T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

PARÇACIK TAKVİYELİ FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN MEKANİKSEL VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİN ARAŞTIRILMASI

ELİF GÖBELOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOÇ.DR. ARİF UZUN

EKİM - 2023
KASTAMONU

TEZ ONAYI

ELİF GÖBELOĞLU tarafından hazırlanan "**PARÇACIK TAKVİYELİ FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN MEKANİKSEL VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **06.10.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Arif UZUN Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Erman ZURNACI Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA Gazi Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ .....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Elif GÖBELOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PARÇACIK TAKVİYELİ FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN MEKANİKSEL VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ELİF GÖBELOĞLU

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN:DOÇ. DR. ARİF UZUN

Bu çalışmada boşluk tutucu tekniği ile parçacık takviyeli alüminyum köpükler üretilmiş ve üretilen köpüklerin mekaniksel ve fiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Köpüklerin üretiminde başlangıç malzemeleri olarak %99,5 saflıkta Al tozu (<44 µm), ortalama çapı 7 µm SiC parçacıkları ve boyutları 1-5 mm arasında değişen üre granülleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar alüminyum ve SiC parçacıklarının (ağırlıkça %3, %5 ve %7) karıştırılması ile başlanmıştır. Ardından boşluk tutucu olarak hacimce %75 üre granülleri Al-SiC karışımına ilave edilmiştir. Hazırlanan karışım üç boyutlu bir karıştırıcıda 30 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra karışım tek eksenli hidrolik preste 600 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır. Preslenmiş kompaktlardaki ürelerin çözünümü için numuneler 80°C'de 3 saat su banyosunda bekletilmiş ve sonrasında 650°C'de 2 saat boyunca fırında sinterleme işlemine tabii tutulmuştur. Üretilen numunelerin sıkıştırma kuvvetleri altında ezilme davranışlarını belirlemek için basma testi uygulanmıştır. Bununla birlikte hücre duvarlarındaki sertlik değişimini belirlemek için mikro sertlik testleri uygulanırken, köpük yapıların gözenek morfolojileri ve yoğunluk değişimleri karakterize edilmiştir. Buna göre her üç köpük türünde de (Al köpük, %5 SiC-Al köpük ve FD-Al köpük) elde edilen gözeneklilik miktarı kullanılan üre miktarıyla oransal olarak (%75) uyum sağlamıştır. Bununla birlikte SiC parçacıklarının köpüklerin hücre morfolojisi üzerindeki etkisi yok denecek kadar azdır. Diğer taraftan mekanik performansın gelişimi açısından oldukça önemli etkiye sahiptir. Çökme gerilimi (4,48 MPa), plato gerilimi (5,01 MPa) ve enerji emme kapasitesinin (2,47 MJ/m^3) en yüksek olduğu köpük türü FD-Al köpüklerdir.

ANAHTAR KELİMELER: Al köpük, SiC, üre

Ekim 2023, 40 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF PARTICLE REINFORCED FUNCTIONAL GRADED ALUMINUM FOAM

ELİF GÖBELOĞLU

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. ARİF UZUN

In this study, particle (SiC) reinforced aluminum foams were produced using the space holder technique and the mechanical and physical properties of the produced foams were compared. In the production of foams, 99.5% pure Al powder (<44 μm), SiC particles with an average diameter of 7 μm and urea granules with sizes ranging from 1-5 mm were used as starting materials. Experimental studies started with mixing aluminum and SiC particles (3%, 5% and 7% by weight). Then, 75% by volume urea granules were added to the Al-SiC mixture as space holder. The prepared mixture was mixed in a three-dimensional mixer for 30 minutes. Then, the mixture was compressed under 600 MPa pressure in a uniaxial hydraulic press. To dissolve the ureas in the pressed compacts, the samples were kept in a water bath at 80 °C for 3 hours and then subjected to sintering in the oven at 650°C for 2 hours. Compression test was applied to determine the crushing behavior of the produced samples under compression forces. In addition, microhardness tests were applied to determine the hardness change in the cell walls, while the pore morphologies and density changes of the foam structures were characterized. Accordingly, the amount of porosity obtained in all three foam types (Al foam, 5% SiC-Al foam and FD-Al foam) was proportionally compatible with the amount of urea used (75%). In addition, the effect of SiC particles on the cell morphology of foams is negligible. On the other hand, it has a very important effect in terms of the development of mechanical performance. The foam type with the highest collapse stress (4.48 MPa), plateau stress (5.01 MPa) and energy absorption capacity (2.47 MJ/m^3) is FD-Al foams.

KEYWORDS: Al foam, SiC, urea

October 2023, 40 Page

TEŞEKKÜR

Tezimin her aşamasında bilgisini ve değerli zamanını benimle paylaşan tecrübelerinden faydalandığım, her konuda bana yol gösteren saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Arif UZUN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans sürecim boyunca pozitif enerjisiyle daima yanımda yer alan, yardımını esirgemeyen sevgili arkadaşım Esma Gizem KIRMIZI'ya teşekkür ederim. Son olarak bugünlere gelmemi sağlayan, hayatımın her döneminde maddi manevi destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

ELİF GÖBELOĞLU

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **ii**
TAAHHÜTNAME ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **viii**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **ix**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **x**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Alüminyum Köpükler 1
1.2 Seramik Takviyeli Alüminyum Köpükler 2
1.3 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Alüminyum Köpükler 4
2. ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ **8**
2.1 Toz Metalurjisi 8
2.2 Gaz Enjeksiyon Yöntemi 9
2.3 Çoğaltma İşlemi 10
2.4 Sürtünme Karıştırma İşlemi 11
2.5 Boşluk Tutucu Tekniği 12
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **15**
3.1 Malzemeler 15
3.2 Tozların Karıştırılması 15
3.3 Presleme İşlemi 17
3.4 Üre Çözündürme ve Sinterleme İşlemleri 17
3.5 Karakterizasyon İşlemleri 18
3.5.1 Makro ve Mikro Yapısal Analizler 18
3.5.2 Yoğunluk ve Gözeneklilik Ölçümü 18
3.5.3 Basma Testi 19
3.5.4 Mikro Sertlik Ölçümü 19
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA **20**
4.1 Makro Yapı Analizleri 20
4.2 Mikro Yapı Analizleri 21
4.3 Gözeneklilik ve Yoğunluk Değişimi 23
4.4 Al Köpüklerin Ezilme Davranışı 25
4.5 Al Köpüklerin Enerji Sönümleme Kapasitesi 30
4.6 Hücre Duvarlarının Mikro Sertlik Değişimi 31
5. SONUÇLAR **33**
KAYNAKLAR **35**
ÖZGEÇMİŞ **40**

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Kapalı (a) ve açık (b) gözenekli alüminyum köpük 1
Şekil 2.1 Metalik köpükler için toz metalurjisi tekniğinin şematik diyagramı 9
Şekil 2.2 Gaz enjeksiyon yöntemi 10
Şekil 2.3 Metalik köpük üretimi için çoğaltma sürecinin şeması 11
Şekil 2.4 SKK ile değişen gözenek yapısına sahip bir FD-köpük öncüsünün üretim sürecinin şematik gösterimi 12
Şekil 2.5 FD-Al köpük numune 12
Şekil 2.6 Boşluk tutucu yöntemi ile alüminyum köpük üretiminin şematik gösterimi 14
Şekil 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelere ait SEM görüntüleri, a) Al tozu, b) SiC tozu, c) üre granülleri 15
Şekil 3.2 Turbula tipi toz karıştırma makinesi 16
Şekil 3.3 Al-SiC-üre karışımı 16
Şekil 3.4 Sıkıştırma sonrası üretilen numuneler (Al (%95) – SiC (%5) – Üre) 17
Şekil 3.5 Çözündürme ve sinterleme işlemleri 18
Şekil 3.6 Alüminyum köpüklerin zımparalama işlemi 18
Şekil 4.1 Al köpüklerin gözenek yapısı 21
Şekil 4.2 Alüminyum köpüklerin hücre duvarı SEM görüntüleri 22
Şekil 4.3 FD-Al köpüğün EDS analizi 22
Şekil 4.4 FD-Al köpüğün analitik haritalama analizi 23
Şekil 4.5 Al köpüklerin gözeneklilik değişimleri 24
Şekil 4.6 Al köpüklerde yoğunluk (a) ve bağıl yoğunluk (b) değişimi 25
Şekil 4.7 Al köpüklerin sıkıştırma altında gerilim-gerinim eğrileri 27
Şekil 4.8 Alüminyum köpüklere ait elastik modül değerleri 28
Şekil 4.9 Alüminyum köpüklere ait çökme gerilimi değerleri 28
Şekil 4.10 Alüminyum köpüklere ait plato gerilimi değerleri 29
Şekil 4.11 Alüminyum köpüklerin sıkıştırma gerilimi altında deformasyon davranışları, a) Al köpük, b) %5 SiC/Al köpük, c) FD-Al köpük 30
Şekil 4.12 Alüminyum köpüklerin enerji emilimi kapasitesi 31
Şekil 4.13 Alüminyum köpüklerin mikro sertlik değişimi 32

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 Tozların karışım oranları 16

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

ρs	**:** Sinterlenmiş köpük numunenin yoğunluğu
ρT	**:** Köpük numunenin teorik yoğunluğu
ρ*	**:** Köpük numunenin bağıl yoğunluğu
AC3A	**:** Açık hücreli alüminyum alaşımı
B_4C	**:** Bor karbür
c-BN	**:** Kübik bor nitrür
SiC	**:** Silisyum Karbür
TiB_2	**:** Titanyum Diborür
Y_2O_3	**:** İtriyum (III) Oksit
Al_2O_3	**:** Alüminyum Oksit
NaCI	**:** Sodyum Klorür
c-BN	**:** Kübik- Bor Nitrür

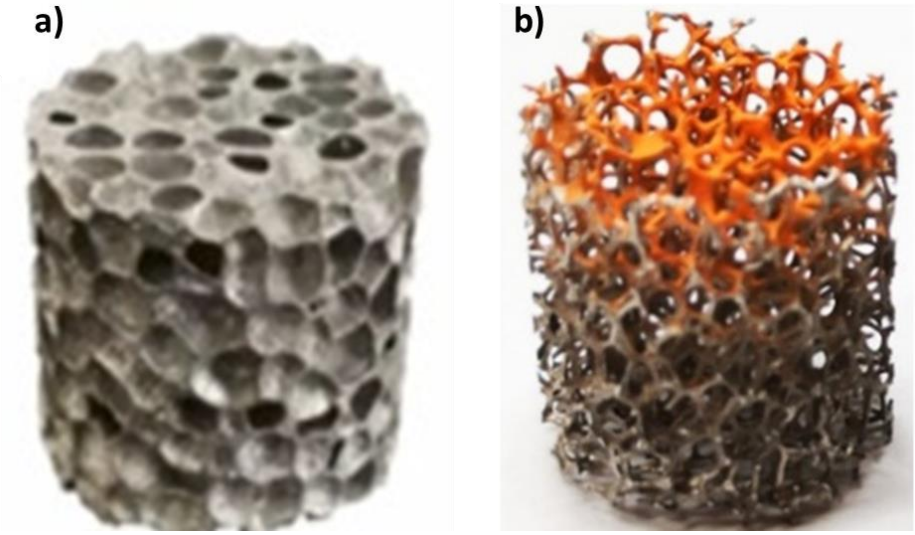
Kısaltmalar

mm	**:** Milimetre
µm	**:** Mikrometre
dk	**:** Dakika
%	**:** Yüzde
°C	**:** Santigrat derece
TM	**:** Toz metalurjisi
FD	**:** Fonksiyonel derecelendirilmiş
SKK	**:** Sürtünme karıştırma kaynağı
SKP	**:** Sürtünme karıştırma prosesi
AMKK	**:** Alüminyum matrisli kompozit köpükler
KNT	**:** Karbon nanotüpler
EDS	**:** Enerji dağıtıcı spektrum

1. GİRİŞ

1.1 Alüminyum Köpükler

Metal köpükler çok çeşitli benzersiz özelliklere ve potansiyel uygulamalara sahip büyüleyici malzemelerdir. Hafiflik, ses yalıtımı, alev geciktirici, şok emme, elektromanyetik kalkanlama gibi benzersiz özellikleri sunarken, katı metallere kıyasla daha düşük mekanik mukavemet, hassas ve tutarlı gözenek yapıları elde etmede zorluklar gibi bazı sınırlamalara da sahip olduklarını belirtmek gerekir (Kosenko vd., 2022; Singh vd., 2023). Metal köpükler, yapısal ve işlevsel özelliklerinin benzersiz kombinasyonu nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Bu köpükler, bağlantılarına göre kapalı hücreli ve açık hücreli olarak sınıflandırılabilen gözenekli yapıları ile karakterize edilir (Şekil 1.1). Metal köpüklerin imalatında alüminyum, bakır, nikel, titanyum, magnezyum, altın ve paslanmaz çelik dâhil olmak üzere çeşitli metaller kullanılmıştır. Bu metaller arasında alüminyum köpük, sunduğu çeşitli avantajlar nedeniyle en kapsamlı şekilde çalışılan ve uygulanan malzeme olarak ortaya çıkmıştır. Bu avantajlar arasında düşük erime noktası, uygun fiyat, bol miktarda bulunabilirlik ve minimum çevresel etki yer almaktadır (Qingxian vd., 2015; Tripathi vd., 2021).



Şekil 2.1 Kapalı (a) ve açık (b) gözenekli alüminyum köpük (Mauko vd., 2023; Wang vd., 2023)

1940'larda alüminyum köpüğün ortaya çıkmasından bu yana, bu malzemenin çeşitli yönlerini keşfetmek için dünya çapında akademisyenler tarafından kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırma çabaları, bileşim tasarımı, üretim yöntemleri, performans kontrolü ve hata mekanizmaları gibi alanlara odaklanmıştır (Czerwinski, 2021; Lu vd., 2021). Endüstriyel ve yapısal uygulamalarda hafif olmaları, yüksek özgül dayanıma sahip olmaları, düşük yoğunluklu olmaları, yüksek özgül enerjiye sahip olmaları, akışkan geçirgen olmaları, yüksek korozyona dayanıklı olmaları, geri dönüştürülebilir olmaları, yüksek düzeyde darbe enerjisi emilimine sahip olmaları, ısıya dayanıklı olmaları, yüksek düzeyde ses ve titreşim emilimine sahip olmaları gibi ayırt edici nitelikleri nedeniyle alüminyum köpük sıklıkla tercih edilmektedir (Bayraktar ve Katundi, 2010; Sharma ve Saxena, 2022).

1.2 Seramik Takviyeli Alüminyum Köpükler

Alüminyum köpük kompozit yapılar, yapısal özellikleri işlevsel özelliklerle birleştirme yetenekleri nedeniyle önemli ölçüde dikkat çekmiş ve bu da onları zorlu hizmet ortamları için uygun hale getirmiştir. Bu yapılar yüksek araştırma değerine ve geniş uygulama olanaklarına sahiptir (Faidzi vd., 2021; Pratomo vd., 2020). Alüminyum köpük kompozit yapıların hafiflik ve enerji emme özellikleri, onları yeni hafif yapılar tasarlamak için özellikle çekici kılmaktadır. Bu durum, otomobil, demiryolu taşımacılığı, askeri teçhizat ve havacılık gibi çeşitli sektörlerde kullanımlarına yönelik taleplerin artmasına yol açmıştır.

Alüminyum köpük kompozit yapıların dikkat çekici özellikleri, sahip oldukları benzersiz hücresel yapıya bağlanabilir. Hücresel yapı, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve mükemmel enerji emme yetenekleri sağlayan birbirine bağlı gözeneklerden oluşur. Bu özellikler, alüminyum köpük kompozitleri ağırlık azaltma ve darbe direncinin çok önemli olduğu uygulamalar için uygun hale getirmiştir. Üretim yöntemleri açısından, alüminyum köpük kompozitlerin üretimi için çeşitli teknikler geliştirilmiştir (Karuppasamy ve Barik, 2021). Üretim yöntemleri hakkında detaylı bilgi Bölüm 2'de verilmiştir. Her yöntemin avantajları ve sınırlamaları vardır ve yöntemin seçimi, istenen köpük özellikleri ve özel uygulama gereksinimleri gibi faktörlere bağlıdır.

Alüminyum köpüklerde mikro boyutlu seramik parçacıkların kullanımı, köpük stabilitesini artırmak ve gözenek boyutu dağılımını kontrol etmek için yaygındır. Bu seramik partiküller sıvı metale eklendiğinde, sıvı/gaz ara yüzüne göç etme eğilimindedirler. Bu göç, köpürme işlemi sırasında oluşan kabarcıkların stabilize edilmesine yardımcı olur, gözeneklerin birleşmelerini önler ve daha düzgün bir gözenek yapısıyla sonuçlanmasını sağlar. Ek olarak, sıvı metalde seramik partiküllerin bulunması viskoziteyi arttırır. Bu artan viskozite, köpüğün genleşme hızının kontrol edilmesine ve büyük, düzensiz gözeneklerin oluşumunun önlenmesine yardımcı olabilir. Seramik partiküller gözenek boyutlarının daha düzgün dağılımını teşvik ederek metal köpüğün genel stabilitesine ve mekanik özelliklerine katkıda bulunur (Jin vd., 1991).

Alüminyum köpüklerde matris mukavemetini iyileştirmek ve köpük özelliklerini geliştirmek için TiB_2, Y_2O_3 ve Al_2O_3, özellikle mikron boyutlu SiC partikülleri (SiC_P) gibi çeşitli takviyeler kullanılmıştır (Güden ve Yüksel, 2006; Kennedy ve Asavavisitchai, 2004; Mahmutyazıcıoğlu vd., 2013; Zhao vd., 2006). Bu çalışmalarda genellikle hacimce %10'un üzerinde mikro boyutlu takviyelere sahip kompozit köpüklere odaklanılmıştır. Şimdiye kadar ilave edilen bu parçacıkların çoğunun ergiyik yöntemlerle veya toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş alüminyum köpükler için kullanıldığı görülmektedir.

Li vd. (2007), alüminyum köpüklere B_4C, c-BN ve SiC gibi seramik parçacık ilaveleri ile köpüğün mekanik özelliklerinin geliştiğini belirtmişlerdir. Bu seramik parçacıklarının eklenmesi köpüklerin tepe gerilimini, elastik modülünü ve enerji emilimini arttırmıştır. Seramik takviyeler arasında en iyi enerji emilimini %15 c-BN takviyeli köpük numuneler elde edilmiştir.

Wichianrat vd. (2012), açık hücreli alüminyum alaşımı (AC3A alaşımı tipi) köpüklere değişen kütle fraksiyonlarında SiC parçacıkları ekledi. Deneysel sonuçlar köpüğe SiC parçacıklarının eklenmesi ile köpüğün mikro sertliğinde ve basma dayanımında artışın meydana geldiğini göstermiştir.

Kulshreshtha vd. (2021), karıştırma döküm tekniğiyle hazırlanan alüminyum köpüğün basma deformasyonu üzerinde parçacık boyutunun etkisini inceledi. Araştırmacılar biri nano parçacıklarla güçlendirilmiş diğeri daha iri parçacıklarla güçlendirilmiş iki tür kompozit köpüğün mekanik özelliklerini karşılaştırdılar. Sonuçlar, nano parçacıklarla güçlendirilmiş köpüğün daha küçük hücre boyutuna, daha yüksek basma dayanımına ve daha iri parçacıklarla güçlendirilmiş köpüğe kıyasla neredeyse iki kat daha fazla enerji emme kapasitesine sahip olduğunu gösterdi. Bu durum nano parçacıklarla güçlendirilmiş köpükteki daha küçük hücre boyutuna ve parçacıkların hücre duvarı boyunca düzgün dağılımına atfedildi. Mekanik özelliklerde gözlenen farklılıklarda yoğunluk ve hücre duvarı kalınlığının etkili olduğu da ayrıca vurgulanmıştır.

Liu vd. (2009), ZA22/SiCp kompozit köpüklerin basma yükleri altında deformasyon mekanizmalarını ve çatlak davranışlarını incelediler. ZA22/SiCp kompozit köpüklerin büyük gerilim dalgalanmalarıyla birlikte kırılgan bir basma davranışı sergilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte SiC seramik parçacıklarının, çatlakların çekirdeklenmesi ve yayılmasıyla gözlemlendiği gibi, basma dayanımı üzerinde hem takviye edici bir etkiye hem de baskılayıcı bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır.

1.3 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Alüminyum Köpükler

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş alüminyum (FD-Al) köpükler, hücresel malzemeler alanında heyecan verici bir gelişmedir. Bu köpükler, konuma göre değişen özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Köpüğün farklı kısımları farklı özelliklere sahip olabilir. Bu yenilik, bir yapı veya uygulama içindeki özel ihtiyaçlara göre malzeme performansının optimize edilmesine olanak tanır. İşlevsel olarak derecelendirilmiş alüminyum köpüklerler de pozisyona bağlı gözenek yapıları köpük içindeki boşlukların düzenini ve boyutunu ifade eder. Köpüğün farklı bölgelerindeki gözenek yapısı manipüle edilerek sertlik, mukavemet ve enerji emilimi gibi değişen mekanik özellikler elde edilebilir (Ferreira vd., 2010; Hangai vd., 2012; Shinagawa, 2008). Örneğin, darbeler sırasında daha fazla enerji emilimi için köpük yapı daha büyük gözenekli bölgelere sahip olabilirken, diğer bölgeler daha fazla sertlik için daha ince gözeneklere sahip olabilir.

İşlevsel derecelendirme elde etmenin bir başka yolu da alüminyum köpüğün alaşım bileşimini değiştirmektir. Farklı alaşım bileşimleri, termal iletkenlik, korozyon direnci ve mukavemet gibi özelliklerde değişikliklere neden olabilir. Köpüğün farklı kısımları için alaşımların stratejik olarak seçilmesi malzemenin belirli koşullar altında en iyi performans sergilemesini sağlar (Hangai vd., 2011). FD-Al köpükler, mühendislerin ve tasarımcıların karmaşık uygulamalar için malzeme performansını optimize etmelerine olanak tanır. Örneğin, yüzeyi boyunca değişen mekanik yüklere maruz kalan bir yapıda köpük, gerilimi verimli bir şekilde dağıtmak ve lokalize hataları önlemek için değişen sertlik bölgeleri ile tasarlanabilir. Değişken gözenek yapılarına sahip FD-Al köpükler tasarlayarak kontrollü sıralı deformasyon elde edilebilir. Bu, köpüğün dış kuvvetlere maruz kaldığında belirli bir düzende ve şekilde deforme olacağı anlamına gelmektedir (Hangai vd., 2012).

FD-Al köpükler oluşturma yeteneği, geniş bir uygulama yelpazesine kapı açmaktadır. Örneğin, havacılık ve uzay mühendisliğinde, hassas bileşenleri aşırı sıcaklıklardan korumak için farklı termal özelliklere sahip köpükler tasarlanabilir. Otomotiv uygulamalarında, ağırlığı en aza indirirken çarpışma güvenliğini artırmak için FD-Al köpükler kullanılabilir. FD-Al köpüklerin üretim süreçlerinin gözenek boyutu, yoğunluk ve alaşım bileşimindeki farklılıkları karşılaması gerekir. İstenen malzeme gradyanlarını elde etmek için gelişmiş üretim teknikleri kullanılmaktadır.

Hassani ve Paydar (2021) tarafından yapılan çalışmada kademeli gözenek yapısına sahip alüminyum köpüklerin mekanik özelliklerindeki iyileşme, gözenek miktarını ayarlayarak imal edilen köpüğün uzunluğu boyunca bir yoğunluk gradyanı oluşturulmasından kaynaklanmaktadır. Yoğunluk gradyanına sahip köpükler, aynı bağıl yoğunluğa ve tek tip yapıya sahip köpüğe kıyasla yaklaşık iki kat daha yüksek plato gerilimi ve daha yüksek enerji emme kabiliyeti göstermektedir. Ayrıca, gözenek frekansının tasarlanmasıyla köpüğün enerji emme kabiliyetindeki iyileşmenin, daha düşük bağıl yoğunluğa sahip köpük için daha belirgin olduğu da gösterilmiştir.

Boşluk tutucu hacim fraksiyonunun değişimi, FD-Al köpüğün mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Hangai vd. (2016), tarafından yapılan çalışmada

üretilen FD-Al köpükler, u = %60, %70 ve %80 kesintisiz sınırlara sahip kademeli gözenekliliğe sahipti. Üretilen FD-Al köpükler üzerindeki sıkıştırma testlerinin sonuçlarına göre, plato gerilimi ve enerji emilimi artan u ile azalma eğilimindedir.

Wang vd. (2022), boşluk tutucu yöntemiyle ürettikleri FD-alüminyum matrisli kompozit köpükler (AMKK) ile geleneksel alüminyum köpüklerin ezilme davranışlarını karşılaştırmışlardır. FD-AMKK'lerin üst katmanı tipik olarak saf Al köpüklere karşılık gelirken, alt katman karbon nanotüplerle güçlendirilmiş Al kompozit köpüklere (KNTs/Al köpükler) karşılık gelmektedir. Sıkıştırma davranışı açısından, FD-AMKK'lerin gerilme-gerinim eğrileri başlangıç doğrusal elastik deformasyon aşaması, bir plato bölgesi ve bir yoğunlaşma bölgesi şeklinde üç bölge sergilemiştir. FD-AMKK'lerin deformasyonu en zayıf katmandan başlamıştır. Bu da en az mekanik mukavemete sahip katmanın ilk önce deforme olduğu anlamına gelmektedir. Bununla birlikte sıkıştırma davranışındaki spesifik farklılıkların, köpük içindeki karbon nanotüpler (KNT'ler) gibi takviye parçacıklarının bileşimine, yapısına ve içeriğine bağlı olarak değişebilmektedir.

Üç katmanlı FD-köpük malzeme gibi yoğunluğu derecelendirilmiş köpüklerin, tek tip köpüğe kıyasla üstün basınç özelliklerine sahip olduğu Sharma vd. (2023), tarafından belirtilmektedir. Yoğunluk derecelendirmesi, köpüğün yük taşıma kapasitesini artırarak FD-köpük malzemelerde elde edilen 142 MPa'lık maksimum basma dayanımı ile sonuçlanmıştır. Ayrıca, FD-köpük malzemelerin yoğunlaşma gerinimi tek tip köpüğe kıyasla %26 daha yüksektir. Bu bulgular, yoğunluğu derecelendirilmiş köpüklerin tek tip köpüklere kıyasla basma dayanımı ve yoğunlaşma gerinimi açısından daha iyi mekanik özellikler sergilediğini göstermektedir.

He vd. (2020), yoğunluk dereceli alüminyum köpüğün mekanik özelliklerini yarı statik basma testleri ile incelenmiştir. Basma gerilimi-gerinim eğrileri ve yoğunluk dağılımı arasındaki ilişki, uyarlanabilir mekanik özelliklere müsaade edecek şekilde araştırmacılar tarafından kurulmuştur. Derecelendirilmiş alüminyum köpüğün basma eğrileri elastik, plastik plato ve yoğunlaşma şeklinde üç tipik aşama sergilemiştir. Derecelendirilmiş köpükteki aşamalı çökme, düşük yoğunluk bölgesinde başlamış ve

daha yoğun bölgeye doğru genişlemiştir. İlgili akış gerilimi hesaplanmış ve alüminyum köpüğün yoğunluk gradyanına dayalı olarak iyi bir şekilde tahmin edilmiştir.

Brothers ve Dunand (2008) polimer çoğaltma tekniği ile ürettikleri yoğunluğu derecelendirilmiş Al-6061 köpükler ile tek tip köpüklerin sıkışma davranışlarını karşılaştırılmıştır. Tek tip köpük, neredeyse sabit bir plato gerilimi ile geleneksel metalik köpüklerin karakteristik basma davranışını sergilerken yoğunluğu artırılmış köpük düzgün bir şekilde yükselen bir plato gerilimi göstermiştir. Yoğunluk dereceli köpüğün plato bölgesinde belirgin bir pozitif eğime sahip olduğu görülmüştür. Bu da en düşük yoğunluklu bölgede başlayan ve daha güçlü, daha yüksek yoğunluklu bölgelere doğru ilerleyen deformasyona işaret etmektedir. Deformasyon davranışındaki bu farklılıklar, üniform köpüklerin basma davranışı için yarı ampirik ölçeklendirme ilişkilerine dayanan basit bir seri kompozit model kullanılarak modellenmiştir.

2. ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

2.1 Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi yöntemi belirli bir hücresel yapıya sahip alüminyum köpük oluşturmak için birkaç aşama içerir (Şekil 2.1) (Parveez vd., 2022). Bunlar;

Matris tozu ve köpürtücü maddenin karıştırılması: Süreç, alüminyum matris tozunun (alüminyum parçacıkları) bir köpürtücü madde ile iyice karıştırılmasıyla başlar. Köpürtücü madde, yüksek sıcaklıklarda ayrışarak ergimiş veya yarı ergimiş alüminyum matris içinde kabarcıklar oluşturan bir maddedir. Bu matris tozu ve köpürtücü madde karışımı, köpüğü oluşturacak ilk malzemeyi oluşturur.

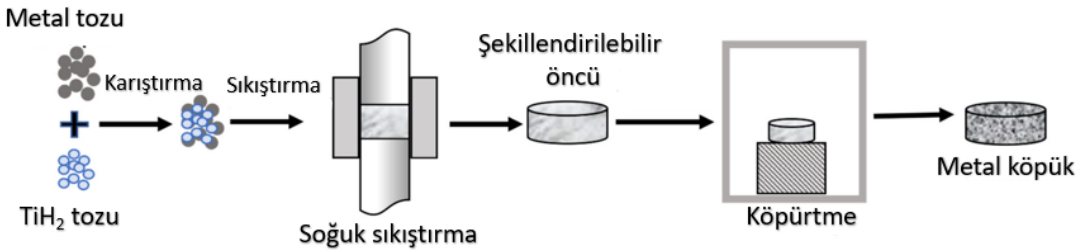
Köpürebilen öncünün yoğunlaştırılması ve şekillendirilmesi: "Köpüren karışım" olarak adlandırılan karışım malzemenin sıkıştırılması ve köpüklenebilen bir öncü oluşturulması için şekillendirilmesi gerekir. Karışımı yoğunlaştırmak ve istenen şekle sokmak için presleme, ekstrüzyon veya haddeleme gibi çeşitli yöntemler kullanılır. Bu öncü malzeme köpük üretim sürecinin başlangıç noktası olarak hizmet eder.

Köpürtme işlemi: Köpürtülebilir öncü daha sonra bir köpürtme fırınına yerleştirilir. Fırında öncü malzeme yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılır. Öncü malzeme içindeki köpürtücü madde ısı nedeniyle ayrışırken gaz açığa çıkarır. Bu gaz ergimiş veya yarı ergimiş alüminyum matris içinde sıkışarak kabarcıklar oluşturur.

Genleşme ve soğutma: Köpürtücü madde tarafından üretilen gaz biriktikçe, köpürtülebilir öncü malzeme genleşmeye başlar ve malzemenin hacminin artmasına neden olur. Malzemenin genleşmesi ve köpürtücü maddenin ayrışma hızı fırın içindeki sıcaklık profili tarafından kontrol edilir. İstenen köpük yapısı elde edildiğinde köpürtülebilir öncü soğumaya bırakılır.

Kapalı hücreli alüminyum köpük: Soğutma işlemi alüminyum matrisi katılaştırır ve içinde hapsolmuş kabarcıklardan oluşan hücresel bir ağa sahip katı bir yapı ortaya çıkar. Bu yapı, tek tek hücrelerin katı duvarlarla birbirinden izole edildiği kapalı

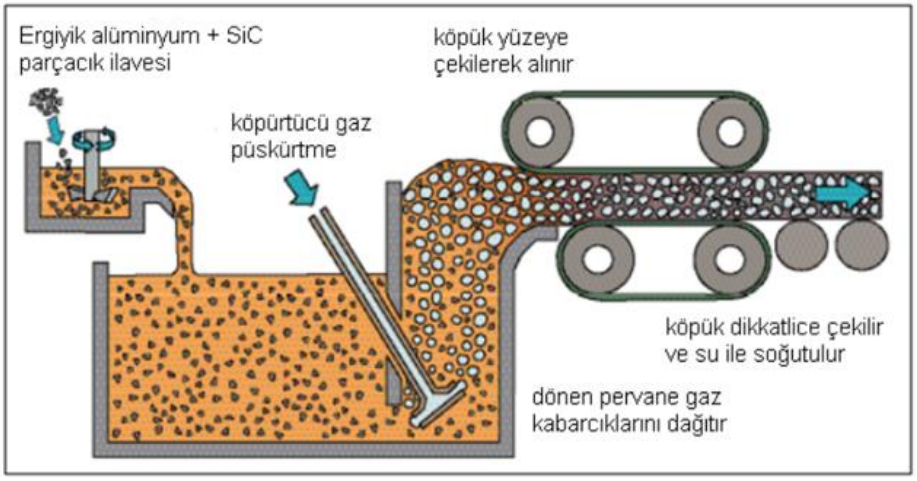
hücreli alüminyum köpük olarak bilinir. Köpüğün yoğunluk ve hücre boyutu gibi özellikleri başlangıç karışımının bileşiminden, köpürtücü maddeden ve işlem koşullarından etkilenir (Banhart, 2000, 2001; Baumeister vd., 1997).



Şekil 2.1 Metalik köpükler için toz metalurjisi tekniğinin şematik diyagramı (Parveez vd., 2022)

2.2 Gaz Enjeksiyon Yöntemi

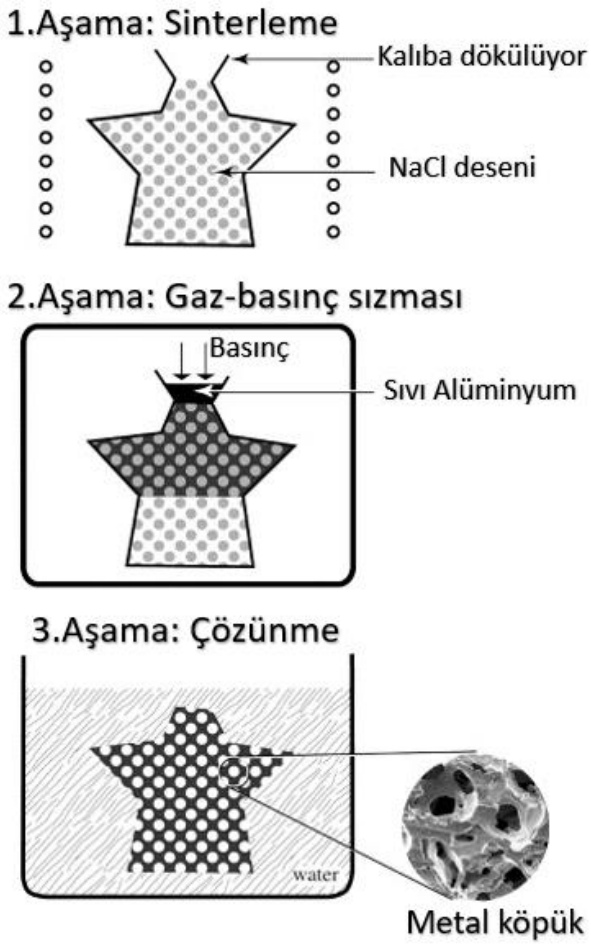
Bu yöntem, bir köpük yapısı oluşturmak için erimiş alüminyum eriyiğine gaz enjekte edilmesini içermektedir. Süreç seramik parçacıkların ön işleme tabi tutulması ve alüminyum eriyiğine eklenmesi ile başlamaktadır. Bu parçacıklar eriyiğin viskozitesini arttırır ve gaz kabarcıklarının çok hızlı bir şekilde kaçmasını önlemeye yardımcı olurlar. Alüminyum eriyiğine gaz (genellikle nitrojen gibi inert bir gaz) enjekte etmek için bir üfleme borusu kullanılmaktadır. Gaz eriyik içinde kabarcıklar oluşturur ve seramik parçacıklar bu kabarcıkların sıvı metal boyunca dağılmasına yardımcı olur. Ergimiş alüminyum içindeki kabarcıkları daha da dağıtmak için bir karıştırma aparatı kullanılır. Bu, gaz kabarcıklarının eşit dağılımını ve düzgün karışımını sağlar. Kabarcıklar ergimiş alüminyum boyunca yükseldikçe, soğutuldukları ve katılaştıkları sıvı yüzeyine yaklaşırlar. Bu katılaştırma işlemi, kabarcıkları yerinde kilitleyerek katı duvarlardan ve sıkışmış gaz dolu hücrelerden oluşan bir ağa sahip köpük yapısı oluşturur. Süreç sürekli olacak şekilde tasarlanmıştır ve alüminyum köpük üretiminin devam etmesini sağlamaktadır. Yeni kabarcıklar enjekte edildikçe ve sıvı yüzeyine yükseldikçe katılaşır ve köpük yapısına katkıda bulunurlar. Bu sürekli şekillendirme prosesi verimli üretim sağlamaktadır (Şekil 2.2) (Kulshreshtha ve Dhakad, 2020).



Şekil 2.2 Gaz enjeksiyon yöntemi (Khare ve Sorte, 2021)

2.3 Çoğaltma İşlemi

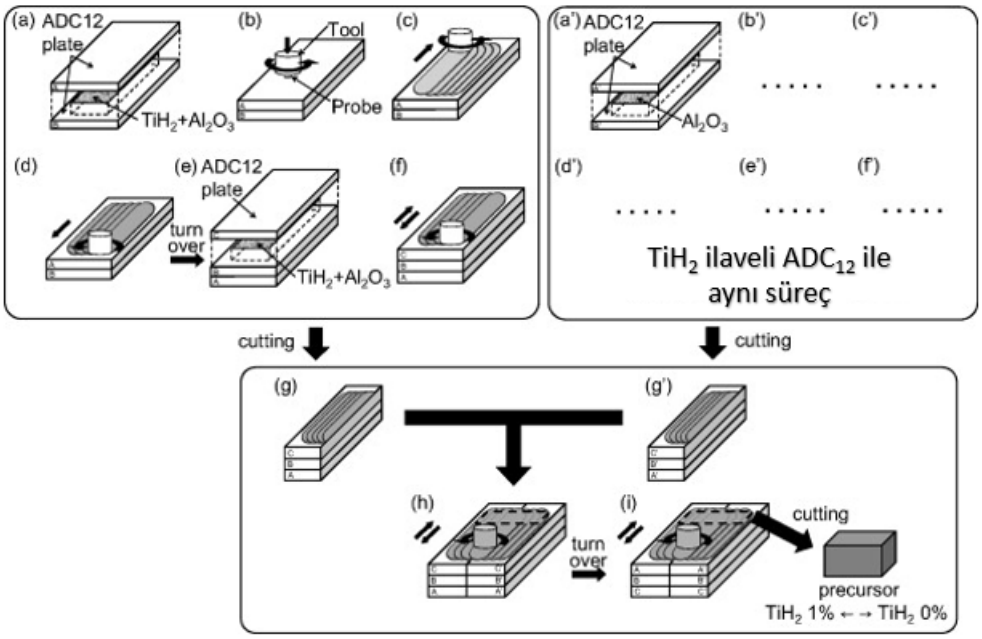
Saf alüminyum köpükler Şekil 2.3'de gösterildiği gibi gözenekli tuz kalıplarının infiltrasyonu ve ardından tuzun çözünmesi ile üretilir. Üretimde kullanılan kalıp, sodyum klorür tozunun paketlenmiş bir yatağının sinterlenmesiyle hazırlanır. Bu yüksek saflıktaki tuzun parçacık boyutu yaklaşık 500 μm çapındadır ve şekilleri eş eksenli veya alınan partiye bağlı olarak kübik ile küresel arasında değişir. Deseni üretmek için gevşek tuz tozu bor nitrür ile kaplanmış alümina potalara dökülür. Kroze daha sonra sabit bir yoğunluk elde edilene kadar vurulur. Bu kroze soğuk bir fırına yerleştirilir ve havada 785°C sinterleme sıcaklığına kadar ısıtılır ve ardından fırın soğutulur. Sinterlemeden sonra tuz kalıbı çıkarılır, grafitle kaplanmış benzer bir alümina potaya yerleştirilir ve kalıbın üzerine yüksek saflıkta (%99,99) alüminyumdan bir kütük yerleştirilir. Bu düzenek sıcak duvarlı ve gaz basınçlı infiltrasyon aparatına yerleştirilir ve burada vakum altında 750°C' ye ısıtılır. Sıcaklık sabitlendikten sonra, sistem argon ile 0,5 MPa basınca kadar basınçlandırılır ve böylece sıvı alüminyum preformun içine sızar. İnfiltrasyon tamamlandıktan sonra kroze, infiltrasyon aparatı içindeki soğuk bir bakır soğutucunun üzerine indirilerek krozenin altından yukarıya doğru yönlü katılaşma başlatılır. Katılaşmadan sonra malzeme infiltrasyon aparatından çıkarılır ve tuzun çıkarılmasından önce istenen boyutlarda işlenir. Tuz daha sonra damıtılmış suya daldırılarak süzülür (San Marchi ve Mortensen, 2001).



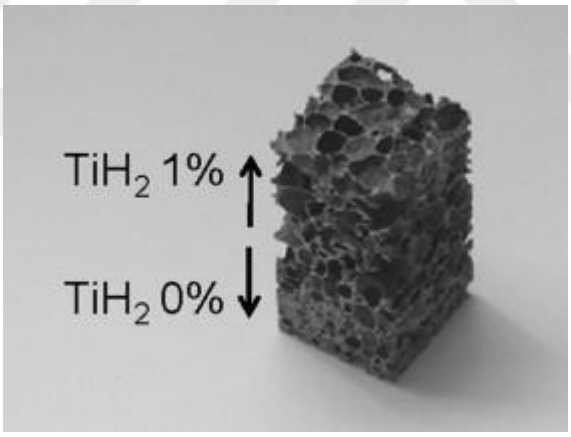
Şekil 2.3 Metalik köpük üretimi için çoğaltma sürecinin şeması (San Marchi ve Mortensen, 2001)

2.4 Sürtünme Karıştırma İşlemi

Şekil 2.4'te fonksiyonel derecelendirilmiş köpük öncüsünün üretim süreci şematik olarak gösterilmektedir. Üretim yönteminde öncelikli olarak alüminyum plakalar arasına köpürtücü madde (TiH_2 tozu <45 μm, %1 ağırlıkça) ve seramik parçacıklar (Al_2O_3 tozu ~1 μm, %5 ağırlıkça) istiflenmektedir. Daha sonra fazla miktarda öncül elde etmek ve tozları iyice karıştırmak için çok geçişli sürtünme karıştırma prosesi (SKP) uygulanmaktadır. Bu işlem bir sürtünme karıştırma kaynak (SKK) makinesi ile gerçekleştirilmektedir. Bindirme şeklinde lamine plakalar her iki taraftan SKK yapılarak alın kaynağı ile birleştirilmektedir. Birleştirilen parçalar köpüğün boyutuna göre kesilmekte ve elde edilen öncü numune bir kalıba yerleştirilip önceden ısıtılmış bir elektrikli fırında ısıtılarak köpürtme işlemine tabii tutulmaktadır (Hangai vd., 2012; 2015). Köpürtme işlemi sonrası elde edilmiş FD-Al köpük yapı Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 SKK ile değişen gözenek yapısına sahip bir FD-köpük öncüsünün üretim sürecinin şematik gösterimi (Hangai vd., 2012)



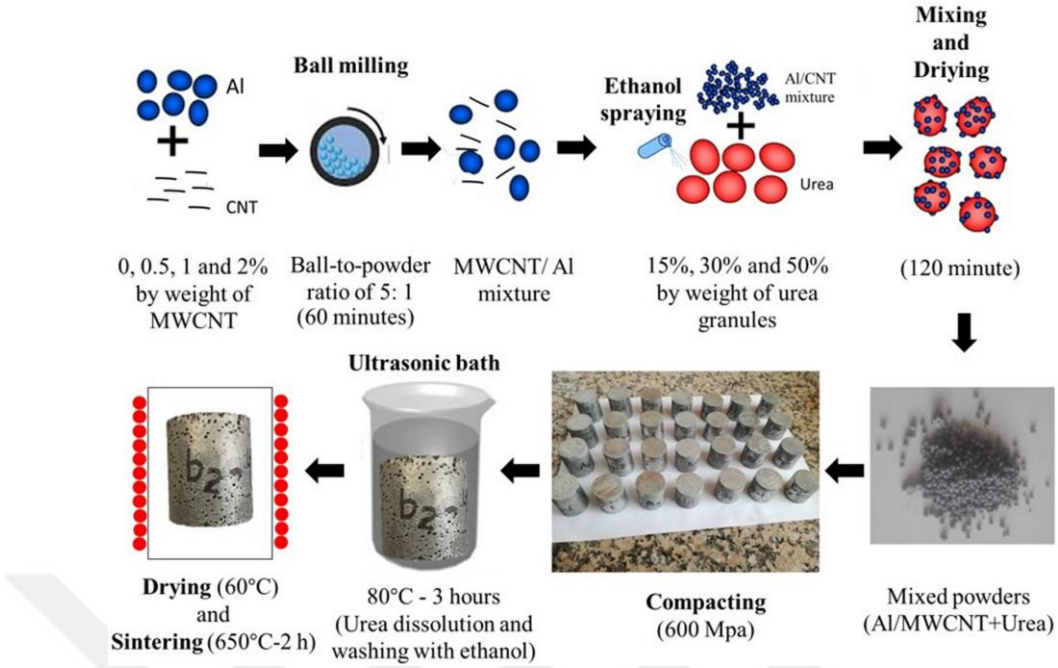
Şekil 2.5 FD-Al köpük numune (Hangai vd., 2012; 2015)

2.5 Boşluk Tutucu Tekniği

Bu teknik sinterleme ve çözündürme işlemi olarak bilinen toz metalurjisi yolu ile düşük maliyetli açık hücreli alüminyum köpükler üretmek için geliştirmiştir (Zhao ve Sun, 2001). Bu teknikte sıkıştırılmış toz karışımında istenen gözenek yapısını oluşturmak için NaCl gibi bir boşluk tutucu kullanılmaktadır. Kompakt hale getirilmiş malzemeler sinterlenir ve ardından çözünme aşamasında boşluk tutucu ortadan kaldırılır. Boşluk tutucu olarak kullanılan malzemenin şekli ve boyutu, gözenekli yapının gözenek boyutunu ve morfolojisini kontrol etmektedir. Buda nihai

ürün olan köpüğün fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Yöntemin kontrol parametreleri üzerine araştırmacılar birtakım incelemeler yapmışlardır (Sun ve Zhao, 2005; Surace vd., 2009; Yang vd., 2007; Zhao vd., 2004). Sinterleme ve çözündürme tekniği ile köpük üretimi NaCl parçacıklarının genellikle düzensiz olması ve ayrıca sıcak suda çözünme ve sinterleme aşamasının uzun zaman alması nedeniyle sınırlı kalabilmektedir (Sun ve Zhao, 2003).

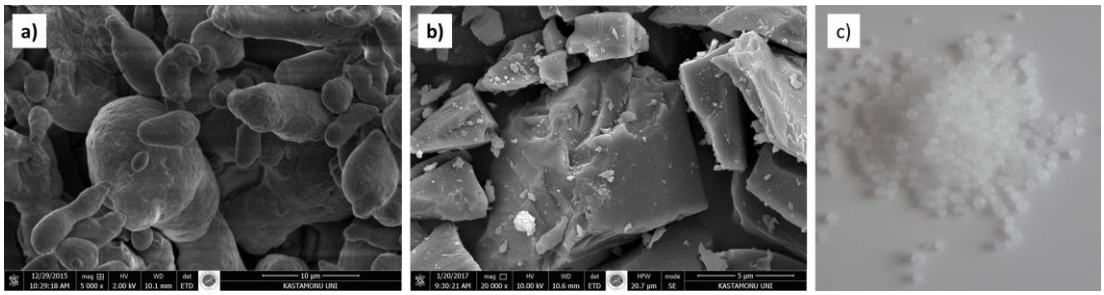
Boşluk tutucu tekniği, metalik köpükler üretmek için çeşitli çalışmalarda başarıyla kullanılmıştır (Abo sbia ve Uzun, 2022; Hassani vd., 2012). Yaygın olarak kullanılan iki boşluk tutucu karbamid ve amonyum bikarbonattır. Şekil 2.6'da boşluk tutucu yöntemi ile alüminyum köpük üretiminin şematik gösterimi verilmiştir. Bu teknik, geleneksel tuz çözündürme işlemine göre daha kısa çözündürme süresi, boşluk tutan parçanın kolaylıkla çıkarılması ve ana metalde minimum kirlenme ve korozyon gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bafti ve Habibolahzadeh (2010) metalik köpüklerin hazırlanması için karbamidin boşluk tutucu olarak kullanımını araştırmıştır. Karbamidin köpük yapısında etkili bir şekilde gözenekler oluşturduğunu ve kolayca çözülebildiğini, bunun da istenen özelliklere sahip bir köpükle sonuçlandığını bulmuşlardır. Çalışma, metalik köpük üretiminde boşluk tutucu olarak karbamid kullanımının fizibilitesini ve etkinliğini göstermiştir.



Şekil 2.6 Boşluk tutucu yöntemi ile alüminyum köpük üretiminin şematik gösterimi (Abo sbia ve Uzun, 2022)

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Malzemeler



Şekil 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelere ait SEM görüntüleri, a) Al tozu, b) SiC tozu, c) üre granülleri

3.2 Tozların Karıştırılması

Toz karıştırma işlemine ilk olarak Al ve SiC parçacıklarının karıştırılması ile başlanılmıştır. Tablo 3.1'de belirtilen oranlarda Al ve SiC parçacıkları turbula tipi karıştırıcıda (Şekil 3.2) 30 dakika boyunca homojen olarak karıştırılmıştır. Akabinde karışım tozların üre granülleri ile homojen bir şekilde karışımlarını sağlamak ve üre granülleri üzerine karışım tozların tutunmalarını sağlamak için granül yüzeylerine etil alkol (2 hacim%) püskürtülmüştür. Islak yüzeylere sahip granüller ile SiC/Al karışımı benzer şekilde turbula tipi karıştırıcıda 30 dakika boyunca homojen olarak karıştırılmıştır. Böylece presleme öncesi Al-SiC-üre karışımı elde edilmiştir (Şekil 3.3).

Tablo 3.1 Tozların karışım oranları

No	Numune		Malzemeler		
			Al (ağırlıkça %)	SiC (ağırlıkça %)	Üre (hacimce %)
1	Al köpük		100	-	75
2	%5 SiC/Al köpük		95	5	75
3	FD-Al köpük	(4. Katman)	93	7	75
		(3. Katman)	95	5	
		(2. Katman)	97	3	
		(1. Katman)	100	0	



Şekil 3.2 Turbula tipi toz karıştırma makinesi



Şekil 3.3 Al-SiC-üre karışımı

3.3 Presleme İşlemi

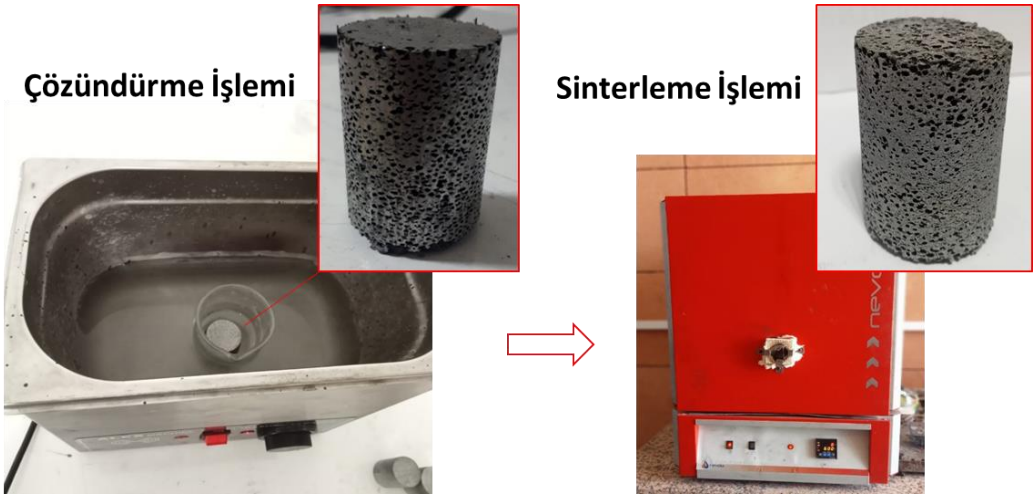
Karışım tozlar (Al-SiC-üre) çelik bir kalıp içerisinde 600 MPa basınç altında hidrolik preste tek yönlü olarak sıkıştırılmıştır. Presleme işleminden sonra 28x40 mm ölçülerinde silindirik numuneler elde edilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Sıkıştırma sonrası üretilen numuneler (Al (%95) – SiC (%5) – Üre)

3.4 Üre Çözündürme ve Sinterleme İşlemleri

Sıkıştırma sonrası kompakt malzemelerde gözenekli yapıyı elde edebilmek için yapı içerisinde boşluk tutucu olarak rol alan ürelerin çözündürülerek yapıdan uzaklaştırılması sağlanmıştır. Sıkıştırılmış numunelerdeki ürelerin çözünebilmesi için numuneler 80°C'de 3 saat su banyosunda bekletilmiştir. Böylece gözenekli yapıların oluşumu sağlanmıştır. Devamında ham mukavemete sahip olan bu numunelerin daha mukavim hale gelebilmesi için sinterleme işlemi uygulanmıştır. Numuneler 2 saat boyunca 650°C'de atmosfer kontrolü olmayan fırın içerisinde sinterleme işlemine tabii tutulmuşlardır. Böylelikle köpük numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Çözündürme ve sinterleme işlemleri

3.5 Karakterizasyon İşlemleri

3.5.1 Makro ve Mikro Yapısal Analizler

Elde edilen alüminyum köpüklerin gözenek morfolojilerinin makro ve mikro yapısal analizleri için öncelikli olarak numuneler ortadan kesilmiştir. Akabinde pürüzsüz bir analiz yüzeyi elde etmek için numuneler geleneksel metalografi prosedürlerine (zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri) tabii tutulmuştur (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Alüminyum köpüklerin zımparalama işlemi

3.5.2 Yoğunluk ve Gözeneklilik Ölçümü

Elde edilen numunelerin yoğunlukları (ρ) Eşitlik. 3.1'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{m}{v} \tag{3.1}$$

Bu eşitlikte m; numune ağırlığını ve v; numune hacmini ifade etmektedir.

Alüminyum köpüklerin teorik yoğunlukları (ρ_T) Eşitlik 3.2'de verilen karışım kuralına göre hesaplanmıştır.

$$\rho_T = [(\%W_1) \times \rho_1] + [(\%W_2) \times \rho_2] + \ldots\ldots\ldots\ldots + [(\%W_n) \times \rho_s] \tag{3.2}$$

Burada W_n; bileşimi oluşturan her bir malzemenin ağırlıkça oranını ve ρ; yoğunluğunu ifade etmektedir.

Numunelerin bağıl yoğunluk (ρ^*) değerleri Eşitlik 3.3'te verilen formüle göre hesaplanmıştır. Bununla birlikte gözeneklilik oranının hesaplanmasında Eşitlik 3.4'teki formül kullanılmıştır.

$$\rho * = {}^{\rho}/_{\rho_T} \tag{3.3}$$

$$\rho * = {}^{\rho}/_{\rho_T} \times 100 \tag{3.4}$$

3.5.3 Basma Testi

Alüminyum köpüklerin statik sıkıştırma testleri, Shımadzu marka Autograph AGS-X model üniversal test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Sıkıştırma hızı 1 mm/dak olarak ayarlandı. Statik sıkıştırma testleri sırasında numunenin deformasyonunun görüntülerini elde etmek için bir video kamera kullanıldı.

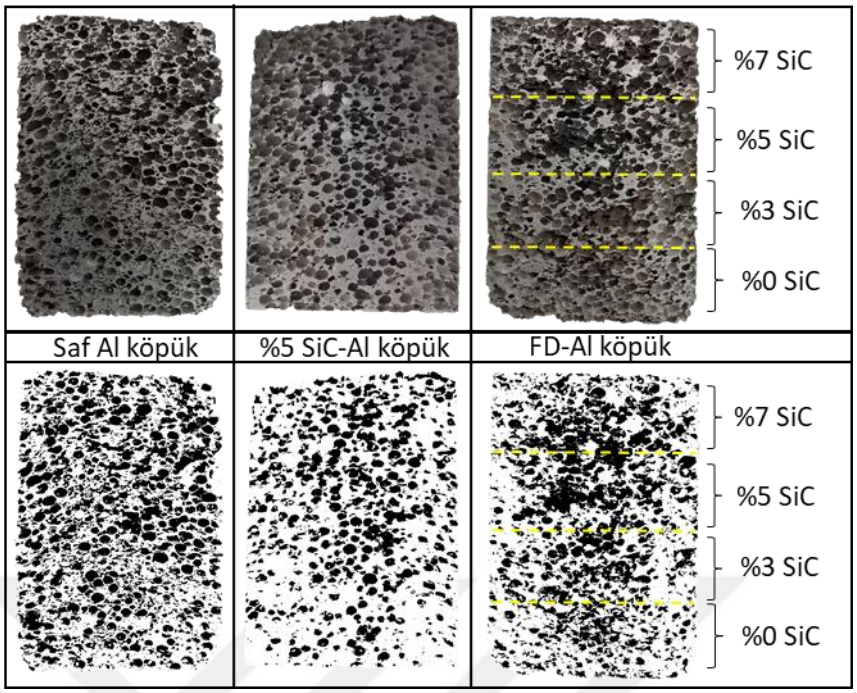
3.5.4 Mikro Sertlik Ölçümü

Alüminyum köpüklerin hücre duvarlarındaki sertlik değişimlerini belirlemek için Shimadzu (HMV-G) marka Vickers mikro sertlik cihazı kullanılmıştır. Ölçüm esnasında 10 saniyelik bir sürede 980,6 mN'luk (HV 0,1) yük uygulanmıştır. Ortalama mikrosertlik değeri numunenin 5 farklı bölgesinin sertliğinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Makro Yapı Analizleri

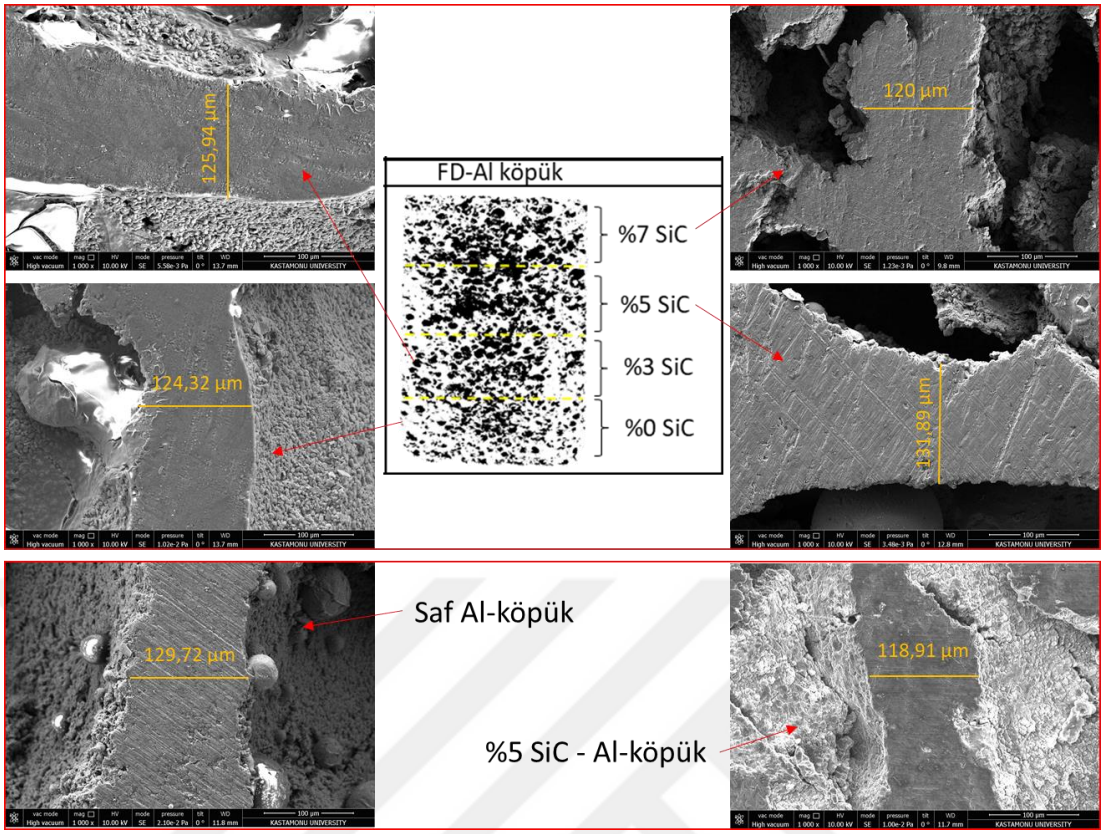
Şekil 4.1'de 3 farklı yapıya sahip alüminyum köpüklere ait gözenek yapıları verilmiştir. Şekile bakıldığında gözeneklerin yapı içerisindeki dağılımının nispeten homojen olduğu görülmektedir. Yapıdaki gözeneklerin malzeme boyunca eşit olarak dağıldığı söylenebilir. Ayrıca, makro yapı resimleri gözeneklerin köpük üretiminde kullanılan üre parçacıkların şekline benzediğini göstermektedir. SiC parçacıklarının varlığı köpükteki gözeneklerin genel düzenlemesini belirgin şekilde etkilememiştir. Alüminyum köpükler NaCl gibi diğer yer tutucu malzemelere kıyasla daha az köşelidir (Zhao vd., 2006). Bu özellik deformasyon sırasında yerel stres konsantrasyonlarını azalttığı ve potansiyel olarak alüminyum köpüklerin mukavemetini arttırdığı için faydalıdır. Kompozit köpüklerin gözenek boyutu ve gözeneklilik oranı gibi yapısal özellikleri çalışmamızda bahsedilen üre kullanılarak üretim sürecinde kolaylıkla kontrol edilebilmektedir (Jiang vd., 2005; Wang vd., 2015). Bu, gözeneklerin boyutunun ve oranının belirli gereksinimleri veya istenen sonuçları karşılamak üzere ayarlanabileceği anlamına gelmektedir. Köpük üretiminde kullanılan üre taneciklerinin küresel şeklinin gözenek dağılımındaki homojenliğe katkı sağlayan bir faktör olduğu söylenebilir.



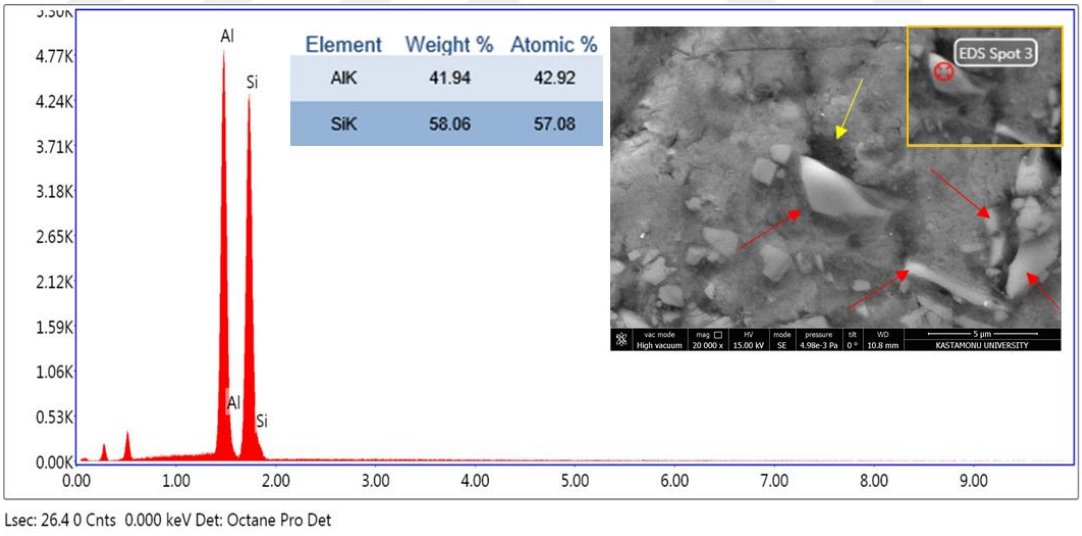
Şekil 4.1 Al köpüklerin gözenek yapısı

4.2 Mikro Yapı Analizleri

Şekil 4.2'de 3 farklı yapıya sahip alüminyum köpüklerin hücre duvarları gösterilmektedir. Lokal olarak gözenek oluşumu farklılık göstermiş olsa da hücre duvarı kalınlıklarının 120 µm ile 130 µm arasında değiştiği söylenebilir. Hücre duvarında SiC parçacıklarının varlığını tespit etmek için FD-Al köpüğün hücre duvarından EDS analizi yapılmıştır. Analiz sonucu elde edilen görüntü ve spektrum Şekil 4.3'te verilmiştir. Buna göre EDS spektrumu alüminyum ve silisyumun varlığını doğrulamaktadır. Kırmızı okla belirtilen SiC ile matris malzemesi aralarında bir miktar mikro boşluk veya boşluk olduğu gözlemlenebilir. Ara yüzeydeki bu boşluğun Al-Si sisteminin reaktif olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Raj vd., 2023).



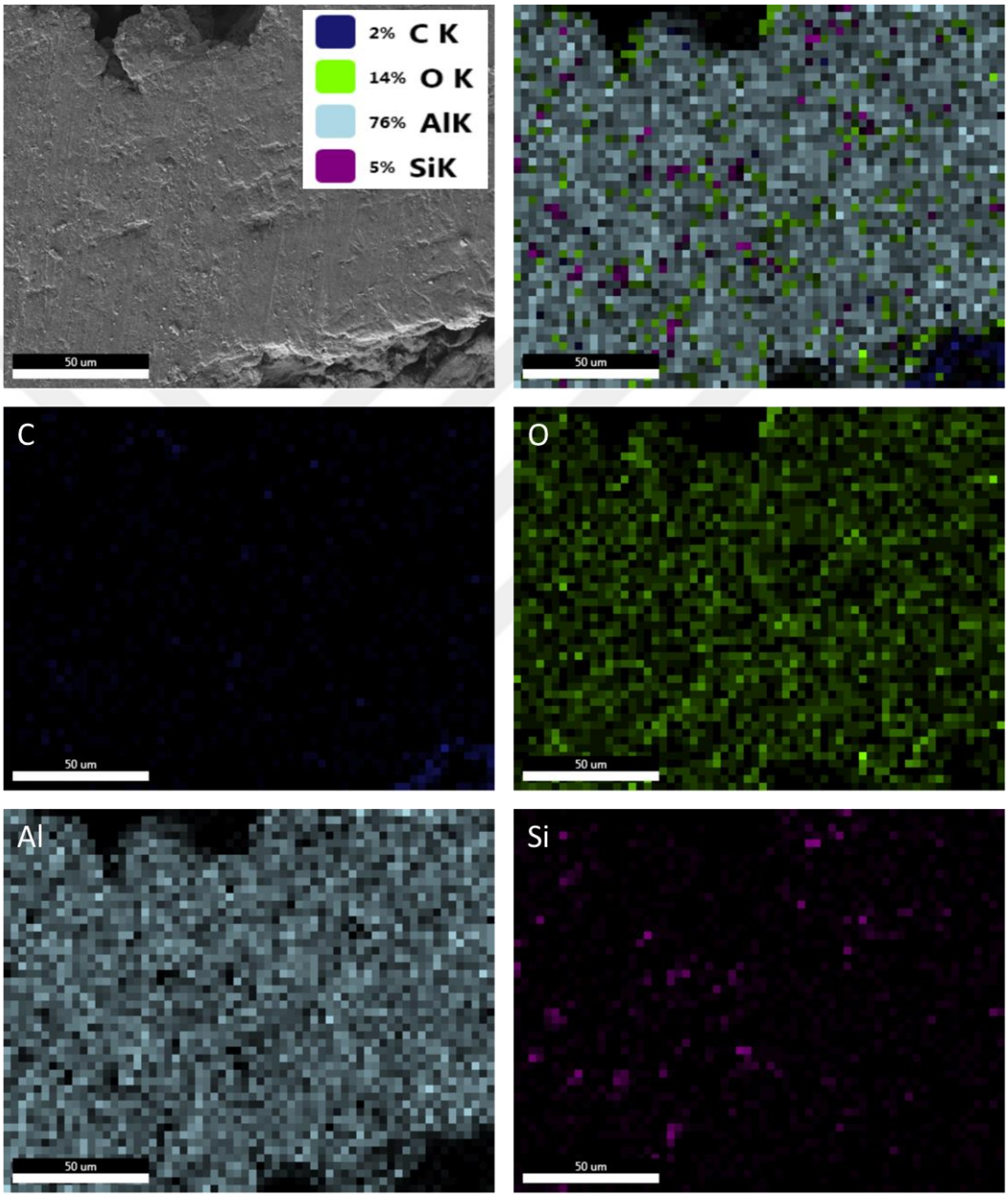
Şekil 4.2 Alüminyum köpüklerin hücre duvarı SEM görüntüleri



Şekil 4.3 FD-Al köpüğün EDS analizi

SiC parçacıklarının dispersiyonu alüminyum köpüklerin mekanik performansı üzerine önemli bir etkiye sahiptir. Ergiyik yöntemlerle üretilen köpükler için SiC parçacıklarının varlığı yalnızca hücre duvarına dayanıklılık ve sertlik sağlamakla kalmaz, aynı zamanda sıvı metal akışını da kontrol etmektedir (Rajak vd., 2016). FD-Al köpüğün %7 SiC içeren hücre duvarı üzerinde yapılan analitik haritalama

analizinde SiC parçacıklarının nispeten homojen dağıldığı söylenebilir (Şekil 4.4). Elde edilen oransal değerler FD-Al köpüğün SiC içeriği ile uyum göstermektedir. Bununla birlikte hücre duvarlarında oksitlenmenin meydana geldiği görülmektedir.

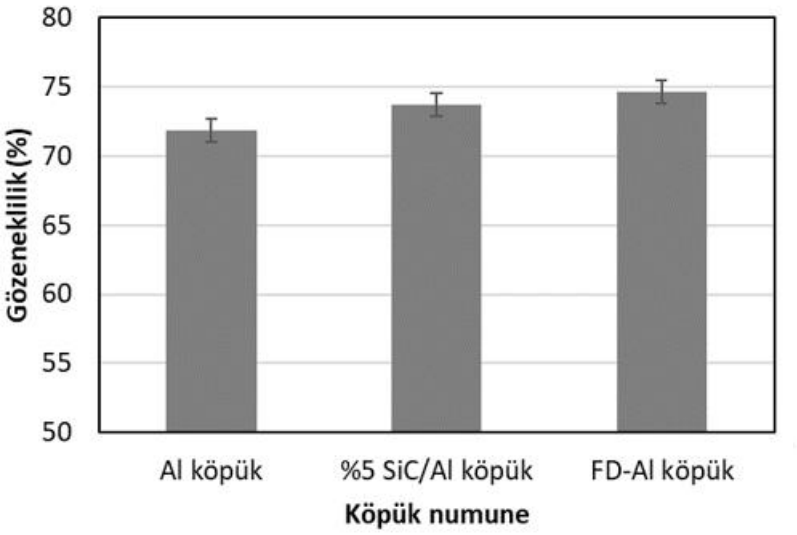


Şekil 4.4 FD-Al köpüğün analitik haritalama analizi

4.3 Gözeneklilik ve Yoğunluk Değişimi

Şekil 4.5'te alüminyum köpüklerin gözeneklilik oranları verilmiştir. Hacimsel olarak %75 oranında üre içeren numunelerde gözeneklilik miktarının bu değer ile uyumlu

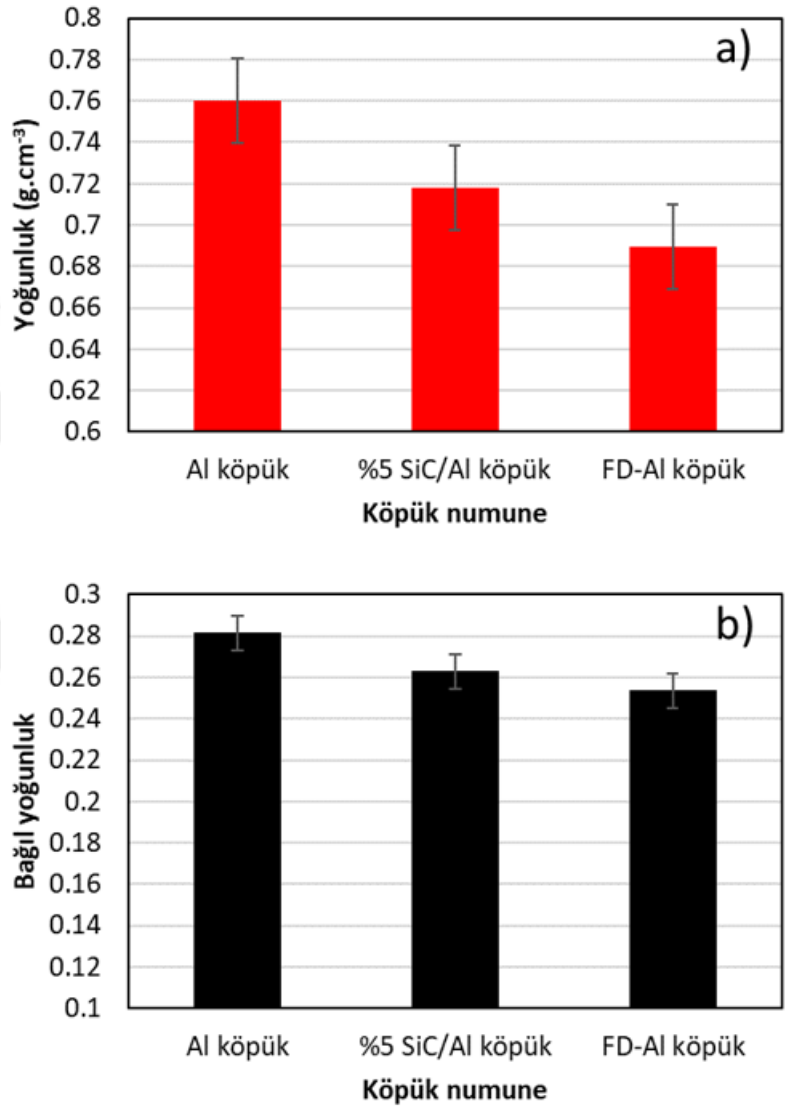
olması beklenmektedir. Ancak saf alüminyum köpüklerde yaklaşık %72, %5 SiC içeren köpüklerde %74 ve FD-Al köpüklerde yaklaşık %75 olarak hesaplanmıştır. Bu değer saf alüminyum köpüklerde ürenin eser miktarlarda çözünmediğini veya köpük yapı içerisinde kaldığını göstermektedir. Bununla birlikte SiC parçacıklarının gözeneklilik oranına katkı sağladığı söylenebilir. Ancak bu durum ürenin yapı içerisinden daha iyi çözünerek uzaklaştığı anlamına gelmemelidir. Esasında ortalama 7 µm boyuta sahip olan SiC parçacıklarının topaklanma eğilimi sonucunda seramik parçacıklar etrafında meydana gelen gözeneklerin katkıda bulunduğu söylenebilir.



Şekil 4.5 Al köpüklerin gözeneklilik değişimleri

Şekil 4.6 a-b'deki grafiklerde alüminyum köpüklerin içermiş oldukları yapısal özelliklere göre yoğunluk ve bağıl yoğunluk değişimleri verilmiştir. Mühendislik malzemelerinde yoğunluk değişimi elemental içeriklere bağlı olduğu gibi yapısal özelliklere bağlı olarak da değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla gözenekli yapıya sahip olan alüminyum köpükler için yoğunluk değişimi doğrudan yapıyı oluşturan bileşenlerin yoğunluğunun yanı sıra içermiş oldukları gözenek miktarı ile ilişkilidir. Beklenildiği gibi yüksek gözenekliliğe sahip olan FD-Al köpüklerde en düşük yoğunluk değeri 0,69 $g.cm^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. %5 SiC-Al köpükler ile saf Al köpüklerde ise yoğunluk değerleri sırasıyla 0,72 $g.cm^{-3}$ ve 0,76 $g.cm^{-3}$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.6a). En düşük ve en yüksek yoğunluk farkı yaklaşık olarak %10'dur. Alüminyum köpükler için bağıl yoğunluk değerleri mekanik özellikleri doğrudan etkilen bir özelliktir. Genellikle gözenekli yapılar için 0,3'ün altında bağıl yoğunluk değerleri beklenilmektedir. Yapılan çalışmada her üç numune türünde bu

değerin altında bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.6b). Bağıl yoğunluk değerlerinin artması numunelerde gözenekli yapının azalacağı anlamına gelmektedir. Hem yoğunluk değerleri hem de gözeneklilik oranları numunelerin bağıl yoğunluk değerleri ile doğrudan ilişkilidir.

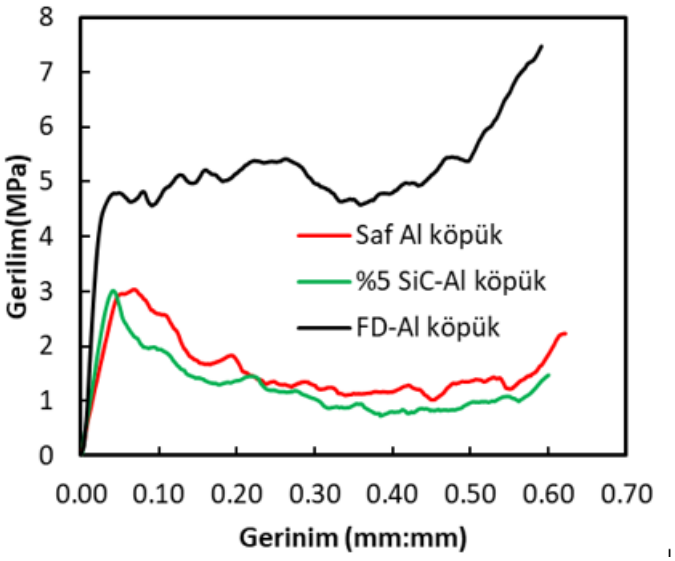


Şekil 4.6 Al köpüklerde yoğunluk (a) ve bağıl yoğunluk (b) değişimi

4.4 Al Köpüklerin Ezilme Davranışı

Sıkıştırma testlerinden elde edilen gerilim-gerinim eğrileri tipik olarak köpük malzemelerde görülenlere benzer özellikler göstermektedir (Şekil 4.7). Köpük numunelerinin gerilim-gerinim eğrilerinde doğrusal bir elastik bölge, plato bölgesi ve bir yoğunlaşma bölgesi gözlenmektedir. Doğrusal elastik bölge, köpük malzemenin

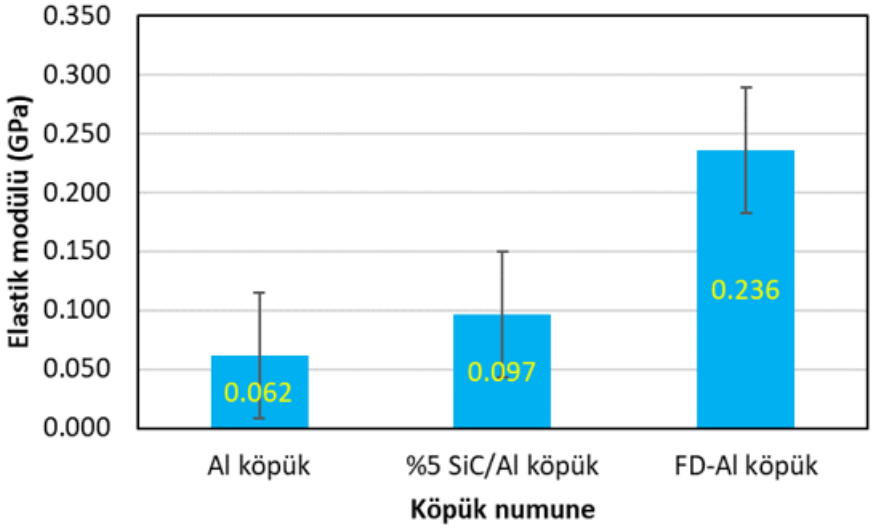
elastik davrandığı, yani uygulanan gerilim kaldırıldığında orijinal şekline geri döndüğü, gerilim-gerinim eğrisinin ilk kısmıdır. Bu bölgede gerilimin gerinim ile doğru orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Plato bölgesi, köpük malzemelerin karakteristik bir özelliğidir ve genellikle çökme mekanizmalarıyla ilişkilendirilir. Bu bölgede gerilme nispeten sabit kalır veya gerilme artmaya/azalmaya devam eder. Bu davranışa köpük hücrelerin veya hücre duvarlarının kademeli olarak çökmesi ve burkulması neden olur. Bu da malzeme içinde stresin yeniden dağılımına neden olur. Plato bölgesinin genişliği ortalama hücre boyutu, hücrelerin en-boy oranı ve hücre kusurlarının veya mikro yapısal varyasyonların varlığı gibi faktörlerden etkilenebilir. Yoğunlaşma bölgesi ise plato bölgesinden sonra meydana gelir ve daha fazla gerinme ile streste önemli bir artış ile karakterize edilir. Bu bölgede köpük malzemesi köpüğün hacminde bir azalmaya ve yoğunluğunda bir artışa yol açan bir sıkıştırma veya yoğunlaştırma işlemine tabi tutulur. Yoğunlaştırma bölgesinin genişliği, numunelerin nispi yoğunluk değerleri ve hücre duvarı en boy oranı dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlı olabilir. Köpük hücreleri çöktükçe ve malzeme daha sıkı hale geldikçe, köpüğün nihai gücünü gösteren maksimum bir gerilim noktasına ulaşana kadar gerilim artar (Gui vd., 2000; Markaki ve Clyne, 2001; Uzun, 2019). Elde edilen gerilim-gerinim grafiğinde elastik bölge dışında, plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgesindeki eğrilerde dalgalanmalar meydana gelmektedir. Deformasyon esnasında hücre duvarları büküldüğünde veya birbiri üzerinde katlandığında doğrusal olmayan gerilim-gerinim eğrileri elde edilebilir (Song vd., 2008). Bununla birlikte sıkıştırma kuvveti arttıkça hücre duvarlarında stres konsantrasyonları oluşabilmekte ve yeni kırılma yüzeylerinin oluşması benzer sonuçların oluşmasına katkı sunabilmektedir (Elbir vd., 2003; Luo vd., 2008; Raj ve Daniel 2007; Uzun, 2019). Saf Al köpük ile %5 SiC takviyeli Al köpüğün gerilim–gerinim eğrileri benzer eğim sergilemektedir. Oysaki FD-Al köpüklerin gerilim gerinim eğrileri nispeten daha mukavim bir yapıyı yansıtmaktadır.



Şekil 4.7 Al köpüklerin sıkıştırma altında gerilim-gerinim eğrileri

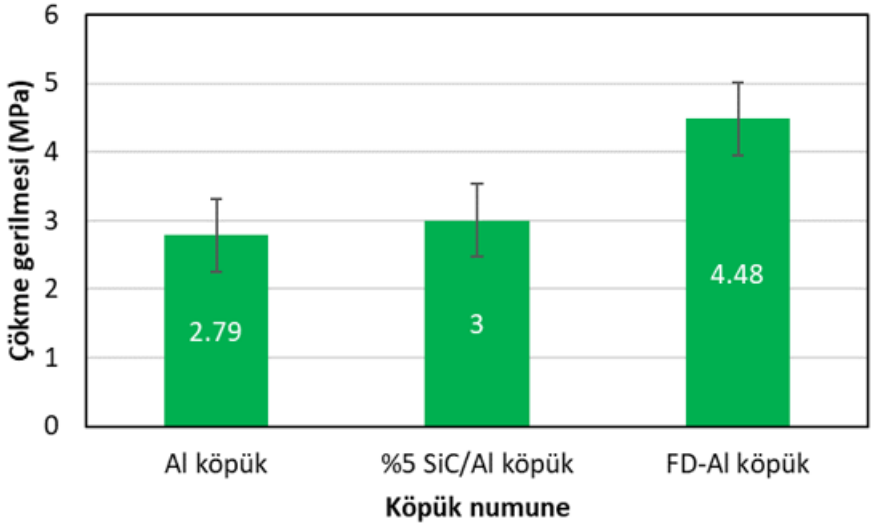
Katı mikro boyutlu parçacıkların metal köpüklerin üretim sürecine dâhil edilmesi ile köpüğün mekanik özellikleri, stabilitesi ve viskozitesi önemli ölçüde değişmektedir. Bu parçacıklar, metal köpük matrisinde dengeleyiciler ve takviyeler olarak işlev görerek, özellikle mekanik dayanımı artırmak için kullanılırlar. Özellikle, güçlendirme etkileri katı parçacıkların boyutu, dağılımı ve köpük matrisi ile olan ara yüz etkileşimi gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Parçacıkların matris ile uyumluluğu ve ara yüz bağlanma gücü köpüğün mekanik performansını büyük ölçüde etkileyebilir. Bununla birlikte, takviye edici etkiler önemli ölçüde değişebilir.

Alüminyum köpüklere C, c-BN ve SiC gibi seramik parçacıkların eklenmesi, tepe gerilimi ve elastik modül dahil olmak üzere mekanik özellikleri geliştirmiştir. Böylece iyileştirilmiş enerji emme kapasiteleri ortaya çıkmıştır (Li vd., 2007). Şekil 4.8'te alüminyum köpüklerin elastik modül grafiği verilmiştir. Grafiğe bakıldığında alüminyum köpüğe %5 SiC ilave edildiğinde elastik modülde yaklaşık %56 oranında artış meydana gelmiştir. Köpük içerisinde ortalama parçacık oranı %5 olan FD-Al köpüklerde ise bu oran %280 seviyelerine çıkabilmektedir.



Şekil 4.8 Alüminyum köpüklere ait elastik modül değerleri

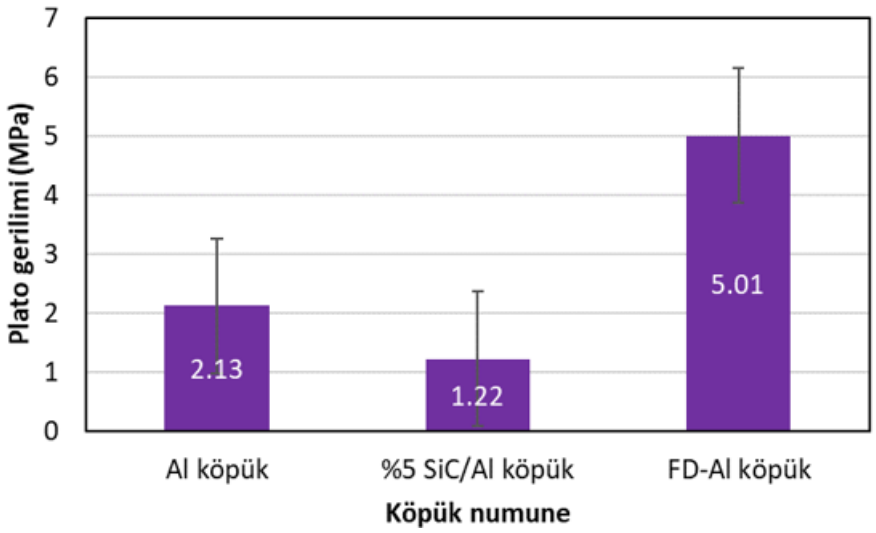
Ek olarak, Al köpüğe %5 SiC ilavesi ile çökme (tepe) geriliminde 1,07 oranında nispeten artış sağlanmıştır (Şekil 4.9). Al köpükte ve %5 SiC içeren köpükte elde edilen ortalama çökme gerilimleri sırasıyla 2,79 MPa ve 3 MPa'dır. FD-Al köpüklerin ortalama çökme gerilimi artışı daha yüksektir ve yaklaşık 4,48 MPa'dır. Bu iki aşamadaki çökme gerilimi artışları farklıdır ve köpüğün mikroyapısal düzeni değiştikçe çökme gerilimi doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır.



Şekil 4.9 Alüminyum köpüklere ait çökme gerilimi değerleri

Plato gerilimi, sıkıştırma gerilimi-gerinim eğrisinden elde edilen plato bölgesinin ortalama gerilimi olarak tanımlanır. Şekil 4.10'da her üç köpük için plato geriliminin değişimi gösterilmiştir. Buna göre en yüksek ortalama plato gerilimi 5,01 MPa ile

FD-Al köpüklerde elde edilirken en düşük plato gerilimi ise 1,22 MPa ile %5 SiC içeren köpüklerde elde edilmiştir. Bu değerler literatürde verilen değerlerle karşılaştırıldığında oldukça düşüktür (Kulshreshtha vd., 2021; Luo vd., 2008). Ayrıca SiC parçacıklarındaki oransal artış ile birlikte plato gerilmelerinde de artış beklenilmektedir (Kulshreshtha vd., 2021; Luo vd., 2008). Ancak çalışmamızda Al köpüğe kıyasla %5 SiC içeren köpüğün daha düşük plato gerilmesine sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun çökme (tepe) geriliminden sonra hücre duvarlarında meydana gelen hızlı yıkımdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Kapalı hücreli köpüklerin sıkıştırma yüklemesi sırasında, gerinim hücre duvarlarının burkulmasına neden olan ince bir bantta lokalize olma eğilimindedir (Gibson ve Ashby, 1997). Ancak çalışmada test edilen köpüklerin hücre yapılarının topolojisinin bir sonucu gerinim dağılımı yerel olarak üniform olmama eğilimindedir (Şekil 4.11). Deformasyon, yükleme yüzeyi ile temas halinde olan tek bir bantta başlamış ve birbiri ardına diğer katmanlara üniform olarak ilerlememiştir. Boşluk tutucu yöntemiyle hazırlanmış köpük numunelerde sıkışma esnasında kırılgan bir deformasyon davranışı gözlenmiştir. Al köpükte ve %5 SiC içeren köpükte yıkım deformasyon bantı boyunca gerçekleşmiştir (Şekil 4.11a, b). FD-Al köpükte deformasyon numune yüzey alanında başlamış ve artan gerinimle birlikte deformasyon bantı boyunca ilerlemiştir (Şekil 4.11c). Al-alaşım/SiC_P köpükler hücre duvarı deformasyon davranışlarına göre yerel olarak kırılgan köpük kategorisine girmektedir (Güden ve Yüksel, 2006).



Şekil 4.10 Alüminyum köpüklere ait plato gerilimi değerleri



Şekil 4.11 Alüminyum köpüklerin sıkıştırma gerilimi altında deformasyon davranışları, a) Al köpük, b) %5 SiC/Al köpük, c) FD-Al köpük

4.5 Al Köpüklerin Enerji Sönümleme Kapasitesi

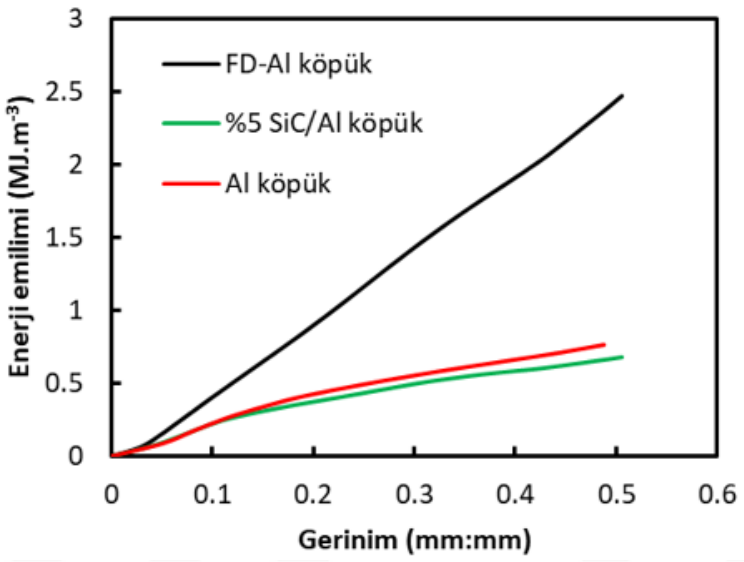
Alüminyum köpüklerde birim hacim başına emilen enerji Eşitlik 4.1'de verilen formülden hesaplanmıştır (Baumeister vd., 1997).

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon \tag{4.1}$$

Burada W; enerji emme kapasitesi, σ; gerilim ve ε; gerinimdir.

Eşitlik 4.1'e göre hesaplanan üç farklı türden alüminyum köpüğün enerji emme kapasitesi Şekil 4.12'de gösterilmektedir. Buradan, üç tür alüminyum köpüğün tüm enerji emme kapasitesinin artan gerinim ile arttığı görülebilir. Özellikle gerinim arttığında fark da büyümektedir. %5 SiC/Al köpük ve saf Al köpüğün 0.5 gerinim için enerji soğurma yetenekleri sırasıyla 0,67 ve 0,76 MJ/m^3 olup, fark oldukça küçüktür. Bu durum Al köpüğün %5 SiC/Al köpüğe kıyasla bağıl yoğunluk değerinin nispeten daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak daha düşük bağıl yoğunluğa sahip FD-Al köpüğün enerji soğurma yeteneği (2,47 MJ/m^3) her iki

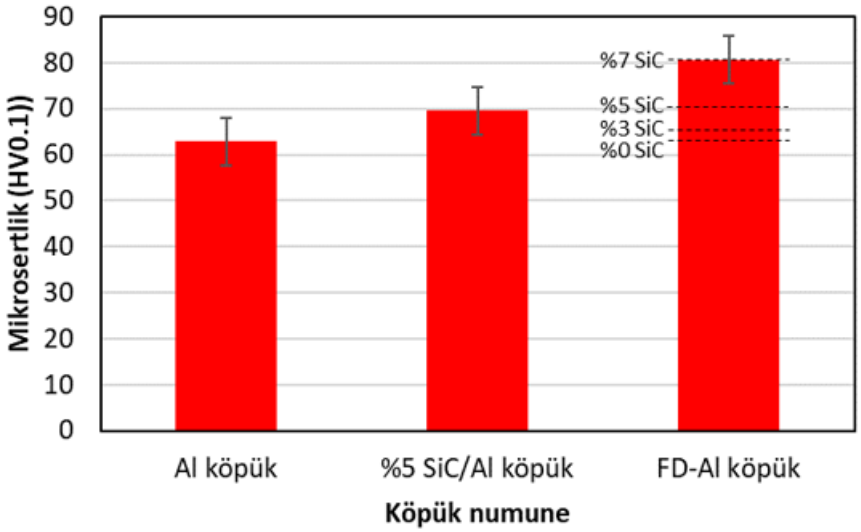
köpüğe kıyasla daha yüksektir. Bu sonuç işlevsel olarak hücre duvarlarında yer alan SiC parçacıklarının enerji emilimindeki etkinliğini ortaya koymaktadır. Özellikle yoğunluğu derecelendirilmiş alüminyum köpüklerin tek düze alüminyum köpüklere kıyasla daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip oldukları araştırmacılar tarafından vurgulanmaktadır (Hassani ve Paydar, 2021; He vd., 2020; Sharma vd., 2023).



Şekil 4.12 Alüminyum köpüklerin enerji emilimi kapasitesi

4.6 Hücre Duvarlarının Mikro Sertlik Değişimi

Şekil 4.13 üç farklı türdeki köpüğün hücre duvarlarındaki sertlik değişimini göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi SiC içeren köpüklerin (%5 SiC/Al köpük ve FD-Al köpük) mikro sertlik değerleri Al köpüğe kıyasla yüksektir. Saf Al köpük, %5 SiC-Al köpük ve FD-Al köpük için elde edilen ortalama sertlik değerleri sırasıyla 62,8 HV, 69,5 HV ve 80,5 HV'dir. Seramik parçacık içeriği arttıkça mikro sertlik değerlerinin de arttığı açıktır. Bunun nedeni matristeki sert SiC parçacıklarının hacim oranının artmasıdır. Mikro sertlikteki artış köpüklerin kırılganlığında artış sağlamaktadır (Wichianrat vd., 2012). Bu durum, Şekil 4.7'deki gerilim-gerinim grafiğindeki eğrilerin salınımlı konfigürasyonundan anlaşılabilmektedir.



Şekil 4.13 Alüminyum köpüklerin mikro sertlik değişimi

5. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada boşluk tutucu (üre) kullanılarak farklı yapısal özelliklere sahip alüminyum köpükler (Al köpük, %5 SiC takviyeli Al köpük ve SiC takviyeli fonksiyonel derecelendirmiş Al köpük) üretilmiştir. Üretilen köpük yapıların gözenek morfolojileri, mikro sertlik değerleri, sıkıştırma kuvvetleri altında ezilme davranışları ve enerji sönümleme kapasiteleri birbirleri ile kıyaslanmıştır. Buna göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- ✓ SiC parçacıklarının köpüklerdeki hücre morfolojisi üzerine önemli bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir.

- ✓ Hacimsel olarak %75 üre kullanılarak üretilen köpük yapılarda gözeneklilik oranları %75 yakın elde edilmiştir.

- ✓ SiC parçacık miktarındaki oransal değişime sahip alüminyum köpüklerdeki hücre duvarı kalınlığı 120 μm ile 130 μm arasında değişmiştir. Al-Si reaktivitesinden dolayı SiC parçacıkları ile matris arasında mikro boşluklar yer yer tespit edilmiştir.

- ✓ Köpük yapılarda elde edilen bağıl yoğunluk değerleri alüminyum köpüklerin hücresel yapılarını yansıtabilmesi için belirlenen bağıl yoğunluk değerinin (<0,3) altında elde edilmiştir.

- ✓ %5 SiC ilavesi elastik modülde %56'lık bir artışa yol açarken, FD-Al köpüklerde potansiyel olarak %280'lik bir artış elde edilmiştir. Bu malzemelerdeki enerji emme kapasitelerini artırmaktadır.

- ✓ Sıkıştırma testi altında elde edilen ortalama gerilim-gerinim eğrilerindeki salınım gevrek kırılmayı işaret etmiştir. Ayrıca çökme gerilimi ve plato stresi en yüksek numunenin FD-Al köpükte olduğu tespit edilmiştir.

- ✓ Artan gerinim ile birlikte enerji emme kapasitesi de artmaktadır. FD-Al köpüğün hücre duvarlarındaki SiC parçacıklarının etkinliği nedeniyle diğer köpüklere kıyasla üstün performans (2,47 MJ/m^3) sergilediği tespit edilmiştir.

- ✓ %5 SiC/Al ve FD-Al köpük gibi SiC içeren köpüklerin mikro sertliği saf Al köpüğünkinden daha yüksektir ve FD-Al köpük için seramik parçacık içeriği arttıkça artmıştır. Artan mikro sertlik, gerilim-gerinim grafiğindeki salınım modelinde yansıtıldığı gibi artan köpük kırılganlığıyla da ilişkilendirilebilir.

KAYNAKLAR

Abo sbia, A. E. S., & Uzun, A. (2022). Production of MWCNT-Reinforced Aluminum Foams Via Powder Space-Holder Technique and Investigation of their Mechanical Properties. *Transactions of the Indian Institute of Metals, 75(*9), 2241-2253.

Bafti, H., & Habibolahzadeh, A. (2010). Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters. Materials & Design, *31*(9), 4122-4129.

Banhart, J. (2000). Properties and applications of cast aluminium sponges. *Advanced Engineering Materials, 2*(4), s. 188-191.

Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science, 46*(6), s. 559–632.

Baumeister, J., Banhart, J., & Weber, M. (1997). Aluminium foams for transport industry. *Materials & design, 18*(4-6), 217-220.

Bayraktar, E., & Katundi, D. (2010). Development of a new aluminium matrix composite reinforced with iron oxide (Fe3O4). *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering, 38*(1), 7-14.

Brothers, A. H., & Dunand, D. C. (2008). Mechanical properties of a density-graded replicated aluminum foam. *Materials Science and Engineering: A, 489*(1-2), 439-443.

Czerwinski, F. (2021). Current trends in automotive lightweighting strategies and materials. *Materials, 14*(21), 66-31.

Elbir, S., Yilmaz, S., Toksoy, A. K., Guden, M., & Hall, I. W. (2003). SiC-particulate aluminum composite foams produced by powder compacts: Foaming and compression behavior. *Journal of materials science, 38*(23), 4745-4755.

Faidzi, M. K., Abdullah, S., Abdullah, M. F., Azman, A. H., Hui, D., & Singh, S. S. K. (2021). Review of current trends for metal-based sandwich panel: Failure mechanisms and their contribution factors. *Engineering Failure Analysis, 123*, 105-302.

Ferreira, S. C., Velhinho, A., Silva, R. J. C., & Rocha, L. A. (2010). Corrosion behaviour of aluminium syntactic functionally graded composites. *International Journal of Materials and Product Technology, 39*(1-2), 122-135.

Gibson, L.J.; Asbhy, M.F. (1997). Cellular Solids: Structure and Properties, 2nd ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK.

Gui, M. C., Wang, D. B., Wu, J. J., Yuan, G. J., & Li, C. G. (2000). Deformation and damping behaviors of foamed Al–Si–SiCp composite. *Materials Science and Engineering: A, 286*(2), 282-288.

Güden, M., & Yüksel, S. (2006). SiC-particulate aluminum composite foams produced from powder compacts: foaming and compression behavior. *Journal of Materials Science, 41,* 4075-4084.

Hangai, Y., Kubota, N., Utsunomiya, T., Kawashima, H., Kuwazuru, O., & Yoshikawa, N. (2015). Drop weight impact behavior of functionally graded aluminum foam consisting of A1050 and A6061 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A, 639,* 597-603.

Hangai, Y., Morita, T., Koyama, S., Kuwazuru, O., & Yoshikawa, N. (2016). Functionally graded aluminum foam fabricated by friction powder sintering process with traversing tool. *Journal of Materials Engineering and Performance, 25, 3691-3696.*

Hangai, Y., Oba, Y., Koyama, S., & Utsunomiya, T. (2011). Fabrication of A1050-A6061 functionally graded aluminum foam by friction stir processing route. *Metallurgical and Materials Transactions A, 42,* 3585-3589.

Hangai, Y., Takahashi, K., Utsunomiya, T., Kitahara, S., Kuwazuru, O., & Yoshikawa, N. (2012). Fabrication of functionally graded aluminum foam using aluminum alloy die castings by friction stir processing. *Materials Science and Engineering: A, 534,* 716-719.

Hassani, A., Habibolahzadeh, A., & Bafti, H. (2012). Production of graded aluminum foams via powder space holder technique. *Materials & Design, 40,* 510-515.

Hassani, F., & Paydar, M. H. (2021). Improvement in energy absorption properties of aluminum foams by designing pore-density distribution. *Journal of Materials Research and Technology, 14,* 609-619.

He, S. Y., Lv, Y. N., Chen, S. T., Dai, G., Liu, J. G., & Huo, M. K. (2020). Gradient regulation and compressive properties of density-graded aluminum foam. *Materials Science and Engineering: A, 772,* 138658.

Jiang, B., Zhao, N. Q., Shi, C. S., & Li, J. J. (2005). Processing of open cell aluminum foams with tailored porous morphology. *Scripta Materialia, 53*(6), 781-785.

Jin, I., Kenny, L. D., & Sang, H. (1991). Lightweight foamed metal and its production. International Patent Application WO91/03578, 21.

Karuppasamy, R., & Barik, D. (2021). Production methods of aluminium foam: A brief review. *Materials Today: Proceedings, 37,* 1584-1587.

Kennedy, A. R., & Asavavisitchai, S. (2004). Effects of TiB2 particle addition on the expansion, structure and mechanical properties of PM Al foams. *Scripta Materialia, 50*(1), 115-119.

Khare, S., & Sorte, M. (2021). An overview of aluminum foam production methods. *International Journal of Engineering Science and Computing, 11(*02), 27659-27666.

Kosenko, A., Pushnitsa, K., Kim, A., Novikov, P., & Popovich, A. A. (2022). Structural, electrical, and mechanical properties investigation of open-cell aluminum foams obtained by spark plasma sintering and replication on polyurethane template. *Materials, 15*(3), 931.

Kulshreshtha, A., & Dhakad, S. K. (2020). Preparation of metal foam by different methods: A review. *Materials Today: Proceedings, 26,* 1784-1790.

Kulshreshtha, A., Dhakad, S. K., & Mondal, D. P. (2021). Effect of particle size on compressive deformation of Aluminium foam prepared through stir casting technique. *Materials Today: Proceedings, 47,* 7174-7177.

Li, Y., Xiong, J., Lin, J., Forrest, M., Hodgson, P., & Wen, C. E. (2007). Mechanical properties and energy absorption of ceramic particulate and resin-impregnation reinforced aluminium foams. *Mater. Forum, 31*, 52-56.

Liu, J., Yu, S., Zhu, X., Wei, M., Luo, Y., & Liu, Y. (2009). Correlation between ceramic additions and compressive properties of Zn–22Al matrix composite foams. *Journal of alloys and compounds, 476*(1-2), 220-225.

Lu, J., Wang, Y., Zhai, X., Zhi, X., & Zhou, H. (2021). Impact behavior of a cladding sandwich panel with aluminum foam-filled tubular cores. *Thin-Walled Structures, 169,* 108459.

Luo, Y., Yu, S., Li, W., Liu, J., & Wei, M. (2008). Compressive behavior of SiCp/AlSi9Mg composite foams. *Journal of Alloys and Compounds, 460*(1- 2), 294-298.

Mahmutyazicioglu, N., Albayrak, O., Ipekoglu, M., & Altintas, S. (2013). Effects of alumina (Al2O3) addition on the cell structure and mechanical properties of 6061 foams. *Journal of Materials Research, 28*(17), 2509-2519.

Markaki, A. E., & Clyne, T. W. (2001). The effect of cell wall microstructure on the deformation and fracture of aluminium-based foams. *Acta Materialia, 49*(9), 1677-1686.

Mauko, A., Sarıkaya, M., Güden, M., Duarte, I., Borovinšek, M., Vesenjak, M., & Ren, Z. (2023). High strain-rate deformation analysis of open-cell aluminium foam. *Journal of Materials Research and Technology, 25, 1208-1221.*

Parveez, B., Jamal, N. A., Anuar, H., Ahmad, Y., Aabid, A., & Baig, M. (2022). Microstructure and mechanical properties of metal foams fabricated via melt foaming and powder metallurgy technique: A review. *Materials, 15*(15), 5302.

Pratomo, A. N., Santosa, S. P., Gunawan, L., Widagdo, D., & Putra, I. S. (2020). Numerical study and experimental validation of blastworthy structure using aluminum foam sandwich subjected to fragmented 8 kg TNT blast loading. *International Journal of Impact Engineering, 146*, 103-699.

Qingxian, H., Sawei, Q., & Yuebo, H. (2015). Development on preparation technology of aluminum foam sandwich panels. *Rare Metal Materials and Engineering, 44*(3), 548-552.

Raj, R. E., & Daniel, B. S. S. (2007). Aluminum melt foam processing for light-weight structures. *Materials and Manufacturing Processes, 22*(4), 525-530.

Raj, R., Muchhala, D., Kumar, R., Gupta, G., Sriram, S., Chilla, V., & Mondal, D. P. (2023). Microstructure and Mechanical Properties of SiC/Mullite Reinforced A356 Composite Foam. *Journal of Materials Engineering and Performance, 32*(15), 6770-6785.

Rajak, D. K., Kumaraswamidhas, L. A., Das, S., & Kumaran, S. S. (2016). Characterization and analysis of compression load behaviour of aluminium alloy foam under the diverse strain rate. *Journal of Alloys and Compounds, 656*, 218-225.

San Marchi, C., & Mortensen, A. (2001). Deformation of open-cell aluminum foam. *Acta materialia, 49*(19), 3959-3969.

Sharma, A., Ravindran, S., & Gupta, A. K. (2023). Fabrication and Mechanical Properties of Tri-Layer B4C-Reinforced Al–Zn Functionally Graded Foam Having Higher Energy Absorption Efficiency. *Advanced Engineering Materials, 25*(11), 2201734.

Sharma, S. K., & Saxena, K. K. (2022). Effects on microstructure and mechanical properties of AZ31 reinforced with CNT by powder metallurgy: An overview. *Materials Today: Proceedings, 56*, 2038-2042.

Shinagawa, K. (2008). Shape change and pore distribution in aluminum powder compacts by graded foaming. *Porous Metals and Metallic Foams*, 95-98.

Singh, R., Arora, R., Panwar, R. S., & Sharma, J. D. (2023). Characterization and Quasi-static Compressive Response of Closed Cell Al2024-B4C p Composite Foams and their Energy Absorption Characteristics. *International Journal of Metalcasting, 17*(2), 1229-1242.

Song, H. W., He, Q. J., Xie, J. J., & Tobota, A. (2008). Fracture mechanisms and size effects of brittle metallic foams: In situ compression tests inside SEM. *Composites Science and Technology, 68*(12), 2441-2450.

Sun, D. X., & Zhao, Y. Y. (2003). Static and dynamic energy absorption of Al foams produced by the sintering and dissolution process. *Metallurgical and Materials Transactions B, 34*, 69-74.

Sun, D. X., & Zhao, Y. Y. (2005). Phase changes in sintering of Al/Mg/NaCl compacts for manufacturing Al foams by the sintering and dissolution process. *Materials Letters*, *59*(1), 6-10.

Surace, R., De Filippis, L. A. C., Ludovico, A. D., & Boghetich, G. (2009). Influence of processing parameters on aluminium foam produced by space holder technique. *Materials & Design*, *30*(6), 1878-1885.

Tripathi, O., Singh, D. P., Dwivedi, V. K., & Agarwal, M. (2021). A focused review on aluminum metallic foam: Processing, properties, and applications. *Materials Today: Proceedings*, *47*, 6622-6627.

Uzun, A. (2019). Production of aluminium foams reinforced with silicon carbide and carbon nanotubes prepared by powder metallurgy method. *Composites Part B: Engineering*, *172*, 206-217

Wang, J., Yang, X., Zhang, M., Li, J., Shi, C., Zhao, N., & Zou, T. (2015). A novel approach to obtain in-situ growth carbon nanotube reinforced aluminum foams with enhanced properties. *Materials Letters*, *161*, 763-766.

Wang, X., Yang, X., & Cheng, Y. (2022). Compressive behaviour and energy absorption of functionally graded composite foams. *Materials Science and Technology*, *38*(18), 1625-1635.

Wang, Y., Chen, F., Wang, X., Liu, Y., Sun, J., Gu, Y., & Yu, Y. (2023). Micro-CT in the mechanical properties and energy absorption of closed-cell aluminium foam. *Materials Today Communications*, 106-962.

Wichianrat, E., Boonyongmaneerat, Y., & Asavavisithchai, S. (2012). Microstructural examination and mechanical properties of replicated aluminium composite foams. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, *22*(7), 1674-1679.

Yang, Y. J., Han, F. S., Yang, D. K., & Zheng, K. (2007). Compressive behaviour of open cell Al–Al2O3 composite foams fabricated by sintering and dissolution process. *Materials science and technology*, *23*(4), 502-504.

Zhao, N. Q., Jiang, B., Du, X. W., Li, J. J., Shi, C. S., & Zhao, W. X. (2006). Effect of Y2O3 on the mechanical properties of open cell aluminum foams. *Materials Letters*, *60*(13-14), 1665-1668.

Zhao, Y. Y., & Sun, D. X. (2001). A novel sintering-dissolution process for manufacturing Al foams. *Scripta materialia*, *44*(1), 105-110.

Zhao, Y., Han, F., & Fung, T. (2004). Optimisation of compaction and liquid-state sintering in sintering and dissolution process for manufacturing Al foams. *Materials Science and Engineering: A*, *364*(1-2), 117-125.