molecular Weight and Intrinsic Viscosity Determined by High Performance Size Exclusion Chromatography: Application to Guar Galactomannan, *Carbohydrate Polymers*, 39, 377-380.
- [55] Banhart, J., 1999. Foam Metal the Recipe, Europhysics News, 30, 17-20.
- [56] Polan, N.W. and Corporation, O., 1992. ASM Handbook Corrosion, 13, 1518.
- [57] Url-5 *http://www.ergaerospace.com/Aluminum-properties.htm*, alındığı tarih 13.05.2011.

[58] Idris, M.I., Vodenitcharova, T. and Hoffman, M., 2009. Mechanical Behaviour and Energy Absorption of Closed-Cell Aluminium Foam Panels in Uniaxial Compression, *Materials Science and Engineering*, A517, 37-45.

EKLER

- EK A.1 : Açık hücreli alüminyum köpüklerin EDS analizi.
- **EK A.2 :** %2 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin EDS analizi.
- **EK A.3 :** %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin EDS analizi.
- **EK A.4 :** Normal atmosfer şartlarında sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüklerin XRD analizleri.
- **EK A.5 :** %2 ve %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin XRD analizleri.
- EK A.6 : Argon atmosferinde sinterlenen %2 bakır takviyeli köpüğün XRD analizi.



Şekil A.1 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen (a) 4 saat (b) 7 saat sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüğün EDS analizi.





Şekil A.2: 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen (a) 4 saat (b) 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli alüminyum köpüğün EDS analizi.





Şekil A.3 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzemesi kullanılarak üretilen (a) 4 saat (b) 7 saat sinterlenen açık hücreli %4 bakır takviyeli alüminyum köpüğün EDS analizi.

EK A.4



Şekil A.4 : Normal atmosfer şartlarında sinterlenen açık hücreli alüminyum köpüklerin XRD analizleri.





Şekil A.5 : %2 ve %4 bakır takviyeli alüminyum köpüklerin XRD analizleri.





Şekil A.6 : 40 ppi gözenek boyutundaki model malzeme kullanılarak üretilen ve argon atmosferinde 7 saat sinterlenen açık hücreli %2 bakır takviyeli köpüğün XRD analizi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad	: Elvan ZAMAN
Doğum Yeri ve Tarihi	: Zonguldak, 02.04.1985
Lise	: 2000-2003 Zonguldak Fen Lisesi
Lisans	: 2003-2008 Yıldız Teknik Üniversitesi
	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
Adres	: Kadıköy/İSTANBUL