

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜNDE
YÖRÜNGESEL ÇALKALAMANIN MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Öznur KILIÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Malzeme Programı

Danışman
Doç. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Haziran, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜNDE YÖRÜNGESEL
ÇALKALAMANIN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Öznur KILIÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 30.06.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Kerem Altuğ GÜLER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Kerem Altuğ GÜLER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Gökhan ÖZER, Üye
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi (FSMVÜ)

Danışmanım Doç. Dr. Kerem Altuğ GÜLER sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Alüminyum alaşımlarının dökümünde yörüngesel çalkalamanın mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Öznur KILIÇ

İmza



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FYL-2017-3242 numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme

TEŞEKKÜR

Lisans eğitimi ve yüksek lisans eğitimi boyunca bilgi birikimini ve desteğini benden esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Kerem Altuğ GÜLER'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimi boyunca deneysel çalışmalarda ve tez yazım aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, üzerimde büyük emekleri olan Arş. Gör. Serhat ACAR'a teşekkür ederim.

Desteklerini ve yardımlarını her zaman yanımda gördüğüm, Arş. Gör. Kubilay ÖZTÜRK'e, Semih BİRİNCİ'ye, Eylem KARASAKAL SUBAŞI'na, Işık KAYA BERK'e, Merve YANGAZ'a teşekkür ederim.

Son olarak bugünlere gelmem de göstermiş oldukları fedakârlıklardan ötürü; annem Nazik KILIÇ, babam İlhan KILIÇ ve ablam İlknur KILIÇ DEMİREL'e teşekkür ederim.

Öznur KILIÇ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Hipotez	6
2 ALÜMİNYUM	7
2.1 Genel Özellikler	8
2.2 Alüminyum Kullanım Alanları.....	9
2.3 Alüminyum Döküm Yöntemleri.....	10
2.4 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	10
2.4.1 Alüminyum Dövme Alaşımları.....	11
2.4.2 Alüminyum Döküm Alaşımları	14
2.5 Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi.....	16
2.5.1 Silisyum.....	16
2.5.2 Bakır	16
2.5.3 Magnezyum	17
2.5.4 Demir	17
2.5.5 Mangan.....	17
2.5.6 Stronsiyum-Sodyum	17
2.5.7 Titanyum	18
2.5.8 Hidrojen	18

2.6 Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımları.....	18
2.7 A356 Alüminyum Alaşımı ve Genel Özellikleri.....	21
3 KAYBOLAN KÖPÜK DÖKÜM YÖNTEMİ	23
3.1 Harcanabilen Kalıplar.....	23
3.1.1. Kalıcı Modeller.....	23
3.1.2 Harcanabilir Modeller	24
3.2 Kalıcı Kalıplar.....	24
3.3 Kaybolan Köpük Döküm Yöntemi.....	25
3.3.1 Yöntemin Tarihçesi	25
3.3.2 Kaybolan Köpük Döküm Yönteminin Proses Basamakları	26
3.3.3 Kaybolan Köpük Döküm Yönteminin Avantaj-Dezavantajları	26
3.3.4 Kaybolan Köpük Döküm Yöntemi Proses Parametreleri.....	29
3.3.5 Kaybolan Köpük Döküm Yönteminin Uygulamaları.....	38
4 ALÜMİNYUM TANE İNCELTME YÖNTEMLERİ	42
4.1 Tane İncelticiler Kullanarak Tane İnceltme.....	43
4.2 Isıl Yöntemle Tane İnceltme	44
4.3 Dinamik Yöntemle Tane İnceltme	46
4.3.1 Titreşim ve Karıştırma ile Tane İnceltme	47
4.3.2 Gaz Üfleme Yolu ile Karıştırma	57
4.3.3 Momentum Konveksiyonun Arttırılması	58
4.3.4 Döndürme	58
4.3.5 Çalkalama	58
4.4 Şiddetli Plastik Deformasyon ile Tane İnceltme (Katı Halde Tane İnceltme)	59
5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	61
5.1 Kalıp Hazırlama Süreci.....	61
5.2 Ergitme ve Döküm Prosesi	62
5.3 Numune Hazırlama.....	64
5.4 Karakterizasyon Yöntemleri.....	64
5.4.1 Metalografik İnceleme.....	64

5.4.2 Sertlik Ölçümü	64
5.4.3 Yoğunluk Ölçümü	64
5.4.4 Mekanik Testler	65
6 SONUÇ VE ÖNERİLER	66
KAYNAKÇA	86
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	91



SİMGE LİSTESİ

Ar	Argon
A α	Birincil alüminyum tanelerinin alanı
Al	Alüminyum
A356	Alüminyum 356 alaşımı
α -Al	Birincil alüminyum taneleri
$\alpha_{\max}$	Titreşimin pik evresi
B	Sabit manyetik alan
B	Bor
β	Beta
cm	Santimetre
Cu	Bakır
Cr	Krom
°C	Santigrad
d	Malzemenin ortalama tane boyutu
f ω	frekans/genlik
f	Titreşim genliğini
F	Elektromanyetik cisim kuvveti
Fe	Demir
g	Gram
G	Kuvvet Birimi
σ	Sembolü katı-sıvı ara yüzey gerilim
σ_y	Akma dayanımı
Hz	Hertz
He	Helyum
A	Titreşim genliğini
J	Alternatif elektrik alan
J	Joule
kg	Kilogram
k γ	Dayanım katsayısı
kWh	kilovat saat

Ksi	N/mm ²
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
MPa	Megapaskal
m ³	Metreküp
N ₂	Azot
Ni	Nikel
Pb	Kalay
P _α	Birincil alüminyum tanelerinin çevresi
r	Sıvı-katı faz ara yüzünün ortalama eğim açısı
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
Ti	Titanyum
T _m	Ergime Noktası
µm	mikrometre
V _s	Saf Katının Molar Hacmi
Zn	Çinko
%	Yüzde
III A	3A grubu
ΔT	Katı faz eğriliğinden kaynaklanan erime noktasındaki değişiklik
ΔH _m	Füzyonun (ergimenin) molar entalpi
π	Pi sayısı

KISALTMA LİSTESİ

ACEF	Accumulative Continious Extrusion Forming - Birikmeli Sürekli Ekstrüzyon Şekillendirme
ARB	Accumulstive Roll Bonding - Birikmeli Rulo Yapıştırma
CAL	Kalori
CEC	Cyclic Extrusion Compression - Periyodik Ekstrüzyon Sıkıştırma
cm	Santimetre
Dak	Dakika
ECAP	Equal-Channel Angular Pressing - Eşit Kanallı Açısal Presleme
EMS	Electromagnetic Stirring - Elektromanyetik Karıştırma
EPC	Expandable Pattern Casting - Harcanabilen Model Döküm
F	Mekanik Titreşimin Ürettiği Ergiyik Titreşim Kuvveti
F-EMS	Final Solidifation Electromagnetic Stirring - Nihai Katılaşma Elektromanyetik Karıştırma
FSW	Friction Stir Welding-Sürtünme Karıştırma Kaynağı
g	Gram
HZ	Hertz
HPT	High Pressure Torsion- Yüksek Basıncılı Burulma
KHZ	Kilohertz
KG	Kilogram
LFC	Lost Foam Casting – Kaybolan Köpük Döküm Yöntemi
M-EMS	Mould Electromagnetic Stirring – Kalıbın Elektromanyetik Karıştırılması
MDF	Multi Directional Molding – Çok Yönlü Dövme
mm	Milimetre
RCS	Repetitive Corrugation and Streightening – Sürekli Dalgalandırma ve Doğrultma
SDAS	Secondary Dendrite Arm Spacing – İkincil Dendtir Kolları Arasındaki Mesafe
S-EMS	Secondary Cooling Mold Electromagnetic Stirring – İkincil Soğutma Elektromanyetik Karıştırma

SPD	Severe Plastic Deformation – Şiddetli Plastik Deformasyon
TCEC	Tube Cyclic Extrusion Compresion – Tüp Periyodik Döngüsel Ekstrüzyon Karıştırma
TE	Twist Extrusion - Burulma Ekstrüzyonu



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 Alüminyum ürün sevkiyatlarının yüzde dağılımı [2]	9
Şekil 2. 2 Sıvı ve katı çizgilerin metastabil uzantılarını gösteren Al-Si sistemi için faz diyagramı [48]	19
Şekil 2. 3 Yaygın alüminyum-silisyum döküm alaşımları mikroyapıları. a) Ötektikaltı alaşım mikroyapı (1,65-12,6 ağırlıkça % Si) ,b) Ötektik alaşım mikroyapı (12,6 ağırlıkça % Si) , c)Ötetiküstü alaşım mikroyapı (>12,6 ağırlıkça % Si [49]	20
Şekil 2. 4 A356 alüminyum alaşımının optik mikroskop görüntüleri [53]	22
Şekil 3. 1 Polistiren polimerasyon proesi [59]	31
Şekil 3. 2 Köpük bozunma prosesinin şematik olarak gösterimi [12]	31
Şekil 3. 3 Metal döküm ve kalıplamanın şematik olarak gösterimi [64]	34
Şekil 3. 4 Yolluklama sistemleri, a) Alt yolluklama sistemi, b) Üst yolluklama sistemi.....	37
Şekil 3. 5 Kohler Motoru[68]	39
Şekil 4. 1 Elektromanyetik karıştırmanın şematik gösterimi.....	49
Şekil 4. 2 Farklı tane küçültme şartları uygulanan alüminyum, çelik, bizmut ve dökme demir alaşımlarının fa diyagramları [70].....	53
Şekil 4. 3 Ultrasonik ekipmanların şematik gösterimi [22]	55
Şekil 4. 4 Titreşim kuvveti F, alternatif elektrik alan J, sabit manyetik alan [73] ...	57
Şekil 5. 1 Kalıplama esnasında kullanılan titreşim cihazı	62
Şekil 5. 2 Hazırlanan kalıpların döküm prosesinde kullanılan yörüngesel çalkalama cihazı	62
Şekil 5. 3 a) Çalkama uygulamadan gerçekleştirilen döküm prosesi, b) yörüngesel çalkalama uygulayarak gerçekleştirilen döküm prosesi.....	63
Şekil 5. 4 Arşimet Prensibi ile yoğunluk ölçümü yapılan hassas tartı.....	65
Şekil 5. 5 Çekme ve çentik darbe deneylerinin yapıldığı cihazlar	65
Şekil 6. 1 Üretilen parçalardan çıkarılan numunelerin pozisyonları.....	66
Şekil 6.2 720 °C'de dökülen numunenelerin optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, 50x büyütme	68
Şekil 6.3 780 °C'de dökülen numunenelerin optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, 50x büyütme	69

Şekil 6.4 720°C'de dökülen numunelerde çalkalama hızının SDAS üzerindeki etkisi	70
Şekil 6.5 720°C'de dökülen numunelerde çalkalama hızının şekil faktörü üzerinde etkisi	71
Şekil 6.6 720°C'de dökülen numunelerde çalkalama hızının tane boyutuna üzerine etkisi	72
Şekil 6.7 720°C'de dökülen numunelerde çalkalama hızının ötektik silisyumların boy/en oranına etkisi.....	73
Şekil 6.8 720 °C de dökülen numunelerde çalkama hızının sertlik üzerinde etkisi	74
Şekil 6.9 780°C'de dökülen numunelerde çalkalama hızının tane çapı üzerine etkisi	75
Şekil 6.10 780°C'de dökülen numunelerde çalkalama hızının küresellik üzerine etkisi	76
Şekil 6.11 780°C'de dökülen numunelerde çalkalama hızının ötektik silisyumların boy/en oranına etkisi.....	77
Şekil 6.12 780°C'de dökülen numunelerde çalkalama hızının tane çapı üzerine etkisi	77
Şekil 6.13 780°C'de dökülen numunelerde çalkalama hızının sertlik üzerine etkisi	79
Şekil 6.14 720 °C için mekanik test sonuçları (akma, çekme dayanımı, % uzama)	80
Şekil 6.15 720 °C için mekanik test sonuçları (darbe tokluğu).....	80
Şekil 6.16 780 °C için mekanik test sonuçları (akma, çentik darbe dayanımı, % uzama)	81
Şekil 6.17 780 °C için mekanik test sonuçları (darbe tokluğu).....	81

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Alüminyum dövme alaşımları.....	12
Tablo 2.2 Alüminyum döküm alaşımları	14
Tablo 2.3 Yaygın kullanılan alaşımların kompozisyonları [51].....	21
Tablo 2.4 A356 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu [2]	22
Tablo 4.1 Endüstride Kullanılan Tane İncelticiler [70].....	44
Tablo 4.2 Farklı katılaşma yöntemlerinin soğuma oranları [22]	45
Tablo 4.3 EMS yöntemlerinin sınıflandırılması [22].....	51
Tablo 4.4 Mekanik titreşim ve ultrasonik titreşimin karşılaştırılması [22]	56
Tablo 4.5 Şiddetli Plastik Deformasyon Yöntemleri [22]	59
Tablo 5.1 Refrakter Boya Genel Özellikleri [74].....	61
Tablo 5.2 A356 Alüminyum Alaşımın Kimyasal Bileşimi (% ağırlıkça)	63
Tablo 6.1 720 °C'de dökülen numunelerin yoğunlukları	73
Tablo 6.2 780 °C'de dökülen numunelerin yoğunlukları	78

Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Yörüngesel Çalkalamanın Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Öznur KILIÇ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç.Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Tüm metalik malzemelerde olduğu gibi, alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri de mikroyapı ile doğrudan ilişkilidir. Alüminyum döküm ve dövme alaşımlarında, tane inceltme işlemi uygulanarak, elde edilen ince ve homojen mikroyapı sayesinde mekanik özelliklerin arttığı gözlemlenmiştir. İnce ve eş merkezli mikro yapı ile malzeme yüksek mukavemet ve süneklik göstermektedir. Bu nedenle, tane inceltme alüminyum alaşımlarının dökümünde yaygın olarak uygulanmaktadır. Literatürde; tane inceltme işlemlerinin farklı yöntemlerle gerçekleştirilebildiği belirtilmektedir. Bu yöntemler; termal, kimyasal ve dinamik yöntemlerdir. Bu çalışmada dinamik yöntemler arasında yeralan yörüngesel çalkalama yöntemi incelenmiştir. Çalışma kapsamında geleneksel mekanik titreşim yöntemine alternatif bir yol olan kaybolan köpük döküm yöntemi tercih edilmiştir. A356 alüminyum döküm alaşımı kaybolan köpük döküm yöntemi (lost foam casting) ile orbital çalkalama uygulanarak dökülmüştür. Deneylerde, elde edilen döküm parçaları için çalkalama oranının etkileri araştırılmıştır. Kalıplama işleminde 10 kg/m³ yoğunluğuna sahip genleşebilen polistiren (expandable polystyren) modelleri (170x50x40 mm) kullanılmıştır. Dökümler 720 °C ve 780 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Her bir sıcaklık için 50, 100, 150, 200

devir/dakika (revolutions per minute) yörüngesel çalkalama hızı uygulanmıştır. Çalkalamanın ve çalkalama hızının etkisini gözlemlemek amacıyla aynı sıcaklıklarda statik halde dökümlerde gerçekleştirilmiş ve bu dökümlerden elde edilen numuneler referans numuneler olarak tanımlanmıştır. Mikroyapı numuneleri kenarlardan ve bu numunelerin orta kısımlarından alınmıştır. Metalografik incelemeler görüntü analiz destekli optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir, şekil faktörü, tane büyüklüğü ve SDAS (secondary dendrite arm spacing), ötektik silisyumların boy/en oranları hesaplanmıştır. Ek olarak, numunelerin yoğunlukları, gözeneklilik değerlendirilmesi amacıyla Arşimed prensibi ile ölçülmüştür. Numunelerin sertlik değerleri Brinell sertlik yöntemi ile hesaplanmıştır. Ayrıca mukavemet değerlerinin belirlenmesi amacıyla numunelere çekme ve çentik darbe testleri uygulanmıştır. SDAS değerinin düşük ve orta çalkalama hızlarında azaldığı fakat yüksek çalkalama hızında arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum her iki döküm sıcaklığında gerçekleştirilen dökümler için aynıdır. Şekil faktörü 720 °C’de gerçekleştirilen dökümler için ortalama değerlerde seyrederken, 780 °C’de gerçekleştirilen dökümler için SDAS’a benzer şekilde çalkalama ile birlikte artış göstermiştir. Her iki sıcaklıkta dökülen numunelerde tane çapında düşük ve orta çalkalama hızlarında düşüş yaşanırken, çalkalama hızının artışıyla tane kabalaşması gözlemlenmiştir. Ötektik silisyumların boy/en oranların da da benzer sonuçlar tespit edilmiştir. Yoğunluk değerlerinde ise düşük ve orta çalkalama hızının sıvı metal beslemesini desteklemesi sebebiyle artış yaşanmış ve Bu durum özellikle sertlik değerlerini olumlu etkilemiştir. Fakat yüksek çalkalama hızında yaşanan besleme sorunları sebebiyle yoğunlukta düşüş yaşanmıştır ve sertlik değerleri de buna paralel olarak düşüş göstermiştir. Düşük ve orta hızlardaki çalkalama ile SDAS, tane çapı, ötektik silisyumların boy/en oranlarında düşüş meydana gelmiştir ve bu durum mekanik değerleri olumlu etkilemiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaybolan köpük döküm yöntemi, A356 alaşımı, yörüngesel çalkalayıcı, tane inceltme, genleşebilen polistiren (EPS)

The Effect of Orbital Shaking on Microstructure and Mechanical Properties in Casting of Aluminum Alloys

Öznur KILIÇ

Department of Metallurgical and Material Science Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

As with all metallic materials, the mechanical properties of aluminum alloys are directly related to the microstructure. In aluminum casting and wrought alloys, it is observed that mechanical properties increase thanks to the fine and homogeneous microstructure obtained by applying grain refining process. By virtue of the fine and equiaxed microstructure, the material shows high strength and ductility. For these reasons, grain refinement is widely applied in the casting of aluminium alloys. In the literature; grain refinement processes can be realized with different methods. These techniques can be listed as; thermal, chemical and dynamic methods. In this study, orbital shaking method which lays among the dynamic methods has been investigated. Within the scope of this study, as an alternative way to the traditional mechanical vibration method was preferred. A356 aluminium casting alloy was cast by lost foam casting method (LFC) with the orbital shaking. In the experiments, the effects of the shaking rate were investigated for resulted casting parts. Expandable polystyrene (EPS) patterns (170x50x40 mm) with the density of 10 kg/m³ were used in the moulding process. Castings were performed at two different temperatures, 720 ° C and 780 ° C. Orbital shaking rate of 50, 100, 150,

200 rpm was applied for each temperature. In order to observe the effect of the shaking and the shaking rate, they were carried out in the castings at the same temperature statically and the samples obtained from these castings were defined as reference samples. The microstructure samples were removed from the edges and the centre parts of these samples. Metallographic examinations were carried out via image analyzer assisted optical microscope by means of calculating shape factor, grain size, and SDAS (secondary dendrite arm spacing), eutectic silicon length/width ratio. In addition, the densities of the samples were measured for the porosity evaluation by Archimedes' principle. The hardness values of the samples were calculated by Brinell hardness method. In addition, tensile and notch impact tests were applied to the samples in order to determine the strength values. It was observed that SDAS value decreased at low and medium shaking rates but increased at high shaking rates. This situation is the same for castings performed at both casting temperatures. While the shape factor was at average values for castings performed at 720 ° C, it increased with the similar to SDAS for castings performed at 780 ° C. Samples poured at both temperatures experienced a decrease in the low and medium shaking rates of the grain diameter, while grain coarse was observed with the increase of the shaking. Similar results were determined in the length / width ratios of eutectic silicones. On the other hand, there was an increase in density values due to the low and medium shaking rate supporting liquid metal feeding. This situation especially affected hardness values. However, due to the feeding problems experienced at high shaking rate, the density decreased and the hardness values decreased in parallel. With low and medium shaking, SDAS, grain diameter, and eutectic silicones length / width ratios have decreased , which positively affected the mechanical values.

Keywords: Lost foam casting method, A356 alloy, orbital shaking, grain refinement, expandable polystyrene (EPS)

1.1 Literatür Özeti

Alüminyum oksijen ve silisyumdan sonra yeryüzünde en bol bulunan üçüncü elementtir. Fakat alüminyumun üretimi 1800'lü yılların sonuna kadar hem pahalı hem de zor olmuştur [1].

Alüminyum sahip olduğu özellikler sebebiyle çok çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Bu özellikler alüminyum ve alaşımlarını ekonomik ve çekici hale getirmiştir. Alüminyumun sahip olduğu özellikleri görünüş, üretilebilirlik, fiziksel özellikler, hafiflik, mekanik özellikler ve korozyon direnci şeklinde sıralayabiliriz. Bakırın ($8,93 \text{ g/cm}^3$) ve çeliğin ($7,83 \text{ g/cm}^3$) yoğunluğu ile kıyaslanacak olursa alüminyumun yoğunluğu bu iki elementin yoğunluğunun üçte biri kadardır [2].

Alüminyum alaşımları dövme (işlem) alaşımları ve döküm alaşımları şeklinde iki ayrı kategoriye ayrılmaktadır. Bu alaşım gruplarının çoğu uygulama için ekonomiktir. Otomotiv endüstrisinde, havacılık endüstrisinde, makine ve ev aletlerin yapımında, mutfak aletlerinde, elektronik aletlerin koruma kapaklarında, kriyojenik uygulamalar için basınçlı ekipmanlarda ve diğer birçok alanda alüminyum alaşımlarının kullanımı mümkündür [3].

Alüminyum alaşımları kullanılarak hassas bileşenler üretebilmek amacıyla basınçlı döküm, kalıcı kalıba döküm, kum kalıba döküm ve kaybolan köpük döküm yöntemi gibi farklı döküm yöntemleri geliştirilmiştir [4]. Basınçlı döküm yüksek üretilebilirlik oranına sahip döküm yöntemidir. Ergimiş metalin kalıba yüksek hızda şarj edilmesi kalıp içerisinde önemli miktarda gaz gözeneklerine sebep olmaktadır. Bu durum yöntemin dezavantajı olarak tanımlanmaktadır. Bunun sonucunda döküm parçasının yüzeyinde kabarcıkların oluşmaktadır, oluşan bu kabarcıklar üretilen ürüne ısıtma işlem uygulanmasını mümkün kılmamaktadır [5], [6]. Ayrıca ince cidarlı parçaların dökümünde yavaş katılaşma hızı gerekli

olduğundan basınçlı döküm yöntemi gibi yüksek katılaşma hızına sahip dökümler ince cidarlı parçaların dökümü için uygun değildir. Bununla birlikte, kum kalıba döküm yönteminde hassas dökümler için istenen boyutsal hassasiyetlik ve yüzey pürüzlülüğü tam olarak karşılanamamaktadır. Öte yandan, karmaşık alüminyum alaşımlı hassas döküm parçalarını üretmek için kaybolan köpük döküm yöntemi (lost foam casting) ile nete yakın biçimde döküm parçası elde edilebilmek mümkündür. [7]–[9].

Kaybolan köpük döküm yöntemi; harcanabilen model döküm (expandable pattern casting), buharlaşan model döküm, kaybolan köpük döküm (lost foam casting), dolu kalıba döküm, Castryal döküm, Replicast döküm ve policast döküm olarak da birçok terimle ifade edilmektedir. Kaybolan köpük döküm yöntemi ile ilgili çalışmalar ilk olarak 1964 yılında Flemings tarafından yapılmıştır. Fakat yöntem 1958 yılında dolu kalıp prosesi olarak Shroyer tarafından geliştirilmiştir[10]–[12].

Kaybolan döküm yöntemi (lost foam casting), modeli köpük malzemesinden yapılan bir döküm yöntemidir. Yöntemde kullanılan köpük polimerik malzemedir. Ayrıca model kalıcı değil bir başka deyişle harcanabilen modeldir. Yöntemde ilk olarak polimer bazlı model hazırlanmaktadır. Fakat üretilecek parçanın bir bütün olarak kalıplanması mümkün değil ise iki veya daha fazla parçanın kalıplanmasının ardından tüm parça bir araya getirilir. Model monteleme işleminden sonra ikinci adım su bazlı refrakter bulamaç ile modelin kaplanması işlemidir. Üçüncü adım boyanan modellerin refrakter kaplamalarının kurutulmasıdır. Kuruyan modeller daha sonra kuru ve gevşek kum ile bir derece içerisinde kalıplanmaktadır. Gevşek olan kumu daha kompakt bir hale getirmek için kalıba titreşim uygulanabilmektedir. Kaybolan köpük döküm yönteminde model kalıptan uzaklaştırılmadan sıvı ergiyik model üzerine direkt dökülmektedir. Sıvı ergiyik polimerik model ile temas kurduğunda çeşitli kimyasal reaksiyonlar gerçekleşir ve model bozunmaya uğrar. Gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan ürünler ilk olarak refraktere daha sonra da gevşek kuma difuze olarak dışarıya atılmaktadır. Böylece arzu edilen şekil sıvı ergiyik ve polimerik modelin yer değiştirmesi sonucuyla elde edilir [8], [13].

Bugüne kadar kaybolan köpük prosesi ile hem demir hem de demir dışı alaşımları için çalışmalar mevcuttur. Özellikle dökme demir, alüminyum, çelik üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır fakat magnezyum alaşımları için çeşitli çalışmalar rapor edilmiştir [14], [15].

Kaybolan köpük döküm yöntemi, geleneksel döküm yöntemlerine göre avantajlara sahiptir. Karmaşık ve içgeçişlere sahip parçaların üretilmesinde maça kullanımına gerek kalmamaktadır. Modeller ucuzdur ve yakın boyut toleransı sağlamaktadır. Model ayırma çizgisi yoktur bu sayede iyi yüzey kalitesi sağlamaktadır. Kalıplama esnasında kum tekrar kullanılmaktadır bunun sonucunda proses maliyeti düşüktür ve yöntemin çevre dostu olmasını sağlamaktadır [16], [17]. Bu döküm yönteminin avantajlarının yanında birçok dezavantajı da mevcuttur. Döküm parçasının yüzeyinde karbon kusurları, modellerin yetersiz kaplanması sebebiyle sıvı-metal penetrasyonu, döküm parçalarında gaz boşlukları yani gözenekler ve çekinti hataları bu yöntemin dezavantajlardandır[18].

Belirtilen dezavantajların yaşanmaması ve son ürün kalitesinin iyi olması için tüm süreç boyunca proses parametlerine dikkat edilmelidir. Bu proses parametreleri; modelin türü ve yoğunluğu, kumun türü ve kumun geçirgenliği, iyi yüzey kalitesini sağlamak amacıyla ve sıvı-polimerik köpük model arasında bariyer oluşturarak katılma esnasında kumun metal ile penetrasyonunu engelleyen refrakter kaplamanın kalitesi ve kalınlığı ve döküm hızıdır. Döküm hızı alaşım türü ve döküm sıcaklığından etkilenmektedir [19].

Döküm sektöründe döküm prosesi sonucunda elde edilen mikroyapının kontrol edilmesi günümüzde karşılaşılan temel zorluklardan biridir. İnce ve eş eksenli içyapı mikro gözeneklere ve çatlaklara karşı hassastır fakat mukevemet, süneklik gibi iyi mekanik özellikler sergilemektedir [20].

Tane boyutu alaşımların işlenebilmesi ve özelliklerinin belirlenmesinde en temel mikroyapısal faktörlerden biri olarak bilinmektedir. İnce tane boyutu ile sıcak yırtılmaya olan eğilim azalmaktadır. Ayrıca ince tane boyutulu ile gözenekler daha dağınık ve ince bir yapıda olmaktadır. Bunlara ek olarak ince tane boyutu yönlendirilmiş beslenme karakteristiğini iyileştirmektedir. Fakat ince tane boyutu akışkanlığı azaltabilir ve sıcak noktalarda hatalara sebep olabilmektedir [21].

İnceltirilmiş döküm mikroyapısı döküm parçasının özelliklerin artmasını sağlamaktadır. Mukavemetlenme mekanizması (1.1) Hall-Petch eşitliği ile ilişkilendirilebilir [21].

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y \cdot d^{-1/2} \quad (1.1)$$

Eşitlikte ; σ_y akma mukavemetini, σ_0 kristalin dislokasyon hareketine gösterdiği direnci; yani dislokasyonları harekete geçirmek için gereken gerilim miktarını, k_y mukavemetlendirme katsayısı (bu katsayısı malzemeye özgüdür) , d ise malzemenin ortalama tane boyutunu temsil emektedir [22]. Formülden de anlaşılacağı üzere tane boyutu büyüdükçe malzemenin dayanımı düşmektedir.

Tüm metallerde olduğu gibi alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini belirleyen en temel faktör mikroyapıdır. Ötektikaltı Al-Si alaşımlarında iyi bir şekilde tane inceltirirse (rafinasyon) dendritik olmayan mikroyapı elde edilebilir [23].

Metallerde mikroyapının inceltirilmesi için birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Uygulanan yöntemler katılaşma sürecinde veya sonrasında yapılabilmektedir. Katılaşma sırasında titreşim ve karıştırma ile tane inceltme birinci grup; hızlı katılaştırma ikinci grup; tane inceltici ajanlar yardımı ile inceltme üçüncü grup ve son olarak şiddetli deformasyon ise dördüncü gruptur [22].

Kumar ve arkadaşları [24] Al-%6Cu alaşımının katılaşması esnasında döküm parçasının mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerinde kalıp titreşiminin etkisini araştırmışlardır. Döküm grafit kalıpta gerçekleştirilmiştir. Titreşim frekansları ise 40-150 Hz arasında değişmektedir. Ayrıca titreşimin belirgin etkisini gözlemlemek amacıyla döküm esnasında hiç titreşim uygulanmadan döküm gerçekleştirmişlerdir. Bu dökümden elde edilen numune referans numune olarak seçilmiştir. Sonuçlar kalıba uygulanan mekanik titreşimin mikroyapı üzerinde ve döküm parçasının özelliklerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Kalıba titreşim uygulanarak dökülen numunelerde daha ince taneli ve daha iyi mekanik sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca titreşimin frekansının artmasıyla tanelerin daha çok incelendiği gözlemlenmiştir. Buna paralel olarak numunelerin sertlik değerlerinde de artış yaşanmıştır.

Shi ve arkadaşları [25] 6016 alüminyum alaşımının katılaşma sürecinde ultrasonik işlem uygulamışlardır. Ultrasonik titreşimin malzemenin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Geleneksel döküm yöntemi ile dökülen ingotlar ve ultrasonik işlem uygulanan ingotlar karşılaştırıldığında, ergimiş metale uygulanan ultrasonik titreşim ile, üretilen ürünlerin tamamen inceltmiş bir mikroyapıya ve homojenliğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ultrasonik titreşim gözeneklilik miktarını azaltmış ve çekme boşluğu ve çekinti gibi katılaşma hatalarını da elimine etmiştir. Bunlara ek olarak, döküm parçasındaki segregasyon en aza indirilmiş ve mekanik özelliklerde gelişme yaşandığı raporlanmıştır.

Wenming ve arkadaşları [26] A356 alaşımının seramik kabuklu hassas dökümünde köpük model kullanmışlar ve titreşim frekansının mikroyapı, mekanik özellikler ve kırılma davranışı üzerinde etkisini incelemişlerdir. Titreşim olmayan numunelerde titreşim olanlara göre birincil Al ve ötektik silisyumun kaba-dendritik ve kaba-plaka şeklinde oluşumu gözlenmiştir. Titreşim frekansı arttıkça tane boyutu ile ikincil dendrit kolları arası mesafe (secondary arm spacing) düşmüş, şekil faktörü artmıştır. Mekanik titreşimin etkisiyle yoğunluk, akma ve çekme mukavemeti, yüzde uzama ve sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Aynı çalışma kapsamında kırılma yüzeyleri de incelenmiş olup titreşimsiz koşulda oluşan kaba mikroyapıya sahip numunelerde görece gevrek kırılma yüzeyi izlenmiştir. Vibrasyonla üretilen numunelerde kırılma yüzeylerinde, sünek kırılma karakteristiği olan çukur (dimple) oluşumu gözlemlenmiştir.

Wen-qi Zou ve arkadaşları [27] titreşim frekansının kaybolan köpük yöntemiyle dökülen yüksek kromlu dökme demirler için mikroyapı ve performansı üzerinde çalışmalarıdır. Mikroyapı hem titreşimsiz hem de farklı titreşim frekanslarında dökülen numunelerde genel olarak birincil karbürlerden ve ötektik kolonilerinden oluştuğu; titreşim frekansı arttıkça mikroyapının daha ince bir hal aldığı gözlemlenmiştir. Fakat sertlik artışının bu etkiden az miktarda etkilendiği raporlanmıştır. Ayrıca parçalara aşınma testi uygulanmış olup, titreşim etkisi altında dökülen numunelerin aşınma direncinin arttığı belirtilmiştir.

Kıyasöz ve arkadaşları [28] yörüngesel çalkalayıcı eşliğinde kaybolan köpük döküm yöntemiyle üretilen A380 alaşımının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yörüngesel çalkalama hareketinin ve hızının mikroyapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kaybolan köpük döküm yönteminde yörüngesel çalkalamanın geleneksel mekanik karıştırmaya alternatif bir teknik olarak kullanılabileceği gözlemlenmiştir. Çalışmada yörüngesel çalkalamanın kaybolan köpük döküm yöntemiyle üretilen parçaların makro geometrisini değiştirmedeği ve mekanik titreşime göre daha uygun olduğu saptanmıştır. Çalışmada yörüngesel çalkalama hareketi ile dendrit kollarının yakınlaştığı ve ikincil dendrit kolları arasındaki mesafenin düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak sertlikte artış gözlemlenmiştir. Ayrıca döküm öncesinde başlayan ve katılaşmanın sonuna kadar devam eden çalkalama hareketinin doldurma ve besleme kapasitesini olumlu yönde etkileyerek yoğunluğu artırdığı kanıtlanmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Tezin amacı; alüminyum döküm alaşımlarının kaybolan köpük yöntemi ile dökümünde mekanik titreşim yerine yörüngesel çalkalama hareketi ile dinamik tane inceltme işlemini gerçekleştirerek mikroyapıda değişim sağlamak ve bunun sonucunda mekanik özellikleri arttırmaktır. Amaç döküm sıcaklığı ve çalkalama hızı gibi proses parametrelerinin değiştirilmesiyle oluşacak farklı özellikteki numunelerin incelenmesi ve kıyaslanmasıdır.

1.3 Hipotez

Kaybolan köpük döküm işleminde mekanik titreşim uygulanması köpük model üzerindeki refrakter kaplamanın parçalanmasına neden olmaktadır. Bu durum döküm parçanın şeklini, boyutsal hassasiyetini ve yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Kaybolan köpük döküm yönteminde yörüngesel çalkalama uygulanarak dendritlerin kırılarak ikincil dendrit kolları arasındaki mesafenin düşmesi sonucu mikroyapının inceltilmesi hedeflenmiştir. Uygulanan yörüngesel çalkalama işlemi kalıba hasar vermemekte ve parça bütünlüğünü bozmamaktadır. Böylece kaybolan köpük döküm yönteminde uygulanan yörüngesel çalkalamanın mekanik titreşime ikame yöntem olabileceği incelenmek istenmiştir.

2 ALÜMİNYUM

Alüminyum oksijen ve silisyum elementlerinin ardından yeryüzünde en bol bulunan üçüncü elementtir. Fakat alüminyum üretimi 1800'lü yılların sonuna kadar pahalı ve zor olmuştur [1]. Alüminyum periyodik cetvelde III A grubunda bulunmaktadır. Atom ağırlığı 26,89 g ve +3 değerliğe sahiptir. Yoğunluğu 2,7 g/cm³, ergime noktası 659,8 °C, kaynama noktası 2450 °C, ısınma ısısı 0.224 Cal/g, erime ısısı 400 Cal/g 'dir. 20°C'taki elektriksel iletkenliği bakırın %65'i, ısı iletim katsayısı 0,5 W/mk, ışık yansıtılabilirliği ise %90' dır. Çeşitli alaşım elementlerinin ilavesi ile bu özellikler değiştirilebilmektedir [29].

Alüminyum metalini ve onun alaşımlarını değişik kullanım alanları için ekonomik ve çekici yapan özellikler; görünüş, hafiflik, fiziksel ve mekanik özellikler, korozyona olan direnç ve üretilebilirliktir [2].

Alüminyumun çok yönlü bir metaldir, onun bu özelliği alüminyumu çelikten sonra en çok kullanılan metal yapmaktadır. Alüminyum boksit mineralinden elde edilmektedir. Boksit minerali Bayer Prosesi ile alüminyum oksite diğer bir adıyla alüminaya dönüştürülmektedir. Piyasada alüminyum endüstrisinde kullanılan alüminaların hepsi, Bayer prosesi tarafından üretilmektedir. Alümina daha sonra elektrolitik hücreler ve Hall Heroult prosesi kullanılarak alüminyum metaline dönüştürülmektedir. Hall Heroult prosesi 1886'da Fransa'da Paul Heraoult ve ABD'de de Charles M.Hall tarafından patentlenmiştir. Dünya genelinde alüminyum yukarıda belirtilen yeni alüminyum üretimi ile bir kısmı da geri dönüşüm sayesinde üretilmektedir. Geri dönüştürülmüş alüminyum hurdaların kullanımı hem çevresel hem de ekonomik olarak katkı sağlamaktadır. Çünkü 1 tonluk yeni (birincil) alüminyum üretmek için 14.000 kWh enerji harcanmaktadır. Fakat 1 tonluk alüminyumun geri dönüştürülmüş alüminyum hurdalarının eritilmesi ve yeniden kazandırılması ile üretimi bu değer yaklaşık %5'inin harcanmasına neden olmaktadır. Ayrıca birincil ve geri dönüştürülmüş (ikincil) alüminyumlarda kalite açısından fark bulunmamaktadır [30].

2.1 Genel Özellikler

Alüminyumun yaygın olarak kullanılması aşağıda sıralanan özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Yüksek Mukavemet/Ağırlık Oranı Alüminyumun yoğunluğu 2.7 g/cm^3 , çeliğin yoğunluğu ise 7.83 g/cm^3 'dür. Bir başka ifade ile alüminyumun yoğunluğu çeliğin yoğunluğunun yaklaşık üçte biri kadardır. Ayrıca alüminyum alaşımlarının mukavemeti yaklaşık 700 Mpa (100 ksi)'dir. Bu özellik alüminyumu yumuşak karbon çeliklerine rakip yapmaktadır [31].

Üretilebilirlik Alüminyum döküm, dövme, ekstrüzyon, bükme, haddeleme, çekme, eğme ve işleme gibi yöntemlerle üretilebilen en kolay metallerin arasındadır [31].

Korozyon Direnci Alüminyum ve oksijen hızlı bir şekilde reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyon sonucu ile alüminyum oksit oluşmaktadır. Oluşan bu oksit metalin daha fazla oksidasyona uğramasını önler. Oksit filmi; ince, sert, renksizdir ve metalin yüzeyine yapışarak onu korur. Herhangi bir zarar gördüğünden de bu tabaka hızlıca kendini yenileyebilmektedir [31].

Yüksek Elektrik İletkenliği Bakır ve alüminyum eşit ağırlıkta alındığında alüminyum bakırdan iki kat daha fazla elektriği iletmektedir. Bu durum özellikle elektrik iletim kablolarında alüminyum kullanımını cazip hale getirmiştir [31].

Yüksek Termal İletkenlik Alüminyumun ısı iletkenliği çeliğe göre yaklaşık üç kat daha fazladır. Bu özellik alüminyumunun ısı değiştiriciler gibi ısıtma ve soğutma işlemlerinde kullanılmasını sağlamaktadır [30].

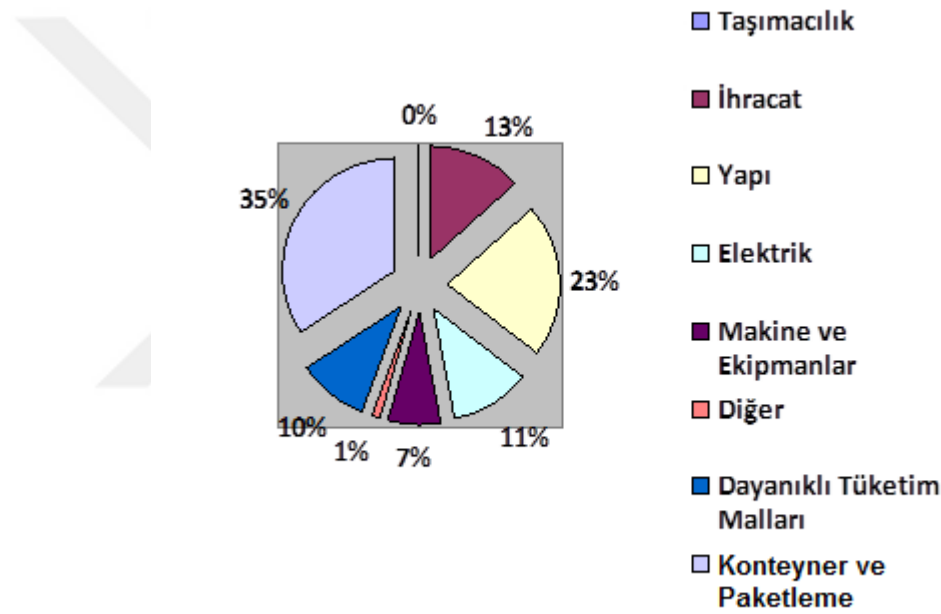
Kriyojenik Sıcaklıklarda Yüksek Dayanıklılık Alüminyum düşük sıcaklıklarda kırılğan değildir. Kırılmaya da eğilimli değildir. Aksine düşük sıcaklıklarda daha yüksek mukavemet ve dayanıklılık göstermektedir. Bu özellikler alüminyumun kriyojenik tanklarda kullanımını sağlamaktadır [31].

Yansım Alüminyum metalinin yüzeyi pürüzsüzdür. Bu sebeple yüzeye gelen radyal dalgaları, görünür ve mikrodalga ışınlarını yüzeye çarparak yansıtmaktadır [32].

Geri Dönüşüm Alüminyum, % 100'e kadar geri dönüşümü olan metaldir. Geri dönüşüm oranı bu kadar yüksek olması nedeniyle ikincil üretim yöntemi ile üretilmektedir [32].

2.2 Alüminyum Kullanım Alanları

Alüminyum kullanım alanlarını; bina ve inşaat, ulaşım, dayanıklı tüketim malları, elektrik ve makine teçhizatları, konteynerlar ve ambalajlar, ihracat ve diğer kullanımlar şeklinde sıralayabiliriz. [2]. Aşağıda Şekil 2. 1'de uygulama alanlarının yüzde oranları verilmektedir.



Şekil 2. 1 Alüminyum ürün sevkiyatlarının yüzde dağılımı [2]

Alüminyum yapı uygulamaları daha çok bina ve çatı kaplamaları, kapı ve pencere doğramaları, aksesuar yapımlarında karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca alüminyum alaşımlarına yapılan eloksal kaplama ile dekoratif görüntü sağlanmaktadır. Doğal ve renkli eloksal kaplamalar ile alüminyum inşaat alanındaki uygulamalarda yer edinmektedir. Bir diğer uygulama ise ambalaj sektörüdür. İlaç kutuları, diş macunu tüpleri, konteynerler, fırında yemekleri pişirmek için kullanılan folyolar, meşrubat kutuları ambalaj sektöründeki uygulamalara örnek olarak verilmektedir. Alüminyumun en önemli uygulama alanlarından bir diğeri ise ulaşım. Çünkü

ulaşım araçları ne kadar hafif olursa, kullanmak için harcanan enerjide o seviyede azalmaktadır. Bu sayede hem sürücü masrafları azalacak hem de egzoz emisyonu azaltılmış olacaktır. Alüminyum mükemmel iletkenliğe sahiptir. Özellikle elektrik ve elektronik sektöründe elektrik nakil hatlarında, yeraltı kablolarında, elektrik borularında ve motor bobin sarımında kullanılmaktadır [33].

2.3 Alüminyum Döküm Yöntemleri

Alüminyum metallerin dökümünde kullanılan birçok döküm yöntemiyle üretilen metallerden biridir. Bu döküm proseslerini kullanım sırasına göre sırayacak olursak; basınçlı döküm, kalıcı kalıba döküm, kum kalıba döküm (yaş veya kuru kalıp), alçı kalıba döküm, hassas döküm ve sürekli döküm şeklindedir. Ayrıca kaybolan köpük döküm yöntemi, sıkıştırmalı döküm ve sıcak izostatik presleme döküm eşitleri de kullanılmaktadır. Döküm yöntemi seçiminde özellikle fizibilite ve kalite faktörleri etkili olmaktadır. Fizibilite açısından yöntemler kıyaslanacak olursa birçok alüminyum alaşımı herhangi bir döküm yöntemi ile üretilir. Fakat önemli miktarda döküm yapabilmek için boyut ve tasarım özellikleri döküm yönteminin belirlenmesindeki en önemli faktörlerdir. Örneğin büyük tonajlı ürün üretmek gerektiğinde metal kalıp kullanmaktan ziyade kum kalıp kullanılabilir. Boyutsal hassasiyetinin iyi olmasını istediğimiz küçük parçalarda ise metal kalıp kullanılmaktadır. Kalite faktörü ile ifade edilmek istenen seçilen döküm yöntemi uygulandığında gözeneklerin, çatlak ve yüzey hatalarının azlığı; mukavemet ve süneklik gibi mekanik özelliklerin iyi olmasıdır [34].

2.4 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları iki ana kategoriye ayırmak mümkündür. Bu kategori dövme (işlem) ve döküm alaşımları şeklinde isimlendirilmektedir [35]. Üretim yöntemlerinin farklı olması sektörde değişik ihtiyaçların olduğunun göstergesidir. Dövme alaşımları plastik deformasyonla şekillendirilmektedir. Döküm alaşımlarına göre hem kimyasal bileşimleri hem de mikroyapıları oldukça farklıdır. Bahsedilen bu her iki ana grup içindeki alaşımlarda ısıl işlem uygulanabilen ve ısıl işlem uygulanamayan alaşımlar şeklinde iki alt gruba daha ayrılmaktadır [36].

Döküm ve dövme alaşımlarının isimlendirilmesi için sistem geliştirilmiştir. Alüminyum Birliği en çok Amerika Birleşik Devletlerinde kabul görmüş sistemdir. Dövme alaşımları için dört haneli bir sistem kullanılmaktadır [35]. Dört hanenin ilk sayısı alaşımın birincil elementini belirtir. İkinci hane, alaşımın modifikasyonu belirtir [31]. Döküm alaşımları için tanımlama üç haneli sistem ve ardından ondalık bir değerle yapılmaktadır. İlk rakam alaşımın birincil elementini göstermektedir. İkinci iki basamak, saflık seviyesini belirtir. Noktadan sonraki son hane ise alaşımın formunu gösterir. Külçe için 1 ve 2 rakamı kullanılır. Empürite seviyesine bağlı olarak rakamlar değişmektedir. Dökümler için 0 rakamı kullanılmaktadır. Alaşımın modifikasyonu alaşım numarasının önüne getirilen harf ile tanımlanmaktadır. (örneğin A,B,C vb) [31].

2.4.1 Alüminyum Dövme Alaşımları

Alüminyum dövme alaşımlarının üretiminde ilk olarak kütük (ingot) dökümü gerçekleştirilir daha sonra plastik şekil verme işlemleriyle ürün haline getirilir. Alüminyum dövme alaşımları; dövme, haddeleme, ve ekstrüzyon gibi plastik şekil verme yöntemleriyle üretilmektedir [32].

Tablo 2.1’de alüminyum dövme alaşımları içerdiği birincil elementlere göre sınıflandırılmıştır. 1XXX, 3XXX, 5XXX serisi dövme alaşımları ısıl işlem uygulanmayan alaşımlardır. Bu alaşımlar sadece şekil değiştirme yoluyla sertleşebilmektedir. 4XXX serisi ise hem ısıl işlem uygulanabilen hem de ısıl işlem uygulanamayan alaşımlara sahiptir. 2XXX, 6XXX, 7XXX, 8XXX serisi alaşımlar ise sertleştirilebilmektedir.

Tablo 2.1 Alüminyum dövme alaşımları

Seri Numarası	Alaşım Elementi
1XXX	- (Saf Alüminyum)
2XXX	Bakır
3XXX	Mangan
4XXX	Silisyum
5XXX	Magnezyum
6XXX	Silisyum-Magnezyum
7XXX	Çinko
8XXX	Diğer Elementler
9XXX	Kullanılmayan Seri

2.4.1.1 1XXX Serisi Alüminyum Dövme Alaşımları

Bu serideki bileşimler, yüksek süneklik ve şekillendirilebilirliğe sahiptir ve bu sayede kolayca işlenebilir ve şekil alabilirler. Yüksek elektrik iletkenliğine ve korozyon ortamlara dayanıklılığa sahiptir [37].

2.4.1.2 2XXX Serisi Alüminyum Dövme Alaşımları

Bu serideki alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi bakırdır. Sahip olduğu bakır elementi sayesinde çözelti sertleşmesi ile çökelti oluşturularak yüksek mukavemet elde edilir. Alüminyum alaşımlarının neredeyse hepsine kolayca kaynak prosesi uygulanamamaktadır fakat özellikle 2219 ve 2195 gibi seriler kaynak uygulamaları için geliştirilmiştir [37].

2.4.1.3 3XXX Serisi Alüminyum Dövme Alaşımları

Bu serinin ana alaşım elementi mangandır. Tüm ortamlarda korozyona karşı yüksek direnç sağlar. Bu serideki alaşımlar kolay bir şekilde kaynaklanabilir ve lehimleme uygulamalarında kullanılmaktadır [37].

2.4.1.4 4XXX Serisi Alüminyum Dövme Alaşımları

İki tür silisyum içeren alüminyum alaşımları mevcuttur. Tek başına silisyum içerenler; çok güçlü olmayan fakat mükemmel akış ve bitirme özelliklerine sahiptirler. Birde silisyumun yanı sıra yapısında bakır ve/veya magnezyum elementi içerenler mevcuttur. Bakır ve magnezyum elementleri sayesinde çözeltiye alma ısı işlemi ile mukavemet kazanırlar [37].

2.4.1.5 5XXX Serisi Alüminyum Dövme Alaşımları

Bu seri ana element olarak magnezyum içermektedir. Ayrıca bu alaşımlar ısı işlem uygulanamayan en yüksek mukavemetli alaşımlar arasındadır. Bu alaşımlar, kırılmaya karşı çok dayanıklıdır ve enerjiyi absorbe edebilirler. Böylece yüksek tokluğun gerektirdiği kritik uygulamalarda kullanılmaktadır. Korozyon ortamlara dayanıklıdır ve uygulamalarda çokça kullanılmaktadır [37].

2.4.1.6 6XXX Serisi Alüminyum Dövme Alaşımları

Bu alaşımlar silisyum ve magnezyum içermektedirler. Silisyum ve magnezyum elementlerinin ikisi birden mevcut olduğunda alüminyum-magnezyum-silisyum sistemi ile Mg_2Si fazı elde edilir. Hem korozyon direnci hem de mukavemeti yüksek olmaktadır [37].

2.4.1.7 7XXX Serisi Alüminyum Dövme Alaşımları

Bu grup alaşımlar yüksek miktarda çinko elementi içermektedir. Çinko elementinin yanında bakır ve magnezyum elementlerinin içermesi ticari serilerde en yüksek dayanımı sağlamaktadır [37].

2.4.1.8 8XXX Serisi Alüminyum Dövme Alaşımları

8XXX serisi kayda değer seviyede titanyum, lityum, demir içerebilir [35]. Demir ve nikel elektrik iletkenliğinde yüksek miktarda kayıp yaşanmadan mukavemeti arttırmak için kullanılmaktadır [37].

2.4.1.9 9XXX Serisi Alüminyum Dövme Alaşımları

Bu seri kullanılmamaktadır.

2.4.2 Alüminyum Döküm Alaşımları

Alüminyum döküm alaşımlarının ergime sıcaklıkları nispeten düşüktür, hidrojen elementi hariç gaz çözünürlükleri de düşüktür. Çok iyi dökülebilirlik, iyi işlenebilirlik, iyi yüzey kalitesi, iyi korozyon dayanımı, iyi termal ve elektrik iletkenliğine sahip olma gibi özelliklere sahiptir. Fakat metal katılaşma esnasında %3,5-8,5 oranında hacimsel olarak çekme göstermeleri sebebiyle bir takım problemler yaşanmaktadır. Bu sebeple çekme boşluklarının önlenmesi, sıcak yırtılmaların yaşanmaması ve yüksek boyutsal hassasiyetin sağlanması için kalıp tasarımı çok önemli bir parametredir. Alüminyum döküm alaşımlarının sahip oldukları mekanik özellikleri ısıtılarak uygulanarak daha yüksek değerlere çıkarılabilmektedir [38]. Tablo 2.2’de alüminyum döküm alaşımları içerdiği birincil elementlere göre sınıflandırılması belirtilmiştir. Bu serilerden 1XX.X, 5XX.X ve 8XX.X serisine ısıtılarak uygulanmazken, 2XX.X, 3XX.X, 4XX.X ve 7XX.X serisine ısıtılarak uygulanabilmektedir.

Tablo 2.2 Alüminyum döküm alaşımları

Seri Numarası	Alaşım Elementi
1XX.X	- (Saf Alüminyum)
2XX.X	Bakır
3XX.X	Silisyum+Bakır, Mangan
4XX.X	Silisyum
5XX.X	Magnezyum
6XX.X	Bu seri kullanılmamaktadır.

Tablo 2.2 Alüminyum döküm alaşımları (devamı)

7XX.X	Çinko
8XX.X	Kalay
9XXX	Diğer elementler

2.4.2.1 1XX.X Serisi Alüminyum Döküm Alaşımları

Bu seri en az %99 oranında alüminyum içeren alaşım grubudur. Düşük oranlarda element içermeleri sebebiyle saf alüminyum alaşım serisi şeklinde de söylenebilir [32]. Saf alüminyumun sahip olduğu yüksek elektrik iletkenliği sebebiyle elektrik motor rotorlarında kullanılmaktadır [39].

2.4.2.2 2XX.X Serisi Alüminyum Döküm Alaşımları

Bu serinin birincil alaşım elementi bakırdır [31]. Isıl işlem uygulabilen alaşımlar sınıfındandır. Oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet, bazen de yüksek tokluk sergilemektedirler. Uçak, otomotiv uygulamaları/motorlarda kullanılmaktadır [40].

2.4.2.3 3XX.X Serisi Alüminyum Döküm Alaşımları

Bu alaşım serisi silisyum elementinin yanında magnezyum veya bakır elementi içermektedir. Isıl işlem uygulanabilmektedir. Diğer döküm alaşımlarında göre mükemmel akışkanlık, yüksek mukavemet, yüksek tokluk göstermektedirler. Otomotiv endüstrisinde, pistonlar ve pompalarda kullanılmaktadır [40].

2.4.2.4 4XX.X Serisi Alüminyum Döküm Alaşımları

Bu serinin başlıca elementi silisyumdur. Hem iyi dökülebilirliğe hem de bakır içeren 3XX.X alaşımlarına göre daha iyi korozyon direncine sahiptir [39].

2.4.2.5 5XX.X Serisi Alüminyum Döküm Alaşımları

Bu seri ağırlıkça en çok magnezyum elementini içermektedir. Isıl işlem uygulanamamaktadır. Mükemmel korozyon direnci, iyi işlenebilirliğe sahiptir. Pişirme aletleri, yiyecek taşıma ekipmanları, uçak ve otoyol bağlantı parçalarından kullanılmaktadır[40].

2.4.2.6 6XX.X Serisi Alüminyum Döküm Alaşımları

Bu seri döküm alaşımlarında kullanılmamaktadır.

2.4.2.7 7XX.X Serisi Alüminyum Döküm Alaşımları

Bu serinin başlıca elementi çinkodur. İyi darbe özelliklerine sahiptir ve ısıtıl işlem uygulanmadan oldukça yüksek mukavemet sağlamaktadırlar [39].

2.4.2.8 8XX.X Serisi Alüminyum Döküm Alaşımları

Bu serinin başlıca elementi kalaydır. Isıl işlem görebilir. Çok iyi işlenebilirlik özelliği vardır. Yatak ve burçların üretiminde kullanılmaktadır [40].

2.4.2.9 9XX.X Serisi Alüminyum Döküm Alaşımları

Bu seri, diğer serilerde kullanılanlar dışındaki elementlerle alaşımlanmış dökümler için ayrılmıştır [31].

2.5 Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi

Saf alüminyum sahip olduğu zayıf mekanik özellikler sebebiyle endüstriyel uygulamalar için kullanışlı ve faydalı değildir. Genelde saf alüminyumun sahip olduğu mukavemet, süneklik ve diğer mekanik özellikleri arttırmak için çeşitli alaşım elementleri eklenmektedir [41].

2.5.1 Silisyum

Silisyum, alüminyum döküm alaşımlarının birçoğunda kullanılan en önemli alaşım elementidir. Silisyum yüksek akışkanlık sağlaması sebebiyle iyi dökülebilirliğe sebep olmaktadır. Silisyumun alüminyum içerisindeki çözünürlüğü çok düşüktür. Bu sebeple yapı içerisinde sert saf Si olarak çökerek aşınma direncini arttırmaktadır. Fakat işlenebilirliği düşürmektedir. Ayrıca ağırlıkça silisyum konsantrasyonuna bağlı olarak Al-Si alaşımları ötektikaltı, ötektik ve ötektiküstü şeklinde üç ana gruba ayrılmaktadır [42].

2.5.2 Bakır

Alüminyum döküm alaşımlarında diğer alaşım elementleri ile kıyaslanacak olursa bakır; ısıtıl işlem uygulanmış ve uygulanmamış durumlarda; ortam sıcaklıklarında veya yüksek kullanım koşullarında mukavemet ve sertlik üzerinde en büyük etkiye

sahip elementtir [39]. Alüminyum-bakır alaşımları %2 ile %10 arasında bakır içermektedir. Bakır yapı içerisinde mukavemet sağlar ve çökeltme sertleşmesini kolaylaştırır. Sünekliği ve korozyon direncini düşürmektedir. Havacılık, askeri araçlar ve roket kanatları uygulama alanlarıdır [43].

2.5.3 Magnezyum

Magnezyum malzemenin korozyon direncini artırır, iyi işleme ve eloksallama, boya ve parlatma gibi iyi özellikler sağlamaktadır. Fakat silisyumun tersine dökülebilirliği azaltmaktadır. Alüminyum-silisyum alaşımlarında magnezyum β fazı olarak isimlendirilen Mg_2Si olarak çökelmektedir. Magnezyum ilavesi ile alüminyum alaşımları yaşlanma ile sertleşebilir. Böylece akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve sertlik artmaktadır. Fakat magnezyum eklenmesi yapıda bulunan kırılma fazların şeklini ve çeşidini etkilemektedir, sünekliği ve tokluğu düşürebilmektedir [44].

2.5.4 Demir

Demir alüminyum içerisinde doğal olarak bulunur, tane inceltici etkiye sahiptir ve mukavemet artırır [32]. Demir katılma esnasında karmaşık intermetalik fazlar oluşturmaktadır. Oluşan bu fazlar mekanik özellikleri ve bilhassa sünekliği olumsuz etkilemektedir [45].

2.5.5 Mangan

Alüminyum alaşımlarına mangan eklenmesi, çekme mukavemetini arttırmaktadır. Düşük devirli yorulma direncini de ayrıca arttırmaktadır [43]. Yapıda bulunan mangan mukavemet kazandırmaktadır. Hem de yapıda bulunan mangan ile süneklik ve korozyon direncinde azalma yaşanmamaktadır [42].

2.5.6 Stronsiyum-Sodyum

Stronsiyum ve sodyum elementleri, ötektik silisyumun fazının morfolojisini ve mikroyapısını modifiye etmek için kullanılmaktadır. Ötektik silisyum nispeten kaba taneli fakat sürekli bir ağ şeklinde katılaşmaktadır. Bu kaba sürekli ağ yapısı gerilimi artırarak mukavemetin yükselmesine neden olmak ve sünekliği baskılamaktadır. Özellikle ötektik ve hipoötektik alaşımlara eklenerek ötektik silisyumun ince lifli ve lamelar yapıya dönüşmesini sağlamaktadır [42].

2.5.7 Titanyum

Titanyum alüminyum içine tane inceltici olarak ilave edilmektedir. Titanyum bor elementinin bulunması durumunda veya TiB_2 olarak eklenildiğinde tane inceltici etkisini gösterebilmektedir. Ayrıca titanyum kaynak yapısını incelttiği için ve kaynak çatlağını önlediği için dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır[43].

2.5.8 Hidrojen

Hidrojen alüminyum içerisinde istenmeyen elementtir. Yapı içerisine hava ile girmektedir ve giren hidrojen soğuma sırasında gaz boşlukları oluşmasına neden olmaktadır. Tane sınırlarında gerilmeli korozyon çatlağına neden olmaktadır. Berilyum, silisyum, kalay gibi elementler eklenerek hidrojen engellenmektedir [32].

2.6 Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımları

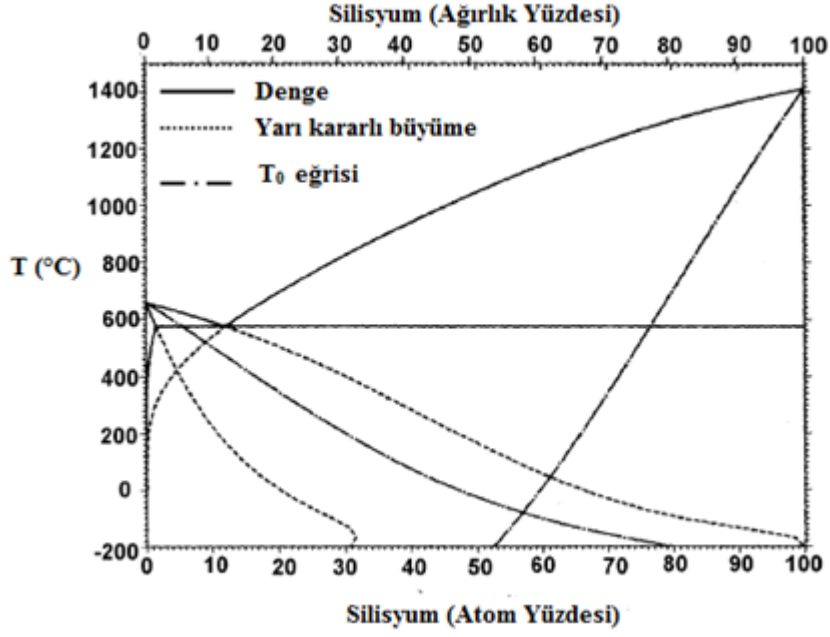
Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması bölümünde de anlatıldığı üzere alüminyum alaşımları ana alaşım elementlerinin çeşidine göre gruplandırılmaktadır [46].

Al-Si alaşımlarında en önemli ve temel alaşım elementi silisyumdur. Birinci görevi iyi dökülebilirliği sağlamaktır. Bu sayede kalıplar kolayca dolmakta ve elde edilen ürünlerde sıcak yırtılma veya sıcak çatlama gibi döküm hataları gerçekleşmeden katılaşma tamamlanmaktadır. Ayrıca silisyumun oluşturduğu faz sayesinde alaşımın aşınma direnci artmaktadır [47]. İçerdiği silisyum konsantrasyonuna bağlı olarak Al-Si döküm alaşımları üç ana kategoriye ayrılmaktadır; [46]

I) Ötektikaltı Al-Si alaşımları (<12 ağırlıkça % Si)

II) Ötektik Al-Si alaşımları (12-13 ağırlıkça % Si)

III) Ötektiküstü Al-Si alaşımları (14-25 ağırlıkça % Si)

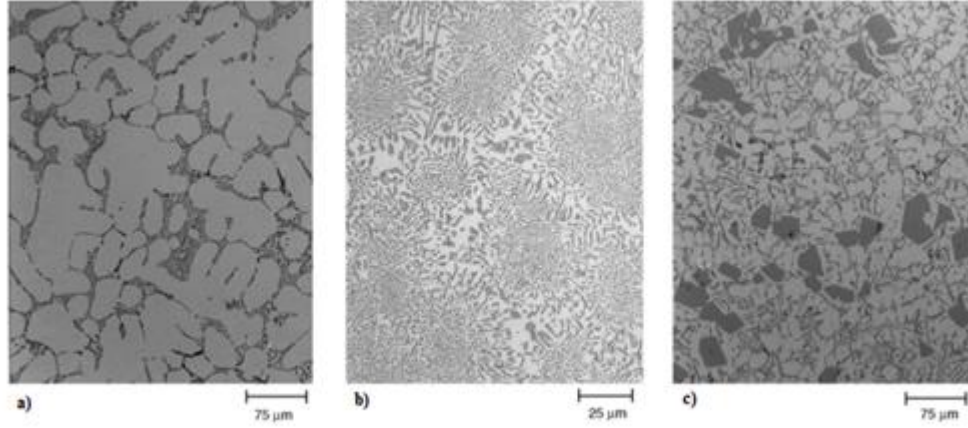


Şekil 2. 2 Sıvı ve katı çizgilerin metastabil uzantılarını gösteren Al-Si sistemi için faz diyagramı [48]

Sistem silisyumun ve alüminyumun birbiri içinde sınırlı çözünürlüğü ile ilgili basit ikili ötektik sistemidir. Şekil 2.2 günümüzde kullanılan Al-Si faz diyagramını göstermektedir. Şekil 2.2’de gösterilen faz diyagramında gerçekleşen tepkime aşağıdaki (2.1) eşitliğinde verilmektedir.



Eşitlikte S harfi sıvı ergiyiği, α sembolü birincil alüminyumu, β birincil siliyumu ifade etmektedir. Ötektik reaksiyon 577 °C’de %12,6 Silisyum içeriğinde gerçekleştiği günümüz kabullerindendir [48].



Şekil 2. 3 Yaygın alüminyum-silisyum döküm alaşımları mikroyapıları. a) Ötektikaltı alaşım mikroyapısı (1,65-12,6 ağırlıkça % Si) ,b) Ötektik alaşım mikroyapısı (12,6 ağırlıkça % Si) , c)Ötetiküstü alaşım mikroyapısı (>12,6 ağırlıkça % Si [49]

Alüminyum silisyum döküm alaşımlarının başlıca mikroyapısı birincil alüminyum fazı (α -Al) ve Al-Si'nin ötektik karışımından oluşmaktadır. Şekil 2.3'de silisyum içeriğine bağlı olarak değişen mikroyapılar verilmektedir. Ötektikaltı alüminyum-silisyum alaşımlarının mikroyapılarına bakıldığında birincil alüminyum taneleri ve Al-Si ötektik fazı bulunduğu görülmüştür. Ötetik alüminyum silisyum alaşımının mikroyapısı incelendiğinde ise mikroyapı ötektik fazından oluşmaktadır. Ötetiküstü alüminyum silisyum alaşımlarının mikroyapısına bakıldığında birincil silisyum ve ötektik fazların bulunduğu gözlemlenmektedir[32].

Alüminyum silisyum alaşımlarının yapısında iki önemli element bulunmaktadır. Bu elementler Mg ve Cu'dur. Bu elementler ile ısıtılma işlemi yapılamayan alaşıma ısıtılma işlemi yapılabilmektedir. Ayrıca Mg ve Cu elementleri hem oda sıcaklığında hem de 190 ° C 'den daha yüksek sıcaklıklarda mukavemet kazandırmaktadır. Bu elementler mukavemet artışını oluşturdıkları θ (Al₂Cu), β (Mg₂Si), S(Al₂CuMg) fazlarıyla sağlamaktadırlar [50].

Alüminyum-silisyum alaşımları üretimi yapılan alüminyum döküm parçalarının %85-90 civarını oluşturmaktadır. En yaygın kullanılan alaşımlar Tablo 2.3'te özetlenmektedir.

Tablo 2.3 Yaygın kullanılan alaşımların kompozisyonları [51]

Alaşım	Üretim Methodu	Element (%)					
		Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Diğer
350 Serisi	KD KKD	5-7	<0.2- 1.25	0.35- 0.55	<0.06- <0.02	<0.1- <0.35	-
380 Serisi	BD	8.5-11	2.0- 3.5	<0.1- <0.3	<1.3	<3.0	<0.3 Sn
390 Serisi	BD	<7.5	4.5	0.55	<1.3	<0.1	<0.1 Mg
400 Serisi	KD, KKD, BD	5.25- 12	<0.1- <0.3	<0.05- <0.1	<0.8- <2.0	<0.5	-
*Kompozisyonda geriye kalan değerler alüminyum ve empürite elementlerdir. KD: Kum Döküm; KKD=Kalıcı kalıba döküm, BD=Basınçlı döküm							

2.7 A356 Alüminyum Alaşımı ve Genel Özellikleri

A356 alaşımı, ısıtıl işlem uygulanabilen döküm alaşımları kategorisinde en yaygın kullanılan alaşımlardan biridir. Katılma aralığı 615 °C – 555 °C'dır. İçerdiği demir miktarı düşüktür. A356 alaşımının mikroyapısı birincil alüminyum matrisinden ve alüminyum-silisyumun oluşturduğu ötektikten oluşmaktadır. A356 alüminyum alaşımı yüksek mukavemete ve tokluğa sahiptir. Sahip olduğu bu iki önemli özellik sebebiyle özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisi için ekipmanların üretiminde kullanılmaktadır. Bu alaşıma çözeltiye alma ısıtıl işleminden sonra doğal yaşlanma (T4) veya yapay yaşlandırma (T6) ısıtıl işlemleri yapılabilmektedir. Mg₂Si intermetalik fazının oluşumu ile mukavemetlenme sağlanmaktadır [52].

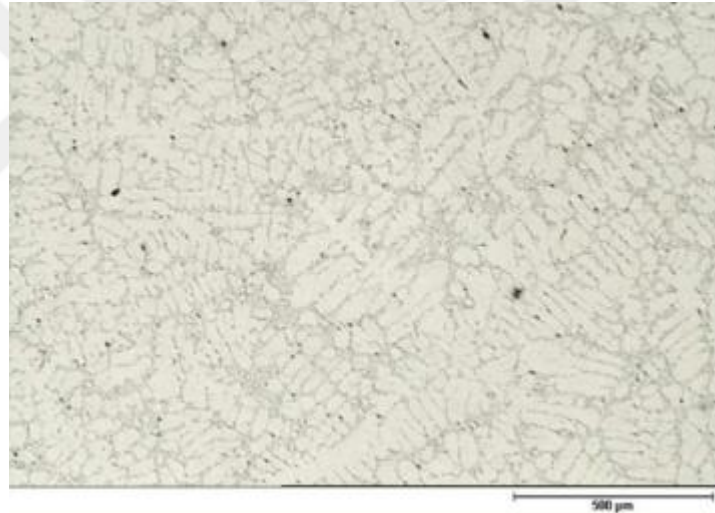
A356 alüminyum alaşımı ısıtıl işlem ile kazandığı iyi mekanik özellikler, mükemmel dökülebilirlik ve korozyon direnci sayesinde otomotiv, havacılık gibi endüstriyel alanlarda en yaygın kullanılan alaşımlardan biridir. Ayrıca üretim maliyeti

düşüktür, farklı döküm prosesleri ile karmaşık parçaların dökümünde kullanılmaktadır [53]. A356 alaşımının kimyasal kompozisyonu Tablo 2. 4 'te verilmektedir.

Tablo 2. 4 A356 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu [2]

Si	Mg	Fe	Ti	Zn	Sr	Cu	Mn	Cr	Ni	Al
6.5-7.5	0.25-0.45	0.20 max	0.20	0.10	<0.001	0.20	0.10	---	---	Bal

Şekil 2. 4 'te A356 alüminyum döküm alaşımının mikroyapısı gösterilmektedir. Yapı birincil α -Al dendritlerinden ve ötektik silisyum parçacıklarından oluşmaktadır. Görüntüde açık gri renkli olan bölgeler matris yapısı olan birincil alüminyum dendritlerini, koyu renkli olan bölgeler silisyum parçacıklarını belirtmektedir. Fakat bazı mikroyapılar Mg_2Si , $\beta-Al_5FeSi$ and $\pi-Al_8Mg_3FeSi_6$ çeşitli intermetalik fazları da içermektedir.



Şekil 2. 4 A356 alüminyum alaşımının optik mikroskop görüntüleri [53]

Döküm yöntemleri kalıp tiplerine göre sınıflandırıldığında; bu sınıflandırma harcanabilen kalıp ve kalıcı kalıp şeklinde iki ana kategori şeklinde yapılmaktadır. Harcanabilen kalıplar; kendi arasında harcanabilen model ve kalıcı model şeklinde alt gruplara ayrılmaktadır [54].

3.1 Harcanabilen Kalıplar

3.1.1. Kalıcı Modeller

A. Kil ve Su Bağlı Yaş Kum Kalıplama

Yaş kum kalıplamada silis, olivin, kromit, zirkon kumu gibi çeşitli kumlar kullanılmaktadır.

B. Isıyla Sertleşen Bağlayıcılar

Kabuk prosesi /kabuk döküm süreci, furan sıcak kutu yöntemi, fenolik sıcak kutu, sıcak kutu, fırınlanan bağlayıcılı kalıplar ısıyla sertleşen bağlayıcıları içeren kalıplama yöntemine örnek olarak verilmektedir.

C. Soğuk Kutu Yöntemiyle Sertleşen Bağlayıcılar

Fenolik üretan bağlayıcılı yöntem, furan/SO₂ yöntemi, akrilik/epoksi bağlayıcılı yöntem, fenolik esterler soğuk kutu yöntemiyle sertleşen bağlayıcıları içeren kalıplama yöntemine örnek olarak verilmektedir.

D. Soğuk Kalıplar (Isı Harici Sertleşenler)

Asit katalizörü kullanan furan yöntemleri, asit katalizörü kullanan fenolik yöntemler, üretan yöntemleri (yağ, fenolik, poliol) soğuk kalıplamaya örnek olarak verilmektedir.

E. Silikat ve Fosfat Bağlayıcılar

Karbondiyoksit ile sertleşen sodyum silikat, shaw kalıplama prosesi, unicast seramik kalıp prosesi, alümina fosfat bağlayıcılı yöntemler bu yönetime örnek olarak verilmektedir.

F. Alçı Bağlayıcı Yöntemler

Gibsum (CaSO_4) bağlayıcı yöntem alçı bağlayıcılar ile kalıplama yöntemine örnek olarak verilmektedir.

G. Bağlayıcı İçermeyen Yöntem

Manyetik ve vakum kalıpları bağlayıcı içermeden kalıcı model yapma yöntemlerindendir.

3.1.2 Harcanabilir Modeller

A. Köpük Modeller

Kaybolan köpük döküm yöntemi ve replicast döküm yöntemi bu kategoriye girmektedir.

B. Mum Modeller (Hassas Döküm)

Etil silikat bağlayıcı blok kalıplar, etil silikat bağlı seramik kabuk kalıplar, koloidal silikat bağlı yöntemler, alçı bağlayıcılı yöntemler, yer çekimine karşı alçak basınçlı döküm yöntemleri bu kategoriye girmektedir.

3.2 Kalıcı Kalıplar

A. Metal Kalıplar

Yüksek basınçlı döküm, alçak basınçlı döküm, kalıcı kalıba döküm bu kategoriye girmektedir.

B. Santrifüj Döküm

Dikey santrifüj döküm, yatay santrifüj döküm bu kategoriye girmektedir.

C. Sürekli Döküm

D. Hibrit/Çoklu Dökümler

Sıkıştırma döküm, yarı-katı döküm yöntemi (reodöküm), osprey döküm bu kategoriye girmektedir.

Kaybolan köpük döküm yöntemi harcanabilen kalıplar kategorisindeki harcanabilen modeller sınıfında yer alan döküm yöntemidir.

3.3 Kaybolan Köpük Döküm Yöntemi

Kaybolan kayıp döküm yöntemi (lost foam casting), genleşmiş polimer bazlı köpük modeli kullanmaktadır. Bu yöntemde köpük model ince bir seramik tabaka (refrakter) ile kaplanmaktadır. Bağlayıcısız kum refrakter kaplanmış model etrafına titreşim uygulanarak kalıplanır. Polimerik model ergiyik metal döküm gerçekleştikten sonra yer değiştirmesi ile istenilen şekil elde edilmiş olur. Bu döküm yöntemi ile alüminyum, magnezyum, dökme demir (gri ve sfero) malzemeler üretmek için kullanılmaktadır. Fakat çelik ve bakır içerikli farklı malzemelerin ticari olarak da dökümü yapılmaktadır. Uygulama olarak en bilinen örnekleri alüminyumdan silindir blokları ve kafaları ; sfero dökme demirden krank milleri, gri dökme demirden ateşleme bujileridir [55].

3.3.1 Yöntemin Tarihçesi

Kaybolan köpük döküm yöntemi bir önceki bölümde de belirtildiği gibi harcanabilen modeller kategorisine girmektedir. Bu yöntem ergiyik metalin köpük modelle temas etmesi ile modelin buharlaşması temeline dayanmaktadır. Kaybolan döküm yöntemi ile ilgili ilk çalışmalar Shroyer tarafından yapılmıştır. Shroyer çalışmasında polistiren plakaların işlenmesi ile model oluşturmuştur. Oluşturduğu modelin etrafını ise bağlayıcı içeren kum ile doldurarak döküm işlemini gerçekleştirmiştir. 1958 yılında US2830343A numaralı, 'Cavityless casting mold and method of making same' isimli patenti almıştır [56]. Daha sonra 1964 yılında M. Flemings bağlayıcısız kumda döküm işlemi gerçekleştirmiştir. Thomas R. Smith 1964 yılında aynı döküm stilini kullanarak US3157924A numaralı 'Method of Casting' patentini almıştır [57]. Kaybolan köpük yöntemi ile maliyet azaltılmak ve istenilen parçaların düşük ağırlıklar ile dökülebilmek istenmesi sebebiyle otomatik

endüstrisine ürün üreten dökümhanelerin kullandığı yöntemlerden biri haline gelmiştir. Bu yöntem farklı isimlerle de tanınmaktadır. Kaybolan köpük döküm yöntemi; buharlaşabilen model dökümü, boşluksuz döküm, dolu kalıba döküm, Styrocast™, Foamcast™, Styropur™, ve Policast™ şeklinde literatürde isimlendirilebilmektedir. Fakat 1990 yılında AFS yöntemi 'Expandable Pattern Casting-Harcanan Model Dökümü' olarak isimlendirilmesine kararını almıştır [58].

3.3.2 Kaybolan Köpük Döküm Yönteminin Proses Basamakları

Kaybolan köpük döküm yöntemi ile üretim yapabilmek için birden fazla adıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu adımlar Tablo 3. 1'de işlem sırasına göre listelenmiştir.

Tablo 3. 1 Kaybolan köpük döküm yöntemi proses basamakları

1. Model Yapımı
2. Model Muayene
3. Model Salkımı Biraraya Getirme
4. Salkımın Kaplanması
5. Kaplamanın Kurutulması
6. Kum içerisinde sıkıştırma
7. Metal Dökümü
8. Kalıp Bozumu
9. Temizleme ve Bitiş

3.3.3 Kaybolan Köpük Döküm Yönteminin Avantaj-Dezavantajları

Kaybolan köpük döküm yöntemi geleneksel döküm yöntemlerine göre birçok avantaja sahiptir.

1. Maça gereksinimini ortadan kaldırmaktadır. Bir polistiren bloktan işlenen köpük kalıpları, döküm parçasının arzu edilen şekilde işlenmesi ile şekillendirilmektedir. Ayrıca bu işleme yönteminin sağladığı avantaj ise birkaç parçanın monte edilmesi ve bu sayede karmaşık şekilli parçaların elde edilmesini sağlamaktadır [59]. İşleme ve kalıpta şişirme ile üretilen modeller sayesinde maça ve ayırma çizgileri olmamaktadır. Ayrıca geleneksel dökümde kullanılan klasik maçalar içsel geçiş noktalarında boyutsal farklılaşmalara ve et kalınlıklarında değişmelere sebep olmaktadır. Buna ek olarak geleneksel dökümde maça kumlarının dökümden sonra uzaklaştırılması için geçit delikleri bulunması gerekmektedir. Bazı dökümlerde ise sıvı metal maça çıkışındaki kalıp ve maça arasındaki açıklıktan dolarak döküm prosesinden sonra uzaklaştırılması gereken bir çapak oluşturabilmektedir. Böylece çapak, maça kalınlığı, maça izleri, maça uzaklaştırma problemleri gibi geleneksel dökümde gerçekleştirilen ek işlemlerle elimine edilmiş olur. Üretici için maça üretimi, kum karıştırma, kumun dondurulması, dökümden sonra maça kumunun uzaklaştırılması gibi hem zaman hem maliyet gerektiren işlemler ortadan kaldırılmaktadır. Nihai ürünün elde edilmesi için temizleme esnasında maça işlerinin en aza indirilmesi ile temizleme maliyetleri de azalmaktadır [60].
2. Kaybolan köpük döküm yöntemi düşük sermaye maliyetine sahiptir. Benzer kapasiteli yaş kum kalıplama tesisinin maliyetinin %50'si kadardır [61].
3. Çevresel ve ekonomik açıdan kaybolan köpük döküm yöntemi incelendiğinde; bir diğer avantaj döküm kumunun tekrar kullanılabilir olmasıdır. Çünkü geleneksel yaş kum kalıplamada kalıp kumunun özelliklerinin korunması için çeşitli kimyasal işlemler uygulanmaktadır. Kum döküm sonunda elden çıkarıldığında ise çevre üzerinde olumsuz etkiye neden olmaktadır [59].
4. Köpük model döküm öncesinde kalıptan uzaklaştırılmaz, bu sayede tasarım mühendisine döküm işlemi için ilave esneklik sağlamaktadır [60]. Genleşebilen model, kalıpta bir bağlantı hattı ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Bu hem tasarım mühendisi için hem de dökümhaneci için esneklik sağlamaktadır [62].

5. Yakın boyut toleransı ve iyi yüzey kalitesi sağlaması sebebiyle ikincil işleme ihtiyaçlarını azaltmaktadır [63].
6. Düşük takım maliyeti sağlamaktadır. Takım ömürleri pahalı olsa bile ömürleri uzundur. Bu sebeple uzun ömürlü ve yüksek hacimli parçalar için takım maliyetleri, daha kısa ömürlü ve çok sayıda takım seti gerektiren kokil kalıba döküm ve düşük basınçlı dökümlere göre daha düşüktür [61].
7. Taşlama ve son işlem işçiliği azdır. Çoğu dökümde döküm deliği çıkarılması sebebiyle, bunun olmaması avantaj sağlamaktadır [61].
8. Birçok uygulamada işleme büyük ölçüde azaltılmakta ve bazı durumlarda tamamen ortadan kalkmaktadır [61].

Bu avantajların yanısıra yöntem çeşitli dezavantajlara da sahiptir.

1. Sürecin tamamen otomatikleştirilmesi zordur. Model demetinin biraraya getirilmesi ve kaplama, bir döküm tesisinin bir döküm tipine tahsis edilmediği sürece, özel mekanik kullanım geliştirilebilecek şekilde el emeği içermektedir [61].
2. İyi bir döküm elde edilmeden önce çok sayıda deneme döküm yapılmalıdır [61].
3. Döküm ölçüsüne ancak bir takım modifikasyon sonra ulaşılabilir, çünkü köpük modelin çekmesi henüz tam olarak doğru bir şekilde tahmin edilememektedir [61].
4. Önceki iki maddede belirtilen sebeplerden ötürü döküm ürünlerinin teslimi uzundur.
5. İşlemin iyi bir yüzey kalitesi sağladığı doğrudur fakat bu modelin yüzeyine bağlıdır. Model yoğunluğu, bu modelle üretilen dökümün kalitesi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Modelin yoğunluk değeri, tanelerin buhar ile kalıplanması ve sıkıştırılmasına bağlı olarak değişmektedir. Eğer dikkatli kullanılmazsa köpükler bozulabilir ve kalıcı hasara neden olmaktadır [59].

6. Tüm avantajların yanında bu yöntem ile yapılan döküm proseslerinde her dökümde yeni bir model ihtiyacı mevcuttur. Yöntemin ekonomikliğı ise büyük oranda ürün maliyetine bağılı olarak değışmektedir [60].
7. Proses süreç parametrelerine çok duyarlıdır. Model malzemesi olarak kullanılan polistiren köpük malzemesinin, bozunma kimyası döküm prosesindeki başarı için hayati önem taşımaktadır [59]. Bu sorunlar proses parametreleri kısmında açıklanacaktır.

3.3.4 Kaybolan Köpük Döküm Yöntemi Proses Parametreleri

Geleneksel yaş kum kalıplama ile karşılaştırılacak olursa kaybolan köpük döküm yöntemi nispeten yeni bir prosestir. Proses parametreleri çok iyi bir şekilde anlaşılamamıştır ve henüz proses parametreleri sayısallaştırılamamıştır. Bu sebeple hem küçük ölçekli hem de endüstriyel boyuttaki uygulamalarda çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. Süreci etkileyen proses parametreleri döküm yapısının kalitesini ve mekanik özellikleri belirleyen en büyük etmenlerdir [59], [64].

3.3.4.1 Model ve Model Özellikleri

Kaybolan köpük döküm yönteminde modeller genleşebilen polistiren köpük, polimetilmetakrilat ve polialkilen karbonattan yapılmaktadır. Belirtilen malzemeler hafiftir ve bu sebeple taşıma sırasında bozulmayı önlemek için üretimden sonra çok dikkat edilmelidir. Polistiren köpük model alüminyum ve alüminyum alaşımları için kullanılmaktadır. Demir dökümde döküm prosesinde çeşitli hataların oluşmasına neden olduğu için kullanılmamaktadır. Ayrıca modelin sahip olduğu yoğunluk değeri üretilen döküm parçasının kalitesini de etkilemektedir [59]. Yapılan çalışmalar; döküm prosesinde meydana gelen hataların sebebinin büyük bir yüzdesinin model yoğunluğunun tüm modelde eşit olmamasından kaynaklandığını belirtmiştir [64]. Kalıp özelliklerinde; model malzemesinin tanelerinin sıkıştırılması ve yoğunluk arasında önemli bir ilişki mevcuttur. Erimiş metalin kalıba dökümü sürecinde yoğunluk ergiyik metalin akışını etkilemektedir. Eğer model tanelerinin sıkıştırılması modelin bir tarafında farklı olursa ergiyik metal düzgün bir akış sergilemek yerine düşük yoğunluklu alanlara akma isteğı göstermektedir. Metal sıkıştırma oranı düşük orana sahip

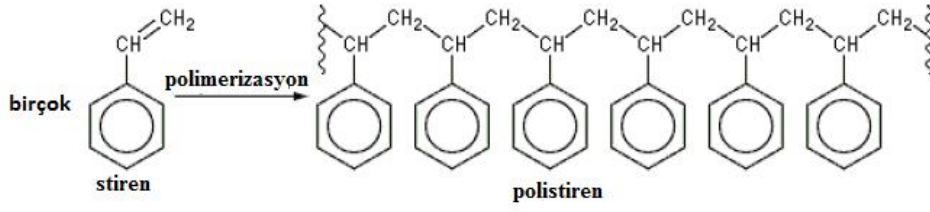
bölgelere aktığında kıvrımlara (katlama) ve köpük inklüzyonlarına neden olmaktadır [59].

3.3.4.2 Model Kaplaması

Model üzerine sadece refrakter madde veya refrakter madde-bağlayıcı karışımı olan kaplama yapılmaktadır. Bu kaplama kuruduktan sonra model üzerinde bir tabaka oluşturmaktadır. Oluşan bu tabaka döküm kalitesini etkileyen önemli parametrelerden biridir [59], [64]. Refrakter kaplama oluşan gaz ürünlerinin kalıptan çevreye kaçmasını sağlayacak geçirgenliğe sahip olmalıdır. Eğer yeterince geçirgenlik sağlanmazsa gaz kalıp içerisinde sıkışarak döküm içerisinde çeşitli hatalara neden olmaktadır. Döküm sırasında oluşan gaz ürünlerinin çevreye aktarımı zamanında yapılmalıdır. Yukarıda bahsedilenin aksine gaz salınımı çok hızlı yapılırsa basınç düşmesi yaşanmaktadır; kaplama tabakası kumun ağırlığını taşıyamaz ve bu olay kalıp çökmesi ile sonuçlanmaktadır. İdeal refrakter kaplaması, oluşan gaz ve sıvı bozunma ürünlerinin döküm sürecinde kalıptan zamanında ve dengeli bir şekilde çevreye salınmasını sağlayacak şekilde olmalıdır. Kaplama malzemesi, katı madde miktarı, viskozite, sıvı absorblama kapasitesi, kaplama kalınlığı, gaz geçirgenliği gibi model kaplaması ile ilgili parametreler döküm kalitesini etkilemektedir. Refrakter kaplamanın model üzerine uygulanması püskürtme, daldırma, serpmeye boyama yöntemleri ile yapılmaktadır. Püskürtme yöntemi kaplama için en ideal kalınlığı ve uniform dağılımı sağlamaktadır. Daldırma yönteminde uniform dağılım sağlanamamaktadır. Serpmeye boyama da kullanılan fırça model üzerinde izler bırakır ve üretilen döküm parçalarında bu izleri görmek mümkündür [59].

3.3.4.3 Köpük Modelin Yapısı ve Termal Bozunumu

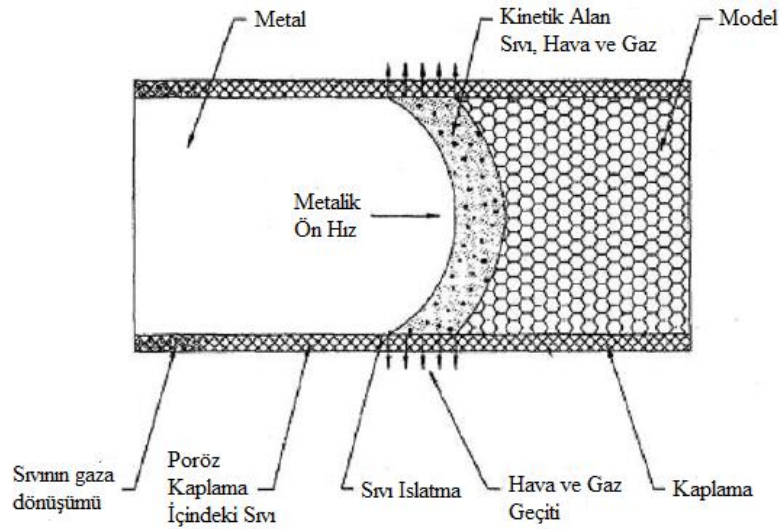
Köpük model malzemesi bölümünde bahsedildiği gibi en çok kullanılan model malzemesi genleşebilen polistiren köpüktür. Polistiren malzeme 1839 yılında Edward Simon tarafından Almanya’da bulunmuştur. Monomer halindeki stirenin polimerizasyonu sonucu üretilmiştir. Türevi ise petroldür. Polistiren, karbon atomuna bağlı benzen halkası ve hidrojen atomları ile oluşmuş kimyasal yapıya sahiptir. Kimyasal formülü $(C_8H_8)_n$ şeklindedir [59]. Polimerizasyon prosesi şematik olarak Şekil 3. 1’de gösterilmektedir.



Şekil 3. 1 Polistiren polimerazyon proesi [59]

Kaybolan köpük döküm sürecinde yüksek sıcaklıklarda polistirenin termal bozunumu yaşanmaktadır. Bu termal bozunum için fiziksel ve kinetik modellemeler çalışılmıştır. Fiziksel modellemede ergiyikten katı modele iletilen ısı enerjisinin sonucu ile reaksiyon bölgesinde piroliz ürünleri oluşmaktadır. Ayrıca fiziksel modeller; oluşan piroliz ürünlerinin bileşiminin, refrakter kaplama ve kumun içinden çevreye atılmadan önce arayüzde ne kadar süre kaldığının bir fonksiyonu olduğunu belirtmektedir.

Molibog [65] yaptığı çalışmada köpük-metal arayüzeyinde üç fazlı kinetik bölgenin olduğu önerisini sunmaktadır. Molibog'un sunduğu öneri Şekil 3. 2 'de gösterilmektedir.



Şekil 3. 2 Köpük bozunma prosesinin şematik olarak gösterimi [12]

Literatürde yapılan çalışmalar; sıcaklık arttıkça camsı geçiş sıcaklığına (T_g) ulaşıncaya kadar polimerin herhangi bir bozunmaya maruz kalmadan yapısını koruduğunu göstermektedir. Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) polimer moleküllerinin titreşime başladığı sıcaklıktır. Sıcaklık camsı geçiş sıcaklığının üzerine çıktığında molekül titreşimi artar ve viskozite azalır. Sıcaklık daha yüksek derecelere çıkarıldığında ise polimer zinciri depolimerizasyona uğrar. Depolimerizasyon ürünleri monomerler, dimerler ve oligomerler olabilir [64].

Genleşebilen polistiren köpük %92 karbon atomu, %8 hidrojen atomu içeren, doğrusal zincir yapısına sahip, molekül yoğunluğu 300,000 ila 500,000 arasında olan amorf bir polimerdir. Yoğunluğu genellikle 0,02-0,026 g/cm³ ve tane çapı ortalama 1,4 mm civarındadır. Termal bozunma sürecinde EPS 120 °C'de yumuşamakta, 160 °C'de erimektedir. 470 ila 500 °C arasında buharlaşmaktadır [66]. Farklı sıcaklıklarda parçalanmalar devam etmekte ve çeşitli ürünler oluşmaktadır. Yaklaşık 750°C'de parçalanma ürünü olan gazda stiren, tolüen (C₇H₈), benzen (C₆H₆), etilen (C₂H₄), asetilen (C₂H₂) ve metan (CH₄) bulunmaktadır. Tablo 3. 2'de genleşebilen polistiren (EPS) ve polimetil metakrilat (PMMA) köpük malzemelerinin özellikleri özetlenmiştir. Özellikle demir dökümünde EPS kullanımı parlak karbon hatalarının olduğu literatürdeki çalışmalarda gözlemlenmiştir. Alternatif olarak PMMA model malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalarda karbon hatalarını elimine etmek için polialkilen karbonat (PAC) ve EPS'nin çeşitli kopolimerleri de iyi sonuçlar vermiştir [59].

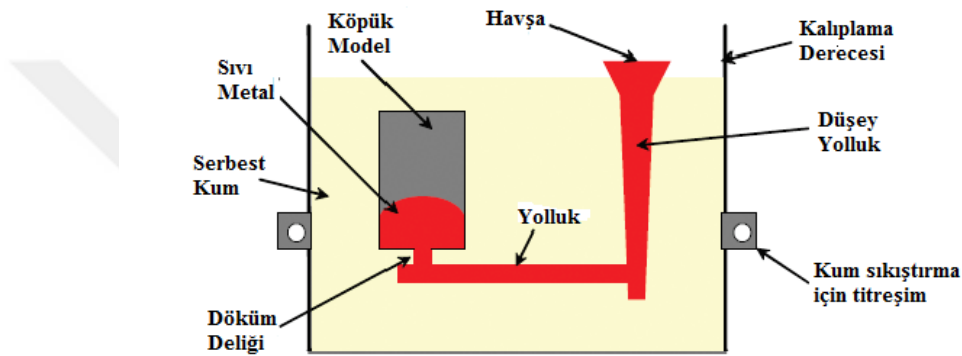
Tablo 3. 2 Genleşebilen polistiren ve polimetilmetakrilat malzemeleri karakteristik özellikleri [64]

Termal Özellikler	EPS	PMMA
Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	80-100	105
Çökme Sıcaklığı (°C)	110-120	140-200
Ergime Sıcaklığı (°C)	160	260
Buharlaşmaya başlama sıcaklığı (°C)	275-300	250-260
Buharlaşma pik sıcaklığı (°C)	400-420	370
Buharlaşma bitiş sıcaklığı (°C)	460-500	420-430
Bozulma Isısı (J/g)	912	842
750 °C'de buharlaşma hızı (Kg/s.m ²)	0.77	0.61
1300 °C'de buharlaşma hızı (Kg/s.m ²)	0.18	0.31
750 °C'de gaz verimi (STP/kg)	0.23	0.273
1300 °C'de gaz verimi (STP/kg)	0.76	0.804
750 °C'de % viskoz kalıntısı	61	32
1400 °C'de % viskoz kalıntısı	15	3

3.3.4.4 Kalıplama Pratiği

Kalıplama işleminin gerçekleştirilmesi için ilk olarak model üretimine ihtiyaç duyulmaktadır. Endüstriyel olarak kalıplar iki şekilde üretilmektedir. Birinci yöntem kalıpların kalıpta şişirme ile üretimi; ikinci yöntem ise kalıpların polistiren bloktan işlenerek üretimidir. Modeller bir yolluklama sistemi ile birleştirilerek refrakter kaplama ile kaplanmaktadır. Refrakter kaplamanın kuruması

gerekmektedir. Yolluk sistemi ile yapılan modeller kalıba yerleştirilir ve kum ile desteklenerek sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırma adımı çok önemlidir. Çünkü ergiyik metalin dökümü esnasında kumun çökmesini engelleyecek rijitliği sağlama için gerekmektedir. Geleneksel kum kalıplama ile kıyaslanacak olursa kaybolan köpük döküm yönteminde model ve yolluk sistemi döküm öncesinde kalıptan uzaklaştırılmaz. Ergiyik kalıba döküldüğü zaman model ve yolluk sistemi katılaşma esnasında buharlaşarak ortamı terk etmektedir [59]. Şematik kalıplama prosesi Şekil 3. 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. 3 Metal döküm ve kalıplamanın şematik olarak gösterimi [64]

Termal enerji ile köpük modeller bozunmaya uğrayarak arzu edilen şekilde ve boyutta ürünün elde edilmesini sağlamaktadır. Sıvı metal köpük model ile yer değiştirdiğinde; bozunma, sıvılaşma, buharlaşma ve depolimerizasyon gibi bir dizi reaksiyon gerçekleşmektedir. Oluşan bu bozunma ürünleri, refrakter kaplama tabakası ile modeli çevreleyen kuma aktarılmaktadır. Bozunma ürünleri dökümün kalitesini etkilemektedir ve elimine edilmezse döküm parçasında hatalara neden olmaktadır. Geleneksel döküm ile benzer olarak kaybolan köpük döküm yönteminde de döküm sonrasında kalıp soğutulur, kalıp bozma işlemi gerçekleştirilir, temizlendikten sonra kalite kontrolü yapılmaktadır [59].

3.3.4.5 Titreşim

Kaybolan köpük döküm yönteminde arzu edilen şeklin hatasız ve tam bir şekilde üretilmesi için kalıbın sıkıştırılmasında ve optimum yoğunluk elde edilmesinde

kalıba titreşim uygulamak önemli bir süreçtir. Titreşim ile kum iyice sıkılaştırılmalıdır. Titreşim etkisinin iç boşluklara aktarılması gerekmektedir. İyi bir ürün için de titreşim alttan da uygulanmalıdır. Titreşim frekansı, genliği, şiddeti, titreşim hareketinin yönü, titreşimin uygulandığı nokta, döküm kalitesini etkileyen faktörlerdendir [59].

Kalıplama esnasında kalıbın sıkıştırılması için uygulanan titreşimin yanısıra katılaşma esnasında da uygulanan titreşim önemli bir parametredir. Zhong ve arkadaşları [67] 356 alaşımının kaybolan köpük döküm yöntemi ile dökümünde katılaşma sırasında titreşim uygulamışlardır. Sonuçlar titreşimin tane inceltmede etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Pik ivmesi arttıkça taneler incelmış, birincil alüminyum tanelerinin sayısı artmış, ikincil dendrit kolları kırılmış, ortalama tane boyutu küçülerek mekanik özellikler önemli ölçüde artmıştır. Fakat çok yüksek pik ivmesi kalıba ve malzemenin iç yapısına zarar vererek mekanik özelliği düşürme etkisi yarattığı raporlanmıştır.

3.3.4.6 Ergiyik Metalin Kalıp İçerisindeki Karakteristik Davranışı

Kalıplama evresinde yolluk ve besleyici sistemi, sıvı metalin dökümü sırasında kalıp erozyonunu engelleyecek şekilde tasarlanmalı ve oluşturulmalıdır. Sıvı metal kalıba döküldüğünde oluşan türbülansı elimine eden bir yolluk sistemi olması gerekmektedir. Sıvı metal kalıba yerçekimi ile girmektedir. Kaybolan köpük döküm yönteminde sıvı metal ile köpük temas ettiğinde bozunma başlar ve oluşan gaz ürünleri hava deliklerinden dışarı atılır. Çeşitli kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar gerçekleşir. Oluşan gaz ilerlemek isteyen sıvı metale karşı bir arka basınç oluşturur. Böylece kinetik bir bölge oluşmaktadır. Yüksek sıcaklık ile birlikte köpük model ve metal yer değiştirir. Oluşan tüm bozunma ürünleri döküm parçasında potansiyel hata niteliğindedir. Dökülen sıvı metalin davranışını incelemek için birçok araştırmacı çalışmalar yapmıştır. Reaksiyon gerçekleşen bölgelere X ışını kaynağı yerleştirilerek fizikokimyasal reaksiyonlar incelenmek istenmiştir. Meydana gelen olaylar simüle edilmiş veya modellenmiştir fakat metalin davranışının nicel/nitel olarak temsil edilmesinde çeşitli zorluklar yaşanmaktadır [59].

3.3.4.7 Döküm Sıcaklığı

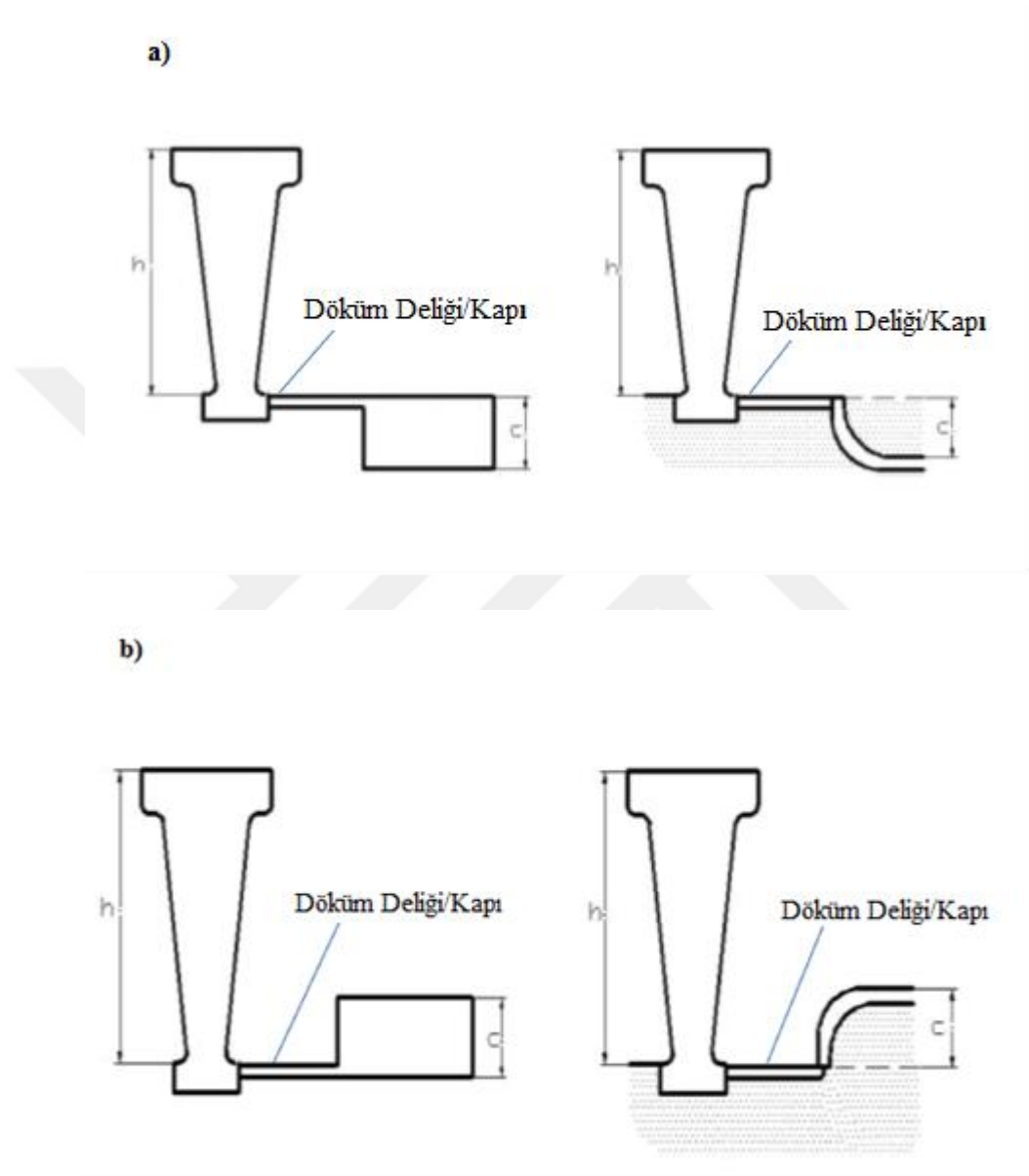
Döküm sıcaklığı dökülecek malzemeye göre değişmektedir. Deneysel çalışmalar döküm sıcaklığının malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmektedir. Döküm sıcaklığının etkisini gözlemlemek için hem görsel hem de mekanik incelemeler yapılmalıdır. Görsel incelemeler; döküm yüzeyinde oluşabilecek kusurlar, yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi şeklindedir. Mekanik inceleme ise; çekme ve akma mukavemeti, % uzama, sertlik şeklindedir. Bazen döküm sıcaklığının tane inceltme üzerindeki etkisi de araştırma konusu olmaktadır. Sıvı metal yüksek termal enerjiye sahiptir ve buharlaşabilen ürünlerin kalıp kumundan ayrışmasından sorunludur. Böylece kaybolan köpük yönteminde kullanılan buharlaşabilen modellerin ayrışması ve H₂'nin kalıp duvarlarından kaçması sağlanmış olur [59].

Pacyniak ve arkadaşları [19] AlSi11 silumin ve EN-GJL 200 dökme demiri üzerinde döküm sıcaklığının kalıp boşluğunun doldurma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada yapılan simülasyon çalışmaları, döküm sıcaklığının kalıp doldurma hızına ve gaz bölgesindeki basınca etkisinin incelenmesini sağlamaktadır. Sonuçlar döküm sıcaklığının azalması ile döküm hızının artışı ve gaz bölgesindeki basıncın düştüğünü göstermektedir. Fakat 150-200°C artan döküm sıcaklığı akış hızını artırmaktadır. Döküm oranındaki bu artış karmaşık ve ince cidarlı parçaların dökümlerinin başarılı gerçekleşmesini sağlamaktadır.

3.3.4.8 Yolluk Sistemi

Ergiyik metal önceden dökülecek parçanın ağırlığına uygun olarak tasarlanan yolluk sistemi vasıtasıyla kalıba dökülmektedir. Yolluk sistemini birçok parçadan oluşmaktadır. Döküm havuzu potadan veya kepçeden dökülen sıvı metali alan yolluk sisteminin tepesinde bulunan havzadır. Düşey yolluk ise bir diğer parçadır. Basıncı ve basınçsız yolluklama sistemleri kullanılır. Basıncı sistemler demir dökümler için; basınçsız sistemler ise alüminyum alaşımları gibi düşük yoğunluğa sahip malzemeler içindir. Yolluklar ve döküm deliği sıvı metali kalıp boşluğuna veya kaybolan köpük döküm prosesinde modele iletmektedir. Besleyiciler yolluk sistemi için önemli bir parçadır. Katılama sırasında dökümü besleyerek çekinti boşlukların oluşumunu engellemektedir. Yolluk sistemi için birçok dizayn

geliştirilmiştir. Bunlar üst yolluk sistemi, alt yolluk sistemi, yan yolluk sistemi vb. Üretilcek parçanın şekline bağlı olarak yolluk sistemi seçilmelidir. Yolluk sistemi döküm öncesinde dizayn edilmeli, döküm için kalıp içerisine yerleştirilmelidir. Şekil 3. 4 'te üst ve alt yolluk sistemi gösterilmektedir [59]



Şekil 3. 4 Yolluklama sistemleri, a) Alt yolluklama sistemi, b) Üst yolluklama sistemi

3.3.4.9 Kalıp Ortamı

Kaybolan köpük dökümünde kalıplama amacıyla kullanılan kumun durumu döküm kalitesini etkileyen önemli bir parametredir. Kaybolan köpük döküm yönteminde kum bağlayıcı içermez, geleneksel kum kalıplamadan farklı olarak bağlayıcı

maddeleri ve su ile ilgili yaşanan problemler ortadan kaldırılmış olur. Sıvı metalin dökümü ve oluşan bozunma ürünleri model üzerindeki refrakter kaplamadan sonra kumun içine doğru iletilmektedir. Kumun geçirgenliği, ısı iletimi, inceliğine bağlı olarak oluşan gaz tekrar sıvılaşabilir veya sıvı metalden fazla miktarda ısı transfer edildiğinde ise kum boyunca gaz ilerlemeye devam eder. Kum tanelerinin kaba olması oluşan gaz ürünlerinin çevreye atılmasını kolaylaştırmaktadır. Kalıp dolum süresi kumun tane büyüklüğünden de etkilenmektedir. Çok ince taneli kum ile döküm yapıldığında kalıp dolum süresi genel değerinden 5 kat daha fazla artmaktadır. Çünkü oluşan piroliz ürünleri erimiş metalden kaçamamaktadır. Yaygın olarak kullanılan kum çeşidi silis kumudur. Bunlara ek olarak kumun sıkıştırılması ve kontrolü kaybolan köpük dökümünde kesinliği ve üretilebilirliği etkileyen parametrelerdendir. Kumun kalıp boşluğu boyunca akmasını sağlamak ve döküm esnasında hem sıvı metalin hemde oluşan gaz ürünlerinin oluşturduğu basınca karşı çıkabilmek için derece doldurma esnasında kuma titreşim uygulanmaktadır. Fakat bu durum kalıbın bozulmasına neden olmaktadır [64].

3.3.5 Kaybolan Köpük Döküm Yönteminin Uygulamaları

Kaybolan köpük döküm yöntemi, öncelikle alüminyum, magnezyum, gri dökme demir ve sfero döküm parçaları üretmek için kullanılır. Fakat bazı çelik ve bakır bazlı alaşımlar dahil olmak üzere diğer metallerde ticari olarak dökülmektedir [55].

3.3.5.1 Alüminyum Döküm

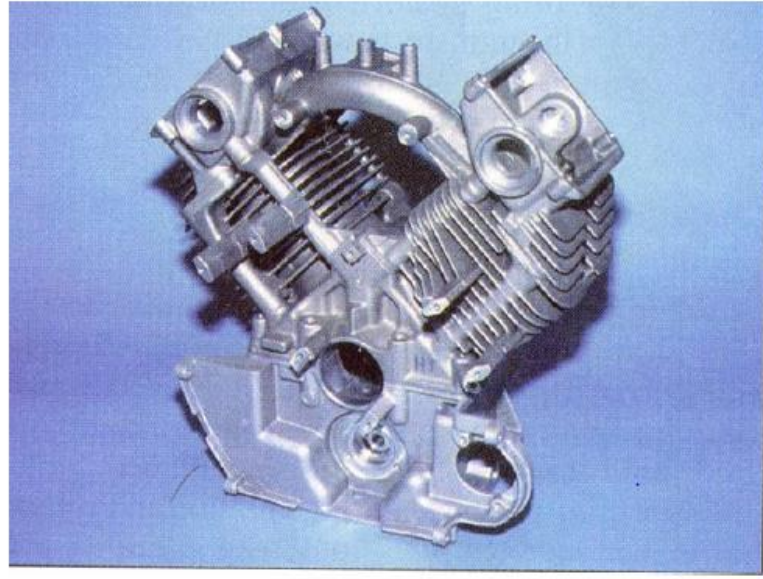
Kaybolan köpük döküm yöntemi için alüminyum otomotiv endüstrisi en büyük pazar payı olmuştur. İlk uygulamalar giriş manifoldlarında olmuştur. Çünkü bu parçalar yüksek kalıplama maliyetli ve kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilmekteydi.

Silindir kafaları ise en hızlı büyüyen otomotiv uygulamasıdır. Başlıklar geleneksel olarak kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilmektedir. Silindir bloklarında malzeme olarak ise otomotiv firmaları gri dökme demir malzemedan alüminyuma geçmektedir. Kaybolan köpük döküm yöntemi su pompası boşluğu, alternatör braket, yağ filtresi montaj yastığı gibi bölümlerin tasarımında avantaj

sağlamaktadır. Yağ besleme ve boşaltma hattı ve soğutma sıvısı hatları da kaybolan köpük döküm yöntemi ile daha etkili şekilde üretilmektedir.

Su pompa gövdeleri, braketler, ısı eşanjörleri, yakıt pompaları, fren silindirleri gibi çeşitli otomatik parçaları kaybolan köpük döküm yöntemi ile üretilmektedir [61].

Bu yöntemin en mükemmel örneği Şekil 3. 5’de gösterilen Kohler motorudur. Bu parçada tasarım aşamasından üretime kadar kaybolan köpük döküm yöntemi uygulanmıştır [68].



Şekil 3. 5 Kohler Motoru[68]

3.3.5.2 Gri Dökme Demir

Elektrik motorunun hareketsiz kısmı (stator mahfazaları) en başarılı uygulamalardandır. Kaybolan köpük döküm yöntemi kullanılmadan önce %40’a ulaşan ağırlık kayıpları yaşanmaktadır. Kaybolan köpük döküm yöntemi ile bu ağırlık kayıpları giderilmektedir. Deliklerin işleme prosesleri tam olarak ortadan kaldırılmasa da azaltılabilmektedir. Montaj için gerekli ayak cıvataları da kaybolan köpük döküm yöntemiyle dökülebilmektedir.

Gri dökme demir vana gövdelerinin, kapaklarının, girişlerin kaybolan köpük döküm yöntemi ile çok sayıda döküm gerçekleştirilmektedir. Cıvata deliklerin dökülmesi ile flanş yüzeyleri düz elde edilmektedir. Bu sebeple işleme prosesinde birçok avantaj sağlanmaktadır [61].

3.3.5.2 Küresel Dökme Demir

Boru bağlantı parçaları kaybolan köpük döküm yönteminin en başarılı uygulamalarındandır. Hassasiyeti çok fazladır. Flanşlar döküm cıvata delikleriyle düz olarak dökülebilmektedir. Bu sayede işleme prosesi tamamen elimine edilmektedir.

Dirsekler, T- profiller, musluk valfleri, en az 300 mm çapa kadar ulaşan büyük hacimli parçaların reçineli kumkalıp yöntemiyle dökümünün yerini almaktadır.

Küresel dökme demir vanalar kaybolan köpük döküm yöntemi ile üretilmektedir. Parçaların yeniden tasarlanması ile işleme elimine edilmiştir.

Diferansiyel dişli kutularında iç yüzeylerdeki düşük işleme ve iyi denge sebebiyle kaybolan köpük döküm yöntemi kullanılmaktadır.

Kaybolan köpük döküm yöntemi ile üretilen manifoldların duvar kalınlığının kontrolü sağlanmaktadır. Böylece ağırlık tasarrufu da sağlanmaktadır. Ayrıca net geçiş performansını da artırmaktadır.

Braketler kaybolan köpük döküm yöntemi ile üretilmektedir. Cıvata deliklerinde, bazı durumlarda işlemenin tam olarak ortadan kaldırılması için dökülebilmektedir [61].

3.3.5.3 Çelik

Köpük modelde karbon birikmesi sebebiyle, bu yöntem çelik döküm için çok uygun değildir. Karbon birikmesi uniform değildir. Fakat karbon bakımından zengin inklüzyonlar kaybolan köpük döküm yöntemi ile dökülen çelik ürünlerinde bulunmaktadır. Genleşebilen polistiren (expandable polistyren) pirolizi sonucu oluşan artıklar, bu kalıntıların çelikten uzaklaştırılmadığı dökümün üst yüzeylerinin altında, %0,7 C değerlerine kadar yüksek karbonlu bölgelerin oluşumuna neden olmaktadır. Bu tür hatalar çoğu çelik dökümünde kabul edilemez seviyelerdedir. Fakat EPS yerine PPMA ile yapılan köpük modelleri ile gerçekleştirilen dökümlerde bu sorun tamamen ortadan kalkmaktadır. Yaklaşık olarak %1,25 C içeren östenitik mangan çeliği gibi yüksek karbonlu çelikler, kaybolan köpük döküm yöntemi ile dökülebilmektedir. Kaybolan köpük döküm yöntemi tungsten karbür ve seramik gibi kesici uçlar içeren dubleks dökümlerin

yapılmasına katkı sağlamaktadır. Uçlar dökümden önce köpük kalıba yerleştirilmelidir [61].



Alüminyum alaşımlarının daha iyi mekanik performans göstermesine yönelik ihtiyacın artmasıyla, günümüzde alüminyum alaşımlarının sünekliğinden ödün vermeden yüksek mukavemet elde etmek için çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Saflaştırma ve tane inceltme alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda göze çarpan iki önemli konudur. Metal ergitme sırasında saflaştırma ne kadar önemli ise; katılaşma prosesi sırasında veya sonrasında tane inceltme işlemi de metalin mekanik özellikleri için çok önemlidir. Tane inceltme işlemi, metalik malzemelerde mukavemeti ve plastisiteyi aynı anda iyileştirdiği tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Tane inceltme işlemi ile oda sıcaklığında mukavemet artışı yaşanmaktadır. Bu artış teorik olarak Hall-Petch eşitliği ile açıklanabilir. Hall-Petch eşitliği literatür özeti kısmında açıklanmıştır.

Hall-Petch mukavemetlenmesi, tane inceltme yolu ile malzemelerin mukavemetlenmesi için etkin bir yöntemdir. Bu arada malzemenin süneklik özelliği de artan tane sayısı ile artmaktadır. Tane inceltme, çökelti sertleşmesi ve deformasyon sertleşmesi ile kıyasalanacak olursa; mukavemet, tokluk ve sünekliği aynı anda artırabilmekte ve segregasyon, gözenek gibi döküm kusurlarını da azaltabilmektedir. Buna ek olarak, kolonsal tane yapısı ortadan kaldırarak şekillendirilebilirliği artırmaktadır. Tane inceltme, ikincil fazların homojen dağılımını, ince ölçekte mikroporozite, çekintiyi ortadan kaldırmak için iyi bir besleme, daha iyi mukavemet ve yorulma ömrü sağlamaktadır. Bu sebeple hem döküm hem de dövme alaşımlar için yüksek mekanik performansa sahip ürünler tane inceltme işlemi yapılan ürünlerdir [22].

Alüminyum-Silisyum alaşımlarında mekanik özellikleri, silisyum parçacıklarının morfolojisi (boyut, şekil ve dağılımı), birincil alüminyumların tane boyutu, şekli ve dendrit parametreleri ile ilgilidir [69].

Tane inceltme işlemi katılaşma prosesi sırasında veya sonrasında uygulanabilmektedir. Tane inceltme yöntemleri dört ana gruba ayrılabilir.

Yöntemler sırasıyla, tane inceltici ilaveler katılması, hızlı katılaşma, katılaşma sırasında titreşim ve karıştırma uygulanarak tane inceltme ve şiddetli plastik deformasyon şeklindedir [22].

4.1 Tane İncelticiler Kullanarak Tane İnceltme

Döküm hatalarını azalttığı ve döküm özelliklerini arttırdığı için alüminyum alaşımlarının döküm prosesinde tane inceltme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Tane büyüklüğü ilk olarak çekirdeklenmeye ve sonrasında birincil alüminyum büyümesinden oluşan katılaşma prosesine bağlıdır. Çekirdeklenme aşamasında ergiyik alüminyum alaşımına çeşitli tane incelticiler ilave edilerek büyük heterojen çekirdeklenme bölgeleri sağlanmaktadır. Ayrıca heterojen çekirdeklenme yapısal aşırı soğumayı uyarabilen çeşitli çözelti elementleri ile hızlandırılabilir. Birincil alüminyum tanelerinin büyümesi sırasında, bu çözelti elementleri veya çözünmeyen diğer tanecikler, taneler arasında toplanarak tanenin büyümesini sınırlandırabilir. Hem yüksek çekirdeklenme oranı hem de tane büyümesinin kısıtlanması ile tane büyüklüğü artırılmış olur. Tane inceltici ilavesi ile tane inceltme işlemi için çeşitli teoriler ileri sürülmektedir. Bu teoriler; karbür-borür teorisi, peritektik teorisi, çift yönlü çekirdeklenme mekanizması teorisi ve çözünen teorisi şeklindedir [22].

Alüminyum alaşımlarında tane inceltme işlemleri ilk olarak titanyum ve bor elementlerini içeren tuz flaksların ergiye verilmesi ile başlamıştır. Yapıda bulunan aktif içeriklerin ve alüminyumun rolü titanyum ve bor elementlerini ortaya çıkarmaktır. Fakat K_2TiF_6 ve KBF_4 tane incelticiler verimli olmalarına rağmen çeşitli sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Titanyum ve bor elementi içeren bu tuz flaksları ergiye verilmesi hidrojen içeriğini arttırmakta, çeşitli korozyon gazların üretilmesine ve titanyum, bor elementlerinin özelliklerini göstermemesine sebep olmaktadır [70]. Uygun tane inceltici kullanıldığı takdirde alüminyum alaşımlarının taneleri ince taneli ve eşeksenli bir şekilde katılaştırılabilir. Yaygın olarak kullanılan tane incelticiler Al-Ti ve Al-Ti-B master alaşımlarıdır. Al-Ti master alaşımlarında titanyum oranı %3 ila %11 arasında değişmektedir. Al-Ti-B master alaşımlarındaki oran ise %2,5 ila %11 arasında titanyum, %0,1 ila %2,5 arasında bor içermesi şeklindedir. Ayrıca Al-Ti-B master

alaşımlarında titanyumun bora oranı 1 ila 50 arasında olmaktadır [71]. Tablo 4. 1'de endüstriyel uygulamalarda kullanılan tane incelticiler listelenmiştir.

Tablo 4. 1 Endüstride Kullanılan Tane İncelticiler [70]

Kimyasal Bileşim	% Titanyum	% Bor
AlTiB 5 / 1	Al % 1 Titanyum	%1 Bor
AlTiB 5 / 0,6	Al % 5 Titanyum	%0,6 Bor
AlTiB 5 / 0,2	Al %5 Titanyum	%0,2 Bor
AlTiB 3 / 1	Al %3 Titanyum	%1 Bor
AlTi 6	Al %6 Titanyum	
AlTi 10	Al %10 Titanyum	

4.2 Isıl Yöntemle Tane İnceltme

Çekirdeklenme işi soğuma hızı arttıkça azalır ve çekirdeklenme oranı, çekirdeklenme işi azaldıkça artışı genel olarak bilinen bir durumdur. Bu nedenle, çekirdeklenme oranı soğuma hızı arttıkça artmaktadır. Bu durum hızlı katılaşma işlemi ile tane inceltme yönteminin temel teorisidir. Özellikle diğerlerinden kolayca segregasyon olan ve kabalaşan alaşımları hazırlamak için hızlı katılaşma kullanılmaktadır. Dwuez 1960 yıllarında yaptığı araştırmalarda; eğer sıvı metal yeterli bir soğutma hızında soğutulursa denge halinde olmayan kristalin elde edilebileceğini keşfetmiştir. Bu tarihten günümüze farklı türlerde ince taneli metal malzemelerin üretilmesi için hızlı katılaştırma yöntemi uygulanmaktadır. 1990 yıllarında ise hızlı katılaştırma yöntemi amorf alaşımı üretmek için kullanılmıştır ve popüler araştırma konusu haline gelmiştir. Soğuma hızı ile ilgili olarak; büyük ölçekli dökümler için soğuma hızı 0.1 K/s'den düşüktür. Metal kalıba dökümlerde ise soğuma hızı 1-1000 K/s aralığındadır. Eğer soğuma hızı 103 K/s'ye ulaşırsa bu durum hızlı katılaşma olarak tanımlanmaktadır. Hızlı katılaşmanın soğuma hızı özel cihazların da kullanımı ile 106 K/s'den daha yüksek değerlere çıkabilmektedir.

Eğer yüksek soğutma hızı elde etmek isteniyorsa, üretilen malzemenin en az bir boyutu yeterince küçük olması gerekmektedir [22]. Farklı katılaşma yöntemlerinin soğutma oranları Tablo 4. 2 'de belirtilmektedir.

Tablo 4. 2 Farklı katılaşma yöntemlerinin soğuma oranları [22]

Hızlı Katılaşma Yöntemi	Soğuma Hızı (K/s)
Su Verme	102-103
Bakır Kalıba Döküm	102-103
İkiz merdaneli döküm	102-103
Yüksek basınçlı döküm	102-103
Sıvı dövme tekniği	300-400
Gaz atomizasyon	102-104
Eriyik Savurma	103
Sprey Bırakım	103-105
Soğutma Plaka	102-103
Titreşimli Soğutma Plaka	10-360

Tablo 4. 2'de belirtilen birçok yöntem son yıllarda metalik cam üretmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Eriyik savurma yönteminde soğuma hızı döner bir merdane ile 103 K/s'nin üzerine çıkabilmektedir. Gaz atomizasyon yönteminde ise, sıvı metal yüksek hızlı gaz akışı ile küçük damlacıklara disperse olur. Bu yöntemde soğuma hızı 102-104 K/s civarına ulaşabilmektedir. Bakır kalıba döküm yönteminde ise; bakırın sahip olduğu yüksek ısı iletkenliği ile küçük metal parçacıklarının hızlı bir şekilde katılaşması sağlanmaktadır. Sıvı dövme yönteminde ise ıstampa alaşım eriyiğine penetre ederek, eriyiğin hızlı katılaşmasını sağlamaktadır. Su verme yönteminde ise eriyik metal soğuk suda

hızlı bir şekilde soğutulmaktadır. Bu yöntemde soğuma hızı 102-103 K/s aralığındadır. Yüksek basınçlı dökümde ise, ergiyik yüksek basınç altında kısa sürede kalıbın içine tamamen akar ve bu sayede yüksek soğuma hızı elde edilir. Metal endüstrisinde en çok kullanılan yöntemler ise ikiz merdaneli döküm ve püskürtme biriktirme yöntemidir. İkiz merdaneli döküm alüminyum uygulamalarında başarılıdır fakat verimi düşük bir yöntemdir. Püskürtme biriktirme yönteminde ise tane büyüklüğü nano ölçekli elde edilebilir. Aynı zamanda bu yöntem ile segregasyon olmadan iğne şeklindeki sert fazlar inceltilir veya küreselleştirilebilir. Fakat bu yöntem ile elde edilen malzemeler gözeneklidir [22].

Katılaşma esnasında yüksek soğuma hızı sebebiyle sıvı metal likidüs sıcaklığının altında aşırı soğumaktadır. Böylece kalıp duvarında aşırı soğuma artmaktadır. Artan soğuma hızı ile beraber çekirdeklenme hızı da artmaktadır. Bunun sonucu olarak tane çekirdeklenme merkez sayısı çok ve diğer tanelerle temas sağlanmadan önce tanelerin büyüyebileceği mesafe kısa olmaktadır. Oluşan tanelerin kalıp duvarından döküm merkezine doğru büyümeleri; ergime gizli ısının sistemden uzaklaştırılması, katı-sıvı ara yüzeyinin önündeki bileşim gradyanı gibi etmenlere bağlıdır. Ergime gizli ısı sistemden ne kadar hızlı uzaklaşırsa katı-sıvı arayüzeyi önündeki bileşim gradyanı o kadar artar. Bu sayede yavaş soğuma sırasında oluşan kısa kolonsal taneler yerine eşeksenli kristallerin oluşumunu destekleyen kritik aşırı soğuma hızına ulaşılmış olur. Hızlı soğuma sonucu döküm merkezinde bulunan eşeksenli taneler tane ince yapıya sahiptir. Ayrıca yapısal aşırı soğuma hızı katılaşma hızı/sıcaklık gradyanı oranını da etkilemektedir [70].

4.3 Dinamik Yöntemle Tane İnceltme

Büyüyen dendritlerin dinamik olarak parçalanmasını sağlamak ve böylece eşeksenli büyüymeyi teşvik edecek çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin hepsi fiziksel bozunmayı içermektedir, tek farkları oluşturulan bu bozunmanın üretim şeklinin farklı olmasıdır [72].

Dinamik tane inceltme yöntemleri; titreşim, manyetik ve elektromanyetik karıştırma, çalkantı, gaz üfleme ile karıştırma, döndürme, doğal konveksiyonu arttırma şeklinde sıralanabilmektedir [70].

Bu yöntemlerin her birinde temel mekanizma ergiyik içerisinde fiziksel karıştırma etkisi doğurarak oluşan dendritlerin koparılması ve kopan dendrit parçalarının sıvının aşırı ısıyla tekrar ergimeden yeni tanelerin oluşması için çekirdek merkezi şeklinde görev olarak eşeksenli tanelerin oluşmasını sağlamaktır [70]

4.3.1 Titreşim ve Karıştırma ile Tane İnceltme

Alüminyumun tane inceltmesinde katılaşma esnasında karıştırma ve titreşim uygulamak yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Mekanik, elektromanyetik ve kabarcık karıştırma çeşitli karıştırma yöntemlerindendir. Literatürde yapılan çalışmalar bu yöntem ile birincil çekirdeklenme sayısının arttığını ve ince taneli mikroyapı elde edildiğini göstermektedir. Titreşim ise mekanik ve ultrasonik titreşim yöntemlerinden oluşmaktadır. Karıştırma ve titreşim esnasında tane inceltme mekanizması aşağıda belirtilen çeşitli teorilerle açıklanmaya çalışılmaktadır [22].

(1) Dendrit kollarının kayma kırılma mekanizması Bu teori, Jackson ve Fleming tarafından desteklenmektedir. Viskoz sıvının karıştırılması sırasında oluşan kayma kuvveti dendrit kolları üzerinde kayma etkisi yaratmaktadır ve dendrit kollarının bu sebeple kırıldığı düşünülmektedir. Fakat karıştırılan bulamaçta Kristal içinde gözlenen belirgin bir kırılma hatası gözlemlenmemiştir. Bazı araştırmacılar ise karıştırmanın dendrit kırılmasını tetiklemediğini; dendrit kollarının elastik ve plastik eğilmesine neden olduğunu belirtmiştir [22].

(2) Dendrit kollarının plastik eğilmesi ile tane sınırlarına sıvı metal infiltrasyonu Bu teori çeşitli çalışmalarda gözlemlenmiştir. Karıştırılan bulamacın birincil tanesinde hem yüksek açılı hem de düşük açılı tane sınırları gözlemlenmiştir. Bu sebeple karıştırma prosesinde yeniden kristalleşme davranışı mevcuttur. Böylece, dendrit kollarının plastik eğilmesi ile etkilenen tane sınırlarında sıvı infiltrasyonu mekanizması önerilmiştir. Yüksek açılı tane sınırını yönelmesinin 20° den fazla olduğu durumlarda, tane sınırı enerjisinin katı-sıvı arayüzeyinin enerjisini iki kere geçebileceği inanılıyordu. Ancak bu durumda, dendrit kolları ana tanelerinden ayrılabilirdi. Fakat Pilling'in yaptığı hesaplar göstermiştir ki; yalnızca birincil fazın ve sıvı fazın nispi hareket hızı yeterince büyük olduğunda, dendrit kollarının eğilmesi mümkündür [22].

(3) Olgunlaşma ve karıştırma ile dendrit merkezinin yeniden ergimesinin teşvik edilmesi Flemings ve Martinez, çözünen segregasyonunun Ostwald olgunlaşma sürecinde dendrit merkezinde kolayca ortaya çıkabileceğini belirtmiştir. Ayrıca çözünenin bu bölgeye itilmesi kolay olduğu düşünülmektedir. Bu da çözünen bakımından zenginleşme nedeniyle denge erime noktasını azaltmaktadır. Dendrit merkezinden (kökünde) denge erime noktası aşağıda belirtilen (4.1) eşitliği sebebiyle azalmıştır. Bu sebeple dendrit kök yeniden ergiyebilir ve ana taneden ayrılabilir.

$$\Delta T_r = \frac{-r \cdot 2T_m V_s \sigma}{\Delta H_m} \quad (4.1)$$

Denklemden ΔT_r , katı faz eğriliğinden kaynaklanan erime noktasındaki değişikliği, σ sembolü katı-sıvı ara yüzey gerilimini, T_m ergime noktasını, V_s saf katının molar hacmini, ΔH_m füzyonun (ergimenin) molar entalpisini, r ise sıvı-katı faz ara yüzünün ortalama eğim açısını ifade etmektedir. Hellawell'in düşüncesine göre, karıştırma sıcaklık ve kompozisyonda güçlü dalgalanmalara neden olmaktadır. Dendritin merkezinden gerilmelerin yoğunlaşmaları olabilir ve bu da dendritin merkezinin erimesine neden olmaktadır [22].

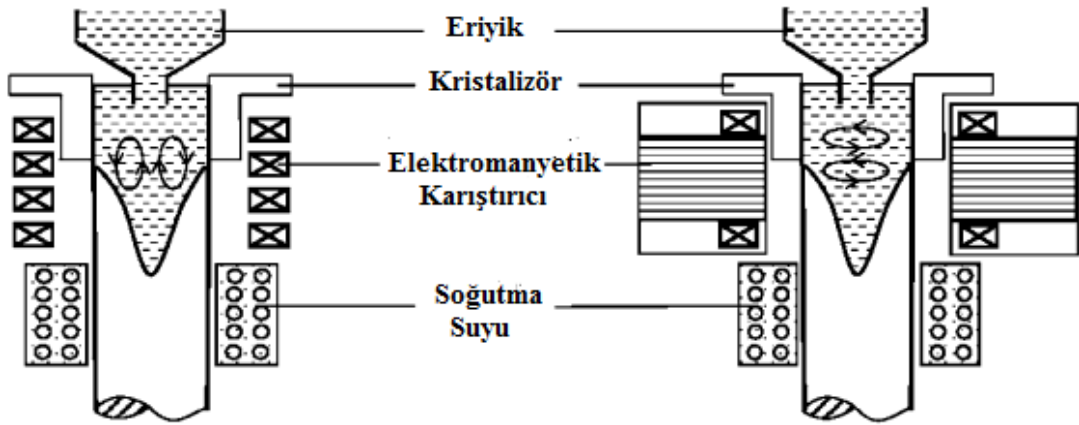
(4) Kristal Yağmuru Campbell ve Southin, katılaşma prosesinin erken evresinde, kalıp duvarının yüzeyinde büyük miktarda bir aşırı soğuma olduğunu öne sürmüştür. Katı fazın yoğunluğu sıvı fazın yoğunluğundan daha büyük olması sebebiyle, duvarda oluşan çekirdekler ergiyik içerisine düşerek kristal yağmur oluşturmaya sebep olmuştur. Bu çekirdeklerin bir kısmı konveksiyonun neden olduğu ısı akışı ile yeniden ergitilecek; kalan kısmı ise tanelerin büyümesi için merkez olacaktır [22].

(5) Ultrasonik Titreşim Ultrasonik titreşim ile ilgili olarak; tane inceltme mekanizması iki olguya dayanmaktadır. Bunlardan birincisi kavitasyon ikincisi ise ultrasonik titreşimin oluşturduğu akustik akıştır. Kavitasyon süreci, ergiyik içerisindeki kabarcıkların oluşumu, genişlemesi ve çökmesi sürecidir. Kabarcıkların çökmesi, çok kısa sürede erime katmanlarının üzerinde yüksek basınçlar üretilmesine neden olur ve çekirdeklenme oranını, dendritlerin

parçalanmasını artırır. Çöken kabarcıkların basınçları çekirdeklenmedeki aktivasyon enerjisinde düşüşe neden olabilir. Bu basınçlar kümelenmiş parçacıkların yanında yüksek çekirdeklenme oranlarına yol açan dendrit kollarının parçalanmasına yetecek kadar yüksektir. Daha da fazlası kırılan kabarcıkların yanındaki ergiğin ergime noktasını da artırabileceği tahmin edilmiştir; böylece efektif aşırı soğuma derecesine erişilmiştir. Kırılan kabarcıkların etrafında kısmi aşırı soğuma meydana gelebilir ve bu nedenle çekirdeklenme oranında artış yaşanmaktadır [22].

4.3.1.1 Elektromanyetik Karıştırma (EMS)

Elektromanyetik alanın alüminyum alaşım ergiyiklerinde kullanılması tane boyutunu inceltebilmektedir. Elektromanyetik karıştırmanın şematik diyagramı Şekil 4. 1 'de gösterilmektedir. Soldaki resim düşey karıştırmayı, sağdaki resim ise yatay karıştırmayı ifade etmektedir.



Şekil 4. 1 Elektromanyetik karıştırmanın şematik gösterimi

Manyetik alan Lorenz kuvvetini indükleyebilir. Bu kuvvet ile ergiyikte basınç farkı ve yoğun konveksiyona neden olmaktadır. Geleneksel dökümde ergiyik önce kalıp duvarının yakınındaki düşük sıcaklık bölgelerinde katılaşır ve daha sonra heterojen çekirdeklenme olmaktadır. Ergiyikte konveksiyon olmazsa, çekirdekler dendrit olarak büyümektedirler. Bununla birlikte, elektromanyetik karıştırmanın

varlığı ile, kalıp duvarındaki kristal çekirdeği konveksiyonun gücü ile süpürölüp kalıp duvarından uzaklaştırılmaktadır. Süpürölen çekirdekler ergiyik içerisinde yayılabilir ve çekirdek sayısı artarak tane incelmeye yol açabilmektedir. Ayrıca tane inceltme işleminin yanı sıra yapının küreselleşmesi de elektromanyetik alanda gerçekleşmektedir. Literatürde yapılan çalışmalara göre; elektromanyetik alanın sebep olduğu konveksiyon (ısı yayılımı) hareketi, ergiyik içerisinde çözünme ve sıcaklık dağılımının homojenliğini destekleyebilir. Böylece birincil alüminyum taneleri (α -Al) her yöne hemen hemen aynı oranda büyümektedir. Bunun yanında ergiyikteki meydana gelen yoğun konveksiyon ; birincil alüminyum tanelerinin etrafındaki dengesiz tabakanın kalınlığını da azaltabilmektedir. Bu da yapısal aşırı soğumanın derecesini düşürerek çekirdeklerin dengesiz bir şekilde büyümesini engellemiş olur. Elektrik akımı ergiyikten geçtiğinde, dendrit merkezi (kökündeki) katı-sıvı arayüzeyin ısı maksimum seviyeye ulaşır. Köklerde biriken ısı, dendrit kollarının ergimesini (füzyon) teşvik edecek ve tanelerin incelmeye ve küreselleşmesine neden olacaktır. Hellawell ve arkadaşları, elektromanyetik karıştırmanın dendrit köklerinde gerilim konsantrasyonuna yol açan şiddetli sıcaklık ve kompozisyon değişimlerine neden olacağına inanmaktadırlar. Böylece tane olgunlaşması sürecinde dendrit köklerinin ergitilmesine sebep olmaktadır [22]. Elektromanyetik alan efektif bir tane inceltme etkinliğine sahiptir. Mekanik karıştırma ile karşılaştırıldığında; elektromanyetik karıştırma çubuğunun harcanma kaybını önlemektedir. Bununla birlikte elektromanyetik karıştırma yönteminin parametrelerinin kontrolü nispeten kurallara bağlıdır. Bunlara ek olarak, mekanik karıştırmaya göre EMS ile ergiyik karıştırabilecek kapasiteler daha azdır. Dezavantajlarına rağmen, endüstride iyi uygulamaları bulunmaktadır [22].

Elektromanyetik karıştırmanın sadece tane inceltme işlemi sağlamaz. Bunun yanında kimyasal bileşimin dağılımının homojen bir şekilde olmasını sağlamaktadır. Demir metalinde elektromanyetik alan uygulanması nispeten daha erken başlanmıştır. A356, 4045, 6061, 7075, Al-Si alaşımlarının dökümünde elektromanyetik alan uygulanmış ve birincil alüminyum tanelerinin incelendiği gözlemlenmiştir [22]. Elektromanyetik karıştırmanın pozisyonuna göre farklı alt yöntemleri içermektedir. Tablo 4. 3'te bu yöntemler özetlenmektedir.

Tablo 4. 3 EMS yöntemlerinin sınıflandırılması [22]

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
F-EMS	Düşük çekme boşluğu Merkezi segragasyon (V şeklinde)	Sadece düşük frekansta çalışmada etkilidir.
M-EMS	Yüksek yüzey kalitesi Mükemmel mikroyapı, Yüksek döküm hızı	Ekipman gereksinimi
S-EMS	Merkez gevşekliği yok Düşük çekme boşluğu Düşük merkez segregasyonu	Bu yöntem kullanıldığında belirgin bir etkisi yoktur.
Karma-EMS	Yüksek döküm kalitesi Düşük merkez segregasyonu	Elektromanyetik kuvvetin gücünü ve yönünü kontrol etmek zordur.
M-EMS: Kalıbın elektromanyetik karıştırılması, S-EMS: İkincil soğutma elektromanyetik karıştırma, F-EMS: Nihai katılaşma elektromanyetik karıştırma		

4.3.1.2 Titreşim

1926 yılında Boyle Ve Taylor adlı araştırmacılar katılaşma sırasında ergiyiğe titreşim uygulandığında, uygulanan titreşimin gaz giderme ve tane küçültme etkisinin olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu konuyla ilgili geçmişten günümüze birçok çalışma yapılmış ve patent alınmıştır. Fakat çalışmalarda titreşimin uygulama şartları ve ulaşılan sonuçlar hakkında açık ve kesin bilgiler mevcut değildir [70].

Sıvı metale titreşim uygulaması esnasında sınıflandırma titreşimin frekansına göre yapılmaktadır. Titreşim frekansına göre sınıflandırma 3 başlık altında yapılmaktadır [70].

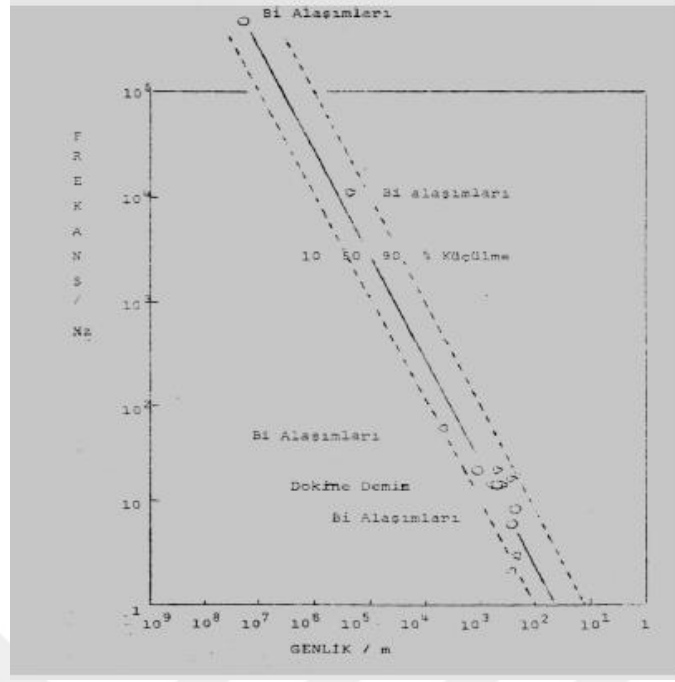
(1) Düşük frekanslı titreşim; 0-300 Hz arasındaki titreşim değerleridir.

(2) Orta frekanslı titreşim; 300 Hz-16 kHz arasındaki titreşim değerleridir.

(3) Yüksek frekanslı titreşim; 16 kHz'den büyük titreşim değeridir.

Bu üç grupta farklı olan durum sadece titreşim enerjisinin katılan sisteme nasıl verildiğidir. Sistemlerin etkileri frekans/genlik (fa) haritalarında gösterilebilmektedir. Fa haritaları ile farklı metaller, titreşimin farklı uygulanma stilleri, farklı kalıp geometrileri, farklı frekans ve genlik değerlerinin sıvı metal üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması sağlanmaktadır. Bunlara ek olarak fa haritaları ile tane inceltme mekanizmasının sebebinin dendrit kollarının kopması mı yoksa kavitasyon sonucu mu olduğu doğrulanabilmektedir [70].

Şekil 4. 2' te örnek fa diyagramı gösterilemektedir. Bu diyagramda alüminyum, bizmut, dökme demir alaşımlarına %10, %5, %90 tane inceltme şartları uygulanmıştır. Şartlar fa diyagramında gösterildiği zaman tane inceltmenin baskın olduğu bölgenin alanının dar olduğu farkedilmektedir [70].



Şekil 4. 2 Farklı tane küçültme şartları uygulanan alüminyum, çelik, bizmut ve dökme demir alaşımlarının fa diyagramları [70]

Titreşim kuvvetleleri, ergiyiğe ultrasonik, elektromanyetik, mekanik yöntemler olmak üzere farklı şekilde uygulanabilmektedir [73].

- **Mekanik Titreşim**

1870'li yıllardan beri parçaların döküm halindeki mikroyapısını değiştirmek için kalıpların titreştirilmesi uygulaması yapılmaktadır. Mekanik titreşim genellikle potanın tabanına yüklenmektedir. Kuvvet, titreşim genliği ve frekansı ayarlanarak kontrol edilmektedir [22].

Mekanik titreşimin ürettiği ergiyik titreşim kuvveti aşağıdaki eşitlik (4.2) yardımıyla bulunur.

$$F = \alpha_{\max} \cdot x \cdot m \quad (4.2)$$

Eşitlikte $\alpha_{\max}$ ifadesi titreşimin pik ivmesini ifade etmektedir. Bu ivme aşağıdaki belirtiken (4.3) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$I \propto \alpha_{\max} I = |A| (2 \pi f)^2 \quad (4.3)$$

Eşitlikteki $|A|$ ifadesi titreşim genliğini, f ifadesi ise genliğini anlatmaktadır. Genelde titreşim yoğunluğu; kalıbın titreşim frekasansı ve titreşim genliği ile

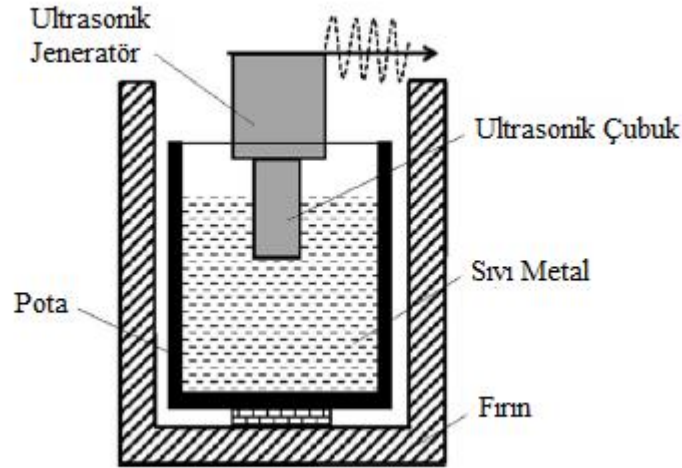
kontrol edilen titreşim ivmesi ile değerlendirilir. Uyarıcı güç, artan titreşim yoğunluğu ile artmaktadır [22].

Titreşim uygulanması ile çekirdeklenmenin teşvik edilerek mikroyapının inceltildiği inanılmaktadır. Limmaneevichitr, Taghavi ve arkadaşları mekanik titreşimin A356 alaşımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar göstermiştir ki birincil alüminyum tanelerinin ortalama tane boyutu, titreşim derecesi arttıkça daha ince ve daha küresel hale gelmektedir. Döküm numunesi ile karşılaştırıldığında, alaşımın tane büyüklüğü 15 dakika 50 Hz'lik bir titreşim frekansında tane boyutu 1200'den 174 μm 'ye incelmıştır. Tane inceltme etkisi, titreşimin daha yüksek katı fraksiyonlarına ve daha düşük döküm sıcaklığında uygulandığında belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Titreşim frekansındaki ve titreşim genliğindeki artış ile birlikte, birincil alüminyum boyutları ve ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe azalmıştır [22].

Mekanik titreşim ile sadece tane inceltme değil, döküm sırasında gaz giderme ve besleme kapasitelerinin gelişmesi de sağlanmaktadır. Titreşim, döküm prosesinin stabilitesini geliştirmek için sürekli olarak kalıba uygulanmaktadır. Yöntem laboratuvarında incelenmiş tane inceltme işleminde etkili olduğu kanıtlamıştır. Fakat endüstriyel uygulamalarda seri üretimde problemler yaşanmaktadır. Titreşim ile gözeneklilik ve termal parçalanma gibi döküm hatalarına rastlanmaktadır. Başarılı bir titreşim için titreşim kalıp tasarımı, büyük hacimli ergiyik için titreşim döküm sistemi çalışmalarına odaklanılmalıdır [22].

- **Ultrasonik Titreşim**

Metalürjik uygulamalar için ultrasonik titreşim araştırmaları 1930 'lü yıllara dayanmaktadır. Metal ergiyiğine yüksek yoğunlukta ultrasonik titreşim uygulanması tane boyutunda etkili miktarda azalma meydana getirebilmektedir. Ultrasonik titreşim ergiyik metalin altından veya üstünden uygulanabilmektedir. Ultrasonik titreşimin şematik olarak gösterimi Şekil 4. 3'te gösterilmektedir.



Şekil 4. 3 Ultrasonik ekipmanların şematik gösterimi [22]

Literatürde ultrasonik titreşim ile yapılan çalışmaların olumlu sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Eskin yaptığı çalışmada saf alüminyumun ultrasonik titreşim uygulanmadan önceki ve sonraki mikroyapı görüntülerini incelemiştir. Ultrasonik titreşimin öncesindeki sütun şeklindeki dendritik mikroyapının, ultrasonik titreşim uygulandıktan sonra ince ve eş eksenli mikroyapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir [22].

St.John ve arkadaşları tane inceltme işleminde ultrasonik titreşimin sadece sıvılaşma eğrisinin 20°C üzerindeki sıcaklık aralıklarından, sıvılaşma eğrisinin altında belli sıcaklıklara kadar uygulanabileceğini ortaya çıkarmıştır [22].

Haghayeghi ve arkadaşları uygulanan frekansın mikroyapı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 10 ve 14 kHz frekans değerlerinde mikroyapıda herhangi bir iyileşme gözlemlenmezken; frekans 17,5 ve 20 kHz değerlerine çıkarıldığında tane boyutunun 118 μm 'den 68 ve 60 μm 'ye kadar indiği gözlemlenmiştir. Ayrıca Eskin alüminyum alaşımlarının katılaşma mikroyapısını etkileyen en önemli etmenin kavitasyon eşiğinin 17 kHz olduğunu sunmuştur [22].

Ergiyik içerisindeki akustik akış ve kavitasyon ultrasonik titreşim tarafından uyarılmaktadır. Bu sayede ergiyiğin gazının giderilmesi ve homojenizasyon sağlanabilmektedir. Bunlara ek olarak ultrasonik titreşim ile tane inceltme ve ergiyikteki nanopartiküllerin dağılımının homojenizasyonu sağlanabilmektedir.

Uniform nano-SiC partikül takviyeli magnezyum matrisli kompozitler ultrasonik titreşim yöntemi ile hazırlanabilmektedir. Fakat hazırlanan kompozitin boyutunun küçük olduğu raporlanmıştır [22].

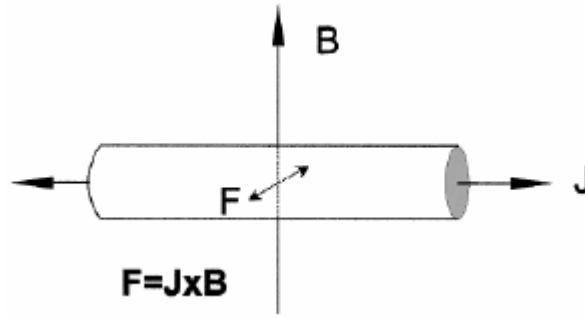
Ultrasonik titreşimi büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda kısıtlayan noktalar, yüksek enerjili ultrasonik ekipman üretme zorluğu, yüksek sıcaklığa dayanıklı ekipman üretme zorluğudur. Bu sınırlamaları gidermek için halen çalışmalar sürmektedir. Mekanik titreşim ve ultrasonik titreşim Tablo 4. 4'te karşılaştırılmaktadır.

Tablo 4. 4 Mekanik titreşim ve ultrasonik titreşimin karşılaştırılması [22]

	Titreşim Frekansı	Uygulama	Avantaj	Dezavantaj
Mekanik Titreşim	200 Hz'den daha az	Sürekli Döküm	İnce Tane Uniform dağılımlı kompozisyon Artan besleme verimliliği Kararlı döküm prosesi	Termal parçalanma Büyük gözenekler Yüksek frekans
Ultrasonik Titreşim	200 Hz'den daha fazla	Sürekli döküm, Yarı katı döküm	Etkili tane inceltme Azalmış makrosegregasyon Azalmış gözenek Ergiyik kirlenmesi yok Düşük segregasyon	Yüksek güçlü ultrasonik ekipman eksikliği Yüksek frekans titreşime dirençli ultrasonik çubuk eksikliği

- **Elektromanyetik Titreşim**

Elektromanyetik titreşim iki farklı kuvveti yani sabit bir manyetik alanın ve alternatif elektrik alanı içermektedir. Eğer ergiyik içerisine manyetik akı yoğunluğu B olan sabit manyetik alan ve frekansı f , akım yoğunluğu J olan alternatif elektrik alan uygulanırsa; $F=J \times B$ yoğunluğuna sahip titreşimli elektromanyetik cisim kuvveti ergiyiğe indüklenir. Bu kuvvet, ergiyik içerisinde partikülleri, J ve B düzlemine dik titreşen, alternatif elektrik alanın frekansına eşit bir frekansla titreşmesini sağlamaktadır. Uygulanan manyetik kuvvet, indüklenme kuvveti nedeniyle ergiyik içerisinde farklı bir elektromanyetik kuvvet oluşmaktadır. Bu kuvvet nispeten dönel bir kuvvettir. Ergiyik bu sayede karışmaktadır [73]. Şekil 4. 4'te kuvvetler arasındaki ilişki şematik gösterilmektedir.



Şekil 4. 4 Titreşim kuvveti F , alternatif elektrik alan J , sabit manyetik alan B [73]

4.3.2 Gaz Üfleme Yolu ile Karıştırma

Bu yöntemde Ar , N_2 , He soygazları ergiyik içerisine gönderilmektedir. Gazlar sayesinde ergiyiğin karıştırılması sonucu kolonsal büyüme baskılanarak eşeksenli taneler arttırılmaktadır. $Al-0,2 Cu$ alaşımı ile yapılan çalışmada; alaşım $680^\circ C$ 'de ergitilmiştir. Ergiyiğin 65 mm çapında 150 mm yüksekliğinde grafit kalıba döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Grafit kalıba 20 ve 100 mm derinliğinde 6 mm çapında alümina tüp daldırılmıştır. Azot gazı ise 200 cc/dak hızla 10 saniye boyunca gönderilmiştir. Mikroyapı incelendiğinde tanelerin incelendiği gözlenmiştir. 100 mm derinlikte ise tanelerin daha ince olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise gazın soğutma etkisidir [70].

4.3.3 Momentum Konveksiyonun Arttırılması

Ergiyikte sıcaklık ve bileşim gradyanı ile ergiyiğin kalıp boşluğuna akışı esnasında momentum kuvveti oluşmaktadır. Eğer oluşan bu momentum kuvveti arttırılırsa sıvı metalin yüzeyinde titreşim oluşmaktadır. Sıvı serbest yüzeyi kalıp temas noktası ve kalıp yüzeyinde oluşan taneler oluşan momentum konveksiyonu ile koparılmaktadır. Koparılan taneler iç bölgelere taşınır, böylece eş eksenli taneler oluşmaktadır [70].

Literatürde sıvı alüminyumun döküm prosesinde kalıba boşaltma şekli değiştirilmiştir. Mikroyapılar incelendiğinde döküm yapılarında farklılıklar gözlemlenmiştir.

- a) Eğer döküm sistemi alttan beslenirse, metalin serbest yüzeyi sakin olmaktadır. Fakat döküm sıcaklığı düşük tutulsa dahi kaba taneli mikroyapı elde edilmiştir.
- b) Eğer ergiyik kalıba çalkantılı bir şekilde üst bölgeden dökülürse eşeksenli tane oluşan bölge fraksiyonu daha yüksek bulunmuştur.
- c) Eğer ergiyiğin dökümü çok sayıda yolluktan üst bölgeden gerçekleştirilirse; momentum kuvveti daha da yükselecektir. Bunun sebebi ise serbest yüzeyi kalıp temas noktasındaki kopma oranı farklı olmasıdır. Böylece daha ince taneli mikroyapı elde edilmiş olur.

4.3.4 Döndürme

Kalıba eş eksenli bir döndürme uygulandığında; kalıbın merkezinde kaba taneli mikroyapı, çevrede ise ince taneli mikroyapı elde edilmiştir. Bahsedilen bu iki bölgenin baskın olduğu alanın uzunluğu çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar döküm sıcaklığı, döndürme hızı ve kalıptan uzaklaşan sıcaklığın hızıdır. Yapılan çalışmalar kalıp ile döndürme eksenleri arasında 20 ila 30 mm arasında fark olduğundan homojen ve eşeksenli bir mikroyapı elde edildiği saptanmıştır [70].

4.3.5 Çalkalama

Ergiyiğe yönü belli olan ve farklı frekanslara sahip çalkalama uygulandığında ergiyik metal ile kalıbın duvarının temas ettiği noktalar ve kalıp duvarındaki katılacak taneler koparılabilir. Bu kopan taneler çalkalama ile ergiyiğe karışarak

yeni taneler için çekirdek merkezi olarak davranmaktadır. Wojciachowski ve arkadaşları yaptıkları çalışmada % 1-4 oranında Cu içeren 3,5 çapında 15,5 cm yüksekliğindeki numune alüminyum alaşımına 1,3 ila 1,5 Hz frekansta 180°C genlikte çalkalama uygulamışlardır. Numune incelendiğinde çalkalama şiddeti, eriyen element miktarı ve döküm sıcaklığının mikroyapıyı etkilediği saptanmıştır. Çalkalama şiddetinin ve eriyen metal miktarının artması ile; döküm sıcaklığı da düştükçe kolonsal olan tanelerin boyut miktarlarında azaldığı gözlemlenmiştir. Çalkalama ile birlikte dendritler kopmakta, katı/sıvı ara yüzeyinin önünde sıcaklık değişimi olmakta, kopan dendrit taneleri ergimeden çekirdek merkezi görevi görerek eş eksenli taneleri oluşturduğu düşünülmektedir [70].

4.4 Şiddetli Plastik Deformasyon ile Tane İnceltme (Katı Halde Tane İnceltme)

Bu başlıkta ifade edilmek istenen şiddetli plastik deformasyondur. Termo-mekanik proseslerde plastik deformasyon tane büyüklüğünün değiştirilmesinde ve kontrol edilmesinde efektif bir yöntemdir. Son yıllarda şiddetli plastik deformasyon (severe plastic deformation) prosesleri ile metal esaslı malzemelerde yüksek miktarda plastik gerilme uygulanarak ultra-ince tane üretilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Tablo 4. 5'te kullanılan yöntemler listelenmiştir [22].

Tablo 4. 5 Şiddetli Plastik Deformasyon Yöntemleri [22]

Şiddetli Plastik Deformasyon Yöntemleri	
Eşit Kanallı Açısallı Presleme (Equal-Channel Angular Pressing)	Periyodik Ekstrüzyon Sıkıştırma (Cyclic Extrusion Compression)
Yüksek Basıncılı Burulma (High Pressure Torsion)	Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding)
Birikmeli Rulo Yapıştırma (Accumulative Roll Bonding)	Birikmeli Sürekli Ekstrüzyon Şekillendirme (Accumulative Continuous Extrusion Forming)

Tablo 4. 5 Şiddetli Plastik Deformasyon Yöntemleri [22] (devamı)

Çok Yönlü Dövme (Multi-directional Forging)	Sürekli Dalgalandırma ve Doğrultma (Repetitive Corrugation and Streightening)
Burulma Ekstrüzyonu (Twist Extrusion)	Tüp periyodik döngüsel ekstrüzyon sıkıştırma (Tube Cyclic Extrusion Comperission)

Çok yönlü dövme yönteminde, numune, deformasyon sırasında eksenel yük yönündeki değişikliklerle birlikte sürekli olarak sıkıştırılır ve gerilmektedir. Bu etkiler metalde şiddetli plastik deformasyona neden olmaktadır.

Sürekli dalgalandırma ve doğrultma yönteminde, bir iş parçası enine kesit geometrisinde ölçüsünde önemli değişiklik yapmadan sürekli olarak bükülür ve düzleştirilir. Periyodik olarak bükme ve düzleştirme ile önemli miktarda plastik gerilme meydana gelmektedir.

Burulma ekstrüzyon yönteminde, numune plastik deformasyona ulaşmak için, ortasında dönen bir kesite sahip dikdörtgen kanaldan geçer. Fakat numunenin boyutu ve şekli burulma ekstrüzyonundan sonra değişmemektedir.

Tüp periyodik döngüsel ekstrüzyon sıkıştırma yönteminde ise, tüp şeklindeki numune bölme ve mandrel arasına yerleştirilir ve numune boyun bölgesinden geçtiğinde deformasyon gerçekleşmektedir.

Bu yöntemler arasında eşit kanallı açısallı presleme, yüksek basınçlı burulma, birikmeli rulo yapıştırma, periyodik ekstrüzyon sıkıştırma, sürtünme karıştırma kaynağı yaygın olarak çalışanlar arasındadır. Birikmeli sürekli ekstrüzyon şekillendirme ise yeni bir yöntemdir. Eşit kanallı açısallı presleme uygulaması kalıbın servis ömrünün düşüklüğü ve karışık olması sebebiyle sınırlıdır. Mevcut şiddetli plastik deformasyon yöntemleri çoğu düşük verimli ve yüksek maliyetlidir. Bu sebeple düşük maliyetli ve verimi yüksek şiddetli plastik deformasyon süreci geliştirmek ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [22].

5.1 Kalıp Hazırlama Süreci

Bu deneysel çalışmada model malzemesi olarak ısı yalıtım uygulamalarında kullanılan 10 kg/m³ yoğunluğa sahip polistiren levhalar tercih edilmiştir. Polistiren modellerin yüzeylerinin kaplanmasında kullanılan refrakter boya, Metko Hüttenes Albertus firmasından temin edilmiş olup firma içerisinde ürün kodu Disopast 7061'dir. Kırmızı bir renge sahip olan bu boya alümina silikat esaslı olup strafor kalıp boyama kullanımına uygun ve çeşitli kullanım yerlerine göre su ile seyreltilebilmektedir. Kullanım yerine göre fırça veya spreyle uygulanabilmektedir. Kurumuş boya yüzeyi uygun viskozite değerlerinde yüksek gaz geçirgenliğine sahiptir. Boyanın genel özellikleri Tablo 5. 1'de verilmiştir.

Tablo 5. 1 Refrakter Boya Genel Özellikleri [74]

Yoğunluk (20°C)	~ 1,70 g/cm ³
Viskozite	~ 15sn
pH	~ 8

Arzu edilen boyutta (170x50x40 mm) hazırlanan modellere refrakter boya kaplaması işlemi gerçekleştirildikten sonra, kalıplama işlemi için bir metal derece içerisine yerleştirilmiştir. Modellerin derece içerisinde daha kolay kalıplanabilmesi için Foseco marka besleyici gömlek kullanılmıştır. Besleyici gömleğin bir metal derece içerisine yerleştirilmesi ve Octagon 200, Endecotts Limited Marka cihazın yardımıyla model etrafına kum titreşim altında doldurulmuş ve kalıplama işlemi tamamlanmıştır. Katılaşma süreci boyunca çalkalama hareketini vermek amacıyla Mikrotest marka yörüngesel çalkalayıcı kullanılmıştır. Yörüngesel çalkalama cihazı bu çalışma için özel olarak yaptırılmıştır. Hazırlanan kalıp yörüngesel çalkalayıcı

cihazının üzerine yerleştirilerek çalkalama hızı ayarlanmıştır. Model kalıplama ve yörüngesel çalkalama cihazına ait görseller Şekil 5. 1 ve Şekil 5. 2 'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 1 Kalıplama esnasında kullanılan titreşim cihazı



Şekil 5. 2 Hazırlanan kalıpların döküm prosesinde kullanılan yörüngesel çalkalama cihazı

5.2 Ergitme ve Döküm Prosesi

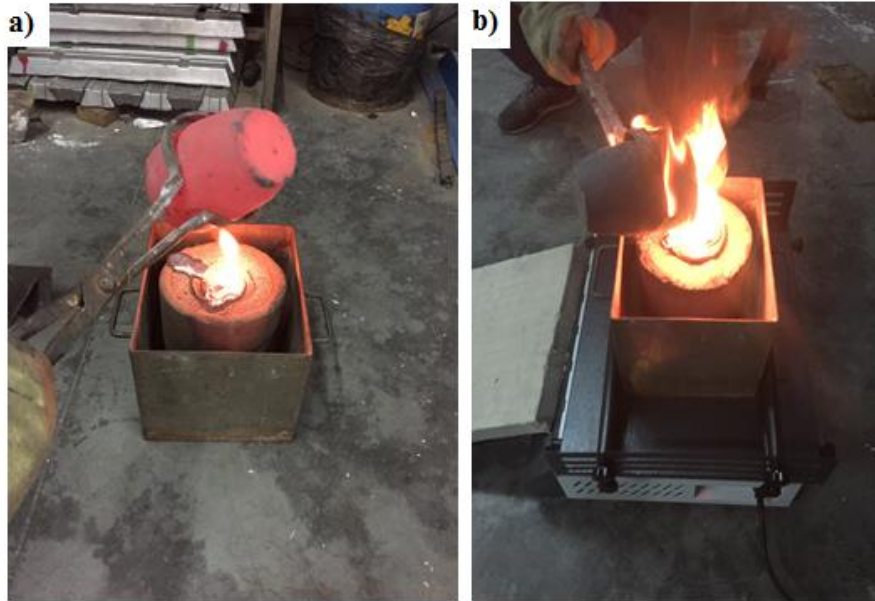
Kalıp hazırlama prosesinden sonra, A356 alüminyum alaşımı ingotlardan köpük modellerin hacmini dolduracak ağırlıkta (1- 1,20 kg) parçalar kesilmiş ve A4

boyutlu kil/grafit potalara ergitme için yerleştirilmiştir. Kullanılan A356 alaşımının kimyasal kompozisyonu Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 A356 Alüminyum Alaşımın Kimyasal Bileşimi (% ağırlıkça)

Al	Si	Mg	Fe	Ti	Pb	Cu	Mn	Cr	Ni
Kalan	7,28	0,35	0,14	0,12	0,011	0,01	0,02	0,003	0,003

Döküm sıcaklığı olacak 720°C ve 780°C olacak şekilde tercih edilen A356 alaşımlarının ergitme işlemi Protherm marka elektrik dirençli fırında gerçekleştirilmiştir. Ergiğin katılaşma süresini uzatarak yörüngesel çalkalama ile oluşan dendritlerin kırılması için gerekli olan sürenin sağlanması ve kalıbın iyi bir şekilde doldurulması amacıyla yüksek bir döküm sıcaklığı tercih edilmiştir. Döküm işlemi Şekil 5. 3’de gösterildiği gibi hem çalkalama işlemi uygulanarak hem de uygulanmadan (statik) gerçekleştirilmiştir. Yörüngesel çalkalayıcı hızları 50, 100, 150 ve 200 devir/dakika (rpm) olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 5. 3 a) Çalkama uygulamadan gerçekleştirilen döküm prosesi, b) yörüngesel çalkalama uygulayarak gerçekleştirilen döküm prosesi

5.3 Numune Hazırlama

Dökülen parçaların ilk katılma bölgesinden metalografik işlemler için numuneler kesme cihazı yardımıyla elmas disk kullanılarak kesilmiştir. Özellikle orta ve kenar kısımlar arasında fark olup olmadığını görmek amacıyla bu bölgelerden numuneler alınmıştır. Numuneler önce sırasıyla 320,400,600,800,1000,1200,2000 grit zımparalar yardımıyla zımparalanmış ardından 1 µm elmas süspansiyon ile parlatılarak Kellar çözeltisi ile yaklaşık 1 dakika dağlanmıştır.

5.4 Karakterizasyon Yöntemleri

Dökümler sonucunda elde edilen numunelerin analiz edilmesi amacıyla mikroyapı incelemesi, sertlik ölçümü, yoğunluk ölçümü, ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe, çekme ve kırma deneyleri yapılmıştır.

5.4.1 Metalografik İnceleme

Numune hazırlama işlemleri gerçekleştirilerek hazırlanan örnekler optik mikroskop yardımıyla mikroyapı incelemesine tabi tutulmuştur. Mikroyapı incelemesinin yanısıra numunelerin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe, ötektik silisyumların boy/en oranları ve tane boyutu ölçülmüş, buna bağlı olarak şekil faktörü hesaplanmıştır.

5.4.2 Sertlik Ölçümü

Belirlenen parametrelerde üretilen numuneler, parametre değişikliğinin malzeme sertliğine etkisini incelemek amacıyla Brinell sertlik testine tabii tutulmuştur. Testte batıcı uç olarak 2.5 mm çapında çelik bilye kullanılırken uygulanan yük 62.5 kg olarak belirlenmiştir. Sertlik uygulamasından sonra malzeme yüzeyinde oluşan iz çapları ölçüldükten sonra aşağıda (5.1) eşitliğinde verilen formül yardımıyla Brinell sertlik değerleri saptanmıştır.

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (5.1)$$

5.4.3 Yoğunluk Ölçümü

Döküm parçalarının yoğunlukları Arşimet prensibi uygulanarak hesaplanmıştır. Numunelerin hava ortamında ve su ortamında ağırlıkları tartılarak yoğunluklar

değerleri belirlemiştir. Şekil 5. 4'te gösterilen Precisa 205 A SCS hassas tartının yoğunluk ölçme kiti kullanılmıştır.



Şekil 5. 4 Arşimet Prensibi ile yoğunluk ölçümü yapılan hassas tartı

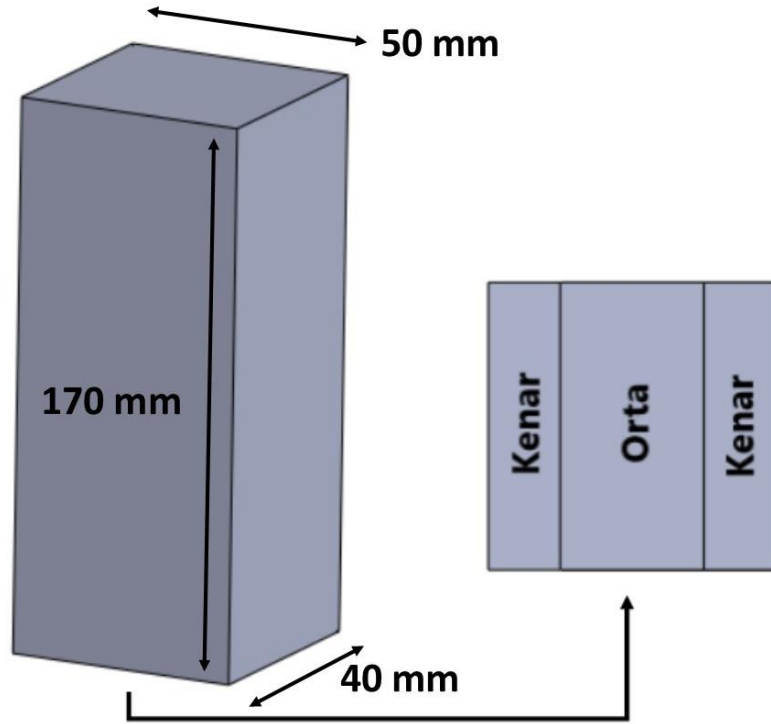
5.4.4 Mekanik Testler

Farklı döküm sıcaklıkları ve farklı çalkantı hızları uygulanarak elde edilen döküm parçalarından mukavemet ve darbe tokluklarını tayin edebilmek amacıyla kırma ve çekme numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere çekme testi uygulanarak numunelerin; akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri belirlenmiştir. Numunelerin darbe toklukların belirlenmesi amacıyla numunelere V çentik açılarak, Charpy çentik darbe testi yapılmıştır. Yapılan mekanik deney cihazlarına ait fotoğraflar Şekil 5. 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. 5 Çekme ve çentik darbe deneylerinin yapıldığı cihazlar

10 kg/m³ yoğunluğuna sahip köpük model kullanılarak 720 °C ve 780°C’de statik, 50, 100, 150, 200 dev./dak. hızlar kullanılarak başarılı bir şekilde döküm gerçekleştirilmiştir. Döküm sıcaklığının ve çalkalama hızının malzeme yapısına etkisinin incelenmesi amacıyla dökülen parçaların farklı bölgelerinden karakterizasyon için numuneler alınmıştır. Gerçekleştirilen tüm dökümler için, döküm parçalarının kenarından ve numunenin merkezinden görüntüler alınmıştır. Alınan numunelerin görüntüleri Şekil 6. 1’de şematik olarak gösterilmiştir.



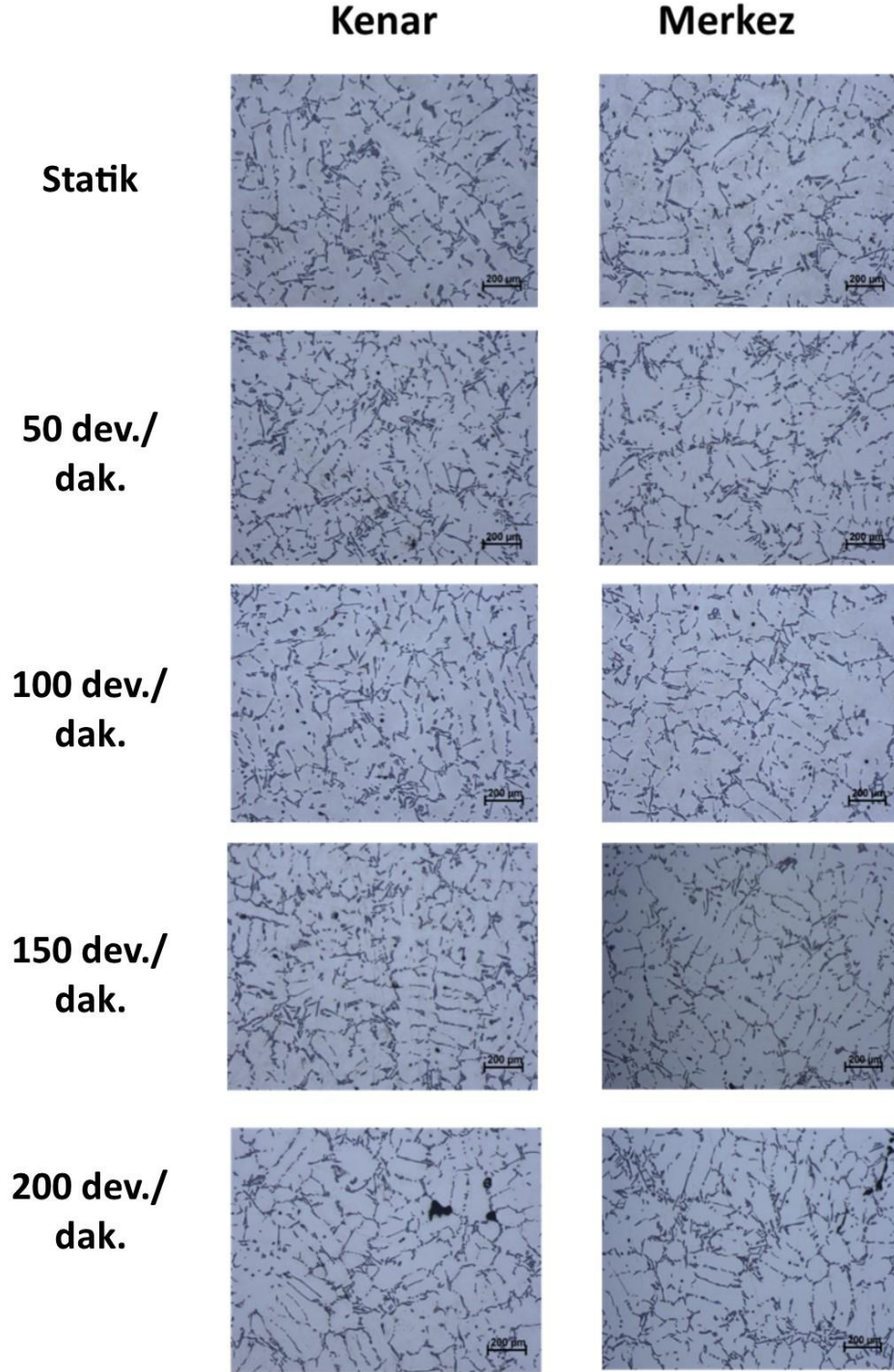
Şekil 6. 1 Üretilen parçalardan çıkarılan numunelerin pozisyonları

Döküm gerçekleştirildikten sonra, hazırlanan model ve üretilen döküm parçaları üzerinde makro gözlemler yapılmıştır. Dökümler, makro anlamda hazırlanan modellere uygun olarak hatasız ve tam bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Merkez ve kenar bölgelerden çıkarılan numunelerden optik mikroskop ile alınan mikroyapı

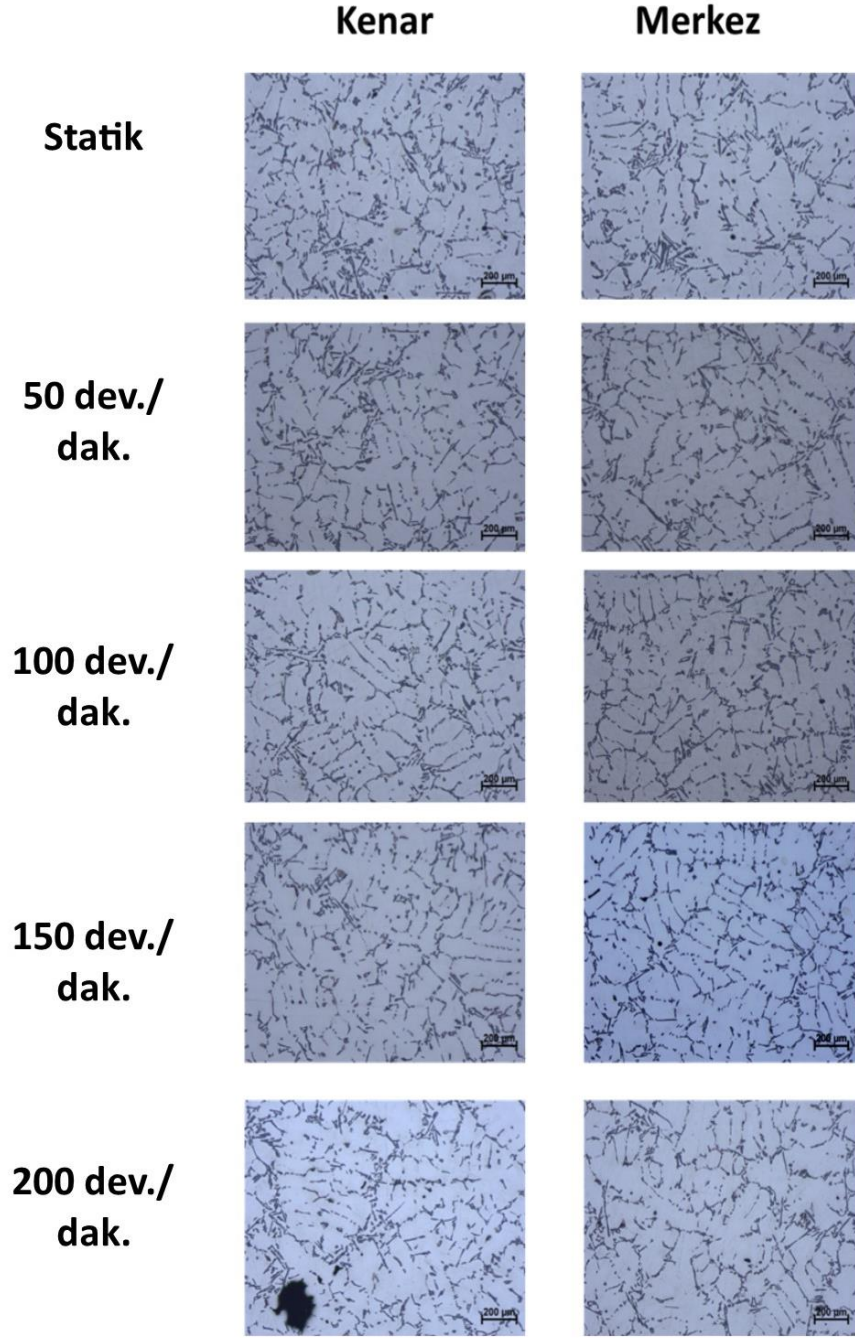
görüntüleri 720 °C ve 780 °C için sırasıyla Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te verilmiştir. Hem 720 °C'de hem de 780 °C 'de dökülen tüm numuneler incelendiğinde ötektikaltı Al-Si alaşımlarının tipik mikroyapıları gözlemlenmiştir. Açık gri alanlar birincil alüminyum fazını (α -Al), koyu gri ve iğnemsî şekiller ise ötektik silisyumu ifade etmektedir.

Dinamik tane inceltme, katılaşma sırasında büyüyen dendritleri kıran ve yeni çekirdekleri oluşturarak toplam tane sayısını artıran bir mekanizmadır. Yörüngesel çalkalama ile mikroyapının etkilenmesi, malzemenin özelliklerinin değişmesi ve yüzey kalitesinin iyileşmesinden dolayı, bu işlem kaybolan köpük döküm yöntemini geliştirici bir etkiye sahiptir. Yörüngesel çalkalama ile oluşan merkezkaç kuvveti, katılaşmaya başlayan yapı üzerinde bir kayma kuvveti göstermektedir. Bu kayma kuvveti özellikle birincil alüminyumları (α -Al) etkilemektedir.

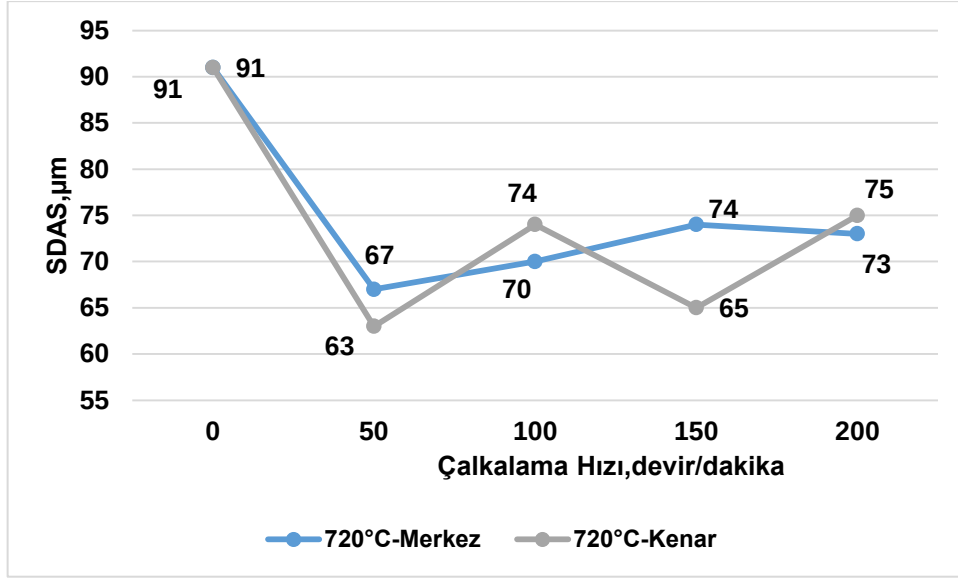
Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'de farklı çalkantı hızlarında gerçekleştirilen dökümlerin mikroyapıları incelendiğinde, her numunede özellikle birincil alüminyum fazı incelenmiştir. Değişen çalkalama hızlarında kenar ve orta bölgelerden alınan mikroyapılar incelendiğinde belirgin bir farkın meydana gelmediği belirlenmiştir. Bölge sabit tutulup (kenar veya orta) çalkalama hızının artmasına bağlı inceleme yapıldığında, artan hızlarla birlikte ötektik Si'lerin homojen dağılması ve bunun sonucunda bir miktar tane küçülmesi gözlemlenmiştir. Ayrıca yörüngesel artan çalkalama hızı ile üretilen numunelerin morfolojisi, ince dendritler ve rozetler olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 6.2 720 °C’de dökülen numunelerin optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, 50x büyütme

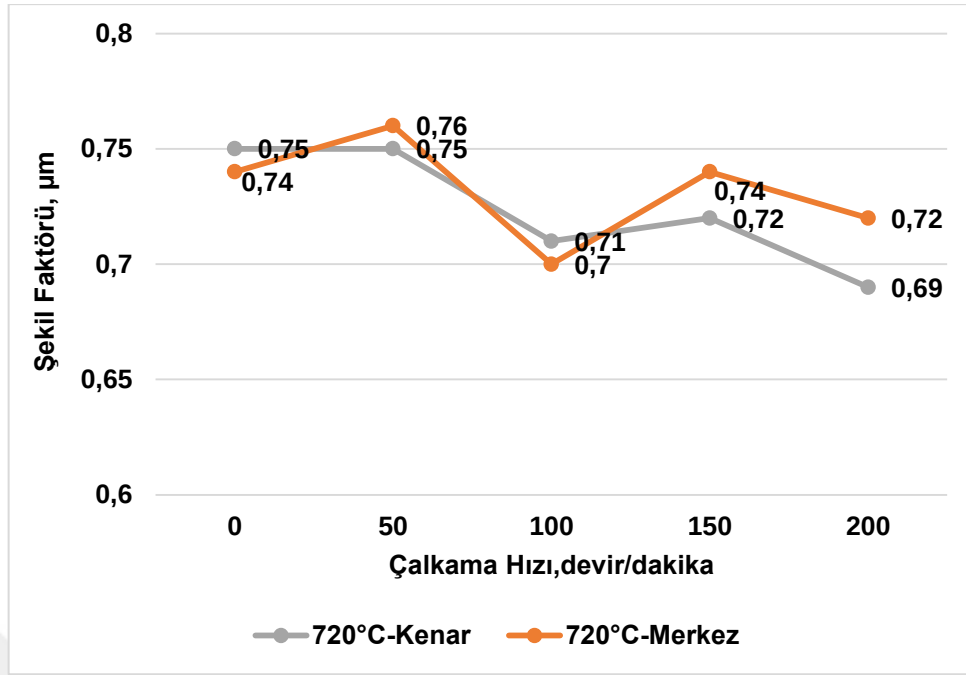


Şekil 6.3 780 °C’de dökülen numunenelerin optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, 50x büyütme



Şekil 6.4 720°C’de dökülen numunelerde çalkalama hızının SDAS üzerindeki etkisi

SDAS (ikincil denrit kolları arasındaki mesafe) değerleri 720 °C’de statik ve farklı çalkalama hızı ile dökülen numunelerin kenar ve merkez bölgelerinden optik mikroskop aracılığıyla ölçülmüştür. Çalkalama hızı ve SDAS değeri arasındaki ilişki Şekil 6.4’ te gösterilmiştir. Başlangıçta statik olarak dökülen numunelerden kenar ve merkez bölgelerinden ölçülen SDAS değerlerinin, yaklaşık 90 µm olduğu gözlemlenmiştir. Çalkalamanın etkisiyle SDAS değerlerinin düşmeye başladığı fakat artan çalkalama oranları ile SDAS değerinin kararlı hale geldiği gözlemlenmiştir. Çalkalama ile üretilen merkezkaç kuvvetinin, rozet yapısını üretmek için yeterli bir G kuvveti yaratsa dahi, oluşan rozet mikroyapısını kırmak için yeterli olmadığı söylenebilir. Buna ek olarak artan hızlarda yapının daha fazla incelmemesi, 200 rpm’de tanelerin SDAS değerlerinde artış yaşanarak kabalaşıyor görünmesi, çalkama sırasında özellikle yarı-katı aralık geçilirken katılaşmış olan birincil alüminyum tanelerinin sürüklenerek birleşmesi ya da oluşan çekirdeklerin yeniden ergimesi ve toplam çekirdek sayısının azalması sonucu olabileceği düşünülmektedir.

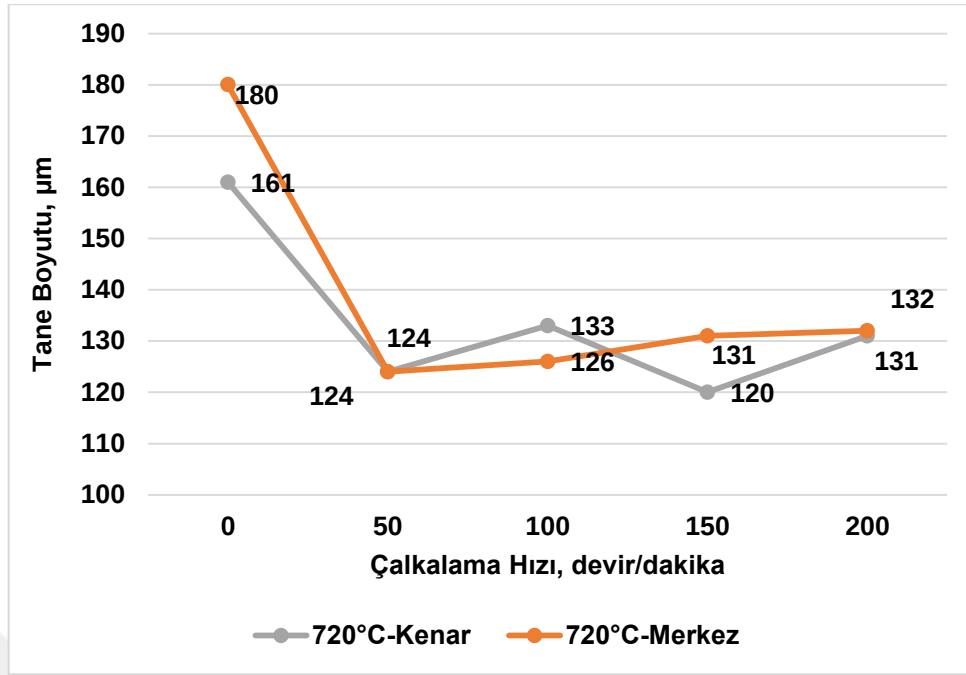


Şekil 6.5 720°C’de dökülen numunelerde çalkalama hızının şekil faktörü üzerinde etkisi

Çalkalamanın rozetsi bir mikroyapı oluşturma eğilimi görüldükten sonra detaylı analiz edebilmek amacıyla küresellik ölçümleri yapılmıştır. Şekil faktörü / küresellik hesaplamak için birincil alüminyum tanelerinin alanı ($A\alpha$) ve çevresi ($P\alpha$) ölçülmüş ve elde edilen değerler (6.1) eşitliğinde kullanılmıştır.

$$\text{Şekil Faktörü} = (4\pi A\alpha / P\alpha^2) \quad (6.1)$$

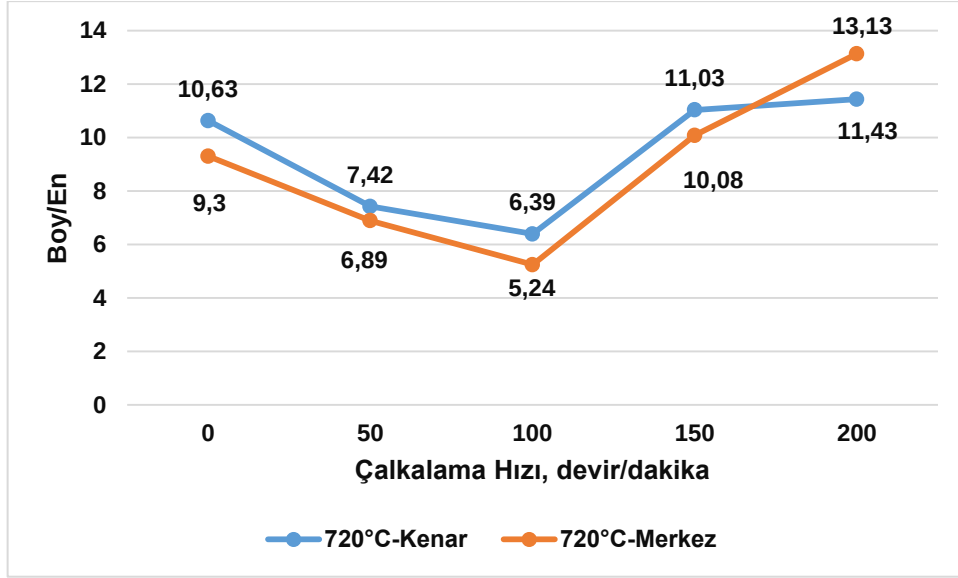
Hesaplanan değerler 0 ile 1 arasındadır. Değerler 1’e yaklaştıkça küresellik artar. Değişen çalkama hızı ile küresellik arasındaki ilişki Şekil 6.5 ‘de verilmiştir. Elde edilen değerler ortalama değerlerdir. Çalkalama etkisiyle rozetsi bölgeler oluşsa da dendritlerin büyük boy/en oranları ortalama küresellik değerlerini düşürücü etki göstermektedir. Bu nedenle statik döküm kıyaslandığında küresellik değerleri açısından belirgin bir fark görülememiştir.



Şekil 6.6 720°C’de dökülen numunelerde çalkalama hızının tane boyutuna üzerine etkisi

Ölçülen tane boyutunun çalkalama hızıyla değişimi Şekil 6.6’da gösterilmektedir. Şekil 6.6’da görüldüğü gibi, tane boyutu statik dökümde kenar bölgede 160 µm, merkez bölgede ise 180 µm olarak ölçülmüştür. Yörüngesel çalkalama ile statik döküme kıyasla tane boyutunda önemli bir düşüşe neden olmuştur. Şekil 6.2’de, kenar bölgelerden alınan görüntülerin yapısal olarak merkezden alınan görüntülerden farklı olmadığı görülmüştür. Büyük farklılıkların olmaması 50x40 mm’lik bir bölümde yapısal homojenliğin korunduğu ve çalkalamanın mikroyapıda bir gradyan oluşturmadığı gözlemlenmektedir.

Ötektik silisyum parçalarının morfolojisinin karakterize edilmesi amacıyla boy oranı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Boy oranı ölçülen tüm ötektik silisyumların uzunluklarının genişliklerine oranının ortalama değeridir. Bu değer plaka şeklindeki silisyumların parçalanma derecesini temsil etmektedir. Hem kenar hem de merkez numunelerinin farklı bölgelerinden ölçümler yapılmış ve bu ölçümlerin ortalama değerleri alınmıştır. Değerler Şekil 6.7’de gösterilmektedir. Şekil 6.7’de görüldüğü gibi hem kenar hem merkezde yaklaşık 10 olan değer düşük çalkalama hızlarında 5 değerlerine kadar düşmüştür. Fakat çalkalama hızı orta ve yüksek değerlere ulaştığında boy/en oranları artış göstermiştir.



Şekil 6.7 720°C’de dökülen numunelerde çalkalama hızının ötektik silisyumların boy/en oranına etkisi

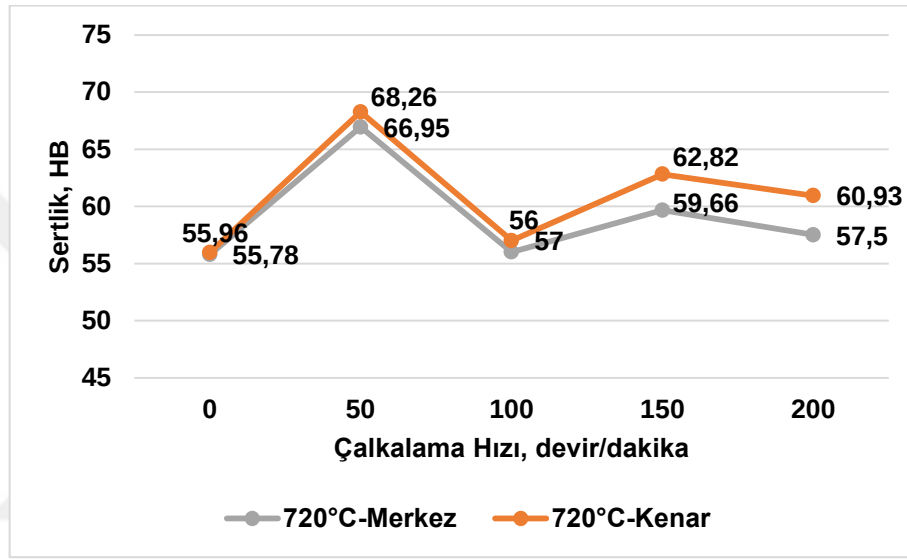
Çalkalama hızının döküm parçaları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için numunelerin yoğunlukları Arşimet prensibi ile hesaplanmıştır. 720 °C için tüm örneklerin yoğunlukları Tablo 6.1’de verilmiştir. 356 alaşımının teorik yoğunluğu 2,685 g/cm³’tür [2].

Tablo 6.1 720 °C’de dökülen numunelerin yoğunlukları

Numune	Yoğunluk (g/cm ³)
Statik	2,57
50 rpm	2,64
100 rpm	2,63
150 rpm	2,61
200 rpm	2,59

Tablo 6.1’de, en düşük yoğunluk değerinin 2,57 g/cm³ ile statik dökümle üretilen numuneye ait olduğu görülmektedir. Çalkalama hızındaki artış ile yoğunluk değeri

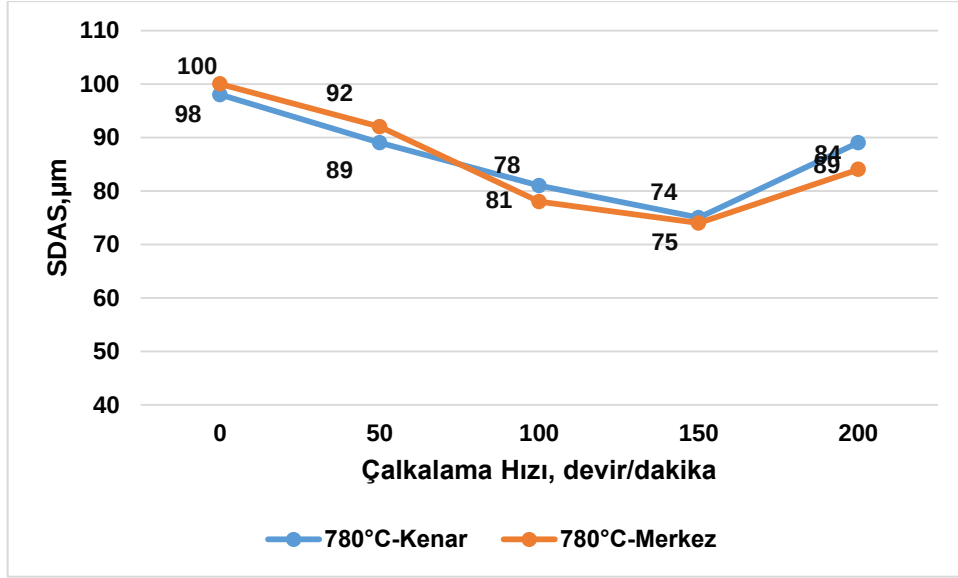
az miktarda artış göstermiştir. Fakat çalkalama hızı arttıkça 50 rpm çalkalama hızı ile dökülen numuneye göre yoğunlukta azalma olduğu gözlemlenmiştir. 200 rpm ile dökülen numunenin yoğunluk değeri statik döküm ile dökülen numunenin yoğunluk değerine yakındır. Düşük ve orta çalkalama hızı, katılaşma sırasında döküm kısmının beslenmesi için faydalı olduğu ve dendrit kolları arasında mikro gözenekliliği uygun bir şekilde durduğu söylenebilir. 200 rpm çalkalama hızı katılaşma basamağında bozulmaya neden olduğundan, bütün döküm parçasının uygun şekilde beslenmesi sağlanamamıştır.



Şekil 6.8 720 °C de dökülen numunelerde çalkama hızının sertlik üzerinde etkisi

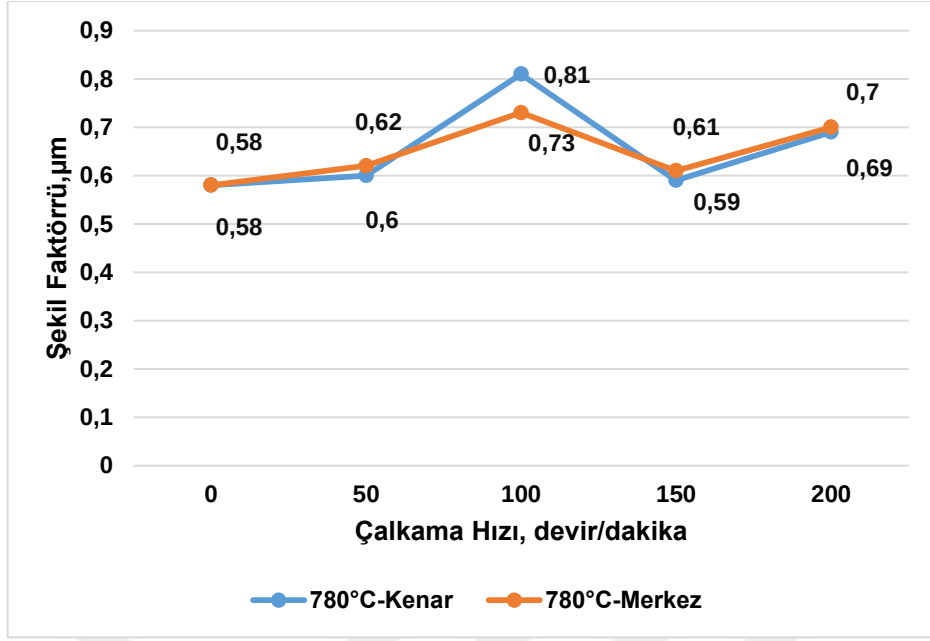
Şekil 6.8’de numunelerin sertlik değerleri gösterilmektedir. Başlangıçta yaklaşık 90 μm olan SDAS’ın ani düşüşü sertlik değerini artırmıştır. Buna ek olarak orta ve yüksek hızlarda çalkalama hızı, SDAS değerinde bir artışa neden olduğu için sertlik değerlerinde azalmaya sebep olmuştur. Çalkalama yoluyla düşük hızlarda iyi beslenmenin ve dendritler arasındaki mikro gözenekliliğin eksikliğinin sertliği artırmaya teşvik edildiği düşünülmektedir.

720 °C’de dökülen numunelerin SDAS, küresellik, tane çapı, yoğunluk, sertlik değerlerine ek olarak 780 °C’deki numuneler için de aynı ölçümler tekrarlanmıştır. Şekil 6.9’ de 780°C’de dökülen numunelerin SDAS değerleri gösterilmektedir.



Şekil 6.9 780°C’de dökülen numunelerde çalkalama hızının tane çapı üzerine etkisi

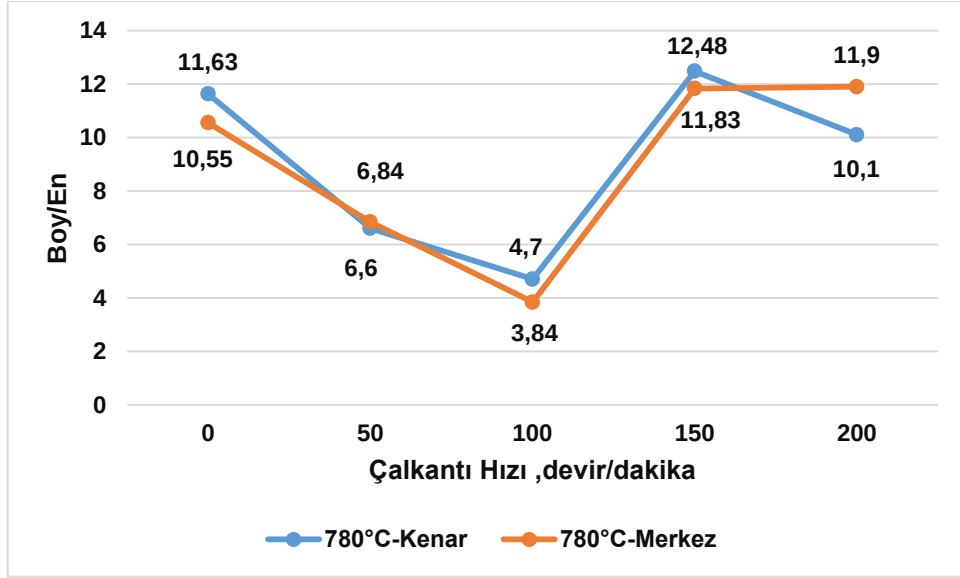
Başlangıçta statik olarak dökülen numunede kenar ve merkez bölgelerinden ölçülen SDAS değerlerinin, yaklaşık 100 µm olduğu gözlemlenmiştir. Çalkalamayla birlikte SDAS değerlerinin düşme gözlemlenmiştir. Fakat 720 °C’den farklı olarak SDAS değerinde çok keskin bir düşüş farkedilmemektedir ve düşüş kademelidir. Çalkalama hızının artmasıyla SDAS değerlerinde büyük değişiklikler yaşanmamıştır ve ortalama değerler elde edilmiştir. Fakat 780 °C’de en düşük SDAS değerinin 150 rpm çalkalama hızı ile dökülen numunede elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca çalkalama hızı 200 rpm’e geldiğinde yapı incelmek yerine aksine bir miktar kabalaşmaktadır.



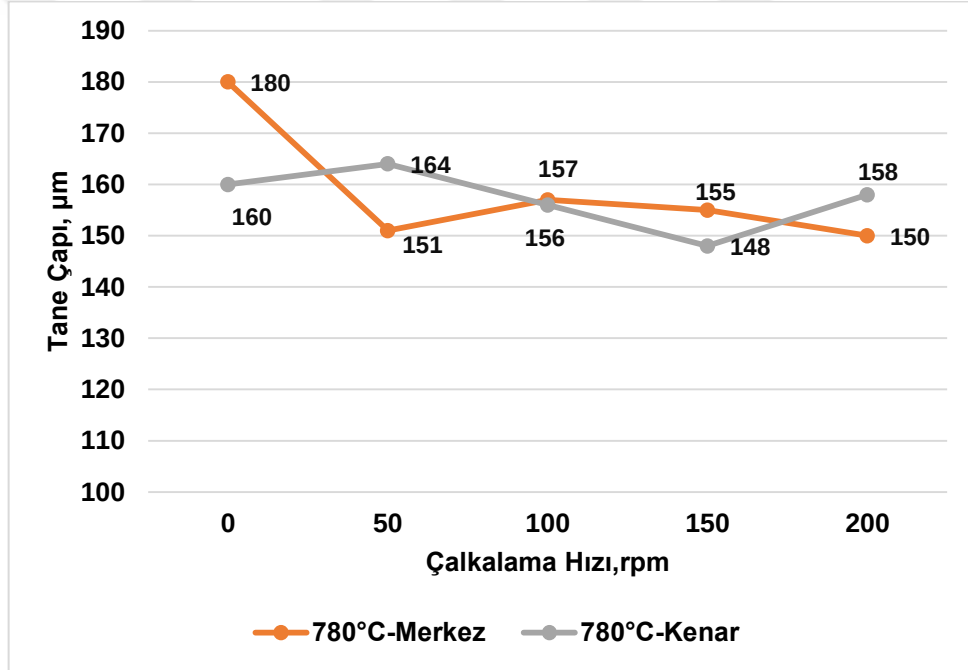
Şekil 6.10 780°C’de dökülen numunelerde çalkalama hızının küresellik üzerine etkisi

Şekil 6.10’de 780 °C’de dökülen numunelerin küresellik üzerine etkisi gösterilmektedir. 780°C’de statik olarak dökülen numune de küresellik faktörünün 720 °C’den çok daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Çalkalamanın etkisiyle küresellik değerleri artmaktadır. Bunun da 780 °C’de dökülen numunede katılaşma süresinin uzaması ve daha fazla tanenin çalkantının etkisiyle dendritlerin kırıldığı böylece küresellik değerinin arttırdığı düşünülmektedir.

780 °C’de dökülen numunelerin ötektik silisyumlarının karakterizasyon sonuçları Şekil 6.11’de özetlenmiştir. 720° C’de dökülen numunelerle benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ötektik silisyumların yaklaşık 10 olan çalkalamanın etkisiyle yaklaşık 4 değerlerine kadar inmiştir. Fakat çalkalama hızıyla tekrar 10 değerlerine ulaşmıştır. Yani düşük çalkalama hızı ötektik silisyumların küreselleşmesini olumlu etkilese de orta ve yüksek çalkalama hızı ötektik silisyumların küreselliğini olumsuz etkilemiştir.



Şekil 6.11 780°C'de dökülen numunelerde çalkalama hızının ötektik silisyumların boy/en oranına etkisi



Şekil 6.12 780°C'de dökülen numunelerde çalkalama hızının tane çapı üzerine etkisi

Ölçülen tane çaplarının çalkalama hızıyla değişimi Şekil 6.12'de gösterilmektedir. Tane çapları 720 °C de dökülen numunelere benzer olarak statik dökümde kenar bölgede 160 µm, merkez bölgede ise 180 µm olarak ölçülmüştür. Çalkalama ile beraber statik döküme kıyasla tane boyutunda düşüş yaşanmıştır. Hem kenar hem de merkez bölgelerden alınan görüntülerin farklı olmadığı görülmüştür. Büyük

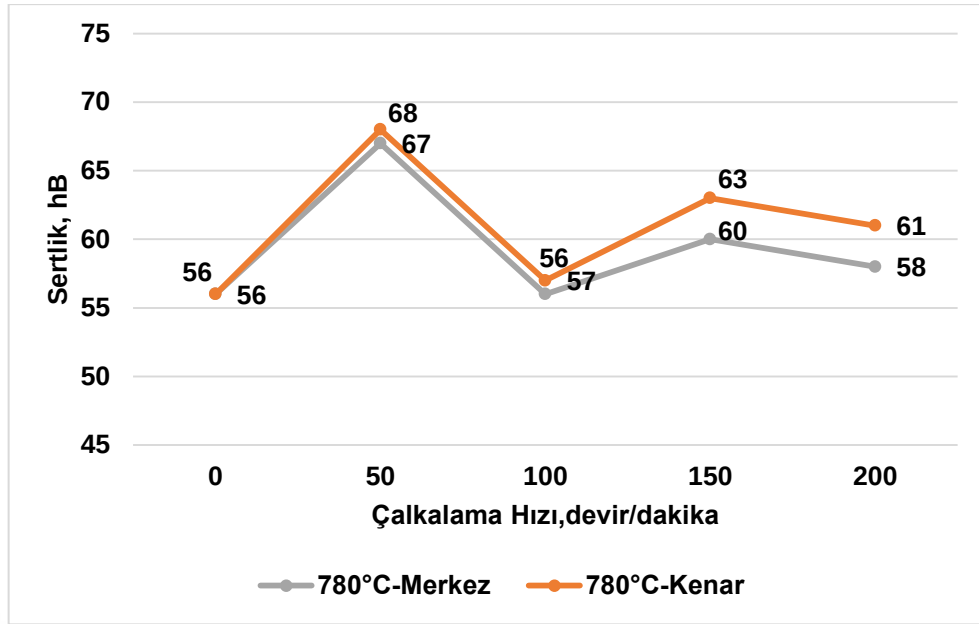
farklılıkların olmaması 780°C’de gerçekleştirilen dökümler için de 50x40 mm’lik bir bölümde yapısal homojenliğin korunduğu ve çalkalamanın mikroyapıda bir gradyan oluşturmadağı söylenebilmektedir.

780 °C’de dökülen numuneler için yoğunluklar Arşimet prensibi ile hesaplanmıştır. Tüm örneklerin yoğunlukları Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2 780 °C’de dökülen numunelerin yoğunlukları

Numune	Yoğunluk (g/cm ³)
Statik	2,58
50 rpm	2,61
100 rpm	2,64
150 rpm	2,65
200 rpm	2,59

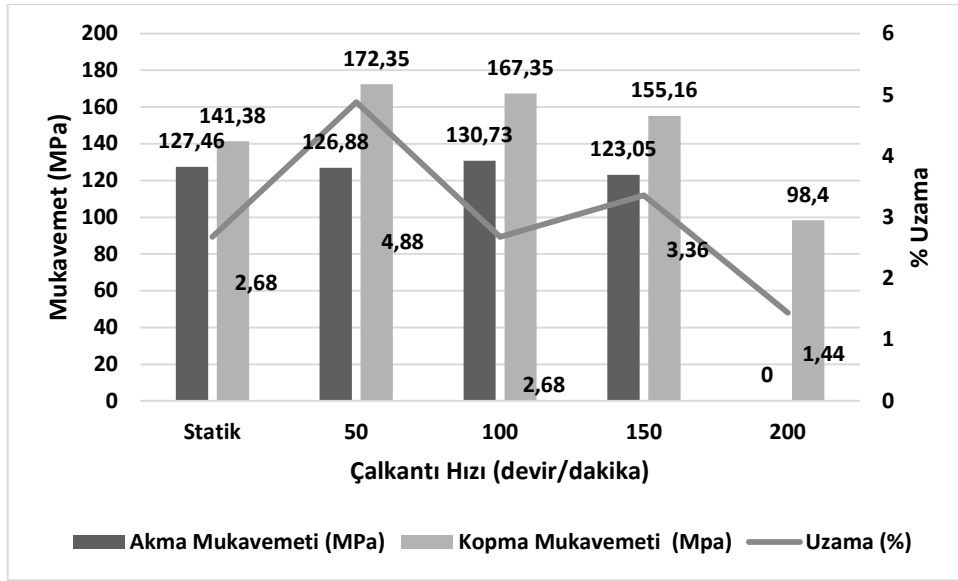
Tablo 6.2’de, en düşük yoğunluk değerinin 2,58 g/cm³ ile statik şekilde üretilen numuneye ait olduğu görülmektedir. Çalkalama hızındaki artış ile yoğunluk değeri az miktarda artış göstermiştir. Fakat 200 rpm ile dökülen numunenin yoğunluk değeri statik döküm ile dökülen numunenin yoğunluk değerine yakındır. 720 °C’de benzer şekilde düşük ve orta çalkalama hızı, katılaşma sırasında döküm kısmının beslenmesi için faydalı olduğu ve dendrit kolları arasında mikro gözenekliliği uygun bir şekilde durduğu söylenebilir. 200 rpm çalkalama hızı katılaşma basamağında bozulmaya neden olmaktadır mikroyapılarda görülen gözenekler bu durumu destekler niteliktedir.



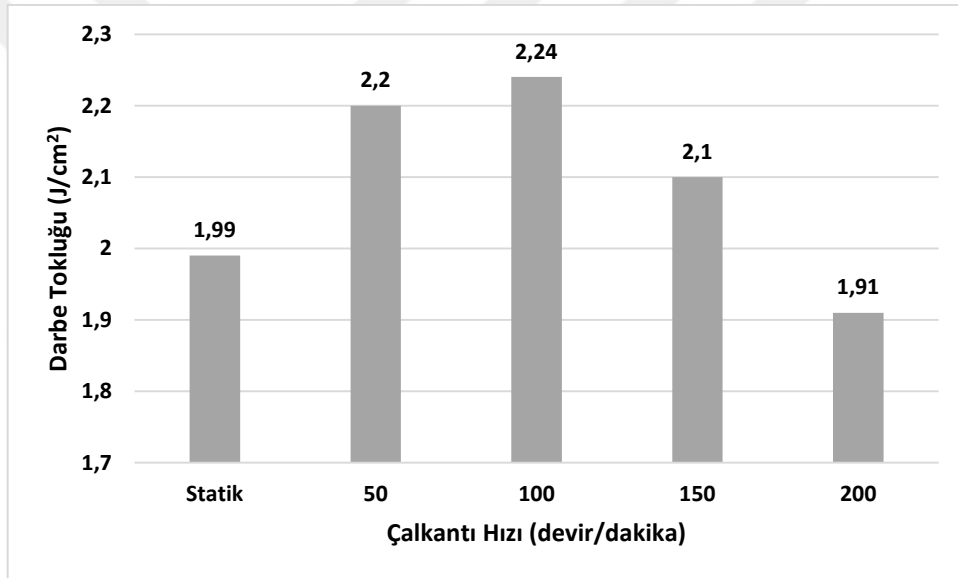
Şekil 6.13 780°C’de dökülen numunelerde çalkalama hızının sertlik üzerine etkisi

Şekil 6.13’de numunelerin sertlik değerleri gösterilmektedir. Başlangıçta yaklaşık 100 μm olan SDAS değerlerindeki sürekli düşük ve küresellik faktöründeki artışlar sertlik değerini artırmaktadır. Düşük ve orta değerdeki çalkalama metal akışı esnasında iyi beslenmenin ve dendritler arasındaki mikro gözenekliliği azaltmaktadır. Bu durum sertliği artırmaktadır. Fakat 200 rpm gibi yüksek çalkantı hızında SDAS değerindeki artış ve yoğunluktaki azalış mikrogözenekliliği artırmakta ve sertliği olumsuz etkilemektedir.

Uygulanan işlem parametrelerinin (çalkalama hızı ve döküm sıcaklığı) malzeme mekanik özelliklerine etkisini detaylı bir şekilde incelemek için üretilen numuneler çentik darbe testine ve çekme testine tabii tutulmuştur. Şekil 6.14’de ve Şekil 6.15 ‘de 720 °C’de dökülen numunelere ait mekanik test sonuçları, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de ise 780 °C’de dökülen numunelerin mekanik test sonuçları verilmiştir.



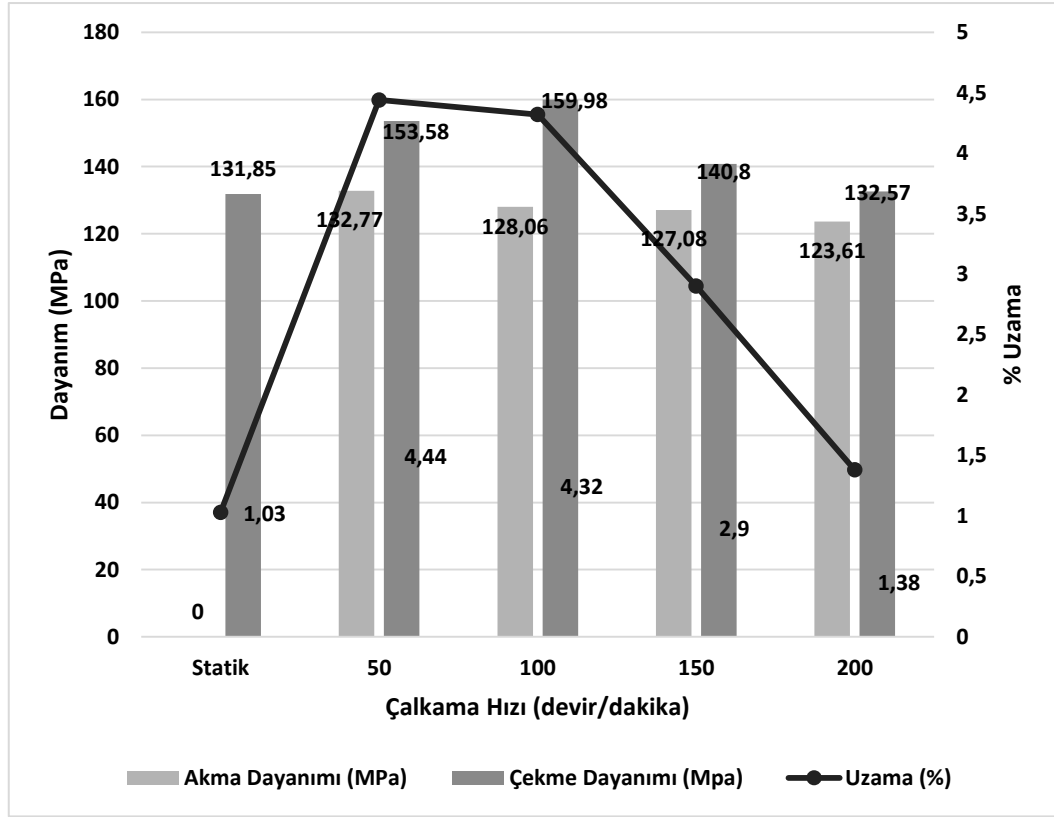
Şekil 6.14 720 °C için mekanik test sonuçları (akma, çekme dayanımı, % uzama)



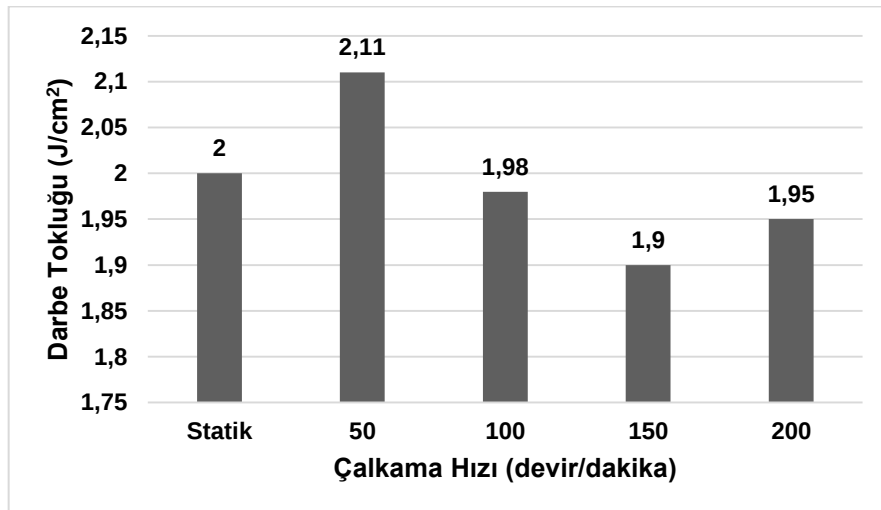
Şekil 6.15 720 °C için mekanik test sonuçları (darbe tokluğu)

Elde edilen sertlik sonuçları ile benzer şekilde SDAS değerindeki ani düşüş, tane çapındaki azalma ile daha ince taneli bir mikroyapının elde edilmesi statik döküme kıyasla düşük ve orta hızlarda çalkalama ile dökülen numunelerin mekanik değerlerini olumlu etkilemiştir. Statik dökümde 141 MPa olan çekme mukavemeti değeri yaklaşık 170 MPa değerlerine kadar yükselmiştir. Ortalama değerlerde ölçülen küresellik değerleri sebebiyle çalkamalı dökümlerde yakın mekanik sonuçlar elde edilmiştir. Fakat çalkalama hızı 200 rpm'e ulaştığında SDAS değerindeki yükseliş ve beslemenin yeterli olamayışı sebebiyle ortaya çıkan

mikroporozite mekanik değerleri olumsuz etkilemektedir. entik darbe testi sonuçlarında ise darbe tokluklarının $1,91 \text{ J/cm}^2$ ve $2,24 \text{ J/cm}^2$ arasında değiştiği ve çalkalama herhangi bir etkisinin olmadığını göstermektedir.



Şekil 6.16 780 °C için mekanik test sonuçları (akma, çentik darbe dayanımı, % uzama)



Şekil 6.17 780 °C için mekanik test sonuçları (darbe tokluğu)

Elde edilen sertlik sonuçları ile benzer şekilde SDAS değeriindeki sürekli olarak yaşanan düşüş, küresellik değeriindeki artış statik döküme kıyasla düşük ve orta hızlarda çalkantı ile dökülen numunelerin mekanik değerlerini olumlu etkilemiştir. Statik dökümde 131 MPa olan çekme mukavemeti değeri yaklaşık 160 MPa değerlerine kadar yükselmiştir. Ortalama değerlerde ölçülen tane çapı sebebiyle çalkantılı dökümlerde yakın mekanik sonuçlar elde edilmiştir. 720 °C'de dökülen numunelerde yaşanan durum 780 °C'de dökülen numunelerde de benzer etkiye neden olmuştur. 200 rpm çalkantı hızında SDAS değeriindeki yükseliş ve beslemenin yeterli olamayışı sebebiyle ortaya çıkan mikroporozite mekanik değerleri olumsuz etkilemektedir. Çentik darbe testi sonuçlarında ise darbe tokluklarının 1,95 J/cm² ve 2 J/cm² arasında değiştiği ve çalkantının herhangi bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

Deneysel çalışmalar sonucunda aşağıda verilmiş olan genel sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarda A356 alüminyum döküm alaşımı kullanılmıştır. Belirtilen alaşım iki farklı döküm sıcaklığında (720 °C ve 780 °C) statik ve farklı çalakalama hızları (50, 100, 150, 200 devir/dakika) uygulanarak dökülmüştür. Çeşitli karakterizasyon ve mekanik test çalışmaları ile sonuçlar irdelenmiştir.

- Her iki döküm sıcaklığı da dikkate alındığında yörüngesel çalkalama işleminin dinamik tane inceltme yöntemlerinden biri olabileceği görülmektedir. Çünkü statik döküm ile çalkantılı dökümleri kıyasladığımızda SDAS değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Özellikle 720°C'de gerçekleştirilen dökümler için SDAS değerinin çalkantı ile birlikte keskin bir düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. SDAS değeri 720°C'de statik halde dökülen numunede 91µm değerinden 50 devir/dakika hız ile çalkalama işlemi yapıldığında ortalama 65 µm değerlerine kadar düşüş göstermiştir. 100 ve 150 devir/dakika hızlarında bu değer ortalama 70 µm elde edilmiştir. Fakat 200 devir/dakika hıza ulaşıldığında bu değer ortalama 74 µm'ye ulaşmıştır. SDAS değeri 780°C'de statik halde dökülen numunede 99 µm değerinden 50 devir/dakika hız ile çalkalama işlemi yapıldığında ortalama 91 µm değerlerine kadar düşüş göstermiştir. 100 ve

150 devir/dakika hızlarında bu değer sırasıyla ortalama 80 μm ve 75 μm elde edilmiştir. Fakat 200 devir/dakika hıza ulaşıldığında bu değer ortalama 87 μm 'ye ulaşmıştır. Hem 720 $^{\circ}\text{C}$ 'de hem de 780 $^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirilen dökümlerde çalkalama hızı 200 devir/dakika hızına ulaştığında SDAS değerlerinde artış yaşanmıştır. Bu durumun katılaşmış olan birincil alüminyum (α -alüminyum) tanelerinin sürüklenerek birleşmesi sonucu olabileceği fikrini doğurmuştur. Yapı 200 devir/dakika'da kabalaşıyor eğilimi göstermektedir.

- Her iki döküm sıcaklığında gerçekleştirilen dökümlerin mikroyapıları incelendiğinde statik döküme kıyasla çalkalama sonucu tane boyları küçülmüştür. Statik dökümlerdeki tane boyları her iki sıcaklıkta da birbirine çok yakinken çalkalamanın tane boyutunu düşürmedeki etkisi 720 $^{\circ}\text{C}$ 'de yapılan dökümlerde daha yüksektir. Statik dökümde ortalama 170 μm olan tane boyutu, çalkalama ile beraber 124 μm değerlerine kadar inmiştir. 780 $^{\circ}\text{C}$ 'de yapılan dökümlerde tane boyutu ortalama 170 μm iken, çalkalama ile beraber 150 μm değerlerine kadar inmiştir. 720 $^{\circ}\text{C}$ 'de katılaşma süresinin kısalması olumlu etki göstermiştir. 720 $^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirilen dökümlerin mikro yapılarındaki birincil alüminyum fazının küreselliği görece daha yüksektir. Bu durum da mekanik özelliklere faydalı olarak yansımıştır.
- Yoğunluk değerleri incelendiğinde her iki sıcaklıkta gerçekleştirilen numuneler için düşük ve orta çalkantı hızı döküm prosesinde beslemeye yardımcı olmuş ve dendrit kolları arasındaki mikrogözenekliliğin beslemesine katkı sağlamıştır. Fakat yüksek çalkalama hızı yetersiz beslemeye ve gözeneklere sebep olmuştur.
- Özellikle düşük ve orta çalkantı hızlarında yaşanan ikincil dendrit kolları arasındaki mesafede düşüş, ötektik silisyumların boy/en oranlarındaki düşüş, yoğunluk değerlerindeki artış sertlik değerlerinin ve buna bağlı olarak çekme ve akma mukavemetlerini olumlu etkilediği gözlemlenmektedir. Mukavemet değerleri 720 $^{\circ}\text{C}$ 'de dökümlerde 141 MPa iken düşük ve orta çalkama hızlarında 172 MPa değerlerine kadar

yükselmiştir. % Uzama değerleri de % 2,68'den 50 devir/dakika çalkalama hızı ile % 4,88 değerine kadar yükselmiştir. Çentik darbe dayanımları 720 °C 'de dökülen numuneler için ortalama değerlerdir. 1,99 J/cm² olan çentik darbe değeri düşük çalkalama hızında 2.2 J/cm² değerlerine ulaşmıştır. Mukavemet değerleri 780 °C 'de dökümlerde 131 MPa iken düşük ve orta çalkama hızlarında 160 MPa değerlerine kadar yükselmiştir. % Uzama değerleri de % 1,03'den 4,44 ve 4,32 değerlerine kadar yükselmiştir. Çentik darbe dayanımları 780 °C 'de dökülen numuneler için ortalama değerlerdir. 2 J/cm² olan çentik darbe değeri düşük çalkalama hızında 2.11 J/cm² değerlerine ulaşmıştır.

- Kaybolan köpük döküm yöntemi kalıbın doldurulması yönünden diğer döküm yöntemlerinden farklıdır. Bu yöntemde sıvı metal köpük modeli uzaklaştırarak ilerlerken uç sıcaklığı sürekli olarak düşer ve kalıbın sonuna ulaştığında geriye doğru büyük bir sıcaklık gradyanı oluşur. Bu sıcaklık gradyan yönlenmiş katılaşmayı ve dolayısıyla sıvı metal beslemesini destekler. Döküm esnasında ve sonasındaki yüksek çalkalama hızı kaybolan köpük döküm yönteminin doğal katılaşma ve besleme düzenini bozabilir ve deneysel çalışmalarda bu sonuçla 200 devir/dakika çalkalama hızında karşılaşılmıştır. Yapılan gözlemler çalkalama hızının artmasıyla SDAS ve tane boyunun sürekli azalmadığını ortaya koymuştur. Görece düşük ve orta seviyeli çalkalama SDAS değerlerini azaltıp beslemeye faydalı olurken yüksek çalkalama hızının neden olduğu konveksiyon, yeniden ergimenin ve ısının yeniden dağılmasının artmasına neden olmaktadır. Bu durumda parçanın soğuma profili değişmekte ve özellikle oluşan çekirdeklerin bir kısmının yeniden ergimesiyle toplam çekirdek sayısı azalmaktadır. Bunun etkisi mikro yapıda daha düşük çalkalama hızlarına kıyasla daha yüksek SDAS ve tane boyu olarak yansımaktadır. Bunun yanında özellikle yarı katı bölgede katılaşmanın sonuna doğru tanelerin sürüklenmesinin ve birleşmesinin gerçekleşme ihtimali de göz ardı edilmemelidir. Yüksek çalkalama hızının besleme yönünden neden olduğu bir diğer fiziksel zafiyet ise kalıp ağzından bir miktar metalin dışarı saçılmasıdır. Kalıp ağzından

metal miktarının eksilmesi beslemeyi ve metalin basıncını doğal olarak zayıflatacaktır.

- Bu tez çalışması öncesinde yörüngesel çalkalamanın kaybolan köpük yöntemiyle ilk olarak denendiği ve A380 alaşımı kullanılarak yapılan çalışmada çalkalama hızının artışıyla SDAS değerlerinin sürekli olarak azaldığı ve yoğunluğun ve sertliğin de sürekli olarak arttığı rapor edilmiştir [28]. Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar bu ilk çalışmayı tam olarak destekler nitelikte değildir. Kısmen farklı sonuçların ortaya çıkmasının bir nedeni ilk çalışmada en yüksek çalkalama hızının 150 devir/dakika olması ve 200 devir/dakika ile dökümün denenmemiş olmasıdır. Bir diğer büyük fark ise numune boyutları arasındadır. Öncül çalışmadaki numune boyutları (30x30x50 mm) tez çalışmasındaki numunelere göre oldukça küçüktür. Bu durum büyük numunelerin uzayan katılaşma süresinin de sonuçlara büyük etkisinin olduğunu ortaya koymaktadır. Hızlı katılaşma şartlarında yüksek çalkalama hızlarının olumlu etkileri görünürken katılaşma süresinin uzaması zararlı etkilerinin de ortaya çıkmasına neden olmaktadır. A356 alaşımının dökümü ile yürütülen tez çalışmasında genel olarak en iyi özelliklerin 50 devir/dakika çalkalama hızında elde edildiği anlaşılmıştır.
- Yörüngesel çalkalama bir tür mekanik titreşimdir ve bu tez çalışmasında konvansiyonel mekanik titreşime bir alternatif olarak kullanılmıştır. Döküm yöntemi olarak kaybolan köpük yönteminin seçilmesi, mekanik titreşimin bu yöntemde neden olabileceği hasarları ortadan kaldırmaktır. Kaybolan köpük yönteminde boyut ve şekil açısından parça bütünlüğünü sağlayan unsur model üzerindeki refrakter kaplamadır. Döküm esnasında konvansiyonel mekanik titreşim uygulamak bu kaplamanın parçalanmasına ve sıvı metalin kum içine nüfus etmesine neden olabilir. Bu durum öncül çalışmada ortaya konmuştur. Yörüngesel çalkalama hareketi ise kaplamaya zararlı değildir, yüksek hızlarda bile döküm numunelerin şeklinde bir bozulma oluşmamıştır. Bu önemli özelliğinden dolayı yörüngesel çalkalama başta kaybolan köpük yöntemi olmak üzere döküm işlemlerinde bir dinamik tane inceltme yöntemi olarak değerlendirilebilir.

- [1] D. Askeland, P. Fulay, and W. Wright, "What is Materials Science and Engineering," *Sci. Eng. Mater.*, pp. 650–651, 2010.
- [2] T. Materials and I. Company, "ASM Handbook; Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials," vol. 2, 1991.
- [3] J.R. Davis & Associates. and ASM International. Handbook Committee., *Aluminum and aluminum alloys*. ASM International, 1993.
- [4] W. Jiang, Z. Fan, X. Chen, B. Wang, and H. Wu, "Combined effects of mechanical vibration and wall thickness on microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy produced by expendable pattern shell casting," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 619, pp. 228–237, 2014.
- [5] M. Okayasu, Y. Ohkura, S. Takeuchi, S. Takasu, H. Ohfuji, and T. Shiraishi, "A study of the mechanical properties of an Al-Si-Cu alloy (ADC12) produced by various casting processes," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 543, pp. 185–192, 2012.
- [6] C. Lin, S. Wu, S. Lü, P. An, and L. Wan, "Microstructure and mechanical properties of rheo-diecast hypereutectic Al-Si alloy with 2%Fe assisted with ultrasonic vibration process," *J. Alloys Compd.*, vol. 568, pp. 42–48, 2013.
- [7] P. Geffroy, M. Lakehal, J. Goñi, E. Beaunon, J. Heintz, and J. Silvain, "Thermal and Mechanical Behavior of Al-Si Alloy Cast Using Magnetic Molding and Lost Foam Processes," vol. 37, no. February, 2006.
- [8] M. R. Barone and D. A. Caulk, "A foam ablation model for lost foam casting of aluminum," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 19–20, pp. 4132–4149, Sep. 2005.
- [9] X. J. Liu, S. H. Bhavnani, and R. A. Overfelt, "Simulation of EPS foam decomposition in the lost foam casting process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 182, no. 1–3, pp. 333–342, 2007.
- [10] J.-H. Kuo, J.-C. Chen, Y.-N. Pan, and W.-S. Hwang, "Mold Filling Analysis in Lost Foam Casting Process for Aluminum Alloys and Its Experimental Validation," *Mater. Trans.*, vol. 44, no. 10, pp. 2169–2174, 2003.
- [11] "Cavityless casting mold and method of making same," Apr. 1956.
- [12] P. Kannan, J. J. Biernacki, and D. P. Visco, "A review of physical and kinetic models of thermal degradation of expanded polystyrene foam and their application to the lost foam casting process," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 78, no. 1, pp. 162–171, 2007.
- [13] D. A. Caulk, "A foam melting model for lost foam casting of aluminum," 2006.
- [14] O. Kilic, S. Acar, A. Kisasoz, and K. A. Guler, "Investigation of carbon contamination in lost foam castings of low carbon steel," vol. 15, no. 5, 2018.

- [15] Y. C. Wan *et al.*, "Microstructure and mechanical properties of semi-continuous cast Mg-Gd-Y-Zr alloy," *Materials Science and Engineering A*, vol. 617, no. 10, pp. 243–248, 2014.
- [16] K. A. Guler, A. Kisasoz, and A. Karaaslan, "A novel method for Al/SiC composite fabrication: Lost foam casting," *Int. J. Mater. Res.*, vol. 102, no. 3, pp. 304–308, 2011.
- [17] M. Karimian, A. Ourdjini, M. Hasbullah Idris, and H. Jafari, "Effect of pattern coating thickness on characteristics of lost foam Al-Si-Cu alloy casting," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 22, no. 9, pp. 2092–2097, 2012.
- [18] H. R. Azimi, M. Rezaei, and F. Abbasi, "Thermo-oxidative degradation of MMA-St copolymer and EPS lost foams: Kinetics study," *Thermochim. Acta*, vol. 488, no. 1–2, pp. 43–48, 2009.
- [19] T. Pacyniak and R. Kaczorowski, "Effect of pouring temperature on the Lost Foam Process," vol. 11, no. 3, pp. 149–154, 2011.
- [20] N. Abu-Dheir, M. Khraisheh, K. Saito, and A. Male, "Silicon morphology modification in the eutectic Al-Si alloy using mechanical mold vibration," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 393, no. 1–2, pp. 109–117, 2005.
- [21] M. A. Easton, M. Qian, A. Prasad, and D. H. StJohn, "Recent advances in grain refinement of light metals and alloys," *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 20, no. 1, pp. 13–24, 2016.
- [22] R. G. Guan and D. Tie, "A review on grain refinement of aluminum alloys: Progresses, challenges and prospects," *Acta Metall. Sin.*, vol. 30, no. 5, pp. 409–432, 2017.
- [23] C. Limmaneevichitr, S. Pongananpanya, and J. Kajornchaiyakul, "Metallurgical structure of A356 aluminum alloy solidified under mechanical vibration: An investigation of alternative semi-solid casting routes," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 9, pp. 3925–3930, 2009.
- [24] S. Mishra, M. Saleem, R. Kumar, and Amitesh, "Effect of Mould Vibration on Microstructure and Mechanical Properties of Casting During Solidification - a," *Ijert*, vol. 5, no. March, pp. 11–13, 2016.
- [25] C. Shi, K. Shen, D. Mao, Y. Zhou, and F. Li, "Effects of ultrasonic treatment on microstructure and mechanical properties of 6016 aluminium alloy," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 12, pp. 1511–1518, Aug. 2018.
- [26] W. Jiang, X. Chen, B. Wang, Z. Fan, and H. Wu, "Effects of vibration frequency on microstructure, mechanical properties, and fracture behavior of A356 aluminum alloy obtained by expendable pattern shell casting," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 1–4, pp. 167–175, 2016.
- [27] W. Q. Zou, Z. G. Zhang, H. Yang, and W. Li, "Effect of vibration frequency on microstructure and performance of high chromium cast iron prepared by lost foam casting," *China Foundry*, vol. 13, no. 4, pp. 248–255, 2016.
- [28] A. Kisasoz, K. A. Guler, and A. Karaaslan, "Influence of orbital shaking on microstructure and mechanical properties of A380 aluminium alloy

- produced by lost foam casting," Russ. J. Non-Ferrous Met., vol. 58, no. 3, pp. 238–243, 2017.
- [29] K. Öztürk and S. Çubuk, ""Alüminyum döküm alaşımlarında katılaşma hızı ve ısıtma işlemlerinin etkisi," Yıldız Teknik Üniversitesi, 2017.
- [30] T. Alam and A. H. Ansari, "Review on Aluminium and Its Alloys for Automotive Applications," Int. J. Adv. Technol. Eng. Sci., no. May, 2017.
- [31] Wessel JK, "Handbook of advanced materials: enabling new designs," New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004, p. 292.
- [32] S. Ölmez, "Alüminyum esaslı alaşımların yüksek sıcaklıkta aşınma davranışlarının incelenmesi," Yıldız Teknik Üniversitesi, 2016.
- [33] Y. Darıdereli, "Alüminyum alaşımlarının mikroyapı, mekanik özellikler ve aşınma direncine yaşlanmanın etkisi," İstanbul Üniversitesi, 2010.
- [34] "Aluminum Casting Processes :: Total Materia Article." [Online]. Available: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=59>. [Accessed: 01-Dec-2018].
- [35] J. Davis, "Alloying: understanding the basics," Mater. Sci. Technol., pp. 192–203, 2001.
- [36] T. A. Başer, "Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı," Mühendis ve Makina, vol. 53, no. 635, pp. 51–58, 2012.
- [37] J. G. Kaufman, "Introduction to Aluminum Alloys and Tempers," ASM Int., p. 237, 2000.
- [38] O. Güven, "Alüminyum silisyum magnezyum döküm alaşımlarının yapı incelemesi," p. 77, 2005.
- [39] D. Apelian, "Aluminum Cast Alloys: Enabling Tools for Improved Performance," 2009.
- [40] A. T. A. Inc, Aluminum Alloy Selection and Application. 1998.
- [41] F. Fracasso, "Influence of quench rate on the hardness obtained after artificial ageing of an Al-Si-Mg alloy," pp. 1–62, 2010.
- [42] R. S. Rana, R. Purohit, and S. Das, "Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites," Int. J. Sci. Res. Publ., vol. 2, no. 6, pp. 1–7, 2012.
- [43] O. S. I. Fayomi, A. P. I. Popoola, and N. E. Udoeye, "Effect of Alloying Element on the Integrity and Functionality of Aluminium-Based Alloy," Alum. Alloy. - Recent Trends Process. Charact. Mech. Behav. Appl., 2017.
- [44] J. A. Taylor, D. H. St John, J. Barresi, and M. J. Couper, "An empirical analysis of trends in mechanical properties of T6 heat treated Al-Si-Mg casting alloys," Int. J. Cast Met. Res., vol. 12, no. 6, pp. 419–430, May 2000.
- [45] J. Taylor, "The effect of iron in Al-Si casting alloys," 35th Aust. Foundry Inst. Natl. Conf., no. December, pp. 148–157, 2004.

- [46] S. Nayak and A. Karthik, "Synthesis of al-si alloys and study of their mechanical properties," *Mater. Eng.*, pp. 1–61, 2011.
- [47] M. Zamani, "Al-Si Cast Alloys - Microstructure and Mechanical Properties at Ambient and Elevated Temperature Al-Si Cast Alloys - Microstructure and Mechanical Properties at Ambient and Elevated Temperature," Jönköping University, 2015.
- [48] M. M. Makhlof and H. V. Guthy, "The aluminum – silicon eutectic reaction : mechanisms and crystallography," vol. 1, no. 2001, pp. 199–218, 2002.
- [49] M. Warmuzek, *Aluminum–Silicon Casting Alloys-Atlas of Micro-Fractographs*. 2004.
- [50] P. Surajit, "Microstructure And Mechanical Property Of Al-Si Alloy," 2016.
- [51] J. U. Ejiofor and R. G. Reddy, "Developments in the processing and properties of particulate Al-Si composites," *Jom*, vol. 49, no. 11, pp. 31–37, 1997.
- [52] Y. Harada, S. Tamura, and S. Kumai, "Effects of High-Temperature Solutionizing on Microstructure and Tear Toughness of A356 Cast Aluminum Alloy," *Mater. Trans.*, vol. 52, no. 5, pp. 848–855, 2011.
- [53] C. Daniele, "The Grain Refinement and the Ni / V Contamination in the A356 Aluminium Casting Alloy : an Experimental Study on Impact and THE GRAIN Refinement And The Ni / V," no. September, p. 128, 2013.
- [54] ASM Handbook;"Casting", vol. 15, 1988.
- [55] K. A. Guler, *Lost Foam Casting (Disposable Pattern)*, no. April 2015. Elsevier Ltd., 2016.
- [56] "Cavityless casting mold and method of making same," Apr. 1956.
- [57] "Method of casting," Feb. 1964.
- [58] A. Üster, "Dolu Kaliba Döküm Yöntemi İle Hücresel Metal Üretimi," Yıldız Teknik Üniversitesi, 2010.
- [59] B. V. Omidiji, "Evaporative Pattern Casting (EPC) Process," *Adv. Cast. Technol.*, vol. 6, 2018.
- [60] S. Kara, "Alüminyum dolu kaliba döküm uygulamalarında model yoğunluğunun poroziteye etkisi," Yıldız Teknik Üniversitesi, 2015.
- [61] J. R. Brown, "Foseco Ferrous Foundryman ' s Handbook Foseco Ferrous Foundryman ' s Handbook Edited by."
- [62] "The Evaporative Pattern Casting Process" , *Cast Metal Times*, June/July 2002, ss. 13-14
- [63] M. B. Asmael, "Lost foam casting of LM6-Al-Si cast alloy " We hereby declare that We have read this thesis and in our opinion this thesis is sufficient in terms of scope and quality for the award of the degree of Master of Engineering (Mechanical - Advanced Manufacturi," no. November, 2014.
- [64] X. Liu, "Experimental and computational study of fluid flow and heat transfer in the lost foam casting process," Auburn University, 2005.

- [65] T. V. Molibog and T. Vitalyevich, "Modeling of metal/pattern replacement in the lost foam casting process," ProQuest Diss. Theses; Thesis (Ph.D.)--The Univ. Alabama Birmingham, 2002.; Publ. Number AAI3053272; ISBN 9780493676883; *Source Diss. Abstr. Int. Vol. 63-05, Sect. B, page 2539.; 157 p.*, 2002.
- [66] M. J. Ainsworth, "Metal-Foam Interface Stability During the Filling of Lost Foam Moulds with Aluminium Alloys," no. September, 2010.
- [67] Z. Zhao, Z. Fan, X. Dong, B. Tang, D. Pan, and J. Li, "Influence of mechanical vibration on the solidification of a lost foam cast 356 alloy," *China Foundry*, vol. 7, no. 1, pp. 24–29, 2010.
- [68] C. Uluç, "Dolu Kalıba Döküm Teknolojisi Ve Uygulanması," Yıldız Teknik Üniversitesi, 2006.
- [69] S. G. Shabestari and F. Shahri, "Influence of modification, solidification conditions and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy," *J. Mater. Sci.*, vol. 39, no. 6, pp. 2023–2032, 2004.
- [70] F. Baypınar, "Alüminyum döküm alaşımlarına Al5Ti1B ile Tane İnceltme İşlemi Uygulanması," Gazi Üniversitesi, 2005.
- [71] T. Ziya, "Al-4,5 Cu Döküm Alaşımlarında Tane İnceltme İşleminin Etkisinin Zamanla Değişiminin İncelenmesi," Gazi Üniversitesi, 2014.
- [72] B. Cantor and K. O'reilly, *Solidification and casting*, vol. 53. 1989.
- [73] J. Deshpande, "The Effect of Mechanical Mold Vibration On the Characteristics of Aluminum Alloys," Worcester Polytechnic Institute, 2006.
- [74] "Kalıp ve Maça Boyaları Disopast 7061."

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: kiliccoznur@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. Ö. Kılıç, S. Acar, K. A. Güler, The Effect of Orbital Shaking on the Microstructure of Lost Foam Cast A356 Aluminium Alloy, 9th International Aluminium Symposium, İstanbul, Türkiye, 10-11 Ekim 2019, ss. 256-260

