



**SIVI METAL KALİTESİNİN K-MOLD TEKNIĞİ
İLE TAYİNİ VE ÇEKİNTİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Mehmet TOKATLI

Danışman: Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL

Yüksek Lisans Tezi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2022

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALURJİ ve MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**SIVI METAL KALİTESİNİN K-MOLD TEKNİĞİ İLE TAYİNİ VE ÇEKİNTİ
ÜZERİNE ETKİSİ**

(Determination of liquid metal quality with K-mold and its effect on shrinkage)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet TOKATLI

Danışman: Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Erzurum
Şubat, 2022



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**SIVI METAL KALİTESİNİN K-MOLD TEKNİĞİ İLE TAYİNİ VE ÇEKİNTİ ÜZERİNE
ETKİSİ**

Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL danışmanlığında, Mehmet TOKATLI tarafından hazırlanan bu çalışma, 10/02/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Metalürjisi Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Yunus Emre BENKLİ
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Danışman: Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Engin
KOCADAGIŞTAN
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU
Bayburt Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

İkinci Tez
Danışmanı: Doç. Dr. Murat ÇOLAK
Bayburt Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun/....../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2021-8863



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL* danışmanlığında sunulan “Sıvı Metal Kalitesinin K-Mold Tekniği ile Tayini ve Çekinti Üzerine Etkisi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	8	30
Kuramsal Temeller	16	30
Materyal ve Yöntem	4	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	9	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Mehmet TOKATLI	Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL
10.2.2022	10.2.2022
İmza: Aslı Islak İmzalıdır.	İmza: Aslı Islak İmzalıdır.

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tezin tüm aşamalarında her türlü desteğini ve akademik bilgisini esirgemeyen her türlü koşulda ve durumda yanımda olan saygıdeğer tez danışmanlarım Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL ve Doç. Dr. Murat ÇOLAK hocalarıma saygı ve şükranlarımı sunarım.

Laboratuvar imkânlarını sunan ve kadrosunda bulunmaktan mutluluk duyduğum Bayburt Üniversitesine teşekkürü borç bilirim. Çalışmalarına özellikle teknik açıdan katkı sağlayan ve akademik bilgisini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU hocama teşekkür ederim. FYL-2021-8863 proje numarası ile tez çalışmalarına destek sağlayan Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca üniversite – sanayi işbirliği vizyonu ile desteklerini eksik etmeyen CMS Jant ve Makine Sanayi A.Ş.' ye özellikle Ar-Ge Merkezi birimine teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca ve yaşamım boyunca dualarını ve desteklerini eksik etmeyen Anneme ve Babama sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

En önemlisi de tanıdığım günden beri hep yanımda olan ve her zaman desteğini eksik etmeyen kıymetli eşime ve dünyalar güzeli kızlarıma çok teşekkür ederim.

Mehmet TOKATLI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SIVI METAL KALİTESİNİN K-MOLD TEKNİĞİ İLE TAYİNİ VE ÇEKİNTİ ÜZERİNE ETKİSİ

Mehmet TOKATLI

Danışman: Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL

İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Amaç: Bu tez çalışmasındaki amaç alüminyum ve alaşımlarının dökümlerinde sıvı metal temizliğinin katılaşma esnasındaki % çekinti miktarına etkisi ve bu temizliğin K-mold testi kullanarak sıvı metal kalitesindeki ilişkiyi ortaya çıkarmaktır.

Yöntem: AlSi7Mg0.3 (A356) alüminyum alaşıma aynı alaşımın hurdasının % 5, % 10 ve % 15 oranlarında ilave ederek farklı miktarlarda sıvı metal temizlik oranları sağlanacaktır. Sıvı metal temizliğinde inert olan azot gazı 5 lt/dk ve 300 dv/dk'ya sabitlenen döner çark hızı esas alınarak rotari gaz giderme yöntemi ile sıvı metale zerk edilecektir. 730°C'deki sıvı metalden temizlik öncesi ve sonrası vakum altında katılaştırma (RPT) test numuneleri alınmış ve 200°C'ye ön ısıtılan çekme çubuğu, ördek ayağı ve K-mold metal kalıplarına temizlik öncesi ve sonrası dökümler gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: Uygulamalar sonrası sıvı metale gaz giderme işlemi uygulandıktan sonra K-mold test numunesinde inklüzyonların azaldığı, çekme testinde numunenin mukavemetinin arttığı, ördek ayağı kalıplarında çekinti miktarının azaldığı, RPT numune testinde gözeneklerin azaldığı ve içyapı incelemesinde gözenekler ile inklüzyonların azaldığı görülmektedir.

Sonuç: Şarja eklenen hurda oranlarına göre sıvı metal içerisinde hidrojen gazının ve inklüzyonların arttığı tespit edilmiştir. Hurda oranına göre numunelerde mekanik özelliklerin azaldığı uygulanan sıvı temizliğiyle bu özelliklerin arttığı ve sıvı metal kalitesinin K-mold test tekniği ile daha hızlı ve pratik olup kısa sürede bilgi verdiği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: A356, K-mold, döküm, çekinti, sıvı metal temizliği, (Rotary) döner tip gaz giderme, bifilm.

Şubat 2022, 65 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

Determination of liquid metal quality with K-mold and its effect on shrinkage

Mehmet TOKATLI

Supervisor: Assoc. Prof. Çağlar YÜKSEL

Co-supervisor: Assoc. Prof. Murat ÇOLAK

Purpose: The aim of this thesis will be to reveal the effect of liquid metal cleanliness on the % shrinkage amount during solidification in castings of aluminum and its alloys and to reveal the relationship between this cleanliness and liquid metal quality by using the K-mold test.

Method: By adding 5, 10 and 15 % of the scrap of the same alloy to the AlSi7Mg0.3 (A356) aluminum alloy, different amounts of liquid metal cleaning rates will be provided. Nitrogen gas, which is inert in liquid metal cleaning, will be injected into the liquid metal by rotary degassing method based on the rotating wheel speed fixed at 5 lt/min and 300 dv/min. Before and after cleaning, solidification (RPT) test samples were taken from the liquid metal at 730°C, and castings were performed before and after cleaning into the tensile rod, duck foot and K-mold metal molds preheated to 200°C.

Findings: After degassing the liquid metal after the applications, it is seen that the inclusions decrease in the K-mold test sample, the strength of the sample increases in the tensile test, the amount of shrinkage in the duck feet molds decreases, the pores decrease in the RPT sample test, and the pores and inclusions decrease in the internal structure examination.

Results: It was determined that hydrogen gas and inclusions increased in the liquid metal according to the scrap rates added to the charge. According to the scrap rate, it is thought that the mechanical properties of the samples decrease, these properties increase with the applied liquid cleaning, and the liquid metal quality is faster and more practical with the K-mold test technique and gives information in a short time.

Keywords: A356, K-mold, casting, shrinkage, liquid metal cleaning, rotary degassing, bifilm.

February 2022, 65 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
Literatür Özeti.....	2
Tezin Amacı ve Kapsamı	4
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Alüminyum ve Alaşımları	5
Alüminyum ve Alaşımların Üretim Teknikleri	6
Birincil Alüminyum Üretimi	6
İkincil Alüminyum Üretimi	6
Alüminyum ve Alaşımların Sınıflandırılması	7
İşlem (Dövme) Alüminyum	8
Dökme Alüminyum	8
Sıvı Alüminyum Kalitesi	9
Gazlar	9
Hidrojen.....	10
Sıvı Metalde hidrojen Girişi	10
İnklüzyonlar.....	11
Oksit Filmi.....	11
Gözeneklilik	12
Sıvı Metal Kalitesini Arttırmak İçin Kullanılan Yöntemler	13
Flakslar	14
Rotary (Döner) Gaz Giderme	14
Yeniden Ergitme(kontrollü karıştırma) Gaz Giderme Yöntemi.....	16
Elektromanyetik Yönlü Gaz Giderme	18
Sprey Gaz Giderme	19
Ultrasonik Gaz Giderme	21

Vakumlu gaz giderme.....	22
Sıvı Alüminyum Test Yöntemleri	23
Termal Analiz Yöntemi	24
X- Işını Yöntemi.....	24
Tatur test.....	25
Akışkanlık Testi.....	26
Ultrasonik Test	26
PoDFA, Prefil Footprinter ve Qualiflash Test.....	27
Elektriksel Direnç Test (LİMCA)	29
Azaltılmış Basınç Testi (RPT).....	29
K–mold.....	30
MATERYAL ve METOT	33
Materyal.....	33
Yöntem	33
Ergitme ve Kalıplama İşlemi.....	34
Sıvı Metal Temizliği.....	35
Kalıpların Hazırlanması ve Sıvı Metalin Dökülmesi	36
Yoğunluk Ölçümü	39
Metalografik Muayene	40
Çekme ve Sertlik Testi	41
ARAŞTIRMA BULGULAR VE TARTIŞMA	43
Sıvı Metalin Temizlik Kontrol RPT Sonuçları.....	43
Yoğunluk Testi Sonuçları.....	45
K-Mold Kalıbı Döküm Deneyi Sonuçları	45
Ördek Ayağı Kalıbı % Çekinti Sonuçları	48
Mikroyapı İnceleme Sonuçları	51
Mekanik Test Sonuçları.....	55
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	65

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Alüminyum metalinin fiziksel ve mekanik özellikleri	6
Tablo 2. Birincil ve İkincil Alüminyum Endüstrilerinin Karşılaştırılması	7
Tablo 3. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	8
Tablo 4. Dökme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	9
Tablo 5. İnklüzyonların sınıflandırılması, çeşitli bileşikleri ve potansiyel kaynakları.....	11
Tablo 6. Külçe Etial-177 alüminyumun ve ikincil alüminyumun (talaş) kimyasal bileşimi sınır değerleri.....	33
Tablo 7. Deney parametreleri	35
Tablo 8. RPT numunelerden elde edilen gözenek ve yoğunluk verileri.....	45
Tablo 9. K- mold inklüzyon sayıları	48
Tablo 10. K değerlerinin karşılaştırılması	48
Tablo 11. Ördek ayağı kalıbından elde edilen çekinti numuneleri % çekinti miktarı imaj analiz sonuçları	51
Tablo 12. Sertlik ölçüm sonuçları	55
Tablo 13. Çekme test deneyi sonuçları	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. İkincil alüminyum tipleri, a) preslenmiş yumuşak hurda, b) sert, döküm hurdası, c) talaş, d) alüminyum içecek kutusu	7
Şekil 2. Sıcaklığa bağlı hidrojen çözünürlüğü ve saf alüminyum ile 356 ve 319 alaşımlarının hidrojen çözünürlüğü	10
Şekil 3. a) Alüminyum alaşımının yüzeyindeki oksit film görüntüsü ve gerilmeler sonucu filmdeki olası yırtılma (ve aniden yeniden oluşum), b) Hava veya gaz ile ergiğin ara yüzeyinin karşılaştığı yüzey oksit filmin görünüşü	12
Şekil 4. Döner gaz giderme cihazının şematik gösterimi	16
Şekil 5. Yeniden ergitme (kontrollü katılaştırma) şeması	17
Şekil 6. Elektromanyetik yönlü gaz giderme uygulamanın şematik gösterimi	18
Şekil 7. Sistemin gaz giderme mekanizması	19
Şekil 8. Elektromanyetik karıştırma, (a) yönlendirme olmadan (b) yönlendirme ile oluşan yapı	19
Şekil 9. Sprey gazdan arındırma yönteminin şematik çizimi	20
Şekil 10. Ultrason sisteminin suda uygulanan testleri. (a)Ultrason kapalı. (b)ultrason açık ...	22
Şekil 11. a) Vakumlu, b) Ergiyikten hidrojeni emen gaz gidermenin şematik gösterimi	23
Şekil 12. a) Tatur kalıbının şematik gösterimi ve numune, b) dış, c) iç gözenekler	26
Şekil 13. Ultrasonik algılama prensibi	27
Şekil 14. a) PoDFA yönteminin prensibi b) Qualiflash cihazı c) PREFIL-Footerprinter çalışma prensibi	28
Şekil 15. LİMCA test cihazı şematik görünüm	29
Şekil 16. RPT cihazı görüntü ve çalışma sistemi	30
Şekil 17. K-mold test kalıbı ve numune görüntüsü	31
Şekil 18. K-mold yüzeyleri, a) temiz hammadde, b) yolluk hurdaları, c) basınçlı dokum, d) birçok kere kullanılmış hurda.....	31
Şekil 19. Şarjda kullanılan a) külçe resmi, b) talaş resmi	33
Şekil 20. Çalışma kapsamında yapılan işlemler ve sıralaması	34
Şekil 21. Çan tipi ergitme ocağı (Elektrik Direnç Ocağı)	35
Şekil 22. Rotary gaz giderme ile sıvı metal temizleme yöntemi	36
Şekil 23. Isıtıcı tabla ve kalıpların ısıtılması	37
Şekil 24. Döküm işlemi	37
Şekil 25. K- mold test kalıbı.....	38
Şekil 26. Ördek ayağı kalıp görüntüsü	38
Şekil 27. Azaltılmış basınç testi (RPT) cihazı ve numunesi	39
Şekil 28. Çekme çubuğu test kalıbı	39
Şekil 29. Yoğunluk ölçüm test cihazı.....	40

Şekil 30. a) Zımparalama ve parlatma cihazı ve b) metalografik mikroskop	41
Şekil 31. Sertlik ölçüm test cihazı	41
Şekil 32. Çekme testi cihazı ve çekme numunesi	42
Şekil 33. RPT test numunesi görüntü resimleri; a) gaz giderme işlemi öncesi, b) gaz giderme işlemi sonrası	43
Şekil 34. RPT numunelerin kesitleri	44
Şekil 35. K- mold numunesi örnek fotoğraf görüntüsü.....	46
Şekil 36. Değişen hurda oranlarında temizlik öncesi ve sonrası K- mold parça numuneleri...	46
Şekil 37. Değişen hurda oranlarında temizlik öncesi ve sonrası K- mold toplu kırık numuneleri	47
Şekil 38. Ördek ayağı kalıbı döküm numunesi örnek görüntü.....	49
Şekil 39. Ördek ayağı a) temizleme öncesi, b) temizleme sonrası çekinti miktarının gösterimi	49
Şekil 40. Ördek ayağı küçük ve büyük parça a) temizleme öncesi, b) temizleme sonrası çekinti miktarının gösterimi	50
Şekil 41. Değişen hurda oranlı numunelerden temizlik öncesi ve sonrası ait mikroyapı görüntüleri	52
Şekil 42. % 5 hurda ilaveli alaşım temizleme öncesi yapılan dökümlerden elde edilen mikroyapı resimleri a) 100x, b) 200x büyütme.....	53
Şekil 43. % 10 hurda ilaveli alaşım temizleme öncesi yapılan dökümlerden elde edilen mikroyapı resimleri a) 100x, b) 200x büyütme.....	53
Şekil 44. % 15 hurda ilaveli alaşım temizleme öncesi yapılan dökümlerden elde edilen mikroyapı resimleri a) 100x, b) 200x büyütme.....	54
Şekil 45. Temizleme sonrası 100x büyütmeden çekilen mikroyapı resimleri, a) % 5 hurda ilaveli döküm, b) % 10 Hurda ilaveli döküm, c) % 15 hurda ilaveli döküm	54
Şekil 46. Deney numunelerine ait ortalama sertlik ölçüm sonuçları.....	55
Şekil 47. Deney numuneleri çekme mukavemeti ve % uzama sonuçları.....	57

KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

Bi	: Bifilm İndeksi (mm)
LiMCA	: Sıvı Metal Temizlik Analizcisi (Liquid Metal Cleanless Analysis)
PoDFA	: Gözenekli Disk Süzme Analizi (Porous Disk Filtration Analysis)
RPT	: Reduced Pressure Test (Düşürülmüş Basınç Testi)
VAK	: Vakum Altında Katılaştırma
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry (Enerji Ayırmalı Spektroskopi)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
XIDS	: X-Işını Görüntüleme
ETİAL	: ETİ Alüminyum
TA	: Termal Analiz Yöntemi
SAM	: Taramalı akustik mikroskopi
SiC	: Silisyum Karbür
N	: Azot
Ar	: Argon
Al	: Alüminyum
°C	: Santigrat derece
DC	: Doğru Akım
dv	: Devir
dk	: Dakika
g	: Gram

GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde hafif ve mekanik özellikleri yüksek bileşenlere yönelik talep gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle CO₂ emisyonun azaltılması ve çevreye zararlı gazların salınımını engellemek adına uygulanan alaşımlarla birlikte alüminyum her alanda olduğu gibi döküm alanında da yerini almıştır. Avantajları sayesinde (hafiflik, kazanılan mekanik özellik vs.) otomotiv ve ulaşım araçlarının alüminyum alaşımlarının uygulamasına yol açmıştır. Ayrıca mükemmel dökülebilirlik, iyi korozyon direnci ve üstün mekanik özellikler ve düşük yoğunluk arasındaki uygunluk alüminyum alaşımlarının dökümhanelerde kullanımını arttırmaktadır. Ayrıca gelişen teknolojik uygulamalarla birlikte alüminyum alaşımları hava ve savunma sanayiinde de büyük yer almaktadır.

Üretimde birincil ve ikincil alüminyum olarak isimlendirilen alüminyum ve alaşımların kullanıldığı özelliklerde ikincil alüminyum olarak nitelendirilen alüminyum hurdalarının geri dönüştürülmesine hükümetler ve dünyadaki araştırmacılar tarafından çevrenin korunması, enerji kaynaklarının korunması ve kaynakların yenilenmesi için önem verilmiştir.

Alüminyum ve alaşımlarının sıvı metal kalitesi alüminyum dökümde oldukça önemli yere sahip iken ikincil alüminyum endüstrinin saflık ihtiyacını karşılayamamaktadır. Bu nedenle alüminyum geri dönüşümü ve geri dönüşüm alüminyumun saflığının artırılması üzerine yapılan araştırmalar çok önemli yere sahiptir.

Yüksek kaliteli alüminyum dökümler üretmek için, sıvı alüminyum ve demir içeren fazlar gibi intermetalikler içinde çözünmüş hidrojen gibi bifilmelerden ve bifilm açıcı maddelerden önemli ölçüde arınmış bir ergiyik ile başlamak önemlidir.

Alüminyum alaşımındaki safsızlıklar üç kategoriye ayrılabilir: Çözünmüş hidrojen, metalik olmayan oksit filmleri ve diğer bazı safsızlık elementleri (örn., Cl ve Fe). Hidrojen ve metalik olmayan oksit filmleri, alaşımın mikroyapıları ve özellikleri üzerinde büyük etkilere sahiptir. Ergiye akışkanlığını yitirmesine ve alaşımda mikro gözeneklilik oluşumuna neden olabilirler. Metalde çatlak kaynağı ve sert noktaların oluşmasına bile yol açabilirler. Böylece işlenebilirlik, yüzey düzgünlüğü ve dökümün mekanik özellikleri, özellikle tokluk ve yorulma direnci daha da kötüleşecektir. Bu nedenle, alüminyum ergiyinde hidrojen ve inklüzyon miktarını azaltmak hidrojen içeriğini kontrol etmek dökümlerin ve hurda parçaların geri dönüşümü ve yeniden kullanımı üzerinde büyük öneme sahiptir.

Literatür Özeti

Literatür incelendiğinde sıvı metal temizliği ve sıvı metal temizlik ölçüm yöntemleri ile ilgili çeşitli uygulamalar görülmektedir. Gerek sıvı metal temizliği gerekse sıvı metal temizlik kontrolü kuramsal temellerde geleneksel ve yenilikçi çalışmalar kapsamında anlatılmıştır. Bu metotları sanayide uygulanabilirliği açısından incelendiğinde ise gerek maliyet gerekse üretim kapasitesi açısından geleneksel metotların kabul gördüğü anlaşılmaktadır. Bu bağlamda döküm endüstrisine bakıldığında sıvı metal temizliği açısından rotary (döner tip) temizleme metodunun ve sıvı metal temizlik testinin de RPT test cihazı ile yaygın olarak kullanıldığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmada çevreye zararı olmayan ve uygulama kolaylığı ile verimi açısından endüstride yer bulan döner tip gaz giderme sistemi ile sıvı metal temizliği araştırılmıştır. Sıvı metal kontrolünde endüstride uygulama metodu kolay olan RPT test cihazı kullanılmıştır. Ayrıca endüstri ile akademik uygulamaları sınırlı sayıda olan RPT test cihazına göre sıvı metal kontrolünde daha hızlı ve kolay sonuç veren K- mold test sistemi kullanılmıştır. Alüminyum alaşımlarında kullanılan sıvı metal temizliği ve temizlik test metotlarıyla ilgili yapılan bazı çalışmalar:

Yüksel *et al.* (2017) yaptıkları bir çalışmada, hurda A356 alüminyum alaşımının sıvı metal kalitesi artırılarak mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve ikincil alüminyum kullanımının artırılmasını amaçlamışlardır. Elde edilen bulgulara göre ultrasonik gaz giderme işleminin geleneksel eritkenlerin (flaks) ve tepkimez gazların (N₂, Ar gibi) kullanımı ile ulaşılan bi-film indeksi değerlerinden daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra ultrasonik gaz giderme süresinin artışı ile sıvı metal kalitesinin artışı arasında doğrusal bir ilişkisi olduğunu belirlemişlerdir.

Xu *et al.* (2004) çalışmalarında, A356 alaşımının, 20 kHz frekansta ultrasonik titreşim ve 1500 W'a kadar titreşim yoğunlukları kullanılarak alüminyumdan gaz giderilmesi için ultrasonik gaz giderme düzeneği hazırlanmıştır. Ultrasonik gaz giderme, çeşitli işlem sıcaklıkları ve süreleri için farklı alüminyum ergiyik hacimlerinde test edilerek gaz giderme sonuçları RPT numunelerinde yoğunluk ölçümü ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, alüminyum alaşımlarında gözenek oluşumunu azaltmak için ultrasonik titreşim kullanılabileceği önerilmiştir.

Ni *et al.* (2003) yaptıkları bir çalışmada, korunan ve RE içeren bir JDN-I flaks ile saflaştırılan A356 hurda ergiyiğinin gazdan arındırılması için döner tip gazdan arındırma tekniği kullanmışlardır. Deneyde uygulanan teknik sonucunda, ötektik silisyum modifikasyonunun düşmesine ve alaşımın mekanik özelliklerinin, döner pervane gazının alınmasından sonra kötüleştiğini ve JDN-I ile rafine edildikten sonra döner pervane gaz giderme

sistemi ile muamele edilen hurda A356 alaşımının gerilme mukavemeti ve uzamasının daha da kötüleştiğini göstermiştir. Yalnızca akı ile rafine edilenlere kıyasla sırasıyla % 5,6 ve % 23,3 azalmıştır. Aynı zamanda, ergiyikteki oksit kaplamalarının alaşımın mekanik özelliklerinde bir düşüşe yol açacak şekilde arttığını gözlemlenmiştir. Döner tip gaz gidermede uygulama süresi, sıcaklığı ve devrinin önemi yapılan çalışmada görülmüştür.

Zhao *et al.* (2012) yaptığı çalışmada; ötektik alaşıma yakın Si içeren alüminyum alaşımların yeniden ergitilerek X ışını radyografi yöntemi kullanılarak gözenek oluşumlarını incelenmişlerdir. Alüminyum alaşımların içinde bulunan gözeneklerin yeniden ergitilmesi ile sıvı metalin içeresinden hızla dışarı çıktığı ve ötektik alaşıma yakın alüminyum alaşım ile A356 alaşımın birkaç kez yeniden ergitme deneyi gerçekleştirilen bu çalışmanın sonucunda alüminyum alaşımların birkaç kez ergitildikten sonra gözeneklerin önemli ölçüde azaldığını tespit etmişlerdir.

Sensoy *et al.* (2020), A356 alüminyum alaşımının akıcılık verimliliğini artırmayı ve optimum akıcılık şartlarının belirlenmesini hedeflemişlerdir. Yapılan analiz çalışmaları sonucunda akıcılığa en çok etki eden parametrenin kesit kalınlığı olduğu kanısına varmışlardır.

Gyarmati *et al.* (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, Ar ve N₂ temizleme gazları ile gerçekleştirilen döner tip gaz giderme işlemlerinin sıvı alüminyum alaşımının bifilm miktarı üzerindeki etkileri karşılaştırılmışlardır. Deneyler sırasında ergiyik kalitesindeki değişiklikleri K-mold numuneleri ile karakterize etmişlerdir. K-mold numunelerin kırılma yüzeylerini inceleyerek sıvı metaldeki inklüzyon içeriğini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada sıvı metale uygulanan temizleme işlemlerinde, argon gazının azot gazına kıyasla daha olumlu sonuçlar ortaya çıkardığını ve sıvı metaldeki inklüzyonları temsil eden K değerlerinde azalma olduğu tespit etmişlerdir.

Galarraga *et al.* (2018), ergimiş AlSi10Mg alüminyum alaşımında çözünen hidrojenin oluşturduğu gaz gözenekliliğinin azaltılması, temizleme gazı üfleme ile birlikte bir ultrasonik gaz giderici kullanımını incelenmişlerdir. Farklı numunelerin hidrojen içeriğinin belirlenmesinde düşürülmüş basınç testi (RPT) kullanmışlardır. Ayrıca RPT testini etkileyen farklı faktörleri de göz önüne almışlardır. RPT testinde tutarlı sonuçlar elde etmek için vakum uygulaması ile birlikte alüminyum numunenin sıcaklık kontrolünün gerekli olduğu ve atmosfer neminin önemli etkisi olduğu için nemin dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı; alüminyum ve alaşımlarının dökümlerinde sıvı metal temizliğinin katılaşma esnasındaki % çekinti miktarına etkisi ve bu temizliğin K-mold testi kullanarak sıvı metal kalitesindeki ilişkiyi ortaya çıkarmak ve elde edilen bilgiyi literatüre kazandırmaktır. Bu amaçla sanayide yaygın olarak kullanılan döner tip gaz giderme (rotary) sistemi ile sıvı metal temizliği uygulandıktan sonra deneyler gerçekleştirilmiştir.

AlSi7Mg0.3 (A356) alüminyum alaşıma aynı alaşımın hurdasının % 5, % 10 ve % 15 oranlarında ilave ederek sıvı metal kalitesi değerlendirilmiştir. Sıvı metal temizliğinde inert olan Azot gazı 5 lt/dk ve 300 dv/dk'ya sabitlenen döner çark hızı esas alınarak rotary gaz giderme yöntemi ile sıvı metale zerk edilmiştir. 730 °C'deki sıvı metalden temizlik öncesi ve sonrası vakum altında katılaştırma (RPT) test numuneleri alınmış ve 200 °C'ye ön ısıtılan çekme çubuğu, ördek ayağı ve K-mold metal kalıplarına temizlik öncesi ve sonrası dökümler gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması beş ayrı bölümde hazırlanmıştır. Birinci bölüm, “Giriş” bu bölümde, çalışma hakkında genel bilgiler, yapılan çalışmalar, tezin amacı ile içeriği hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde “Kuramsal Temeller” başlığı ile alüminyum ve alaşımları hakkında genel bilgiler, sıvı alüminyum kalitesine etki eden faktörler ile sıvı metal temizlik yöntemleri ve sıvı metal temizliği test yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölüm “Materyal ve Metot” kısmında, deneylerde kullanılan malzemeler, deney süreçleri ve elde edilen deney numune işlemlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde “Araştırma Bulgular ve Tartışma” kısmında, deney işlemleri sonucunda elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Beşinci bölümde ise çalışmanın sonuçlarından bahsedilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

KURAMSAL TEMELLER

Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyum bileşikler halinde yer kabuğunda % 8 oranında bulunan karbon ve silisyumdan sonra gelen elementtir. Dünyada çelikten sonra en çok üretimi yapılan alüminyum malzemeler hayatımıza inşaat sektöründe yoğun olarak kullanımla girmiş olup gelişen teknoloji ve enerji kazanımı ile çevre odaklı üretimle birlikte otomotiv, uçak, vagon yapımı, elektrik, ambalaj, tel ve kablo üretimi, makine ve makine elemanları ile metalürji alanlarında kullanımı bulunmaktadır. Ayrıca AR-GE çalışmalarının sonucunda günümüzde savunma sanayi ve uzay endüstrisinde oldukça fazla yer almaya başlamıştır.

Alüminyum ve alaşımların korozyon dayanıklılığı yüksek olması ve servis ömrünün uzunluğu, dış etkenlere ve değişik iklim şartlarına karşı dayanıklılığı, hafifliği, kolay biçimlendirilebilmesi, düşük bakım maliyetleri, renklendirilebilmesi ve teknolojik açıdan sonsuz ürün çeşitliliği gibi alternatif özelliklere sahip olması yukarıda bahsedilen kullanım alanının genişliği ve önemini oluşturan parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Alüminyum endüstrisi, birincil ve ikincil olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Alüminyumun doğadan elde edilmesinin en önemli hammaddesi boksittir ve birincil alüminyum bu cevherden elde edilir. Dört ton boksitten bir ton alüminyum elde edilmektedir. Boksit rezervleri dikkate alındığında, Türkiye'nin dünyadaki boksit rezervinin %1'ini barındırdığı bilinmektedir. Cevherlerin % 95'i (422 milyon ton) Toroslar kuşağında yer almaktadır. Boksitten bir ton alüminyum üretimi için yaklaşık 17000 kWh enerji gerekirken, geri dönüşümle aynı miktar alüminyum için 750 kWh enerji harcanmaktadır (Öztürk 2005).

Ülkemizde ise cevherden alüminyum elde eden ve madenden son ürüne kadar üretim yapabilen tek entegre alüminyum fabrikası Eti Alüminyum A.Ş. bünyesinde Konya ili Seydişehir ilçesinde bulunmaktadır.

İkincil alüminyum, birincil alüminyum ile çeşitli alaşım ve üretim yöntemleri kullanılarak hayatımıza giren ve bir şekilde işlevlerini yitirmesi sonucu kullanım dışı kalan hurda olarak isimlendirilen alüminyum ve alaşım ürünlerden elde edilmektedir.

Alüminyum geri dönüşebilirliği iyi olan bir metal olup birincil alüminyuma göre oldukça düşük enerji gereksinimi duyar. Alüminyumun yeniden değerlendirilmesi sonucu elde

edilen ikincil alüminyuma olan talep, yüksek enerji maliyetleri ve çevreci yaklaşımlara paralel olarak artmaktadır.

Üretim yöntemlerine göre de alüminyum ürünleri, hammadde (külçe, biyet) ve yarı ürünler (ara mallar) olan ekstrüzyon ürünleri (alüminyum profiller, çubuklar, lamalar, filmaşınlar), yassı ürünler (levha, şerit, folyo), döküm ürünleri ve iletkenler olarak gruplandırılır. Alüminyum metalinin bazı özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Alüminyum metalinin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Özgül ağırlık	Ergime sıcaklığı	Kaynama sıcaklığı	Elastisite modülü	Çekme gerilmesi	% uzama
Al	2,70 g/cm ³	660 °C	2519 °C	70 GPa	40-90 MPa	% 30-40

Alüminyum ve Alaşımların Üretim Teknikleri

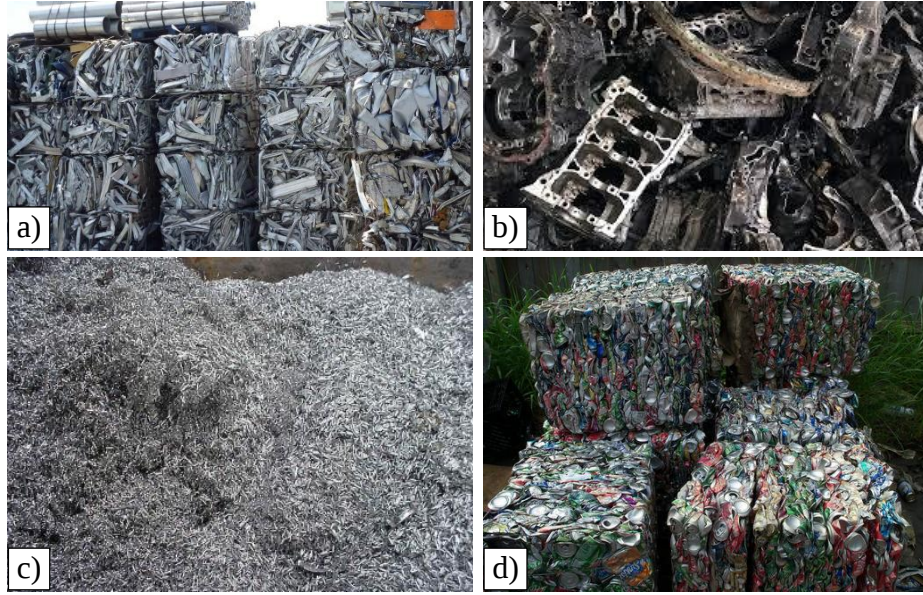
Birincil (cevherden alüminyum) üretim yöntemi ve ikincil (hurdadan) alüminyum üretim yöntemleri olarak ikiye ayrılabilir. İkinci alüminyum üretim yönteminin enerji tasarrufunun oldukça yüksek olması hem hammadde maliyetinde düşüşe hem de çevresel etkiye olumlu etkisi, alüminyumun geri dönüşümünü vazgeçilmez kılmıştır.

Birincil Alüminyum Üretimi

Alüminyum, yeryüzünde çeşitli yerlerden çıkarılan çeşitli minerallerin bir kombinasyonu olarak bulunur ve boksit cevherinden birincil alüminyum elde edilir. Ekonomik değere sahip boksit cevheri çıkarılıp çeşitli proseslerle belirli boyutlama yapıldıktan sonra uygulanabilirliği ekonomik olan Bayer prosesi ile alümina elde edilir. Yaklaşık 2,9 ton boksitten bir ton alümina üretilir. Boksit cevherinden elde edilen alümina elektroliz (Hall-Herault prosesi) işlemi ile saf alüminyum elde edilir (Car 2010).

İkincil Alüminyum Üretimi

İkincil alüminyum, birincil alüminyum ile çeşitli alaşım ve üretim yöntemleri kullanılarak hayatımıza giren ve bir şekilde işlevlerini yitirmesi sonucu kullanım dışı kalan hurda olarak isimlendirilen alüminyum ve alaşım ürünlerden elde edilmektedir. Çeşitli alüminyum ve alaşım hurda görselleri Şekil 1’ de verilmiştir. Alüminyum geri dönüşebilirliği iyi olan bir metal olup birincil alüminyuma göre oldukça düşük enerji gereksinimi duyar. Alüminyumun ve alaşımların yeniden değerlendirilmesi sonucu elde edilen ikincil alüminyuma olan talep, yüksek enerji maliyetleri ve çevreci yaklaşımlara paralel olarak artmaktadır.



Şekil 1. İkincil alüminyum tipleri, a) preslenmiş yumuşak hurda, b) sert, döküm hurdası, c) talaş, d) alüminyum içecek kutusu

Birincil alüminyum üretim prosesi gibi daha detaylı ve yüksek maliyetli olmayan ikincil alüminyum üretimi; hurda toplama, hurda ayırma ve hazırlama, ergitme, alaşımlandırma, metal rafinasyonu, döküm, cüruf temizleme ve cüruf değerlendirme başlıkları halinde birbirini tamamlayan prosesler olarak karşımıza çıkmaktadır. İkincil alüminyum ve alaşımların kullanım alanlarına göre istenilen sonucun varılması bu proseslerin en iyi verimle kullanılmasıyla oluşmaktadır. Birincil ve ikincil alüminyum ve alaşımların endüstrideki kullanımlarının karşılaştırılması Tablo 2’ de verilmiştir (Car 2019).

Tablo 2. Birincil ve İkincil Alüminyum Endüstrilerinin Karşılaştırılması

Birinci Alüminyum Endüstrisi	İkincil Alüminyum Endüstrisi
Yüksek yatırım maliyeti	Düşük yatırım
Uzun üretime geçme süreci	Kısa üretime geçme süreci
Yüksek enerji tüketimi	Enerji tasarrufu
Doğal boksit kaynakların hammadde olarak kullanılması	Boksit kaynaklarının kullanımında tasarruf
Yüksek oranda kirli gaz salınımı	Düşük oranda kirli gaz salınımı

Alüminyum ve Alaşımların Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları uluslararası standartlarda kabul gören döküm ve işlem (dövme) alaşımları olarak iki ana grupta sınıflandırılır.

İşlem (Dövme) Alüminyum

Ağırlıklı olarak sürekli döküm yöntemi ile blok biçiminde çeşitli alaşımları içeren alüminyum blok homojenleştirme tavı uygulandıktan sonra ekstrüzyon veya haddeleme ile biçimlendirilir. Isıl işlem uygulanabilirliği olarak sınıflandırılır.

Tablo 3' te gösterilen işlem (dövme) alaşımları dört basamaklı bir sistem ile numaralandırılmakta olup ilk rakam temel alaşım elementini vermektedir. Alaşımlarda ikinci sıradaki rakam, alaşım modifikasyonunu belirtmekte ve rakam sıfır ise alaşımın orijinal olduğunu vermektedir. 1 ile 9 arasında değişen rakamlar, alaşımdaki değişiklikleri ifade eder. Son iki rakamın grupta farklı alüminyum alaşımlarını belirtmektedir (Al-Saadı and Tunay 2017).

Tablo 3. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Alaşım	Açıklama
1xxx	Saf alüminyum
2xxx	Ana alaşım elementi bakır olup, magnezyum gibi diğer elementlerde bulunabilir.
3xxx	Ana alaşım elementi mangan olan alüminyum alaşımları
4xxx	Ana alaşım elementi silisyum olan alüminyum alaşımları
5xxx	Ana alaşım elementi magnezyum olan alüminyum alaşımları
6xxx	Başlıca alaşım elementleri magnezyum ve silisyum olan alüminyum alaşımları
7xxx	Ana alaşım elementi çinko olan alüminyum alaşımları, ancak bakır, magnezyum, krom ve zirkonyum gibi elementler bulunabilir.
8xxx	Kalay ve biraz lityum içeren alüminyum alaşımları
9xxx	Gelecekte kullanılmak üzere belirlenmiştir.

Dökme Alüminyum

Döküm, istenilen şeklin bir kalıp yardımı ile verilmesi ve o kalıbın içini dolduran sıvının katılaşarak kalıp içindeki tasarımı alması olarak tanımlanabilir. Metalurjide döküm çeşitli proseslerle elde edilen ve ticari bir değer güderek metal ve alaşımların ergitilerek kum kalıp, alçı kalıp, kokil kalıp, basınçlı döküm, hassas döküm gibi ön veya son şekil verilen ticari proseslerle üretilmektedir.

Alüminyum ve alaşımların döküm sınıflandırmasında Tablo 4' te gösterildiği gibi üç basamaklı bir kodlamanın sonunda ondalıkla noktalama içeren dört rakam kullanılmaktadır (Al-Saadı and Tunay 2017).

Tablo 4. Dökme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Alaşım	Ana alaşım elementi
1xx.x	Saf Alüminyum (% 99 dan fazla Al içeren alaşımlar)
2xx.x	Bakır (Başlıca alaşım elementi)
3xx.x	Silisyum, bakır ve /veya magnezyum ile.
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer Elementler
6xx.x	Kullanılmayan seri

Sıvı Alüminyum Kalitesi

Her endüstrinin hedefi, üretim ürününün kalitesini ve verimliliğini artırmaktır. Sıvı metal kalitesi bütün metal dökümlerde olduğu gibi alüminyum ve alaşımların dökümlerinde de mekanik özelliklerini ve kalitesini belirleyen ilk adımlardan birisidir.

Alüminyum alaşımların kalitesine en çok etki eden ise metalik olmayan kalıntılar olarak bilinen inklüzyonlar ve gazlardır. İyi bir döküm için sıvı metalden arındırılmış inklüzyonlar ve gazlar elde edilecek mamulün mekaniksel ve fiziksel özelliklerini etkiler. Döküm hatalarına sebep olan gazlar ve inklüzyonlar aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

Gazlar

Dökülen parça içinde gaz varlığı döküm hatalarını meydana getirmekle birlikte dökülen parçanın mekaniksel ve fiziksel özelliklerini özellikle süneklik ve yorulma özelliklerini etkilemektedir.

Ergimiş metalde bulunan önemli gazlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

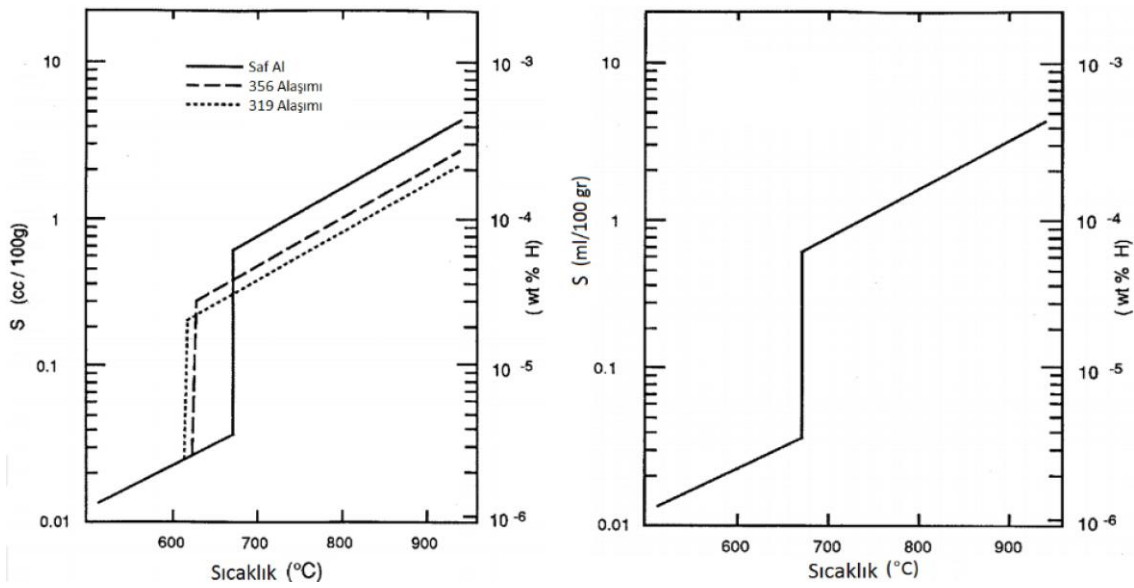
- (1) Tek atomlu gazlar (tepkimez gazlar) – Ar, He
- (2) İki atomlu gazlar (basit gazlar) – O₂, N₂, H₂
- (3) Karmaşık gazlar – CO, CO₂, H₂O, NH₃, SO₂, H₂S

Tek atomlu gazlar ergiyik içinde çözünmezler. İki atomlu gazlar çözünmeleri yüksek olup ergimiş alüminyum alaşımları hidrojen tarafından çözünürlüğü fazladır. Katı alüminyum alaşımlarında ise hidrojen çözünürlüğü düşüktür. Karmaşık gazlar döküm prosesi boyunca bileşenler ile kimyasal tepkimeye girmesi ile oluşmaktadır (Campbell 2003).

Hidrojen

Ergimiş alüminyum ve alaşımları içerisinde tek çözünen gazın hidrojen olduğundan sıvı alüminyum içerisindeki hidrojen gaz ölçümü ile sıvı metalin temizliği hakkında değerlendirme yapılmaktadır (San-Martin and Manchester 1992).

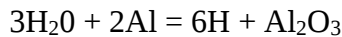
Hidrojen çözünürlüğü sıcaklıkla doğru orantılıdır. Şekil 2’ de sıcaklıkla birlikte hidrojen çözünürlüğü ve bazı alaşımların karşılaştırılması gösterilmiştir. Ergimiş alüminyum alaşımlarında soğuma ve katılaşma sıcaklığı düştükçe hidrojen çözünürlüğü azalır ve sıvı metaldeki hidrojen gaz formuna geçer böylelikle boşluklar oluşur. Bu gözeneklerin oluşmasını engellemek için sıvı metalin döküm aşamasına kadar gaz kontrolü yapılmalıdır.



Şekil 2. Sıcaklığa bağlı hidrojen çözünürlüğü ve saf alüminyum ile 356 ve 319 alaşımlarının hidrojen çözünürlüğü (Gruzleski and Closset 1990)

Sıvı Metalde hidrojen Girişi

Alüminyum alaşımlarının dökümünde alaşım elementleri ve miktarlarına göre hidrojen çözünürlüğü değişir. Alüminyum alaşımların oksijene olan afinitesinden dolayı hidrojenin temel kaynağı nemin indirgenmesidir.



Ergimiş alüminyumda çözünen hidrojen atomlarının çoğunun reaksiyona göre sıvı alüminyum yüzeyindeki su buharının ayrışmasından geldiği iyi bilinmektedir. Dökümde ergitilen malzemelerden (hurda, alaşımlar), kullanılan ekipmanlardan (pota, kalıp vb.) gelen nem ile havadaki nem alüminyuma nüfuz ederek hidrojen ayrışır. Ayrıca yüksek ergime sıcaklıkları, sıvı metal transferi de ortamdaki nem ile nüfuz ederek hidrojen ayrışır (Ren *et al.* 2014). Küçük atom yapısına sahip olan hidrojen sıvı metal içerisinde oldukça hızlı yayılır.

Böylelikle katılaşıma esnasında sıvı metal içerisinde hapsolmuş hidrojen atom sayısı oranında gözenekler oluşturur (Dispınar 2006).

İnklüzyonlar

Sıvı metal içerisinde inklüzyonlar dışsal ve içsel olarak iki şekilde karşımıza çıkmaktadır. Dışsal inklüzyonlar; aşınma ve fırın malzemelerinden kaynaklanan refrakter malzemeleri, silisyum oksit, alüminyum oksit, silisyum karbürün erozyon sonucu alüminyum alaşımda ayrı ayrı bulunmaları gibi durumlardan kaynaklanabilir.

İçsel inklüzyonlar ise sıvı metal hazırlama esnasında kimyasal olarak oluşmakla birlikte bilinçli olarak sıvı metali temizleme amaçlı atılan flaks ilavesiyle veya tane inceltme için katılan alaşımlar sebep olabilmektedir (Güler 2017).

Ergimiş alüminyum alaşımlarında bulunan bazı inklüzyonları, oksitler (Al_2O_3 , MgO), spineller ($MgO.Al_2O_3$, $SrO.Al_2O_3$), borürler (TiB_2 , VB_2 , ZrB_2), karbürler (Al_3C_4 , TiC), intermetalikler ($MnAl_3$, $FeAl_3$, $AlSiFeMn$ fazları), nitrürler (AlN), yüksek sıcaklıkta ergiyen kalıntılar olarak sıralayabiliriz. Tablo 5’ te bazı inklüzyonların sınıflandırılması ve potansiyel kaynakları hakkında kısaca bilgi verilmiştir (Kaufman and Rooy 2004).

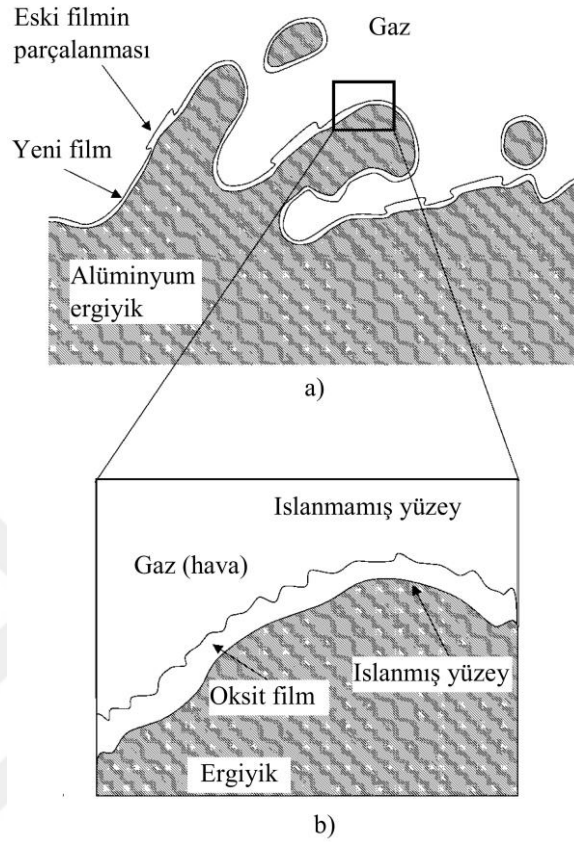
Tablo 5. Inklüzyonların sınıflandırılması, çeşitli bileşikler ve potansiyel kaynakları.

Sınıflandırma	Gözlemlenmiş türleri	Potansiyel kaynakları
Metalik olmayan dış kaynaklı	Çeşitli refrakter partikülleri, Al_4C_3 vb.	Refrakter degradasyonu, refrakter/metal reaksiyonları
Metalik olmayan	MgO, Al_2O_3 film ve kümeleri $MgAl_2O_4$ film ve kümeleri	ergitme, alaşımlama, metal transferi sırasında oluşan türbülans Flaks tuzlarının reaksiyonu sonucu zayıf ayrıştırma, klor gazıyla oluşan tuz, magnezyum ihtiva eden alaşımlar, filtre
Flaks tuzları	$MgCl_2, NaCl, CaCl_2$ vb.	

Oksit Filmi

En önemli inklüzyon sorunlarından birisi de yüksek sıcaklıklarda ergitilen alüminyum ve alaşımların oksijene karşı afinitesinin fazla olmasından ergimiş alüminyumun oksijenle reaksiyon sonucu yüzeyinde meydana gelen oksit film tabakalarıdır. Yüzeyde oluşan oksit tabakası sıvı metal ile atmosfer arasında koruyucu bir tabaka oluşturur. Yüzeydeki oksit tabakası sıvı metalin içine girdiği zaman sıvı metal temizlenmediğinde sıkıntı doğurur. Genel olarak alüminyum oksit filmi ergitme sırasında meydana gelmekle birlikte döküm esnasında da döküm prosesi gereği aktarılan sıvı metal yüzeyinde daha önceden oluşan oksit filmin parçalanarak tekrar oksit film oluşması olarak karşımıza çıkmaktadır. Oluşan bu oksit filmi;

Yeni oksit filmi olarak isimlendirilirken ergitme esnasında oluşan oksit filmine de eski oksit filmi denilir. şekil 3' te alüminyum alaşımında oluşan oksit filmleri gösterilmiştir (Divandari and Campbell 2004).



Şekil 3. a) Alüminyum alaşımının yüzeyindeki oksit film görüntüsü ve gerilmeler sonucu filmdeki olası yırtılma (ve aniden yeniden oluşum), b) Hava veya gaz ile ergiyiğın ara yüzeyinin karşılaştığı yüzey oksit filmin görünüşü (Yüksel)

Bu kirliliğı sıvı metalden temizlemek için çeşitli uygulamalar olmakla birlikte gerek çevresel gerekse üretici maliyetine olumlu yönde fayda sağlayan döner tip (rotary) gaz giderme metodunun sanayide yaygın olarak kullanıldığı görölmektedir.

Gözeneklilik

Gözeneklilik alüminyum alaşım dökümlerinde diğeri metal dökümlerde olduğu gibi en büyük kusurlardan biridir. Gözenekliliğın varlığı, dökümlerin mekanik özellikleri ve korozyon direnci için zararlı olabilir. Dökümlerdeki gözeneklilik, katılaşma sırasında gazın çözeltiden çökmesi veya sıvı metalin katılaşma ile ilişkili hacim büzölmesini telafi etmek için interdendritik bölgelerden beslenememesi nedeniyle oluşur. Bazı araştırmacılara göre bu iki parametreye ilave olarak oksitlerinde gözeneklilik çekirdeklenmesini tetiklediği yani gözenekliliğında bir çekirdekleşme adımları ile meydana geldiği ifade edilmektedir (Tiwari and Beech 1978).

Alüminyum dökümlerde gözenek oluşumunu en çok etkileyen ve kontrolü yapılabilen hidrojen gazı olarak karşımıza çıkmaktadır. Hidrojen, ergimiş alüminyumda önemli ölçüde çözünür olan tek gazdır. Bu nedenle ergimiş alüminyum alaşımındaki çözünmüş hidrojen seviyelerinin kontrolü, yüksek kaliteli dökümlerin üretimi için kritiktir. Hidrojen gözenekliliğini azaltmanın en etkili yolu gazın giderilmesidir. Günümüzde alüminyumun gazını almak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (Xu *et al.* 2004).

Bu bağlamda mekanik özellikleri etkileyen Al alaşımındaki safsızlıklar üç kategoriye ayrılabilir: Çözünmüş hidrojen, metalik olmayan oksit kapanımlar ve diğer bazı safsızlık elementleri (örn., Cl ve Fe). Hidrojen ve metalik olmayan oksit kapanımlar, alaşımın mikroyapıları ve özellikleri üzerinde büyük etkilere sahiptir. Ergiyeğin akışkanlığını yitirmesine ve alaşımda mikro gözeneklilik oluşumuna neden olabilirler. Metalde çatlak kaynağı ve sert noktaların oluşmasına bile yol açabilirler. Böylece işlenebilirlik, yüzey düzgünlüğü ve dökümün mekanik özellikleri, (özellikle tokluk ve yorulma direnci) daha da kötüleşecektir (Ni *et al.* 2003).

Bu nedenle Al ergiyeğinden hidrojen ve inklüzyonların saflığını arttırmak için uzaklaştırılması özellikle hidrojen içeriğini kontrol etmek, Al hurda dökümlerinin ve hurda parçalarının geri dönüşümü ve yeniden kullanımı üzerinde büyük öneme sahiptir.

Sıvı Metal Kalitesini Arttırmak İçin Kullanılan Yöntemler

Çalışmanın önceki kısımlarında alüminyum alaşımlarının sıvı metal kalitesine etki eden parametrelerinden kısaca bahsedilmiştir. Sağlıklı bir ürün eldesi için sıvı metal kalitesi döküm endüstrisinde çok önemlidir. Özellikle rekabet ortamı ve çevresel faktörlerde göz önünde bulundurulduğunda ikincil alüminyum kullanımın döküm endüstrisinde oldukça fazla yer aldığı bilinmektedir. Ayrıca ikincil alüminyum döküm kalitesine etki eden en önemli parametrelerden olan sıvı metal temizliğin olumsuz etkisi de bilinmektedir. Uygulanabilirliği ile birlikte çevre faktörü ve ekonomik girdilerde göz önünde bulundurulduğunda sıvı metal kalitesinin artırılması ile ilgili farklı yöntemler olmakla birlikte bu yöntemlerle ilgili araştırmalarda gelişen teknolojiyle birlikte paralel olarak artmaktadır.

Son yıllarda sıvı metali temizleme işlemi için çeşitli yaklaşımlar araştırılmış ve uygulanan metotlar içerisinde azot, argon gibi inert gaz kullanarak döner tip gaz giderme metodu ve bazı kimyasal tabletler (örneğin heksakloroetan (C_2Cl_6)) kullanılması gibi yöntemler karşımıza çıkmaktadır. Bu uygulamalardan özellikle kullanılan çeşitli kimyasal flaksların, alüminyum ergiyeğinin rafine edilmesinde çeşitli derecelerde etkili olduğu bilinmektedir. Ancak, kullanılan kimyasallardan özellikle klor kullanımından dolayı çevresel sorunların

oluştugu bilinmektedir. Bu nedenle temiz ve çevreye duyarlı bir gaz giderme için yeniden eritme gaz giderme, vakumlu gaz giderme, ultrasonik gaz giderme, spreyc gaz giderme, elektromanyetik alan altında yönlü katılaşma gibi ergimiş alüminyum alaşımlar için çeşitli gazdan arındırma gibi alternatif uygulamalar karşımıza çıkmaktadır.

Sıvı metal temizliğinde kullanılan uygulamalardan bazıları aşağıda verilmiştir:

Flakslar

Ergimiş metal kirliliğine sebep olan gaz halinde bulunan safsızlıklar veya inklüzyonları gidermek için kullanılan kimyasal bileşenler dışında reaktif veya inert gazlarda birer flaks olarak tanımlanmaktadır. Flakslama, içinde kimyasal bileşiklerin kullanıldığı ergimiş alüminyuma yönelik tüm katkı maddelerini zerk edilmesi için kullanılır. Bu bileşikler çoğunlukla inorganik olup parçalama, gazdan arındırma, temizleme ve alaşımlama gibi çeşitli işlevleri yerine getirebilirler (Utigard 1998).

Kullanım amaçlarına göre Flakslar çeşitleri; Örtü Flaksları, Rafinasyon Flaksları, Curuf Çekme (Drossing-off) Flakslar, Temizleme (Cleaning) Flaksları, Duvar Temizliği Flaksları, Alaşımlama/Tane Küçültme Flaksları, Gaz Giderme Flaksları olarak sıralanabilir.

Kullanım amaçlarına göre ana başlıklar altında sıraladığımız flaks çeşitleri için piyasada kullanılmakta olan 150' yi aşkın flaks karışımları bulunmaktadır. Yalnız sıvı metal temizliğinde değil ergitme sonrası da sıvı metal içinde sıvı alüminyumu oksitlenmesini önlemek amaçlı tedbirler alınmalı ve bütün parametreler göz önüne alınarak kullanılacak olan flaks ergitme prosesi kapsamında değerlendirilerek en uygun olanı kullanılmalıdır (Ertan *et al.* 2003).

Sanayide ekonomik ve uygulanabilirliği kolay olduğundan en çok kullanılan flakslar içerisinde bulunan flor ya da klor içeren karışımlardır. Bu flakslar arasında yer alan heksakloreten (C_2Cl_6) içeren tabletler en yaygın kullanılmaktadır. Heksakloreten sıvı metal içerisinde bozularak klorür oluşturur böylelikle $AlCl_3$ gaz kabarcıkları hidrojeni ergimiş metalin yüzeyine taşır. Ancak çevresel ve insan sağlığı açısından oluşan gazlar problem oluşturmaktadır.

Kullanılan flaksların çevreye ve insan sağlığına etkileri de göz önünde bulundurulunca her ne kadar kullanım kolaylığı olsa da flaksların yerine daha çevreci ve insan sağlığına olumsuz etkilerin ortadan kaldıran sıvı metal temizleme yöntemleri geliştirilmektedir.

Rotary (Döner) Gaz Giderme

Alüminyum dökümhaneleri için düşük maliyetle verimli çalışma sunan döner gaz gidericiler yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Azot ve argon gazı gibi maliyetçe oldukça ucuz

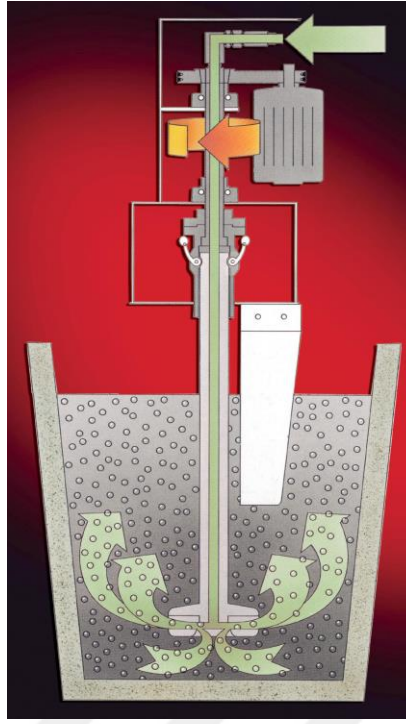
olan inert gazın, sıvı metale zerk edilerek hidrojen gazını ergimiş alüminyumdan boşaltılması sağlanır. Böylelikle çevreye ve insan sağlığına tehlikeli gaz giderme tabletleri kullanma ihtiyacını ortadan kaldırır.

Hidrojen gazı, ergimiş metal boyunca sanki kapalı bir alanda salınır gibi dağılarak ergiyik boyunca sabit basınç sağlayacaktır. Alüminyumun hidrojen gazının giderilmesi, hidrojen gazının ergiyikteki yüksek basınçlı bir alandan inert gazdaki düşük basınçlı bir alana geçmesi ilkesine dayanır.

Hidrojen gazının sıvı metalde hareket etme ve basıncını eşitleme yeteneği, neredeyse havadaki kadar hızlıdır. Bu nedenle her bir metal parçasını inert gazla temas ettirmek gereksizdir. Bir alüminyum ısısının ne kadar iyi ve ne kadar hızlı gazdan arındırılabilceği iki faktör tarafından belirlenir: Bunlar metal / gaz ara yüzü boyunca transfer hızı ve metale maruz kalan gazın yüzey alanıdır.

Döner gaz giderme, sıvı metale verilen inert bir gazın yüzey alanını artırma prensibine göre çalışır. Şekil 4’ te döner gaz giderme cihazının şematik resmi görülmektedir. İnert gaz kabarcıklarının yüzey alanı ne kadar büyükse, sıvı metalde gaz giderme o kadar hızlı ve başarılı gerçekleşecektir. Belirli bir gaz hacmi için kabarcıkların boyutu ne kadar küçükse, gazın toplam yüzey alanı o kadar büyük ve gazdan arındırma o kadar hızlı ve başarılı olmaktadır (Simulator and Holiday 2021).

Döner tip gaz giderme tekniği yanlış kullanılırsa, ergiyikte çok sayıda girdaplar oluşacak ve böylece atmosferdeki oksijen ergiyikle reaksiyona girecektir. Hidrojen içeriğinin azaltılabilmesine rağmen, mikroyapıda alüminyum ve alaşımın mekanik özelliklerine olumsuz etkide bulunan birçok gözenekler ve kapanım görünmeye devam edecektir (Ni *et al.* 2003).



Şekil 4. Döner gaz giderme cihazının şematik gösterimi (Foseco 2015)

Yeniden Ergitme(kontrollü karıştırma) Gaz Giderme Yöntemi

Bir başka gaz giderme yöntemi olan kontrollü katılaştırma metodu da sıvı metal temizleme yöntemleri olarak uygulanmaktadır. Bu işlem ile gözenekler çözünen ve yüzen olmak üzere iki adımla kontrol edilir. Ayrıca kontrollü katılaştırma ile ergiyik içerisinde bulunan inklüzyonları ve oksitleri tıpkı geleneksel gaz giderme sisteminde olduğu gibi önemli oranda uzaklaştırarak azaltmaktadır.

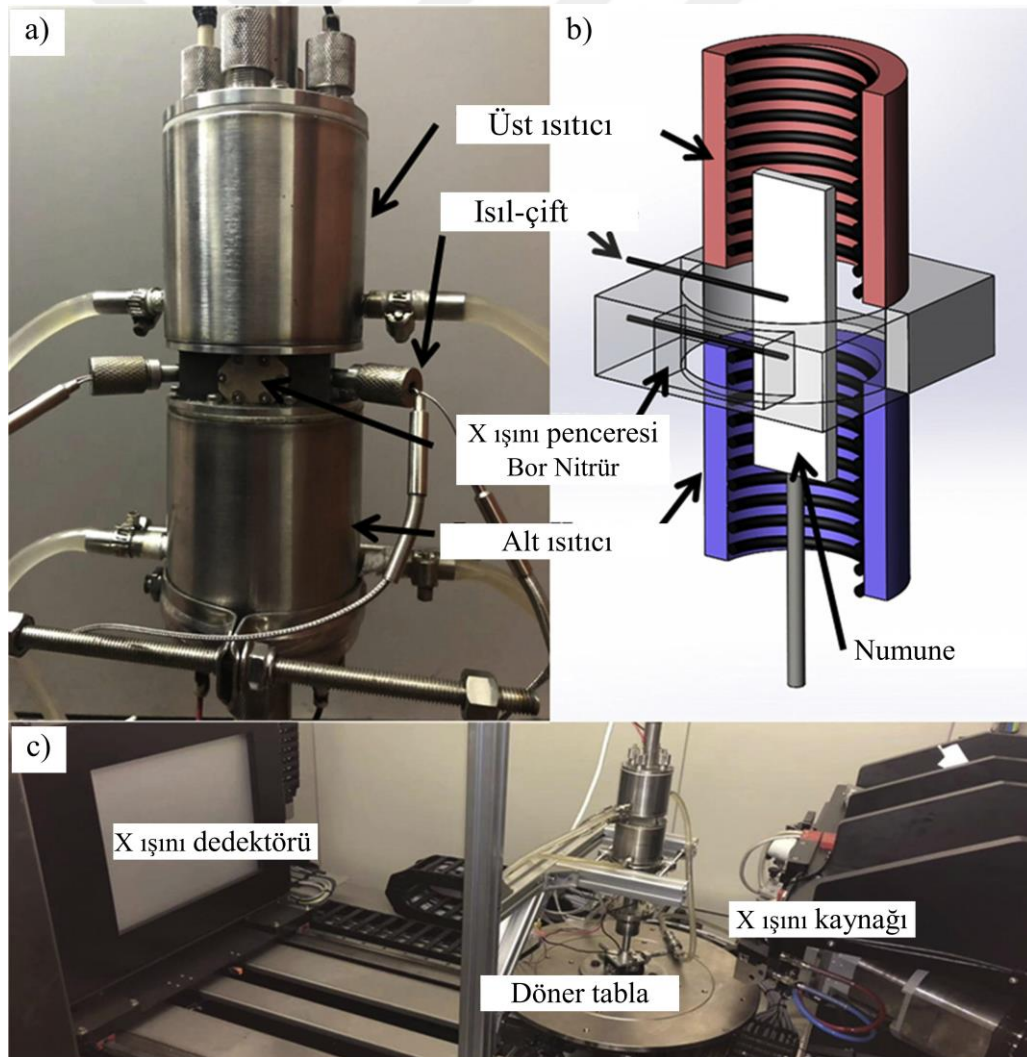
Deneysel çalışmalarda alüminyum dökümlerin yeniden ergitilmesi sırasında gözeneklilik davranışının yerinde gözlemi ise, gerçek zamanlı XIDS (X-ışını görüntüleme yönlü katılaştırma) aparatla gözlemlene imkânı veriyor. XIDS sistemi ile mikro odaklı X-ışını görüntüleme kaynağı, değiştirilmiş bir yönlü katılaştırma fırını ve bir CCD kamera ile bağlantılı bir görüntü yoğunlaştırıcıdan meydana gelmektedir (Dong *et al.* 2020).

Sistem; fırının altında ve üstünde bulunan bağımsız olarak kontrol edilen iki ısıtma bölgesi, X-ışınının nüfuz etmesine izin veren bir pencere olmak üzere üç bölümden oluşur. Sıcaklığı kontrol etmek ve ölçmek için termokuplar iki ısıtıcı arasındaki sıcaklık farkı, dikey bir sıcaklık gradyanı oluşturacak şekilde ayarlanır. Alt ısıtıcı, numunenin dikey olarak yukarı doğru katılaşması için daha düşük bir sıcaklığa ayarlanıp malzeme sistem içerisinde belirli bir hız, süre ve sıcaklıkla hareket ettirilir. Şekil 5’ te yeniden ergitme (kontrollü katılaştırma) sistemi gösterilmektedir. Yeniden eritme işlemi sırasında gözenekler çözünen ve yüzen olmak üzere iki olası mekanizma ile kontrol edilir (Lee and Hunt 2001).

Hidrojenin sıvı alüminyumdaki çözünürlüğünün sıcaklıkla arttığı iyi bilinmektedir. Gözeneklilikteki hidrojen molekülleri yeniden ergime sırasında termodinamik olarak kararsız hale gelir ve sıvı metale ayrılmak ve çözünmek ister.

Yeniden ergitme işleminin ayrıca ergiyik içerisindeki inklüzyonları etkili bir şekilde azaltmaktadır. Geleneksel gaz giderme işleminde, inert gazların temizlenmesi gibi yeniden ergitme işleminde de oksitler ve inklüzyonlar etkin bir şekilde uzaklaştırılır çünkü neredeyse tamamı katılaşmadan sonra gözenekliliğe bağlanmıştır.

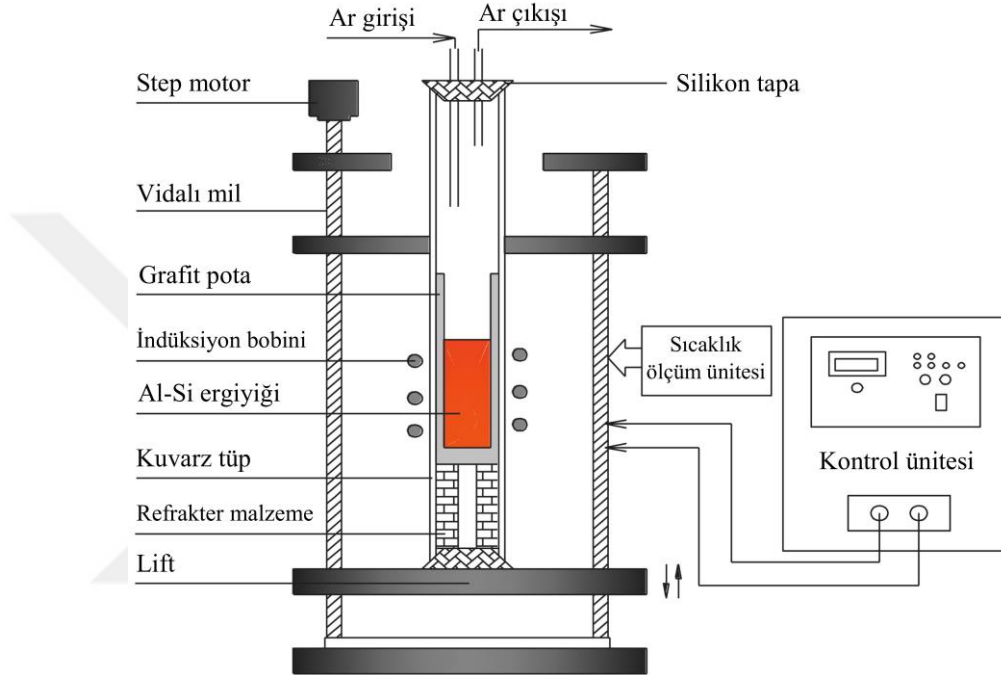
Campbell 'e göre, alüminyum dökümlerindeki her gözenek oksit partiküllerinden veya bifilmilerden çekirdeklenir ve büyür. Ergiğin yüzeyi, tüm yeniden ergitme işlemi boyunca durgundur ve bu nedenle, diğer gaz giderme işlemlerine oranla ergiye daha az oksit oluşur ve katılabilir. Bu yeni gaz giderme işlemi, katılaşma işlemi sırasında çökme gözenekliliğinden rahatsız olan tüm alaşımlar için verimlidir ve aynı zamanda alüminyum alaşımlarının geri dönüşüm endüstrisi için de değerlidir (Zhao *et al.* 2012).



Şekil 5. Yeniden ergitme (kontrollü katılaşırma) şeması (Dong *et al.* 2020)

Elektromanyetik Yönlü Gaz Giderme

Temiz ve çevreye duyarlı bir gaz giderme için yapılan çalışmalar arasında elektromanyetik alan altında yönlü katılaşma ile ergimiş alüminyumun gazdan arındırılması yöntemi de kendine yer bulmuştur. Bu çalışma yüksek kaliteli alüminyum alaşımlarının imalatı için optimum gaz giderme koşulları elde edildiğinde ve Havacılık dökümlerinde potansiyel uygulamaları olan gaz giderme için alternatif bir yöntem olarak gözükmemektedir (Ren *et al.* 2014).



Şekil 6. Elektromanyetik yönlü gaz giderme uygulamanın şematik gösterimi (Ren *et al.* 2014)

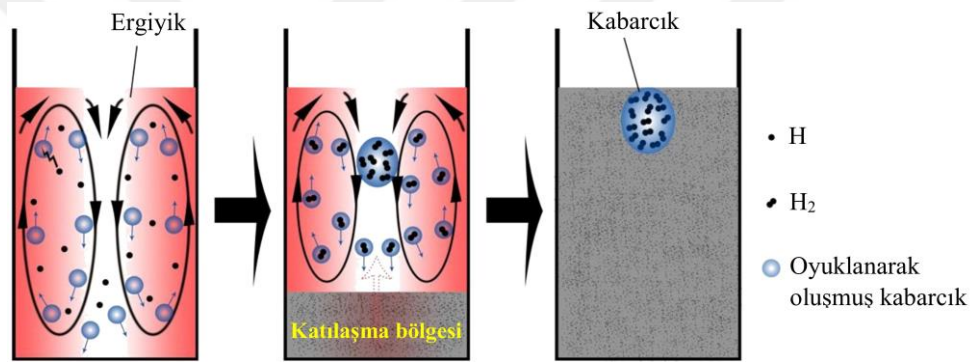
İndüksiyon içerisinde alüminyum alaşımının ergitilmesinden sonra sıvı metalin çekme sistemi ile aşağı çekilir ve çekmenin eşlik ettiği doğal soğuma nedeniyle aşağıdan yukarıya doğru sürekli katılaşır. Bu işlemler esnasında sıvı metalin oksitlenmesini önlemek için argon gazının kuvarz tüpünden Şekil 6’ da görüldüğü gibi sürekli üflenir. Daha sonra, sıvı metal aşağı çekmenin eşlik ettiği doğal soğuma nedeniyle aşağıdan yukarıya doğru sürekli katılaşması ile sistem gerçekleşmektedir.

Ergimiş alüminyumda gözenekliliğe sebep olan en büyük etkenlerden birinin hidrojen gazının olduğu bilinmektedir. Sıvı metalde en büyük hidrojen gazının oluşumu da sıvı alüminyum yüzeyindeki su buharının ayrışmasından meydana geldiği bu su buharının gerek proses içerisinde gerekse ortamdan kaynaklı olduğu bilinmektedir.

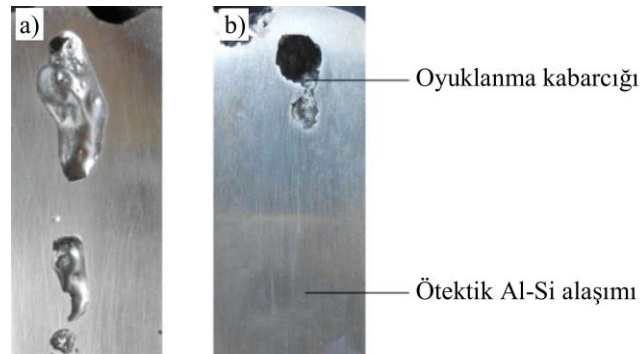
Elektromanyetik yönlü karıştırma, sıvı metale uygulanan manyetik alan ile sıvı metalde oluşan karışımla birlikte hidrojen atomları sıvı metal içerisinde salınır. Böylelikle düşük iç basınca sahip küçük kaviteasyon kabarcıkları meydana gelir. Meydana gelen kaviteasyon

balonunun dış ara yüzünden daha büyük olan dış hidrojen kısmı basıncı sayesinde, sıvı metalde ki hidrojen atomu bu kabarcıklarla sürekli ve kolay bir şekilde yayılır ve birbirleriyle etkileşime girer.

Daha sonra, yönlü katılaşma ile hidrojen gazı büyüyen katı tarafından sıvıya doğru artarak ilerler. Bu işlem esnasında sıvı metal içerisinde oluşan ve ergiyik akış hızının etkisi altında diğer kabarcıklarla bir araya gelerek gaz giderme hızını büyük oranda artıracaktır. Böylelikle büyük miktarda küçük kavite kabarcıkları bir araya gelir ve hacim genişler, son olarak katılaşma numunesinde daha fazla hidrojen konsantrasyonunu barındıran başlangıça göre daha büyük kabarcık boşluğu haline gelir. Ayrıca daha yavaş katılaşma ile zenginleştirilmiş kabarcık hacminin kademeli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 7' de sistemin gaz giderme mekanizması şematik olarak verilmiştir. Ayrıca Şekil 8' de sistemin yönlendirme ve yönlendirme olmadan oluşan yapı resmi gösterilmiştir (Ren *et al.* 2014).



Şekil 7. Sistemin gaz giderme mekanizması (Ren *et al.* 2014)



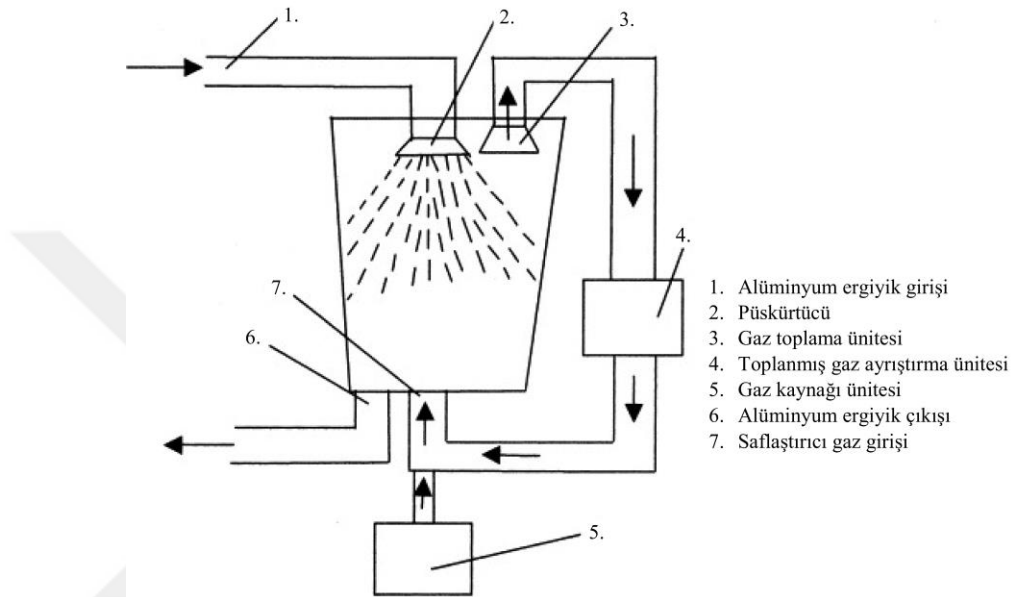
Şekil 8. Elektromanyetik karıştırma, (a) yönlendirme olmadan (b) yönlendirme ile oluşan yapı (Ren *et al.* 2014)

Sprey Gaz Giderme

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, son ürünlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilecek istenmeyen safsızlıkları gidermek için bir ön işleme tabi tutulmalıdır. Aslında bahsedilen safsızlık, metalin soğutulması ve katılaşması üzerine çözeltiden çıkan ve üründe istenmeyen gözeneklilik oluşturan çözünmüş hidrojendir. Sıvı

alüminyum kullanılmadan önce alüminyum ergiyikten hidrojen uzaklaştırılması sağlıklı bir ürün eldesi için vazgeçilmez bir görevdir.

Yeni bir hidrojen giderme yöntemi olan sprej yöntemi ile gaz kabarcıklarını döner pervaneli gazdan arındırma yönteminde olduğu gibi toplu ergiyik haline getirmek yerine, ergiyik küçük damlacıklar halinde atomize edilir ve çevre inert gaza püskürtülür. Sprej gazdan arındırma yönteminde, ergiyiğin yüzey/hacim oranı çok büyüktür. Atomize ergiyik damlacıklarındaki hidrojen, inert gaz tarafından kolayca emilebilir (Wu *et al.* 2005).



Şekil 9. Sprej gazdan arındırma yönteminin şematik çizimi (Wu *et al.* 2005)

Şekil 9' da verilen sistemin çalışma prensibi incelendiğinde; sıvı metal, bir girişten (1) bir püskürtücüye (2) getirilir. Püskürtücü sayesinde sıvı metal küçük ergiyik damlacıklar halinde çok küçük boyutlar haline getirilir ve bir işleme tankına püskürtülür. Bir gaz besleme sisteminden (5) gelen arındırıcı gaz, bir arındırıcı gaz girişi ile (7) işleme tankına verilir. Arındırıcı gaz yukarı doğru hareket ederken sıvı metal damlacıkları aşağı doğru hareket eder. Sıvı metal damlacıklar arındırıcı gazı ile temas ettiğinde, sıvı metal damlacıklar ile arındırıcı gaz arasındaki hidrojenin kısmi basınç farkı nedeniyle sıvı metal damlacıklarında bulunan hidrojen arındırıcı gaza yayılır. Temizleme gazı, temizleme tankının tepesine yükseldikten sonra, gaz geri kazanım ünitesine (3) çekilir. Böylelikle geri kazanım gazındaki hidrojenin geri kazanım gazı ayırma ünitesine (4) getirilir ve geri kazanılan gaz, arındırıcı gaz girişi (7) aracılığıyla yeniden kullanılabilir. Gazdan arındırılan sıvı metal ergiyik damlacıkları işleme tankının altında toplanır ve bir çıkış (6) yoluyla işleme tankından uzağa akar. Sıvı metal damlacıklarının katılaşmasını önleme amaçlı arıtma tankındaki arındırıcı gazın sıcaklığı yüksek tutulur (Wu *et al.* 2005).

Sprej gaz giderme yönteminin avantajları aşağıda verilmiştir (Wu *et al.* 2005):

- Arıtma tankı atmosferden izole edilmiştir ve tankın tamamı arındırıcı gazla doldurulmaktadır. Bu nedenle ergiyik atmosferden H_2O (H_2O ergiyik ile reaksiyona girer ve hidrojen atomları üretir) ve H_2 'yi emmez.
- Arıtma tankında, hem arındırıcı gaz hacmi hem de arındırıcı gaz ve ergiyik damlacıkları arasındaki ara yüzey alanı çok büyüktür. Buna göre, saflaştırma gazı, dinamik dengeye ulaşılmadan önce çok fazla hidrojeni barındırabilir. Ancak gazdan arındırma hızı da kinetik olarak uygundur.
- Ergiyik damlacıkları ve arındırıcı gaz zıt yönlerde hareket eder. Sonuç olarak, düşük hidrojen içerikli ergiyik damlacıkları, daha düşük hidrojen içerikli saflaştırma gazı ile temas edecektir. Buna göre, uygun bir kinetik koşul karşılanabilir.
- Arındırıcı gaz, büyük ölçüde geri dönüştürülebilir.

Ultrasonik Gaz Giderme

Alüminyum dökümlerdeki temel gaz gözenekleri kaynağı, ergimiş alüminyumda önemli çözünürlüğe sahip tek gaz olan hidrojendir. Katılma noktasında, çözünürlükte büyük bir düşüş meydana gelir. Bu da hidrojen çökmesine ve gaz gözeneklerinin gelişmesine yol açar. Bu nedenle ergimiş bir alaşımdaki hidrojen içeriği, özellikle yüksek mukavemetli döküm alaşımları ile uğraşırken mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır (Gruzleski and Closset 1990; Meidani and Hasan 2004).

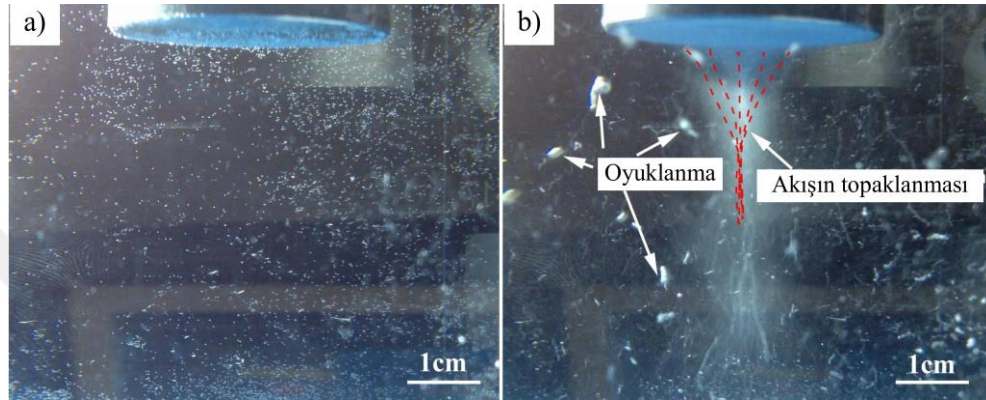
Alüminyum ergiyiklerinde hidrojen içeriğini azaltmak için genellikle çok sayıda yöntem kullanılır. Bunların tümü büyük miktarda cüruf üretmekte olup flakslarla yapılan temizleme metotları ile atmosfere tehlikeli gaz salınımı yaparak önemli bir çevresel etki oluşturur.

Yenilikçi uygulamalar arasına giren ve geliştirme çalışmalarında bulunulan ultrasonik gazdan arındırma metodunun en önemli avantajlarından birinin sıvı metal temizleme sırasında meydana gelen cüruf ve zehirli gazların önüne geçmesidir.

Bir sıvı metal yoğunluğu, yüksek ultrasonik titreşime maruz bırakıldığında titreşimlerin yüksek yoğunluğu sayesinde basıncın kavitasyon eşiği üzerine değişmesine ve böylelikle çok sayıda boşluk oluşturmaya sebep olur. Şekil 10' da ultrason sisteminin suda uygulanan testleri gösterilmektedir. Meydana gelen kavitasyon, hidrojenin sıvı metalde gelişen kabarcıklara difüzyonunu hızlandıran kütle transfer süreçlerini artırır. Akustik kavitasyon süreç boyunca bitişik kabarcıklar ile temasa geçerek birleşir ve sıvı içerisinde yüzeye ulaşacak yeterli boyutlara ulaşır (Xu *et al.* 2004).

Ultrasonik yöntem aynı zamanda tane incelemesini, tane boyutunun azaltılmasını, eş eksenli tanelerin oluşumunu fazların titreşimle incelmesini ve dağılımın artırılmasını, malzeme homojenliğini arttırılmasını, ikincil fazların ve inkülyasyonların uniform olarak dağılmasını sağlamaktadır (Meidani and Hasan 2004; Tiryakioğlu *et al.* 2004).

Bununla birlikte ultrasonik dalga, bir ergiyikte yol boyunca salınım enerjisini ve ses yoğunluğunu kaybeder. Bu kayıp önemliyse yoğunluk hızla kavitasyon eşiğine düşer ve kavitasyon durur, gaz giderme etkisi de azalır (Puga *et al.* 2009).



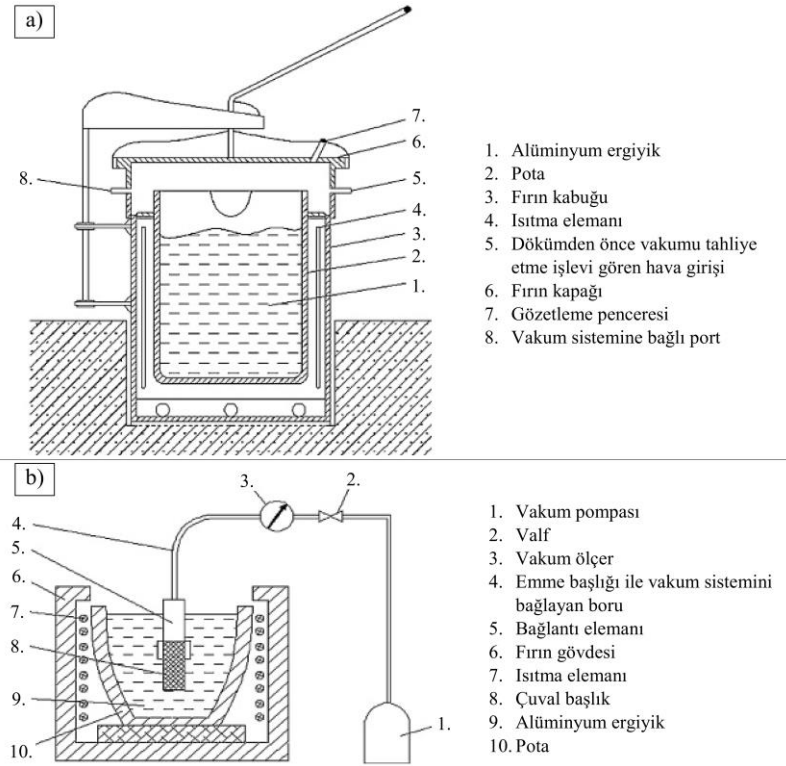
Şekil 10. Ultrason sisteminin suda uygulanan testleri. (a) Ultrason kapalı. (b) Ultrason açık (Liu *et al.* 2017)

Vakumlu gaz giderme

Bu işlemde içerisinde sıvı metal bulunan pota, üzeri kapalı bir boşluk bulunan hazneye yerleştirilir. Oluşturulan bu özel hazneyi vakumlamak, hidrojenin sıvı metalde serbest kalmasını sağlar. Bu uygulanan prosesin hidrojeni uzaklaştırmada çok etkili olduğu kanıtlanmıştır. Ancak düşük verimliliği ve vakumlama sırasında sıcaklık kaybı nedeniyle dökümhane üretiminde nadiren kullanılmaktadır. Bu sistem Şekil 11a' da şematik olarak gösterilmektedir.

Bu işlemde, gazdan arındırma hidrojenin dışarıya transferini engelleyen ergiyik yüzeyini kaplayan oksit filmi ile ergiyiğin ortasındaki ve altındaki hidrojenin yüzeye dağılması ve çıkmasının uzun zaman alması şeklinde iki faktörden olumsuz etkilenir.

Bu eksiklikler ise Şekil 11b' de gösterildiği gibi iç vakum emme ile giderilmiştir. İç vakum emme sıvı metalle reaksiyona girmeyecek gözenekli bir emme kafası sıvı metale daldırılır. Vakum işlemini başlatmak için valf açılır. Böylelikle gözenekli başlık içinde hidrojen kısmi basıncı sıfırda tutulur. Bu şekilde sıvı metal ve gözenekli başlık arasındaki ara yüzde hidrojen konsantrasyon gradyanı meydana getirilir (Zhao *et al.* 2012).



Şekil 11. a) Vakumlu, b) Ergiyikten hidrojeni emen gaz gidermenin şematik gösterimi (Zeng et al. 2012)

Sıvı Alüminyum Test Yöntemleri

Alüminyum döküm tesislerinin hedefleri yüksek kalitede mamulü rekabet ortamında uygun maliyetle üretmektir. Bu bağlamda dökümhanelerde önemli miktarlarda birincil alüminyum, ikincil alüminyum ve ana alaşımlar kullanılmaktadır. Döküm ürünlerin kalitesini etkileyen en büyük parametrelerden birisi de ergimiş metalin kalitesidir. Ergitme aşamasında oluşacak olan herhangi bir kusur, nihai mikroyapıya taşınacak ve kesinlikle döküm ürünlerinin kalitesini etkileyecektir. Bu nedenle döküm ürünlerin kalitesinin kontrolünün ergiyik kalitesinin kontrolü ile başladığı açıktır.

Sıvı metal temizliği, mevcut inklüzyonlar, çözünmüş hidrojen ve daha az oranda kalıntı elementlerin konsantrasyonunu ifade eder. Bu faktörlerde belirli bir eşik sınırı aşıldığında üründe istenmeyen mekanik ve fiziksel özellikleri ortaya çıkmaktadır. Sıvı metal temizliğinden kaynaklı bu tarz hataları bertaraf edebilmek için döküm aşamasına kadar sıvı metal kontrol edilir. Yerinde gerçekleştirilen ergiyik bileşimi ve kalitesinin hızlı analizi, döküm işlemlerinde büyük değer taşır. Sıvıdaki bu tür hızlı ölçümler, katı haldeki numunelerin analizini kolaylaştırır ve böylece üretkenliği artırır. Bu nedenle son yıllarda bu safsızlıkları ölçmek ve gidermek için çeşitli teknolojiler geliştirilmiştir. Alüminyum döküm tesislerinde yaygın ve kullanılabilecek test yöntemleri ile son yıllarda gelişerek uygulaması yapılan sıvı metal test yöntemleri Termal

Analiz Yöntemi, X- Işını Yöntemi, Tatur Test, Akışkanlık Testi, Ultrasonik Test, PoDFA, Prefil Footprinter ve Qualiflash Test, Elektriksel Direnç Test (LİMCA), Azaltılmış Basınç Testi (RPT), K-mold olarak sıralanabilir.

Termal Analiz Yöntemi

Bir metalin veya alaşımın katılaşma boyunca meydana gelen sıcaklık değişimi ile çeşitli fazların oluştuğu bilinmektedir. Katılaşma boyunca kaydedilen sıcaklık-zaman verileri ile alaşımın katılaşma süreci hakkında nicel bilgi veren grafikler elde edilir. Bu eğrilere soğutma eğrisi adı verilir ve tekniğe verilen genel ad termal analizdir. Bu yöntem sıvı alüminyum temizlik kontrolünde 1980' lerden buyana kullanılan bir testtir.

TA test numuneleri, silindirik (grafit seramik veya çelik) bir kabın ergiye daldırılarak veya ergiye pota ile test kabına dökülerek alınabilir. Test numunesinin katılaşması sırasında sıcaklığı ölçmek için test kapındaki ergiye bir veya iki K-tipi termokopl eleman yerleştirilir. Termokupllardan gelen çıktılar, sıcaklık - zaman verilerinin kaydedildiği ve daha sonra çeşitli şekillerde işlendiği veri kaydedici aracılığıyla bir bilgisayarsa aktarılır. Alüminyum döküm tesislerinde ağırlıklı olarak kullanım yeri ana alaşım ilavelerinin (tane inceltici ve modifiye edici) alüminyum ergiye olan verimliliği kontrol edilmektedir. Bunlardan başkade; tane boyutu, dendrit bağlantı noktası, ötektik silisyum modifikasyon seviyesi, ikincil ötektiğin düşük ergime sıcaklığı, demir içeren metaller arası çökeltme, magnezyum intermetaliklerin çökeltmesi, katı oranı ve diğer karakteristik sıcaklıklar hakkında da bilgi vermektedir (Barlow and Stefanescu 1998; Emadi *et al.* 2005).

X- Işını Yöntemi

X Işını yöntemi, X ışını radyografisi ve X ışını tomografisi olarak ikiye ayrılabilir.

X ışını radyografisi, döküm kalitesini belirlemek için tahribatsız bir ölçme tekniğidir. İnküzyon ve gözenekleri tespit etmenin yanı sıra iç çatlaklar, büzülme, birleşme kaynakları ve sıcak yırtıklar gibi diğer kusurları bulmak için X- ışını radyografisi kullanılmaktadır. Bir numunenin (veya tüm parçanın) radyografileri standartlaştırılmış görüntülere göre analiz edilir.

Temel çalışma prensibi, belirli katı fazların X-ışınlarını nasıl farklı şekilde emdiğiyle ilgilidir. Bir X-ışını maddenin içinden geçerken, malzemeye etkileşim biçimi malzemenin kırılma özelliklerine bağlıdır. Analiz edilen materyalde iki faz mevcutsa, görüntü kontrastına yol açan değişiklikten bir fark olacaktır.

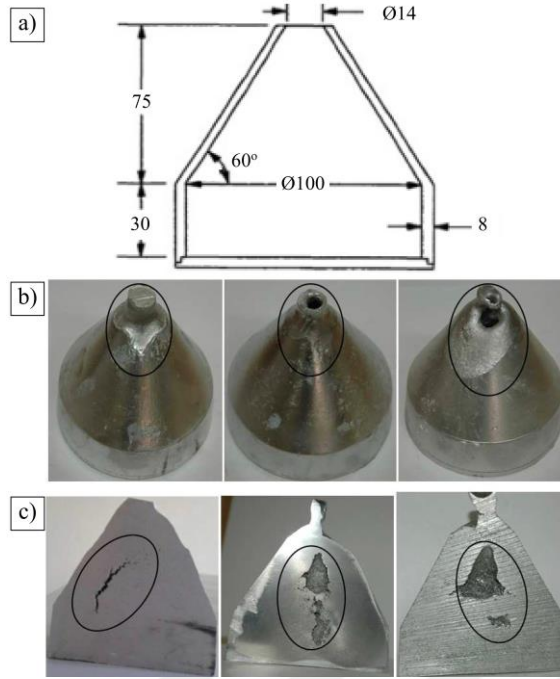
Dökümlerde morfoloji ve göreceli pozisyonun yanı sıra inküzyonların tespitine izin verse de üç boyutlu görüntüler üretme ve partikül kimyasını belirleme konusunda yetersiz

kalmaktadır. Döküm kalınlığıyla ilgili sınırlamalarda vardır. X ışınlarının metal içinden geçme yeteneği, kalınlığının bir fonksiyonudur. Yüksek enerjili X-ışını kaynakları kullanılmadıkça, kalın döküm bölümleri tam olarak sorgulanamaz (de Andrade Silva *et al.* 2010).

X-ışını tomografisi (XRT), X-ışınlarının daha gelişmiş bir kullanımıdır. İlk olarak tıbbi uygulamalar için kullanılan XRT ile mikroyapıların 3 boyutlu görselleştirilmesi, Pb içermeyen lehim bağlantıları, toz metalurji çelikleri ve metal matris kompozitler gibi diğer birçok metalurjik çalışmalarda kullanılmaktadır. Tek bir dönme eksenini etrafında çekilmiş radyografileri analiz ederek, kesitsel görüntüler bir 3D görüntü oluşturmak için derlenebilir. Bu enine kesiti ortadan kaldırır ve minimum örnek hazırlığı ile üstün çözünürlük ve görüntü kalitesi sağlar. Bu yöntem, 3D kompozit görüntüyü oluşturmak için yüksek enerjili, tek renkli X ışınları gerektirir. Numunenin kesilmesi ve parlatılması gerekmediğinden, analiz süresi kısaltılabilir. Uygun görüntüleme yazılımı ile inklüzyonların morfolojisi, boyut dağılımı, konumu ve hacim fraksiyonu numune içinde doğru bir şekilde belirlenebilir. Farklı fazlar farklı X-ışını soğurma katsayılarına sahip olacağından, inklüzyonların kimyası prensip olarak belirlenebilirken en önemli dezavantaj ise maliyetli olup daha çok laboratuvar tabanlı bir tespit yöntemidir (Lashkari *et al.* 2009).

Tatur test

Alüminyum alaşımlarında gözenekleri kontrol etmek için kullanılan bir tekniktir. Tatur testi, iki parça içeren üst tarafı delikli konik olan kalıcı sabit geometri kalıbı ile yapılır. Ölçüm sırasında ergiyik önceden ısıtılmış kalıp deliğinden dökülür ve besleme yapmadan katılaşmaya bırakılır. Sıvı-katı dönüşümü sırasında büzülme, üst kısmın konik tasarımı ve yükselticinin olmaması nedeniyle mikro ve makro gözeneklilik oluşumu artacaktır. Yoğunluk ölçümü ve su deplasmanı gibi basit teknikler kullanarak, mikro ve makro büzülme ve büzülme hacmini ölçmek mümkündür. Güvenilir sonuçlar çıkarmak için çok sayıda (yaklaşık 20) test yapmak ve bunları istatistiksel olarak değerlendirmek gerekir. Çok sayıda numune kontrolü bu tekniğin dökümhanelerde bir kalite kontrol aracı olarak kullanılmasını engellemektedir. Şekil 12' de Tatur test kalıbı ve numune görüntüleri verilmiştir (El Haj *et al.* ; Bsona and Sládek 2011).



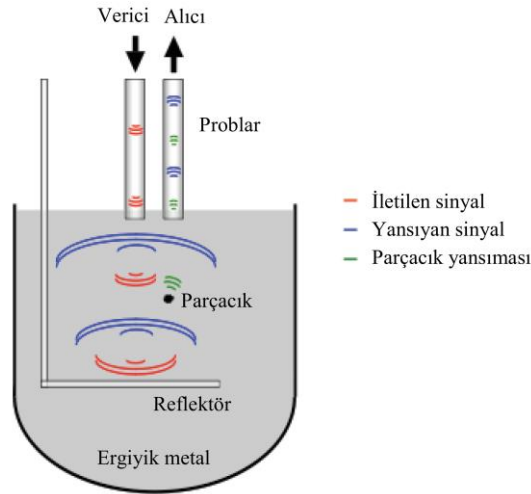
Şekil 12. a) Tatur kalıbının şematik gösterimi ve numune, b) dış, c) iç gözenekler (El Haj *et al.*)

Akışkanlık Testi

Akışkanlık testi için çeşitli test kalıpları bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılsalar bile çeşitli nedenlerden dolayı eleştirilmektedirler. Bunun en önemli nedeni, akışkanlık testinin tekrarlanabilirliğinin düşük olmasıdır. Metallerin akışkanlığı, metal değişkenler (kimyasal bileşim ve katılaşma aralığı), kalıp ve kalıp / metal değişkenleri (kaplama ve termal iletkenlik) ve test değişkenleri (süper ısı oksit içeriği) gibi birçok parametreden etkilenir. Bu nedenle çeşitli deneylerde tüm bu parametreleri kontrol altında tutmak zordur. Ölçümlerin tekrarlanabilirliğini artırmak için, yukarıda bahsedilen parametrelerin çoğunun deneyler sırasında kontrol edilmesi gerekmektedir (Balaban *et al.*).

Ultrasonik Test

Bu testin amacı, kantitatif karakterizasyonun yanı sıra yüzey altı ve tahribatsız yığın yapısal görselleştirme için akustik mikroskopi yöntemini uygulayarak tahribatsız olarak alüminyum dökümlerin metalürjik yapısını (tane yapısı, kapanımlar, gözeneklilik vb.) incelemektir. Ayrıca aynı mantıkla sıvı metal içerisindeki gazlar ve inküzyonlar hakkında da bilgi verir. Şekil 13’ te ultrasonik test sistemi prensibi gösterilmektedir.

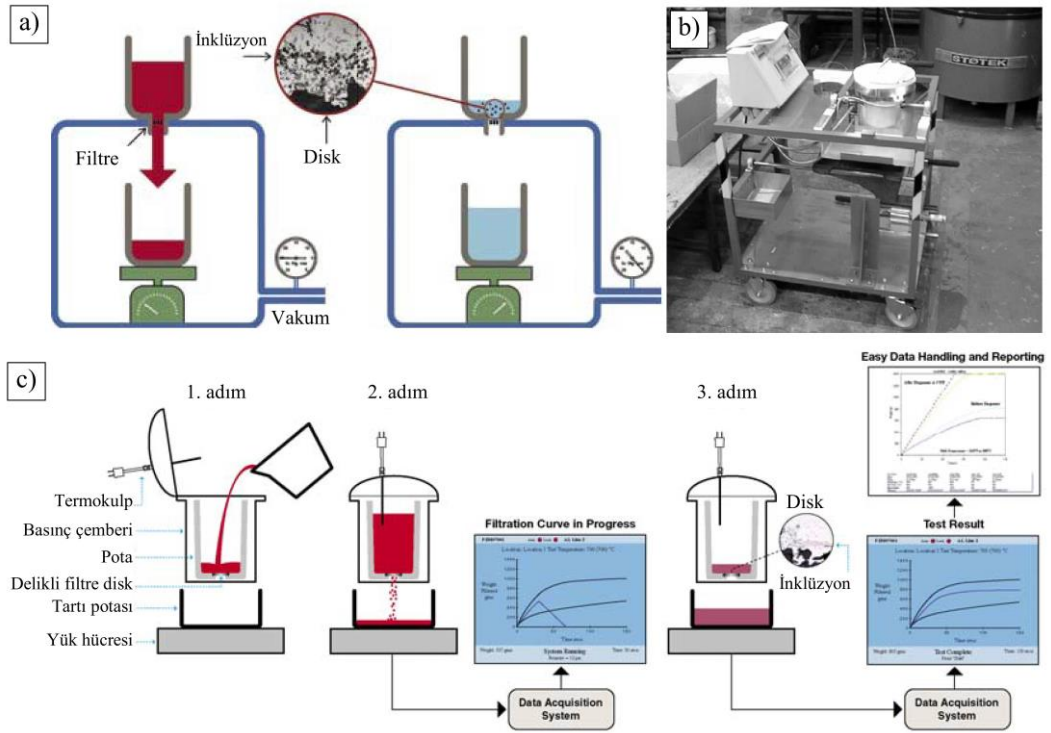


Şekil 13. Ultrasonik algılama prensibi (Gökelma *et al.* 2016)

Taramalı akustik mikroskopi (SAM) tekniğinde, yüzeye yakın ve toplu yapı incelemesi için ultrasonik darbeler kullanılır. Dönüştürücü tarafından üretilen tek bir darbe, kısmen geri yansiyarak numune yüzeyine doğru ilerlerken, geri kalanı iç yapı ile etkileşime girerek numune boyunca yayılır. Genel olarak dönüştürücü tarafından alınan/yansıyan sinyal, içyapıdan yansıyan ekoların takip ettiği yüzey yansımasına karşılık gelen bir tepe içerir. Bu ekolar, örneğin belirli bir alandaki ultrason hızına bağlı olan bir zaman gecikmesinden sonra bir dönüştürücüye ulaşır. Yansıyan ve iletilen dalgaların genlikleri, her tarama noktasında malzemenin akustik özelliklerini belirleyerek veri elde edilir (Maev *et al.* 2001).

PoDFA, Prefil Footprinter ve Qualiflash Test

Filtreleme sistemi ile çalışan metotlardır. Filtreden basınç altında zorlayarak sıvı alüminyum geçirilir ve inklüzyonlar filtre sayesinde yakalanır. Inklüzyonlar filtre yüzeyinde yoğunlaşır. Daha sonra metalografik olarak analiz edilen veriler endüstriyel olarak kabul edilmiş sonuçlar sunar. PoDFA, Prefil Footprinter ve Qualiflash test yöntemlerinin hepsi bu mantıkla çalışır. Şekil 14’ te PoDFA, Prefil Footprinter ve Qualiflash test cihazları gösterilmektedir (Stanica and Moldovan 2009).



Şekil 14. a) PoDFA yönteminin prensibi b) Qualiflash cihazı c) PREFIL-Footer printer çalışma prensibi (Karppinen 1997; Enright *et al.* 2003; Jaradeh and Carlberg 2011)

Şekil 14a’ da ergimiş numune bir vakum kullanarak küçük bir seramik filtreden geçirilir ve yaklaşık 1,5 kg sıvı metal filtre edildiğinde test durdurulur. Filtrede hapsolmuş inklüzyonlar metalografik inceleme ile tayin edilir.

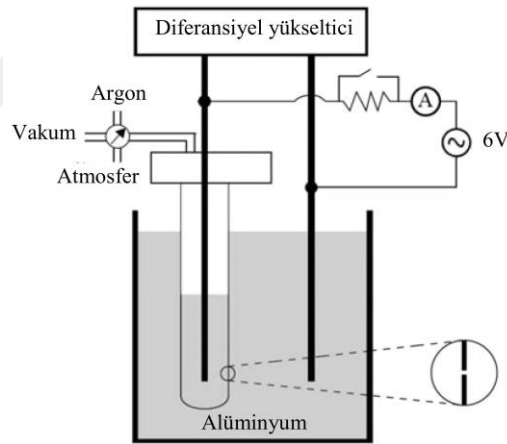
Şekil 14b’ de ergimiş alaşımdan bir numune, sabit sıcaklık ve basınçta ince gözenekli bir filtre diskinden önceden ısıtılmış bir potaya dökülür. Filtrelenen metal miktarı dijital bir terazi kullanılarak kaydedilir ve zamana göre filtrelenmiş ağırlık grafiği elde edilir. Ergiyikteki kalıntılar, test filtresinin yüzeyinde hızla birikerek filtreden geçen akış oranını düşürür. Akış hızı eğrisinin eğimi ve genel şekli, ergiyikte bulunan inklüzyonların seviyesini gösterir. Ergiyik ne kadar temiz olursa, filtreden o kadar hızlı akar ve ortaya çıkan eğrinin eğimi o kadar yüksek olur.

Şekil 14c’ de ortasında bir delik bulunan filtreleme bölümü plakasının altına, tabana yerleştirilmiş seramik filtre, sıcaklık kontrollü huni şeklinde bir kabuktan oluşur. On basamak içeren basamak benzeri bir külçe kalıbı doğrudan kabuğun altına yerleştirilir. Huni kabuğunun sıcaklığı 430°C civarında tutulur. Numune alınan metal, ısıtılmış huniye dökülür ve içinden geçen metal, altına yerleştirilen külçe kalıbına alınır. Ergiyik temizliğinin derecesi, kalıpta metalin kapladığı adımların sayılmasıyla belirlenir.

Elektriksel Direnç Test (LİMCA)

Doutre ve Guthrie tarafından 1970'lerde ve 1980'lerde yapılan çalışmada, ergimiş alüminyumun büyük bir DC (doğru akım) akımının varlığında küçük bir açıklıktan çekilmesine izin veren teknoloji geliştirilmiştir. Kapanımlar iletken olmadığından açıklıktaki dirençler parçacıklar geçerken artar. Alınan voltaj ölçümleri, inklüzyonların boyutuyla orantılı olduğundan ve çekilen sıvının miktarı ölçülebildiğinden, parçacıkların gerçek zamanlı hacimsel dağılımı ölçülebilir (Hudson and Apelian 2016).

LİMCA tekniği, Şekil 15' te gösterildiği gibi dirençli darbe prensibine dayanmaktadır. Ölçülecek parçacıklar (içinde bulundukları akışkanınkinden farklı bir elektrik iletkenliğine sahip olan), bir delikten elektriksel olarak yalıtıcı bir kaba çekilir. Delikten geçtiklerinde, eşit hacimde iletken sıvının yerini değiştirerek, deliğin elektrik direncinde geçici bir değişikliğe neden olurlar. Uygulanan sabit bir akımla bu direnç değişikliği bir voltaj darbesi olarak algılanır. Bu darbeler yükseltilir, sayılır ve genliklerine göre sınıflandırılır. Bu, her numune için parçacıkların sayısı (kilogram metal (k / kg başına binlerce kapanım olarak ifade edilir)) ve boyut dağılımı hakkında kesin bir bilgi sağlar (Dupuis and Dumont 2016).



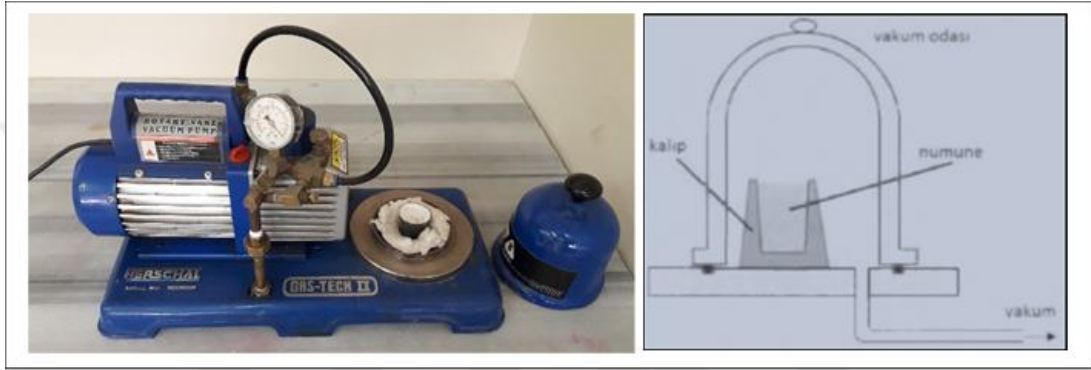
Şekil 15. LİMCA test cihazı şematik görünüm (Dupuis and Dumont 2016)

Azaltılmış Basınç Testi (RPT)

Azaltılmış basınç testinin basitliğinden, ucuzluğundan, kolay tekrarlama özelliğinden, çabuk sonuç vermesinden dolayı dökümhanelerde kullanımı oldukça yaygındır. Bu tekniğin ana prensibi, sıvı alüminyum, indirgenmiş basınç altında soğutulması sırasında gaz gözenekliliği oluşumuna dayanır. İki ince cidarlı çelik potaya az miktarda yaklaşık 200 g alüminyum ergiyiği dökülür. Bir pota atmosferik basınç altında katılaşmak için bırakılırken diğeri basıncın 80 mbar'a düşürüldüğü ve ergiyik tamamen katılaşana kadar sabit kaldığı bölme oturtulur. Katılaşmadan sonra numuneler kalıplardan çıkarılır veya yoğunluk ölçümü

ile ya da gözenekliliği gözlemek için bölümlere ayırarak değerlendirilir. Tüm sürecin tamamlanması için birkaç dakika yeterlidir (Djurđjevic *et al.* 2010).

Bu koşullar altında katılaştıran numunelerden en güzel verileri almak için numune ikiye bölünür ve kesilen yüzey gözeneklilik açısından incelenir. Diğer bir yaygın yöntem ise numunenin yoğunluğunu ölçmektir. Kesitli numunenin görsel değerlendirmesi, genellikle sonucu standart bir tabloyla karşılaştırılarak yapılır. Düşük gözenek sayısı, daha temiz bir ergiyik anlamına gelir. Bununla birlikte RPT ölçümleri, örnekleme türbülansı, hazne vakum basıncı titreşimi ve katılma oranı gibi birçok değişkene karşı oldukça hassastır. Şekil 16’ da RPT cihazı fotoğraf görüntüsü ve çalışma prensibi gösterilmektedir (Hudson and Apelian 2016).



Şekil 16. RPT cihazı görüntü ve çalışma sistemi (Yüksel 2020)

K-mold

K-kalıp yöntemi 1973 yılında Japonya'da Sanji Kitaoka tarafından Nippon Light Metal Ltd. şirketinde icat edilen bir kırılma testidir. Kırk yıldan fazla bir süredir bu yöntem, basit bir atölye ekipmanı olarak kullanılmıştır. Bu yöntemin amacı, üretim koşullarında alüminyum ergiyiğinin makro temizliğini değerlendirmektir. Bu yöntemin başlıca avantajları şunlardır; (i) hızlı değerlendirilmesi (yaklaşık 10 dakika), (ii) kolay kullanımı, (iii) kolay numune alınması (iv) taşınabilirliği, (v) inklüzyonlara ve oksit filme duyarlılığı ve (vi) düşük maliyetidir (Djurđjevic *et al.* 2010).

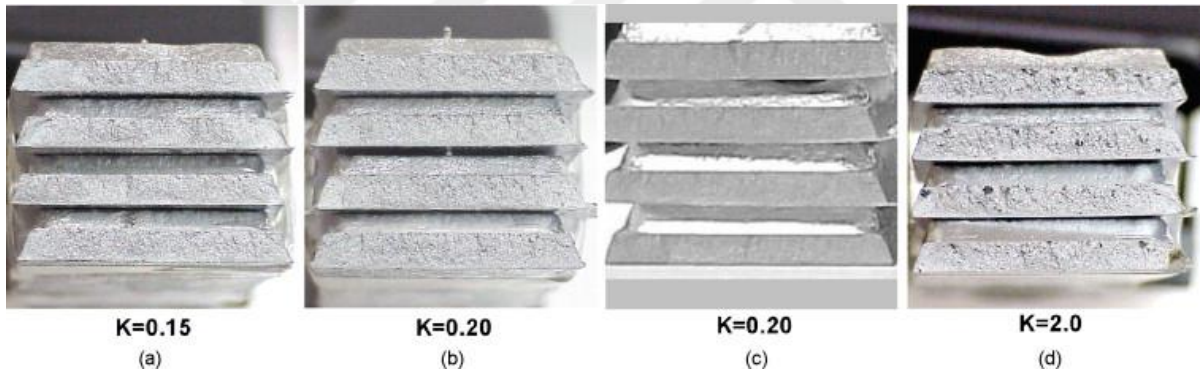
Yaklaşık 400 g ergiyik önceden ısıtılmış kalıba dökülür ve birkaç saniye sonra yassı çubuk (240x36x6mm) şeklindeki gibi test numuneleri elde edilir. Şekil 17’de K-mold ve numune resimleri gösterilmektedir. Test numunelerinin birkaç parçaya bölünmesi ve bir araya getirilmesi gerekir. Kırılma yüzeyleri görsel olarak veya düşük bir büyütme altında analiz edinilebilirken çeşitli görüntü tarama metotları ile gözeneklerin sayı ve boyutu hakkında bilgi verir. Numunenin hızlı katılması çok ince bir matris oluşturur ve bu nedenle kırık yüzeyinde inklüzyonlar açıkça tespit edilir (Hudson and Apelian 2016).



Şekil 17. K-mold test kalıbı ve numune görüntüsü (Furnace Efficiency Monitoring 2015)

Ergiğin temizliği K-kalıp değeri Eşitlik 1’ de görüldüğü gibi ifade edilir. Bu değer, ergiyik temizliğinin değerlendirilmesi için test parçalarının yüzeyinin görsel olarak incelenmesine ve yüzeydeki kapanımların sayısına dayanmaktadır. Eşitlikteki K; kırık yüzeyinde bir numunenin bir parçasında bulunan inklüzyonların sayısını, s; küçük probun n parçasında bulunan toplam kapanım sayısını, n; incelenen örnek sayısını ifade etmektedir.

$$K = \frac{s}{n} \quad (1)$$



Şekil 18. K-mold yüzeyleri, a) temiz hammadde, b) yolluk hurdaları, c) basınçlı dokum, d) birçok kere kullanılmış hurda (Wannasin *et al.* 2007)

Şekil 18’de resmedilen yüzeylerden elde edilen K-değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanmış ve a’dan d’ye doğru sıvı metal kalitesindeki düşüş K-değerinin artmasından anlaşılmaktadır. Buna göre:

- i. K-değeri < 0,5 olduğunda sıvı metalin temiz olduğunu gösterir.
- ii. 0,5 < K-değeri < 1,0 aralığında kabul edilebilir değerlerde ancak sıvı metalin proses edilerek temizlenmesi gerektiğini gösterir.
- iii. K-değeri > 1,0 üzerinde olduğunda mutlaka sıvı metalin temizlenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır (Balaban *et al.*).

Sıvı metal temizliği uygulaması ile sıvı metal kalitesine etkisi, ergiyik işlemlerinden önce ve sonra belirlenen K değerlerinin karşılaştırılması ile değerlendirilmekte ve K

değerlerindeki (ΔK) değişim yüzdesi aşağıda verilen Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada K_1 ; ergiyik muamelesinden önce belirlenen K -değeridir. K_2 ise; ergiyik muamelesinden sonra belirlenen K -değeridir (Gyarmati *et al.* 2019).

$$\Delta K = \frac{(K_2 - K_1)}{K_1} \times 100 \quad (2)$$



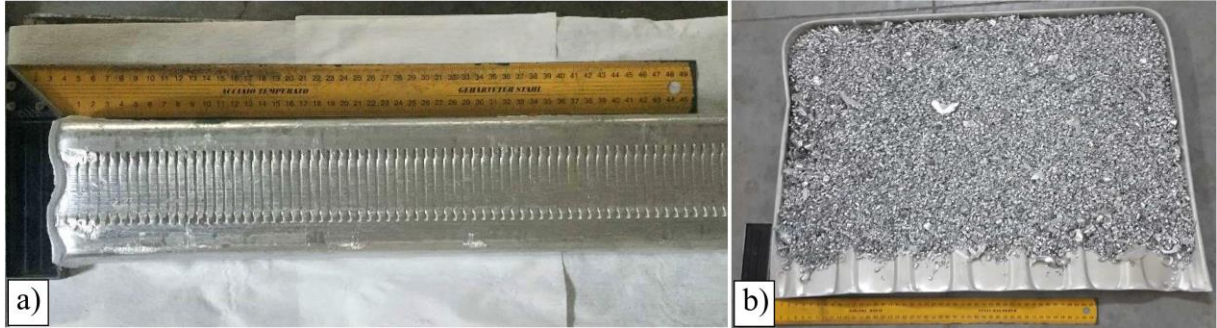
MATERYAL ve METOT

Materyal

Deneyleerde ETİ Alüminyum A.Ş.' den tedarik edilen alaşımlı külçeler ve CMS Jant ve Makine Sanayi A.Ş. firmasından tedarik edilen alüminyum alaşım hurda (talaş) kullanılmıştır. Deneyleerde piyasada bilinen ismi ile Etial 177 (ETİ Alüminyum A.Ş. isim kodu / E-177) alüminyumunu kullanılmıştır. Etial-177 alüminyum kimyasal bileşimi ve şarjda kullanılan alüminyum alaşım talaşların ise kimyasal bileşimi sınır değerleri Tablo 6' da verilmiştir. Şekil 19' da şarjda kullanılan külçe ve talaş (hurda) alüminyum resmi gösterilmektedir.

Tablo 6. Külçe Etial-177 alüminyumun ve ikincil alüminyumun (talaş) kimyasal bileşimi sınır değerleri

	Kimyasal Analiz							
	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti
Külçe ETİAL-177	0,20	6,60-7,40	0,02	0,03	0,30-0,45	0,04	0,02	-
Hurda / Talaş	0,07	7,28	-	-	0,227	-	0,004	0,11

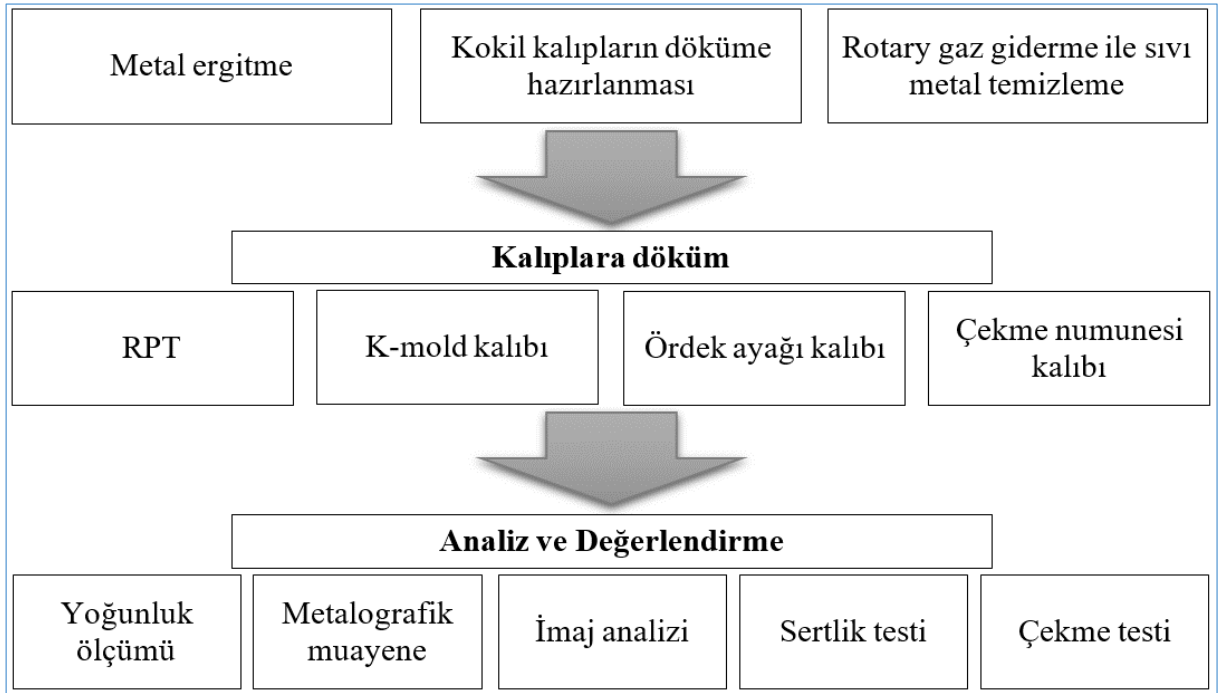


Şekil 19. Şarjda kullanılan a) külçe resmi, b) talaş resmi

Yöntem

Bu tez çalışması kapsamında ergitme ve sıvı metal temizleme olmak üzere iki yöntem kullanılmıştır. K-mold kalıbı ve azaltılmış basınç testi (RPT) ile sıvı metal temizlik miktarı tespit edilmiştir. RPT ile elde edilen numunelerden arşimet prensibine göre yoğunluk testi yapılmıştır. Alüminyum numunelerin mekanik özellikleri, çekme ve sertlik testine tabi tutularak belirlenmiştir. Metalografik çalışmalar ile mikro boyutta incelemeler gerçekleştirilmiştir. Yüzde çekinti miktarlarını belirlemek için ördek ayağı kalıbı ve imaj

analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemlerin ve yapılan diğer ara işlemlerin tez aşamasındaki uygulama sırası Şekil 20’ de verilmiştir.



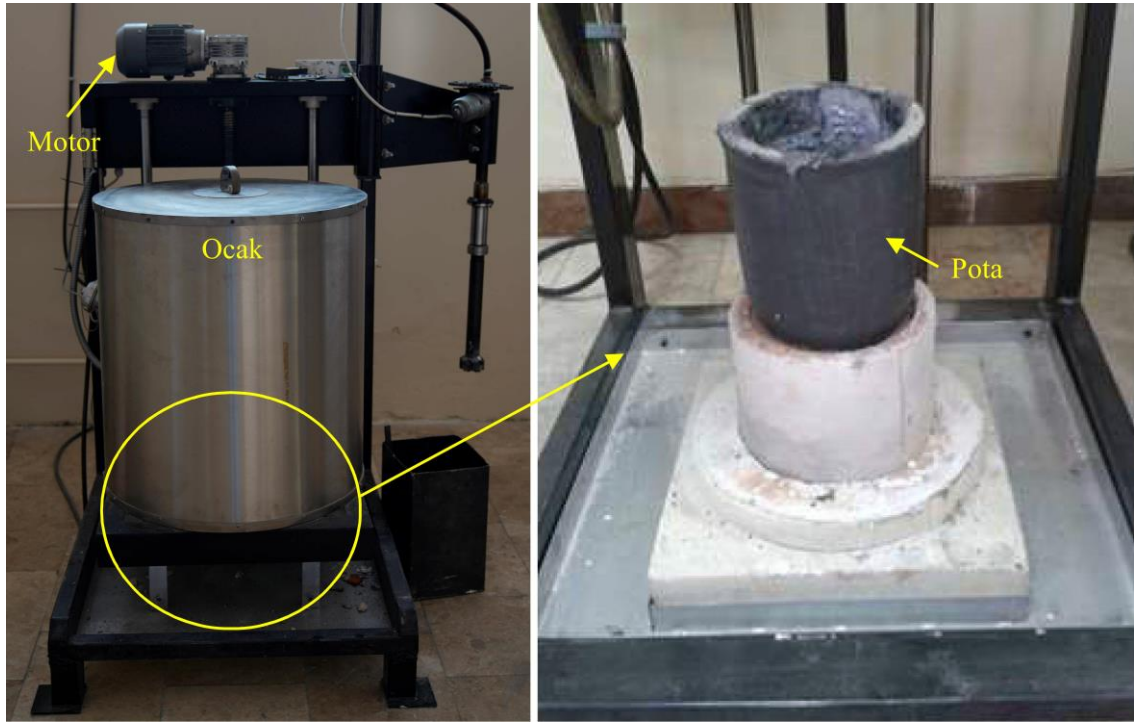
Şekil 20. Çalışma kapsamında yapılan işlemler ve sıralaması

Ergitme ve Kalıplama İşlemi

Ergitme işlemi, 8 kg sıvı alüminyum kapasitesine ve 10 kW gücüne sahip elektrik direnç ocağında ve SiC pota içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 21). Ergitme işleminde kısaca % 100 birincil A356 külçeye sırasıyla şarj ağırlığının % 5, % 10 ve % 15’i olacak şekilde ikincil (talaş hurdası) A356 alaşımı kullanılmıştır. Ergitme işlemi sırasında şarj malzemesinin ağırlığı sürekli 5000 g olacak şekilde hazırlanmıştır. Fırında şarj malzemesi dilimlenmiş külçelerin 730°C’ de ergitme işlemi gerçekleştirildikten sonra deney parametrelerinde belirtilen oranlarda talaş ilavesi yapılmıştır. Tablo 7’ de deney parametreleri belirtilmektedir. Talaş ilavesi etkisi ile sıvı metalde sıcaklık düşmesinden dolayı tekrar sıvı metal fırına konulmuş ve sıcaklığın döküm sıcaklığı olan 730°C olana kadar beklenmiştir. Sıvı metal sıcaklığı 730°C’ ye çıktığında fırından sıvı metal yüklü pota döküm işlemi için çıkartılmıştır.

Tablo 7. Deney parametreleri

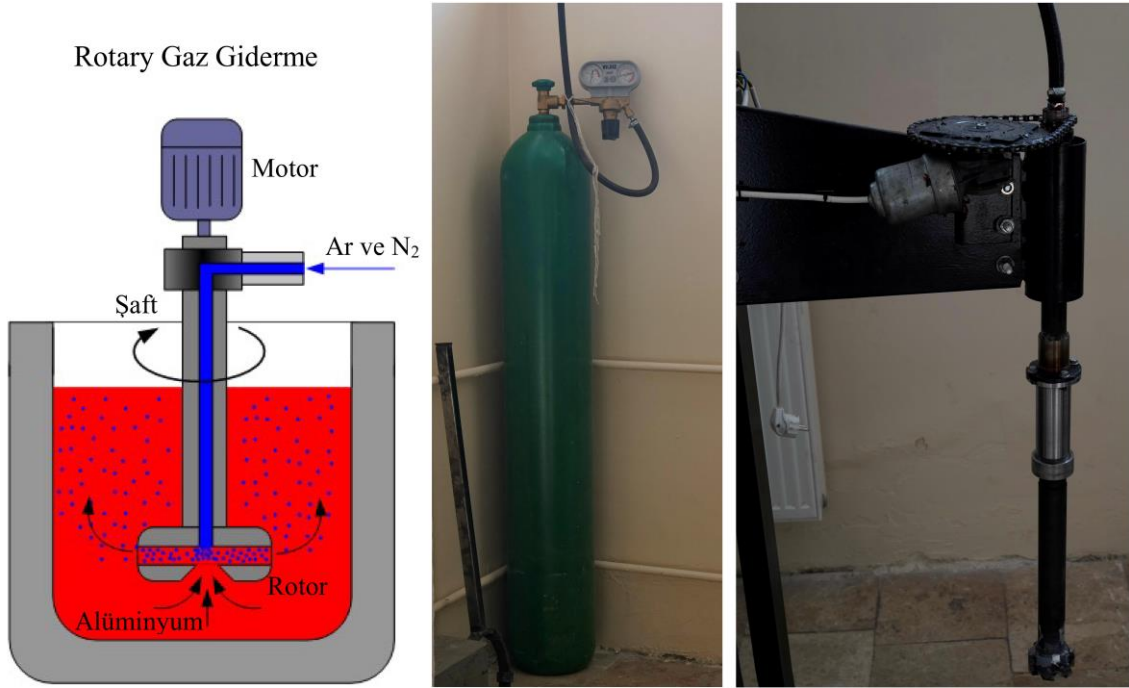
Alaşım	Döküm Sıcaklığı (°C)	Gaz Debisi (lt/dk)	Dönem devri (d/ dk)	Gaz giderme süresi (dk)	% Hurda
A356 (Etial 177)	730	5	300	5	5 10 15
A356 (Etial 177)	730	-	-	-	5 10 15

**Şekil 21.** Çan tipi ertitme ocağı (Elektrik Direnç Ocağı)

Sıvı Metal Temizliğı

Sıvı metalin temizlenmesi işleminde Şekil 22’ de resmedilen döner tip gaz giderme prosesi uygulanmıştır. Temizleme işleminde döner tip gaz giderme prosesi sıvı metalin içerisine daldırılan grafit lansın istenilen devirde dönerek oluşan girdapla birlikte sıvı metalin içerisine inert olan azot gazı zerk edilir. Lansın özel dizayn edilmiş başlık kısmıyla ve dönme etkisiyle oluşan girdap sayesinde azot gazı sıvı metalin her tarafına zerk edilir. Azot gazının da etkisiyle oluşan kabarcıkla birlikte sıvı metaldeki inklüzyonlar flotasyon mantığı ile sıvı metalin yüzeyine çıkartılmaktadır. Bu kabarcıkların oluşumu ile sıvı içerisindeki kirlilikleri taşıyıcı görevi gören çok sayıda kaynak oluşmaktadır. Gaz giderme süresinin artması ile bu kabarcıkların veriminin artacağı düşünülmektedir. Ancak belirli bir sürenin de yeterli olması durumunda ilave süre, enerji ve malzeme kayıplarının önüne geçilmesi için gaz giderme

süresinin saptanması ve optimize edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple literatürdeki araştırmalar baz alınarak yapılan ön denemeler sonucunda sıvı metal temizleme işlemlerinde gaz debisi ve çark hızı sabitlenmiş olup sırasıyla 5 lt/dk ve 300 rpm olarak uygulanmıştır.

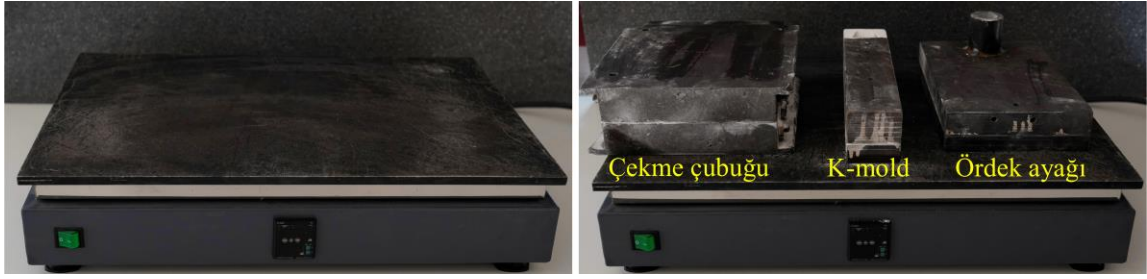


Şekil 22. Rotary gaz giderme ile sıvı metal temizleme yöntemi

Kalıpların Hazırlanması ve Sıvı Metalin Dökülmesi

Döküm sonrası kokil kalıplardan numunelerin kolaylıkla ve zarar görmeden çıkması istenmektedir. Aksi takdirde kalıptan çıkarılmak istenen döküm parçasına uygulanacak kuvvet hem kalıba hem de elde edilen döküm parçasına zarar vermektedir. Bu yüzden kalıp ömrünü ve elde edilen ürün kalitesini korumak için döküm öncesi kokil kalıplara kalıp ayırıcı bor nitrür uygulanmıştır.

Sıvı alüminyum metalinin katılaşmadan ve kalıba yapışmadan kalıbın şeklini alabilmesi için kalıplara ön ısıtma işlemi yapılması gerekir. Ayrıca kokil kalıp yüzeyindeki nemin atılması ve alüminyumun kalıp içerisinde yürüebilmesi için de bu işlem yapılmaktadır. Metal kalıpların ısıtma işlemi Şekil 23’ te görülen 40x60 cm ebatlarında ve 50°C ila 300°C ye kadar ısı kontrolü sağlayan Elektromag M 4060 marka ısıtıcı tabla (Hotplate) ile gerçekleştirilmiştir. Döküm öncesi kokil kalıplar ısıtıcı tabla ile 200°C olacak şekilde ısıtılıp döküme hazır hale getirilmiştir.



Şekil 23. Isıtıcı tabla ve kalıpların ısıtılması

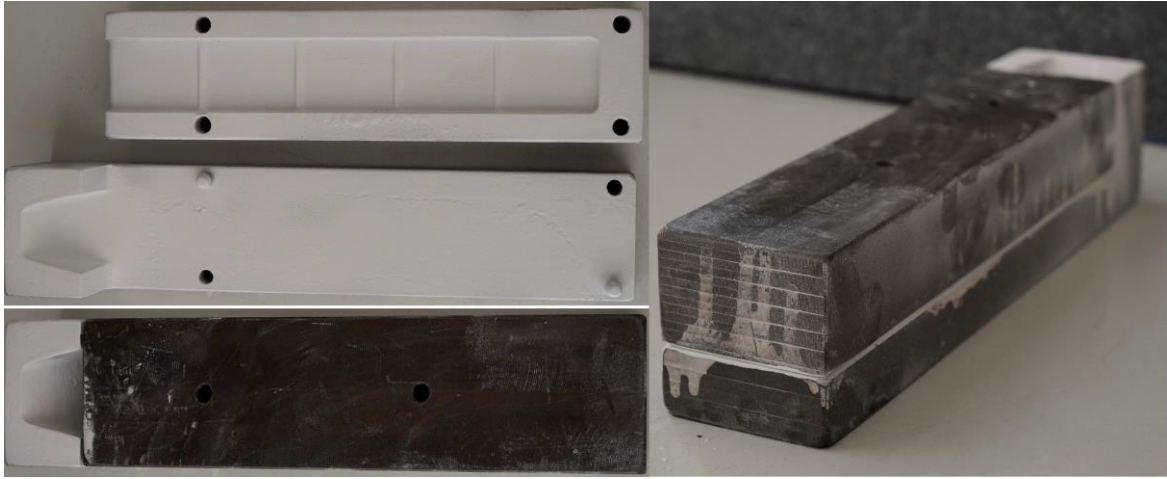
Deney dökümlerinde farklı oran şarj için temizleme öncesi ve sonrası dökümler yapılmıştır. Sıvı metal temizleme işlemi döner tip gaz giderme prosesi ile gerçekleştirilmiştir.

Kokil kalıplara dökümler, sıvı metal sıcaklığı 730°C ve kalıp sıcaklığı 200°C olarak Şekil 24’ te gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Kalıplar yeterli soğuma süresi sonrası içindeki numuneler çıkarılmıştır.



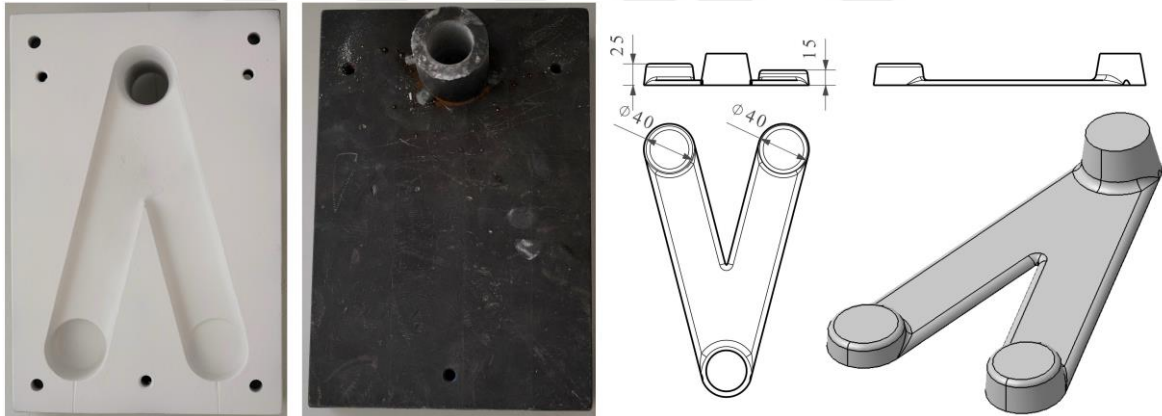
Şekil 24. Döküm işlemi

Şekil 25’ te gösterilen K-mold kalıbı kullanılarak sıvı metal temizlik miktarı tespit edilmiştir. K-mold test kalıbına yapılan deney dökümlerinde yaklaşık 400 g ergiyik dökülmüştür. K-mold kalıplarından 240x36x6mm boyutlarında dört eşit kesit kalınlığına sahip test numuneleri elde edilmiştir. Katılaşma tamamlandıktan sonra kesitler kırılarak yüzeylerdeki kirlilik (oksit kalıntısı) adetleri sayılmıştır.



Şekil 25. K- mold test kalıbı

Şekil 26’ da gösterilen farklı kesit kalınlıklara sahip % çekinti kalıbı kullanılarak sıvı metal kalitesi ile % çekinti arasında ilişki kurulmuştur. Dökümcülükte ortalama kesit kalınlığının yarısı olarak tecrübe ve pratiğe bağlı olarak kullanılan modül kavramı soğuma ya da katılaşma süresi hakkında bilgi vermektedir. Bu kalıp kullanılarak 15 mm ve 25 mm kesit kalınlığa sahip kalıp boşluklarındaki % çekinti miktarının katılaşma süresi ile ilişkisi de gözlemlenmiştir. Bu sayede katılaşma süresinin % çekinti üzerine olan etkisi de incelenmiştir.



Şekil 26. Ördek ayağı kalıp görüntüsü

Gözeneklere sebep olan gaz ve inklüzyonların katılaşma sırasında daha kolay büyümesine yardımcı olmak amacıyla sıvı metal indirgenmiş basınç altında Şekil 27’ de görülen test cihazının kabına yaklaşık 200 g sıvı metal dökülmüştür. Ergitilmiş alüminyum alaşımı temizleme öncesi ve sonrası olarak RPT test cihazında basıncı 80 mbar'a düşürülerek ergiyik tamamen katılaşana kadar bekletilmiştir. Katılaşmadan sonra numuneler kalıplardan çıkartılıp yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Ayrıca RPT numunelerindeki gözenekleri görmek için numune bölümlere ayrılarak incelenmiştir.



Şekil 27. Azaltılmış basınç testi (RPT) cihazı ve numunesi

Çekme testine maruz kalacak olan çekme çubuğu üretiminde sıvı metal temizleme öncesi ve sonrası olarak dökülmüştür. Çekme çubuğu kalıbı yanlarda besleyicileri ve uygun yolluk sistemi ile kalıp içerisinde sıvı metalin türbülansa uğramadan ve gaz basıncı oluşmadan kalıp boşluğu doldurulacak şekilde tasarlanmıştır.

Dökülen numuneler sıvı metal temizleme öncesi ve sonrası kokil çekme çubuğu kalıbından ikişer adet olmak üzere her % oran hurda ilaveli sıvı metalden toplamda dört adet numune elde edilmiştir. Şekil 28’ de çekme çubuğu kalıbı ve döküm numunesi görülmektedir.



Şekil 28. Çekme çubuğu test kalıbı

Yoğunluk Ölçümü

RPT cihazından elde edilen numunelerin yoğunluk ölçümleri arşimet (Archimede) prensibine göre gerçekleştirilmiştir. Bu prensibe göre her bir numunenin önce havada daha sonra sıcaklığı 20 °C ölçülen ve yoğunluğu $d_s=0,99821 \text{ g/cm}^3$ olarak alınan saf suda ağırlıkları tartılmıştır. Tartım işlemi Şekil 29’ da gösterilen 0,02 g hassasiyete sahip elektronik teraziye kurulan arşimet düzeneği ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 29. Yoğunluk ölçüm test cihazı

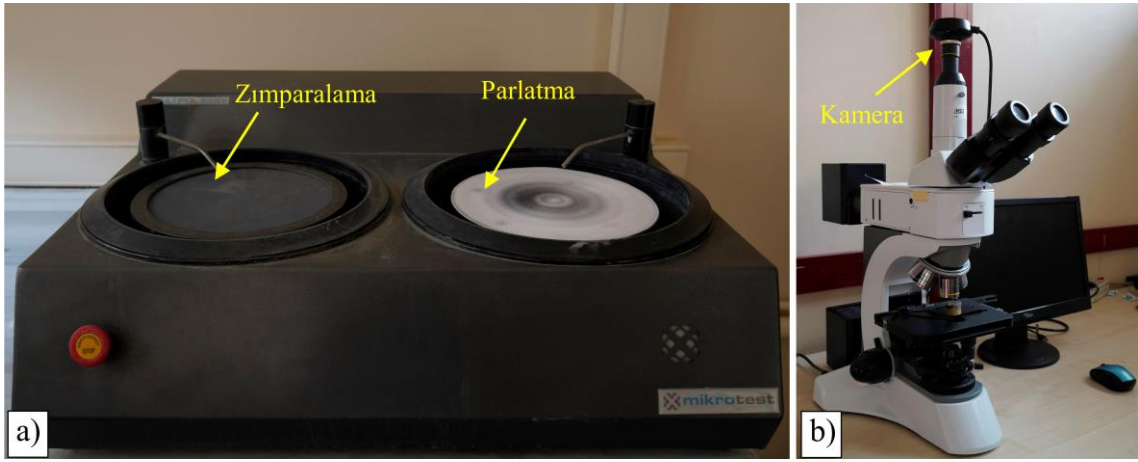
Elde edilen veriler Eşitlik 3'teki formüle göre hesaplanmıştır. Burada d_n döküm numunenin yoğunluğu, m_h numunenin havadaki ağırlığı, m_s numunenin saf sudaki ağırlığı, d_s oda sıcaklığında suyun yoğunluğunu ifade etmektedir. Numunelere ait % gözenek değerleri ise Eşitlik 4'de verilen formülle tespit edilmiştir.

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

$$\% \text{ Gözenek} = [(Teorik \text{ yoğ.} - Deneysel \text{ yoğ.}) / Teorik \text{ yoğ.}] \times 100 \quad (4)$$

Metalografik Muayene

Sıvı metal temizleme yönteminin mikroyapıya olan etkilerini incelemek için deney dökümlerinden her hurda oranlarında temizleme öncesi ve sonrası numuneler alınmıştır. Bu numunelere 180, 400, 800, 1200 ve 2500 numaralı zımpara ile sırasıyla zımparalama işlemi yapılmıştır. Ardından 3µm, 1µm alümina süspansiyonu ve son olarak 0,05 µm'lik kolodial silika ile parlatılmıştır. Daha sonra numuneler Keller çözeltisi (95 ml saf su, 2,5 ml HNO₃, 1,5 ml HCl, 1,0 ml HF) ile dağlanarak NMM-800/820 serisi metalürjik optik mikroskopta mikroyapı incelemelerine tabi tutulmuştur. Hazırlanan döküm numunelerin mikro fotoğraf çekimleri de mikroskoba bağlı çalışan Clemex dijital kamera ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 30'da metalografik muayenede kullanılan zımparalama ve parlatma cihazı ve kameralı mikroskop verilmiştir.



Şekil 30. a) Zımparalama ve parlatma cihazı ve b) metalografik mikroskop

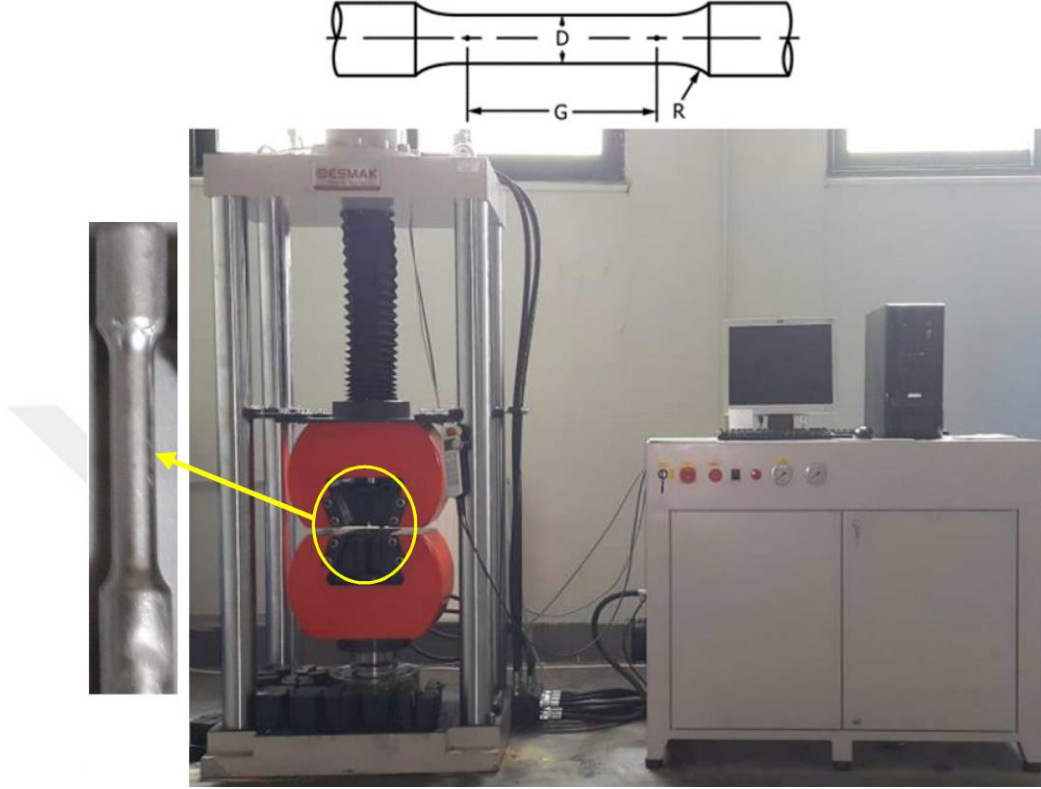
Çekme ve Sertlik Testi

Deney dökümlerinden elde edilen numunelerin mekaniksel özelliklerin önemli bir parametresi olan sertlik ölçümünü Rockwell sertlik ölçümleri, oda sıcaklığında Şekil 31’ de görülen BMS makine DIGIROCK-RBOV marka cihazda gerçekleştirilmiştir. Ölçümde HRB test metodu 1,6 mm çaplı bilye ile 10 kgf ön yük ve 100 kgf toplam yük altında her bir numuneden en az 5’er adet alınan sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Şekil 31’ de sertlik test cihazı gösterilmektedir.



Şekil 31. Sertlik ölçüm test cihazı

Elde edilen numunelerin çekme testi Şekil 32’ de gösterilen formda hazırlanarak ASTM B557-15 standardına göre 25 mm/dk’lık çekme hızı altında 2000 kN’luk Şekil 32’ de gösterilen BESMAK marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Çekme testiyle akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri tespit edilmiştir.



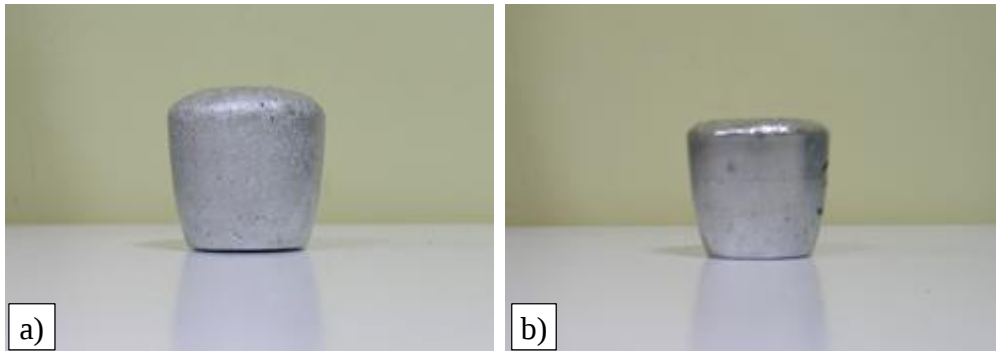
Şekil 32. Çekme testi cihazı ve çekme numunesi

ARAŞTIRMA BULGULAR VE TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde yapılan deney dökümlerinde elde edilen sonuçlar verilmiştir. Deney dökümlerinde gerçekleştirilen farklı hurda oranları ile dökümlerde sıvı metal temizleme öncesi ve sonrası alınan RPT test numunelerinde sıvı metal kalitesi değerlendirilmiştir. K- mold test kalıbına dökülen numunelerden sıvı metal içerisinde bulunan inklüzyonlar ve gözenekler değerlendirilmiştir. Ördek ayağı kalıbına dökülen numunelerden üzerine sıvı metal kalitesinin % çekintiye olan etkisi değerlendirilmiştir. Çekme çubuğu kalıbından alınan çekme çubuğu numuneleri ile mekanik özellikler değerlendirilmiştir. Numunelerden alınan parçalarla metalografik çalışmalar sonucunda mikroyapı görüntüleri incelenmiştir. Ayrıca numunelerden alınan parçalarla sertlik testi yapılmıştır.

Sıvı Metalin Temizlik Kontrol RPT Sonuçları

Döküm kalitesine etkileyen en önemli parametrelerden biri de şüphesiz gözeneklilik ve inklüzyonlardır. Tez çalışmasında da bu hataları yok etmek veya en aza indirebilmek için döner tip gaz giderme sistemi ile sıvı metal kalitesini arttırıcı işlemler uygulanmıştır. Gözenekliliğe sebep olan gaz ve inklüzyonların katılaşma sırasında daha kolay büyümesine yardımcı olmak amacıyla sıvı metal indirgenmiş basınç altında katılaştırılmıştır. Bu işlem için RPT test cihazından numuneleri elde edilerek ergimiş metal kalitesi kontrol edilmiştir. Şekil 33' te deneylerden elde edilen temizleme öncesi ve sonrası RPT numunelerinden birer örnek gösterilmektedir.

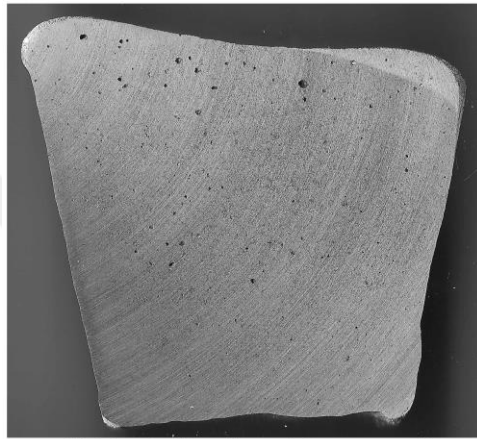


Şekil 33. RPT test numunesi görüntü resimleri; a) gaz giderme işlemi öncesi, b) gaz giderme işlemi sonrası

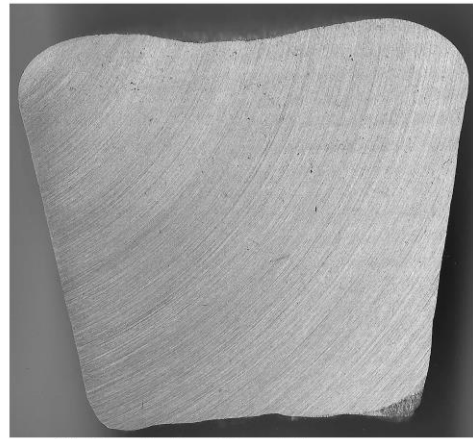
Şekil 33a' da numune görüntüsünde sıvı metal temizleme öncesi uygulanan RPT testinde vakum altına numunenin katılaşması sürecinde sıvı metal içerisindeki gözeneklerin etkisiyle hacimsel genişmeden dolayı dışı doğru kabarık bir görüntü elde edilmiştir. Şekil 33b' de sıvı metal temizleme işlemi yapılmış RPT numunesinin görüntüsü verilmiştir. Sıvı metale

uygulanan temizleme işlemi sayesinde indirgenmiş basınç altında katılaşma ile numunenin üst tarafında içe doğru çöküntü olduğu görülmektedir.

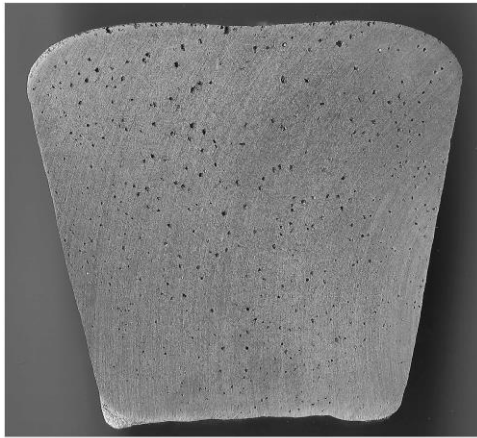
Hurda oranlarına göre her dökümden önce sıvı metal döner tip gaz giderme sistemi ile sıvı metal içine azot gazı zerk edilerek temizleme gerçekleştirilmiştir. Tablo 7’ de deney döküm parametrelerine göre sıvı metal temizleme öncesi ve sonrası RPT numunelerin kesitleri görülmektedir. Her ne kadar hurda oranların az olmasından kaynaklı gözenek azlığı olsa da sıvı metal temizleme işlemi ile RPT numunelerinde gaza dayalı gözeneklerin azaldığı tespit edilmiştir.



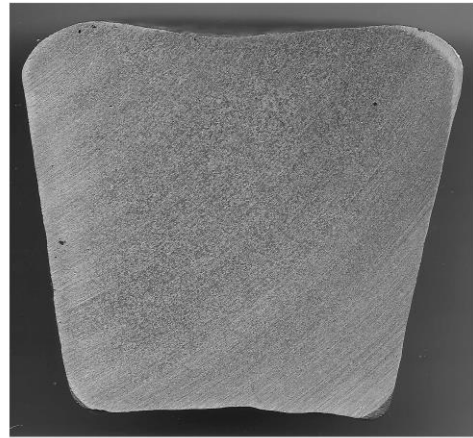
% 5 hurda ilaveli temizleme öncesi



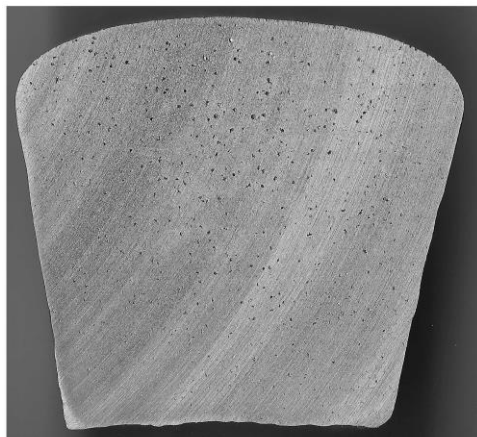
% 5 hurda ilaveli temizleme sonrası



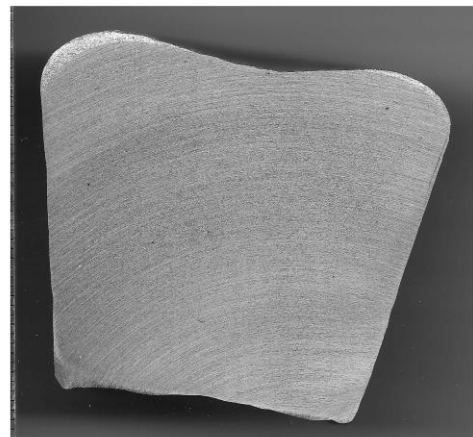
% 10 hurda ilaveli temizleme öncesi



% 10 hurda ilaveli temizleme sonrası



% 15 hurda ilaveli temizleme öncesi



% 15 hurda ilaveli temizleme sonrası

Şekil 34. RPT numunelerin kesitleri

Yoğunluk Testi Sonuçları

Deneylerde dökülen numunelerin yoğunluk ölçümleri materyal ve metot kısmında anlatıldığı gibi Arşimet prensibine göre uygulanmıştır. Tablo 8’ de deney numunelerinden elde edilen gözenek ve yoğunluk verileri gösterilmektedir.

Tablo 8. RPT numunelerden elde edilen gözenek ve yoğunluk verileri

Döküm Yöntemi	Numune Adı	Havada Ağırlık (g)	Suda Ağırlık (g)	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Hesaplanan Gözenek %
Kokil Kalıp	%5 Hurda Temizleme Öncesi	110,32	68.71	2.6520	2.69	1.48
Kokil Kalıp	%5 Hurda Temizleme Sonrası	109,92	68.84	2.6757	2.69	0.74
Kokil Kalıp	%10 Hurda Temizleme Öncesi	117,97	73,33	2.6427	2.69	1.85
Kokil Kalıp	%10 Hurda Temizleme Sonrası	133,55	83,59	2.6731	2.69	0.74
Kokil Kalıp	%15 Hurda Temizleme Öncesi	118.59	73.38	2.6230	2.69	2.60
Kokil Kalıp	%15 Hurda Temizleme Sonrası	120,78	75,53	2.6691	2.69	0.78

Tablo 8’ de verilen yoğunluk ölçüm sonuçları incelendiğinde elde edilen deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluğa bağlı gözenek değerleri görülmektedir. Sonuçlarda aynı hurda oranları ilavesi ile yapılan dökümlerde temizleme işleminin oluşan gözenek miktarını azalttığı anlaşılmaktadır. Temizleme sonrası hurda miktarından bağımsız olarak tüm numunelerdeki yoğunluk miktarında artış ve gözeneklilikte azalma görülmektedir. Bu durum temizleme işleminin etkinliği ve uygun olduğunu göstermektedir. Hurda miktarı arttıkça gözeneklilik miktarının da arttığı yoğunluk sonuçlarından anlaşılmaktadır.

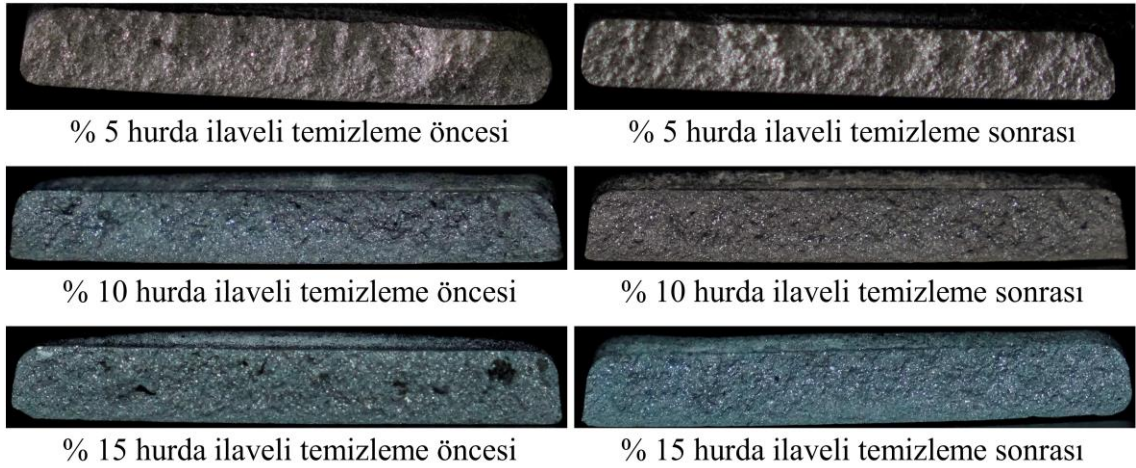
K-Mold Kalıbı Döküm Deneyi Sonuçları

Döküm deneylerinde hazırlanmış olan sıvı metal, temizleme öncesi ve sonrası olarak yaklaşık 400 g ergiyik alan önceden ısıtılmış K- mold kalıbana dökülür. Katılaşmanın gerçekleşmesi kalıp tasarımı gereği kısa bir süre sonra gerçekleşir ve yassı çubuk (240x36x6mm) gibi test numuneleri elde edilir. Şekil 35’ te K-mold numune resmi gösterilmektedir.



Şekil 35. K- mold numunesi örnek fotoğraf görüntüsü

Elde edilen yassı çubuk numuneler kalıp tasarımında bulunan çentik izlerinden çekiç marifeti ile darbe uygulanarak kırılır. Numuneden elde edilen 5 parçadaki kırılma yüzeylerindeki inklüzyon sayıları 42,4 MP yüksek çözünürlüğe sahip Sony a7R3 marka fortograf makinası ile tespit edilmiştir. Numunenin hızlı katılaşması çok ince bir matris oluşturur ve bu nedenle kırık yüzeyinde inklüzyonlar açıkça tespit edilmektedir. Şekil 36’ da değişen hurda oranlarında temizlik öncesi ve sonrası K- mold parçalarından en uç kademsinden ve Şekil 37’ de verilen kırık yüzey resimlerinde yukarıdan aşağı en uç kesitten yolluk kısmına doğru dizilerek resmedilmiştir.



Şekil 36. Değişen hurda oranlarında temizlik öncesi ve sonrası K- mold parça numuneleri



% 5 hurda ilaveli temizleme öncesi



% 5 hurda ilaveli temizleme sonrası



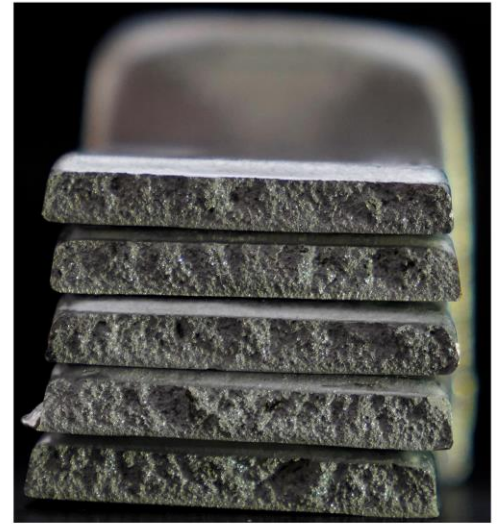
% 10 hurda ilaveli temizleme öncesi



% 10 hurda ilaveli temizleme sonrası



% 15 hurda ilaveli temizleme öncesi



% 15 hurda ilaveli temizleme sonrası

Şekil 37. Değişen hurda oranlarında temizlik öncesi ve sonrası K- mold toplu kırık numuneleri

Şekil 37' de gözle numune kontrolü sonucu inklüzyon sayıları Tablo 9' da gösterilmektedir.

Tablo 9. K- mold inklüzyon sayıları

Numune adı	İnklüzyon sayısı	K- mold parça sayısı	K değeri
% 5 Hurda Temizleme Öncesi	11	5	2,2
% 5 Hurda Temizleme Sonrası	3	5	0,6
% 10 Hurda Temizleme Öncesi	12	5	2,4
% 10 Hurda Temizleme Sonrası	3	5	0,6
% 15 Hurda Temizleme Öncesi	14	5	2,8
% 15 Hurda Temizleme Sonrası	4	5	0,8

Şekillerde verilen kırık yüzeyler ve Tablo 9’da verilen ölçüm sonuçlarına bağlı olarak K değerleri incelendiğinde temizleme öncesi ve sonrası numunelerde K değerleri olumlu ölçüde tespit edilmiştir. Hurda miktarına bağlı olarak yapıda ortaya çıkan K değerlerinin yapılan ölçüm sonuçlarına göre % 5 hurda ilaveli dökümde 2,2, % 10 hurda ilaveli dökümde 2,4, % 15 hurda ilaveli dökümde 2,8 olduğu tespit edilmiştir. Hurda miktarının artmasına bağlı olarak döküm yapıda ortaya çıkan inklüzyonlarda artış ve K değerinde yükselmeler gözlenmiştir. Ayrıca tabloda verilen değerler incelendiğinde % 5 ve % 10 hurda ilavesi sonrası temizleme yapılarak gerçekleştirilen deneylerde K değeri 0,6 iken hurda miktarı % 15 olduğunda K değeri 0,8 olarak karşımıza çıkmıştır. Sıvı metal kalitesi üzerine K mold test yöntemi ile yapılan çalışmalar incelendiğinde 1 değerinin altındaki değerlerde sıvı metal kalitesinin kabul edilebilir seviyelerde olduğu ve bu durum temizleme işleminin uygunluğunu teyit etmektedir. Deney sonuçlarına bakıldığında temizleme yapılmadan dökülen numunelerde K değerleri 1 değerinin üstünde olduğunda temizleme yapılması gerektiği anlaşılmaktadır (Gyarmati *et al.* 2022).

Deney dökümlerinde sıvı metal temizliği uygulamasının verimliliği K değerinin karşılaştırılması yüzde oranla tarifi Eşitlik 2’ ye göre ifade edilmiş ve Tablo 10’ da gösterilmiştir.

Tablo 10. K değerlerinin karşılaştırılması

Deney Döküm	ΔK
% 5 hurda ilaveli dökümde	267
% 10 hurda ilaveli dökümde	300
% 15 hurda ilaveli dökümde	250

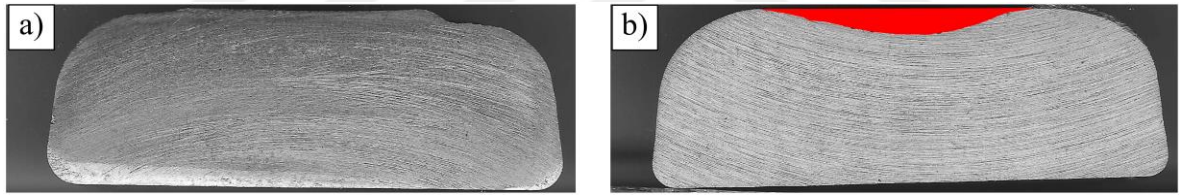
Ördek Ayağı Kalıbı % Çekinti Sonuçları

Şekil 26’ da gösterilen kalıba deney parametrelerinde belirtilen döküm yöntemlerine göre döküm numuneleri elde edilmiştir. Şekil 38’ de ördek ayağı kalıbı ile yapılan dökümlerden elde edilen numunelere örnek bir görüntü verilmiştir. Döküm numuneler uç kısımlarından kesilerek kesit görüntülerinden çekinti incelemelerine tabi tutulmuştur.



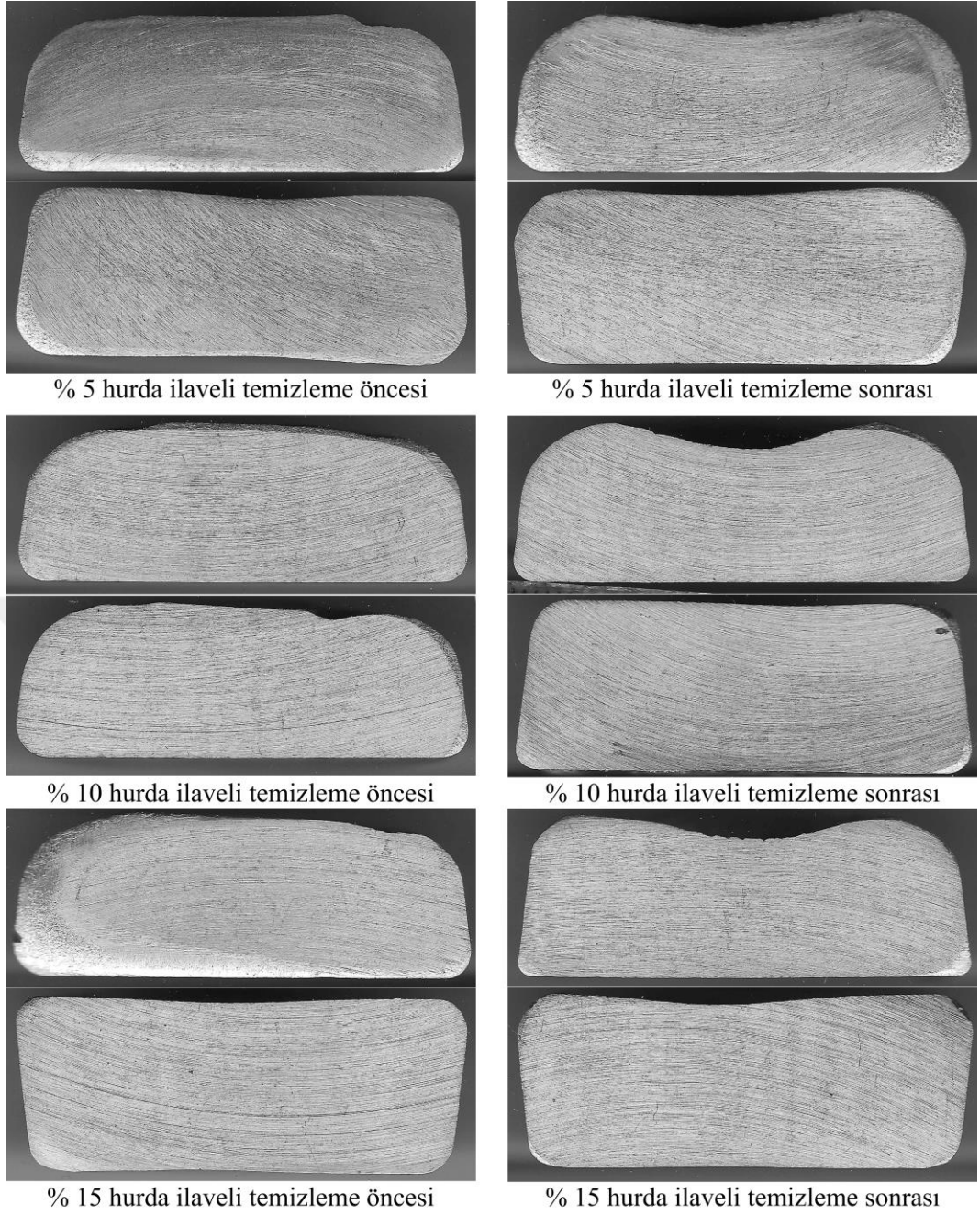
Şekil 38. Ördek ayağı kalıbı döküm numunesi örnek görüntü

Şekil 38’ de verilen numune uç kısımlarında bulunan 15 mm ve 25 mm kesit kalınlığa sahip yuvarlak kısımlardan % çekinti miktarını tespit etmek için Şekil 39’ da gösterildiği gibi kesit alınmıştır. Hurda oranlarına göre sıvı metal temizleme öncesi ve sonrası olmak üzere yapılan deney dökümlerinden elde edilen numune uçları kesilip metalografik işlemlerden sonra imaj analizi programı ile % çekintileri bulunmuştur. Şekil 39’ da imaj analiz işleminden örnek bir görüntü verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi orijinal resimde çekinti olan kısım işlenerek toplam alan içerisindeki % çekinti miktarı belirlenmiştir.



Şekil 39. Ördek ayağı a) temizleme öncesi, b) temizleme sonrası çekinti miktarının gösterimi

Şekil 40’ da tüm deneylerden elde edilen ördek ayağı kalıbı numunelerin kesit görüntüleri verilmiştir. Şekilde ilgili kısımda üstte kalan resimlerde 15 mm yüksekliğindeki numuneler altta kalan resimlerde 25 mm kalınlığındaki resimler verilmiştir. Resim içerisinde alaşım % hurda miktarı ve temizleme durumu belirtilmiştir.



Şekil 40. Ördek ayağı küçük ve büyük parça a) temizleme öncesi, b) temizleme sonrası çekinti miktarının gösterimi

Şekil 40’ da verilen resimler incelendiğinde temizleme sonrası elde edilen numunelerde hurda miktarından bağımsız olarak daha fazla çekinti olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum sıvı metal temizliğini teyit eder niteliktedir. Konu ile ilgili daha önceden yapılan çalışmalarda sıvı metal temizliğini döküm parça içerisinde mikro porozite riskini azalttığı ve buna bağlı olarak yüzeyde çöküntünün daha fazla olduğu bilinmektedir (Liu and Samuel 1998). Ayrıca kesit görüntüleri incelendiğinde aynı döküm şartlarında kalıpta meydana gelen küçük ve büyük numunelerdeki çekinti miktarları karşılaştırıldığında modülü büyük olan 25 mm yükseklikteki numunede daha fazla çöküntü karşımıza çıktığı gözlenmektedir. Bu durum katılaşma zamanı

ve modül kriteri ile ilgili olduğu düşünülmektedir (Ayran and Pekedis 2019). Tablo 11' de kesit görüntülerin imaj analizi yazılımı ile yapılan ölçüm sonuçları verilmiştir.

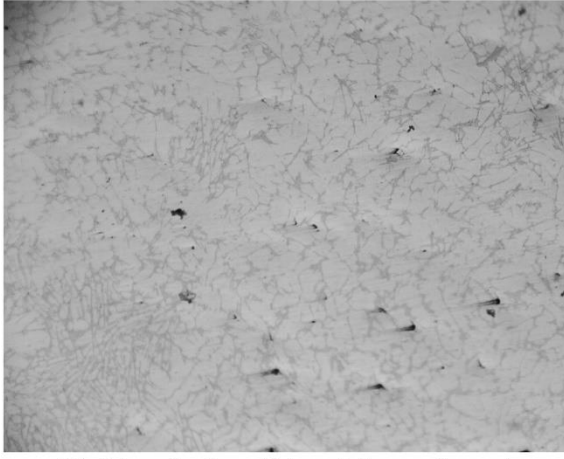
Tablo 11. Ördek ayağı kalıbından elde edilen çekinti numuneleri % çekinti miktarı imaj analiz sonuçları

Alaşım Hurda İlave Oranı	Temizleme Öncesi		Temizleme Sonrası	
	15 mm yükseklikteki küçük numune	25 mm yükseklikteki büyük numune	15 mm yükseklikteki küçük numune	25 mm yükseklikteki büyük numune
% 5	% 0,64	% 1,62	% 1,12	% 2,23
% 10	% 0,42	% 1,34	% 1,26	% 2,34
% 15	% 0,34	% 1,10	% 1,62	% 2,54

Tablo 11' de verilen ördek ayağı kalıbı imaj sonuçlar incelendiğinde % 5 hurda ilavesi yapılan dökümlerde temizleme öncesi küçük numunede % 0,64 büyük numunede % 1,62 çekinti miktarı tespit edilmiştir. Aynı alaşım sıvı metal temizleme süreci sonrasında küçük numunede % 1,12 ve büyük numunede % 2,23 çekinti miktarı ölçülmüştür. Aynı alaşımda sadece temizliğe bağlı olarak yüzeyde çekinti ve buna bağlı olarak çekinti miktarının fazla çıkması sıvı metalin temizliğini teyit eder niteliktedir. Konu ile ilgili yapılan benzer çalışmalar değerlendirildiğinde sıvı metal içerisinde ortaya çıkan safsızlıklara bağlı olarak temizleme olmaksızın yapılan dökümlerde numunede mikro porozitenin yapıda dağılmış bir şekilde olduğundan yüzeyde çekinti miktarının daha az olduğu bilinmektedir (Sabau and Viswanathan 2002). Ancak bu durum ilgili alaşımın mekanik özellikleri ve yoğunluğunun daha fazla olduğu anlamına gelmemektedir. Numune sonuçları incelendiğinde dikkat çeken bir diğer hususta hurda miktarından bağımsız olarak temizleme sonrası alaşımların yüzey çöküntü olduğu ve ortaya çıkan değerlerin birbirine yakın olduğudur. Bu durum temizleme sonrası sıvı metal kalitesinin benzer oranda kabul edilebilir seviyelerde olduğunun göstergesi niteliğindedir. Temizlemeden dökülen alaşımlarda hurda miktarının artması ile birlikte numunelerdeki çekinti miktarlarında düşüş gözlenmektedir. Bu durum sıvı metal safsızlığından kaynaklandığı ve hurda miktarı artışı ile daha fazla mikro porozitenin şişerek yüzeyde çekintiye engel olmasının sebep olabileceği düşünülmektedir.

Mikroyapı İnceleme Sonuçları

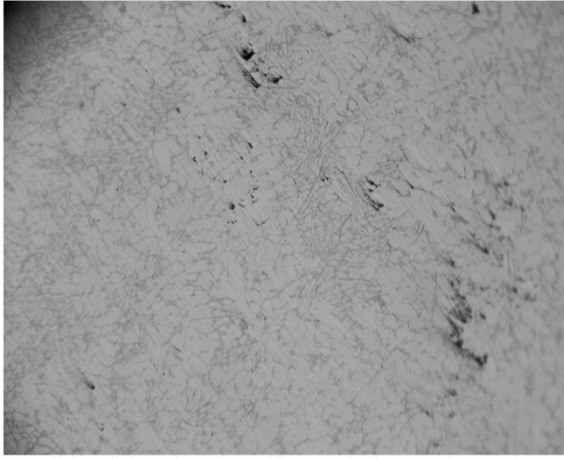
Döküm numunelerinden değişen hurda oranları ile oluşan içyapıyı incelemek için numuneler alınmıştır. Metalografik olarak hazırlanan numunelerle mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Şekil 41' de hurda farkına bağlı olarak 100x büyütmede çekilmiş mikroyapı resimleri verilmiştir.



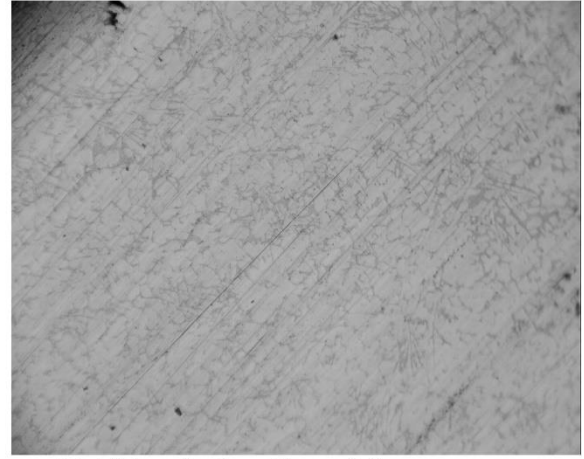
% 5 hurda ilaveli temizleme öncesi



% 5 hurda ilaveli temizleme sonrası



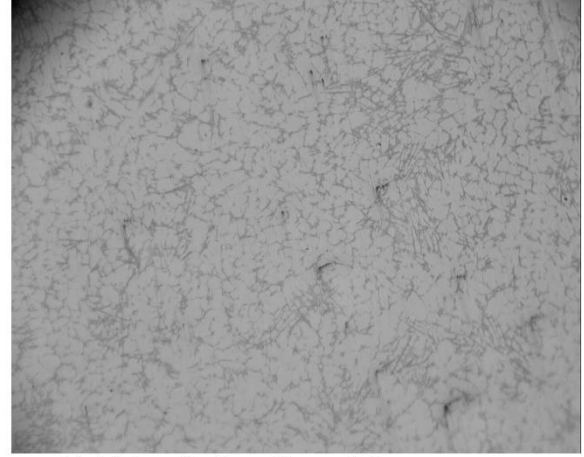
% 10 hurda ilaveli temizleme öncesi



% 10 hurda ilaveli temizleme sonrası



% 15 hurda ilaveli temizleme öncesi



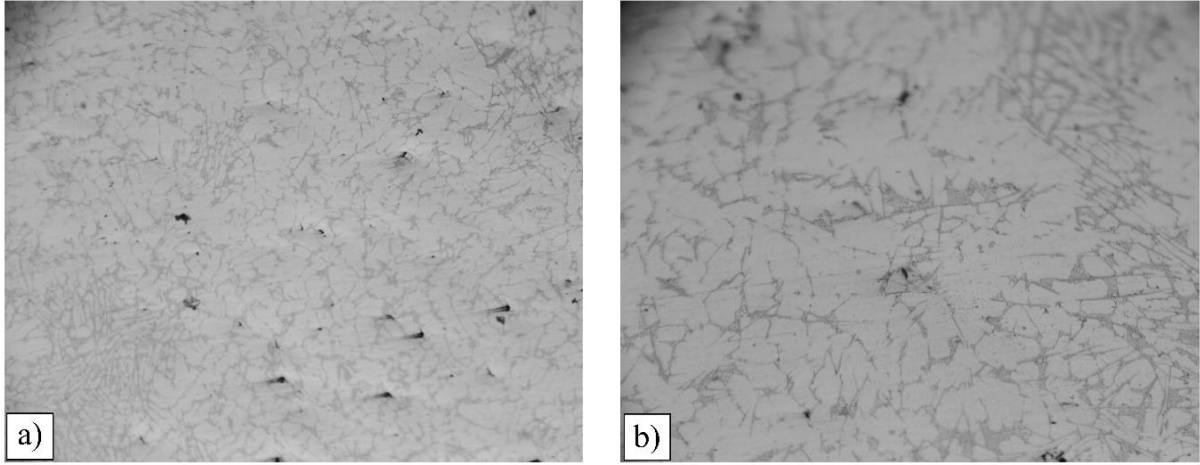
% 15 hurda ilaveli temizleme sonrası

Şekil 41. Değişen hurda oranlı numunelerden temizlik öncesi ve sonrası ait mikroyapı görüntüleri

Şekil 41’ de görüldüğü gibi sıvı metalde hurda oranı arttıkça yapı içerisinde bulunan inklüzyon ve gözeneklerin arttığı görülmektedir. Sıvı metal temizleme işlemi sonrası yapıdaki inklüzyon ve gözeneklerin azaldığı görülmektedir.

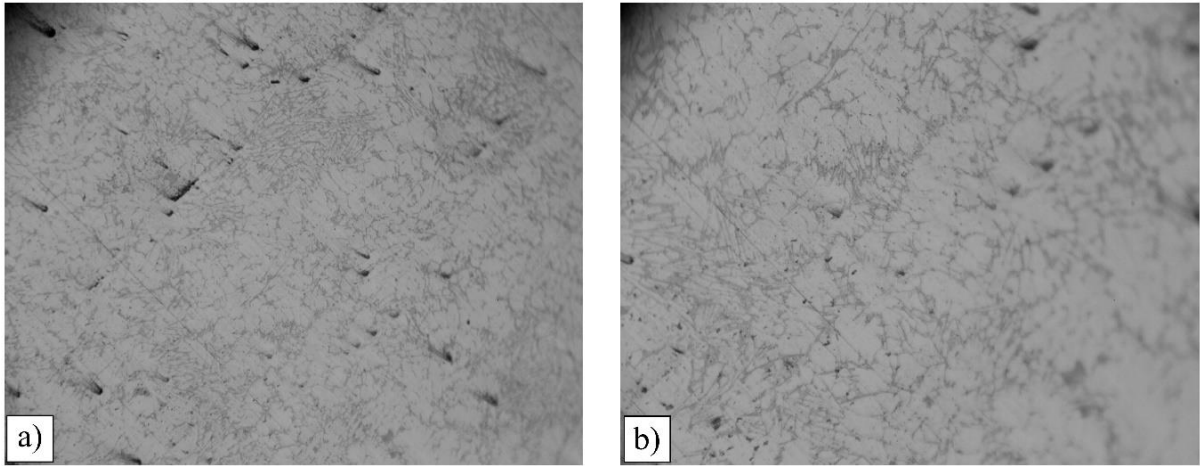
Döküm numunelerden, değişen hurda oranlarında yapılan temizleme öncesi ve temizleme sonrası döküm şartlarında oluşan iç yapının incelenmesi için numuneler alınmıştır. Numuneler metalografik olarak hazırlandıktan sonra mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Şekil

42' de alaşım % 5 hurda ilaveli döküme ait farklı büyütmelelerde çekilen numunelerin mikroyapı resimleri verilmiştir. Şekil 42' de 100 ve 200 büyütmede çekilen resimler örnek olarak verilmiştir.

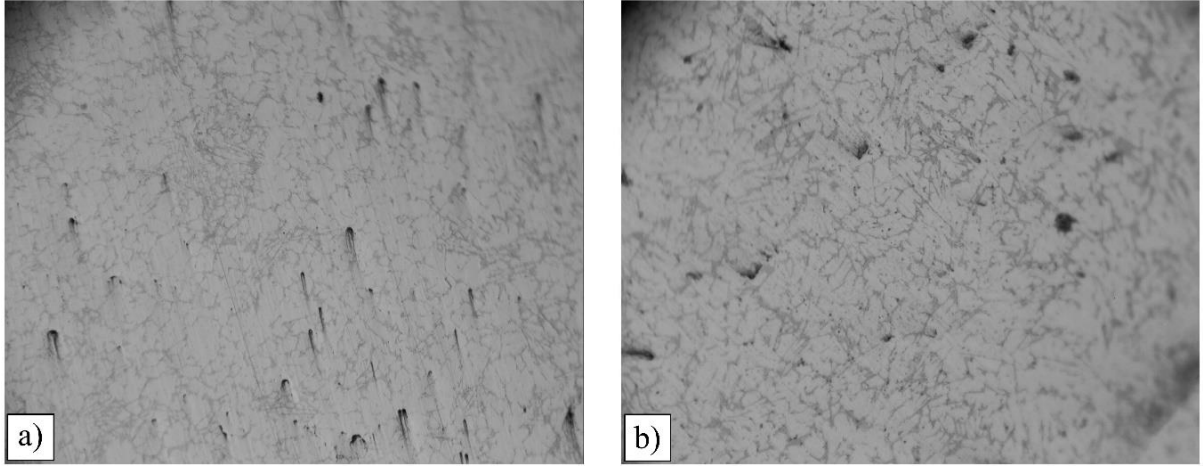


Şekil 42. % 5 hurda ilaveli alaşım temizleme öncesi yapılan dökümlerden elde edilen mikroyapı resimleri a) 100x, b) 200x büyütme

Farklı büyütmelelerde çekilen resimlerde görüldüğü gibi % 5 Hurda içeren alaşımda temizleme öncesinde azda olsa gözenekler (siyah bölgeler halinde) görülmektedir. İçyapı incelendiğinde alaşımın kimyasal bileşimine bağlı olarak ötektik öncesi α ve ötektik $\alpha + \text{Si}$ yapısı içerdüğü gözlenmektedir. Şekil 43' te % 10 hurda içeren alaşıma ait mikroyapı resimleri, Şekil 44' te % 15 hurda içeren alaşıma ait mikroyapı resimleri verilmiştir.



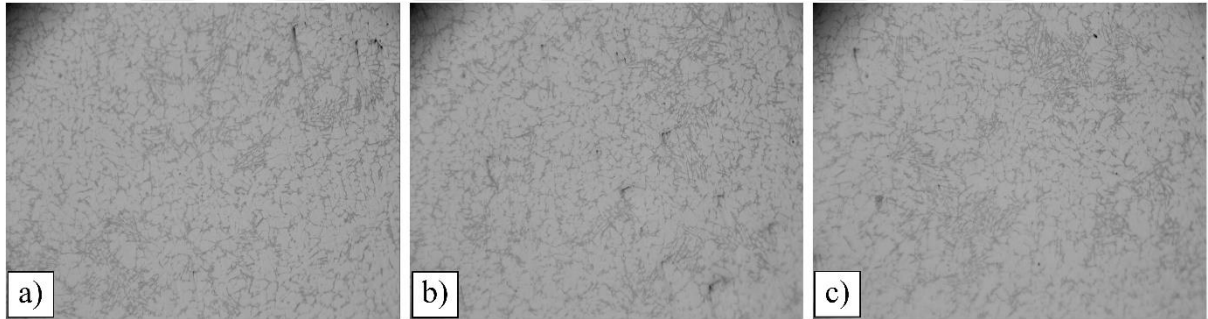
Şekil 43. % 10 hurda ilaveli alaşım temizleme öncesi yapılan dökümlerden elde edilen mikroyapı resimleri a) 100x, b) 200x büyütme



Şekil 44. % 15 hurda ilaveli alaşım temizleme öncesi yapılan dökümlerden elde edilen mikroyapı resimleri a) 100x, b) 200x büyütme

Şekil 42, Şekil 43 ve Şekil 44’ te verilen farklı hurda oranı ilavesi ile temizleme öncesi yapılan döküm numune mikroyapı resimleri incelendiğinde hurda miktarının artması ile birlikte gözenek miktarında da artış olduğu gözlenmiştir. Hurda malzemeleri temizlemeksizin yapılan dökümlerde hurdadan kaynaklı yağ, kir, atık ve çeşitli kimyasalların döküm iç yapısında gözeneklilik oluşturduğu düşünülmektedir.

Farklı hurda oranlarında yapılan dökümlerde temizleme sonrası numune elde edilen 100x büyütmede çekilen mikroyapı resimleri Şekil 45’ te verilmiştir.



Şekil 45. Temizleme sonrası 100x büyütmeden çekilen mikroyapı resimleri, a) % 5 hurda ilaveli döküm, b) % 10 Hurda ilaveli döküm, c) % 15 hurda ilaveli döküm

Şekil 45’ te görüldüğü gibi hurda oranından bağımsız olarak temizleme sonrası yapılan dökümlerde 100x büyütmede çekilen resimlerde döküm iç yapısının gözenek riskinin oldukça azaldığı tespit edilmiştir.

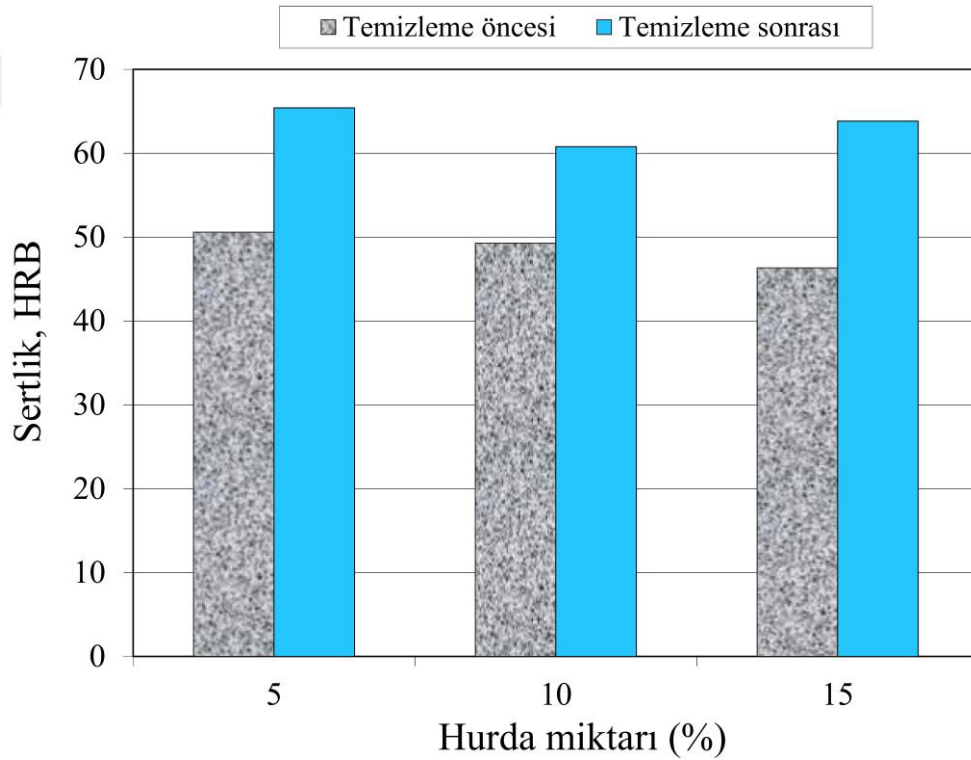
Döküm deneylerinden elde edilen numunelerine ait tüm şekillerdeki resimler incelendiğinde numune iç yapılarının ilgili alaşım standardına uygun olduğu tespit edilmiştir. Alaşıma ilave edilen hurda oranlarına ve temizleme işlemine bağlı olarak bazı döküm sonuçlarında iç yapıda poroziteli sonuçlar ile karşılaşmıştır. Bu durum literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında hurda ilave edilerek sıvı metal temizliği uygun olmayan alaşımlarda olası sonuçlar olarak karşımıza çıkmaktadır (Arslan *et al.* ; Tunçay 2019).

Mekanik Test Sonuçları

Farklı yüzde oranla hurda girdilerine göre hazırlanan sıvı metal dökümlerinden elde edilen numunelere ait sertlik ölçümleri HRB test metodu 1,6 mm çaplı bilye ve 10 kgf ön yük ve 150 kgf toplam yük altında her bir numuneden en az 5'er adet alınan sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Degerleri Tablo 12' de, grafikleri ise Şekil 46' da verilen sertlik sonuçları hurda miktarı yüzde oran değişkenli dökümlerin aynı bölgelerinden alınan numunelerin ortalama değerleridir.

Tablo 12. Sertlik ölçüm sonuçları

Numune Adı	%5 Kirli	%5 Temiz	%10 Kirli	%10 Temiz	%15 Kirli	%15 Temiz
Sertlik (HRB)	50,58	62,40	49,28	60,78	46,34	63,83



Şekil 46. Deney numunelerine ait ortalama sertlik ölçüm sonuçları

Sertlik sonuçları incelendiğinde sıvı metal temizleme sonrası elde edilen numunelerde sertlik değerlerinin hurda oranlarından bağımsız olarak birbirine çok yakın olarak çıktığı 60-62 HRB çıktığı görülmektedir. Bu durum sıvı metal temizleme işleminin uygun olarak yapıldığında nihai dökümlerin benzer özellikler çıkardığını göstermektedir. % 5 Hurda ilaveli dökümde ölçülen ortalama sertlik değeri 50,58 HRB, % 10 hurda ilaveli dökümde 49,28 HRB ve % 15 hurda ilaveli dökümde ise 46,34 HRB olduğu tespit edilmiştir. Hurda ilave miktarına bağlı olarak sertlik değerleri temizlemeden yapılan dökümlerde daha düşük olduğu gözlenmektedir. Hurda miktarı artışı ile az da olsa sertlik değerinde bir düşüş gözlenmiştir. Ancak düşüş değeri arasındaki fark oldukça az olduğundan hurda miktarı ile doğrudan ilişki

kurulamamaktadır. Sonuçlar değerlendirildiğinde temizleme işleminin sertlik değeri artışında önemli olduğu anlaşılmaktadır.

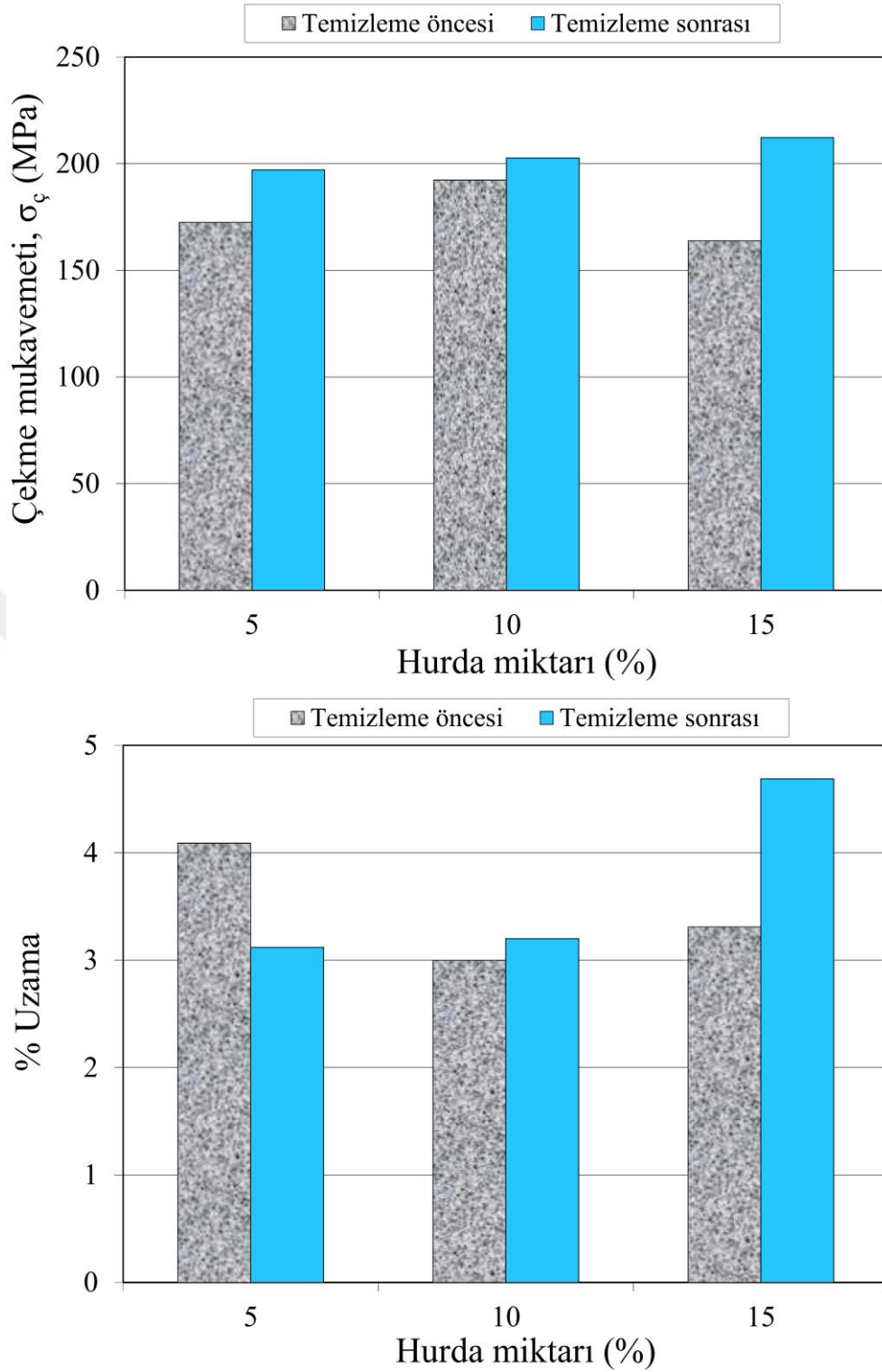
Çalışma kapsamında döküm numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılan diğer test çalışması da çekme deneyleridir. Deney numunelerine ait çekme testi sonuçları Tablo 13’ te verilmiştir. Tablo 13’ te verilen L_k ; kopma anındaki toplam çubuk boyunu, σ_{ak} ; akma mukavemeti değerini, σ_{ϵ} ; çekme mukavemeti değerini, % uzama da toplam uzama miktarını temsil etmektedir. Test sonuçlarına ait çekme dayanımı ve % uzama değerlerine ait grafikler de Şekil 47’ de verilmiştir.

Tablo 13. Çekme test deneyi sonuçları

Numune Adı	% 5 Kirli	% 5 Temiz	% 10 Kirli	% 10 Temiz	% 15 Kirli	% 15 Temiz
L_k (mm)	60,83	61,18	60,95	60,89	60,91	61,66
σ_{ak} (MPa)	137,90	147,92	140,59	137,60	140,56	141,29
σ_{ϵ} (MPa)	172,50	197,12	192,35	202,68	263,89	212,24
% uzama	4,09	3,12	3,00	3,20	3,31	4,69

Tablo 13’ te verilen çekme test sonuçları incelendiğinde temizleme sonrası elde edilen deney numunelerinde çekme mukavemeti değerlerinin aynı hurda oranlı alaşım ile karşılaştırıldığında daha yüksek akma ve çekme mukavemetine sahip olduğu anlaşılmaktadır. % 5 hurda ilave edilen alaşımda temizleme öncesi akma mukavemeti değeri 137,90 MPa, çekme mukavemeti değeri 172,5 MPa iken temizleme sonrası ilgili değerler 147,92 MPa ve 197,12 MPa olarak tespit edilmiştir. Çekme mukavemeti için benzer artış değerleri % 10 ve % 15 Hurda oranlı alaşımlarda da tespit edilmiştir. Deney sonuçlar incelendiğinde en yüksek akma mukavemeti % 5 hurda ilaveli alaşımın temizlemesi sonrası 147,92 MPa olarak tespit edilirken, çekme mukavemetinde en yüksek değer % 15 hurda ilaveli alaşımın temizleme sonrası yapılan dökümde 212,24 MPa olarak bulunmuştur. Temizlemeden yapılan dökümlerde en düşük çekme mukavemeti değeri % 15 hurda ilaveli dökümde 263,89 MPa olarak ölçülmüştür. Çekme ve akma mukavemeti açısından hurda ilavesinin etkisi katılan hurda ilave miktarı ile orantılı bir şekilde değişim göstermediği elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır. Bu durum ilgili numunelerin çekme esnasında miktarından bağımsız olarak biriken bifilm, inklüzyon gibi hataların belli bölgelerde birikmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

% uzama değerleri incelendiğinde değişen döküm deneylerinde birbirine yakın değerler olduğu ve değişen döküm şartlarına bağlı olarak anlamlı uzama değerleri tespit edilemediği gözlenmektedir. Ortalama uzama değerleri % 3 ile en düşük değeri % 10 hurda ilaveli dökümün temizlemeden dökümünde % 3 olarak elde edilirken, en yüksek uzama değeri % 15 hurda ilaveli dökümde temizleme sonrası % 4,69 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 47. Deney numuneleri çekme mukavemeti ve % uzama sonuçları

Çekme numunesinin kırılma yüzeyinden farklı inklüzyon içeriğine sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca kırılma yüzeyindeki oksit filmleri ne kadar büyükse, test çubuğunun çekme özelliklerinin o kadar düşük olduğu gözlemlenebilir. Metalik matriste artan inklüzyon içeriği ile uzama, akma mukavemeti ve nihai gerilme mukavemeti gibi özellikler azalır. Ergiyik içindeki inklüzyonlar ergiyik akışkanlığını olumsuz etkileyebilir ve interdendritik beslenmeyi önleyebileceği bilinmektedir (Li *et al.* 2016; Baytar 2020).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada A356 alüminyum alaşımının içerisine % 5, % 10 ve % 15 hurda ilavesi ile alaşımlar elde edilmiş ve elde edilen alaşımlar sıvı metal temizleme öncesi ve azot gazı ile 5 lt/dk ve 300 dv/dk da döner tip gaz giderme yöntemi ile temizlenerek dökümleri gerçekleştirilmiştir. Böylece değişen hurda oranlarında, temizleme öncesi ve temizleme sonrası yapılan dökümlerde sıvı metal kalitesi RPT numuneleri ve K mold kalıbına yapılan dökümler ile test edilmiştir. Ayrıca belirtilen deney şartlarında ördek ayağı kalıbına dökümler yapılarak % çekinti değişimi ve mekanik test kalıbına yapılan dökümler ile sertlik ve çekme dayanımı değerleri ve mikroyapı değişimleri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- RPT numune test sonuçlarında sıvı metal temizleme öncesi elde edilen numunelerde katılaşma sürecinde sıvı metal içerisindeki gözeneklerin etkisiyle hacimsel genişmeden dolayı dışa doğru kabarık bir görüntü elde edilmiştir.
- Temizleme işlemi sayesinde indirgenmiş basınç altında katılaşma ile numunenin üst tarafında içe doğru çöküntü olduğu tespit edilmiştir.
- K mold kalıbına yapılan dökümlerde sıvı metal kalitesi kırık yüzeyde ortaya çıkan yapı ile değerlendirilmiştir. K değerlerinin yapılan ölçüm sonuçlarına göre % 5 hurda ilaveli dökümde 2,2, % 10 hurda ilaveli dökümde 2,4, % 15 hurda ilaveli dökümde 2,8 olduğu tespit edilmiştir. İlgili değerler sıvı metal kalitesi açısından uygun olmadığı ve temizleme gereksinimi olduğunu doğrulamaktadır.
- % 5 ve % 10 hurda ilavesi sonrası temizleme yapılarak gerçekleştirilen deneylerde K değeri 0,6 iken hurda miktarı % 15 olduğunda K değeri 0,8 olarak ölçülmüştür. K değerinin 1'in altında bulunmasından dolayı sıvı metal temizleme işleminin uygun olduğu ve kabul edilebilir sıvı metal kalitesinin elde edildiği görülmüştür.
- Hurda miktarının artmasına bağlı olarak RPT ve K mold numunelerinde ortaya çıkan gaz durumunda artış gözlenmiştir.
- Temizleme işlemi sonucunda hurda miktarından bağımsız olarak kabul edilebilir seviyelerde sıvı metal kalitesi elde edildiği K mold ve RPT testleri sonucu teyit edilmiştir. Ayrıca K mold ve RPT teknikleri ile elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu ve firma pratiğine bağlı olarak her iki test yönteminin de güvenli araçlar olduğu düşünülmektedir.

- RPT ve K mold sonuçlarına göre alaşıma uygulanan sıvı metal temizleme yöntem ve parametrelerinin (döner tip gaz giderme, 5 lt/dk azot gazı debisi altında ve 300 dv/dk devirde) uygun olduğu tespit edilmiştir. İlgili şartlarda hurda miktarı % 15'e kadar artsa bile etkin bir temizleme ile sıvı metal kalitesi kabul edilebilir seviyelere gelmektedir.
- Ördek ayağı kalıbına yapılan dökümlerde değişen döküm şartlarında % çekinti değerleri farklı modüldeki numunelerde değerlendirilmiştir. Alaşımların temizleme işlemi sonrası hurda miktarından bağımsız olarak daha fazla çekinti olduğu görülmüştür. Bu durum RPT numunelerinde de olduğu gibi sıvı metal temizliğini teyit etmektedir.
- Modül değişiminin etkisi değerlendirildiğinde modülü büyük olan 25 mm yükseklikteki numunede daha fazla çöküntü ile karşılaşmış ve bu durum katılaşma zamanının daha fazla olmasına dayandırılmıştır.
- Ördek ayağı kalıbı imaj analizi sonuçları incelendiğinde % 5 hurda ilavesi yapılan dökümlerde temizleme öncesi küçük numunede % 0,64 büyük numunede % 1,62 çekinti miktarı tespit edilmiştir. Aynı alaşım sıvı metal temizleme süreci sonrasında küçük numunede % 1,12 ve büyük numunede % 2,23 çekinti miktarı ölçülmüştür. Aynı alaşımda sadece temizliğe bağlı olarak yüzeyde çekinti ve buna bağlı olarak çekinti miktarının fazla çıkması sıvı metalin temizliğini teyit etmektedir.
- Ördek ayağı kalıbına yapılan döküm numunelerde hurda miktarından bağımsız olarak temizleme sonrası alaşımların yüzeyinde çöküntü olduğu ve ortaya çıkan değerlerin büyük modüllü numunede % 2,23 - 2,54 ve küçük modüllü numunede % 1,12-1,62 arasında birbirine yakın değerler tespit edilmiştir.
- Döküm numunelerden alınan mikroyapı resimlerinde; alaşımın kimyasal bileşimine bağlı olarak ötektik öncesi α ve ötektik $\alpha + \text{Si}$ yapısı içerdiği gözlenmiş ve numune içyapılarının ilgili alaşım standardına uygun olduğu tespit edilmiştir.
- Değişen döküm şartlarında sıvı metalde hurda oranı arttıkça yapı içerisinde bulunan inklüzyon ve gözeneklerin arttığı, temizleme işlemi sonrası yapıda istenmeyen etkilerin azaldığı ve gözenek riskinin minimize edildiği tespit edilmiştir.
- Hurda malzeme ilavesinde temizlemeksizin yapılan dökümlerde hurdadan kaynaklı yağ, kir, atık ve çeşitli kimyasalların döküm içyapısında gözeneklilik oluşturduğu düşünülmektedir.
- Sertlik testi sonuçları değerlendirildiğinde % 5 Hurda ilaveli dökümde ölçülen ortalama sertlik değeri 50,58 HRB, % 10 hurda ilaveli dökümde 49,28 HRB ve % 15 hurda ilaveli dökümde ise 46,34 HRB olduğu tespit edilmiştir.

- Sıvı metal temizleme sonrası elde edilen numunelerde sertlik değerlerinin hurda oranlarından bağımsız olarak yaklaşık % 20 artış ile 60-62 HRB seviyelerinde çıktığı görülmüştür.
- Çekme test sonuçları incelendiğinde temizleme sonrası elde edilen deney numunelerinde çekme mukavemeti değerlerinin aynı hurda oranlı alaşım ile karşılaştırıldığında daha yüksek akma ve çekme mukavemetine sahip olduğu anlaşılmaktadır.
- En yüksek akma mukavemeti % 5 hurda ilaveli alaşımın temizlemesi sonrası 147,92 MPa olarak tespit edilirken, çekme mukavemetinde en yüksek değer % 15 hurda ilaveli alaşımın temizleme sonrası yapılan dökümde 212,24 MPa olarak bulunmuştur.
- Temizlemeden yapılan dökümlerde en düşük çekme mukavemeti değeri % 15 hurda ilaveli dökümde 163,89 MPa olarak ölçülmüştür.
- % uzama değerleri incelendiğinde değişen döküm deneylerinde birbirine yakın değerler olduğu ve değişen döküm şartlarına bağlı olarak anlamlı uzama değerleri tespit edilemediği gözlenmektedir. Ortalama uzama değerleri % 3 ile en düşük değeri % 10 hurda ilaveli dökümün temizlemeden dökümünde %3 olarak elde edilirken, en yüksek uzama değeri % 15 hurda ilaveli dökümde temizleme sonrası % 4,69 olarak tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Al-Saadı, h.i.a. and Tunay, R.F., 2017. Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5 (3), 525-532.
- Arslan, İ., Gavgalı, E. and Çolak, M., Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Al5Ti1B ve Al10Sr İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7 (2), 237-244.
- Ayran, E. and Pekedis, M., 2019. Alüminyum Alaşımlı Otomobil Jantlarında Deneysel Darbe Testlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrulanması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11 (2), 663-670.
- Balaban, C., Şen, Ö., Özer, G. and Güler, K.A., 380 alaşıımının soğuma eğrisinde ve akışkanlığında tane inceltmenin etkisi.
- Barlow, J. and Stefanescu, D., 1998. Computer-aided cooling curve analysis revisited. *Transactions-American Foundrymens Society*, 349-354.
- Baytar, F., 2020. Alüminyum alaşımları dökümünde akış oranının mekanik özelliklere etkisi.
- Bsona, M. and Sládek, A., 2011. Hydrogen analysis and effect of filtration on final quality of castings from aluminium alloy AlSi7Mg0,3. *Archives of Foundry Engineering*, 5-10.
- Campbell, J., 2003. *Castings Elsevier*.
- Car, E., 2010. Birincil alüminyum üretim teknolojilerine genel bir bakış. *Metalurji* 156, 37-48.
- Car, E., 2019. İkincil alüminyum üretime genel bir bakış. *Metalurji*, 187, 25-37.
- de Andrade Silva, F., Williams, J.J., Müller, B.R., Hentschel, M.P., Portella, P.D. and 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 (8), 2121-2128.
- Dispınar, D., 2006. Determination of metal quality of aluminium and its alloys, University of Birmingham.
- Divandari, M. and 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. and 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. and 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. and 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 ed.*, Ed: J.F. Grandfield and D.G. Eskin. Springer International Publishing, Cham, 332-337.
- El Haj, B., Bouayad, A. and Alami, M., Quantitative evaluation of shrinkage porosity in alsı9 cast alloy as function of titanium addition and casting parameters.

- Emadi, D., Whiting, L.V., Nafisi, S. and Ghomashchi, R., 2005. Applications of thermal analysis in quality control of solidification processes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 81 (1), 235-242.
- Enright, P., Hughes, I., Pickering, J., Simard, A. and Proulx, J., 2003. Characterisation of molten metal quality using the pressure filtration technique.
- Ertan, S., Kavaklıoğlu, B. and Büyükakkaş, F., 2003. Alüminyum sıvı metal temizliğinde kullanılan flakslar, II. Aluminium Symposium, Seydişehir/Turkey.
- Foseco, 2015. FDU Foundry Degassing Unit - Kullanım Kılavuzu.
- Furnace Efficiency Monitoring, F.-c., 2015. Foundry Practice
- Galarraga, H., Garcia de Cortazar, M., Arregi, E., Iparraguirre, J.A. and Oncala, J.L., 2018. Improved ultrasonic degassing of AlSi10Mg alloy and its performance evaluation with reducer pressure test (RPT) method, The 73rd World Foundry Congress: September, pp. 23-27.
- Gökelma, M., Latacz, D. and 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 (01), 13.
- Gruzleski, J.E. and Closset, B.M., 1990. The treatment of liquid aluminum-silicon alloys, American Foundrymen's Society. Inc. Des Plaines, Illinois, USA, 1-35.
- Güler, M., 2017. Alüminyum alaşımlarında inklüzyon çeşitleri ve önleyici faaliyetler. *Metalurji*, 184 (07), 36-42.
- Gyarmati, G., Fegyverneki, G., Molnar, D. and Tokár, M., 2019. The Melt Cleaning Efficiency of Different Fluxes and Their Effect on the Eutectic Modification Level of AlSi7MgCu Alloy. 66, 70-87.
- Gyarmati, G., Vincze, F., Fegyverneki, G., Kéri, Z., Mende, T. and 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*.
- Hudson, S.W. and 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. and Carlberg, T., 2011. Method developed for quantitative analysis of inclusions in solidified aluminum ingots. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 42 (1), 121-132.
- Karppinen, A., 1997. Kontroll av aluminiumsmältans (oxid) inneslutningshalt med QualiflashTM-metoden. Svenska Gjuteriföreningen.
- Kaufman, J.G. and Rooy, E.L., 2004. Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications. Asm International.
- Lashkari, O., Yao, L., Cockcroft, S. and Maijer, D., 2009. X-ray microtomographic characterization of porosity in aluminum alloy A356. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40 (4), 991-999.
- Lee, P. and Hunt, J., 2001. Hydrogen porosity in directionally solidified aluminium-copper alloys: a mathematical model. *Acta materialia*, 49 (8), 1383-1398.
- Li, Z., Limodin, N., Tandjaoui, A., Quaegebeur, P., Witz, J.-F. and Balloy, D., 2016. Damage investigation in A319 aluminum alloy by digital image correlation during in-situ tensile tests. *Procedia Structural Integrity*, 2, 3415-3422.

- Liu, L. and Samuel, F.H., 1998. Effect of inclusions on the tensile properties of Al–7% Si–0.35% Mg (A356.2) aluminium casting alloy. *Journal of Materials Science*, 33 (9), 2269-2281.
- Liu, X., Zhang, C., Zhang, Z., Xue, J. and Le, Q., 2017. The role of ultrasound in hydrogen removal and microstructure refinement by ultrasonic argon degassing process. *Ultrasonics sonochemistry*, 38, 455-462.
- Maev, R., Sokolowski, J., Lee, H., Maeva, E. and Denissov, A., 2001. Bulk and subsurface structure analysis of the 319 aluminum casting using acoustic microscopy methods. *Materials characterization*, 46 (4), 263-269.
- Meidani, A.N. and Hasan, M., 2004. A study of hydrogen bubble growth during ultrasonic degassing of Al–Cu alloy melts. *Journal of Materials Processing Technology*, 147 (3), 311-320.
- Ni, H., Sun, B., Jiang, H. and 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.
- Öztürk, M., 2005. Kullanılmış alüminyum malzemelerin geri kazanılması. Çevre ve Orman Bakanlığı.
- Puga, H., Teixeira, J., Barbosa, J., Seabra, E., Ribeiro, S. and 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.
- Ren, Y., Ma, W., Wei, K., Yu, W., Dai, Y. and Morita, K., 2014. Degassing of aluminum alloys via the electromagnetic directional solidification. *Vacuum*, 109, 82-85.
- Sabau, A.S. and Viswanathan, S., 2002. Microporosity prediction in aluminum alloy castings. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 33 (2), 243-255.
- San-Martin, A. and Manchester, F., 1992. The al-h (aluminum-hydrogen) system. *Journal of phase equilibria*, 13 (1), 17-21.
- Simulator, B.D. and Holiday, E.D., 2021. Portable Rotary Degasser Lowers Aluminum Refining Cost Simulation.
- Stanica, C. and 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.
- Şensoy, A.T., Çolak, M., Kaymaz, I. and Dispınar, D., 2020. Investigating the Optimum Model Parameters for Casting Process of A356 Alloy: A Cross-validation Using Response Surface Method and Particle Swarm Optimization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45 (11), 9759-9768.
- Tiryakioğlu, M., Staley, J.T. and Campbell, J., 2004. Evaluating structural integrity of cast Al–7% Si–Mg alloys via work hardening characteristics: II. A new quality index. *Materials Science and Engineering: A*, 368 (1-2), 231-238.
- Tiwari, S. and Beech, J., 1978. Origin of gas bubbles in aluminium. *Metal Science*, 12 (8), 356-362.
- Tunçay, T., 2019. AlSiCu (LM24) alüminyum alaşımında modifikasyon ve tane inceltmenin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 21-28.
- Utigard, T., 1998. The properties and uses of fluxes in molten aluminum processing. *Jom*, 50 (11), 38-43.

- Wannasin, J., Schwam, D. and Wallace, J.F., 2007. Evaluation of methods for metal cleanliness assessment in die casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 191 (1), 242-246.
- Wu, R., Shu, D., Sun, B., Wang, J., Li, F., Chen, H. and Lu, Y., 2005. Theoretical analysis and experimental study of spray degassing method. *Materials Science and Engineering: A*, 408 (1-2), 19-25.
- Xu, H., Jian, X., Meek, T.T. and Han, Q., 2004. Degassing of molten aluminum A356 alloy using ultrasonic vibration. *Materials Letters*, 58 (29), 3669-3673.
- Yüksel, Ç., Alüminyum alaşımlarının sıvı metal kalitesinin arttırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2016, İstanbul, TÜRKİYE.
- Yüksel, Ç., 2020. Alüminyum ve alaşımlarında sıvı metal kalitesi.
- Yüksel, Ç., Öztürk, M.C., Balcı, Y.B., Eker, H., Çiğdem, M., Dışpınar, D. and Aybarç, U., 2017. Ultrasonik gaz giderme yöntemi ile metal kalitesinin artırılması. *Technological Applied Sciences*, 13 (2), 172-179.
- Zeng, J., Gu, P. and Wang, Y., 2012. Investigation of Inner Vacuum Sucking method for degassing of molten aluminum. *Materials Science and Engineering: B*, 177 (19), 1717-1720.
- Zhao, L., Pan, Y., Liao, H. and Wang, Q., 2012. Degassing of aluminum alloys during remelting. *Materials Letters*, 66 (1), 328-331.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Mehmet TOKATLI
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Konya Merkez İmam Hatip Lisesi
Lisans:	Fırat Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Anabilim Dalı (2022)
Doktora:	-
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Arapça:	Orta