ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜNDE KULLANILAN SIVI METAL TEMİZLEME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Muhammet Emin KESKİN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU

2025

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜNDE KULLANILAN SIVI METAL TEMİZLEME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet Emin KESKİN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU

BAYBURT - 2025

KABUL VE ONAY

Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU danışmanlığında, Muhammet Emin KESKİN tarafından hazırlanan "Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Kullanılan Sıvı Metal Temizleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması" başlıklı bu çalışma, 20.01.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Engin ERBAYRAK ……

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU ……

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇATAR ……

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..…/..…/20… tarih ve 20…../…..-….. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Bünyamin ALIM
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU danışmanlığında hazırlamış olduğum "Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Kullanılan Sıvı Metal Temizleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması" başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımı kabul edeceğimi beyan ederim.

20.01.2025

Muhammet Emin KESKİN

ÖN SÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana yol gösteren, değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkı sağlayan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU'ya en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, akademik gelişimime büyük destek olmuş, yol gösterici tavsiyeleri ve bilgi birikimiyle tezimin şekillenmesine önemli katkılarda bulunmuştur.

Ayrıca, çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübeleriyle desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Murat ÇOLAK'a teşekkür ederim. Kendisinin sağladığı yönlendirmeler ve akademik katkılar, bu çalışmanın ilerlemesinde büyük rol oynamıştır.

Bu süreçte yanımda olan, beni her zaman destekleyen ve cesaretlendiren başta rahmetli babam olmak üzere sevgili annem, abim, ablam ve kardeşime en derin teşekkürlerimi sunarım. Onların varlığı, bana her zaman güç ve motivasyon kaynağı olmuştur.

Bu tez, bana katkı sağlayan değerli hocalarım ve desteklerini her daim hissettiren ailemin emeğiyle şekillenmiştir. Her birine şükranlarımı sunarım.

Muhammet Emin KESKİN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜNDE KULLANILAN SIVI METAL TEMİZLEME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Muhammet Emin KESKİN

Bayburt Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU
Bayburt-2025, Sayfa: 72

Alüminyum ve alaşımları, hafiflik, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, mükemmel korozyon direnci ve üstün geri dönüştürülebilirlik özellikleri sayesinde modern endüstrinin en yaygın kullanılan mühendislik malzemeleri arasında yer almaktadır. Alüminyum, birincil kaynaklardan veya geri dönüştürülmüş malzemelerden üretilmektedir. Geri dönüştürülmüş alüminyumun kullanımı hem sürdürülebilirlik hem de maliyet açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Fakat alüminyumun genel performansını etkileyen safsızlıklar, oksit tabakaları, inklüzyonlar ve hidrojen gazı gibi istenmeyen unsurlar içerebilmektedir. Alüminyum döküm süreçlerinde bu safsızlıkların sıvı metal temizleme yöntemleriyle giderilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada alüminyum alaşımlarının dökümünde kullanılan farklı sıvı metal temizleme yöntemlerinin etkinliği ile ilgili deneysel araştırma yapılmıştır. Bu bağlamda ergimiş hurda A356 alaşımının flaks, sabit lans ve döner tip gaz giderme yöntemleri ile sıvı metal temizliği yapılarak dökümleri gerçekleştirilmiştir. Döküm deneylerinde vakum altında katılaştırma (VAK), K-mold, spiral akıcılık ve mekanik test kalıpları kullanılarak numuneler üretilmiştir. Her yöntemin sıvı metal içindeki inklüzyonları ve gazları ne ölçüde giderdiği; mikroyapı analizleri, mekanik testler, yoğunluk ölçümleri ve akıcılık testleri ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda döner tip gaz giderme yönteminin, flaks ve sabit lans yöntemlerine kıyasla sıvı metal temizleme işlemlerinde daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: A356 alaşımı, sıvı metal temizleme, döner tip gaz giderme, sabit lans, flaks, K-mold, VAK, spiral akıcılık.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

COMPARISON OF LIQUID METAL CLEANING METHODS USED IN CASTING OF ALUMINUM ALLOYS

Muhammet Emin KESKİN

Bayburt University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Emin USLU
Bayburt-2025, Pages: 72

Aluminum and its alloys are among the most widely used engineering materials in modern industry due to their lightness, high strength/weight ratio, excellent corrosion resistance and superior recyclability properties. Aluminum can be produced from primary sources or recycled materials. The use of recycled aluminum provides significant advantages in terms of both sustainability and cost. However, it may contain undesirable elements such as impurities, oxide layers, inclusions and hydrogen gas that affect the overall performance of aluminum. Removal of these impurities through liquid metal cleaning methods is of great importance in aluminum casting processes. In this study, an experimental investigation was conducted on the effectiveness of different liquid metal cleaning methods used in the casting of aluminum alloys. In this context, molten A356 alloy from the scrap was cast by applying liquid metal cleaning by flux, fixed lance, and rotary type degassing methods. Then, samples were produced by using the reduced pressure test (RPT), the K-mold, spiral fluidity, and mechanical test molds in casting experiments. The effectiveness of each method in removing inclusions and gases from the liquid metal was evaluated by microstructure analysis, mechanical tests, density measurements, and fluidity tests. As a result of the study, it was determined that the rotary type degassing method was more effective in liquid metal cleaning processes compared to the flux and fixed lance methods.

Keywords: A356 alloy, liquid metal cleaning, rotary degassing, fixed lance, flux, K-mold, RPT, spiral fluidity.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY ..... **II**
BEYANNAME ..... **III**
ÖN SÖZ... ..... **IV**
ÖZET…... ..... **V**
ABSTRACT ..... **VI**
İÇİNDEKİLER ..... **VII**
TABLOLAR ..... **IX**
ŞEKİLLER ..... **X**
KISALTMALAR ..... **XII**
SİMGELER ..... **XII**
GİRİŞ **1**
Araştırmanın Konusu ve Problemi 2
Araştırmanın Amacı 2
Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi 2
Araştırmanın Sınırlılıkları 3
Terim ve Tanımları 3
BİRİNCİ BÖLÜM **4**
1. KURAMSAL ÇERÇEVE **4**
1.1. ALÜMİNYUM 4
1.2. ALÜMİNYUMUN FİZİKSEL, KİMYASAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ 5
1.3. ALÜMİNYUMUN ÜRETİM SÜREÇLERİ 7
1.3.1. Birincil Alüminyum Üretimi 7
1.3.2. İkincil Alüminyum Üretimi 8
1.4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI 9
1.4.1. Dövme İşlemine Göre Sınıflandırma 9
1.4.2. Döküm İşlemine Göre Sınıflandırma 10
1.5. ALÜMİNYUM SIVI METALİN KALİTESİ 10
1.5.1. Gazlar 11
1.5.2. Hidrojen 11
1.5.3. İnklüzyonlar 13
1.5.4. Oksit Filmler 15
1.5.5. Gözeneklilik 16
1.6. SIVI METAL TEMİZLEME YÖNTEMLERİ 17
1.6.1. Flakslar 18
1.6.2. Döner Tip Gaz Giderme 19
1.6.3. Kontrollü Karıştırma Yöntemi 21
1.6.4. Elektro Manyetik Yönlü Gaz Giderme 21
1.6.5. Sprey ile Gaz Giderme 23
1.6.6. Ultrasonik Gaz Giderme 24
1.6.7. Vakumlu Gaz Giderme 25
1.6.8. Sabit Lans ile Gaz Giderme 25
1.7. SIVI ALÜMİNYUM KALİTE TESTLERİ 26
1.7.1. Termal Analiz Yöntemi 27

1.7.2. X Işını Yöntemi 27
1.7.3. Tatur Test Yöntemi 28
1.7.4. Akıcılık Testi 29
1.7.5. Ultrasonik Test 30
1.7.6. Prefil Footprinter, PoDFA, Qualiflash Test 31
1.7.7. Elektriksel Direnç Testi 32
1.7.8. Vakum Altında Katılaştırma (VAK) Testi 33
1.7.9. K-mold Testi 34
İKİNCİ BÖLÜM 36
2. YÖNTEM 36
2.1. MATERYAL 36
2.2. YÖNTEM 36
2.2.1. Ergitme İşlemi 37
2.2.2. Sıvı Metal Temizleme İşlemleri 38
2.2.3. Döküm İşlemleri 39
2.2.4. Döküm Numunelerinin İncelenmesi 40
2.2.4.1. VAK testi numunelerinin incelenmesi 40
2.2.4.2. K-mold deney numunelerinin incelenmesi 43
2.2.4.3. Spiral akıcılık numunelerinin incelenmesi 43
2.2.4.4. Mekanik testler 43
2.2.4.5. Mikroyapı incelemeleri 45
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM 46
3. BULGULAR 46
3.1. SIVI METAL KALİTESİNİN ANALİZİ 46
3.2. AKICILIK TESTİ SONUÇLARI 51
3.3. MEKANİK TESTİ SONUÇLARI 53
3.3.1. Çekme Testi Sonuçları 53
3.3.2. Sertlik Testi Sonuçları 56
3.4. MİKROYAPI İNCELEMELERİ 57
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER 60
KAYNAKÇA 62
ÖZ GEÇMİŞ 72

TABLOLAR

Tablo 1: Alüminyumun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri **6**
Tablo 2: Alüminyumun Mekanik Özellikleri **6**
Tablo 3: Birincil Alüminyum ve İkincil Alüminyum Üretim Süreçlerinin Karşılaştırması **9**
Tablo 4: Alüminyum Alaşımlarının Dövme ve Döküm İşlemine Göre Sınıflandırılması **10**
Tablo 5: A356 Hurda Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi **36**
Tablo 6: Sıvı Metal Temizleme Yöntemlerinin Parametreleri **38**
Tablo 7: VAK Numunelerinin Yoğunluk ve Gözenek Verileri **47**
Tablo 8: K-mold Testi Verileri **51**

ŞEKİLLER

Şekil 1: Bayer Prosesi ve Hall-Héroult Prosesi **8**
Şekil 2: Kullanım Ömrünü Tamamlamış Çeşitli Alüminyum Hurdaları **9**
Şekil 3: Hidrojen Gözenekleri **13**
Şekil 4: Alüminyum Alaşımlarındaki İnklüzyon Örnekleri **14**
Şekil 5: Alüminyum Alaşımının Yüzeyin Oluşan Oksit Filmin Şematik Görünümü **16**
Şekil 6: 319 Alaşımındaki Gözenekliliğin Optik Mikro Yapısı **17**
Şekil 7: Endüstride Kullanılan Bazı Flakslar **19**
Şekil 8: Döner Tip Gaz Giderme Metodunun Şematik Gösterimi **20**
Şekil 9: Kontrollü Karıştırma Yöntemi **22**
Şekil 10: Elektromanyetik Gaz Giderme Tekniği **22**
Şekil 11: Sprey ile Gaz Giderme Tekniği **24**
Şekil 12: a) Durgun Su, b) Ultrasonik Titreşim Altında Su **24**
Şekil 13: Geleneksel Vakumlu Gaz Giderme Yönteminin Şematik Gösterimi **25**
Şekil 14: Tatur Test Kalıbı ve Test Numuneleri **28**
Şekil 15: Örnek Spiral Akıcılık Test Numuneleri **29**
Şekil 16: Ultrasonik Testinin Şematik Gösterimi **30**
Şekil 17: a) PODFA Yöntemi, b) Qualiflash Cihazı ve c) PREFIL-Footprinter Çalışma Prensibi **31**
Şekil 18: LiMCA Testinin Şematik Gösterimi **32**
Şekil 19: VAK Test Cihazı ve Şematik Gösterimi **34**
Şekil 20: K-mold a) Kalıbı, b) Numunesi ve c) Kırık Yüzey Görüntüleri **34**
Şekil 21: K-mold Kırık Yüzeyler; a) Birincil Alüminyum, b) Yolluk Hurdaları, c) Basınçlı Döküm Yöntemi ve d) İkincil Alüminyum **35**
Şekil 22: a) Kesilmiş Hurda A356 Alaşımı ve b) KCl, c) NaF, d) KF, e) $MgCl_2$ Kimyasalları **36**
Şekil 23: Deneysel Çalışmalar Sürecinde Yapılan İşlemler **37**
Şekil 24: Elektrik Direnç Ocağı ve Gaz Giderme Ünitesi **38**
Şekil 25: Sıvı Metal Temizleme Yöntemlerinin Şematik Gösterimi **39**
Şekil 26: Test Kalıpları ve Yerleşimi **40**
Şekil 27: Vakum Altında Katılaştırma (VAK) Testi Cihazı **41**
Şekil 28: Yoğunluk Ölçüm Deneyi; a) Havada ve b) Suda Tartım İşlemi **41**
Şekil 29: VAK Numune Kesim Görselleri **42**
Şekil 30: Image J Yazılımı ile VAK Testi Numunesi Görüntüsünün Analiz Edilmesi **42**
Şekil 31: Spiral Akıcılık Numunesinin Uzunluk Ölçümü **43**
Şekil 32: Çekme Çubuğu Ölçüleri ve Torna Tezgâhında Döküm Numunenin İşlenmesi **44**
Şekil 33: Çekme Testi **44**
Şekil 34: Sertlik Testi **45**
Şekil 35: a) Zımparalama Parlatma Cihazı ve b) Optik Mikroskop **45**
Şekil 36: VAK Numuneleri **46**
Şekil 37: VAK Numuneleri Kesit Yüzey Görüntüleri **48**
Şekil 38: VAK Numunelerinin Bifilm Analiz Sonuçları **48**
Şekil 39: K-mold Numuneleri **50**
Şekil 40: K-mold Numunelerinin Kırık Yüzey Görüntüleri **50**

Şekil 41: Spiral Akıcılık Numuneleri.....**52**
Şekil 42: Spiral Akıcılık Sıvı Metal İlerleme Mesafeleri.....**52**
Şekil 43: Mekanik Test Numuneleri **53**
Şekil 44: Çekme Testi Sonuçları.....**54**
Şekil 45: Sertlik Testi Sonuçları **56**
Şekil 46: 50X Büyütmede Çekilen Mikroyapı Resimleri **57**
Şekil 47: 100X Büyütmede Çekilen Mikroyapı Resimleri **58**
Şekil 48: 200X Büyütmede Çekilen Mikroyapı Resimleri **59**

KISALTMALAR

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials)
DC	: Doğru Akım
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
HB	: Brinell Sertlik
LIMCA	: Sıvı Metal Temizlik Analizörü (Liquid Metal Cleanliness Analyser)
PoDFA	: Gözenekli Disk Filtrasyon Analizi (Porous Disc Filtration Apparatus)
PREFIL	: Basınçlı Filtrasyon (Pressure Filtration)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TA	: Termal Analiz
VAK (RPT)	: Azaltılmış Basınç Testi (Reduced Pressure Tet)
XRT	: X Işını Tomografisi

SİMGELER

°C	: Santigrat Derece
µm	: Mikrometre
Al	: Alüminyum
Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
Ar	: Argon
C_2Cl_6	: Hekzakloroetan
Cl	: Klor
cm	: Santimetre
Cu	: Bakır
dev	: Devir
dk	: Dakika
dn	: Döküm numunenin yoğunluğu
ds	: Saf suyun yoğunluğu
Fe	: Demir
g	: Gram
H_2	: Hidrojen
H_2S	: Hidrojen Sülfür
HCl	: Hidroklorik Asit
He	: Helyum

HF : Hidroflorik asit
HNO_3 : Nitrik Asit
K : K-mold değeri
KCl : Potasyum Klorür
KF : Potasyum Florür
kgf : Kilogram kuvvet
kJ : Kilojoule
kN : Kilonewton
lt : Litre
m : Metre
mbar : Milibar
Mg : Magnezyum
$MgCl_2$: Magnezyum Klorür
mh : Numunenin havadaki ağırlığı
ml : Mililitre
mm : Milimetre
Mn : Manganez
MPa : Megapaskal
ms : Numunenin sudaki ağırlığı
N_2 : Azot
NaF : Sodyum Florür
NaOH : Sodyum Hidroksit
NH_3 : Amonyak
Ni : Nikel
Pb : Kurşun
Si : Silisyum
SiC : Silisyum Karbür
Sn : Kalay
SO_2 : Kükürt Dioksit
Ti : Titanyum
W : Watt
Zn : Çinko
ε : Birim şekil değiştirme
σ : Gerilme

GİRİŞ

Günümüzün modern endüstriyel ortamında, hafifliği üstün mekanik özelliklerle birleştiren bileşenlere ve komponentlere olan talep, giderek daha kritik hale gelmektedir. Gün geçtikçe alüminyum ve alüminyum alaşımları, CO_2 emisyonlarını düşüren ve zararlı gazların çevreye salınımını sınırlayan alaşımların kullanılmasıyla birlikte diğer sektörlerde olduğu gibi döküm sektöründe de önemli bir yer edinmektedir.

Alüminyum ve alaşımları, hafifliği ve üstün mekanik özellikleri gibi önemli avantajları sayesinde otomotiv ve ulaşım araçlarında kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ayrıca, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının döküm sektöründe paydaşlarına oranla giderek artan kullanımı, alüminyumun üstün dökülebilirlik, güçlü korozyon direnci, mükemmel mekanik özellikleri ve düşük yoğunluk gibi özelliklerine atfedilebilir. Bunlara ek olarak alüminyum alaşımları gelişen teknolojik uygulamalar sayesinde havacılık ve savunma sanayinde de yoğun olarak kullanılmaktadır.

Birincil ve ikincil alüminyum olarak kategorize edilen alüminyum ve alaşımları, üretim süreçlerinde kullanılmaktadır. Özellikle geri dönüştürülmüş alüminyumun (ikincil alüminyum) kullanımı, hükümetler ve araştırmacılar tarafından çevre koruma, enerji kaynaklarının korunması ve enerji tasarrufu için önemli kabul edilmektedir.

Alüminyum ve alaşımlarındaki sıvı metal kalitesi döküm endüstrisinde kritik bir rol oynamasına rağmen, ikincil alüminyum sektörün saflık gereksinimlerini karşılama konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple ikincil alüminyumun geri dönüşümüne ve geri dönüştürülen ikincil alüminyumun saflığının artırılmasına yönelik çalışmalar büyük önem taşımaktadır.

Yüksek kalitede alüminyum dökümü için büyük ölçüde bifilmlerden ve bifilmleri açan maddelerden (demir içeren fazlar ve metaller arası bileşiklerde çözünmüş hidrojenler) arındırılmış bir eriyikle başlamak gerekmektedir.

Alüminyum alaşımlarındaki safsızlıklar üç ayrı kategoride incelenebilir: İlk kategori de çözünmüş hidrojen, ametal oksit filmleri ve çeşitli diğer safsızlık elementleri bulunur (Ör: Cl ve Fe). Alaşımın mikro yapısı ve özellikleri, hidrojen ve ametal oksit filmlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu safsızlıklar sıvı metalin akışkanlığının azalmasına ve alaşımda mikro oranda gözeneklilik oluşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca çatlakların ve metalde sert noktaların oluşmasına da neden olabilmektedir. Bu durumlar ile birlikte işlenebilirlik, yüzey kalitesi ve dökümün mekanik özellikleri olumsuz anlamda etkilenecektir. Bu sebeple, sıvı alüminyumun içeriğinden çözünmüş hidrojen ve inklüzyon miktarını azaltmak veya arındırmak gerekmektedir.

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Alüminyum alaşımlarında, özellikle A356 gibi döküm endüstrisinde yaygınca kullanılan türlerde, sıvı metal içerisindeki oksit filmler, gazlar ve diğer safsızlıkların varlığı, alaşımın mekanik özelliklerini, akışkanlığını ve yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Sıvı alüminyumun temizleme işlemleri, metalurjik kaliteye doğrudan etki eden kritik bir aşamadır. Alüminyum alaşımlarının, safsızlık oluşturan bileşenlerden arındırılması ve mikroyapısal yönden iyileştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma, A356 alaşımının sıvı metal saflaştırma süreçlerinde kullanılan üç farklı yöntemin etkinliklerinin deneysel olarak farklı kalıplar ve test yöntemleri sayesinde karşılaştırılması konusunu ele almaktadır. Söz konusu yöntemlerin gaz giderme, cüruf uzaklaştırma ve mikroyapı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenerek performans farklılıkları bilimsel bir çerçevede değerlendirilmektedir.

Araştırmanın Amacı

Literatürde sıvı metal temizleme işlemleri için farklı proseslerin varlığı bilinmektedir. Öte yandan uygulanan bu proseslerin sıvı metal kalitesine olumlu anlamda etki ettiği görülmektedir. Fakat bu yöntemlerin etkinliklerinin karşılaştırmalı bir analizi sınırlı düzeydedir. Bu bağlamda, sabit lans, flaks ve döner tip gaz giderme tekniklerinin A356 alaşımı üzerinde sunduğu performansın deneysel olarak incelenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Çalışma, yöntemler arasındaki avantaj ve dezavantajların bilimsel temellerle açıklanmasını ve en uygun temizleme tekniğinin farklı testlere dayandırılarak belirlenmesini hedeflemektedir. Bu kapsamda çalışmanın; ekonomik, operasyonel ve teknik değerlendirmeler dikkate alındığı zaman literatüre katkı sağlaması amacı ortaya çıkmaktadır.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Mikroyapı kalitesi açısından, sıvı metalde bulunan hidrojen gazı ve oksit cürufları gibi safsızlıklar, döküm sırasında gözenek oluşumuna ve mikroyapısal heterojenliklere yol açmaktadır. Bu durum, malzemenin yorulma dayanımını ve mukavemetini olumsuz yönde etkileyerek ürün ömrünü kısaltmaktadır. Temizlenmiş metal, homojen bir mikroyapı sağlayarak döküm parçalarının mekanik özelliklerini iyileştirir ve öngörülebilir bir performans sunmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe kullanılan jant ve süspansiyon parçaları gibi bileşenlerde, bu özellikler güvenlik ve dayanıklılık açısından hayati önem taşımaktadır.

Sıvı metal temizliği aynı zamanda üretim verimliliğini ve maliyet etkinliğini artırmaktadır. Safsızlıkların uzaklaştırılması, döküm hatalarının azalmasını sağlayarak yeniden işleme ve hurda oranlarını düşürmektedir. Bu hem üretim süresini kısaltmakta hem de maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca, temizlenmiş metalin viskozitesi ve akışkanlığı iyileşir, bu da

kalıp dolumunu kolaylaştırarak daha kusursuz bir döküm elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu süreç, döküm performansını optimize etmekle kalmaz, aynı zamanda uluslararası kalite standartlarını karşılamayı da mümkün kılmaktadır.

Çevresel ve ekonomik etkiler bağlamında, sıvı metal temizliği malzeme israfını azaltarak daha sürdürülebilir bir üretim sağlamaktadır. Az hurda miktarı ve geri dönüşüm gerekliliği, enerji tüketimini düşürerek çevresel yükü azaltmaktadır. Ayrıca, malzemenin temizliği, korozyon direncini artırır ve bu da özellikle otomotiv sektöründe çevresel koşullara dayanıklı bileşenlerin üretimi bakımından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Sonuç olarak, A356 alüminyum alaşımında sıvı metal temizleme yalnızca yüksek kaliteli ve güvenilir dökümlerin üretilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği teşvik ederken üretim süreçlerinin maliyet verimliliğini de artırmaktadır. Bu nedenle, sıvı metal temizliğinin optimize edilmesi, A356 alaşımının endüstriyel uygulamalarda başarıyla kullanılabilmesi için vazgeçilmez bir unsur olmaktadır.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Bu çalışmada incelenen çeşitli sıvı metal temizleme yöntemlerinin etkinliği laboratuvar testleriyle değerlendirilmiştir. Ancak bu sonuçların endüstriyel ölçekli üretim proseslerine uygulanabilirliği sınırlı olabileceği düşünülmektedir. Üretim koşullarındaki farklılıklar ve diğer faktörler bu temizleme yöntemlerinin performansını etkileyerek pratik uygulamalarda farklı sonuçlara yol açabiliceği tahmin edilmektedir.

Terim ve Tanımları

Döküm; ergimiş metalin belirli bir şekil oluşturmak için bir kalıba döküldüğü işlemdir.

Kokil kalıp; alüminyum dökümünde kullanılan bir araçtır. Metalin soğudukça katılaşmasını ve şeklini almasını sağlamaktadır.

Flaks; metal yüzeyinde oksitlenmeyi önlemek ve sıvı metal temizliğini artırmak için döküm sırasında uygulanan kimyasal bir maddedir.

Sabit lans ile gaz giderme; ergimiş svı metal içerisindeki kirlilikleri ve oksitleri uzaklaştırmak için kullanılan sıvı metal temizleme yöntemidir.

Döner tip gaz giderme; ergimiş metalden çözünmüş gazları ve safsızlıkları gidermek için kullanılan bir sıvı metal temizleme yöntemidir.

Vakum altında katılaştırma (VAK) testi; alüminyum dökümlerdeki gaz (hidrojen) gözenekliliğini kontrol etmek için dökümhanelerde kullanılan ucuz ve etkili bir tekniktir.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. KURAMSAL ÇERÇEVE

1.1. ALÜMİNYUM

Alüminyumun keşfinin gecikmesinin sebebi doğada saf halde bulunmamasıdır. Esas olarak boksit minaralinde (Al_2O_3-NH_2O) yer almaktadır. Alüminyum ilk kez 1825 yılında tanımlanmış olmasına rağmen, yaygın kullanımı ancak tutarlı ve verimli bir üretim sürecinin geliştirilmesinden sonra başlamıştır (Totten & MacKenzie, 2003; Yıldırım, 2006).

1886 yılında Charles Hall ve Paul Héroult bağımsız olarak birincil alüminyum üretimi için ekonomik bir erimiş tuz elektroliz prosesi geliştirmişlerdir. Ayrı ayrı çalışmalarına rağmen, her iki bilim adamı da yöntemlerini benzer temel ilkelere dayandırarak, bugün Hall-Héroult süreci olarak bilinen yöntemin eşzamanlı olarak icat edilmesini sağlamışlardır. Günümüzde alüminyum üretimi için birincil teknik olmaya devam eden bu yöntem, erimiş tuzların kullanıldığı bir elektroliz işlemi olarak tanımlanmaktadır (Totten & MacKenzie, 2003; Yıldırım, 2006).

Bir başka çalışmada Karl Josef Bayer 1887 yılında, boksit madeninden alümina (Al_2O_3) elde etmek için kimyasal bir süreç geliştirmiştir. Günümüzde Bayer süreci olarak bilinen bu süreç, boksitten verimli bir şekilde alümina üretilmesini sağlamaktadır (Totten & MacKenzie, 2003; Yıldırım, 2006).

Adolf Hitler'in rejimi sırasında Almanya alüminyum üretiminde dünya lideri olarak ortaya çıkmıştır. Ancak 1942 yılına gelindiğinde, yeni hidroelektrik santral projelerinin başlamasıyla birlikte ABD, Almanya'yı geride bırakarak dünyanın en büyük alüminyum üreticisi haline gelmiştir (Matweb, 2021; Binczewski, 1995; Demirci, 2012).

Alüminyumun atom numarası 13'tür ve periyodik tabloda 3A grubunda yer almaktadır. Atom ağırlığı 26,981538 g/mol olup, atomik ve iyonik çapları sırasıyla 1,43 Å ve 0,86 Å'dur. Alüminyumun kristal yapısı, 658°C'lik erime sıcaklığına kadar kararlı kalan yüzey merkezli kübiktir (Sarsılmaz, 2008).

Al sembolü ile temsil edilen alüminyum, doğada en çok bulunan üç elementten biridir. Hafifliği, dayanıklılığı, yüksek seviyelerde elektrik iletkenliği ve kolay dökülebilirliği onu farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılan bir hammadde haline getirmektedir. Doğada alüminyum, dünya yüzeyine yakın yerlerde kırmızımsı, kil benzeri boksit cevheri yatakları içinde bulunur. Boksitin endüstriyel rafinasyonu, NaOH ve bir elektrolit kullanılarak elektroliz uygulamasını içerir ve alümina elde edilir (Davis, 1993; Shakhashiri, 2000).

Alüminyum, demir ve çelikten sonra dünya genelinde en yaygın kullanılan metaldir. Yaygın kullanımı, çok çeşitli malzeme performansı gereksinimlerini karşılama kabiliyetine bağlanabilir ve bu da onu modern endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen ikinci metal haline getirir (Atik, 2023).

Yerkabuğunun yaklaşık %8'ini oluşturan alüminyum (Al) karbon (C) ve silisyumdan (Si) sonra çeşitli uygulamalarda en yaygın kullanılan elementlerden biridir (Tokatlı, 2022).

Alüminyum, yüksek mukavemetleri, kolayca işlenebilirlikleri, iletkenliği ve çevre dostu olmaları sayesinde birbirinden farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hala sürmekte olan araştırmalar işlenebilirliklerini ve kaynak parametrelerini optimize etmeyi hedeflemektedir (Varshney & Kumar, 2021).

Alüminyum endüstrisi, birincil alüminyum ve ikincil alüminyum olarak iki ana üretim sürecine ayrılır. Birincil alüminyum, yerkabuğunda doğal olarak bulunan boksit cevherinden üretilir. Bu süreçte kimyasal işlemden geçirilmesini içeren Bayer prosesi yolu devreye girmektedir. Ancak bu yöntem önemli ölçüde enerji tüketimi ve önemli çevresel etkilerle ilişkilidir. Sonuç olarak, birincil alüminyum üretiminde sürdürülebilirliğe ve çevre dostu üretim yöntemlerinin benimsenmesine giderek daha fazla vurgu yapılmaktadır (Totten & MacKenzie, 2003).

İkincil alüminyumlar ise genellikle hurda olarak adlandırılan, işlevsel yaşam döngülerini tamamlamış veya amaçlarına hizmet ettikten sonra atılmış alüminyum ve alaşım ürünlerinden üretilir. Alüminyum, yüksek oranda geri dönüştürülebilir bir metaldir. Bu sayede birincil alüminyum üretiminde harcanacak enerjiye kıyasla geri dönüşüm için önemli ölçüde az enerji ihtiyacı bulunmaktadır. İkincil alüminyuma yönelik artan talep, artan enerji maliyetleri ve çevresel açıdan sürdürülebilir uygulamalara verilen önemin artmasından kaynaklanmaktadır.

Üretim proseslerine göre alüminyumdan elde edilen ürünler, ekstrüzyon ürünleri, yassı ürünler, döküm ürünleri ve iletkenlik içeren ürünler ve yarı mamul ürünler olarak sınıflandırılır.

1.2. ALÜMİNYUMUN FİZİKSEL, KİMYASAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Alüminyum mükemmel korozyon direnci gösterir. Belirli koşullara maruz kaldığında, yüzeyinde koruyucu bir alüminyum oksit (Al_2O_3) tabakası oluşturur. Bu oksit tabakası metalin korozyona direnme kabiliyetini artırır ve ek bir koruma sağlar. Ayrıca, alüminyumun saflığı özelliklerini önemli ölçüde etkiler; daha yüksek saflık seviyeleri daha iyi iletkenlik ve korozyona karşı daha fazla direnç sağlar (Vargel, 2004). Alüminyumun önemli olan bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerini içeren bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Alüminyumun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Özellik	**Açıklama**
Korozyon Direnci	Yüksek, yüzeyde oluşan Al_2O_3 tabakası sayesinde
Alaşımlanabilirlik	Çeşitli metallerle (Si, Mg, Cu, Zn) kolayca alaşımlanabilir
Damping Özelliği	Çelikten daha iyi bir sönümleme performansı sunar
Kaynaklanabilirlik	İyi, özellikle TIG ve MIG yöntemleriyle kaynak yapılabilir
Yoğunluk (Katı – Sıvı)	2,70 g/cm³-2,375 g/cm³
Ergime Sıcaklığı	660,32°C
Kaynama Noktası	2,519°C
Isıl İletkenlik	237 W/(m·K) (yüksek ısı iletkenliği)
Isıl Genleşme Katsayısı	23,1 µm/(m·K) (25°C'de)
Elektriksel Direnç	2,82 Ω·cm (20°C'de)

Alüminyumun elastikiyet modülü çelikten önemli ölçüde daha küçüktür ve çeliğin değerinin yaklaşık üçte biri kadardır. Bu özellik, büyük salınımlı yüklerle uğraşırken mühendislik hesaplamalarında avantajlar sunar. Çelikle karşılaştırıldığında, alüminyum bu tür koşullar altında daha iyi sönümleme özellikleri göstererek belirli uygulamalar için uygun bir metal haline gelmektedir (Al-Saadi & Tunay, 2017).

Alüminyumun dikkate değer avantajlarından biri de şekillendirme ve işleme kolaylığıdır. Saf alüminyum, bükme, çekme, presleme ve kalıplama gibi işlemlerin zahmetsizce gerçekleştirilmesini sağlayan yumuşaklığı ve olağanüstü işlenebilirliği ile ayırt edilir. Alüminyum alaşımları ile çalışırken bu işlemler daha da basitleştirilir. Alüminyumun bazı kritik mekanik özelliklerini içeren detaylar Tablo 2'de verilmiştir (Al-Saadi & Tunay, 2017).

Tablo 2: Alüminyumun Mekanik Özellikleri

Özellik	**Açıklama**
Elastisite Modülü (E)	69 GPa (çeliğin yaklaşık üçte biri)
Çekme Dayanımı	70-700 MPa (alaşıma bağlı olarak değişir)
Akma Dayanımı	35-400 MPa (mekanik işleme ve alaşıma bağlı olarak değişir)
Uzama Oranı	%10-%50 (alaşıma ve işlenme durumuna bağlı)
Poisson Oranı	0,33
Sertlik (Mohs Ölçeği)	2,75
Darbe Dayanımı	Yüksek darbe dayanımı ve enerji emme kapasitesi
Mukavemet-Ağırlık	Yüksek (hafifliği nedeniyle öne çıkar)

1.3. ALÜMİNYUMUN ÜRETİM SÜREÇLERİ

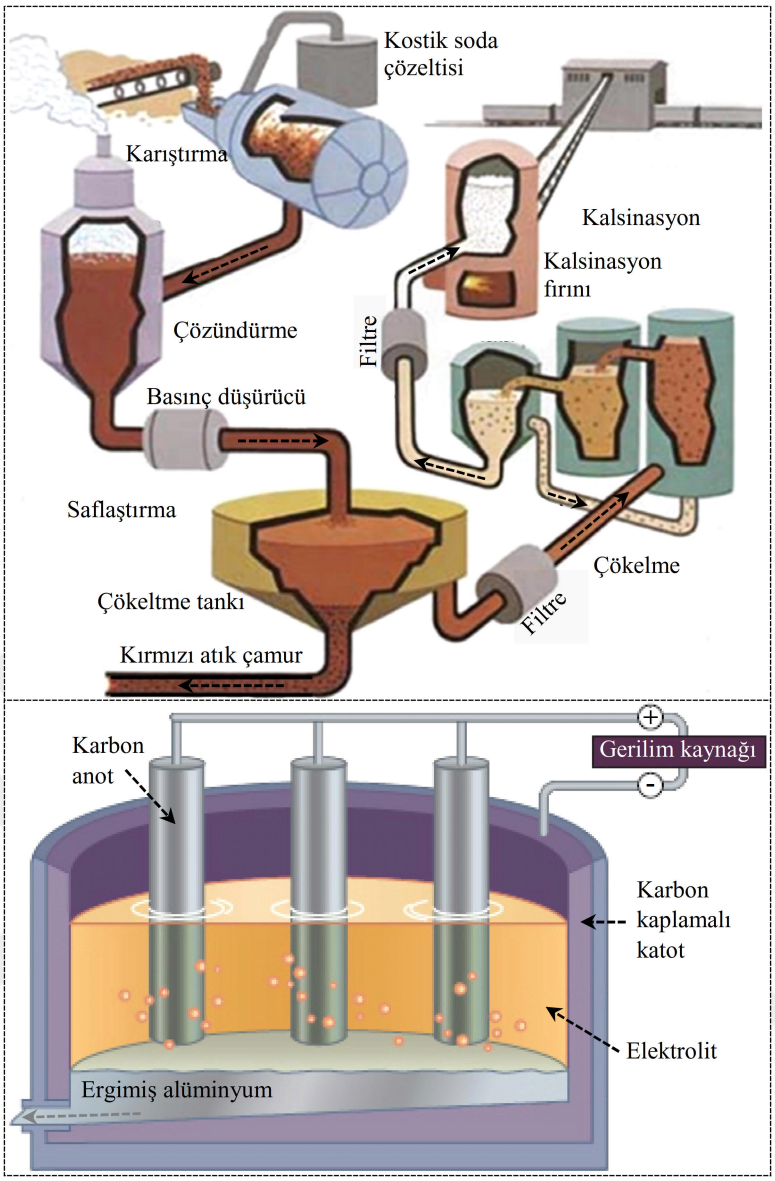
Alüminyum üretimi iki ana proses olarak kategorize edilebilir: Boksit cevherinden çıkarılmasını içeren birincil üretim ve hurda malzemelerin kullanıldığı ikincil üretim. İkincil üretim yöntemi, alüminyum kullanan sektörler için geri dönüşüm süreçlerini önemli hale getirerek enerji tasarrufu sağlamakta, hammadde maliyetlerini düşürmekte ve çevresel etkileri ise azaltmaktadır.

1.3.1. Birincil Alüminyum Üretimi

Birincil alüminyum üretim süreci temel olarak beş ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlar aşağıda maddeler halinde detaylandırılmaktadır (Car, 2011):

- Boksit cevherinin çıkarılması, alümina ve alüminyum üretimi için ihtiyaç duyulan hammaddeyi elde etmek için sistematik madencilik operasyonlarını içeren boksit madenlerinden gerçekleştirilir.
- Alümina üretimi, alüminyum üretimi için birincil ara madde olarak alümina elde etmek üzere kimyasal işleme tabi tutulan boksit cevherinin kullanılmasını içermektedir.
- Sıvı alüminyum, alüminanın erimiş tuzlar içinde çözüldüğü ve saf alüminyumu ayırmak için bir elektrik akımına tabi tutulduğu bir işlem olan alüminanın elektrolizi yoluyla elde edilir.
- Sıvı alüminyum alaşımlarının dökümü, erimiş metalin kalıplara dökülmesini ve burada katılaşarak belirli endüstriyel uygulamalara göre uyarlanmış istenen şekil ve yapıları oluşturmasını içerir.
- Döküm numunesinin nihai ürüne dönüştürülmesi, amaçlanan uygulama için gerekli olan istenen özellikleri ve spesifikasyonları elde etmek için işleme, ısıl işlem veya yüzey bitirme gibi sonraki işleme adımlarını içerir.

Alüminyum, dünyanın farklı bölgelerinden çıkarılan çeşitli minerallerin bir bileşeni olarak bulunur ve birincil alüminyum boksit cevherinden elde edilir. Ekonomik olarak değerli boksit cevheri çıkarılıp uygun boyutlarda işlendikten sonra Bayer süreci ile alümina üretilir ve yaklaşık 2,9 ton boksit 1 ton alümina verir. Hall-Héroult prosesi ise alüminyum üretiminde kullanılan temel bir elektroliz yöntemidir. Bu yöntemde, alümina (Al_2O_3), kriyolit (Na_3AlF_6) gibi erimiş tuzlar içinde çözülür ve elektroliz edilerek saf alüminyum elde edilir. Bu yöntem, alüminyum üretimi için yoğun enerjiye ihtiyaç duyulan bir süreçtir. Üretim maliyetlerinin %20'sini elektrik enerjisi oluşturmaktadır (Rai & Upadhyay, 2020; Désilets vd., 2003). Şekil 1'de Bayer prosesi ve Hall-Héroult prosesini tasvir eden şematik görseller verilmiştir.



Şekil 1: Bayer Prosesi ve Hall-Héroult Prosesi (Grjotheim & Welch, 1980; Tabereaux & Peterson, 2014)

1.3.2. İkincil Alüminyum Üretimi

İkincil alüminyum diye tabir edilen alüminyum, birincil alüminyumun çeşitli alaşımlama ve üretim yöntemleriyle değerlendirilmesinden elde edilen ancak işlevsel ömrünü tamamlamış hurda alüminyum ve alaşım ürünlerinden üretilmektedir. Alüminyum ve alaşım hurda örnekleri Şekil 2'de gösterilmektedir. Yüksek oranda geri dönüştürülebilir olan alüminyum, birincil alüminyum üretimine kıyasla geri dönüşüm için önemli ölçüde daha az enerji gerektirir. Alüminyum ve alaşımlarının geri dönüştürülmesiyle ortaya çıkan ikincil alüminyumlara olan talep, artan enerji masrafları ve çevresel açıdan sürdürülebilir uygulamalara yapılan vurgunun artması nedeniyle giderek artmaktadır.



Şekil 2: Kullanım Ömrünü Tamamlamış Çeşitli Alüminyum Hurdaları

Birincil alüminyum üretimine kıyasla karmaşık olmayan ve daha az bir masrafa sahip bir süreç olan ikincil alüminyum üretimi birkaç temel aşamadan oluşur: Hurda toplama, ayırma ve hazırlama, ergitme, alaşımlama, metal arıtma, cüruf temizleme ve döküm. Bu süreçler, ikincil alüminyum ve alaşımlarının belirli uygulamalarına dayalı olarak istenen sonuçları elde etmede maksimum verimlilik için optimize edilir. Birincil ve ikincil alüminyum üretim süreçlerinin önemli kriterler açısından karşılaştırılması Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3: Birincil Alüminyum ve İkincil Alüminyum Üretim Süreçlerinin Karşılaştırması

Kriter	**Birincil Alüminyum**	**İkincil Alüminyum**
Yatırım maliyeti	Yüksek	Düşük
Üretim süresi	Uzun	Kısa
Enerji sarfiyatı	Yüksek	Düşük
Kirli gaz salınımı	Yüksek	Düşük

1.4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Alüminyum alaşımlarının iki ana kategoride sınıflandırılması, uluslararası kabul görmüş standartlara uygun dövme ve döküm işlemlerine göre yapılmaktadır. Tablo 4'te alüminyum alaşımlarının hem dövme hem de döküm işlemlerine göre sınıflandırılması verilmiştir (Al-Saadı & Tunay, 2017).

1.4.1. Dövme İşlemine Göre Sınıflandırma

Genellikle çeşitli alaşımlar içeren alüminyum bloklar, öncelikle sürekli döküm yöntemiyle üretilir ve daha sonra homojenleştirici bir tavlamayı takiben ekstrüzyon veya haddeleme ile şekillendirilir. Dövme alaşımları, Tablo 4'te verilen görselde dört basamaklı bir sistem kullanılarak tanımlanmıştır. İlk rakam birincil alaşım elementini temsil ederken, ikinci rakam alaşımda yapılan değişiklikleri gösterir. Eğer ikinci hane sıfır ise, hiçbir değişikliğin yapılmadığı ifade edilmektedir. 1'den 9'a kadar olan rakamlar alaşımın belirli varyasyonlarını

belirtmekte ve son iki rakam aynı grup içindeki farklı alüminyum alaşımlarını ayırt etmek için kullanılmaktadır (Al-Saadı & Tunay, 2017).

Tablo 4: Alüminyum Alaşımlarının Dövme ve Döküm İşlemine Göre Sınıflandırılması

Alüminyum ve Alaşımları			
Dövme Alaşımlar		**Döküm Alaşımlar**	
Alaşım	**Ana Alaşım Elementi**	**Alaşım**	**Ana Alaşım Elementi**
1xxx	Al	1xx.x	Al
2xxx	Al – Cu	2xx.x	Al – Cu
3xxx	Al – Mn	3xx.x	Al – Si – Cu – Mn
4xxx	Al – Si	4xx.x	Al – Si
5xxx	Al – Mg	5xx.x	Al – Mg
6xxx	Al – Mg – Si	6xx.x	Kullanılmayan seriler
7xxx	Al – Zn	7xx.x	Al – Zn
8xxx	Al – Diğer	8xx.x	Al – Sn
9xxx	Kullanılmayan seriler	9xx.x	Al – Diğer

1.4.2. Döküm İşlemine Göre Sınıflandırma

Döküm, sıvı metalin bir kalıba dökülerek katılaşmasına izin verilmesiyle kalıbın istenen tasarımını alarak bir malzemeyi şekillendirme işlemidir. Metalürjide, ticari değeri olan metaller ve alaşımlar üretmek için kum döküm, alçı kalıplama, basınçlı döküm ve hassas döküm gibi çeşitli döküm metotları kullanılmaktadır. Bu yöntemler önceden şekillendirilmiş veya sonradan şekillendirilmiş ürünler üretmek için kullanılır.

Silisyum (Si) içeren alaşımlar, döküm performansını artırma yetenekleri nedeniyle döküm işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Silisyum'a ek olarak, çinko (Zn), manganez (Mn), bakır (Cu), kalay (Sn) ve nikel (Ni) gibi diğer elementler de belirli özellikler elde etmek için alüminyum döküm alaşımlarına sıklıkla dâhil edilmektedir. Tablo 4'te belirtildiği üzere, alüminyum ve alaşımları dört basamaklı sistem kullanılarak sınıflandırılmaktadır. Bu alaşımları kategorize etmek için genellikle bir ondalık nokta ile ayrılan dört basamaklı bir sayısal kodlama sistemi kullanılmaktadır (Al-Saadı & Tunay, 2017).

1.5. ALÜMİNYUM SIVI METALİN KALİTESİ

Her endüstrinin öncelikli hedefi üretim kalitesini ve verimliliğini artırmaktır. Tüm metal döküm proseslerinde olduğu gibi alüminyum ve alaşım dökümlerinde de sıvı metalin kalitesi, nihai ürünün mekanik özelliklerini ve genel kalitesini belirlemede kritik bir faktördür. Metalik olmayan inklüzyonlar ve gazlar, alüminyum alaşımlarının kalitesini değiştiren en etkili

faktörler olarak kabul edilmektedir. Optimum döküm için sıvı metalde inklüzyonların ve gazların bulunmaması çok önemlidir, çünkü bunlar ortaya çıkan ürünün mekanik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkiler. Bu inklüzyonların ve gazların neden olduğu kusurlara kısa bir genel bakış aşağıda verilmiştir.

1.5.1. Gazlar

Döküm parçalarda gaz bulunması, parçanın mekanik ve fiziksel özelliklerini, özellikle de sünekliğini ve yorulma direncini önemli ölçüde etkileyerek çeşitli kusurlara yol açabilmektedir. Ergimiş metalde bulunan gazlar tipik olarak aşağıda kategorize edilmektedir:

- Monatomik gazlar (inert gazlar): Ar, He
- Diyatomik gazlar (basit gazlar): O_2, N_2, H_2
- Karmaşık gazlar: CO, CO_2, H_2O, NH_3, SO_2, H_2S

Monatomik gazlar reaktif değildir ve ergimiş metal içinde çözünmezler. Buna karşılık, iki atomlu gazların, sıvı metal içerisindeki çözünürlük oranı yüksektir. Ergimiş alüminyum alaşımları özellikle hidrojeni emmeye eğilimlidir. Öte yandan kompleks gazlar, döküm işlemi sırasında çeşitli bileşenlerle kimyasal reaksiyonlar yoluyla oluşur (Campbell, 2003).

Öte yandan bu gazlar, alüminyumun oksidasyonunu hızlandırarak, metalin mekanik özelliklerinin olumsuz yönde gelişmesini sağlar. Örneğin, sıvı alüminyumun oksijenle geçişi, alüminyum oksit oluşumuna yol açması, metalin sertliğini artırabilir ancak aynı zamanda kırılganlık da yapılabilir (Tunçay & Özyürek, 2014).

1.5.2. Hidrojen

Hidrojen, sıvı alüminyum içerisinde yüksek çözünürlüğe sahiptir. Bu sebeple katılaşma süreci sırasında gaz gözenekliliği oluşturma eğiliminde olduğu için sıvı metal kalitesinin bozulmasında kritik bir rol oynamaktadır (Ateş & Behcet, 2023). Kısaca hidrojen, ergiyik metalin içerisinde çözünür ve katılaşmanın bitiminde gözeneklilik olarak ortaya çıkan gaz kabarcıklarının oluşumuna yol açmaktadır (Gu vd., 2019). Bu nedenle, eriyikteki hidrojenin varlığı, yüksek kaliteli alüminyum dökümler üretmeyi amaçlayan üreticiler için önemli bir endişe kaynağı oluşturmaktadır.

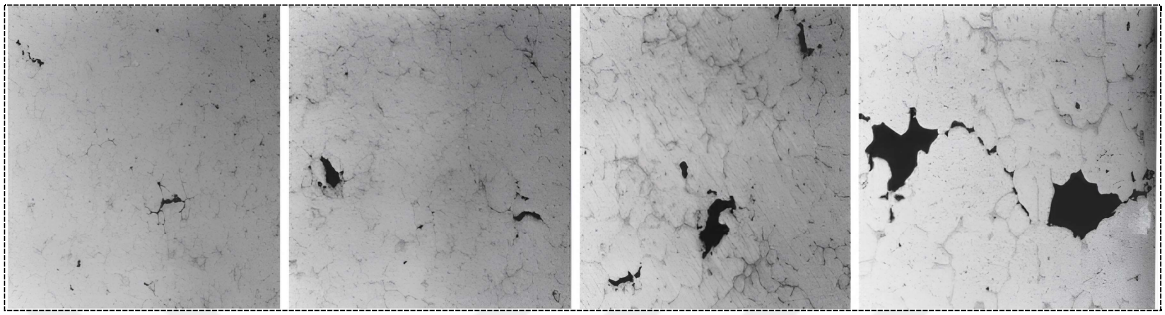
Hidrojenin sıvı alüminyumdaki çözünürlüğü, katı alüminyumdakinden yaklaşık 20 kat daha fazladır, bu da alüminyum katılaştıkça çözünmüş hidrojenin dışarı atıldığı ve gözeneklerin oluşmasına yol açtığı anlamına gelir (Xu vd., 2007; Wu vd., 2008). Bu olgu, hidrojenin alüminyumda gözle görülür şekilde çözünen tek gaz olması ve bu nedenle döküm sürecinde benzersiz bir zorluk oluşturması gerçeğiyle daha da kötüleşir (Huang & Zeng, 2010). Ortaya

çıkan gözeneklilik, mukavemeti ve yorulma direnci de dahil olmak üzere alüminyumun mekanik özelliklerini ciddi şekilde etkileyebilir ve sonuçta nihai ürünün bütünlüğünü tehlikeye atabilir (Jatimurti vd., 2019). Araştırmalar, alüminyum eriyiğinde bulunan hidrojen miktarının katılaşma sırasında gözenek büyümesini ve dağılımını etkileyen önemli bir faktör olduğunu göstermektedir (Chen, 2009).

Dökümden önce hidrojenin eriyikten çıkarıldığı gaz giderme gibi teknikleri, alüminyum ürünlerinin kalitesini sağlamak için kritik öneme sahiptir (Jatimurti vd., 2019; Beamer vd., 2023). Ergimiş alüminyumdaki hidrojen içeriğini azaltmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin, flaksların kullanımı ve vakumlu gaz giderme tekniklerinin kullanımı eriyikteki hidrojen seviyelerini etkili bir şekilde düşürebilmektedir (Zeng vd., 2008). Ek olarak, neme maruziyeti en aza indirmek ve kuru malzemeler kullanmak gibi döküm ortamını kontrol etmek, eritme işlemi sırasında alüminyum tarafından emilen hidrojen miktarını azaltmaya yardımcı olabilir (Diehl vd., 2021). Bu stratejiler, minimum gözenekliliğe sahip yüksek kaliteli alüminyum dökümler üretmek için gereklidir.

Hidrojenin alüminyum alaşımlarının mikro yapısı üzerindeki etkisi bir diğer endişe alanıdır. Çalışmalar, hidrojenin eriyikteki hidrojen içeriğiyle yakından ilişkili olan alüminyum oksit kapanımlarının oluşumuna yol açabileceğini göstermiştir (Zeng vd., 2013). Bu kapanımlar gözenek oluşumu için çekirdeklenme alanları olarak hizmet edebilir ve gözeneklilik sorununu daha da kötüleştirebilir (Chen, 2010). Bu nedenle, hidrojen ve alüminyum arasındaki etkileşimleri mikro yapısal düzeyde anlamak, gözenekliliği azaltmada etkili çözümler geliştirmek için çok önemlidir. Hidrojen, gözeneklilik üzerindeki etkilerine ek olarak, genel döküm sürecini de etkileyebilir. Örneğin, sıvı alüminyumun sıcaklığı, hidrojen çözünürlüğünü en aza indirmek ve katılaşma sırasında aşırı gaz oluşumunu önlemek için dikkatlice kontrol edilmelidir. Sıvı alüminyumdaki çözünmüş hidrojen içeriğini tahmin etmek için makine öğrenimi yaklaşımları araştırılmış ve döküm koşullarını optimize etmek için değerli bilgiler sağlanmıştır (Kim vd., 2020). Bu teknolojik ilerleme, daha verimli üretim süreçlerine ve iyileştirilmiş ürün kalitesine yol açabilir. Hidrojen ve alüminyum arasındaki ilişki karmaşıktır. Çünkü sıcaklık, basınç ve alaşımdaki diğer elementlerin varlığı gibi çeşitli faktörleri içerir. Örneğin, eritme işlemi sırasında alüminyum ve su arasındaki reaksiyon, daha sonra erimiş metalde çözünebilen hidrojeni serbest bırakır (Xu vd., 2007). Bu etkileşimleri anlamak, hidrojen seviyelerini etkili bir şekilde yönetebilen ve alüminyum ürünlerinin kalitesini artırabilen yeni döküm teknikleri geliştirmek için hayati önem taşımaktadır. Dahası, çözelti işlemi sırasında hidrojen kabarcıklarının oluşumu, alüminyum alaşımlarındaki hidrojen ile ilişkili bir başka sorundur (Ferik vd., 2022). Bu kabarcıklar, malzemenin mekanik özelliklerini

tehlikeye atabilir ve bu nedenle yalnızca döküm sırasında değil, aynı zamanda sonraki işleme adımlarında da hidrojen içeriğinin ele alınmasını önemli hale getirir. Şekil 3'te hidrojenin sıvı metal içerisinde yarattığı olumsuz durumu gösteren mikroskop görselleri verilmiştir. (Diehl vd., 2021). Ayarlanmış basınç altında döküm gibi yenilikçi işleme tekniklerinin geliştirilmesi, hidrojen emilimini en aza indirmeyi ve alüminyum dökümlerin kalitesini iyileştirmeyi amaçlamaktadır (Huang & Zeng, 2011).



Şekil 3: Hidrojen Gözenekleri (Anyalebechi, 2013)

Sonuç olarak, hidrojen gazı, katılaşma sırasında gözenek oluşumuna katkıda bulunarak sıvı alüminyumun kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Hidrojenin ergimiş alüminyumdaki yüksek çözünürlüğü, yüksek kaliteli alüminyum ürünleri üretimini sağlamak için döküm işlemi boyunca seviyelerinin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesini gerektirir. Gaz giderme yöntemlerinde devam eden araştırmalar ve teknolojik gelişmeler, proses optimizasyonu ve hidrojen ile alüminyum arasındaki etkileşimlerin anlaşılması, bu zorlukların ele alınması ve çeşitli uygulamalarda alüminyum alaşımlarının performansının artırılması açısından kritik önem taşımaktadır.

1.5.3. İnklüzyonlar

Sıvı alüminyumun kalitesini etkileyen önemli bir faktör, metal içindeki inklüzyonların varlığıdır. Genellikle yabancı partiküller veya gazlar tarafından eklenen bu metalik olmayan safsızlıklar, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini, yüzey kalitesini ve genel dayanıklılığını önemli ölçüde etkileyebilir (Wu, 2024). Kaynaklarına bağlı olarak, inklüzyonlar ya dışsal ya da içsel olarak kategorize edilir. Dışsal inklüzyonlar, fırın malzemelerinin erozyonu veya aşınması nedeniyle eriyiğe giren refrakter partiküller, alüminyum oksit, silikon oksit ve silikon karbür gibi dış kaynaklardan kaynaklanmaktadır. Boyutları 1µm ila birkaç milimetre arasında değişen bu safsızlıklar, boşluklar ve kusurlar oluşturarak metalin içyapısını zayıflatabilir ve sonuçta ürün kalitesini düşürebilir. Buna karşılık, içsel inklüzyonlar ergitme işlemi sırasında kimyasal reaksiyonlar yoluyla oluşur veya tane inceltme veya akışkanlaştırma gibi belirli amaçlar için eriyiğe kasıtlı olarak eklenir (Güler, 2017). Bu inklüzyonlar katı veya sıvı halde bulunabilir ve döküm metalin nihai özelliklerinin belirlenmesinde çok önemli bir rol

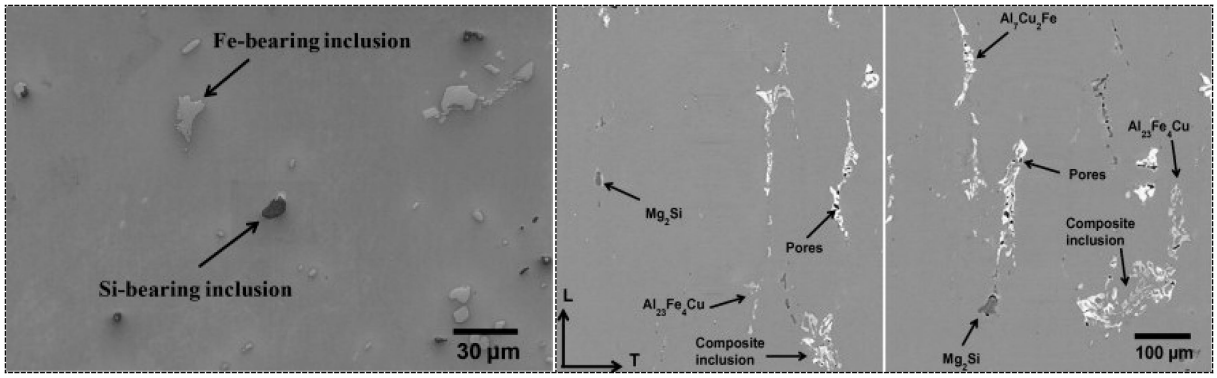
oynar. Yüksek kaliteli alüminyum dökümünün sağlanması için inklüzyonların etkili bir şekilde yönetilmesi ve en aza indirilmesi esastır (Zeng vd., 2013).

İnklüzyonların sıvı alüminyum üzerindeki etkileri, döküm sürecinin kontrolü ile doğrudan ilişkilidir. Döküm sırasında sıcaklık yönetimi, alüminyumun mikro yapısını ve mekanik özelliklerini belirleyen en kritik parametrelerden biridir (Chen & Jiang, 2017). Sıcaklık dalgalanmaları, alüminyumun akışkanlığını ve dolayısıyla inklüzyonların sıvı metal içinde nasıl dağıldığını etkileyebilir. Bu nedenle, döküm sürecinde sıcaklık kontrolü sağlanmadığında, inklüzyonların varlığı daha belirgin hale gelebilmektedir (Wu, 2024).

Filtrasyon süreçleri, sıvı alüminyumda bulunan inklüzyonların kontrol edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Modern filtrasyon teknolojileri, sıvı alüminyumun içindeki inklüzyonların boyutunu ve yoğunluğunu gerçek zamanlı olarak ölçme yeteneğine sahiptir (Wu, 2024). Bu tür sistemler, inklüzyonların etkili bir şekilde filtrelenmesini sağlayarak, alüminyumun kalitesini artırabilir. Örneğin, seramik köpük filtreleme (CFF) ve metalik kartuş filtreleme (MCF) yöntemlerinin birleşimi, inklüzyonların giderilmesinde daha yüksek bir verimlilik sağlamaktadır (Wu, 2024).

Alüminyumun kalitesini etkileyen bir diğer önemli faktör, oksit film dağılımıdır. Oksit filmleri, alüminyumun yüzeyinde oluşan ve metalin oksidasyonunu engelleyen ince tabakalardır. Ancak, bu filmlerin homojen dağılımı sağlanmadığında, alüminyumun mekanik özellikleri olumsuz etkilenebilir (Chen, 2010). Oksitlerin ve diğer inklüzyonların varlığı, sıvı alüminyumun döküm sırasında yüzey kalitesini etkileyerek, nihai ürünün estetik ve dayanıklılık özelliklerini azaltabilir (Rössle & Pohl, 2024).

Sonuç olarak, inklüzyonlar, döküm sürecinin kontrolü, filtrasyon yöntemleri ve oksit film dağılımı gibi faktörlerle doğrudan ilişkilidir. Sıvı alüminyumun kalitesinin artırılması için, bu süreçlerin optimize edilmesi ve inklüzyonların etkili bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir (Maryani & Purba, 2021). Şekil 4'te alüminyum alaşımlarında karşılaşılabilen inklüzyon örneklerine yer verilmiştir (Singh vd., 2014; Singh vd., 2015).

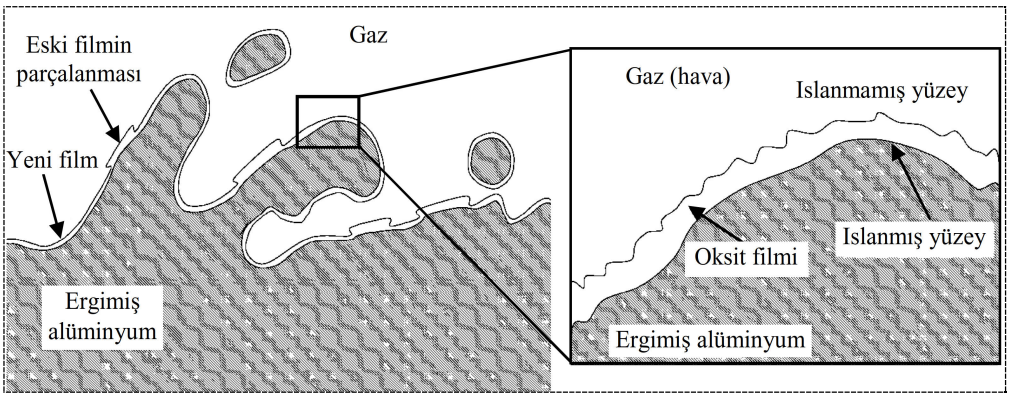


Şekil 4: Alüminyum Alaşımlarındaki İnklüzyon Örnekleri (Singh vd., 2014; Singh vd., 2015)

1.5.4. Oksit Filmler

Sıvı alüminyumun kalitesini etkileyen faktörlerden bir diğeri ise döküm sürecinde oluşan oksit film tabakalarıdır. Oksit filmleri, alüminyumun yüzeyinde doğal olarak meydana gelen ince tabakalardır ve bu tabakalar, metalin mekanik özelliklerini ve korozyon dayanıklılığını doğrudan etkileyebilir (Karaca & Alkan, 2021). Alüminyum ve alaşımlarının döküm işlemi sırasında, oksit filmlerinin oluşumu, sıvı metalin yüzeyinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucunda gerçekleşir. Bu durum, özellikle sıvı alüminyumun havayla temas ettiği anlarda belirgin hale gelir ve oksit filmlerinin kalınlığı, metalin kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir (Tan vd., 2022). Oksit film tabakalarının kalınlığı, alüminyumun döküm sürecindeki sıcaklık ve atmosfer koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda, alüminyumun yüzeyinde daha kalın oksit tabakaları oluşma eğilimindedir (Tokatlı vd., 2022). Bu kalınlık, sıvı alüminyumun akışkanlığını azaltarak, döküm sırasında hava kabarcıkları ve diğer inklüzyonların oluşumuna zemin hazırlayabilir. Ayrıca, oksit filmlerinin homojen olmayan dağılımı, alüminyumun mekanik özelliklerini zayıflatabilir ve nihai ürünün dayanıklılığını azaltabilir (Savaş & Demirok, 2020). Döküm sürecinde oluşan oksit filmleri, sıvı alüminyumun kalitesini artırmak için çeşitli yöntemlerle kontrol edilebilir. Örneğin, sıvı metalin temizlenmesi için uygulanan yöntemler, oksit filmlerinin ve diğer safsızlıkların giderilmesine yardımcı olmaktadır. Bu bağlamda, sıvı alüminyumun döküm öncesinde ve sırasında uygun filtrasyon ve temizleme yöntemlerinin kullanılması, oksit film tabakalarının etkisini minimize edebilir. Böylece, daha yüksek kaliteli alüminyum dökümleri elde etmek mümkün hale gelir (Tokatlı vd., 2022). Oksit film tabakalarının kontrolü, alüminyumun yüzey özelliklerini iyileştirmek için de önemlidir. Anodik oksidasyon gibi yüzey işlemleri, alüminyum yüzeyinde istenilen oksit tabakalarının oluşumunu teşvik edebilir ve bu tabakaların kalınlığı artırılarak metalin korozyon dayanıklılığı artırabilir (Yilmaz & Kocabaş, 2019). Bununla birlikte, oksit filmlerinin kalınlığının aşırı artışı, alüminyumun mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir; bu nedenle dikkatli bir denge sağlanmalıdır (Karakaş & Küden, 2022).

Sonuç olarak, sıvı alüminyumun kalitesini etkileyen oksit film tabakaları, döküm sürecinin kritik bir bileşenidir. Oksit filmlerinin kalınlığı ve dağılımı, alüminyumun mekanik özelliklerini ve korozyon dayanıklılığını doğrudan etkileyerek ürünün kalitesini belirler. Bu nedenle, döküm sürecinde oksit film tabakalarının kontrolü ve yönetimi, alüminyum endüstrisinde yüksek kaliteli ürünlerin elde edilmesi için hayati öneme sahiptir (Tokatlı vd., 2022; Tan vd., 2022; Yilmaz & Kocabaş, 2019). Şekil 5'te oksit film tabakasının oluşum sürecini aktaran şematik görsel verilmiştir.



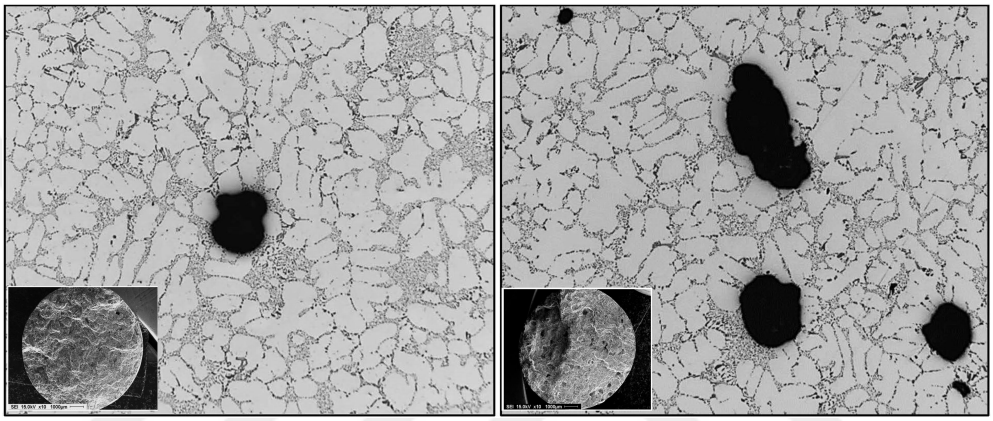
Şekil 5: Alüminyum Alaşımının Yüzeyin Oluşan Oksit Filmin Şematik Görünümü (Yüksel, 2020; Divandari & Campbell, 2004)

1.5.5. Gözeneklilik

Alüminyum alaşımlarındaki gözeneklilik, özellikle dökümlerde mekanik özelliklerini etkileyen kritik bir faktördür. Gözenekliliğin oluşumu öncelikle katılaşma sırasında gaz tutulmasına atfedilir ve bu, termal gradyanlar, katılaşma hızları ve hidrojen gibi çözünmüş gazların varlığı gibi çeşitli faktörler nedeniyle meydana gelebilir (Ran & Zhou, 2007; Kuo, 2011; Chen, 2009). Alüminyum alaşımlarında, özellikle A356-T6 ve A201 gibi olanlarda, mikro yapısal özellikler gözeneklilikten önemli ölçüde etkilenir ve bu da çekme mukavemetinin, sünekliğin ve yorulma direncinin azalmasına yol açabilir (Mugica vd., 2004; Yi vd., 2003; Ammar vd., 2008). Gözeneklilik oluşumunun mekanizmaları çok yönlüdür. Örneğin, Kuo'nun (2011) çalışması termal gradyanlar ve katılaşma hızları arasındaki ilişkiyi vurgulayarak, daha yavaş katılaşma oranlarının uzun süreli gaz hapsolması ve büzülme etkileri nedeniyle artan gözenekliliğe yol açabileceğini belirtmektedir. Ek olarak, ergimiş alüminyumdaki hidrojenin varlığı, ergitme işlemi sırasında nem veya diğer gazlardan kaynaklanan kirlenme ile daha da kötüleşen gaz gözenekliliğini hızlandırabilir (Mathew vd., 2021; Felicelli vd., 2009). Bu olgu, mikro yapısal bütünlüğün havacılık ve otomotiv sektörleri gibi zorlu uygulamalarda performans için çok önemli olduğu yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarında özellikle belirgindir (Fu vd., 2007). Araştırmalar, gözenekliliğin alüminyum alaşımlarının yorulma ömrünü önemli ölçüde azaltabileceğini, kusurlu bileşenlerin kusursuz muadillerinden kat kat daha düşük yorulma ömürleri sergilediğini göstermektedir (Han-Hua, vd., 2003; Ammar vd., 2008). Gözenekliliğin yoğunlaşması, çatlak başlangıcını ve yayılmasını kolaylaştıran gerilim yoğunlaşmaları yaratır ve böylece malzemenin yapısal bütünlüğünü tehlikeye atar (Mugica vd., 2004; Ammar vd., 2008). Gözenekliliğin etkilerini azaltmak için, soğutma oranları ve kalıp tasarımları gibi döküm parametrelerini optimize etmek de dâhil olmak üzere çeşitli stratejiler kullanılmıştır. Ek olarak, tane yapısını iyileştirerek ve gözenekliliği azaltarak alüminyum alaşımlarının mikro yapısal özelliklerini geliştirmek için sürtünme karıştırma işlemi gibi ileri işleme teknikleri araştırılmıştır (Hangai vd., 2010).

Gözeneklilik oluşumuna katkıda bulunan faktörleri anlamak ve kontrol etmek, mühendislik uygulamalarında alüminyum alaşım bileşenlerinin performansını ve güvenilirliğini iyileştirmek için esastır.

Sonuç olarak, alüminyum alaşımlarındaki gözeneklilik, mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen karmaşık bir konudur. Katılaşma dinamikleri, gaz sıkışması ve mikro yapısal özellikler arasındaki etkileşim, bu malzemelerin performansını belirlemede önemli bir rol oynar. Devam eden araştırmalar, bu mekanizmaları anlamaya ve alüminyum dökümlerde gözenekliliği en aza indirmek için etkili stratejiler geliştirmeye odaklanmaya devam etmektedir. Şekil 6'da alüminyumda oluşan gözenekliliğin mikro yapısı verilmiştir (Samuel vd., 2023).



Şekil 6: 319 Alaşımındaki Gözenekliliğin Optik Mikro Yapısı (Samuel vd., 2023)

1.6. SIVI METAL TEMİZLEME YÖNTEMLERİ

Sıvı metal temizliğini korumak, yüksek kaliteli alüminyum dökümler üretmenin önemli parametrelerinden biridir. Alüminyum döküm proseslerinde, eriyikteki çözünmüş hidrojeni, çift filmli oksit tabakalarını ve diğer safsızlıkları ortadan kaldırmak çok önemlidir. Bunu ele alan Tokatlı ve arkadaşları, sektörde yaygın olarak kullanılan sıvı metal temizleme tekniklerine odaklanan ve bunların etkinliğini değerlendiren bir araştırma yürütmüştür. Elde ettikleri bulgular, alüminyum döküm proseslerinde sıvı metal kalitesini daha da artırmak için alternatif yöntemlerin araştırılmasının önemini vurgulamaktadır. Çalışma ayrıca, sıvı metalin saflaştırılmasında uygulanan tekniklerin verimliliğini değerlendirmek için farklı test yöntemlerinin kullanılması gerekliliğini vurgulamaktadır. Sonuç olarak, alüminyum dökümünde sıvı metalin saflaştırılması hem ürün kalitesinin hem de çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında hayati bir rol oynadığını ifade etmişlerdir (Tokatlı vd., 2022).

Güvenilir ve hatasız ürünler üretmek için döküm endüstrisinde yüksek sıvı metal kalitesinin sağlanması esastır. Rekabetçi pazar ortamı ve çevresel hususlar göz önüne alındığında, ikincil alüminyum kullanımı döküm sektöründe giderek daha yaygın hale gelmiştir. Bununla birlikte, yetersiz sıvı metal temizliğinin ikincil alüminyum dökümlerin

kalitesi üzerinde zararlı bir etkiye sahip olabileceği de belgelenmiştir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik fizibilite ve pratik uygulanabilirlik dikkate alınarak sıvı metal kalitesini artırmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu teknikler üzerine yapılan araştırmalar, teknolojideki ilerlemeler ve sektörün çevresel etkiyi en aza indirirken döküm kalitesini artırmaya yönelik süregelen çabaları nedeniyle giderek artmaktadır.

Son yıllarda, sıvı metali temizlemek için azot ve argon gibi inert gazlar kullanan döner gaz giderme teknikleri ve hekzakloroetan (C_2Cl_6) gibi kimyasal tabletler de dahil olmak üzere çeşitli yöntemler araştırılmıştır. Bu yöntemler arasında, kimyasal flaksların kullanımı alüminyum eriyiklerinin rafine edilmesinde çeşitli derecelerde etkinlik göstermiştir. Bununla birlikte, klor içeren kimyasalların kullanımı önemli çevresel kaygılarla ilişkilendirilmiş ve daha sürdürülebilir alternatiflere duyulan ihtiyacı vurgulamıştır.

Daha temiz ve çevre dostu gaz giderme prosesleri elde etmek için yenilikçi yaklaşımlar geliştirilmektedir. Bunlar arasında sabit lans ile gaz giderme, döner tip gaz giderme, kontrollü karıştırma yöntemi, vakumlu gaz giderme, ultrasonik gaz giderme, sprey gaz giderme ve elektromanyetik alan altında yönlü katılaştırma yer almaktadır. Bu tür yöntemler, ergimiş alüminyum alaşımlarını etkili bir şekilde rafine ederken çevresel etkilerini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Araştırmalar ilerledikçe, bu alternatif teknikler endüstriyel uygulamalar için giderek daha uygun hale gelmekte ve metal rafinasyonunda gelişmiş performans ve sürdürülebilirlik sunmaktadır.

Aşağıda sıvı metali temizlemek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bazıları özetlenmiştir:

1.6.1. Flakslar

Ergimiş metali kirleten gaz halindeki safsızlıkları veya inklüzyonları ortadan kaldırmak için hem kimyasal bileşikler hem de reaktif veya inert gazlar yaygın bir şekilde kullanılır ve bunlar flaks olarak adlandırılır. Flakslama, ağırlıklı olarak inorganik olan kimyasal bileşikler aracılığıyla ergimiş alüminyuma çeşitli katkı maddelerinin enjekte edilmesini içermektedir. Bu bileşikler gaz giderme, temizleme, parçalama ve alaşımlama gibi birçok amaca hizmet ederek metalin rafine edilmesine ve kalitesinin artırılmasına katkıda bulunmaktadır (Utigard, 1998).

Flakslar; kaplama flaksları, arıtma flaksları, çapak alma flaksları, temizleme flaksları, duvar temizleme flaksları, alaşımlama-arıtma flaksları ve gaz giderme flaksları dâhil olmak üzere özel uygulamalarına göre çeşitli şekillerde kategorize edilebilir. Her bir tip, metal işleme sürecinde farklı bir işlevi yerine getirmek üzere tasarlanmış olup kalite ve performansın iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Pazar, kullanım amaçlarına göre kategorize edilen çeşitli flaks türlerine göre uyarlanmış 150'den fazla farklı flaks karışımı sunmaktadır. Sıvı alüminyumun oksidasyonunu önlemek için sadece sıvı metal temizliği sırasında değil, aynı zamanda eritme sonrasında da önlemlerin uygulanması önemlidir. En uygun flaksın seçilmesi, optimum sonuçları sağlamak için ilgili tüm parametreleri dikkate alarak ergitme işlemi bağlamında dikkatli bir değerlendirme gerektirmektedir (Ertan vd., 2003).

Flor ve klor içeren karışımlar, maliyet etkinliği ve uygulama kolaylığı nedeniyle endüstride en yaygın kullanılan flakslar arasındadır. Bunlar arasında hekzakloroetan (C_2Cl_6) tabletleri özellikle yaygındır. Sıvı metale verildiğinde, hekzakloroetan klorür üretmek için ayrışır ve $AlCl_3$ gaz kabarcıklarının hidrojeni ergimiş metalin yüzeyine taşımasına izin verir. Ancak, yan ürün gazlar hem çevre hem de insan sağlığı için önemli riskler oluşturmaktadır.

Bu çevre ve sağlık endişeleri ışığında, alternatif sıvı metal temizleme yöntemlerinin geliştirilmesi için çaba sarf edilmektedir. Ortaya çıkan bu teknikler, temizleme işleminin verimliliğini korurken veya artırırken, geleneksel flakslarla ilişkili olumsuz sağlık etkilerini ortadan kaldıran çevre dostu çözümler sağlamayı amaçlamaktadır. Şekil 7'de toz, granül ve tablet halinde bulunan flaksların görseli verilmiştir.

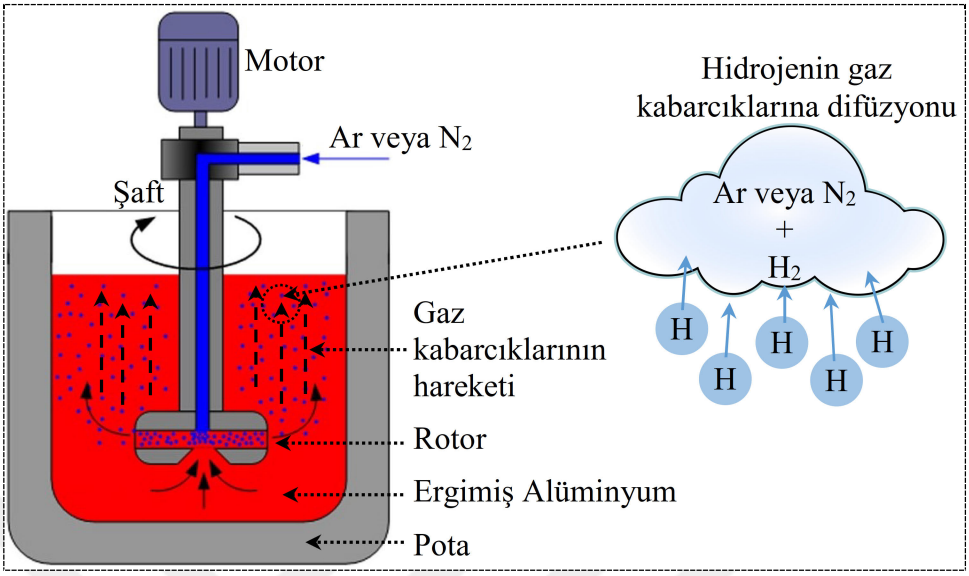


Şekil 7: Endüstride Kullanılan Bazı Flakslar

1.6.2. Döner Tip Gaz Giderme

Alüminyum alaşımları için döner tip gaz giderme yöntemi, ergimiş metalden çözünmüş hidrojen ve diğer gaz halindeki safsızlıkları etkili bir şekilde gidererek alüminyum dökümlerin kalitesini artırmayı amaçlayan kritik bir işlemdir. Şekil 8'de görseli verilen bu yöntem tipik olarak, türbülans yaratan ve gaz kabarcıklarının eriyikten kaçmasını kolaylaştıran dönen bir pervane aracılığıyla argon veya azot gibi bir temizleme gazının enjekte edilmesini içerir (Podařil vd., 2022; Gyarmati vd., 2022). Bu işlemin verimliliği, rotorun tasarımı, temizleme gazının akış hızı ve işlem süresi dahil olmak üzere çeşitli parametrelerden etkilenir (Gyarmati vd., 2022; Mostafaei vd., 2016). Araştırmalar, döner tip gaz gidermenin, etkinliği ve çeşitli üretim ölçeklerine uyarlanabilirliği nedeniyle alüminyum endüstrisinde en yaygın kullanılan

tekniklerden biri olduğunu göstermektedir (Wang vd., 2011). Yöntemin, son döküm ürünlerinde gaz gözenekliliğini önlemek için çok önemli olan ergimiş alüminyumdaki hidrojen içeriğini önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir (Yahya vd., 2011).



Şekil 8: Döner Tip Gaz Giderme Metodunun Şematik Gösterimi (Wu vd., 2022)

Ayrıca bu yöntem hem çevre hem de insan sağlığı için risk oluşturan gaz giderme tabletlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Gaz giderme işlemleri sırasında, ergimiş metal içindeki hidrojen gazı, sanki eriyik boyunca tek tip bir basınç alanı içinde hapsedilmiş gibi eşit olarak dağıtılmaktadır. Hidrojen gazının giderilmesinin ardındaki prensip, hidrojen gazının eriyik içindeki daha yüksek basınçlı bölgelerden inert gaz tarafından oluşturulan daha düşük basınçlı bölgelere doğru hareketine dayanır. Bu, hidrojen seviyelerinde etkili bir düşüş sağlayarak alüminyumun genel kalitesini artırır. Hidrojen gazı sıvı metal içerisinde hareket edebilir ve basıncını neredeyse havada olduğu kadar hızlı bir şekilde eşitleyebilir. Bu, metalin her parçasının inert gazla doğrudan temas etmesi ihtiyacını ortadan kaldırır. Bir alüminyum eriyiğinin gazdan arındırılmasının verimliliği ve hızı iki temel faktöre bağlıdır: Metal-gaz arayüzündeki transfer hızı ve ergimiş metale maruz kalan gazın yüzey alanı (Simulator & Holiday, 2021).

Döner tip gaz giderme yöntemi, ergimiş metale enjekte edilen inert gazın yüzey alanını artırma prensibi mantığı ile çalışmaktadır. Döner tip gaz giderme işleminin şematik gösterimi Şekil 8'de gösterilmiştir (Wu vd., 2022). İnert gaz kabarcıklarının yüzey alanı ne kadar büyük olursa, gaz giderme işlemi o kadar etkili ve hızlı olur. Sabit bir gaz hacmi için, daha küçük kabarcık boyutları daha büyük bir toplam yüzey alanı sağlayarak sıvı metalin gazının daha iyi ve daha verimli bir şekilde alınmasına yol açar (Tokatlı, 2022).

Döner tip gaz giderme metodu yanlış parametler ile uygulandığında, ergimiş metalde çok sayıda girdap oluşabilir ve atmosferden gelen oksijenin eriyikle reaksiyona girmesine izin

verebilir. Bu durum hidrojen içeriğini azaltırken, mikro yapıda gözeneklerin ve inklüzyonların oluşmasına yol açabilir. Bu kusurlar alüminyum ve alaşımlarının mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek genel kalitelerinden ödün vermelerine neden olabilir (Ni vd., 2003).

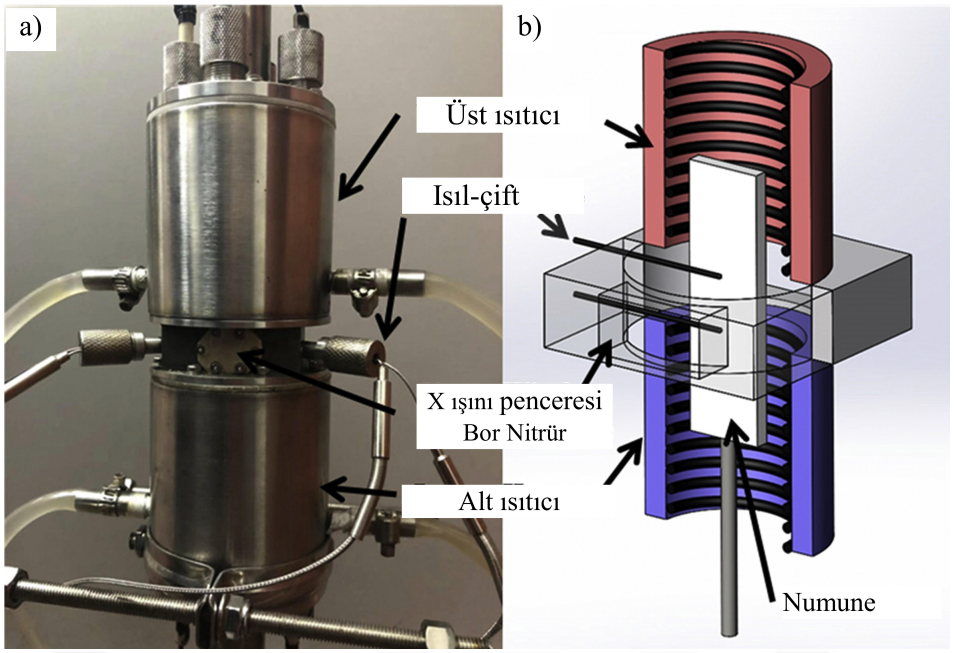
1.6.3. Kontrollü Karıştırma Yöntemi

Alüminyum döküm sektöründe sıvı metali saflaştırmak için bu yöntemin etkili bir teknik olduğu kanıtlanmıştır. Ergimiş metalin homojen bir şekilde karıştırılmasını kolaylaştıran bu işlem, yeniden ergitme aşaması sırasında çözünmüş gazları ve kalıntıları etkili bir şekilde ortadan kaldırır. Haghayeghi vd. (2005), mekanik karıştırma yoluyla üretilen yarı katı Al-7Si-0.3Mg alaşımının özelliklerini araştırmış ve bu yöntemin metalin kalitesini artırmaya önemli ölçüde katkıda bulunduğunu göstermiştir. Yeniden ergitme işlemi sırasında, eriyik yüzeyi durgun kalır ve bu da diğer gaz giderme yöntemlerine kıyasla daha az oksit oluşumuna ve birleşmesine neden olur. Bu yenilikçi gaz giderme tekniği, katılaşma sırasında çökelme gözenekliliğine eğilimli alaşımlar için oldukça etkilidir (Zhao vd., 2012).

Sistem üç ana bileşenden oluşur; fırının üstünde ve altında bulunan iki ısıtma bölgesi ve X-ışını penetrasyonuna izin veren bir pencere. Termokupllar, sıcaklığı kontrol etmek ve izlemek için stratejik olarak yerleştirilmiş ve iki ısıtıcı arasında dikey bir sıcaklık gradyanı oluşturulmasını sağlamaktadır. Alt ısıtıcı, numunenin aşağıdan yukarıya doğru dikey katılaşmasını kolaylaştırmak için daha soğuk bir sıcaklıkta tutulur. Malzeme sistem boyunca kontrollü hızlarda, sıcaklıklarda ve sürelerde işlenir. Şekil 9'da kontrollü katılaştırma sistemi olarak da adlandırılan yeniden ergitme sistemi verilmiştir. Yeniden ergitme işlemleri sürecinde gözenek oluşumu iki ana mekanizma ile yönetilir; çözünme ve flotasyon. Bu mekanizmalar gözenekliliği azaltarak malzemenin kalitesini artırmaya yardımcı olmaktadır. Yeniden ergitme işlemi sırasında, gözeneklilik içinde hapsolmuş hidrojen molekülleri kararsız bir yapıya gelir ve ayrışarak sıvı metal içerisinde geri çözünmelerini sağlar (Lee & Hunt, 2001).

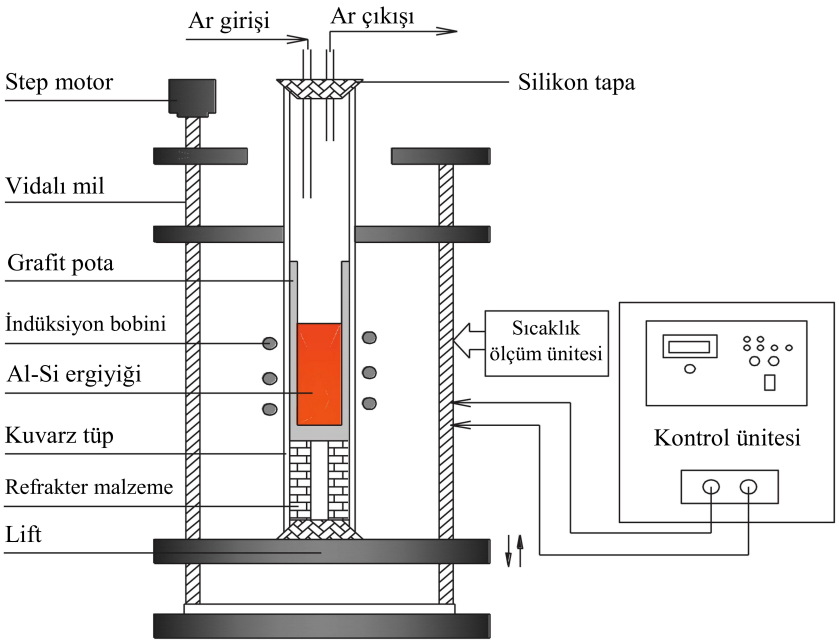
1.6.4. Elektro Manyetik Yönlü Gaz Giderme

Elektromanyetik yönlü gaz giderme, sıvı metalin saflaştırılması için gelişmiş bir yöntemdir. Bu teknik, elektromanyetik alanlar kullanarak gazları ve safsızlıkları etkili bir şekilde gidermekte, ergimiş metalin akışkanlığını artırmakta ve genel döküm kalitesini iyileştirmektedir. Liu vd. (2004), elektromanyetik yönlü gaz gidermenin alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmış ve bu yaklaşımın metalin iç yapısı üzerinde faydalı bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmıştır.



Şekil 9: Kontrollü Karıştırma Yöntemi (Dong vd., 2020)

Elektromanyetik alan altında ergimiş alüminyumun yönlü katılaştırılması, temiz ve çevre dostu gaz giderme için umut verici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknik, özellikle havacılık ve uzay dökümleri gibi uygulamalarda gaz giderme işlemleri için farklı bir yöntem olarak potansiyel göstermektedir. En iyi gaz giderme koşulları oluştuğunda yüksek kaliteli alüminyum alaşımları üretilebilmektedir (Ren vd., 2014). Şekil 10'da bu tekniğin sıvı metal temizleme mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 10: Elektromanyetik Gaz Giderme Tekniği (Ren vd., 2014; Tokatlı vd., 2022)

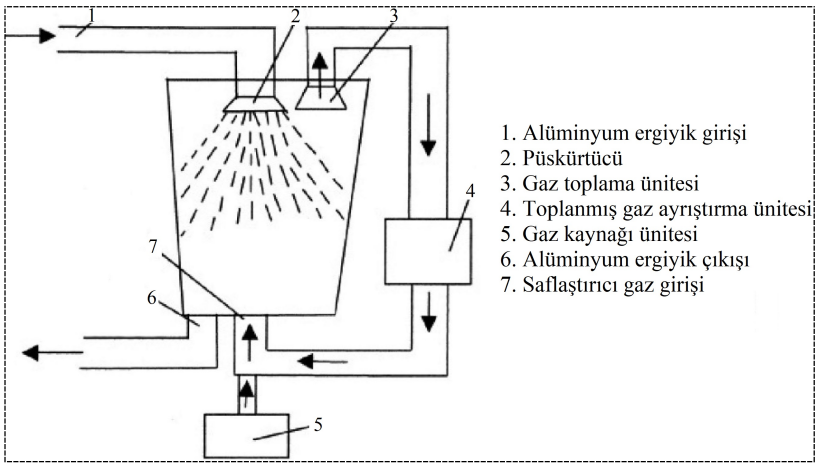
Alüminyum alaşımı bir indüksiyon fırınında eritildikten sonra, sıvı metal bir çekme sistemi kullanılarak aşağı doğru çekilir ve işlem sırasında doğal soğutma ile aşağıdan yukarıya doğru aşamalı olarak katılaşır. Sıvı metalin oksitlenmesini önlemek için Şekil 10'da gösterildiği

gibi bir kuvars tüp aracılığıyla sürekli olarak argon gazı verilir. Bu işlem düşük seviyelerde iç basınçlara sahip küçük kavitasyon kabarcıkları oluşturur. Kavitasyon kabarcıklarının arayüz basıncına kıyasla daha yüksek harici hidrojen kısmi basıncı nedeniyle, sıvı metaldeki hidrojen atomları sürekli olarak yayılır ve bu kabarcıklarla etkileşime girerek etkili gaz gidermeyi kolaylaştırır. Bu sistem, sıvı metalin aşağıdan yukarıya doğru sürekli katılaşmasını sağlar ve çekme işlemi sırasında doğal soğutma etkisi ile kolaylaştırılır.

Yönlü katılaşma sırasında, hidrojen gazı katılaşma cephesinden sıvı metale doğru kademeli olarak göç eder. Bu süreç boyunca, eriyik akış hızından etkilenen sıvı metaldeki kabarcıklar birbirleriyle birleşerek gaz giderme verimliliğini önemli ölçüde artırır. Sonuç olarak, çok sayıda küçük kavitasyon kabarcığı birleşerek hacim genişlemesine yol açar ve katılaşan numune içinde daha yüksek hidrojen konsantrasyonlarını barındırabilen daha büyük kabarcık boşlukları oluşturur. Ayrıca, zenginleştirilmiş kabarcıkların hacminin daha yavaş katılaşma oranlarıyla giderek arttığı tespit edilmiştir (Ren vd., 2014).

1.6.5. Sprey ile Gaz Giderme

Yenilikçi bir dehidrojenasyon yöntemi olan sprey gaz giderme, ergimiş metali küçük damlacıklar halinde atomize ederek ve eriyik içinde gaz kabarcıkları toplamak yerine inert bir gaz ortamına püskürterek geleneksel döner pervaneli gaz giderme işleminden ayrılır. Bu işlemde, ergiyik yüksek bir yüzey-hacim oranına ulaşmaktadır. Atomize damlacıklardaki hidrojen, çevredeki inert gaz tarafından etkili bir şekilde emilir ve bu da yöntemi hidrojen giderimi için oldukça verimli hale getirir. Şekil 11'de gösterilen sistemin çalışma prensipleri analiz edildiğinde, sıvı metal bir girişten (1) sisteme girer ve bir püskürtücüye (2) yönlendirilir. Püskürtücü sıvı metali ince damlacıklar halinde atomize etmektedir. Ardından bu damlacıklar bir işleme tankına gönderilir. Gaz besleme mekanizması (5) tarafından sağlanan arındırıcı bir gaz, gaz girişinden (7) işleme tankına girer. Arındırıcı gaz yükseldikçe sıvı metal damlacıkları alçalır ve bir etkileşim bölgesi oluşturur. Damlacıklar arındırıcı gazla temas ettiğinde, damlacıklar ve arındırıcı gaz arasındaki kısmi hidrojen basıncı farkı nedeniyle sıvı metal içerisindeki hidrojen gaza yayılır. Böylece hidrojen içeren gaz tankın tepesine yükselir ve bir gaz geri kazanım ünitesine (3) yönlendirilir. Geri kazanım ünitesinde hidrojen, geri kazanım gazı ayırma ünitesinde (4) ayrıştırılır ve arındırıcı gazın girişten (7) yeniden kullanılmasına izin verilir. Gazı alınmış sıvı metal damlacıkları tankın dibinde toplanır ve bir çıkıştan (6) çıkar. Damlacıkların katılaşmasını önlemek için tank içindeki arındırıcı gazın sıcaklığı yüksek bir seviyede tutularak sıvı metalin proses boyunca ergimiş halde kalması sağlanır (Wu vd., 2005).



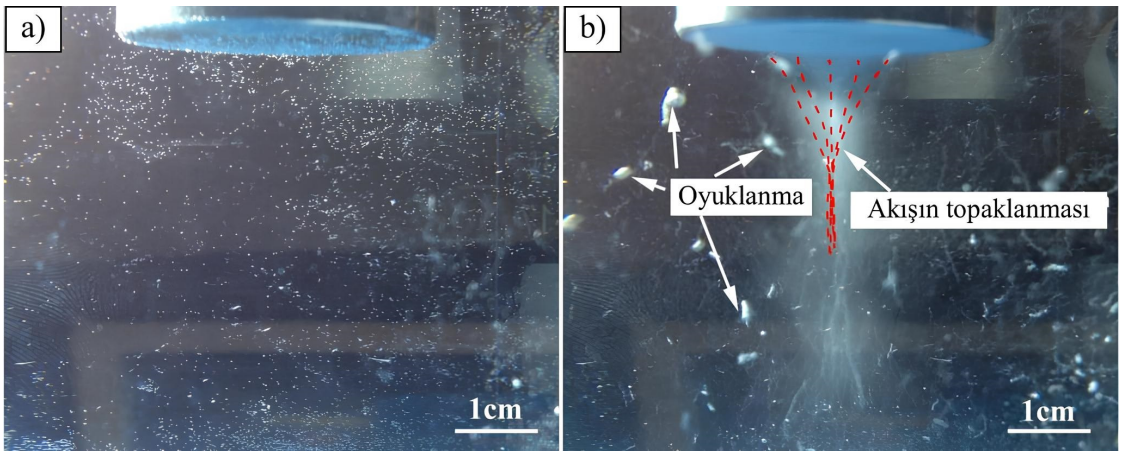
Şekil 11: Sprey ile Gaz Giderme Tekniği (Wu vd., 2005; Tokatlı, 2022)

1.6.6. Ultrasonik Gaz Giderme

Yenilikçi ve gelişen bir teknoloji olan ultrasonik gaz gidermenin en önemli avantajlarından biri, cüruf oluşumunu en aza indirmesi ve sıvı metal temizleme sırasında toksik gazların salınımını önleyerek daha çevre dostu bir alternatif haline getirmesidir.

Sıvı metal yüksek yoğunluklu ultrasonik titreşimlere maruz kaldığında, basınç kavitasyon eşiğinin ötesinde dalgalanarak eriyik içerisinde çok sayıda boşluk oluşturur. Bu kavitasyon etkisi, sıvı metalde oluşan kabarcıklara hidrojen difüzyonunu hızlandırarak kütle transferini önemli ölçüde artırır. İşlem sırasında, akustik kavitasyon bu kabarcıkların komşu kabarcıklarla etkileşime girip birleşmesine ve sıvı metalin yüzeyine yükselecek kadar büyümesine neden olur (Xu vd., 2004). Şekil 12'de ultrasonik gaz giderme mekanizmasının su içerisinde uygulanan testine ait görsel verilmiştir (Liu vd., 2017; Tokatlı, 2022).

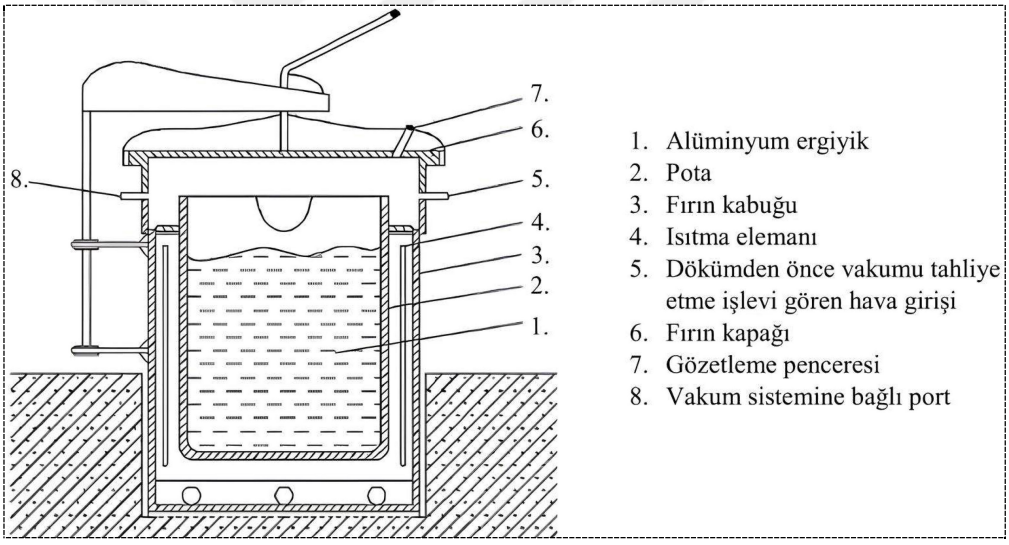
Ayrıca ultrasonik dalgalar ergimiş metal içerisinde ilerlerken, gittikleri yol boyunca ses yoğunluğunu ve salınım enerjisini büyük oranda kaybederler. Bu enerji kaybı önemli seviyelerde ise yoğunluk hızla kavitasyon eşiğinin altına düşerek kavitasyonu durdurabilir ve gaz giderme işleminin etkinliğini azaltabilir (Puga vd., 2009).



Şekil 12: a) Durgun Su, b) Ultrasonik Titreşim Altında Su (Liu vd., 2017; Tokatlı, 2022)

1.6.7. Vakumlu Gaz Giderme

Bu yöntemde, sıvı metali içeren pota kapalı bir haznenin içine yerleştirilir. Bu hazne içinde bir vakum oluşturularak hidrojen sıvı metalden verimli bir şekilde çıkarılır. Bu işlemin hidrojeni uzaklaştırmada oldukça etkili olduğu kanıtlanmış olsa da düşük verimliliği ve vakumlama sırasında meydana gelen sıcaklık düşüşü sebebiyle dökümhanelerde nadiren kullanılmaktadır. Bu sistemin şematik bir gösterimi Şekil 13'te gösterilmektedir. Bu yöntemde gazdan arındırma iki ana faktör tarafından engellenir: Hidrojen transferini engelleyen eriyik yüzeyindeki oksit filmi ve eriyik içinde daha derinlerde, özellikle orta ve altta bulunan ve uzaklaştırılmak üzere yüzeye taşınması uzun zaman alan hidrojen. Bu sınırlamalar dâhili vakum emişi yoluyla ele alınabilir. Bu yaklaşımda, sıvı metalle reaktif olmayan gözenekli bir emme başlığı eriyiğin içine daldırılır. Vakum valfi açıldığında, gözenekli başlık içindeki kısmi hidrojen basıncı sıfırda tutularak sıvı metal ile gözenekli başlık arasında bir konsantrasyon gradyanı oluşturulur. Bu gradyan, hidrojenin eriyikten verimli bir şekilde uzaklaştırılmasını kolaylaştırır (Zeng vd., 2012; Tokatlı, 2022).



Şekil 13: Geleneksel Vakumlu Gaz Giderme Yönteminin Şematik Gösterimi (Zeng vd., 2012)

1.6.8. Sabit Lans ile Gaz Giderme

Sabit lans ile gaz giderme, alüminyum döküm proseslerinde sıvı metalin saflaştırılması için etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu teknik, çözünmüş gazları ve inklüzyonları ortadan kaldırmak için ergimiş metale gaz enjeksiyonunu içerir. Üstten üflemeli bir gaz enjeksiyon nozulunun kullanılması gaz ve sıvı metal arasındaki etkileşimi önemli ölçüde artırabilir ve böylece daha hızlı oksijen kütle transferini teşvik edebilir. Bu yaklaşım gazdan arındırma işleminin verimliliğini artırmakta ve sonuç olarak sıvı alüminyumun kalitesini yükseltmektedir. Sabit bir lans kullanılarak gaz akış hızları optimize edilebilir ve böylece daha etkili bir oksidasyon prosesi elde edilir. Sabit lans ile gaz gidermenin etkinliği, gazın sıvı metal

içerisinde ne kadar iyi dağıtıldığına yakından bağlıdır. Sıvı metal ile soygaz homojenliğinin yakalanması ile beraber döküm hatalarının olasılığı azalmaktadır. Ayrıca, gaz ve sıvı metal arasındaki etkileşim metalin mekanik özelliklerine olumlu katkıda bulunmaktadır (Wang vd., 2024).

Özetle, sabit lanslı gaz giderme, alüminyum döküm proseslerinde sıvı metal temizliğini sağlamak için hayati bir teknik olarak öne çıkmaktadır. Bu yaklaşım, ergimiş metal içerisindeki gaz dağılımını artırarak metal kalitesini önemli ölçüde artırmakta ve döküm sürecini kolaylaştırmaktadır. Wang vd. (2024) tarafından yürütülen çalışmalar, bu yöntemin verimliliğinin ve alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri üzerindeki yararlı etkisinin altını çizmektedir. İleriye dönük olarak, bu teknikteki daha fazla ilerleme ve iyileştirme, alüminyum döküm endüstrisindeki kalite standartlarını iyileştirmedeki rolünü yükseltme vaadini taşımaktadır.

1.7. SIVI ALÜMİNYUM KALİTE TESTLERİ

Alüminyum döküm tesislerinin birincil hedefi, zorlu bir pazar ortamında rekabetçi maliyetlerle yüksek kaliteli ürünler üretmektir. Bunu başarmak için döküm endüstrisinde yüksek seviyelerde ana alaşımlar ile birincil ve ikincil alüminyumlar kullanılmaktadır. Döküm ürünlerin kalitesini etkileyen en kritik faktörlerden biri ergimiş metalin kalitesidir. Ergitme aşamasında ortaya çıkan kusurlar kaçınılmaz olarak nihai mikro yapıya taşınmakta ve döküm ürünlerin genel kalitesini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple kaliteli dökümlerin sağlanması eriyik kalitesinin titizlikle kontrol edilmesiyle başlar.

Sıvı metal temizliği, inklüzyonların, çözünmüş hidrojenin ve daha az ölçüde kalıntı elementlerin konsantrasyonunu kapsamaktadır. Bu faktörler kabul edilebilir eşikleri aştığında, nihai üründe istenmeyen mekanik ve fiziksel özellikler ortaya çıkmaktadır. Bu tür kusurları önlemek için ergimiş metal, döküm aşamasına kadar süreç boyunca yakından izlenmekte ve kontrol edilmektedir. Eriyik bileşimi ve kalitesinin yerinde hızlı analizi, döküm operasyonlarında çok önemli bir rol oynar, zamanında ayarlamaları kolaylaştırır ve genel verimliliği artırır. Sıvı fazdaki bu gerçek zamanlı ölçümler, sonraki katı hal analizlerini basitleştirmekle beraber proses verimliliğini de artırmaktadır. Sonuç olarak, son yıllarda safsızlıkları etkili bir şekilde tespit etmek ve gidermek için çeşitli ileri teknolojiler geliştirilerek ürün kalitesinin iyileştirilmesi sağlanmıştır.

Son yıllarda geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan sıvı metal test tekniklerinin arasında Termal Analiz Yöntemi, X-Ray Yöntemi, Tatur Testi, Akışkanlık Testi, Ultrasonik Test, Prefil Footprinter, PoDFA, Qualiflash Testi, Elektriksel Direnç Testi (LIMCA), Vakum Altında

Katılaştırma Testi (VAK) ve K-mold Testi yer almaktadır. Bu yöntemler, ergimiş alüminyum ve döküm ürünlerin kalitesinin değerlendirilmesinde önem arz etmektedir.

1.7.1. Termal Analiz Yöntemi

Bir metal veya alaşımın katılaşması sırasında, sıcaklık değiştikçe çeşitli fazlar oluşmaktadır. Katılaşma süreci boyunca sıcaklık-zaman verileri kaydedilerek, alaşımın katılaşma davranışına ilişkin nicel bilgiler sağlayan soğuma eğrileri oluşturulmaktadır. Termal analiz olarak bilinen bu teknik, 1980'lerden beri sıvı alüminyum temizlik kontrolü için kullanılmaktadır.

Bir TA testi yapmak için grafit, seramik veya çelikten yapılmış silindirik bir kap ya doğrudan eriyiğin içine daldırılır ya da bir pota kullanılarak ergimiş metalle doldurulur. Katılaşma sırasında sıcaklığını ölçmek için ergimiş numuneye bir veya iki K tipi termokupl yerleştirilir. Termokupl dataları bir veri kaydedici aracılığıyla bilgisayara aktarılır ve burada sıcaklık-zaman bilgileri kaydedilerek daha ileri analizler için işlenir. Öncelikle alüminyum döküm tesislerinde kullanılan bu yöntem, tane incelticiler ve modifiye ediciler gibi temel alaşım katkı maddelerinin etkinliğini izler. Ayrıca, tane boyutu, dendrit kol aralığı, ötektik silikon modifikasyon seviyeleri, ikincil ötektik erime noktaları, demir ve magnezyum elementlerinin intermetalik çökelmesi, katı fraksiyonlar ve diğer kritik karakteristik sıcaklıklar hakkında değerli bilgiler sağlar (Barlow & Stefanescu, 1998; Emadi vd., 2005).

1.7.2. X Işını Yöntemi

Bu yöntem, X-ışını radyografisi ve X-ışını tomografisi olarak iki ana başlık altında kategorize edilmektedir.

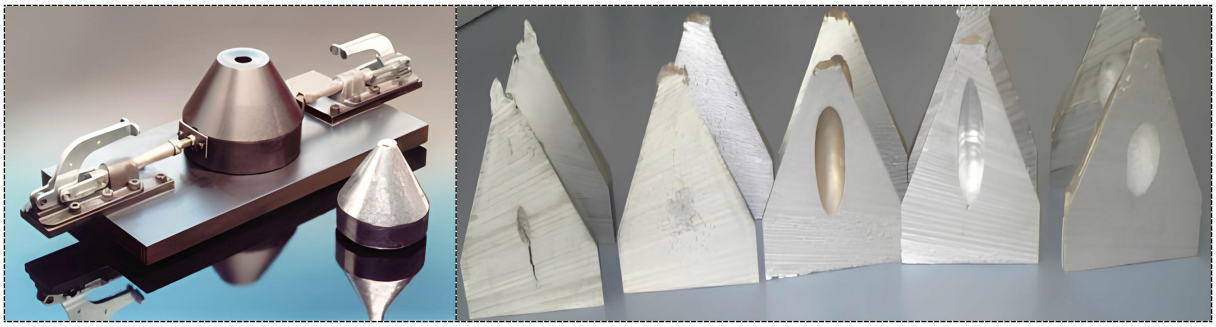
X-ışını radyografisi, tahribatsız bir muayene yöntemidir. Genellikle inklüzyonlar ve gözeneklerin yanı sıra iç çatlaklar, büzülme boşlukları, kaynak kusurları ve sıcak yırtılmalar gibi kusurları tespit etmek için kullanılmaktadır. Bir numunenin radyografik görüntüleri, kaliteyi değerlendirmek için standartlaştırılmış referans görüntülere dayalı olarak analiz edilmektedir. Bu teknik, farklı katı fazların X-ışınlarını farklı derecelerde absorbe etmesi prensibine göre çalışmaktadır. X-ışınları bir malzemeden geçerken, etkileşimleri malzemenin kırılma özelliklerine bağlıdır. Malzeme içinde iki farklı faz mevcut olduğunda, farklı emilim seviyeleri görüntü kontrastına neden olarak iç özelliklerin ve kusurların tespit edilmesini ve analiz edilmesini mümkün kılar. X-ışını radyografisi dökümlerdeki morfolojiyi, göreceli konumları ve inklüzyonları tespit edebilmesine rağmen, 3D görüntüler üretme ve partiküllerin içeriğini analiz etme konusunda sınırlamaları vardır. Ayrıca, etkinliği dökümün kalınlığı ile sınırlıdır. X-ışınlarının metale nüfuz etme kabiliyeti, malzemenin kalınlığından doğrudan

etkilenir ve kalın döküm kesitleri, yüksek enerjili X-ışını kaynakları kullanılmadan tam olarak incelenememektedir (de Andrade Silva vd., 2010).

X-ışını tomografisi (XRT) X-ışınlarına göre daha yeni ve daha kapsamlıdır. Başlangıçta tıbbi görüntüleme için geliştirilen XRT, o zamandan beri Pb içermeyen lehim bağlantıları, toz metalurjisi çelikleri ve metal matris kompozitlerinin araştırılması da dâhil olmak üzere çok sayıda metalurjik çalışmaya uygulanmıştır. Tek bir dönme ekseni etrafında çoklu açılardan alınan radyografiler analiz edilerek, kesit görüntüleri mikro yapıların 3D görselleştirmesini oluşturmak için derlenir. Bu, fiziksel kesit alma ihtiyacını ortadan kaldırır ve numune hazırlığını en aza indirger. Bununla birlikte üstün çözünürlüğe sahip görüntüler sağlar. Teknik, 3D kompozit görüntüyü üretmek için yüksek enerjili, monokromatik X ışınlarına dayanır. Gelişmiş görüntüleme yazılımı kullanılarak, bir numune içindeki inklüzyonların boyutlarını, konumlarını ve hacim oranlarını hassas bir şekilde ölçülebilir. Bununla birlikte, bu yöntemin birincil dezavantajı yüksek maliyetidir, bu da onu laboratuvar tabanlı bir tespit aracı olarak daha uygun hale getirir (Lashkari vd., 2009).

1.7.3. Tatur Test Yöntemi

Tatur testi, alüminyum alaşımlarındaki gözenekliliği değerlendirmek için tasarlanmış bir tekniktir. Tipik olarak iki parçadan oluşan delikli bir üst bölüme sahip konik bir kalıp kullanılmasını içerir. Test sırasında, ergimiş metal önceden ısıtılmış kalıp deliğine dökülür ve bir besleyici kullanılmadan katılaşmasına izin verilir. Kalıbın konik geometrisi, bir basıncın olmaması ile birleştiğinde, büzülme nedeniyle sıvıdan katıya dönüşüm sırasında hem mikro hem de makroporozite oluşumunu teşvik eder. Mikro ve makro porozitenin yanı sıra büzülme hacmini değerlendirmek için yoğunluk ölçümü ve suyun yer değiştirmesi gibi basit yöntemler kullanılmaktadır. Fakat son derece güvenilir sonuçlar ortaya çıkarmak için test sayısı artırılmalı ve bu testleri istatistiksel olarak analiz etmek gerekmektedir. Bu kapsamlı testler, pratik olmadığı için dökümhanelerde rutin bir kalite kontrol aracı olarak kullanılamamaktadır (El Haj vd., 2018). Şekil 14'te Tatur test modeline ait kalıp görseli ve kesit yüzey görüntüleri gösterilmektedir (Brůna & Sládek, 2011).

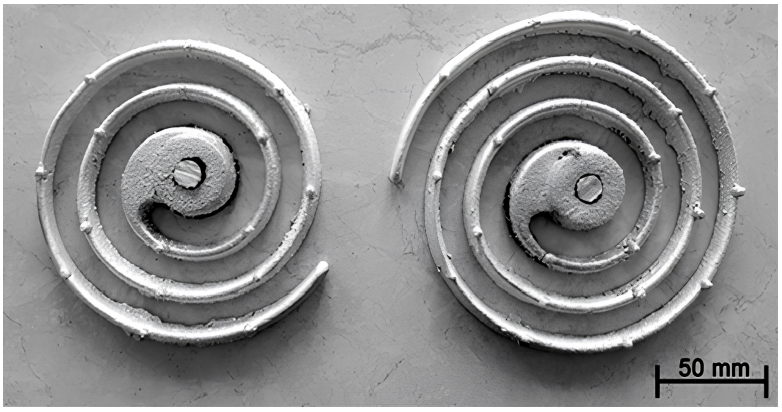


Şekil 14: Tatur Test Kalıbı ve Test Numuneleri (Brůna & Sládek, 2011)

1.7.4. Akıcılık Testi

Alüminyum alaşımlarının akışkanlığı, döküm sürecini ve nihai ürünün kalitesini etkileyen kritik bir özelliktir. Akışkanlık, ergimiş metalin katılaşmadan önce akıp bir kalıbı doldurma yeteneğini ifade eder. Bu durum karmaşık şekiller üretmek ve dökümlerde tekdüze özellikler elde etmek için önemlidir. Alüminyum alaşımlarının akışkanlığını değerlendirmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir ve her birinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Akışkanlığı ölçmek için en yaygın yöntemlerden biri, ergimiş metalin spiral şekilli bir kalıba döküldüğü spiral akıcılık testidir. Bu yöntem, metalin katılaşmadan önce kat ettiği mesafenin ölçülmesine dayanmaktadır. Bu da akışkanlığın doğrudan bir göstergesini ifade etmektedir (Kim vd., 2013; Semanco vd., 2012; Bang vd., 2022).

Akışkanlık ölçümlerinin kalıbın termal özelliklerindeki ve yüzey özelliklerindeki değişikliklere duyarlılığı, gaz sıkışmasının etkilerini en aza indirebilen ve ölçüm doğruluğunu artırabilen vakum akışkanlık testlerinin benimsenmesine yol açmıştır (Kim vd., 2013; Timelli & Bonollo, 2007). Alüminyum alaşımlarının akışkanlığı, bileşimleri ve mikro yapılarından önemli ölçüde etkilenir. Örneğin, silikon gibi alaşım elementlerinin eklenmesi, mikro yapıyı rafine ederek ve ergimiş metalin viskozitesini azaltarak akışkanlığı artırabilir (Sánchez vd., 2006; Haga vd., 2020). Çalışmalar, ötektik silikon parçacıklarının morfolojisinin de akışkanlıkta önemli bir rol oynadığını, daha ince ve daha düzgün dağılmış parçacıkların daha iyi akış özelliklerine yol açtığını göstermiştir (Han vd., 2022). Daha yüksek döküm sıcaklıkları genellikle viskoziteyi azalttığıdan akışı iyileştirerek akışkanlığı artırmaktadır (Sheggaf vd., 2023). Şekil 15'te farklı sıcaklıklarda dökümü gerçekleştirilen spiral akıcılık test kalıbına yapılan döküm numunelerinin görseli verilmiştir (Szuckia vd., 2021).



Şekil 15: Örnek Spiral Akıcılık Test Numuneleri (Szuckia vd., 2021)

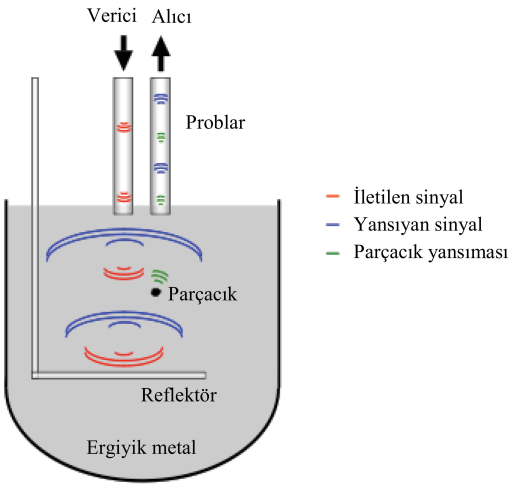
Araştırmalar ayrıca, döküm sırasında soğutma oranları ve kesme gerilimleri gibi işleme koşullarının alüminyum alaşımlarının akışkanlığını etkileyebileceğini göstermiştir. Örneğin, yarı katı bulamaçlara kesme geriliminin uygulanmasının daha iyi akış özelliklerini teşvik ederek ve kusur olasılığını azalttığı ve akışkanlığı iyileştirdiği gösterilmiştir (Murakami vd.,

2013; Murakami vd., 2016). Dahası, döküm sırasında ultrasonik titreşimlerin kullanımı, mikro yapıyı rafine ederek ve düzgün akışı teşvik ederek akışkanlığı artırmanın bir yöntemi olarak araştırılmıştır (Ravi vd., 2008). Sonuç olarak alüminyum alaşımlarının akışkanlığı, alaşım bileşiminden, mikro yapıdan, sıcaklıktan ve işleme koşullarından etkilenen çok yönlü bir özelliktir. Bu faktörleri anlamak, döküm süreçlerini optimize etmek ve yüksek kaliteli alüminyum bileşenlerin üretimini sağlamak için önemlidir.

Öte yandan akıcılık testi için çeşitli test kalıpları mevcuttur, ancak yaygın kullanımlarına rağmen çeşitli nedenlerden dolayı eleştirilere maruz kalmaktadır. En önemli dezavantaj, akışkanlık ölçümlerinin düşük tekrarlanabilirliğidir. Metal akışkanlığı, metalle ilgili değişkenler, kalıp ve kalıp/metal etkileşimleri ve teste özgü değişkenler de olmak üzere çok sayıda parametreden etkilenir. Farklı deneylerde tüm bu parametreler üzerinde kontrol sağlamak önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Akışkanlık testlerinin tekrarlanabilirliğini artırmak için, deneysel süreç sırasında bu faktörlerin çoğunu düzenlemek çok önemlidir (Balaban vd., 2006).

1.7.5. Ultrasonik Test

Bu testin amacı, akustik mikroskopi yöntemini kullanarak tane yapısı, inklüzyonlar ve gözeneklilik dâhil olmak üzere alüminyum dökümlerin metalurjik yapısını tahribatsız bir şekilde analiz etmektir. Bu yaklaşım, malzemeye herhangi bir zarar vermeden hem kantitatif karakterizasyona hem de yüzey altı ve toplu yapısal görselleştirmeye olanak tanımaktadır. Ayrıca, sıvı metaldeki gazların ve kapanımların varlığına ilişkin değerli bilgiler sağlamaktadır. Şekil 16'da ultrasonik test sisteminin çalışma prensibi gösterilmektedir (Gökelma vd., 2016).



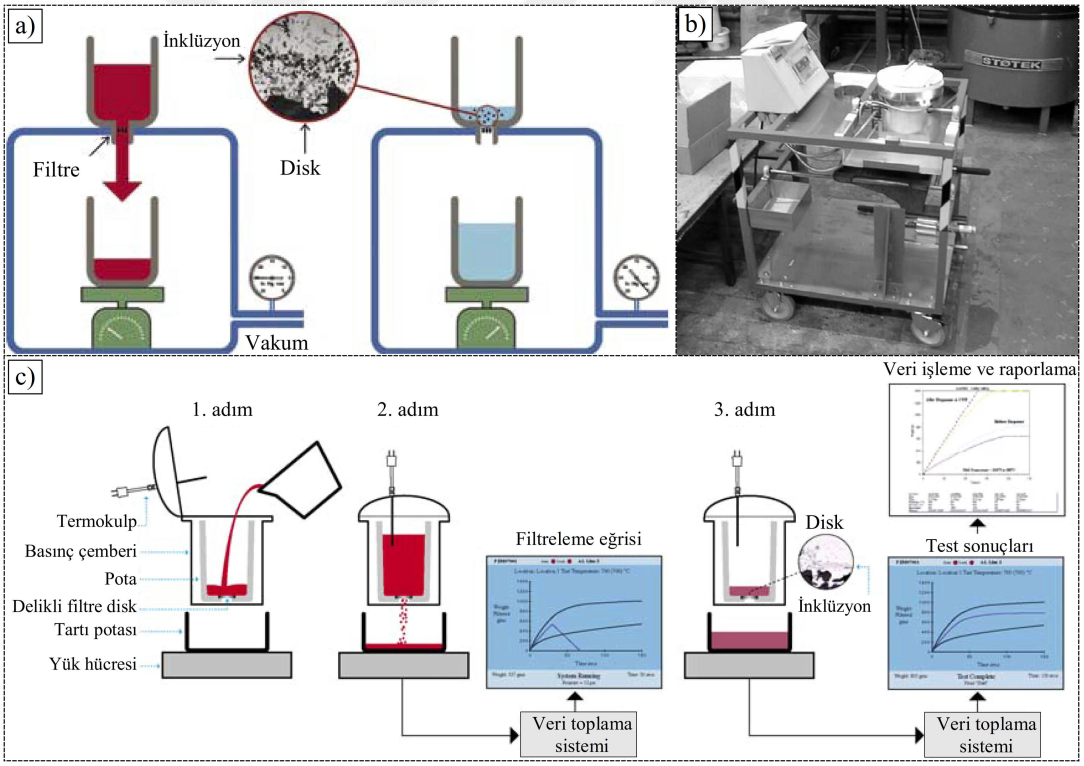
Şekil 16: Ultrasonik Testinin Şematik Gösterimi (Gökelma vd., 2016)

Taramalı akustik mikroskopi tekniği hem yüzeye yakın hem de yığın yapıları incelemek için parçaya ultrasonik darbeler uygulamaktadır. Dönüştürücüler tarafından ortaya çıkarılan bir darbe, numune yüzeyine doğru ilerler ve burada bir kısmı geri yansırken, geri kalanı numuneye

nüfuz ederek mikro yapısıyla etkileşime girer. Dönüştürücü, tipik olarak yansımaya karşılık gelen bir noktayı ve ardından mikro yapıdan gelen yankıları içeren sinyalleri algılar. Bu yankılar, belirli bölgelerdeki ultrason hızı gibi faktörlerden etkilenen bir zaman gecikmesinden sonra alınır. Her tarama noktasında yansıyan ve iletilen dalgaların genlikleri, malzemenin akustik özellikleri hakkında veri sağlayarak yapısal özelliklerine ilişkin ayrıntılı bilgiler sunmaktadır (Maev vd., 2001).

1.7.6. Prefil Footprinter, PoDFA, Qualiflash Test

Bu yöntemler bir filtreleme sistemine dayalı olarak çalışmaktadır. Sıvı alüminyum basınç altında bir filtreden geçirilerek kalıntılar filtre yüzeyinde yakalanmaktadır. Zamanla kalıntılar filtrenin yüzeyinde yoğunlaşmaktadır. Toplanan veriler daha sonra metalografik olarak analiz edilir ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kabul gören sonuçlar elde edilir. Prefil Footprinter, PoDFA ve Qualiflash test yöntemleri bu prensibi takip etmektedir. Şekil 17'de Prefil Footprinter, PoDFA ve Qualiflash test ekipmanları gösterilmektedir (Stanica & Moldovan, 2009).



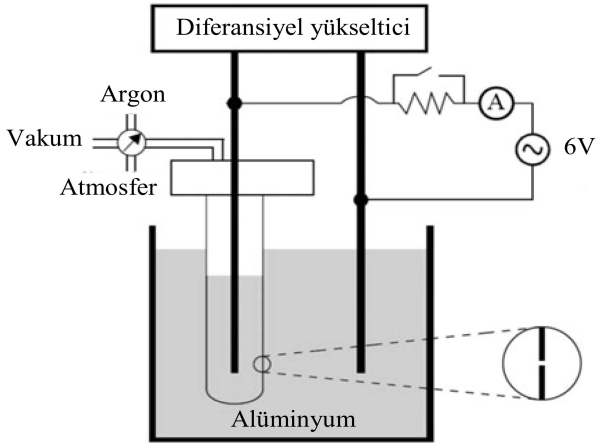
Şekil 17: a) PoDFA Yöntemi, b) Qualiflash Cihazı ve c) PREFIL-Footprinter Çalışma Prensibi (Karppinen, 1997; Enright vd., 2003; Jaradeh & Carlberg, 2011; Tokatlı, 2022)

Şekil 17a'da, ergimiş bir metal numunesi vakum basıncı kullanılarak küçük bir seramik filtreden çekilir ve yaklaşık 1,5 kg sıvı metal filtrelendikten sonra işlem durdurulur. Filtrede yakalanan kalıntılar daha sonra metalografik inceleme yoluyla analiz edilir. Şekil 17b'de, ergimiş alaşım tutarlı bir sıcaklık ve ince gözenekli bir filtreden önden ısıtılmış bir potaya

dökülür. Filtre uygulanan metalin ağırlığı hassas bir terazi kullanılarak izlenir ve ağırlığa karşı zaman grafiği çizilir. Zamanla, eriyikten gelen kalıntılar filtre yüzeyinde birikerek akış hızını kademeli olarak azaltır. Akış hızının oluşturduğu eğrinin eğimi ve çizdiği deseni, eriyiğin temizliğinin göstergesi olarak işlev görür. Eriyik ne kadar temizse filtreden çok hızlı geçer ve dik ve belirgin bir eğri oluşturur. Şekil 17c'deki düzenekte, merkezinde bir delik bulunan huni şeklindeki bir kabuğun tabanına yerleştirilmiş bir seramik filtre bulunmaktadır. Yaklaşık 430°C'de tutulan kabuk, metalin filtreden altına yerleştirilen basamak benzeri bir külçe kalıbına geçmesine izin verir. Kalıpta metal tarafından doldurulan basamakların sayısı eriyiğin temizliğini değerlendirmek için kullanılır ve daha fazla sayıda doldurulan basamak daha yüksek temizliğe işaret eder.

1.7.7. Elektriksel Direnç Testi

1970'ler ve 1980'lerde Doutre ve Guthrie tarafından yürütülen çalışmalarda, ergimiş alüminyumun yüksek bir doğru akıma maruz bırakılırken küçük bir açıklıktan çekilmesini sağlayan bir teknoloji geliştirilmiştir. İletken olmayan kapanımlar geçerken açıklıktaki direnci artırdığından, boyutlarını belirlemek için voltaj ölçümleri kullanılabilir. Bu, içinden çekilen ölçülebilir sıvı hacmiyle birleştiğinde, partiküllerin gerçek zamanlı hacimsel dağılımının doğru bir şekilde ölçülmesini sağlar (Hudson & Apelian, 2016). Şekil 18'de gösterilen LiMCA tekniği, dirençli darbe prensibine dayalı olarak çalışmaktadır. Bu yöntemde, çevreleyen sıvıdan farklı elektrik iletkenliğine sahip partiküller küçük bir delikten elektriksel olarak yalıtkan bir kaba çekilir. Her bir partikül açıklıktan geçerken eşdeğer hacimde iletken sıvının yerini değiştirdiğinden, elektrik direncinde geçici bir değişiklik meydana gelir. Bu değişiklik, voltajın sabit uygulanan bir akım altındaki darbesi olarak kaydedilir. Ardından bu darbe şiddetleri sayılarak yükseltilir. Bu işlemlerin ardından genliklerine göre sınıflandırılır. Veriler, kilogram metal başına binlerce inklüzyon (k/kg) olarak ifade edilen partikül sayısı ve her bir numune içindeki boyut dağılımı hakkında kesin bilgiler sağlamaktadır (Dupuis & Dumont, 2016).



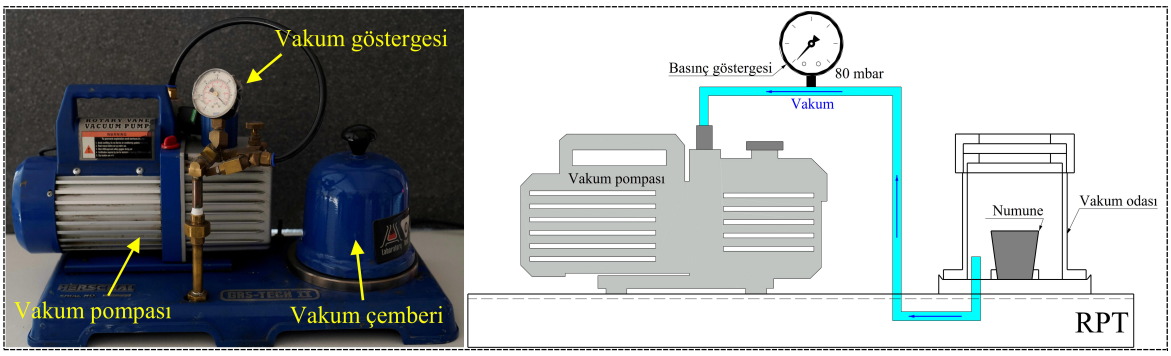
Şekil 18: LiMCA Testinin Şematik Gösterimi (Dupuis & Dumont, 2016)

1.7.8. Vakum Altında Katılaştırma (VAK) Testi

VAK testinin temel avantajlarından biri, alüminyum alaşımlarının döküm kalitesine ilişkin içgörüler sağlama yeteneğidir. Dışpınar ve Campbell'e göre VAK, döküm alüminyum ürünlerinin bütünlüğünü anlamak için çok önemli olan bifilm değerlendirmesi için özel olarak tasarlanmıştır (Dışpınar & Campbell, 2016). Bununla beraber VAK testi, basitliği, maliyet etkinliği, tekrarlama kolaylığı ve hızlı sonuçları nedeniyle dökümhanelerde yaygın olarak benimsenen bir yöntemdir. Teknik, sıvı alüminyumun düşük basınç altında soğutulması sırasında gaz porozitesi oluşumu prensibine dayanmaktadır. Bu süreçte, yaklaşık 200 g ergimiş alüminyum iki ince duvarlı çelik krozeye dökülür. Krozelerden biri atmosferik basınç altında katılaşması beklenirken, diğeri ise 80 mbar basınçta eriyik tamamen katılaşana kadar sabit tutulduğu bir vakum odasına yerleştirilir. Katılaşma tamamlandığında, numuneler kalıplardan çıkarılır ve yoğunluk ölçümü veya gözenekliliği gözlemlemek için kesit alma yoluyla değerlendirilir. Tüm prosedür birkaç dakika içinde tamamlanır (Djurdjevic vd., 2010).

Bu şartlar altında katılaşma evresine geçen numunelerden en doğru verileri elde etmek için numune tipik olarak ikiye kesilir ve enine kesit yüzeyi gözeneklilik açısından incelenir. Yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntem de numunenin yoğunluğunun ölçülmesidir. Kesilen numunelerin görsel değerlendirmesi genellikle gözlemlenen gözenekliliğin standart bir grafikle karşılaştırılmasıyla yapılır. Burada gözenek sayısının az olması daha temiz bir eriyiğe işaret eder. Dahası, VAK testinin etkinliği bilgisayarlı tomografi (BT) gibi gelişmiş görüntüleme teknikleriyle birleştirildiğinde artırılabilir. Gul vd. (2023), BT kusur ölçümlerinin döküm alüminyum alaşımlarının içyapısı hakkında ayrıntılı bilgi sağlayarak VAK testini tamamlayabileceğini ve böylece döküm kalitesinin genel değerlendirmesini iyileştirebileceğini vurgulamaktadır. Bu metodolojilerin entegrasyonu, mekanik performansın kritik olduğu uygulamalar için hayati önem taşıyan alüminyum alaşımlarının mikro yapısal bütünlüğünün daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır.

Sonuç olarak, VAK testi yöntemi, özellikle alüminyum döküm alaşımlarının kalitesini değerlendirmek için temel bir araçtır (Uslu vd., 2023). Bu yöntemi gelişmiş görüntüleme teknikleriyle entegre ederek ve döküm parametrelerinin etkisini anlayarak, üreticiler alüminyum bileşenlerinin güvenilirliğini ve performansını önemli ölçüde artırabilir. Bu alandaki devam eden araştırma ve geliştirme, alüminyum alaşımlarının üretiminde titiz kalite kontrol önlemlerinin önemini vurgulamaya devam etmektedir. Ayrıca VAK ölçümleri, örnekleme türbülansı, oda vakum basıncındaki değişimler ve katılaşma hızı gibi çeşitli parametlere karşı fazlasıyla hassastır (Hudson & Apelian, 2016). Şekil 19, VAK cihazının bir gösterimini ve çalışma prensibini sunmaktadır (Tokatlı vd., 2022).

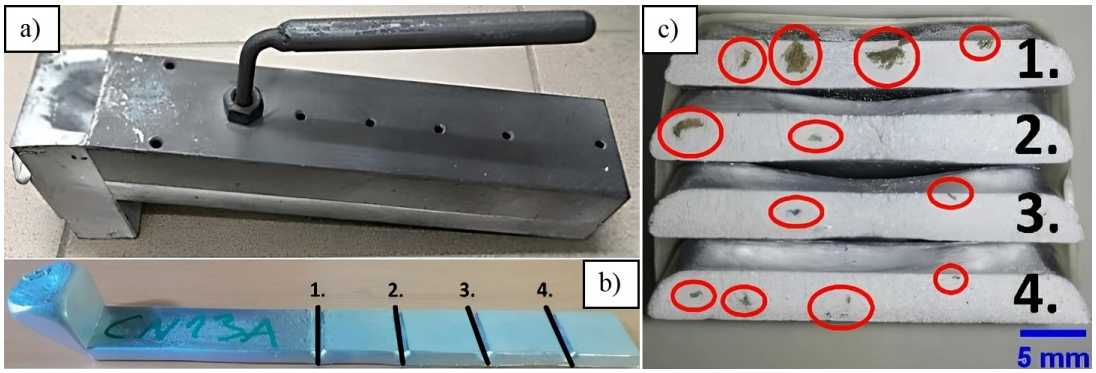


Şekil 19: VAK Test Cihazı ve Şematik Gösterimi (Tokatlı vd., 2022)

1.7.9. K-mold Testi

Japonya'daki Nippon Light Metal Ltd. şirketinde Sanji Kitaoka tarafından 1973 yılında geliştirilen K-mold yöntemi, üretim koşulları altında alüminyum eriyiklerinin makro temizliğini değerlendirmek için tasarlanmış bir kırılma testidir. Kırk yılı aşkın bir süredir bu yöntem pratikliğinden kaynaklı bir atölye aracı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. En önemli avantajları arasında (i) hızlı değerlendirme (yaklaşık 10 dakika), (ii) kullanım kolaylığı, (iii) basit numune alma, (iv) taşınabilirlik, (v) inklüzyonlara ve oksit filmlerine karşı yüksek hassasiyet ve (vi) maliyet etkinliği yer almaktadır (Djurdjevic vd., 2010).

Bu işlemde, yaklaşık 400 g ergimiş alüminyum önceden ısıtılmış test kalıbına dökülür ve bir süre sonra düz çubuklar (240x36x6 mm) şeklinde test numuneleri elde edilir. Şekil 20'de K-mold kalıbı ve elde edilen numuneler gösterilmektedir. Bu test numuneleri daha sonra analiz için daha küçük parçalara kesilir. Kırık yüzeyler gözle veya düşük bir büyütme etkisi altında incelenebilirken, gelişmiş görüntü tarama teknikleri ile gözeneklerin sayısı ve boyutu hakkında ayrıntılı bilgiler alınabilir. Test numunelerinin çabuk katılaşması, ince bir matris oluşturarak kırılma yüzeyindeki kapanımların net bir şekilde tespit edilmesini sağlamaktadır (Hudson & Apelian, 2016).



Şekil 20: K-mold a) Kalıbı, b) Numunesi ve c) Kırık Yüzey Görüntüleri (Máté vd., 2020)

Eriyik temizliği K-mold değeri Denklem 1 kullanılarak belirlenir. Bu değer, mevcut inklüzyonların sayısına odaklanarak test parçası yüzeylerinin görsel incelemesinden elde edilir. Eriyiğin temizliğinin bir göstergesi olarak hizmet eder. Denklemde K, bir numunenin tek bir

parçasının kırılma yüzeyinde gözlemlenen ortalama inklüzyon sayısını temsil eder. “s”, denetlenen tüm parçalarda bulunan toplam inklüzyon sayısını gösterir. “n”, incelenen toplam numune sayısına karşılık gelir. Bu formül, inklüzyonların dağılımına dayalı olarak eriyik temizliğinin standartlaştırılmış bir değerlendirmesine olanak tanır.

$$K = \frac{s}{n} \tag{1}$$

Şekil 21’de görseli verilen kırık yüzeylerden elde edilen K verileri küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır. Görseller ayrı ayrı incelendiğinde sıvı metal kalitesindeki düşüş K değerindeki artışa bağlıdır. Bu açıklamaya göre K indeksinin değer aralığı baz alınarak aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

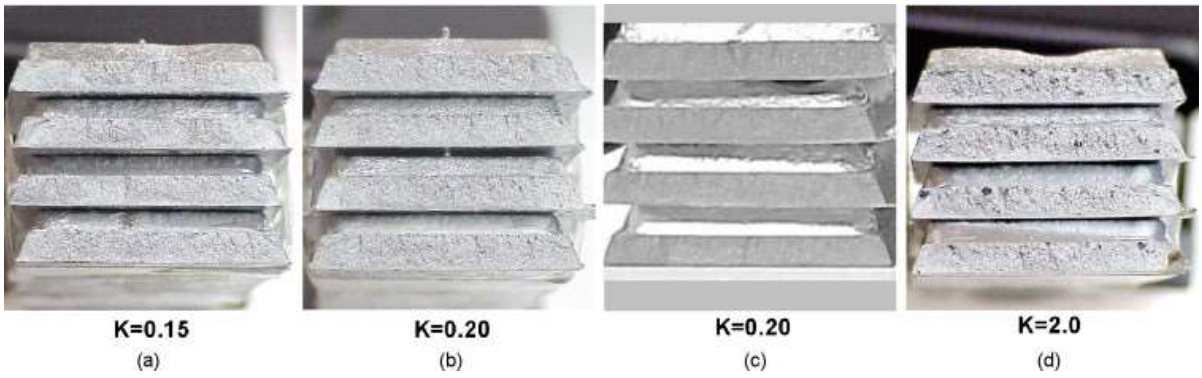
I. K-değeri < 0,5 → Sıvı metal temizdir.

II. 0,5 < K-değeri < 1,0 → Sıvı metal kalitesi kabul edilebilir. Yine de sıvı metalin temizlenmesi gerekir.

III. 1,0 < K → değeri Sıvı metal temizliği şarttır (Balaban vd., 2006).

Sıvı metal temizliğinin eriyik kalitesi üzerindeki etkisi, eriyik işlemlerinden önce ve sonra ölçülen K değerleri karşılaştırılarak analiz edilmektedir. K değerlerindeki yüzde değişim (ΔK) daha sonra Denklem 2 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu bağlamda, K1 ergitme işleminden önce kaydedilen K değerini temsil ederken, K2 işlemden sonra elde edilen K değerine karşılık gelmektedir (Gyarmati vd., 2019). Bu yaklaşım, temizleme işlemiyle elde edilen sıvı metal temizliğindeki iyileşmenin nicel bir değerlendirmesini sağlamaktadır.

$$\Delta K = \frac{(K2 - K1)}{K1} \times 100 \tag{2}$$



Şekil 21: K-mold Kırık Yüzeyler; a) Birincil Alüminyum, b) Yolluk Hurdaları, c) Basınçlı Döküm Yöntemi ve d) İkincil Alüminyum (Wannasin vd., 2007)

İKİNCİ BÖLÜM

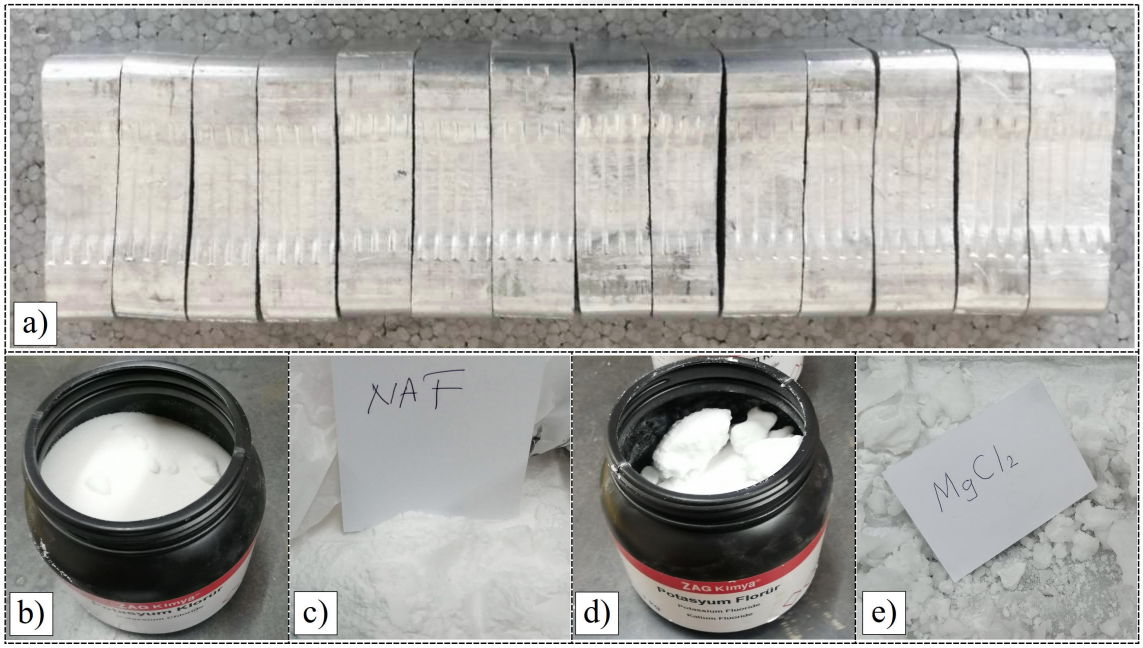
2. YÖNTEM

2.1. MATERYAL

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde içeriğinde yüksek miktarda Al-Si ötektik fazı bulunan, yüksek akıcılık, kolay dökülebilirlik ve geniş katılaşma aralığı özellikleri sayesinde endüstri alanında da yaygınca kullanılan hurda A356 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Tedarik edilen A356 hurda alaşımının, EN 1706 standartlarına göre optik spektrometre ile yapılan kimyasal analiz sonucu elde edilen bileşimi Tablo 5'te verilmiştir. A356 hurda alaşımının ergitme işlemine hazır olarak külçeden kesilmiş hali Şekil 22'de gösterilmiştir. Sıvı metal temizleme işlemleri için flaks olarak KCl, NaF, KF ve $MgCl_2$ kimyasalları seçilmiştir. Bu kimyasallara ait görseller Şekil 22'de sunulmuştur.

Tablo 5: A356 Hurda Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi

Alaşım	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Al
A356 hurda	0,11	7,12	0,01	0,01	0,35	0,02	0,01	0,08	Kalan

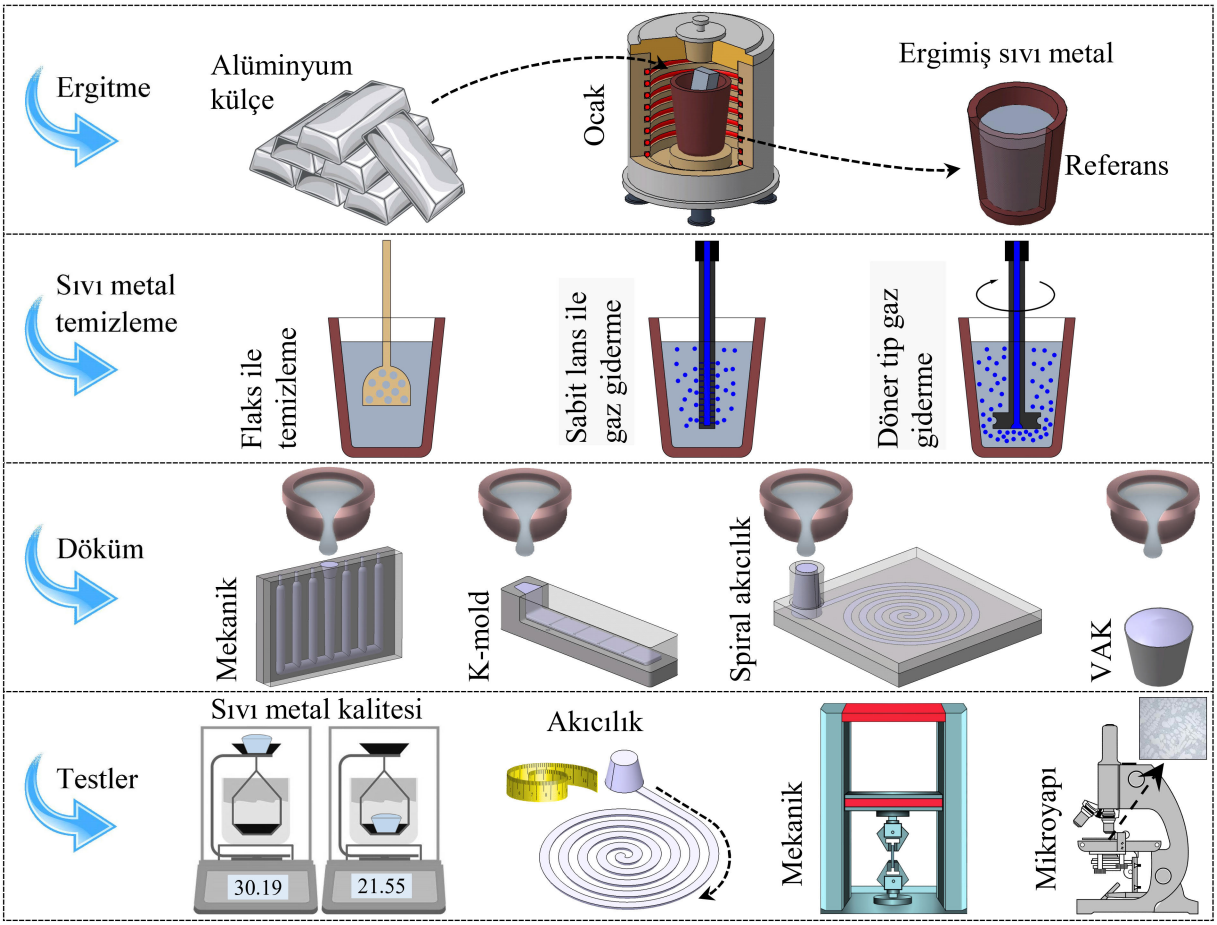


Şekil 22: a) Kesilmiş Hurda A356 Alaşımı ve b) KCl, c) NaF, d) KF, e) MgCl2 Kimyasalları

2.2. YÖNTEM

Çalışma kapsamında hurda A356 alüminyum alaşımının dökümünde farklı sıvı metal temizleme yöntemlerinin etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk önce hurda A356 alaşımının ergitme işlemi yapılmış ve daha sonra deney tasarımına göre sıvı metal temizleme yöntemleri uygulanmıştır. Bu kapsamda flaks, sabit lans ve döner tip sıvı metal temizleme

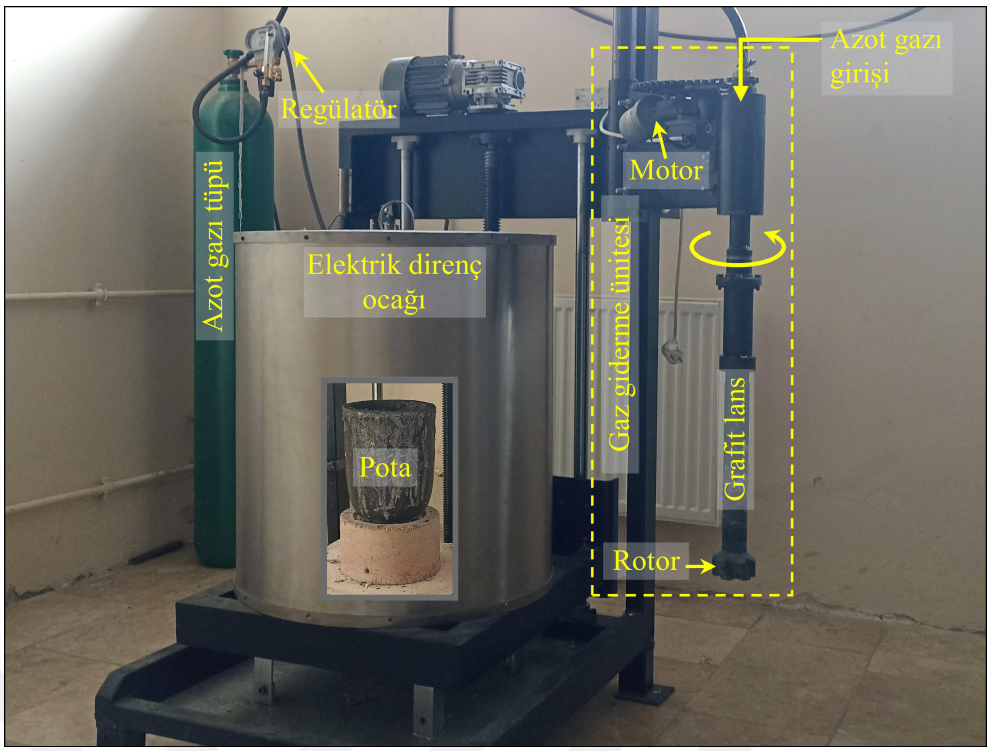
metotları tercih edilmiştir. Sıvı metal temizleme işlemlerinin ardından referans döküm de dâhil olmak üzere hazırlanan dört farklı ergimiş metalin, sırasıyla K-mold, vakum altında katılaştırma (VAK), spiral akıcılık ve mekanik test kalıplarına dökümü gerçekleştirilmiştir. Bu kalıplardan elde edilen numuneler ile yoğunluk testi, imaj analizi, akıcılık testi, mekanik test ve metalografik muayene işlemleri yapılarak sıvı metal kalitesi analiz edilmiştir. Deneysel çalışmaların aşamaları, şematik bir görsel ile Şekil 23'te sunulmuştur.



Şekil 23: Deneysel Çalışmalar Sürecinde Yapılan İşlemler

2.2.1. Ergitme İşlemi

Ergitme işleminde kullanılmak üzere A356 hurda alaşımına ait külçeler belirli ölçüler halinde kesilmiştir. Metal ergitme işlemleri, Şekil 24'te görseli verilen 8 kg sıvı metal kapasitesine ve 10 kW ısıtma gücüne sahip elektrik direnç ocağında bulunan SiC pota içerisinde gerçekleştirilmiştir. İncelemesi yapılan numunelerin kalıp boşluklarına göre toplam ağırlıkları hesaplanmış ve her bir döküm işlemi için pota şarjı 5 kg olacak şekilde ayarlanmıştır. Ergitme işlemlerinde ocak sıcaklığı kademeli olarak 720°C sıcaklığına kadar çıkarılmış ve bütün dökümler için bu sıcaklıkta sabit tutulmuştur.



Şekil 24: Elektrik Direnç Ocağı ve Gaz Giderme Ünitesi

2.2.2. Sıvı Metal Temizleme İşlemleri

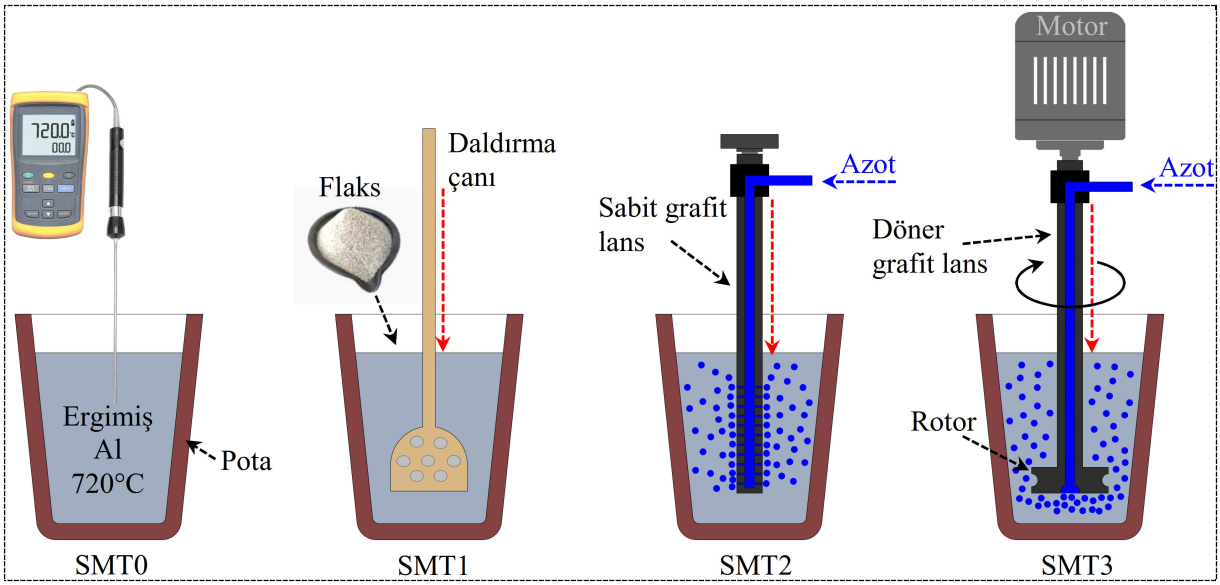
Deney tasarımına uygun şekilde belirlenen parametreler doğrultusunda 720°C sıcaklığındaki ergimiş metale, sıvı metal temizleme yöntemleri uygulanmıştır. Sıvı metal temizleme yöntemlerine ait parametreler Tablo 6'da verilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında karışıklığı önlemek ve işlem kolaylığı sağlamak amacıyla, sıvı metal temizliği ifadesi baz alınarak her bir deney Tablo 6'da gösterildiği şekilde kodlanmıştır.

Tablo 6: Sıvı Metal Temizleme Yöntemlerinin Parametreleri

Sıvı Metal Temizleme İşlemi	Deney Kodu	Ekipman	Materyal	İşlem Parametresi
Temizleme yok (referans)	SMT0	-	-	-
Flaks ile temizleme	SMT1	Daldırma Çanı	Flaks	%45 $MgCl_2$+%45KCl +%5 NaF+%5 KF
Sabit lans ile gaz giderme	SMT2	Sabit Lans	Azot gazı	5 lt/dk
Döner tip gaz giderme	SMT3	Rotor	Azot gazı	5 lt/dk, 300 dev/dk

Temizleme yok işleminde (SMT0) uygulanan sıvı metal temizleme yöntemlerini karşılaştırabilmek için referans dökümler yapılmıştır. Flaks ile temizleme işleminde (SMT1) şarj ağırlığının %0,5'i oranında farklı bileşenlerden oluşturulmuş flaks, daldırma çanı yardımıyla ergimiş metale ilave edilerek karıştırılıp homojenleştirilmiş ve böylece geleneksel

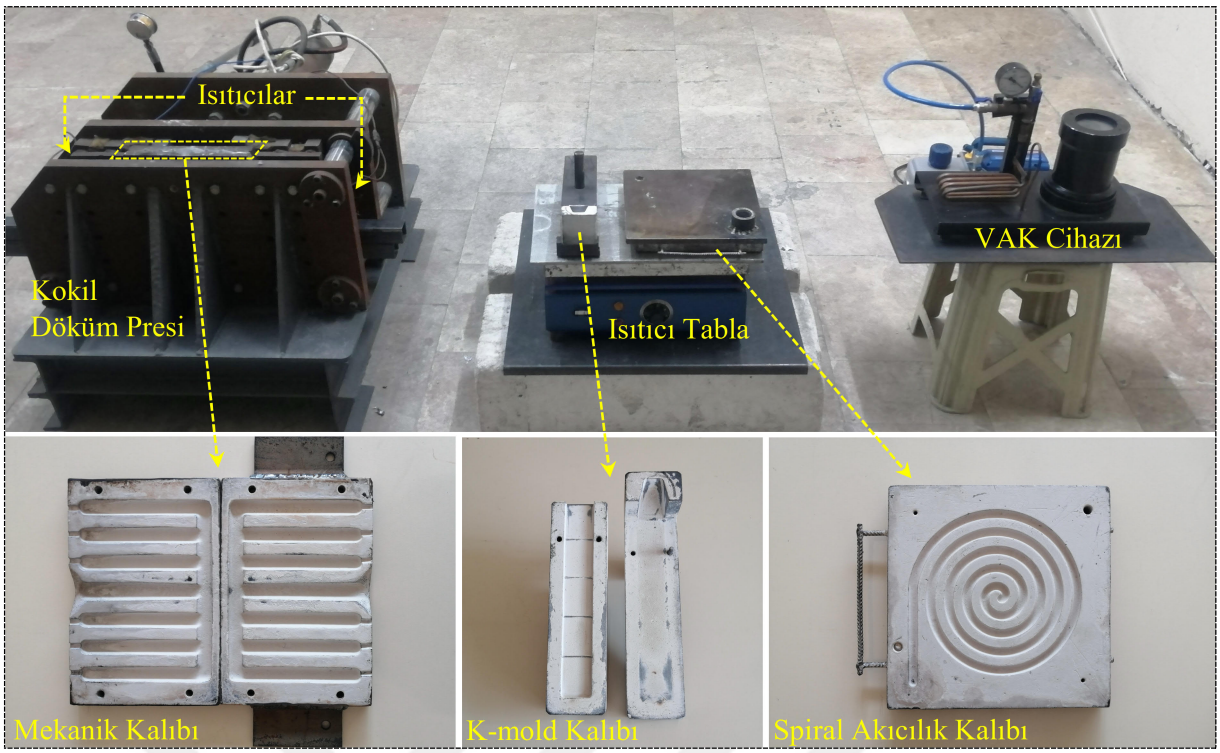
temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Tablo 6'da flaksı oluşturan kimyasal bileşikler ve % oranları verilmiştir. Bir diğer sıvı metal temizleme yöntemi olarak sabit lans ile gaz giderme metodu (SMT2) kullanılmıştır. Bu yöntemde 720°C'deki ergimiş metale, 5 lt/dk akış hızındaki azot gazı, 5 dakika boyunca sabit lans ile enjekte edilmiştir. Döner tip gaz giderme olarak tercih edilen edilen sıvı metal temizleme yönteminde (SMT3) ise, 5 lt/dk gaz akış hızı ve 300 dev/dk rotor dönme hızında ergimiş metale 5 dakika boyunca azot gazı tatbik edilmiştir. Çalışmanın deneysel aşamalarında uygulanan sıvı metal temizleme yöntemlerine ait şematik gösterim Şekil 25'te verilmiştir.



Şekil 25: Sıvı Metal Temizleme Yöntemlerinin Şematik Gösterimi

2.2.3. Döküm İşlemleri

Döküm sonrası kalıplara zarar vermeden numuneleri kolayca çıkarabilmek için test kalıplarına döküm öncesi kalıp ayırıcı olarak bor nitrür uygulaması yapılmıştır. Döküm işleminden önce yapılan bir diğer işlem ise kokil kalıpların ön ısıtmasıdır. Bu işlemin amacı, sıvı metalin hâlihazırda soğuk kokil kalıpla arasındaki ısı transferini azaltmak ve kalıp içerisinde sıvı metalin katılaşma süresini uzatarak kalıbı tam doldurmasını sağlamaktır. Kokil kalıpların ısıtma işlemlerinde mekanik kalıbı için ısıtıcı düzeneğe sahip kokil pres, K-mold, spiral akıcılık ve VAK kalıpları için ise ısıtıcı tabla kullanılmıştır. 300°C sıcaklık değerlerine kadar ulaşabilen her iki ısıtma düzeneğinde döküm öncesi kalıplar 250°C oluncaya kadar ısıtılmıştır. Döküme hazır hale getirilen kalıpların yerleşimi ve ısıtma düzenekleri Şekil 26'da verilmiştir. Döküme hazır olan 720°C'deki ergimiş haldeki sıvı metal, cüruf alma işleminin ardından test kalıplarına dökülmüştür. Numuneler katılaşma sonrası yeterli soğuma süresi beklenildikten sonra kalıpların içerisinden çıkarılmıştır.



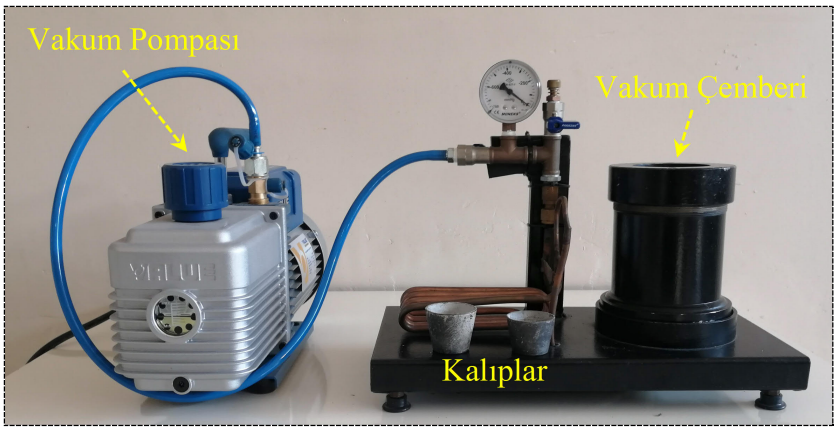
Şekil 26: Test Kalıpları ve Yerleşimi

2.2.4. Döküm Numunelerinin İncelenmesi

Döküm sonrası katılaşma ve soğumanın akabinde kalıplar açılarak döküm numuneleri alınmıştır. Dökümler sonrası VAK, K-mold, spiral akıcılık ve mekanik test numuneleri elde edilmiştir. Yapılan dökümlerden sonra ilk olarak numuneler makro olarak incelenmiş ve fotoğraf görüntüleri alınmıştır. Akabinde her bir test numunesi aşağıda detayları verildiği şekilde incelenmiştir.

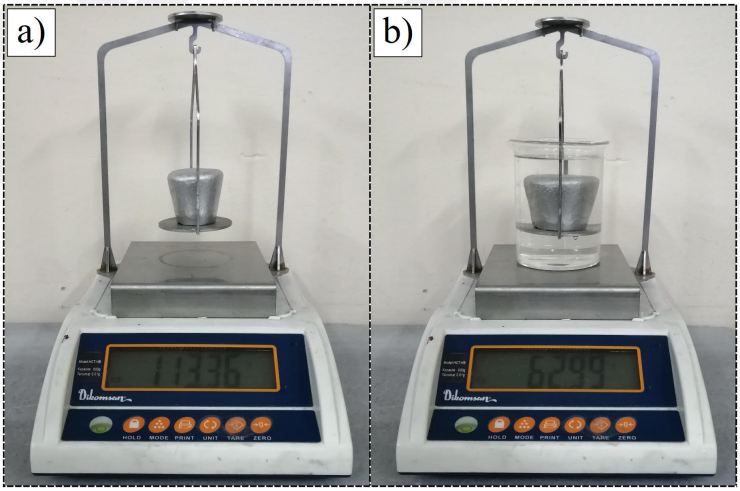
2.2.4.1. VAK testi numunelerinin incelenmesi

Çalışma kapsamında uygulanan sıvı metal temizleme yöntemlerinin etkisini belirlemek amacıyla kullanılan VAK testi cihazı Şekil 27'de gösterilmiştir. Bu işlemde test cihazının kalıbına yaklaşık 200 g sıvı metal dökülmüştür. Ardından sıvı metal içerisindeki gaz ve inklüzyonların katılaşma sürecinde daha kolay büyümesini sağlamak için ergimiş metal azaltılmış basınç altında tutulmuştur. Ergitilmiş alüminyum alaşımı, VAK test cihazında basınç seviyesi yaklaşık 80 mbar'a indirgenerek sıvı metalin tamamen katılaşması beklenilmiştir. Katılaşma tamamlandıktan sonra numuneler kalıplardan çıkarılarak ilk önce yoğunluk ölçümleri yapılmış, daha sonra içyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 27: Vakum Altında Katılaştırma (VAK) Testi Cihazı

VAK testi numunelerinin yoğunluk ölçümleri, Arşimet prensibi esas alınarak yapılmıştır. Bu yöntemde, her bir numunenin ağırlığı önce havada ve ardından sıcaklığı 20°C'deki yoğunluğu d_s=0,99821 g/cm³ olan saf suda tartılmıştır. Tartma işlemleri, Şekil 28'de gösterilen ve 0,02 g hassasiyetle ölçüm yapabilen hassas terazinin üzerine kurulan Arşimet deney düzeneği kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 28: Yoğunluk Ölçüm Deneyi; a) Havada ve b) Suda Tartım İşlemi

Elde edilen veriler ile Denklem 3'te verilen formül kullanılarak numune yoğunluğu hesaplanmıştır. Bu formülde d_n döküm numunesinin yoğunluğunu, m_h numunenin havadaki ağırlığını, m_s numunenin saf sudaki ağırlığını ve d_s ise oda sıcaklığındaki saf suyun yoğunluğunu ifade etmektedir. Numunelerin % gözenek değerleri ise Denklem 4'te yer alan formüle göre belirlenmiştir.

$$d_n = \frac{m_h}{m_h - m_s} \times d_s \qquad (3)$$

$$\%\ Gözenek = [(Teorik\ yoğ. - Deneysel\ yoğ.) / Teorik\ yoğ.] \times 100 \qquad (4)$$

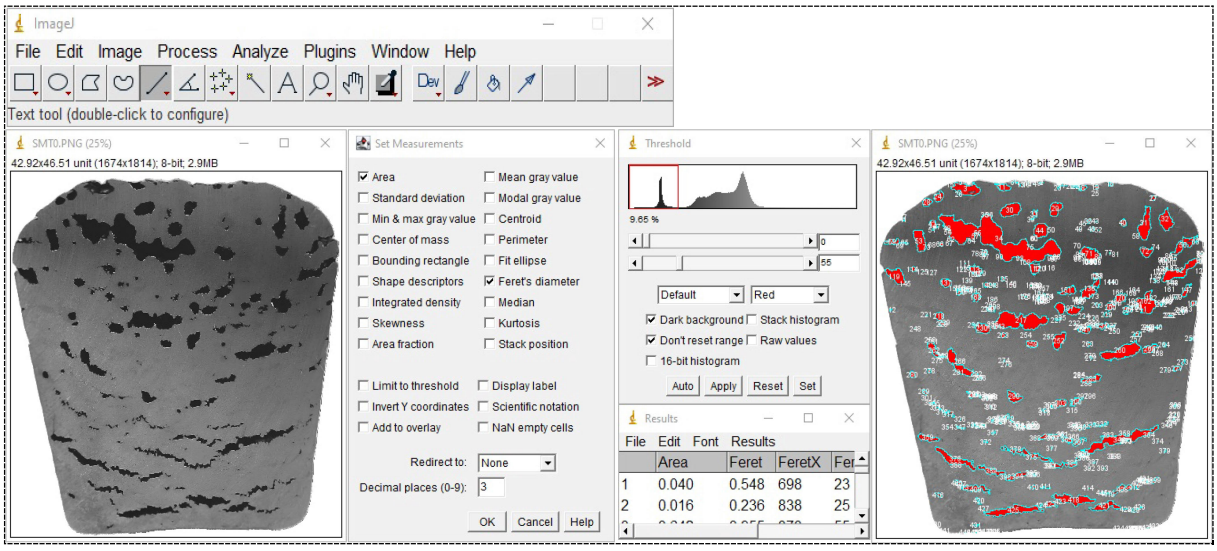
Yoğunluk ölçümü tamamlanan VAK testi numunelerinin içyapısının kontrolü için Şekil 29'da gösterildiği gibi testere yardımıyla yaklaşık olarak dikey ve ortadan olacak şekilde ikiye

ayrılmıştır. Numunelerin kesilen yüzeylerinde oluşan testere izlerinin ve derin çiziklerin giderilerek daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmesi amacıyla, zımpara-parlatma cihazı kullanılarak numuneler 180 numara ve 400 numara zımpara ile zımparalanmıştır.



Şekil 29: VAK Numune Kesim Görselleri

Bifilm indeksini hesaplamak için öncelikle VAK numunelerinin kesilmiş ve zımparalanmış yüzeylerindeki gözenekler görünür hale getirilmiştir. Daha sonra bu yüzeylerin görüntüleri bir tarayıcı yardımıyla dijital ortama aktarılmıştır. Elde edilen görüntüler Şekil 30'da ekran görseli verilen İmage J görütnü işleme yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu işlemde ilk önce ölçek çizgisi tanımlanmış ve 'Feret çapı' yöntemine dayalı hesaplamalar başlatılmıştır. Analitik yazılım, numune içindeki kusurların çevresini tanımlamak için çeşitli algoritmalar kullanır ve ardından yapısal kusurların boyutunu ve morfolojisini analiz edip karşılaştırarak Feret çapını belirler. Hesaplamaya dâhil edilen alanlar sayısal veri olarak ölçülür. Feret değerleri, numune içinde kapladıkları alanın oranını belirlemek için toplanır. Elde edilen sayı değeri, numune içerisindeki oksit ve gaz inklüzyonlarının kapladığı alanı temsil eder. Bu prosedür, deneyler sırasında üretilen tüm VAK numunelerine tutarlı bir şekilde uygulanmış ve bifilmli değerlerin belirlenmesine olanak sağlamıştır.



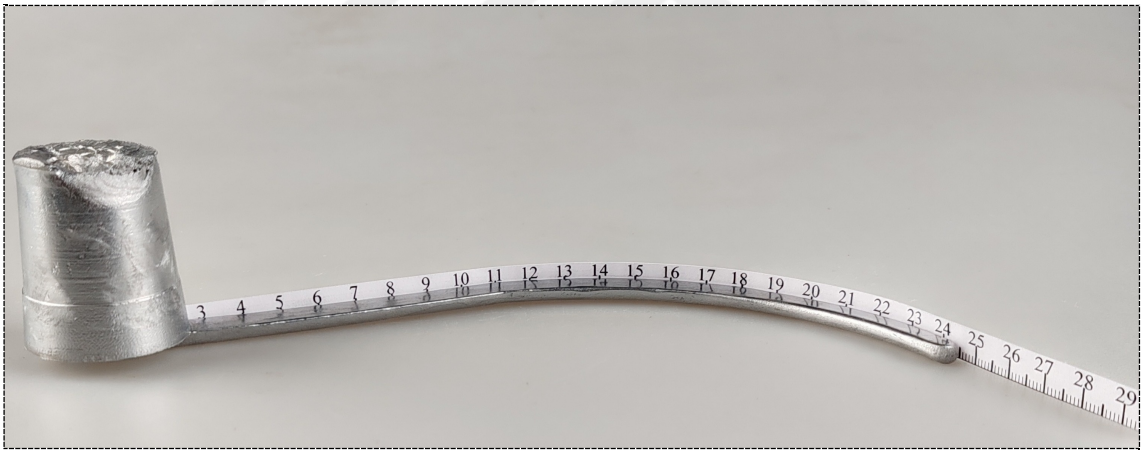
Şekil 30: Image J Yazılımı ile VAK Testi Numunesi Görüntüsünün Analiz Edilmesi

2.2.4.2. K-mold deney numunelerinin incelenmesi

Yapılan dökümlerde, sıvı metalin temizlik ölçütü K-mold testi ile de belirlenmiştir. Deneylerde, Şekil 26'da gösterilen K-mold test kalıbına yaklaşık 200 g ergiyik metal dökülmüştür. Katılaşma sonrası numune üzerinde bulunan çentikli bölgelerden kırılmıştır. Elde edilen parçaların kırık yüzeylerinin fotoğrafları çekilerek dijital ortama aktarılmıştır. Bu fotoğraflar ile görsel incelenme yapılarak kırık yüzeylerdeki kirlilik, oksit kalıntısı gibi kusurların sayıları belirlenmiştir. Denklem 1'de verilen formül kullanılarak alaşımın temizlik miktarını sayısal olarak belirten K değeri hesaplanmış ve Bölüm 1.7.9'da anlatılan K değerinin açıklamalarına bağlı olarak değerlendirmeler yapılmıştır.

2.2.4.3. Spiral akıcılık numunelerinin incelenmesi

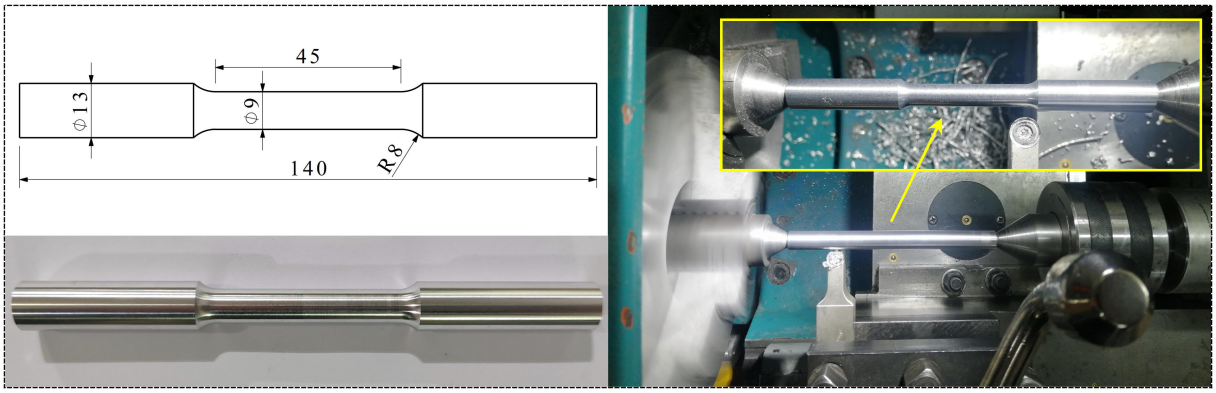
Çalışma kapsamında temizleme yöntemlerinin değerlendirilmesi için sıvı metalin akıcılığı da kontrol edilmiştir. Bu işlem için Şekil 26'da gösterilen spiral akıcılık kalıbı seçilmiştir. Spiral akıcılık kalıbından elde edilen numunelerin uzunlukları ölçülerek sıvı metal ilerleme mesafeleri belirlenmiştir. Şekil 31'de spiral akıcılık numunesinin ölçümünü gösteren bir görsel verilmiştir.



Şekil 31: Spiral Akıcılık Numunesinin Uzunluk Ölçümü

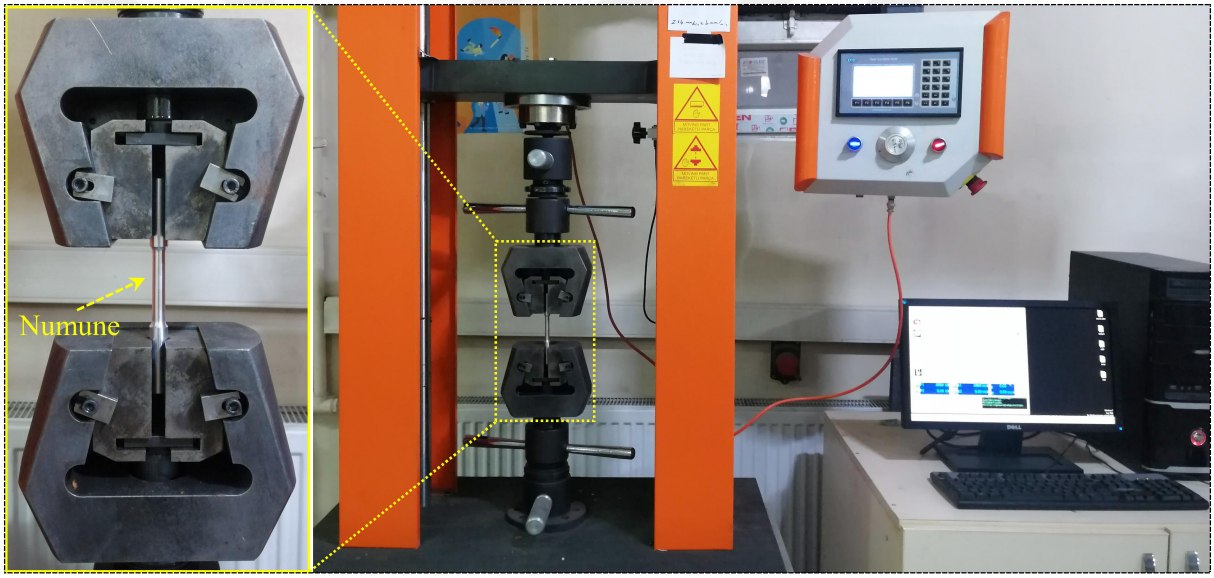
2.2.4.4. Mekanik testler

Şekil 26'da görseli verilen mekanik test kalıbına ergimiş metalin dökümleri gerçekleştirilmiştir. Bu kalıp için deneylerde yaklaşık 600-650 g ergimiş sıvı metal kullanılmıştır. Mekanik test kalıbına yapılan dökümlerde 16 mm çapında her proses için 6 şar adet silindirik çubuk elde edilmiştir. Numuneler, ASTM E8/E8M-13a standardına göre belirlenen ve Şekil 32'de verilen ölçülerde torna tezgâhında işlenerek çekme çubuğu formuna getirilmiştir.



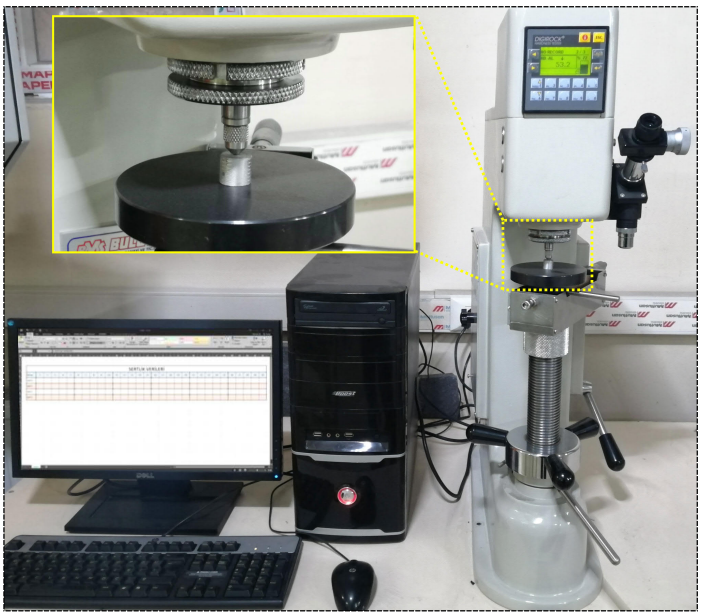
Şekil 32: Çekme Çubuğu Ölçüleri ve Torna Tezgâhında Döküm Numunenin İşlenmesi

Çekme testi numuneleri, 500 kN kapasiteli ve Şekil 33'te gösterilen ELİSTA marka EMB500-500kN Elektromekanik yüklemeli çekme basma test cihazında 1 mm/dk çekme hızında ile test edilmiştir. Çekme testi sonucu elde edilen kuvvet-uzama verileri kullanılarak maksimum gerilme, uzama (%) ve tokluk değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 33: Çekme Testi

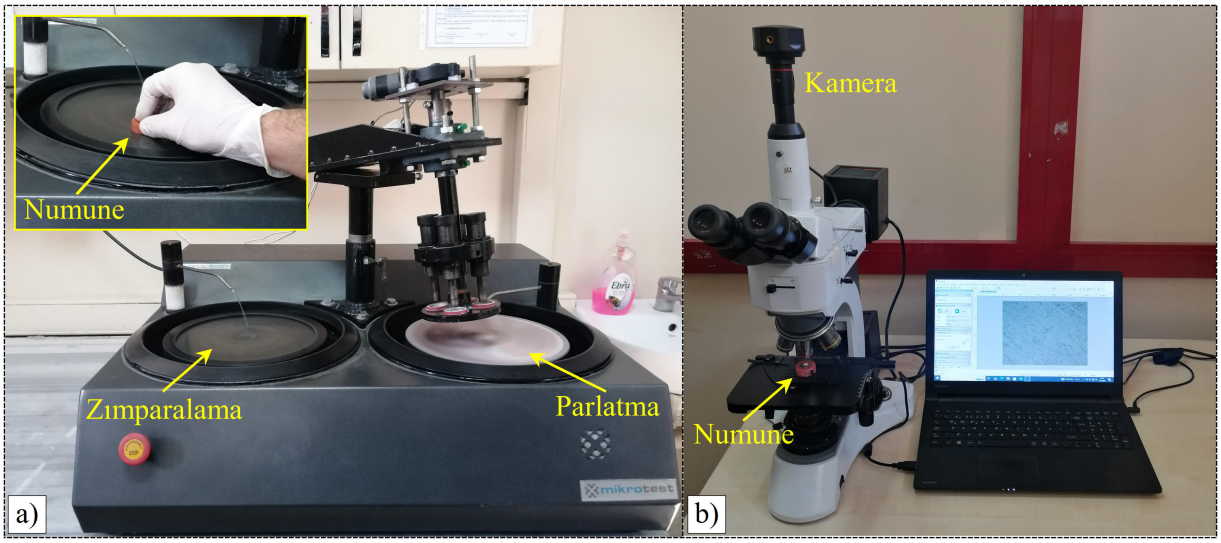
Test döküm numunelerinin mekanik özelliklerini değerlendirmek için önemli bir parametre olan Rockwell sertlik ölçümleri, Şekil 34'te gösterildiği gibi BMS makinesi DIGIROCK-RBOV kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HB test yöntemi, 10 kgf ön yük ve 100 kgf toplam yük ile 1,6 mm çapında bir bilye kullanılarak uygulanmıştır. Her numune için en az 5 sertlik ölçümü yapılarak bu 5 değerin ortalaması alınmıştır.



Şekil 34: Sertlik Testi

2.2.4.5. Mikroyapı incelemeleri

Sıvı metal temizleme yöntemlerinin mikroyapıya nasıl etkileri olduğunu gözlemlemek amacıyla spiral akıcılık numunelerinin uç kısımlarından mikroyapı numuneleri alınmıştır. Kesilen numuneler öncelikle bakalit içine alınarak sırasıyla 180, 400, 800 ve 1200 numaralı zımparalarla zımparalanmıştır. Ardından, 3 µm ve 1 µm alümina süspansiyonu kullanılarak parlatılmış, son aşamada ise 0,05 µm kolloidal silika ile son parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Keller çözeltisi (95 ml saf su, 2,5 ml HNO_3, 1,5 ml HCl, 1,0 ml HF) kullanılarak dağlanan numunelere, NMM-800/820 serisi metalurjik optik mikroskop kullanılarak mikroyapı analizi yapılmıştır. Hazırlanan döküm numunelerinin mikroyapı fotoğrafları, mikroskoba entegre bir dijital kamera kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 35'te metalografik inceleme için kullanılan zımparalama ve parlatma cihazı ile kameralı mikroskop gösterilmektedir.



Şekil 35: a) Zımparalama Parlatma Cihazı ve b) Optik Mikroskop

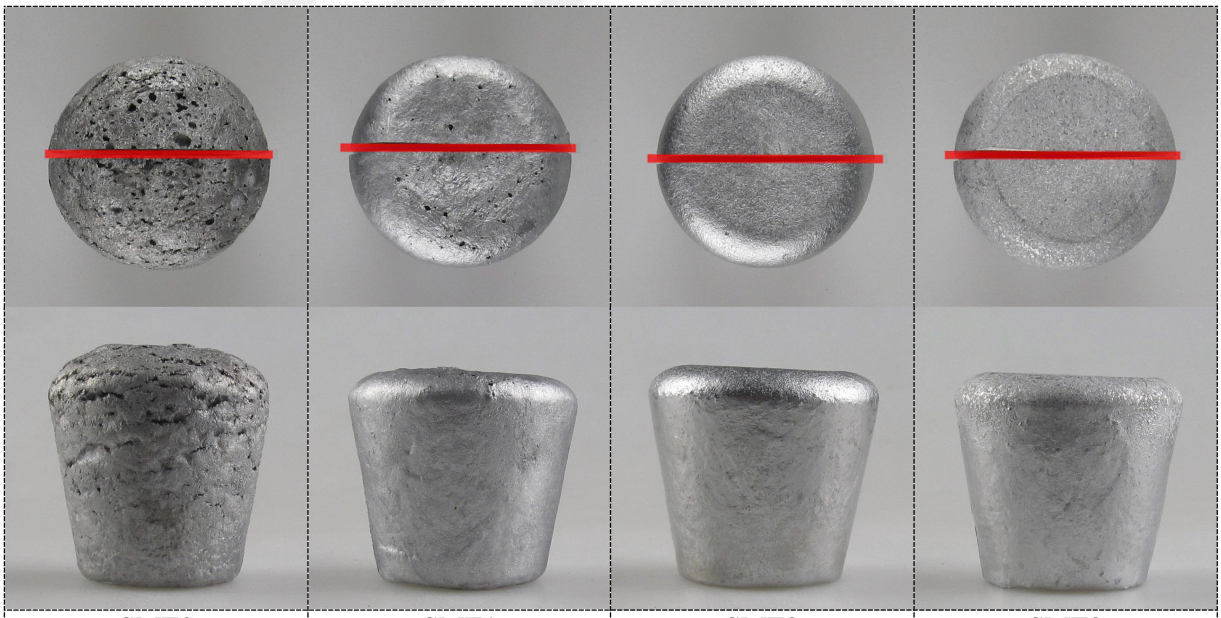
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

Bu çalışmada, çeşitli sıvı metal temizleme proseslerinin hurda A356 alüminyum alaşımı dökümleri üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmanın ilk adımında referans döküm ile birlikte üç farklı sıvı metal temizleme yöntemi kullanılarak toplamda dört döküm deneyi yapılmıştır. Daha sonra bu dökümlerden elde edilen numunelerin, yoğunluk testi, bifilm analizi, akıcılık testi, mekanik test ve metalografik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ile görseller, tablolar ve grafikler oluşturularak sonuçların değerlendirmeleri yapılmıştır.

3.1. SIVI METAL KALİTESİNİN ANALİZİ

Çalışmada farklı sıvı metal temizleme tekniklerinin kontrolü için döküm öncesi sıvı metal kalitesi testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda VAK testi ve K mold testi numuneleri incelenmiştir. VAK numunelerinde makro inceleme, yoğunluk ölçümü, kesit yüzey incelemeleri ve bifilm analizi incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 36'da deneylerden elde edilen VAK numune görselleri verilmiştir.



Şekil 36: VAK Numuneleri

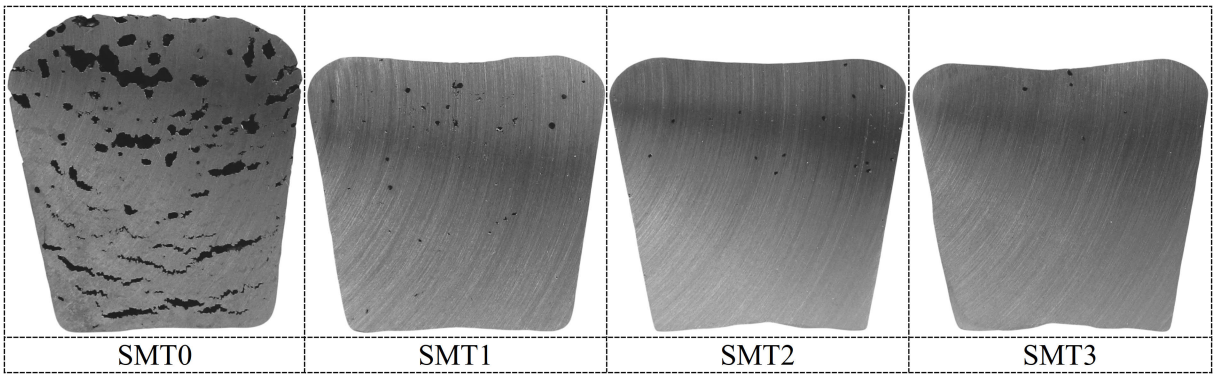
Şekil 36'da verilen görseller incelendiğinde temizleme işlemi uygulanmayan referans numunenin yüzeyinde kabarıklık ve gözeneklilik mevcuttur. Diğer deney numunelerinde yüzeylerin daha düzgün olduğu ve numunelerin tepe noktalarında farklı oranlarda çöküntüler görülmektedir. Mevcut gaz durumunun ne derece olduğunun tespiti açısından numunelerin yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 7'de numunelere ait yoğunluk ölçüm sonuçları verilmiştir.

Tablo 7: VAK Numunelerinin Yoğunluk ve Gözenek Verileri

Numune Adı	Havadaki ağırlık (g)	Sudaki ağırlık (g)	Teorik Yoğunluk	Deneysel Yoğunluk	Gözenek (%)
SMT0	107,47	62,42	2,68	2,38	11,15
SMT1	106,87	66,27	2,68	2,63	1,96
SMT2	113,46	70,81	2,68	2,66	0,91
SMT3	112,65	70,53	2,68	2,67	0,38

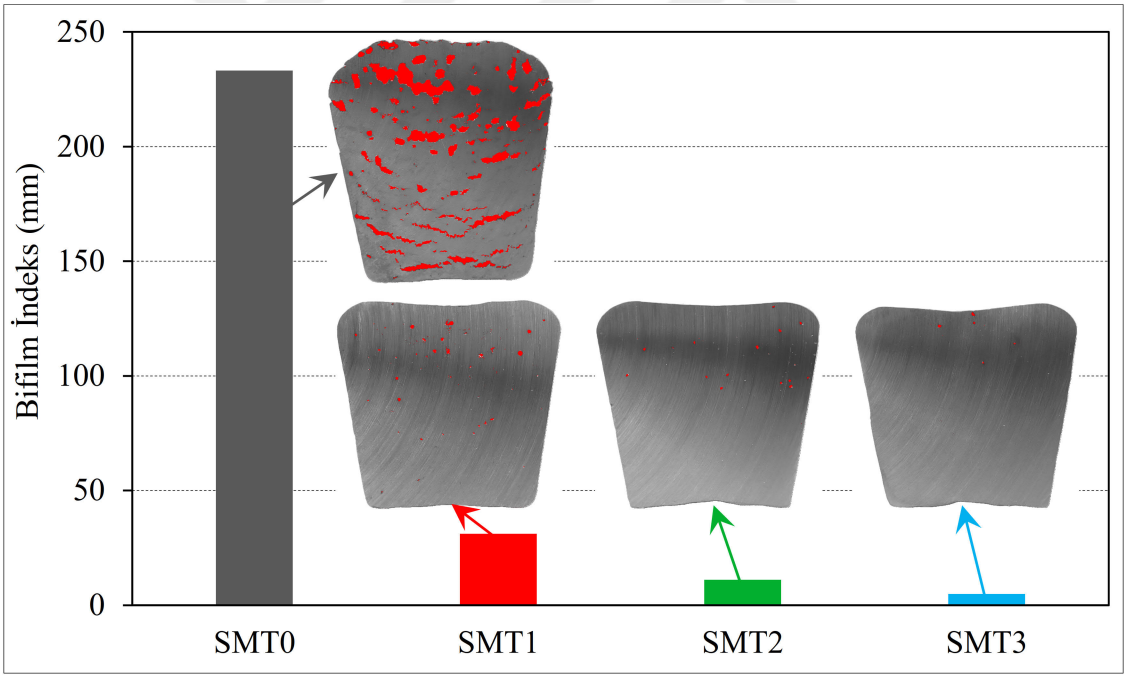
Tablo 7'de bulunan veriler incelendiğinde yoğunluk değerlerinin 2,38 g/cm^3 ile 2,67 g/cm^3 arasında değiştiği tespit edilmiştir. En düşük yoğunluk değeri SMT0 döküm numunesinde tespit edilirken en yüksek yoğunluk değeri ise SMT3 döküm numunesinden elde edilmiştir. A356 alaşımı için teorik yoğunluk değeri 2,68 g/cm^3 değerine göre yapılan gözenek hesaplamalarında SMT0 deney numunesinde %11,15 gözenek, SMT1 deney numunesinde %1,96 gözenek, SMT2 deney numunesinde %0,91 gözenek ve SMT3 deney numunesinde %0,38 gözenek değerleri tespit edilmiştir. Gözenek yüzdelerinin değişimi, uygulanan sıvı metal temizlik yöntemlerine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Bu durumda %0,38 ile en düşük yüzde-gözenek değeri SMT3 deneyinde gerçekleşmiştir. Konu ile ilgili yapılan diğer çalışmalarda VAK numunelerinde %0,5 gözenek değerinin altında kalan değerler için sıvı metal temizliğinin uygun olduğu belirtilmektedir. Ayrıca %0,5 ile %1 arasında elde edilen gözenek seviyelerinde sıvı metal temizliğinin kabul edilebilir seviyelerde olduğu rapor edilmektedir (Erzi vd., 2019; Uslu vd., 2023; Tokatlı vd., 2022). Bu değerlendirmeye göre Tablo 7'de görülen değerlerde SMT3 deneyinde sıvı metal temizleme işleminin uygun olduğu, SMT2 deneyinin kabul edilebilir seviyelerde sıvı metal kalitesine sahip olduğu ifade edilebilir. SMT1 deneylerinde yapılan gaz giderme işlemleri sonrası numune yoğunluk ölçüm ve yüzde-gözenek sonuçlarına göre sıvı metal temizleme işlemlerinin yetersiz olduğu anlaşılmaktadır. Fakat SMT0 numunesi ile kıyaslama yapıldığında temizleme işlemlerinin tümünde uygulanan sıvı metal temizleme işlemleri sonucunda iyileşmenin bariz bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.

VAK numuneleri, kesit yüzeylerinin incelenmesi amacıyla Şekil 36'da gösterilen kırmızı çizgi boyunca dikey olarak kesildikten sonra zımparalanmış ve kesit yüzey görüntüleri dijital ortama aktarılmıştır. Şekil 37'de numunelerden elde edilen kesit yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 37: VAK Numuneleri Kesit Yüzey Görüntüleri

Şekil 37'deki görseller incelendiğinde, yoğunluk ölçüm sonuçlarına paralel bir şekilde kesit yüzey görüntülerinin oluştuğu tespit edilmiştir. SMT0 deney numunesinin kesit yüzeyinde yüksek miktarda ve büyük boyutlarda gözenekler görülmektedir. SMT3 deney numunesinde ise bu durum tam tersi olup numune kesit yüzeyinde gözenekler yok denecek kadar azdır. Ayrıca numunelerin kesit yüzeylerinden elde edilen görseller ile imaj analiz yöntemi kullanılarak bifilm değerleri hesaplanmıştır. Deney numunelerine ait bifilm değerlerini gösteren grafik Şekil 38'de verilmiştir.



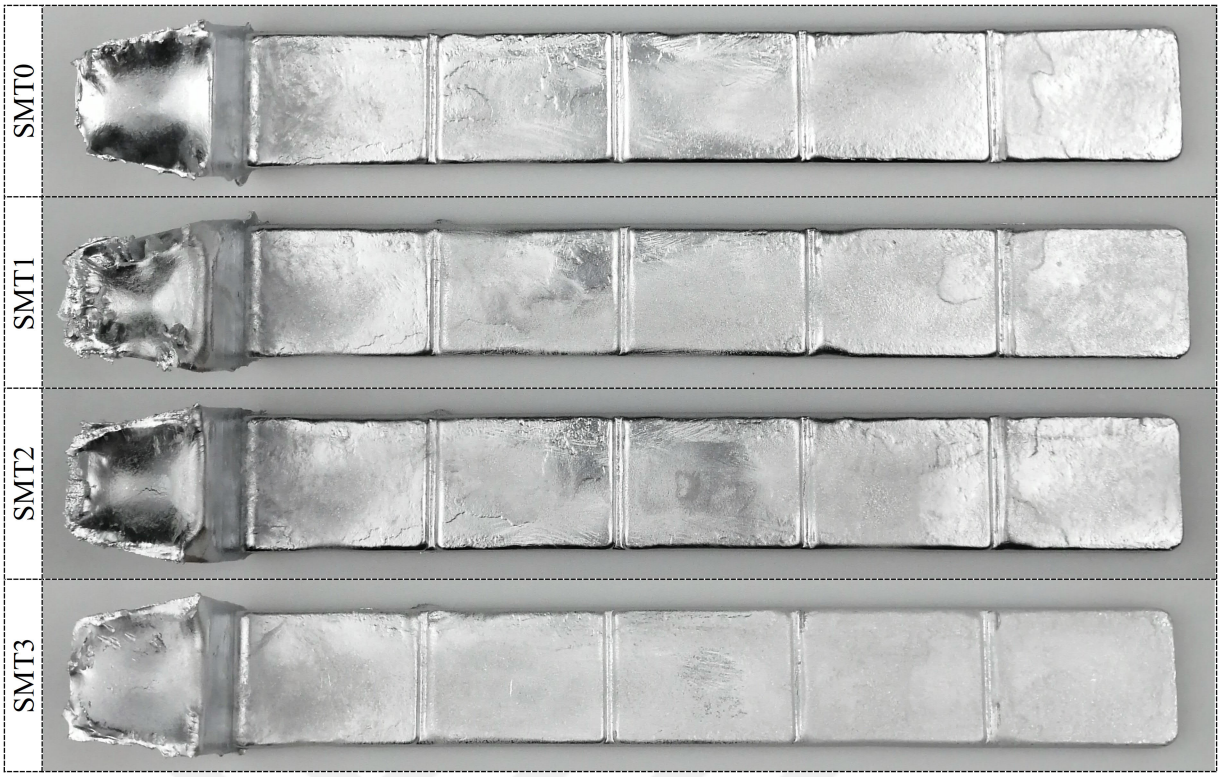
Şekil 38: VAK Numunelerinin Bifilm Analiz Sonuçları

Şekil 38'de bulunan veriler incelendiğinde bifilm indeks değerlerinin 4 mm ile 235 mm arasında değiştiği tespit edilmiştir. En yüksek bifilm indeks değeri 233,07 mm değeri ile SMT0 döküm numunesinde tespit edilirken en düşük bifilm indeks değeri ise 4,839 mm değeri ile SMT3 döküm numunesinden elde edilmiştir. Bu değer SMT1 numunesinde 31,155 mm olarak bulunurken, SMT2 deneyinde ise 11,094 mm olarak tespit edilmiştir. Bifilm indeks değerlerinin

değişimi, uygulanan sıvı metal temizlik yöntemlerine bağlı olarak değiştiği ve sıvı metal temizliğinin bifilm indeks değerlerine olumlu etki ettiği gözlemlenmiştir.

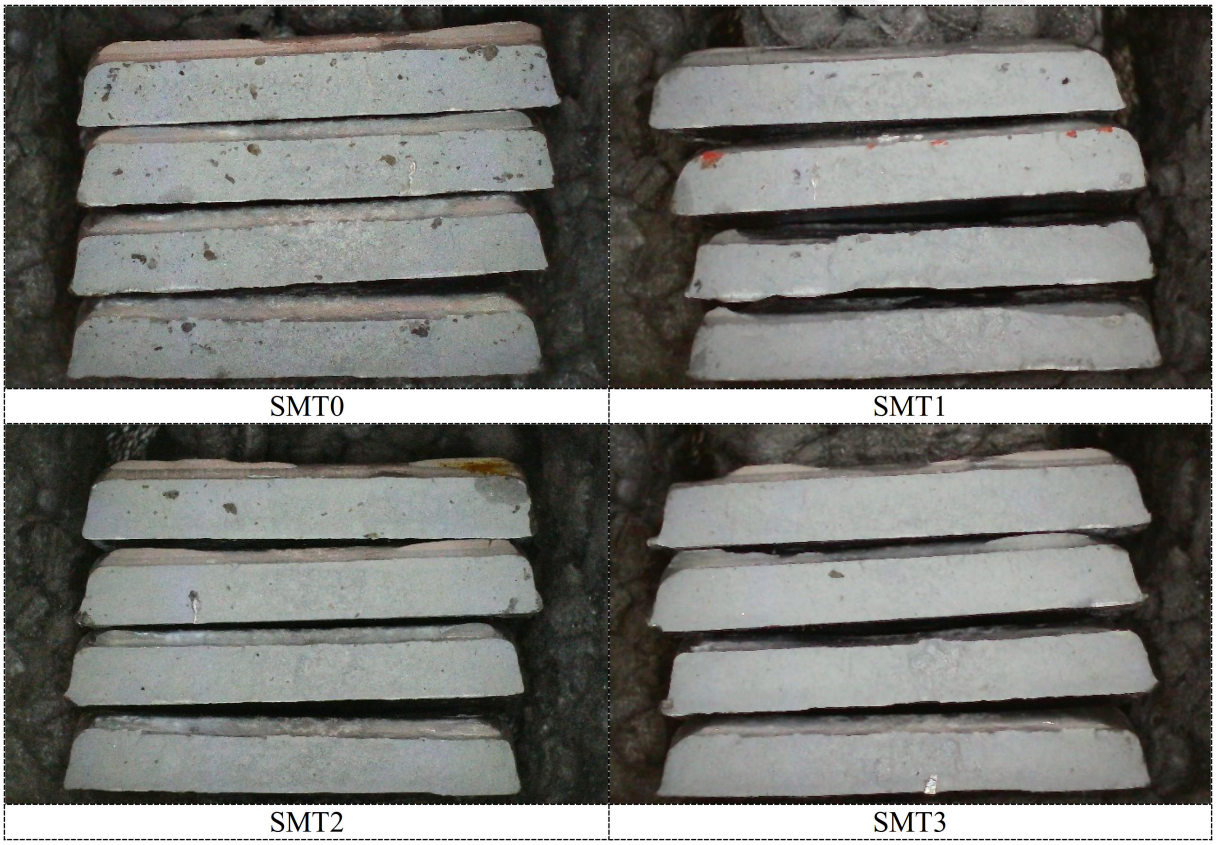
Konu ile ilgili yapılan bir çalışma, bifilm oluşumunun, sıvı metalin taşınması sırasında yüzey türbülansı nedeniyle meydana geldiğini ve çift katmanlı oksit filmlerinin oluşmasına neden olduğunu ifade etmektedir. Bu bifilmlerin, sıvı metal içerisinde hava kabarcıkları ve alüminyum oksit gibi kusurlara yol açarak dökümlerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği belirtilmektedir. Deneysel çalışmalar sıvı metal temizleme işlemi sırasında gaz akış hızı, rotor hızı ve işlem süresi gibi parametrelerin optimize edilmesinin bifilm oluşumunu önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir (Erzi vd., 2019). Sıvı metal temizliğinde rotor verimliliğinin incelendiği bir çalışmada, argon veya azot gibi inert gazların metal banyosuna düzgün ve kontrollü bir şekilde verilmesinin bifilmlerden ve diğer safsızlıklardan giderilmesini kolaylaştırdığı ifade edilmiştir. Araştırmada, çeşitli rotor tasarımlarının ve gaz akış hızlarının metalin temizliği üzerindeki etkisini analiz edilmiştir. Bulgular, optimum rotor tasarımı ve gaz akış hızının metal kalitesini artırmada kritik faktörler olduğunu göstermiştir (Podaril vd., 2022). Farklı bir çalışmada ise A356 alaşımındaki yeni oksitler ergitmeden sonra karıştırılarak üretilmiş ve daha sonra SEM-EDS kullanılarak analiz edilmiştir. SEM analizi, vakum koşulları altında katılaşan dökümün gözenekliliği içinde çok sayıda spinel parçasının varlığını ortaya koymuştur. Alaşım içerisinde oluşan ve hapsolan bifilmler, alüminyum dökümde çatlak başlatma bölgeleri olarak hareket ederek erken arızaya yol açmakla kalmaz, aynı zamanda hidrojen gözenekliliği gibi ek kusurlarla da bağlantılıdır (Tokatlı vd., 2022; Tigli vd., 2023). Bu değerlendirmelere göre sıvı metal temizleme yöntemlerinin varlığı bifilm oluşumuna engel olmaktadır. Yapılan bifilm analizi sonuçlarının literatüre uygun olduğu da bu sayede anlaşılmaktadır.

Çalışma kapsamında sıvı metal temizliğinin kontrolü K-mold kalıbına yapılan döküm numuneler ile de gerçekleştirilmiştir. Şekil 39'da dökümleri gerçekleştirilen K-mold numunelerine ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 39: K-mold Numuneleri

Numuneler, K-mold test tekniğinde belirtildiği gibi çentikli bölgelerinden kırılarak kırık yüzeylerin görselleri incelenmiştir. Şekil 40'da K-mold numune kırık yüzeylerinin görselleri verilmiştir.



Şekil 40: K-mold Numunelerinin Kırık Yüzey Görüntüleri

Şekil 40'taki kırık yüzey görüntülerinden inklüzyonlar sayılmış ve parça adetine oranlanarak her bir deney için ortalama K değeri hesaplanmış ve Tablo 8'de sunulmuştur. Bütün döküm testlerinde ortaya çıkan K değerlerinin arasında sıvı metal temizleme metotlarına göre fark olduğu gözlemlenmektedir. Sıvı metal temizleme proseslerine bağlı olarak kırık yüzeylerde ortaya çıkan K değeri, yapılan ölçüm sonuçlarına göre SMT0 deneyinde 9,00, SMT1 deneyinde 3,25, SMT2 deneyinde 1,75, SMT3 deneyinde ise 0,5 olduğu tespit edilmiştir. Sıvı metal temizleme işlemlerinin değişmesi sonrası döküm yapıda ortaya çıkan inklüzyonlarda azalma ve K değerinde düşüşler gözlenmiştir. SMT3 deneyinde K-mold ve VAK verilerinden, sıvı metal temizliğinin döküm içinde gaz kaynaklı gözenek meydana gelmesini önlemek ve kabul edilebilecek seviyelere indirgemek için yeterli düzeyde olduğu anlaşılmıştır. Bu durum, dökümlerde olası gözeneklerin genellikle gaz kaynaklı olmadığını ve eğer varsa, yetersiz beslemeye dayalı çekinti gözeneklerinin neden olabileceği düşüncesini desteklemektedir.

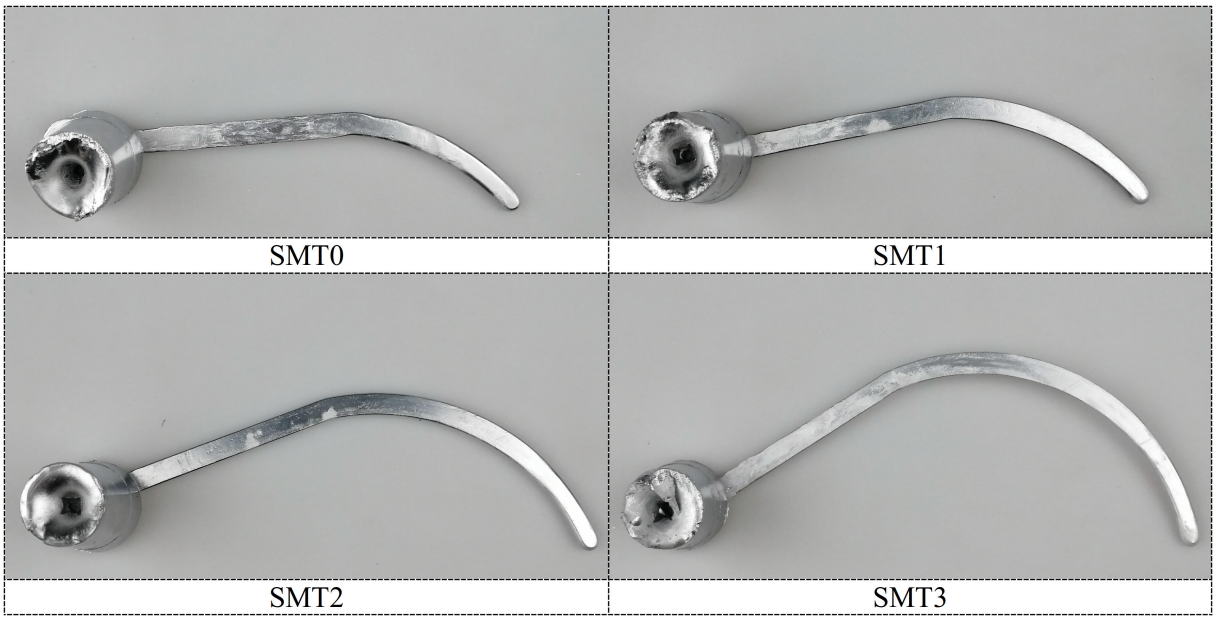
Tablo 8: K-mold Testi Verileri

Numune Adı	İnklüzyon sayısı	K-mold parça sayısı	K değeri
SMT0	36	4	9,00
SMT1	13	4	3,25
SMT2	7	4	1,75
SMT3	2	4	0,50

Sıvı metal kalitesini değerlendirmek için K-mold test yöntemi kullanılarak yapılan farklı bir çalışmada, K değerleri 1'in altında olduğunda kabul edilebilir kalitenin elde edildiğini ve temizleme işleminin etkinliğini doğruladığını göstermektedir. Deneysel sonuçlar, temizlenmeden dökülen numunelerin 1'i aşan K değerleri sergilediğini ortaya koymakta ve bu gibi durumlarda temizleme işleminin gerekliliğinin altını çizmektedir (Gyarmati vd., 2022). Yapılan bu çalışmada, sıvı metal temizleme işlemlerinden döner tip gaz giderme yöntemi ile K indeksini 1'in altına indirilebileceği gösterilmiştir.

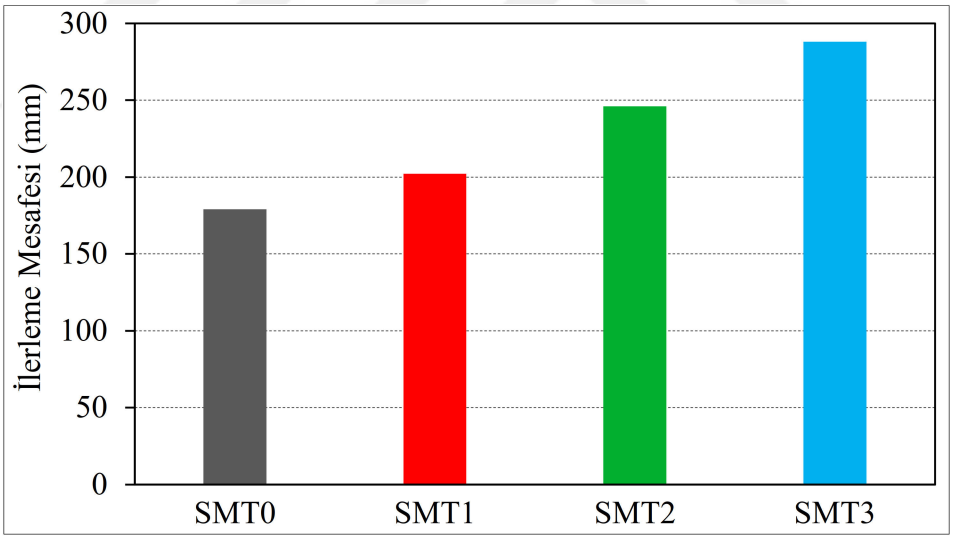
3.2. AKICILIK TESTİ SONUÇLARI

Sıvı metal temizleme yöntemlerinin farkına dair belirlenen farklı deney parametrelerinin akıcılık testinde etkisini gösteren numune resimleri Şekil 41'de verilmiştir.



Şekil 41: Spiral Akıcılık Numuneleri

Şekil 41'de verilen spiral akıcılık numuneleri incelendiğinde, farklı deney parametreleri uygulanan numunelerin sıvı metal ilerleme mesafelerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Spiral akıcılık numunelerinin uzunluk ölçümleri yapılmış ve buna bağlı olarak elde edilen sıvı metal ilerleme mesafeleri grafiği Şekil 42'de verilmiştir.



Şekil 42: Spiral Akıcılık Sıvı Metal İlerleme Mesafeleri

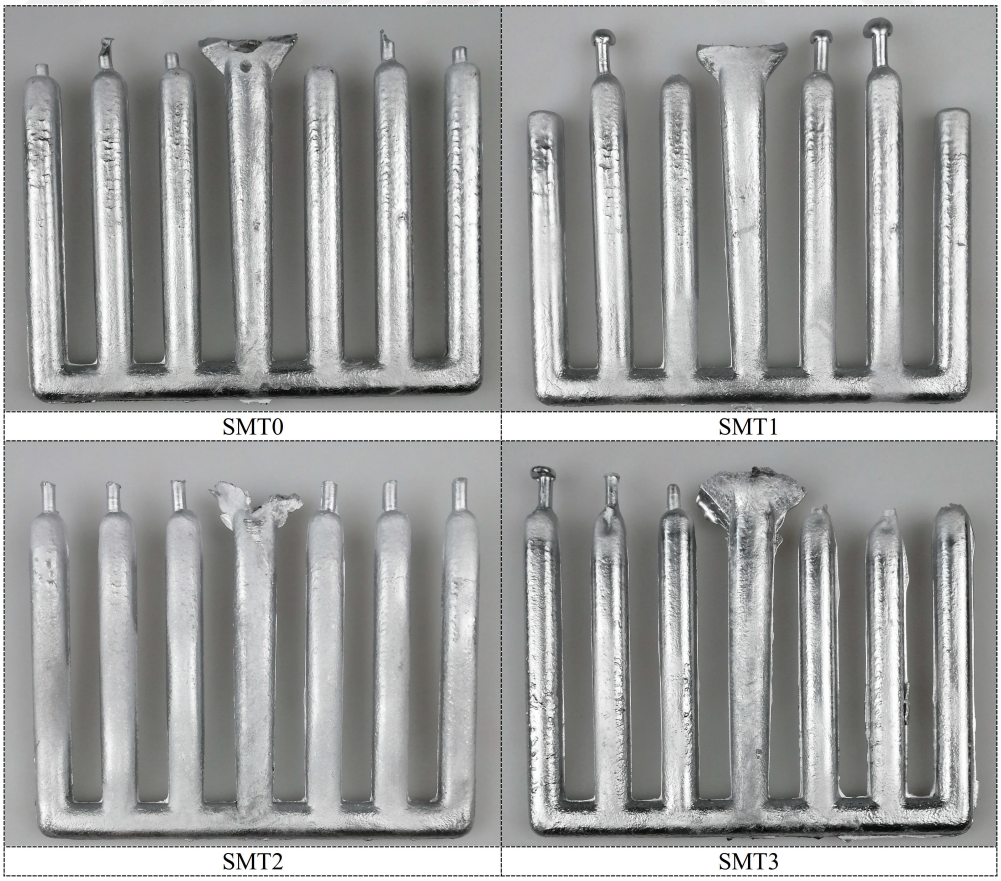
Şekil 42'de verilen grafik incelendiğinde, sıvı metal ilerleme mesafelerinin 179 mm ile 288 mm arasında değiştiği tespit edilmiştir. En yüksek sıvı metal ilerleme mesafesi 288 mm ile SMT3 deneyi sonrası yapılan dökümlerden elde edilmiştir. SMT0 deneyinde 179 mm ergimiş metalin ilerleme mesafesi ölçülmüştür. SMT1 deneyinde bu değer 202 mm iken, SMT2 deneyinde ise 246 mm olarak ölçülmüştür. Deney numunelerinin tümü değerlendirildiğinde temizleme işlemi ile akıcılık özelliklerinin olumlu yönde geliştiği tespit edilmiştir.

A356 alüminyum alaşımlarından yapılan dökümlerin akışkanlığını araştıran çalışmalarda, sıvı metal temizleme işlemlerinin katı partiküllerden arındırma yaparak sıvı metalin akışkanlığını artırdığı gözlemlenmiştir. Metalik olmayan metaller arası partiküllerin akışkanlığı azalttığı, oksit filmlerinin ise akışkanlığı önemli ölçüde etkilediği vurgulanmıştır. Etkili sıvı metal temizliğinin önemi de vurgulanmıştır (Hudson, 2016; Djurdjevic vd., 2010; Timelli & Caliari, 2017). Farklı çalışmalarda ise alaşımda bulunan safsızlık elementleri, oksitler, inklüzyon gibi oluşumların zararlı etkilerini ortadan kaldırmak için sıvı metal temizleme, nötralize edici alaşım elementleri ekleme, filtre kullanımı vb. gibi işlemler uygulandığı ifade edilmiştir. Bu bağlamda en yaygın kullanılan işlem döner tip gaz giderme veya flaks ilavesi gibi sıvı metal temizleme yöntemleri olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmalarda, sıvı metal temizleme uygulanan alaşımların mekanik özelliklerinin gözenekliliğin azalmasıyla birlikte arttığı ve akışkanlığa olumlu katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir (Erzi vd., 2019; Çolak vd., 2016; Durmuş vd., 2024).

3.3. MEKANİK TESTİ SONUÇLARI

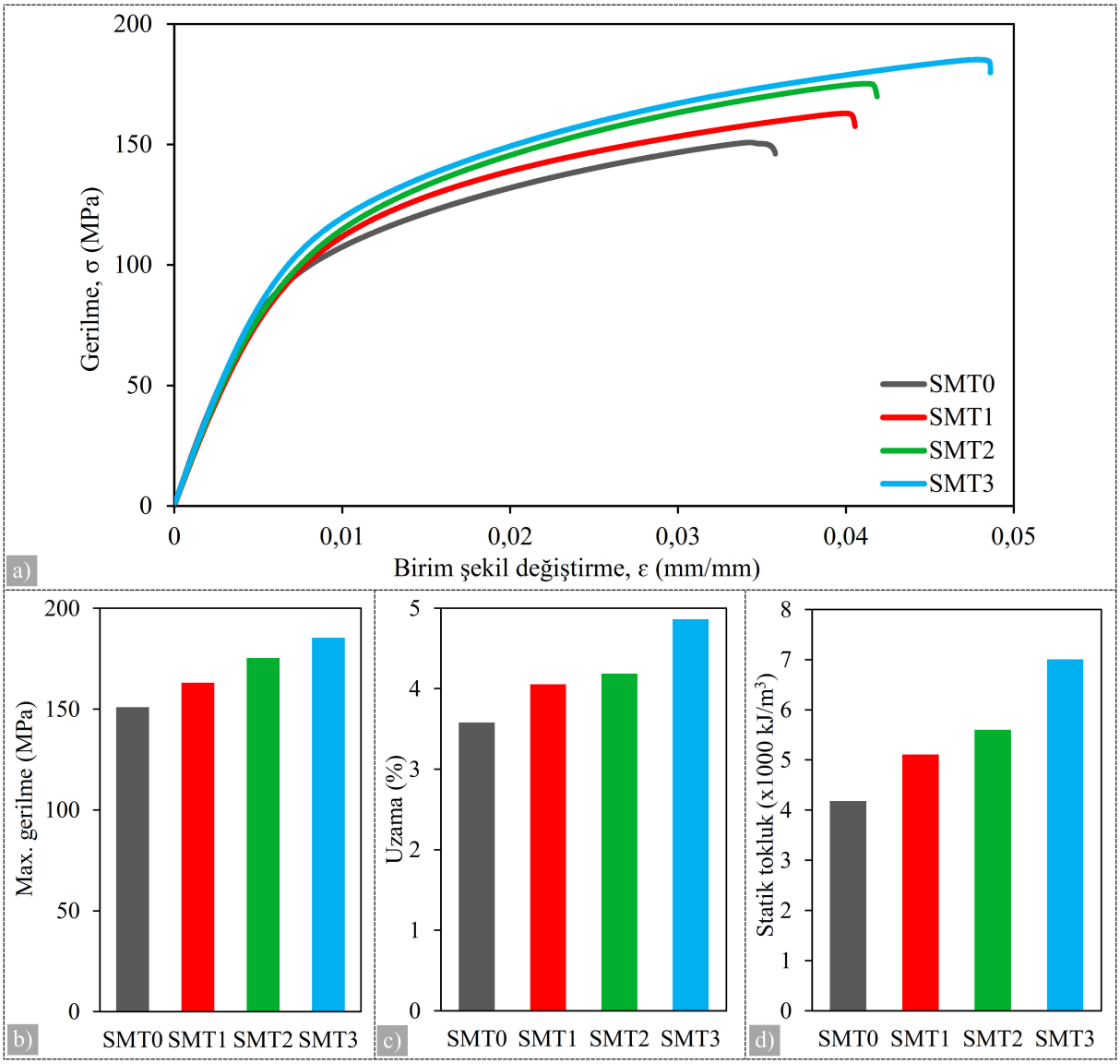
3.3.1. Çekme Testi Sonuçları

Çalışma kapsamında mekanik test kalıbına yapılan dökümlerden elde edilen numunelere ait görseller Şekil 43'te verilmiştir.



Şekil 43: Mekanik Test Numuneleri

Çekme testi sonucu ilgili deney numunelerine ait maksimum gerilme, % uzama ve tokluk değerleri tespit edilmiştir. Çekme testinden elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak grafikler oluşturulmuştur. Döküm deneylerine ait maximum gerilme, % uzama ve tokluk değerlerine ait ortalama sonuçların bulunduğu grafik, Şekil 44'te verilmiştir.



Şekil 44: Çekme Testi Sonuçları

Şekil 44'te verilen grafik incelendiğinde farklı sıvı metal temizleme yöntemlerinin maksimum gerilme, % uzama ve tokluk değerlerini değiştirdiği görülmektedir. Maksimum gerilme değeri grafiği incelendiğinde, en düşük değerin 150 MPa ile SMT0 deneyinde en yüksek değerin ise 180 MPa değeri ile SMT3 deneyinde olduğu görülmüştür. Uzama değerleri numuneler arasında %3,50 ile 4,75 arasında değişmektedir. En yüksek uzama oranı %4,75 ile STM3 deneyinde en düşük uzama oranı ise 3.50 ile SMT0 deneyinde hesaplanmıştır. Tokluk değerleri 4 kJ/m^3 ile 7 kJ/m^3 arasında değişiklik göstermektedir. En yüksek tokluk değeri 6,90 kJ/m^3 ile SMT3 numunesine aittir. En düşük tokluk değeri ise 4,20 kJ/m^3 ile SMT0 deneyine aittir.

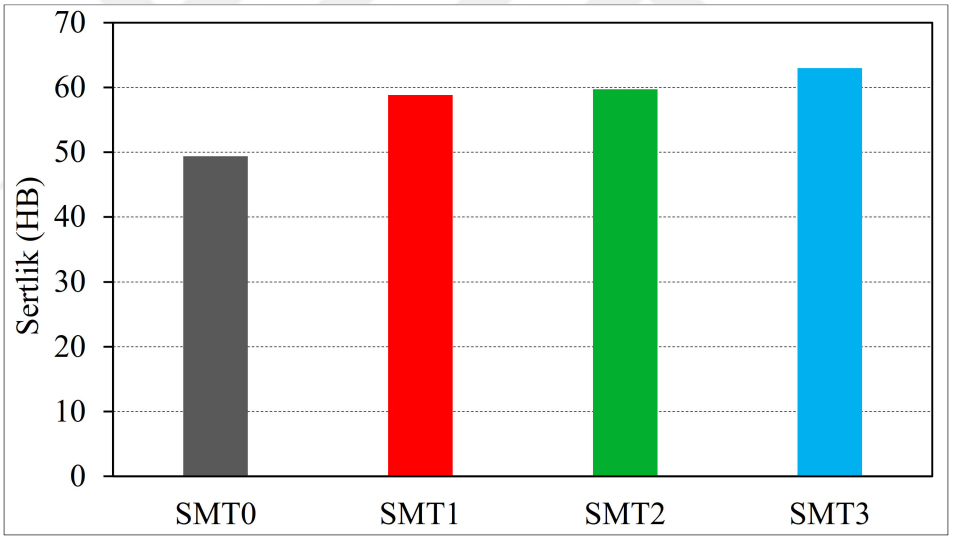
Sıvı metallerin temizliği, döküm alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynadığı bilinmektedir. Oksitler ve inklüzyonlar gibi safsızlıkların varlığı, dökümlerin bütünlüğünü ve performansını önemli ölçüde tehlikeye atabilir ve mekanik özelliklerini etkileyen bir dizi kusura yol açabilmektedir. Önemli faktörlerden biri, ergimiş alüminyumdaki inklüzyon ve kirletici madde seviyesinden büyük ölçüde etkilenen mikro yapısal kalitedir. Yüksek kaliteli alüminyum eriyikleri genellikle azaltılmış oksidasyon inklüzyonları ve daha düşük hidrojen içeriği sergiler; bunların her ikisi de döküm kalitesini iyileştirmek için kritik öneme sahiptir. İstenmeyen inklüzyonların varlığı, katılaşma sırasında gözeneklilik oluşumuna ve hatta çatlak yayılmasına yol açabileceği, bu durumun da akma dayanımını ve sünekliği olumsuz yönde etkilediği tespit edilen çalışmalar mevcuttur (Kreislová & Turek, 2021). Hsieh vd. (2013) yapmış olduğu çalışmada, alüminyum eriyiklerinde oksitlerin varlığının döküm bileşenlerinin bütünlüğünü ciddi şekilde tehlikeye atabileceğini, gaz çözünmesinden veya kirlenmesinden kaynaklanan bu kusurların döküm yapısı içerisinde gözenekliliğe yol açarak, bu durumunda çekme dayanımı ve uzama gibi mekanik özellikleri olumsuz etkilediğini rapor etmiştir. El-Sayed vd. (2011) yapmış oldukları çalışmada, bifilmlerin gözenekliliğin çekirdeklenmesini desteklediğini ve dolayısıyla alüminyum alaşımlarının uzama ve yorulma özelliklerini azalttığı sonucuna ulaşmıştır. Alüminyum eriyiklerinde temizleme işlemleri, bifilmlerin azaltılması sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Bu durumun, çekme dayanımı ve yorulma direncinde belirgin iyileştirmelerle sonuçlandığı çalışmalar mevcuttur. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda, çekme numunesi, kırılma yüzeyine kıyasla inklüzyon içeriğinde farklılıklar sergilendiği görülmüştür. Ayrıca, kırılma yüzeyinde bulunan daha büyük oksit filmlerinin daha düşük çekme özellikleri ile ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Metalik matris içindeki inklüzyon içeriği arttıkça, uzama, akma dayanımı ve nihai çekme dayanımı gibi özellikler olumsuz etkilenir (Li vd., 2015).

Sıvı metal temizliğinin yanı sıra alüminyum alaşımlarının döküm sürecinde, mekanik özelliklerin kalitesi, çeşitli faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu faktörler arasında alaşım bileşimi, sıvı metalin akış dinamikleri, katılaşma koşulları ve dökümde kullanılan kalıplar gibi dış etkenler sayılabilir (Saevarsdóttir vd., 2022). Ayrıca Kuo (2010), özellikle A201 çeşidi olmak üzere alüminyum alaşımlarının, katılaşma aralıklarının uzun olduğunda gözeneklilik oluşumuna eğilimli olduğunu, bunun da dökülebilirliğini karmaşıklaştırdığını ve sonuçta döküm ürününün mekanik performansını tehlikeye attığını tespit etmiştir. Bu zorlukları azaltmak için alüminyum alaşımlarının dökümünde çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Tane inceltici kullanımı, alüminyumun katılaşma yapısını iyileştirmek için yaygın bir yöntemdir ve bu da gelişmiş mekanik özelliklerle sonuçlanmaktadır. Wang vd. (2023), 7075 alüminyum alaşımlarına nikel eklenmesi ile katılaşma mikro yapısını ve dolayısıyla dökümlerin çekme

mukavemetini iyileştiğini rapor etmiştir. Alternatif olarak Vaneetveld vd. (2006) yaptığı çalışmada, yarı katı haldeki alüminyum alaşımlarının yarı katı şekillendirmenin, üstün mekanik performansa yol açan daha ince mikro yapısal özelliklerle sonuçlandığını belirtmişlerdir. Dahası, soğutma hızı ve döküm koşulları, alüminyum alaşımlarının mikro yapısal özelliklerini belirlemede çok önemlidir. Sıkıştırma dökümü veya vakumlu karşı basınçlı döküm gibi teknikler, daha yoğun mikro yapılara ve azaltılmış gözenekliliğe sahip alaşımlar üretmek için yararlı olarak tanımlanmıştır (Lu vd., 2020; Suprianto vd., 2016). Daha ince taneli yapıların katılaşmayla ilişkili kusurları en aza indirerek alüminyum dökümlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir (Deev vd., 2014).

3.3.2. Sertlik Testi Sonuçları

Farklı sıvı metal temizleme yöntemlerine sahip dökümlerden elde edilen numunelerin sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 45'te gösterilen sertlik sonuçları, her biri farklı temizleme metoduna sahip dökümlerin aynı bölgelerinden alınan numunelerin ortalama değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 45: Sertlik Testi Sonuçları

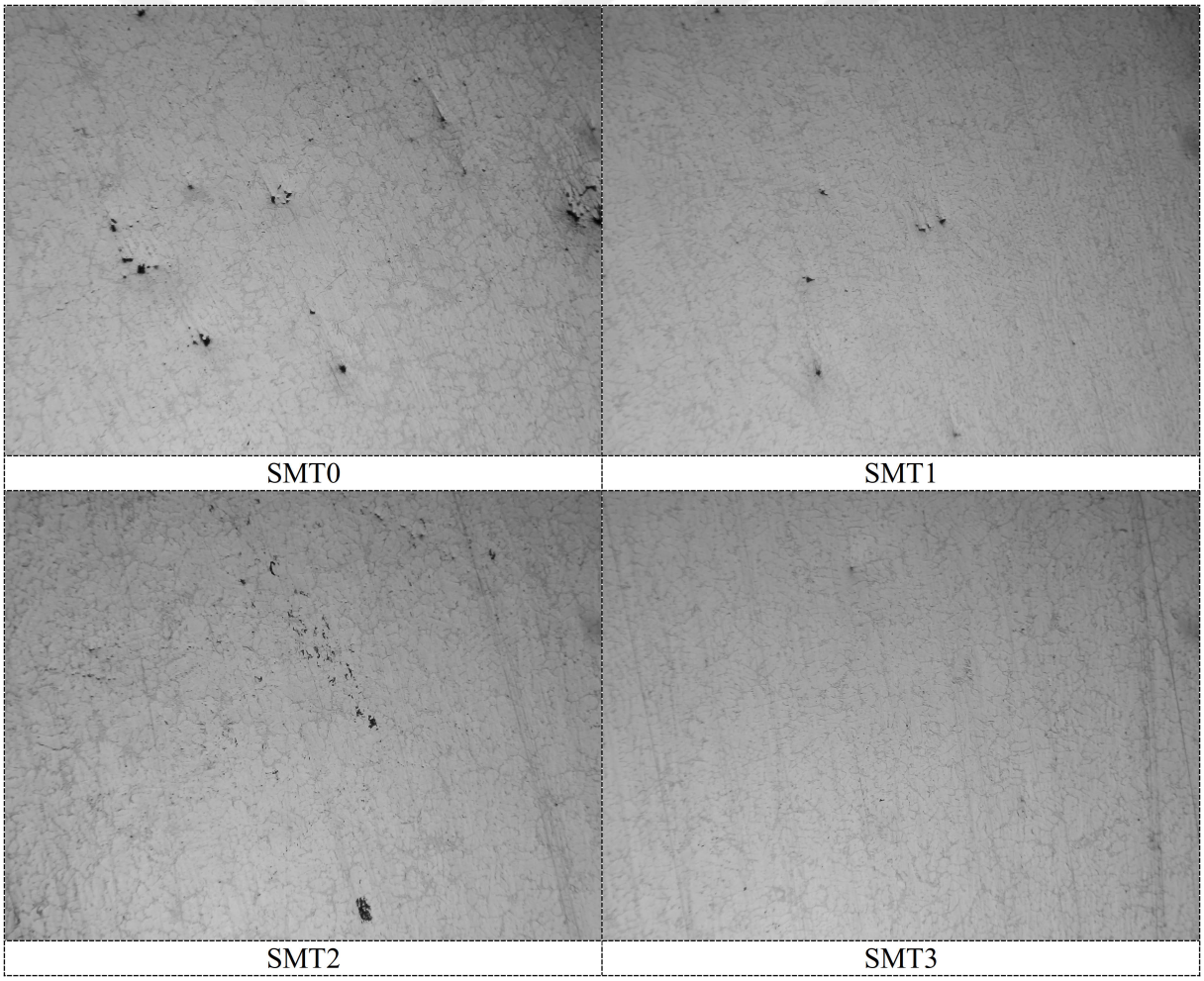
Şekil 45'te verilen grafik incelendiğinde sertlik değerlerinin 45 HB ile 65 HB arasında değiştiği tespit edilmiştir. Maksimum sertlik değerinin SMT3 numaralı deneyde 62,96 HB olduğu en düşük sertlik değerinin ise SMT0 numaralı deneyde 49,38 HB olduğu görülmektedir. Diğer temizleme yöntemleri incelendiğinde ise SMT1 deneyinde 58,83 HB, SMT2 deneyinde 59,72 HB olarak hesaplanmıştır. Tespit edilen değerler, SMT0 deneyi ile karşılaştırıldığında, sıvı metal temizliğinin sertlik değerlerine olumlu etki ettiğini ortaya çıkarmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde sıvı metal temizleme yöntemlerinin metalin mekanik özelliklerine olumlu katkı sağladığı görülmektedir. Holzschuh vd. (2022) yapmış olduğu çalışmada, alüminyum alaşımlarında sıvı metalin temizlenmesi, içindeki

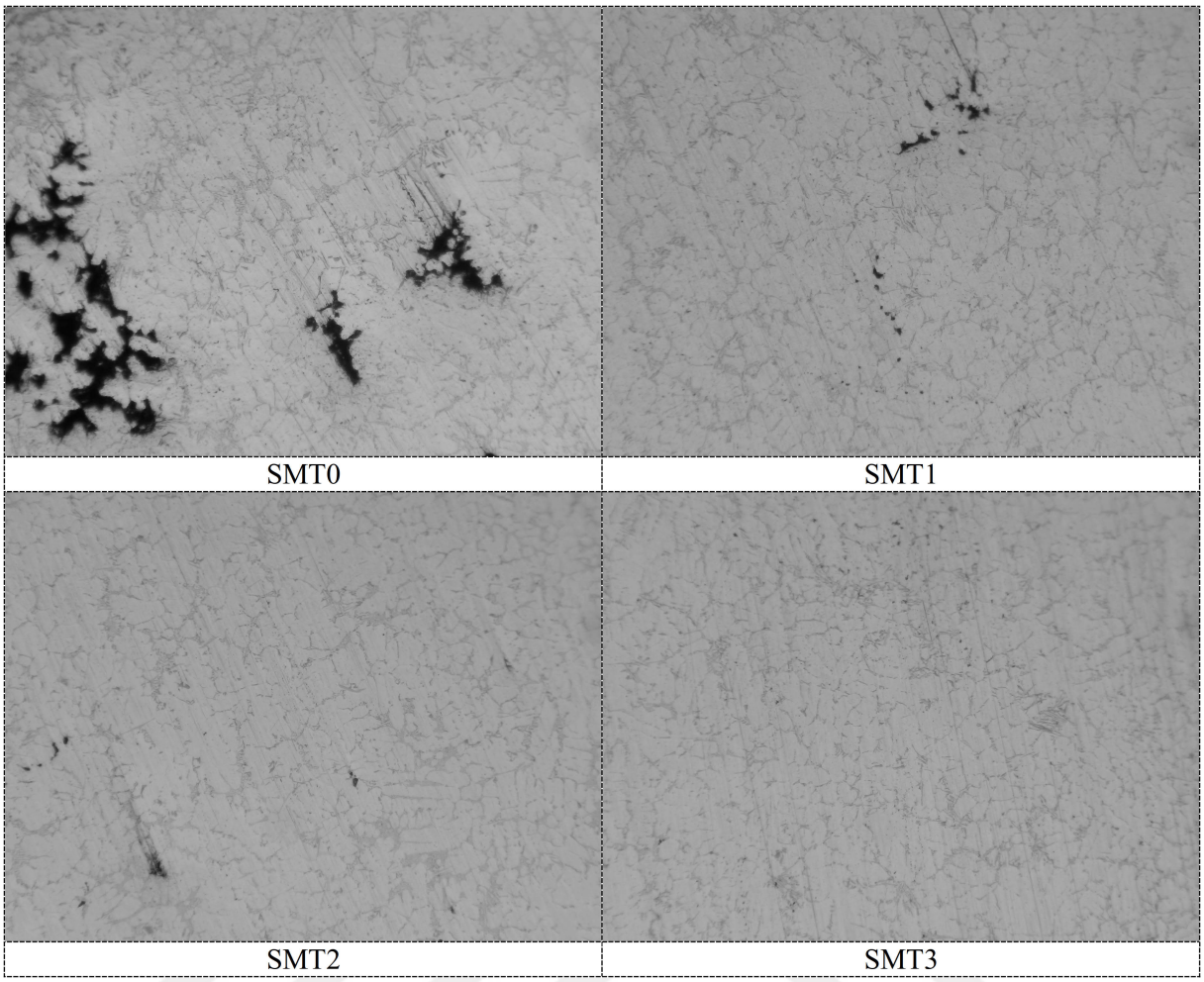
yabancı ve kirletici maddelerin giderilmesine yönelik çeşitli yöntemlerin kullanılmasını kapsadığını söylemişlerdir. Bu işlem, alaşımların ürün kalitesini artırmada kritik bir rol oynadığını vurgulamışlardır. Sıvı metal temizleme, alüminyum alaşımlarının hem mekanik hem de kimyasal özelliklerini geliştirmek için önemli bir parametre olarak öne çıktığını bildirmişlerdir. Tespit edilen sertlik değerleri incelendiğinde, literatür ile paralel bir doğrultuda sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

3.4. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

Hurda A356 alüminyum alaşımı kullanılarak, referans ve üç farklı sıvı metal temizleme teknikleri ile yapılan dökümlerden elde edilen numunelerin mikroyapı incelemeleri de gerçekleştirilmiştir. İncelemelerde 50X, 100X ve 200X büyütmelerde mikroyapı resimleri çekilmiştir. Şekil 46'da 50X büyütmede, Şekil 47'de 100X büyütmede ve Şekil 48'de 200X büyütmede çekilen mikroyapı resimleri verilmiştir.



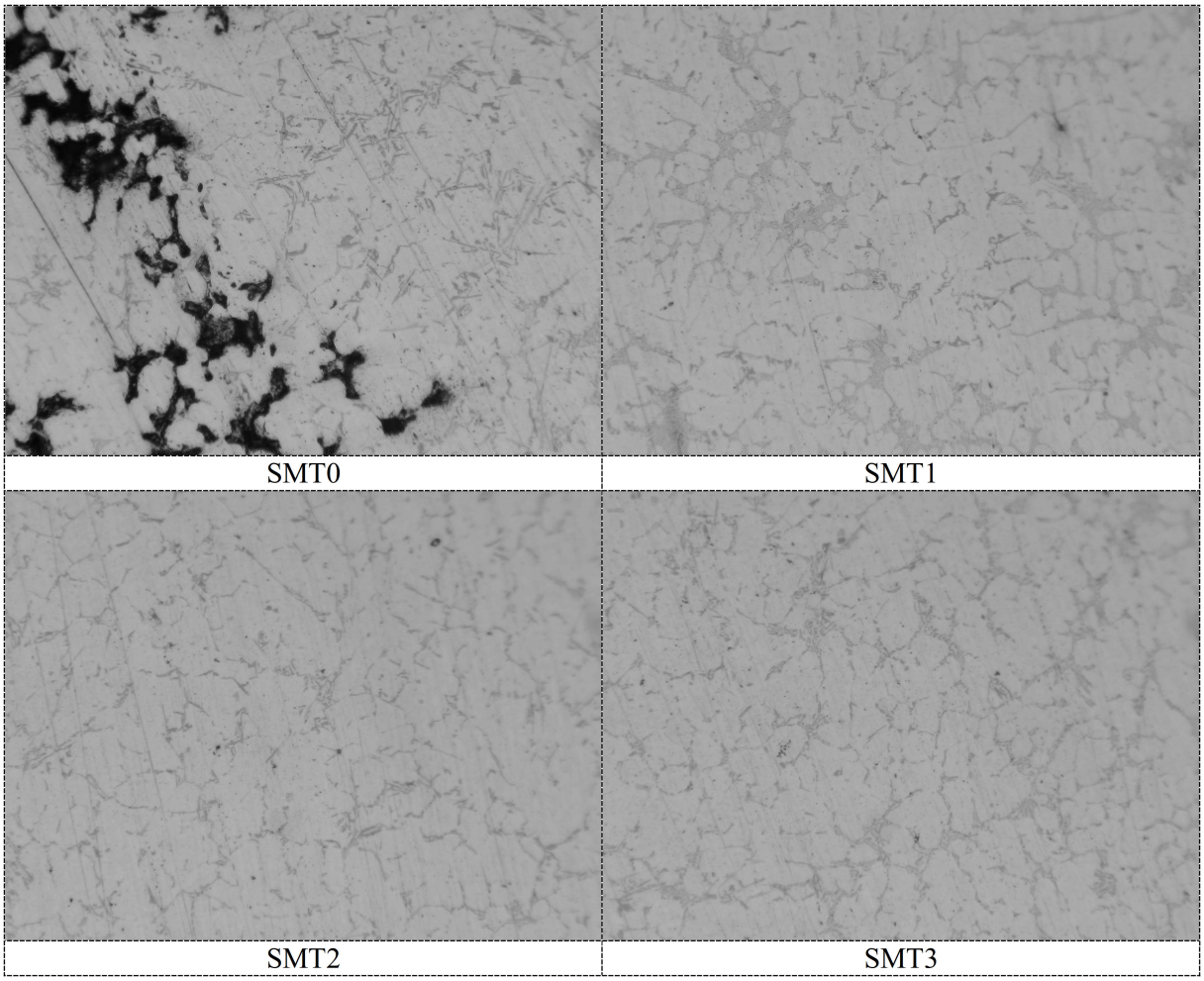
Şekil 46: 50X Büyütmede Çekilen Mikroyapı Resimleri



Şekil 47: 100X Büyütmede Çekilen Mikroyapı Resimleri

Şekil 46, Şekil 47 ve Şekil 48'de verilen mikroyapı resimlerinde A356 alaşım yapısının tüm deney numunelerinde ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Yapıda beyaz renkte görülen yapı α alüminyum ana matrisi olarak tespit edilmiştir. Gri renkte görülen fazlar ise ötektik Al-Si fazlarıdır. Yapıda gözenekler ise siyah renkte gözlenmektedir. Dökümlerdeki sıvı metal temizleme işlemi farkı karşılaştırıldığında çekilen farklı büyütmelerin hepsinde temizleme işlemine bağlı olarak yapıda gözenek miktarı değişimi tespit edilmiştir. Bu kapsamda temizleme işlemi uygulanmadan yapılan döküm numunelere ait mikroyapı resimlerinde gözenek miktarı bariz bir şekilde yapıda gözlenmektedir. Değişen temizleme işlemlerinde gözenekler azalmakta ve en az SMT3 deneyi sonrası yapılan dökümlerde olduğu anlaşılmıştır. Gözenekler incelendiğinde yapıda özellikle 100X ve 200X büyütmede çekilen mikroyapı resimlerinde gözeneklerin bir kısmı gazdan kaynaklı bir kısımı ise yetersiz beslemeden kaynaklı ortaya çıkan gözenekler olduğu tespit edilmiştir. Gözeneklerin yetersiz beslemeden kaynaklanması numune alınan yer ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Ancak gazdan kaynaklı gözenek oluşumu sıvı metal temizliği ile ilgili bir durum olarak ortaya çıkmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen diğer sonuçlar ile uyumlu olarak temizleme sonrası yapıda ortaya çıkan

gazdan kaynaklı gözenekler azalmıştır. Mikroyapı resimleri temizleme işlemlerinin gazdan kaynaklı gözeneklerin azaldığını doğrular niteliktedir.



Şekil 48: 200X Büyütmede Çekilen Mikroyapı Resimleri

Literatürde yapılan çalışmalar, alüminyum döküm alaşımlarının kalitesini etkileyen çeşitli faktörler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu faktörler arasında alaşımın bileşimi, döküm sırasında kullanılan sıcaklık, mikroyapı, porozite, ultrasonik işlem, katkı maddeleri ve döküm yöntemleri sayılabilir. Özellikle alaşımın içeriğindeki katkı maddeleri, döküm alaşımlarının hem mekanik özelliklerini hem de mikroyapısını şekillendirmede önemli bir role sahiptir (Mohamed vd., 2008). Döküm süreçlerinde meydana gelen bazı hatalar, dökümlerde mikro gözeneklerin oluşmasına ve kaba bir mikroyapıya yol açarak mekanik özelliklerin zayıflamasına neden olabilir (Lu, 2020; Yan vd., 2018). Bunun yanı sıra, gözenekler veya oksit filmler gibi kusurların varlığı, alüminyum alaşımlarının performansını ve kalitesini ciddi şekilde olumsuz etkileyebilir (Zhang vd., 2005; Chen vd., 2003). Mikroyapı, döküm alaşımının mekanik özellikleri üzerinde belirleyici olabilir ve porozite gibi kusurların varlığı mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilir (Linder vd., 2006).

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Alüminyum alaşımları için belirlenen sıvı metal temizleme yöntemleri karşılaştırılarak temizleme işlemlerinin yoğunluk, bifilm, kırık yüzey analizi, akıcılık, çekme, sertlik ve mikroyapı gibi mekanik özelliklerine etkisinin incelendiği çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Geri dönüştürülmüş hurda alaşım kullanılarak A356 dökümünde temizleme işlemlerinin uygulanması esastır. Bu çalışma kapsamında uygulanan tüm tekniklerde sıvı metal kalitesinde iyileşme tespit edilmiştir.
- Yoğunluk ölçüm testi analiz edildiğinde, yoğunluk değerleri referans döküme kıyasla artış göstermiştir. SMT0 deneyinin % gözenek değeri ile karşılaştırma yapıldığında, SMT1 deneyinde %82,50 oranında, SMT2 deneyinde %91,80 oranında, SMT3 deneyinde ise %96,60 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir.
- Bifilm indeks değerleri SMT0 deneyi baz alınarak değerlendirildiğinde, SMT1, SMT2 ve SMT3 deneyleri için sırasıyla %86,63, %95,24, %97,92 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
- K indeksi değerleri SMT0 deneyi baz alınarak karşılaştırıldığında, SMT1 deneyinde %63,89 oranında, SMT2 deneyinde %80,56 oranında ve SMT3 deneyinde ise %94,44 oranında azalma tespit edilmiştir.
- Sıvı metal akıcılık değerleri SMT0 deneyi ile kıyaslandığında, SMT1 deneyi için %12,85, SMT2 deneyinde %37,43 ve SMT3 deneyinde %60,89 arttığı tespit edilmiştir.
- Maksimum gerilme değerleri incelendiğinde, SMT0 deneyine oranla sıvı metal temizleme yöntemlerinde artış tespit edilmiştir. SMT1 deneyinde %7,99 oranında, SMT2 deneyinde %16,18 oranında ve SMT3 deneyinde ise %22,80 oranında artış tespit edilmiştir. % uzama değerleri incelendiğinde SMT0 deneyine göre, SMT1 deneyinde %13,26 oranında, SMT2 deneyinde 16,79 oranında ve SMT3 deneyinde ise %38,84 oranında artış tespit edilmiştir. SMT0 deneyi tokluk değerleri baz alındığında ise SMT1 %22,26 oranında, SMT2 deneyinde %34,04 oranında, SMT3 deneyinde ise %67,6 oranında artış görülmüştür. Çekme deneyi sonuçlarına göre optimum şartlar SMT3 deney sonucunda 180 MPa çekme dayanımı, %4,75 uzama ve 6,90 kJ/m^3 statik tokluk şeklinde elde edilmiştir.

- Sertlik değerleri SMT0 deneyi baz alınarak karşılaştırıldığında, SMT1 deneyinde %19,14 oranında artmıştır. SMT2 deneyinde %20,94 oranında artış görülmüştür. SMT3 deneyinde ise %27,50 oranında artış tespit edilmiştir.
- Mikroyapı incelemeleri sonucu sıvı metal temizleme işlemi ile yapıda ortaya çıkan gözenek miktarının azaldığı ve özellikle gazdan kaynaklı gözeneklerin minimize edildiği tespit edilmiştir. Özellikle döner tip gaz giderme ile temizleme sonrası mikroyapıda gazdan kaynaklı gözeneklerin minimize edildiği tespit edilmiştir.

Yapılan incelemelerde, hurda A356 dökümünde uygulanan sıvı metal temizleme yöntemlerinin metal kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir. İlgili testler sonucunda temizleme işlemlerinin gözenekliliği azalttığını, akıcılığı artırdığını ve mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Özellikle döner tip gaz giderme yöntemi, gaz kaynaklı gözenekleri minimize ederek sıvı metal kalitesinde en yüksek iyileştirmeyi sağlamıştır. Sonuç olarak elde edilen veriler, sıvı metal temizleme tekniklerinin doğru bir şekilde uygulanmasının, döküm kalitesini artırmada kritik bir rol oynadığını ve olumlu etkilere sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

Al-Saadi, H. I. A., & Tunay, R. F. (2017). Suni yaşlandırma işleminin alüminyum alaşımının sertliği üzerine etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, *5*(3), 525–532.

Ammar, H. R., Samuel, A. M., & Samuel, F. H. (2008). Porosity and the fatigue behavior of hypoeutectic and hypereutectic aluminum–silicon casting alloys. *International Journal of Fatigue*, *30*(6), 1024-1035.

Anyalebechi, P. N. (2013). Hydrogen-induced gas porosity formation in Al–4.5 wt% Cu–1.4 wt% Mg alloy. *Journal of Materials Science*, *48*, 5342-5353.

Ateş, M., & Behcet, R. (2023). Aviyonik kutuların imalatında kullanılan malzemelerin soğutma üzerindeki etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *46*, 17-26.

Atik, M. (2023). *A356 alaşımına molibden ilavesinin etkileri.* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 776838)

Balaban, C., Şen, Ö., Özer, G., & Güler, K. A. (2006). *380 alaşımının soğuma eğrisinde ve akışkanlığında tane incelemenin etkisi*. 13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul.

Bang, H. S., Kwon, H. I., Chung, S. B., Kim, D. U., & Kim, M. S. (2022). Experimental investigation and numerical simulation of the fluidity of A356 aluminum alloy. *Metals*, *12*(11), 1986.

Barlow, J. O., & Stefanescu, D. M. (1998). Computer-aided cooling curve analysis revisited. *AFS Transactions*.

Beamer, C., Wessman, A., & Godfrey, D. (2023). Use of high-pressure heat treatment (HPHTTM) for L-PBF F357. *Materials Research Proceedings*, *38*, 55-60.

Binczewski, G. J. (1995). The point of a monument: A history of the aluminum cap of the Washington Monument. *JOM*, *47*, 20-25.

Brůna, M., & Sládek, A. (2011). Hydrogen analysis and effect of filtration on final quality of castings from aluminium alloy AlSi7Mg0.3. *Archives of Foundry Engineering*, *11*(1), 5-10.

Campbell, J. (2003). *Castings: The New Metallurgy of Cast Metals* (Second Edition). Elsevier Butterworth - Heinemann, Oxford.

Car, E. (2011). Alüminyum üretim süreçleri, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, İstanbul.

Chen, S., & Jiang, X. (2017). A review of modeling and control for aluminum extrusion. *Destech Transactions on Computer Science and Engineering*.

Chen, Y. J. (2009). Relationship between ultrasonic characteristics and relative porosity in Al and Al-XSi alloys. *Materials Transactions*, *50*(9), 2308-2313.

Chen, Y. J. (2010). Ultrasonic evaluation of the quality of A356.2 alloy by fluxing treatment. *Materials Transactions*, *51*(4), 803-809.

Chen, Y. J., Huang, L. W., & Shih, T. S. (2003). Diagnosis of oxide films by cavitation micro-

jet impact. *Materials Transactions*, *44*(2), 327-335.

Çolak, M., Kayikci, R., & Dispinar, D. (2016). Melt cleanliness comparison of chlorine fluxing and Ar degassing of secondary Al-4Cu. *Metallurgical and Materials Transactions B*, *47*, 2705-2709.

Davis, J. R. (1993). *Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International.

de Andrade Silva, F., Williams, J. J., Müller, B. R., Hentschel, M. P., Portella, P. D., & Chawla, N. (2010). Three-dimensional microstructure visualization of porosity and Fe-rich inclusions in SiC particle-reinforced Al alloy matrix composites by X-ray synchrotron tomography. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *41*, 2121-2128.

Demirci, K. M. (2012). Dünya alüminyum ticaretinde Türkiye'nin yeri. *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalürji Mühendisleri Odası*, 17-29.

Deev, V. B., Selyanin, I. F., Ponomareva, K. V., Yudin, A. S., & Tsetsorina, S. A. (2014). Fast cooling of aluminum alloys in casting with a gasifying core. *Steel in Translation*, *44*, 253-254.

Désilets, M., Marceau, D., & Fafard, M. (2003). START-Cuve: Thermo-electro-mechanical transient simulation applied to electrical preheating of a Hall-Héroult cell. *TMS Light Metals*, 247-254.

Diehl, D., Schneider, E. L., & Clarke, T. G. R. (2021). Formation of hydrogen blisters during the solution treatment for aluminum alloys. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, 18*, 1-9.

Dispinar, D., & Campbell, J. (2016). *Reduced pressure test (RPT) for bifilm assessment*. Shape Casting: 5th International Symposium 2014, 243-251, Springer International Publishing.

Divandari, M., & Campbell, J. (2004). Oxide film characteristics of Al–7Si–Mg alloy in dynamic conditions in casting. *International Journal of Cast Metals Research*, *17*(3), 182-187.

Djurdjevic, M. B., Odanovj, Z. D., Pavlovj-Krsti, J., & Linz, N. (2010). Melt quality control at aluminum casting plants. *Metalurgija*, *16*, 63-76.

Dong, Y., Shuai, S., Zheng, T., Cao, J., Chen, C., Wang, J., & Ren, Z. (2020). In-situ observation of solid-liquid interface transition during directional solidification of Al-Zn alloy via X-ray imaging. *Journal of Materials Science & Technology*, *39*, 113-123.

Dupuis, C., & Dumont, R. (2016). The impact of LiMCA technology on the optimization of metal cleanliness. Essential Readings in Light Metals: Volume 3 Cast Shop for Aluminum Production, *Cham: Springer International Publishing*.

Durmuş, M., Dispinar, D., Gavgali, M., Uslu, E., & Çolak, M. (2024). Evaluation of Fe content on the fluidity of A356 aluminum alloy by new fluidity index. *International Journal of Metalcasting*, 1-15.

El Haj, B., Bouayad, A., & Alami, M. (2018). Quantitative evaluation of shrinkage porosity in AlSi9 cast alloy as function of titanium addition and casting parameters. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*

(IJMPERD), 8(6), 365-372.

El-Sayed, M. A., Salem, H. A., Kandeil, A. Y., & Griffiths, W. D. (2011). Effect of holding time before solidification on double-oxide film defects and mechanical properties of aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, *42*, 1104-1109.

Emadi, D., Whiting, L. V., Nafisi, S., & Ghomashchi, R. (2005). Applications of thermal analysis in quality control of solidification processes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *81*, 235-242.

Enright, P., Hughes, I., Pickering, J., Simard, A., & Proulx, J. (2003). Characterisation of molten metal quality using the pressure filtration technique. *Transactions of the American Foundry Society*, *111*, 193-203.

Ertan, S., Kavaklıoğlu, B., & Büyükakkaş, F. (2003). *Alüminyum sıvı metal temizliğinde kullanılan flakslar*, II. Aluminium Symposium, Seydişehir.

Erzi, E., Gürsoy, Ö., Yüksel, C., Çolak, M., & Dispinar, D. (2019). Determination of acceptable quality limit for casting of A356 aluminium alloy: Supplier's quality index (SQI). *Metals*, *9*(9), 957.

Felicelli, S. D., Wang, L., Pita, C. M., & Escobar De Obaldia, E. (2009). A model for gas microporosity in aluminum and magnesium alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, *40*, 169-181.

Ferik, E., Yılmaz, Ö., Varol, F., & Aslanlar, S. (2022). Investigation of mechanical properties of 5754 aluminum alloy sheets joined by cold metal transfer (CMT) using different current intensity. *Academic Perspective Procedia*, *5*(3), 397-405.

Fu, Y., Hou, M., Yan, X., Hou, J., Luo, X., Shao, Z., & Yi, B. (2007). Research progress of aluminium alloy endplates for PEMFCs. *Journal of Power Sources*, *166*(2), 435-440.

Grjotheim, K., & Welch, B. J. (1980). *Aluminium Smelter Technology: A Pure and Applied Approach*, Aluminium-Verlag.

Gökelma, M., Latacz, D., & Friedrich, B. (2016). A review on prerequisites of a set-up for particle detection by ultrasonic waves in aluminium melts. *Open Journal of Metal*, *6*, 13-24.

Gu, C., Lu, Y., Ridgeway, C. D., Cinkilic, E., & Luo, A. A. (2019). Three-dimensional cellular automaton simulation of coupled hydrogen porosity and microstructure during solidification of ternary aluminum alloys. *Scientific Reports*, *9*, 13099.

Gul, K. A., Dispinar, D., Kayali, E. S., & Aslan, O. (2023). Assessment of tensile properties of cast high Mg containing Al-Mg-Cu aluminum alloy with correlation of computed tomography scans and optical crack surface analysis. *International Journal of Metalcasting*, *17*, 2622-2637.

Güler, M. (2017). Alüminyum alaşımlarında inklüzyon çeşitleri ve önleyici faaliyetler. *Metalurji*, *184*, 36-42.

Gyarmati, G., Fegyverneki, G., Molnar, D., & Tokár, M. (2019). The melt cleaning efficiency of different fluxes and their effect on the eutectic modification level of AlSi7MgCu alloy. *Livarski vestnik*, *66*, 70-87.

Gyarmati, G., Vincze, F., Fegyverneki, G., Kéri, Z., Mende, T., & Molnár, D. (2022). The effect of rotary degassing treatments with different purging gases on the double oxide- and nitride film content of liquid aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B, 53,* 1244-1257.

Haga, T., Imamura, S., Watari, H., & Nishida, S. (2020). *Effect of casting conditions on fluidity of aluminum alloy in die casting*. International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing, Cincinnati, OH, USA.

Haghayeghi, R., Zoqui, E. J., Halvaee, A., & Emamy, M. (2005). An investigation on semi-solid Al–7Si–0.3 Mg alloy produced by mechanical stirring. *Journal of Materials Processing Technology*, *169*(3), 382-387.

Han-Hua, W., Zeng-Sun, J., Bei-Yu, L., Feng-Rong, Y., & Xian-Yi, L. (2003). Characterization of microarc oxidation process on aluminium alloy. *Chinese Physics Letters*, *20*(10), 1815.

Han, Z. H., Wang, Z. M., Sun, Z. P., Zhang, B. R., & Rao, W. F. (2022). Influence of non-uniform ultrasonic vibration on casting fluidity of liquid aluminum alloy. *China Foundry*, *19*(5), 380-386.

Hangai, Y., Utsunomiya, T., & Hasegawa, M. (2010). Effect of tool rotating rate on foaming properties of porous aluminum fabricated by using friction stir processing. *Journal of Materials Processing Technology*, *210*(2), 288-292.

Holzschuh, G. G., Moraes, J. A. R., Garcia, S. B., Zanesco, I., de Cassia de Souza Schneider, R., & Kipper, L. M. (2022). Sustainable applications for disposal of recycled aluminum: A systematic literature review using the SciMAT software. *Journal of Sustainable Metallurgy*, *8*, 945-963.

Hsieh, K. C., Ueng, T. H., & Chen, C. C. (2013). A study of stabilization and recycling for aluminum dross. *Applied Mechanics and Materials*, *275*, 2237-2240.

Huang, C. M., & Zeng, J. M. (2011). Study on hydrogen fluctuations in aluminum melt under CAP process. *Advanced Materials Research*, *146-147*, 1859-1862.

Hudson, S. W., & Apelian, D. (2016). Inclusion detection in molten aluminum: Current art and new avenues for in situ analysis. *International Journal of Metalcasting*, *10*(3), 289-305.

Jaradeh, M. M., & Carlberg, T. (2011). Method developed for quantitative analysis of inclusions in solidified aluminum ingots. *Metallurgical and Materials Transactions B*, *42*(1), 121-132.

Jatimurti, W., Alexander, B., & Toto Wibisono, A. (2019). Effect of degassing time and cooling rate on microstructure and porosity of aluminum 6061 alloy using sand casting method. In *Materials Science Forum*, *964*, 124-129.

Karaca, E., & Alkan, E. (2021). Endüstride yaygın olarak kullanılan asit çözeltileri içinde AA5754 yüzeyinin ve korozyon davranışının incelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *8*(2), 978-989.

Karakaş, S. N., & Küden, C. (2022). Farklı polisaj sistemlerinin yeni alkasit restoratif materyalin renk değişimine etkisinin değerlendirilmesi. *Sağlık Bilimlerinde Değer*, *12*(3), 411-416.

Karppinen, A. (1997). *Kontroll av aluminiumsmältans (oxid) inneslutningshalt med QualiflashTM-metoden*. Svenska Gjuteriföreningen.

Kim, C. W., Cho, J. I., Choi, S. W., & Kim, Y. C. (2013). The effect of alloying elements on thermal conductivity of aluminum alloys in high pressure die casting. *Advanced Materials Research*, *813*, 175-178.

Kim, M. J., Yun, J. P., Yang, J. B. R., Choi, S. J., & Kim, D. (2020). Prediction of the temperature of liquid aluminum and the dissolved hydrogen content in liquid aluminum with a machine learning approach. *Metals*, *10*(3), 330.

Kuo, Y. S. (2010). Mechanical properties and porosity content of A201 aluminum alloy castings in different cooling rate sand molds. *Advanced Materials Research*, *154*, 787-793.

Kuo, Y. S. (2011). Effects of solidification time on porosity content in A201 aluminum alloy castings. *Advanced Materials Research*, *311*, 648-652.

Lashkari, O., Yao, L., Cockcroft, S., & Maijer, D. (2009). X-ray microtomographic characterization of porosity in aluminum alloy A356. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *40*(4), 991-999.

Lee, P. D., & Hunt, J. D. (2001). Hydrogen porosity in directionally solidified aluminium–copper alloys: A mathematical model. *Acta Materialia*, *49*(8), 1383-1398.

Linder, J., Arvidsson, A., & Kron, J. (2006). The influence of porosity on the fatigue strength of high-pressure die cast aluminium. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, *29*, 357-363.

Li, R., Liu, Y., & Zhang, G. M. (2015). Mechanical properties affection of carbon powder added into casting aluminum alloy. *Applied Mechanics and Materials*, *697*, 27-30.

Liu, X. Y., Ercolessi, F., & Adams, J. B. (2004). Aluminium interatomic potential from density functional theory calculations with improved stacking fault energy. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, *12*(4), 665.

Liu, X., Zhang, C., Zhang, Z., Xue, J., & Le, Q. (2017). The role of ultrasound in hydrogen removal and microstructure refinement by ultrasonic argon degassing process. *Ultrasonics Sonochemistry*, *38*, 455-462.

Lu, G., Huang, P., Yan, Q., Xu, P., Pan, F., Zhan, H., & Chen, Y. (2020). Optimizing the microstructure and mechanical properties of vacuum counter-pressure casting ZL114A aluminum alloy via ultrasonic treatment. *Materials*, *13*(19), 4232.

Maev, R., Sokolowski, J., Lee, H., Maeva, E., & Denissov, A. (2001). Bulk and subsurface structure analysis of the 319 aluminum casting using acoustic microscopy methods. *Materials Characterization*, *46*(4), 263-269.

Maryani, E., & Purba, H. H. (2021). Analysis of aluminium alloy wheels product quality improvement through DMAIC method in casting process: A case study of the wheel manufacturing industry in Indonesia. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, *54*(1), 55-62.

Máté, M., Tokár, M., Fegyverneki, G., & Gyarmati, G. (2020). The comparative analysis of the inclusion removal efficiency of different fluxes. *Archives of Foundry Engineering*,

20(2), 53-58.

Mathew, G., & Kottur, V. K. N. (2023). *Effect of ceramic reinforcements on the mechanical and tribological properties of aluminium metal matrix composites*–A review. Materials Today: Proceedings.

Matweb, (March, 2021). Alüminyumun Tarihçesi. https://www.matweb.com/ adresinden edinilmiştir.

Mostafaei, A., Stevens, E. L., Hughes, E. T., Biery, S. D., Hilla, C., & Chmielus, M. (2016). Powder bed binder jet printed alloy 625: Densification, microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*, *108*, 126-135.

Mugica, G. W., Tovio, D. O., Cuyas, J. C., & González, A. C. (2004). Effect of porosity on the tensile properties of low ductility aluminum alloys. *Materials Research*, *7*(2), 221-229.

Murakami, Y., Miwa, K., Kito, M., Honda, T., Kanetake, N., & Tada, S. (2013). Effects of injection conditions in the semi-solid injection process on the fluidity of JIS AC4CH aluminum alloy. *Materials Transactions*, *54*(9), 1788-1794.

Murakami, Y., Miwa, K., Kito, M., Honda, T., Kanetake, N., & Tada, S. (2016). Fluidity evaluation of the AC4CH (A356) aluminum alloy semi-solid slurry made by mechanical vibration method. *Materials Transactions*, *57*(2), 168-173.

Mohamed, A. M. A., Samuel, F. H., Samuel, A. M., Doty, H. W., & Valtierra, S. (2008). Influence of tin addition on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg and Al-Si-Mg casting alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A, 39*, 490-501.

Ni, H., Sun, B., Jiang, H., & Ding, W. (2003). Effects of rotating impeller degassing on microstructure and mechanical properties of the A356 scraps. *Materials Science and Engineering: A*, *352*(1-2), 294-299.

Podaril, M., Prášil, T., Majernik, J., Kampf, R., Socha, L., Gryc, K., & Gráf, M. (2022). Aluminum melt degassing process evaluation depending on the design and the degree of the FDU unit graphite rotor wear. *Materials*, *15*(14), 4924.

Puga, H., Teixeira, J., Barbosa, J., Seabra, E., Ribeiro, S., & Prokic, M. (2009). The combined effect of melt stirring and ultrasonic agitation on the degassing efficiency of AlSi9Cu3 alloy. *Materials Letters*, *63*(24-25), 2089-2092.

Rai, V. P., & Upadhyay, V. (2020). *Redesigning of current carrying conductor—The energy reduction initiative in low amperage Hall-Héroult cell*. Light Metals 2020, 1283-1290.

Ran, G., Zhou, J. E., & Wang, Q. G. (2008). Precipitates and tensile fracture mechanism in a sand cast A356 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, *207*(1-3), 46-52.

Ravi, K. R., Pillai, R. M., Amaranathan, K. R., Pai, B. C., & Chakraborty, M. (2008). Fluidity of aluminum alloys and composites: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, *456*(1-2), 201-210.

Ren, Y., Ma, W., Wei, K., Yu, W., Dai, Y., & Morita, K. (2014). Degassing of aluminum alloys via the electromagnetic directional solidification. *Vacuum*, *109*, 82-85.

Rössle, M., & Pohl, S. (2024). Quality testing in aluminum die-casting–A novel approach using acoustic data in neural networks. *Athens Journal of Sciences*, *11*(1), 9-28.

Samuel, A. M., Samuel, E., Songmene, V., & Samuel, F. H. (2023). A review on porosity formation in aluminum-based alloys. *Materials*, *16*(5), 2047.

Saevarsdottir, G., Awayssa, O., Meirbekova, R., & Haarberg, G. M. (2022). *Direct production of aluminum manganese and silicon alloys in aluminum reduction cells: A laboratory test*. Light Metals 2022, 402-410.

Sánchez, S., Velasco, E., del C. Zambrano, P., & Cavazos, J. L. (2006). Effect of titanium and strontium addition on the fluidity of A319 and A356 aluminum alloys. *Materials Science Forum*, *509*, 159-164.

Sarsılmaz, F. (2008). *Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması.* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 222104)

Savaş, Ö., & Demirok, Ö. F. (2020). Fonksiyonel derecelendirilmiş TiB2/Al kompozitlerin üretimi üzerine bir çalışma. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *8*(3), 1829-1839.

Semanco, P., Fedák, M., Rimár, M., & Ragan, E. (2012). Equation model to evaluate fluidity of aluminum alloys under pressure die-casting conditions with an application. *Advanced Materials Research*, *505*, 190-194.

Shakhashiri, B. Z. (2000). Chemical of the week aluminium. *General Chemistry*, *2*(1), 2–3.

Sheggaf, Z. M., Ehzazat, S. S. W., & Esdeira, A. A. D. (2023). Fluidity of aluminum piston alloy with different amount of pouring temperature. *Journal of Bani Waleed University for Humanities and Applied Science 8*(3), 31-36.

Singh, S. S., Guo, E., Xie, H., & Chawla, N. (2015). Mechanical properties of intermetallic inclusions in Al 7075 alloys by micropillar compression. *Intermetallics*, *62*, 69-75.

Singh, S. S., Schwartzstein, C., Williams, J. J., Xiao, X., De Carlo, F., & Chawla, N. (2014). 3D microstructural characterization and mechanical properties of constituent particles in Al 7075 alloys using X-ray synchrotron tomography and nanoindentation. *Journal of Alloys and Compounds*, *602*, 163-174.

Stanica, C., & Moldovan, P. (2009). Aluminum melt cleanliness performance evaluation using PoDFA (Porous Disk Filtration Apparatus) technology. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, *71*(4), 107-114.

Suprianto, S., Tugiman, T., Hadiguna, T., & Taher, F. (2016). *Effect of pressure on mechanical properties of A356 aluminum castings using squeeze casting method*. Int. Conf. Technol. Innov. Soc.(ICTIS2016), 8-14.

Szuckia, M., Dziubinska, A., Winiarski, G., Majerski, K., Drozdowski, K., Gorny, M., & Buras, J. (2021). Application of 2XXX and 7XXX series alloys as input material for the new casting-forging hybrid process. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, *27*, 795-801.

Tan, E., Dıspınar, D., Güner, A. T., & Atlıhan, G. (2022). Sıcak yırtılmanın alüminyum

alaşımlarının metal kalitesine etkisinin incelenmesi ve alaşımların titreşim karakteristiğinin belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *10*(3), 1186-1200.

Tabereaux, A. T., & Peterson, R. D. (2014). Aluminum Production. S. Seetharaman (Ed.), *Treatise on Process Metallurgy*, *3*, 839-917. Elsevier.

Tigli, A., Tokatli, M., Uslu, E., Çolak, M., & Dispinar, D. (2023). Correlation between K-value, density index and bifilm index in determination of liquid Al cleanliness. *Archives of Foundry Engineering, 23*(3), 22-29.

Timelli, G., & Bonollo, F. (2007). Fluidity of aluminium die castings alloy. *International Journal of Cast Metals Research*, *20*(6), 304-311.

Timelli, G., Caliari, D. (2017). Effect of superheat and oxide inclusions on the fluidity of A356 alloy. *Materials Science Forum*, *884*, 71-80.

Tokatlı, M. (2022). *Sıvı metal kalitesinin K-mold tekniği ile tayini ve çekinti üzerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 710628)

Tokatlı, M., Saydam, F., Hal, M., Koşatepe, A., Çolak, M., & Yüksel, Ç. (2022). Alüminyum alaşımlarının dökümünde yaygınca kullanılan sıvı metal temizleme yöntemlerinin incelenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *12*(1), 423-434.

Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (2003). *Handbook of aluminum: Vol. 1: Physical metallurgy and processes*. Boca Raton, CRC Press.

Tunçay, T., & Özyürek, D. (2014). Al-Si-Mg döküm alaşımlarında filtrasyonun mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *29*(2), 271-279.

Uslu, E., Dağ, M. M., & Çolak, M. (2023). Design and manufacturing of reduced pressure test machine for determination of liquid aluminum quality in casting. *Turkish Journal of Electromechanics and Energy*, *8*(3), 85-89.

Utigard, T. (1998). The properties and uses of fluxes in molten aluminum processing. *JOM*, *50*(11), 38-43.

Vaneetveld, G., Rassili, A., Lecomte-Beckers, J., & Atkinson, H. V. (2006). Thixoforging of 7075 aluminium alloys at high solid fraction. *Solid State Phenomena*, *116*, 762-765.

Vargel, C. (2004). *Corrosion of Aluminium*. Elsevier.

Varshney, D., & Kumar, K. (2021). Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization. *Ain Shams Engineering Journal*, *12*(1), 1143-1152.

Wang, C., Guo, Z., Zhou, B., Li, B., Fei, S., Deng, H., & Shen, G. (2024). Experimental investigation and numerical study on evolution of surface roughness caused by ultrasonic shot peening of 2024 aluminum alloy sheet. *Journal of Materials Research and Technology*, *30*, 9061-9083.

Wang, H., Yu, Z., Wang, Z., Hao, H., Chen, Y., & Wan, P. (2011). Preparation of a preplated

bismuth film on Pt electrode and its application for determination of trace aluminum (III) by adsorptive stripping voltammetry. *Electroanalysis*, *23*(5), 1095-1099.

Wang, Y., Wu, G., Zhang, L., Guo, Y., Wang, C., Li, L., & Xiong, X. (2023). Microstructure evolution and mechanical properties of a cast and heat-treated Al–Li–Cu–Mg alloy: Effect of cooling rate during casting. *Materials Science and Engineering: A*, *880*, 145366.

Wannasin, J., Schwam, D., & Wallace, J. F. (2007). Evaluation of methods for metal cleanliness assessment in die casting. *Journal of Materials Processing Technology*, *191*(1), 242-246.

Wu, J., Djavanroodi, F., Gode, C., Attarilar, S., & Ebrahimi, M. (2022). Melt refining and purification processes in Al alloys: A comprehensive study. *Materials Research Express*, *9*(3), 032001.

Wu, R., Shu, D., Sun, B., Wang, J., Li, F., Chen, H., & Lu, Y. (2005). Theoretical analysis and experimental study of spray degassing method. *Materials Science and Engineering: A*, *408*(1-2), 19-25.

Wu, R., Sun, B., Shu, D., & Wang, J. (2008). Study of hydrogen absorption of aluminum melt. *International Journal of Materials Research*, *99*(2), 212-215.

Wu, Y., Yan, H., Wang, J., Zheng, J., Na, X., & Wang, X. (2024). Research on online monitoring technology and filtration process of inclusions in aluminum melt. *Sensors*, *24*(9), 2757.

Xu, H., Jian, X., Meek, T. T., & Han, Q. (2004). Degassing of molten aluminum A356 alloy using ultrasonic vibration. *Materials Letters*, *58*(29), 3669-3673.

Xu, Z. B., Zou, Y. Z., Gu, H., & Zeng, J. M. (2007). Investigations on hydrogen content change in melt aluminum during casting under adjusted pressure. *Key Engineering Materials*, *353*, 3059-3062.

Yahya, N., Al Habashi, R. M., Koziol, K., Borkowski, R. D., Akhtar, M. N., Kashif, M., & Hashim, M. (2011). Morphology and magnetic characterisation of aluminium substituted yttrium-iron garnet nanoparticles prepared using sol gel technique. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *11*(3), 2652-2656.

Yan, Q. S., Lu, G., Luo, G. M., Xiong, B. W., & Zheng, Q. Q. (2018). Effect of synergistic action of ultrasonic vibration and solidification pressure on tensile properties of vacuum counter-pressure casting aluminum alloy. *China Foundry*, *15*, 411-417.

Yıldırım, H. (2006). *Alüminyum malzemenin otomotiv sektöründeki uygulamaları*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 172165)

Yılmaz, H., & Kocabas, M. (2019). Saf alüminyuma uygulanan iki aşamalı anodik oksidasyon işleminde por genişletme süresinin oksit porlar üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *17*, 38-44.

Yüksel, Ç. (2020). Alüminyum ve alaşımlarında sıvı metal kalitesi. *TÜDÖKSAD Akademi*.

Zhang, B., Cockcroft, S. L., Maijer, D. M., Zhu, J. D., & Phillion, A. B. (2005). Casting defects

in low-pressure die-cast aluminum alloy wheels. *JOM*, *57*, 36-43.

Zeng, J. M., Xu, Z. B., & He, J. (2008). New process of elimination of hydrogen from melt aluminum. *Advanced Materials Research*, *51*, 93-98.

Zeng, J., Gu, P., & Wang, Y. (2012). Investigation of inner vacuum sucking method for degassing of molten aluminum. *Materials Science and Engineering: B*, *177*(19), 1717-1720.

Zeng, J., Li, D., Kang, M., He, H., & Hu, Z. (2013). Nanostructure of aluminum oxide inclusion and formation of hydrogen bubbles in molten aluminum. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *13*(10), 6948-6952.

Zhao, L., Pan, Y., Liao, H., & Wang, Q. (2012). Degassing of aluminum alloys during re melting. *Materials Letters*, *66*(1), 328-331.

ÖZ GEÇMİŞ

Muhammet Emin Keskin, …'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini …'nda, lise eğitimini ise …'nde tamamladı. Bayburt Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun olduktan sonra, 2022 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU danışmanlığında yüksek lisans eğitimine başladı.

Eğitim sürecinde, biri uluslararası olmak üzere iki farklı TÜBİTAK projesinde bursiyer/araştırmacı olarak görev aldı ve bu projeler kapsamında araştırma ve geliştirme çalışmalarında aktif rol oynadı. İş hayatına özel sektörde başladı ve farklı alanlarda mühendislik ile yönetim tecrübeleri edindi. Şu anda ...'de idari işler müdürü olarak görev yapmaktadır.