

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ SIVI METAL KALİTESİNİN ARTTIRILMASI



ÇAĞLAR YÜKSEL

**DOKTORA TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF.DR.MUSTAFA ÇİĞDEM**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ SIVI METAL KALİTESİNİN ARTTIRILMASI

Çağlar YÜKSEL tarafından hazırlanan tez çalışması 18/11/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof.Dr.Mustafa Çiğdem
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof.Dr.Mustafa Çiğdem
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç.Dr.Ergün Keleşoğlu
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç.Dr.Derya Dışpınar
İstanbul Üniversitesi

Prof.Dr.Necmettin Maraşlı
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof.Dr.Recep Artır
Marmara Üniversitesi



Bu alışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TBTAK 114M100 numaralı projesi, T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı SAN-TEZ 0802.STZ.2014 numaralı projesi ile CMS Jant ve Makina A.ř. tarafından ve Yıldız Teknik Üniversitesi BAPK 2014-07-02-DOP03 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında mentörlüğünden sürekli desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocam ve danışmanım Sayın Mustafa Çiğdem'e en derin teşekkürlerimi iletiyorum. Sayın "eş-danışmanım" Derya Dışpınar; önce tabii ki hoca daha sonra bir abi gibi her daim yanımda olduğunuz için teşekkür ederim, büyüyorsunuz hocam! John Campbell elektronik olmayan yayınlarınızı dahi taramaya üşenmeden bana yollamış olmanız, sorduğum tüm sorulara metanet ile cevap vermenizden ve fikirlerinizi paylaştığınız için çok müteşşekkirim. Sayın hocam Ahmet Karaaslan akademik kariyerimi planlamamda ve yön vermemde vermiş olduğunuz tüm destekler için çok teşekkür ederim.

Yunus E. Benkli, K. Vefa Ezirmik, Eray Erzi, Özen Gürsoy, Mustafa Bera Kocabaş, Alptekin Kısasöz, Zekeriya Y. Cömert, Şaban Ceylan, Gökhan Özer, Ergün Keleşoğlu, Kerem A. Güler, H. Murat Luş, Cem Kahruman kariyerimdeki yardımlarınız için teşekkürler. Özge Tamer ile Ömer Demir; uğraşlarınız, vermiş olduğunuz karşılıksız destek ile çoğu işi güzelce başardık, iyi ki birlikte çalıştık. Sevgili öğrencilerim ve artık meslekdaşlarım Mert Gülver, Ceyhun Kuru, Mert Bektaş, Mehmet Reyhanoğlu, Nurhan Erk, Gürcan Özdemir, Taha Yılmaz, Gizem Boz, Seray Akman, Burcu Ertemel ve büyük bir heves ile ekibimize dâhil olan Zülal Öziş, Derviş Deveci, Yusuf B. Balcı, Hüseyincan Eker, M. Cemal Öztürk ve Özlem Çelikaslan'a sağladığı faydalardan dolayı hepinize can-ı yürekten teşekkür ederim.

Canım annem Selma Yüksel'e; eşim Meral Yüksel'e; kızım Duha E. Yüksel'e canım gardaşım Bilgehan Yüksel'e ve her daim varlığını hissettiğim rahmetli babam Erdoğan Yüksel'e varlığıma güç kattığınız için hepinize ayrı ayrı şükranlarımı sunarım, iyi ki varsınız.

Kasım, 2016

Çağlar Oğuz Kağan Yüksel

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT.....	xvii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
BÖLÜM 2	
ALÜMİNYUM ve DÖKÜM	6
2.1 Alüminyumda Gaz	8
2.1.1 Hidrojen	8
2.2 Oksit Filmi	14
2.2.1 Sürekli ve Süreksiz Filmler	15
2.2.2 Al-Si-Mg Alaşımlarında Oksitlenme Davranışı	16
2.2.3 Eski ve Yeni Oksitler	17
2.2.4 Oksit Filmlerinin Döküm Parçalarında Hapsolması	21
2.2.5 Oksit Filmlerinin (Bifilm) Morfolojik Olarak Gelişimi	22
2.2.5.1 Hidrojen Nüfuziyeti	24
2.2.5.2 Dentrit Büyümesi	25
2.2.5.3 Hacimsel Çekinti	25
2.2.5.4 Metaller Arası Bağ Yapan Fazlar (İntermetalik)	25
2.3 Gözeneklilik.....	26
2.3.1 Hidrojen Gözenekliliği.....	27
2.3.1.1 Çekirdeklenme	27
2.3.1.2 Büyüme	30

2.3.2	Çekinti Gözenekliliği	33
2.4	İkincil Alüminyum Ergitilmesi ve Geri Dönüşümü.....	34
2.5	Ergiyik Temizlenmesi ve Ölçüm Yöntemleri.....	35
2.6	Katıfki Ölçüm Yöntemleri.....	36
2.6.1	Gözenekli Disk ile Süzerek Analiz (PoDFA ve PREFIL)	36
2.6.2	Sıvı Metal Temizlik Analizcisi (LiMCA)	38
2.6.3	Ultrason	39
2.6.4	Vakum Altında Katılaştırma Testi (VAK = RPT)	40
2.6.5	Bifilm İndeksi (Bi).....	41
2.7	Gaz Giderme	45
2.8	Eritkenleme (Flakslama)	48
2.8.1	Örtü Eritkenleri	51
2.8.2	Aritma Eritkenleri	53
2.8.3	Gaz Giderme Eritkenleri	54
2.8.4	Curuf Çekme Eritkenleri	54
2.8.5	Alüminyum – Tuz Etkileşimi.....	55
2.8.5.1	Eritken Kullanımı ile Katıfki Giderilmesi.....	57
2.8.5.2	Eritken ile Alüminyum ve Alüminyumdaki Katıfklar Arasındaki Arayüzey Gerilimi.....	60
2.9	Süzme (Filtrasyon)	62
2.10	Weibull İstatistiği	64
BÖLÜM 3		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		
3.1	Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar.....	67
3.1.1	Birincil Alüminyum Külçesi	67
3.1.2	İkincil Alüminyum (Talaş).....	68
3.1.3	Gaz Giderme	69
3.1.4	Eritken.....	70
3.1.5	Kalıp Ayırıcısı.....	71
3.1.6	Kalıp Malzemesi.....	71
3.1.7	Ergitme Ünitesi	72
3.1.8	Çekme Testi	73
3.1.9	Döküm Deneyleri	74
3.1.10	Vakum Altında Katılaştırma (VAK) Cihazı	75
3.1.11	Gaz Giderme ve Eritkenleme	76
3.1.12	Ergitme İşlemi.....	77
3.1.13	Bifilm İndeksi ve % Çekinti Oranının Tespiti.....	78
3.1.14	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	81
BÖLÜM 4		
DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....		
4.1	Bifilm İndeksi – Mekanik Özellikler İlişkisi	82
4.1.1	Bifilm İndeksi (Bi) – Çekme Dayancı İlişkisi.....	82
4.1.2	Bifilm İndeksi (Bi) – Kopma Uzaması İlişkisi.....	90
4.1.3	Bifilm İndeksi (Bi) - % Çekinti.....	92

4.2	Weibull İstatistiği ile Mekanik Özelliklerin İrdelenmesi.....	95
4.2.1	Weibull İstatistiği – Çekme Dayancı İlişkisi.....	96
4.2.2	Weibull İstatistiği – Kopma Uzaması İlişkisi.....	101
BÖLÜM 5		
GENEL SONUÇLAR.....		119
KAYNAKLAR.....		126
ÖZGEÇMİŞ.....		143



SİMGE LİSTESİ

W_0	Oksidin moleküler ağırlığı, gr
W_M	Metalin moleküler ağırlığı, gr
d_0	Oksidin yoğunluğu, gr/cm ³
d_M	Metalin yoğunluğu, gr/cm ³
σ	Çekme dayancı, MPa
κ	Kırılma tokluğu, J
ΔB_i	Bifilm İndeksi farkı, mm
mJ	mili Joule (= 10 ⁻³ J)

KISALTMA LİSTESİ

Bi	Bifilm İndeksi (mm)
GGÖ	Gaz Giderme Öncesi
GGS	Gaz Giderme Sonrası
LiMCA	Sıvı Metal Temizlik Analizcisi (Liquid Metal Cleanless Analysis)
PoDFA	Gözenekli Disk Süzme Analizi (Porous Disk Filtration Analysis)
RPT	Reduced Pressure Test
VAK	Vakum Altında Katılaştırma
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
UTS	Azami Çekme Dayancı (Ultimate Tensile Strength)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Sıcaklığa bağlı hidrojen çözünürlüğü.....	10
Şekil 2.2 Saf alüminyum ile 356 ve 319 alaşımlarının hidrojen çözünürlüğü açısından karşılaştırılması.....	11
Şekil 2.3 Al ergiyiğine H geçişini içeren basamaklar.	12
Şekil 2.4 Hidrojen ve bifilmin yapı içerisinde bulunması. a) Bifilmin olmaması durumunda hidrojenin aşırı doymun davranışı. b) Bifilmeler arasındaki boşluklara hidrojenin yayını ve gözenek oluşumu.	13
Şekil 2.5 Ergiyik alüminyum üzerini kaplayan alüminyum oksit filmi.....	15
Şekil 2.6 Kısmi oksijen basıncı ile %Mg bileşimine bağlı olarak oluşan oksit fazları.....	17
Şekil 2.7 a) Alüminyum alaşımının yüzeyindeki oksit filminin şematik görüntüsü. Gerilmelere maruz kalmasının neticesinde filmdeki olası yırtılma (ve aniden yeniden oluşum). b) Hava veya gaz ile ergiyiğin arayüzeyinin karşılaştığı yüzey oksit filminin detaylı görünüşü.....	18
Şekil 2.8 Al ₇ SiMg (A356) alaşımının taramalı elektron mikroskobundan ikincil elektron özelliği ile alınmış (a) "eski oksit" ve (b) "yeni oksit" görüntüleri. ..	20
Şekil 2.9 Al ₇ SiMg (A356) alaşımındaki karmakarışık oksit filmini gösteren optik mikroskobu görüntüsü	20
Şekil 2.10 Gaz kabarcıkları ile ilişkili olan bifilmelerin hapsolmesine neden olan yüzey burgacının şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.11 Döküm Al-Si-Mg alüminyum alaşımının kırılma yüzeyindeki çift katlı oksit filmi (bifilm) kusurunun taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	22
Şekil 2.12 Oksit filmlerinin (bifilm) şişmesi ve açılması	23
Şekil 2.13 Bir gözenegın çekirdeklemesi için gerekli enerji değişimleri.	29
Şekil 2.14 Katılaşma sırasında oluşmuş gaz gözenekliliği.	31
Şekil 2.15 Besleme mekanizmaları.	33
Şekil 2.16 Notorp marka hidrojen ölçer.....	35
Şekil 2.17 Gözenekli Disk Süzme Analizi (PoDFA).	37
Şekil 2.18 (a) PREFIL cihazı, (b) PREFIL yönteminin uygulamasının şematik gösterimi. ..	38
Şekil 2.19 LiMCA sisteminin şematik gösterimi.	39
Şekil 2.20 Ultrasonik yöntem ile katışkuların belirlenmesinin şematik gösterimi.....	40
Şekil 2.21 Vakum altında katılaştırma cihazı (VAK).	41
Şekil 2.22 Bifilm İndeks ölçümü.	43
Şekil 2.23 Bir çift katlı oksit filminin (bifilm) şematik gösterimi.	44

Şekil 2.24 (a) VAK testi numunesinin gaz giderme ve eritkenleme işlemi öncesindeki görüntüsü ve (b) sonrasındaki görüntüsü.	44
Şekil 2.25 Döner gaz giderme cihazının şematik gösterimi.	46
Şekil 2.26 Tepkimez gazlar kullanılarak hidrojen giderilmesi.	47
Şekil 2.27 Farklı türdeki gaz giderme aparatlarının kabarcık boyutları ve dağılımları (a) üfleç, (b) döner gaz giderme kafası (rotor)	47
Şekil 2.28 Bileşim ile NaCl–KCl karışımının ergime noktasının değişimi.....	48
Şekil 2.29 Parçacık boyutuna bağlı ergiyik alüminyumda farklı tipteki katışıkların derişimleri.....	50
Şekil 2.30 Alüminyum – tuz arayüzey gerilimi.....	52
Şekil 2.31 Na ₂ SiF ₆ 'nın Al ₂ O ₃ 'ü parçalayarak ergiyik metali arıtma etkisi. (a) Na ₂ SiF ₆ eklenmeden önce, (b) Na ₂ SiF ₆ eklendikten sonra.	53
Şekil 2.32 Flor esaslı tuzların oksit filmi üzerine etkileri. (a) metalin oksit filmine yapışması, (b) oksit tabakası boyunca eritkenin nüfuz etmesi, (c) metalin genişlemesi ve küresel bir geometri kazanması.....	55
Şekil 2.33 723 °C'deki çeşitli sülfürler, oksitler, klorürler ve florürlerin oluşumunun Standart Gibbs enerjiler	56
Şekil 2.34 723 °C'deki alüminyum, farklı metal klorürler ve florürler arasındaki denge.....	57
Şekil 2.35 Sabit dv/dk'daki iki Cl ₂ miktarı için zamanla SiC katışığı yüzdesi değişimi (A356)	58
Şekil 2.36 NaCl-KCl karışımına KF'in ilavesi ile Al ₂ O ₃ katışıklarının yüzdesindeki değişim.....	59
Şekil 2.37 Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Al ile eş-molarlı NaCl-KCl arasındaki arayüzey gerilimi.....	61
Şekil 2.38 727 °C (1000 K)'deki NaF miktarının bir fonksiyonu olarak arayüzey gerilimi.....	62
Şekil 2.39 Farklı şekillerdeki köpük süzgeçleri	63
Şekil 2.40 İkincil alüminyum üretimindeki katışıki derişimi üzerine gaz giderme ve seramik köpük süzgeci kullanımının etkileri.....	64
Şekil 3.1 Birincil alüminyum külçesi.....	68
Şekil 3.2 İkincil alüminyum (talaş).	68
Şekil 3.3 Döner gaz giderme cihazı.	69
Şekil 3.4 Bor nitrür kalıp ayırıcısı.....	71
Şekil 3.5 Kokil kalıp (a) Çekme çubuğı, (b) Ördek ayağı.....	72
Şekil 3.6 İndüksiyon ocağı.....	72
Şekil 3.7 Çekme testi numunesi.....	73
Şekil 3.8 Çekme testi cihazı.....	74
Şekil 3.9 Ergitme sırasında karşılaşılan yanlış talaş eklenmesi.	75
Şekil 3.10 Vakum altında katılaştırılma (VAK) cihazı.....	76
Şekil 3.11 Gaz Giderme İşlemi	77
Şekil 3.12 Görüntü analiz yazılımındaki görüntüler. (a) taranmış numune, (b) karşıtlık oluşturulmuş numune ve (c) numunenin analiz edilmesi ve elde edilen veriler	79

Şekil 3.13 Görüntü analiz yazılımındaki görüntüler. (a) taranmış numune, (b) karşıtlık oluşturulmuş numune ve (c) numunenin analiz edilmesi ve elde edilen veriler.	80
Şekil 3.14 % çekinti ölçümü için kullanılan numuneler (a) kalın kesitli (24 x 40 mm), (b) ince kesitli (17 x 40 mm).	81
Şekil 3.15 % çekinti ölçümü için kullanılan numuneler (a) kalın kesitli (24 x 40 mm), (b) ince kesitli (17 x 40 mm).	81
Şekil 4.1 Bifilm İndeks ile Çekme Dayancı arasındaki genel ilişki (GGÖ).	83
Şekil 4.2 Bifilm İndeks ile Çekme Dayancı arasındaki genel ilişki (GGS).	83
Şekil 4.3 Farklı ticari Na_3AlF_6 (Kriyolit Modülü = 3) miktarları (NaCl-KCl) için Bİ-Çekme Dayancı ilişkisi.	84
Şekil 4.4 Farklı Na_2SiF_6 (NaCl-KCl) miktarlarındaki Bİ-Çekme Dayancı ilişkisi.	85
Şekil 4.5 Farklı $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 1,85$ (NaCl-KCl) için Bİ-Çekme Dayancı ilişkisi.	86
Şekil 4.6 Farklı NaF miktarları (NaCl-KCl) için Bİ – Çekme Dayancı ilişkisi.	87
Şekil 4.7 Farklı $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 2,7$ (NaCl-KCl) için Bİ-Çekme Dayancı ilişkisi.	87
Şekil 4.8 Farklı $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 3$ (NaCl-KCl) için Bİ-Çekme Dayancı ilişkisi.	88
Şekil 4.9 Farklı Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) için Bİ-Çekme Dayancı ilişkisi.	90
Şekil 4.10 Bifilm İndeksi ile Kopma Uzaması arasındaki genel ilişki. (GGÖ)	91
Şekil 4.11 Bifilm indeksi ile kopma uzaması arasındaki genel ilişki. (GGS)	92
Şekil 4.12 Çekinti davranışı üzerine bifilmelerin ve hidrojen derişiminin etkileri	93
Şekil 4.13 Bifilm İndeksi ile % çekinti arasındaki genel ilişki (GGÖ).	94
Şekil 4.16 Farklı Ticari Na_3AlF_6 (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayancı verilerinin Weibull ilişkisi.	96
Şekil 4.17 Farklı Na_2SiF_6 (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayancı verilerinin Weibull ilişkisi.	97
Şekil 4.18 Farklı $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 1,85$ (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayancı verilerinin Weibull ilişkisi.	97
Şekil 4.19 Farklı NaF (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayancı verilerinin Weibull ilişkisi.	98
Şekil 4.20 Farklı $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 2,7$ (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayancı verilerinin Weibull ilişkisi.	99
Şekil 4.21 Farklı $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 3$ (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayancı verilerinin Weibull ilişkisi.	100
Şekil 4.22 Farklı Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayancı verilerinin Weibull ilişkisi.	100
Şekil 4.23 Farklı Ticari Na_3AlF_6 (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayancı verilerinin Weibull ilişkisi.	101
Şekil 4.24 Farklı Na_2SiF_6 (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen kopma uzaması verilerinin Weibull ilişkisi.	102
Şekil 4.25 Farklı $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 1,85$ (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen kopma uzaması verilerinin Weibull ilişkisi.	102
Şekil 4.26 Farklı NaF (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen kopma uzaması verilerinin Weibull ilişkisi.	103
Şekil 4.27 Farklı $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 2,7$ (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen kopma uzaması verilerinin Weibull ilişkisi.	104

Şekil 4.28 Farklı NaF/AlF ₃ = 3 (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen kopma uzaması verilerinin Weibull ilişkisi.....	104
Şekil 4.29 Farklı Na ₂ SiF ₆ (MgCl ₂ -KCl) eritkenlerinden elde edilen % kopma uzaması verilerinin Weibull ilişkisi.....	105
Şekil 4.30 Farklı eritken bileşimleri ile çekme dayancı ilişkisi.....	106
Şekil 4.31 Farklı eritken bileşimleri ile kopma uzaması ilişkisi.....	107
Şekil 4.32 Farklı eritken bileşimleri ile tokluk ilişkisi.....	107
Şekil 4.33 Farklı eritkene göre GGÖ ve GGS Bifilm İndeks değişimi ile kopma uzaması arasındaki ilişki.	109
Şekil 4.34 Farklı eritkene göre GGÖ ve GGS Bifilm İndeks değişimi ile çekme dayancı arasındaki ilişki.	110
Şekil 4.35 Farklı eritkene göre GGÖ ve GGS Bifilm İndeks değişimi ile tokluk arasındaki ilişki.	111
Şekil 4.36 Hacimsel hata oranına göre kopma uzaması değişimi.....	112
Şekil 4.37 Çekme testi numunelerinin kırık yüzeyindeki SEM görüntüleri.....	114
Şekil 4.38 Çekme testi numunelerinin kırık yüzeyindeki eritken/oksitin SEM görüntüleri.....	115
Şekil 4.39 VAK numunelerinin gözenek içerisindeki eritken/oksit görüntüleri.....	118

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Birincil ve ikincil sıvı alüminyumdaki genel safsızlıklar.....	8
Çizelge 2.2 Döküm parçalarında meydana gelen oksit filmlerinin karakteristikleri	19
Çizelge 2.3 Katılma sırasındaki tepkimeler	26
Çizelge 2.4 Alüminyum dökümlerindeki gözenek oluşumuna etki eden unsurlar.	31
Çizelge 2.5 Oksit tespiti ve ölçüm yöntemleri.....	36
Çizelge 2.6 Alüminyum alaşımları için eritken olarak kullanılan bazı bileşiklerin karakteristikleri.....	49
Çizelge 2.7 Genel olasılık tahmin ediciler	66
Çizelge 3.1 Birincil alüminyumun külçesinin kimyasal bileşimi.	68
Çizelge 3.2 Talaşın kimyasal bileşimi.	68
Çizelge 3.3 Eritken bileşimi haritası.	70

ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ SIVI METAL KALİTESİNİN ARTTIRILMASI

Çağlar YÜKSEL

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof.Dr.Mustafa ÇİĞDEM

Döküm alaşımlarının mekanik özellikleri doğrudan doğruya içyapı kusurlarından etkilenmektedir. Bu kusurların karakteristik davranışlarını, oluşum mekanizmalarını ve birbirleri ile olası etkileşimlerinin anlaşılması ve bu olguların doğru bir şekilde yönetilmesi ile döküm parçalarının mekanik özellikleri (örn. yorulma dayancı) dolayısıyla da çalışma ömürleri gibi dolaylı özellikleri geliştirilebilir. Birincil alüminyumdan üretilen malzemelerin dökümü ya da daha doğru bir ifade ile kalıp dolumu sırasında yolluk tasarımı, döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, döküm hızı, vs. gibi parametrelerden herhangi biri hatalı tasarlanmaz/seçilmez ise büyük ihtimalle döküm malzemesinden istenen şartnamedeki değer aralıkları elde edilebilir. Ancak ikincil alüminyum yani hurda malzeme kullanılarak ergitme işlemi yapılıyorsa, mutlak suretle dikkatli ve çok doğru sıvı metal işlemleri yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde örneğin son derece iyi yolluk tasarımına sahip uygun döküm sıcaklığı seçilerek yapılan döküm işleminde dahi döküm malzemesinde muhakkak döküm hataları oluşacaktır.

Alüminyum ve alaşımlarının dökümlerinde ise en genel karşılaşılan döküm hatalarının başında katlanmış oksit filmleri yani çift-katlı oksitler (bifilm) gelmektedir. Bu çalışmada alüminyum alaşımlardan en yaygın olarak kullanılan $Al7Si0,3Mg$ (A356) alaşımının hurdasından yüksek kalitede malzeme üretimi üzerine odaklanılmıştır. Ergitme esnasında kullanılan şarjda birincil ve ikincil alüminyum oranları yüzdesel olarak birbirine eşittir (ağ.%50 birincil + ağ.%50 ikincil). Sıvı metal işlemlerinin en önemli basamakları gaz giderme ve eritkenlemedir (flakslama). Deneylerde kullanılan gaz

giderme cihazı sanayide kullanılan cihazların laboratuvar ölçeğine düşürülerek gaz giderme prosesi etkin bir şekilde gerçeği yansıtmayı sağlamıştır. Gaz giderme işleminde %99,9 saafiyette Ar gazı ve eritkenleme işleminde ise metal ağırlığının %2'si kadar eritken kullanılmıştır. Eritken kullanılarak askıda kalan katışıkları (inklüzyon) yani bifilmelerin giderilmesi amaçlanmıştır. Bifilm yapı içerisinde kolayca fark edilemeyebilirler. Bifilmelerin tespiti için en kolay, hızlı, tekrarlanabilir test yöntemi vakum altında katılaştırma (VAK=RPT) cihazı kullanılarak yapılan Bifilm İndeksi'dir. Bifilm İndeksi ile askıda kalan çift katlı oksitlerin açılması sağlanarak sıvı metal kalitesinin sayısallaştırılması sağlanmıştır.

Yedi farklı türdeki eritkenlere ilave bileşiklerin eklenmesi ile hazırlanan eritkenlerle yapılan dökümlerden elde edilen numunelere çekme testi uygulanmıştır. Çekme testinden kopma uzaması, çekme dayancı, tokluk değerleri üretilerek alaşımın ayırt edici mekanik özellikleri ortaya çıkartılmıştır. En yüksek kopma uzaması değerleri Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) karışımlarından sağlanmıştır. Çekme dayancı ve tokluk değerlerinde ise $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 1,85$ ile NaF karışımlarından oluşan eritken gruplarının Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) karışımı ile yarış halinde olduğu görülmektedir. Bu iki mekanik özellik arasında Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) karışımı eritkenler ikinci sırada yüksek özellik göstermelerine rağmen diğer iki eritken grubunda standart sapmalar çok yüksek olmasından dolayı istikrarlı ve güvenilir sonuçlar elde edilemeyecektir. Bununla birlikte Bİ farkının yani giderme oranının en yüksek olduğu eritken de Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) karışımıdır. Genel olarak döküm haliyle (as-cast) çekme dayanımları 180 MPa civarlarında seyrederken kopma uzaması değerleri eritkenin cinsine ve eklenme oranına bağlı olarak %1 – 8,5 aralığında ve tokluk değerleri de 279 – 900 mJ aralığında değişmektedir. Katışıkları kopma uzaması ve tokluk değerleri üzerine doğrudan ve keskin etkilere sahip olmalarından dolayı çekme dayancısının aslında malzeme seçimi ve tasarımında kopma uzaması ve tokluk gibi çok da önemli bir ölçüt olmadığı bu tezle de bir kere daha ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Bifilm İndeksi, Döküm, Geri Dönüşüm, $\text{Al}_7\text{Si}_0.3\text{Mg}$, A356, Mekanik Özellikler, Bifilm, Çift Katlı Oksitler, Vakum Altında Katılaştırma.

IMPROVING LIQUID METAL QUALITY OF ALUMINUM AND ITS ALLOYS

Çağlar YÜKSEL

Department of Metallurgical and Materials Engineering

PhD. Thesis

Advisor: Prof.Dr.Mustafa ÇİĞDEM

Mechanical properties of the casting alloys are directly affected by structural defects. By understanding the characteristic behaviors, formation mechanism and revealing the interactions with each other of these defects, mechanical properties and working life of casting parts can be improved. If the smelting process is performed with primary aluminum alloy and the conditions even an accurate statement mold filling, runner design, casting temperature, molding temperature, casting speed are chosen accurately most likely the properties of casting part will be in the range of desired specifications. However, if the smelting process is done by using secondary or scrap aluminum alloy it is vital to perform very careful and accurate melt treatment operations. Otherwise even in the best runner designed or most accurate temperature selected operations are cannot be impeccable. Folded double oxide films (bifilms) are one of the most common problems encountered during casting aluminum and its alloys. Al7Si0.3Mg (A356) is most widely used aluminum casting alloy and in this study it was focused on to production of high quality material from the scrap of this alloy. Primary and secondary aluminum rates used in the charge are equal (wt.%50 primary + wt.%50 secondary). Most important stages of melt treatment are degassing and fluxing. In degassing Ar gas with high purity levels and in fluxing fluxes with wt.%2 of the liquid metal weight were used. Degassing equipment is the laboratory scale of the industrially used degassing device. By using this device degassing process is tried to simulate as is on the industrial

applications. By using fluxes, it is aimed to eliminate the inclusions and bifilms. Bifilms may not be observed easily in the melt. Easiest, fastest and most reproducible test method for determining bifilms is calculating bifilm index by using reduced pressure test device (RPT). It is aimed to quantify the melt quality using bifilm index by opening the suspended double oxides films in the melt.

Tensile tests were performed via cast specimens obtained from seven different flux mixtures include some additives with different portions from %5 to %40. From tensile test, elongation, tensile strength and toughness values were retained and characteristic values of alloy were established. Highest elongation values were assigned from mixtures of Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) fluxes. On the other hand, both highest tensile strength and toughness values run against $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 1,85$ and Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) flux mixtures. Even though in these two mechanical properties Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) mixtures have second highest values among two other flux mixtures, Na_2SiF_6 (NaCl -KCl) and $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 1.85$, standart deviation of these two fluxes are bigger than Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) fluxes, thus this makes this flux more reliable, consistent and viable against them. However highest BI difference were obtained from Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) mixtures. In general all the cast specimens exhibit about 180 MPa tensile test values whilst elongation and toughness values are evolved due to both flux type and addition portions from %1 – 8,5 and 279 – 900 mJ, respectively. Actually with this thesis, in material selection and design criterias it is revealed once more that tensile strength is not a specific criteria like elongation and toughness, since inclusions have direct and sharp effects on elongation and toughness instead of UTS.

Keywords: Aluminium, Bifilm Index, Casting, Recycling, $\text{Al}_7\text{Si}_0.3\text{Mg}$, A356, Mechanical Properties, Bifilm, Double Oxide Films, Reduced Pressure Test.

1.1 Literatür Özeti

Alüminyum ve alaşımları özellikle düşük yoğunluk/yüksek mukavemet aranan yerlerde gün geçtikçe yer bulmaktadır. Alüminyum parçaları en yoğun olarak otomotiv, uzay-havacılık ve denizcilik sanayilerinde kullanılmaktadır [1]. Binlerce çeşit alüminyum alaşımının uygulama alanı vardır ancak bunlardan en önemlisi ve en kritik olanı otomotiv jantlarıdır. Otomotiv jantlarının en yoğun olarak kullanıldığı alüminyum alaşımları ise Al7Si0,3Mg (A356) ile Al7Si3Cu (A380)'dır. Bu iki alaşımdan da öne çıkan alaşım A356 yani Al7Si0,3Mg alaşımıdır. Farklı döküm yöntemlerinin (örn. basınçlı döküm, kum kalıba döküm) hemen hepsine uygun olan A356 alüminyum alaşımının yüksek akışkanlığı, hafifliğine nazaran mukavemet değerlerinin yüksek olması ve nispeten iyi korozyon dayancısı tercih edilmesinin en büyük sebeplerinden birisidir.

Döküm parçalarında malzeme gözetmeksizin içyapıdaki kusurlar alaşımın karakteristiğini ortaya koymaktadır. Bunun için herhangi bir malzemenin döküm ile üretimi sırasında bu kusurların oluşumunu iyi anlamak gerekmektedir [2]. Bu yüzden son zamanlarda özellikle mekanik özellikler ile doğrudan ilişkili olan bu döküm kusurları üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. En önemli döküm kusurlarının başında çift katlı oksit filmleri ve hidrojen gözenekliliği gelmektedir. Hidrojen alüminyum sıvı metalinde dikkate değer biçimde çözünen tek gazdır [3]. Ergiyik alüminyum ve alaşımlarındaki hidrojen soğuma ve katılaşma sırasında çökerek külçe veya şekilli parçalardaki gaz gözenekliliğinin temelini oluşturmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarının dökümlerinde gözeneklilik mekanik özelliklere, sızdırmazlığa ve yenim dayanımına zararlı etkiye sahiptir [4], [5], [6]. Bu yüzden yüksek kalitede dökümler üretmek için ergiyik alüminyum içerisinde

çözünmüş hidrojenin giderilmesi gerekmektedir [7]. Sıvı metaldeki hidrojen miktarlarını düşürmek için birçok yöntem vardır. Bunlar vakumlu gaz giderme, ultrasonik gaz giderme gibi karmaşık ve nispeten pahalı yöntemlerin yanında azot, argon veya tepkimez gazlar ile klor gazının bir karışımı veya eskiden dökümhanelerde yaygın olarak kullanılan hegzakloreten (C_2Cl_6) gibi tablet ile gaz giderme prosesleridir [8], [9], [10], [11]. Mevcuttaki gaz giderme yöntemleri alüminyum sıvı metalinin arıtılmasında muhtelif etkili derecelere sahip olmasına rağmen özellikle Cl_2 gazından kaynaklı çevresel sorunlarına neden olması ve büyük oranda yatırım maliyeti gerektirmesi bu uygulamayı kısıtlamaktadır [6].

Sıvı metal kalitesini belirleyen bir diğer parametre de çift katlı oksit filmleridir. Bu oksitler ergitme esnasında sıvı metalin hava ile temas ettiği yerlerin dışında kalıp dolumu sırasında da oluştuğu bilinmektedir. Eğer yeterince düzgün bir şekilde tasarlanmayan bir yolluk sistemi ile döküm yapılıyor ise oluşan bu oksitler farklı kalınlıktaki giriş yollukları, parça kesitleri, vs. gibi sıvı metalin aniden hızlanabildiği bölgelerde burgaca sebep olabilmektedir [2]. Döküm malzemesindeki kusurları teşkil eden bu oksitlerden en az zararlı döküm işlemi yapmanın yolu kalıp dolumu sırasında oluşan bu oksitleri hiç oluşturmamaktır [4]. Bu yüzden kaliteli ürünlerin üretimi ergiyiğin kalitesinin kontrolü ile gerçekleşmektedir [1]. Bununla birlikte oluşan oksitlerin giderilmesi için klor ve flor esaslı tuzlar kullanılmaktadır. Bu tuzlar karışımına bağlı olarak ergiyik alüminyum prosesinde önemli bir rol oynarlar. Oksidasyondan metali korumak için pasif bir halde kullanılmaktadırlar ve bazen de katışkıların (inklüzyon), alkali metallerin ve magnezyumun giderilmesinde kullanılabilirler. Birçok tuz eritkenleri KCl-NaCl veya KCl-MgCl₂ ikili sistemlerine dayanmaktadır. Bu tuzlara ilave bileşikler diğer klorları, florları, nitratları, karbonatları veya sülfatları içermektedir [12]. Günümüzde alüminyum alaşımlarının ergiyiklerinde mevcut olabilen bu çok ciddi kusurları tanımlayabilen ve sınıflandırabilen tek başına bir "kalite testi" yoktur. Potansiyel hata mekanizmalarından sorumlu bu kusurların tespiti ve sayısallaştırılması amacı ile vakum altında katılaştırma testi (VAK-RPT) kullanılarak Bifilm İndeksi tespit edilmiştir [1]. Dökümden önce sıvı alüminyumun gaz miktarını denetlemek için geniş bir ölçekte VAK kullanılmıştır. VAK testi kullanılarak tayin edilen Bifilm İndeksi yüksek maliyetli ekipmanlara nazaran ucuz

ve basit bir yöntemdir. Lakin yeniden tekrarlanabilirlik kullanıcıya doğrudan bağlıdır [13]. Bu indeks bütün alüminyum ve alaşımlarına uygundur.

1.2 Tezin Amacı

Uzun yıllardır metal dökümcüler yüksek tonajda malzeme üretimine odaklanmışlardır. Lakin günümüzde özellikle hafiflik, enerji maliyetleri, yüksek dayanım, uzun ömür, yenim gibi özelliklerin gereksinimi artmaya başladıkça artık sürekli üretimi değil kaliteli üretimi düşünme vaktinin geldiği anlaşılmıştır.

Alüminyum ve alaşımları çelik ya da titanyum kadar yüksek mukavemete sahip olmamasına rağmen yüksek dayanım/yoğunluk modülüne göre diğer tüm mühendislik alaşımlarından sıyrılarak ön plana çıkmaya başlamıştır. Uzay ve havacılık ile otomotiv gibi önemli ve kritik parça ihtiyacının en üst düzeyde olması gerektiği sanayilerde gün geçtikçe alüminyum ve alaşımlarının kullanımı artmaktadır. Yüksek yorulma dayanımı, termal gerilmelere dayanım gerektiren özellikle silindir kafaları, jantlar, fan ve pompaların çerçeveleri veya yüke maruz kalması istenen kritik parçalarda AlSiMg alaşımları kullanılmaktadır.

Alüminyum doğası gereği sıvı faza geçer geçmez havadaki nem ile tepkimeye girerek kolayca Al_2O_3 yüzey filmi oluşturur ve açığa iyon halinde sıvı içerisinde çözülmüş hidrojen gazı çıkartır. Alüminyumun sıvı metal kalitesini düşürmek için sadece bu iki olgu bile kâfidir. Ne yazık ki cevherden elde edilen birincil alüminyum külçelerinin ergitilmesinde dahi çoğu kez denetimsiz yapılan dolum ya da sıvı metal prosesleri metalin kalitesini ciddi bir şekilde düşürmektedir. Sıvı metalin buna benzer kötü muamelelerine ilave olarak üreticiler maliyeti düşürmek için kendi döndüsü, hurdası ya da talaşını da şarja ekleyerek sıvı metalin kalitesinin düşmesini tetikleyebilmektedirler. Dökümcülükte çok önemli bir kavram olan modül yani hacim/yüzey alanı oranı ne denli artarsa malzemenin ergitilmesinde o kadar az sorun yaşanır. Bilindiği üzere talaş gibi çok düşük modüle sahip malzemelerin ergitilmesi sırasında büyük sorunlar ile karşılaşmaktadır. Yüzey alanının çok fazla olmasından dolayı hızlı bir şekilde oksitlenerek şarjı kirletmektedir.

Tezin amacı hem ülkemize maliyet açısından bir ferahlık hem de çevresel unsurları göz önüne alarak gelecek nesillere daha temiz ve bozulmamış bir doğa bırakmak amacıyla

bu düşük modüle sahip talaşların (hurdaların) yeniden ergitilerek geri dönüştürülmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda hazırlanacak şarjın içeriğini %50 birincil alüminyum külçesi ve %50 ikincil alüminyum teşkil edecektir. Sıvı metal temizliğinin tayini vakum altında katılaştırma cihazı kullanılarak Bifilm İndeksi ile sayısallaştırılacaktır. İstlenen Bifilm İndeksi tarafından belirlenen aralıklar içerisinde olmayan malzemelerin sıvı metal temizlikleri gaz giderme prosesi ve eritkenleme işlemlerine tabi tutulacaktır. Gaz giderme işlemi Ar gazı üflenerek gerçekleştirilecektir. Eritkenleme işlemi ise sıvı metal ağırlığının %2'sine tekabül edecek şekilde hazırlanan klor ve flor esaslı tuzların karışımı ile yapılacaktır. Eritkenler düşük ergime sıcaklığına sahip olacak şekilde tasarlanacaktır. Böylece sıvı ile temasında hızlı bir şekilde sıvı faza geçerek olası katışkılar ile karşılaşması sağlanacaktır.

Dökümün mekanik özellikleri çekme testi verileri (dayanç, kopma uzaması, tokluk) ile kıyaslanacaktır. Ördek ayağı diye ifade edilen farklı kesit kalınlıklarına sahip kalıplara döküm yapılarak % çekinti oranı ile Bifilm İndeksi ile karşılaştırılarak ilişkilendirilecektir. Elde edilen numuneler içyapısal olarak taramalı elektron mikroskobu ile incelenecektir.

Ayrıca literatürde sıkça rastlanan ikincil alüminyumun kullanımının malzeme özelliklerinin kötü yönde etkilemesi araştırılması ile özellikle ülkemizde bu alandaki akademik çalışma eksikliğinin giderilmesi ve özellikle sanayide ortaya çıkan malzeme kayıplarının ve kullanım yerindeki malzeme sorunlarının giderilmesi amaçlanmaktadır.

1.3 Hipotez

Al7Si0,3Mg alüminyum alaşımı en geniş çapta kullanılan alüminyum alaşımlarından birisidir. Genellikle bu alaşım dinamik ya da statik yükler altında çalıştığından içyapıda mümkün mertebe gözenekliliğin olmadığı ve katışkı içermeyen bir döküm gerçekleştirilmesi arzulanır. Bu sebeple olası döküm kusurlarına mahal vermemek adına bu alaşımın büyük çoğunluğu birincil alüminyumdan üretilmektedir. Lakin birincil alüminyum üretimi sırasındaki meşakkatli prosesler, çevreye verdiği zararlar ve üretimi sırasındaki enerji ve malzeme maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda birincil alüminyumun tek başına kullanılmaması gerektiği açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Tez kapsamında esasen bu gerekçelerden destek alarak geometrisinin karmaşıklığı gözetilmeksizin üretilecek herhangi bir malzemenin en azından ilk başta yarısının ikincil

alüminyumdan oluşacak şekilde kurgulanmıştır. Bu deneysel matris bile oldukça geniş parametreler içerdiğinden şarjda kullanılacak malzeme oranları sabit tutulacaktır. Buradaki en büyük değişken kullanılacak olan eritkendir. Eritken ile döner gaz giderme prosesi birlikte kullanılarak ergiyik içerisindeki katışkılarının ve safsızlıklarının giderilmesi amaçlanmaktadır.

Yedi farklı eritken karışımı denenecektir; Ticari kriyolit, $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 3$, $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 2.7$, $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 1.85$, Na_2SiF_6 ($\text{NaCl}-\text{KCl}$), Na_2SiF_6 (MgCl_2-KCl) ve NaF . İlk eritken grubu olarak $\text{NaCl}+\text{KCl}+\text{Na}_3\text{AlF}_6$ (ticari kriyolit)'dan oluşan bir karışımdır. İlk grup eritken bileşimleri belirlenirken Na_3AlF_6 oranı %5 aralıklarla %5'ten başlayarak %40'a kadar yükseltilecektir. NaCl ve KCl oranları bütün eritken karışımlarında eşit tutulmuştur. Bilindiği üzere temizleme flakslarının ana bileşenleri (matris) alkali klorürlerdir (NaCl , KCl , MgCl_2 , CaCl_2). Kriyolit, alüminyum üretim metalürjisinden de hatırlanabileceği üzere alüminyum oksit (Al_2O_3) çözücüsü olup aynı zamanda katışkılarını soğurabilme yeteneğine sahiptir. Kriyolit sıvı metal temizliğini önemli oranda artırabilmektedir. Bu nedenle çoğu eritken bileşiminde kriyolit bulunmaktadır. Eritken kullanılan ilk deney grubunda kriyolit modülü (NaF/AlF_3) = 3 'tür. Literatürde belirlenmiş en iyi kriyolit oranları dikkate alınarak $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{Na}_3\text{AlF}_6-\text{Na}_2\text{SO}_4$ ve Na_2CO_3 'ten oluşan bir denklik oluşturulacaktır. Sistemik bir şekilde değişik eritken grupları ile çalışmalara devam edilecektir. Önce kriyolit modülü değiştirilecektir. Kriyolit modülü sırasıyla laboratuvarında hazırlanacak olan NaF ile AlF_3 miktarının ayarlanması ile $\text{KM} = 3, 2.8$ ve 1.85 olarak değiştirilerek 1. Eritken grubu deneyler tekrar edilecektir. Daha sonra diğer bir alüminyum oksit çözücüsü olan Na_2SiF_6 katkılı eritkenlerle çalışmalar yapılacaktır. Ayrıca ana reaktif çözücü olarak NaF ihtiva eden eritkenlerle de deneyler gerçekleştirilecektir. Na_2SO_4 , ve CaCO_3 birlikte kullanılarak her birinin etkisi ortaya çıkarılarak bileşim optimizasyonu gerçekleştirilecektir.

ALÜMİNYUM VE DÖKÜM

Oldukça büyük ölçüde bilime ve mühendisliğe bağlı olan çağdaş teknolojilerden birisi olan döküm, insanlık tarihindeki en eski sanatlardan da birisidir. Milattan önce 5000'in sonlarına doğru insanlar bakır cevherini ergiterek neredeyse saf bakırı elde etmeyi öğrenmişlerdir. Saflaştırılmış bakır kabaca şekillendirilmiş arzu edilen nesne şekline göre açık kalıplara dökülmüştür. Katılaşmadan sonra döküm son halini elde etmesi için dövülmüştür. Kil potaları ve bazı dökümlerin örnekleri Anadolu'da bulunmuştur [14]. Milattan önce 3500'de önceki metalurjistler ilk döküm alaşımı olan arsenik bronzunu üretmeyi öğrenmişlerdir [14], [15].

İnsanlık kademeli olarak "demir çağından" tüm metal şekillendirme proseslerinin kullanıldığı "mühendislik malzemeleri" çağına geldikçe döküm prosesi bileşen tasarımından nihai bir ürüne en doğrudan ve en kısa yol olarak devamlılığını sürdürmektedir. Bu özelliği dökümü en büyük üretim proseslerinden biri yapar iken döküm alaşımlarını da oldukça geniş ölçekte kullanılan malzemelerin büyük bir kısmını oluşturacağı hale getirir. 2012 ile 2013 yılları arasında Dünya ekonomisi büyük oranda durgun halde iken döküm üretimi sırasıyla %2,4 ve %3,4 oranında büyümüştür. Döküm proseslerinin uzun ömürlü olmasının ana nedenler döküm alaşımları tarafından sağlanan fiziksel ve mekanik özelliklerin geniş kapsamlı olması, döküm prosesinin son şekline yakın şekil (near-net shape) kabiliyeti, prosesin çok yönlülüğüdür (gramdan yüzlerce tonlara kadar diğer üretim yöntemleri ile üretilmeyen girintili-çıkıntılı şekilli herhangi bir metalden dökümü). Dökümler karmaşık ekipmanların parçaları olmalarından dolayı

uygulamaların çoğunda “görünmez” durumda olmalarına rağmen tüm sanayi ürünlerin %90’ında kullanılmaktadır [15].

Alüminyumun mühendislik alaşımı olarak kendisine yer bulması Hall-Heroult prosesinin geliştirilmesi ile alüminyumun arıtılmasından sonraki döneme rast gelmektedir. 20.yy’ın ilk kısmında alüminyum dökümlerinin uygulamaları dekoratif parçalar ve yemek yapımında kullanılan araç-gereçler ile kısıtlı idi. Ancak II. Dünya Savaşı’ndan sonra alüminyum döküm sanayisinde dikkate değer bir yükseliş gerçekleşmiştir. Dünya çapında yaşanan enerji krizleri ve alüminyumun yüksek mukavemet/ağırlık oranından dolayı çoğu araçta döküm alüminyumun kullanımı artmıştır.

Özel bir uygulama için bir alaşımın seçimi genellikle üç değişkene bağlıdır;

- Dökülebilirlik (cüruf oluşturma eğilimi, kalıp geometrisi ve alaşım katılma karakteristikleri gibi karmaşık özelliklere bağlıdır)
- Mekanik özellikler
- Kullanım özellikleri

Alüminyum alaşımlarının dökülebilirliği akışkanlığı, sıcak yırtılma eğilimi ve çekinti karakteristikleri ile belirlenmektedir. Döküm alaşımları 0°C’den (ötektik alaşımlar) 140°C’ye kadar geniş bir katılma aralığına sahiptirler.

Mekanik özellikler genellikle ısı işlem görebilen ötektik alaşımları (A356, A357 – Al7SiMg) ve katı çözümlü alaşımları (A201) içeren alaşımlardan elde edilmektedir. Uzay ve havacılık sanayileri en yüksek seviyede mekanik özelliklere ihtiyaç duymaktadır. Bu özellikler tane inceltme, ötektik modifikasyon, safsızlık seviyesinin belirlenmesi gibi ergitme ve döküm uygulamalarının içerisindeki önemli parametrelerin sıkı bir şekilde denetimi ile elde edilebilir.

Kullanım özelliklerine göre döküm alaşımlarının seçimi işlenebilirlik, yemim dayanımı, sertlik ve mekanik özelliklere bağlıdır [16].

Alüminyum ve alaşımlarında sıvı fazda bazı safsızlıklar bulunabilir. Çizelge 2.1’de bu safsızlıkların birincil ve ikincil alüminyumda ne dereceye kadar kabul edilebildiği verilmiştir. Çizelge 2.1’den de görüldüğü gibi safsızlıkları hidrojen, tepkinir gazlar (magnezyumu içerir) ve katışkılar olmak üzere üç ana sınıfa ayırmak mümkündür.

Çizelge 2.1 Birincil ve ikincil sıvı alüminyumdaki genel safsızlıklar [17].

Safsızlık	Birincil alüminyumdaki derişimi	İkincil alüminyumdaki derişimi
Hidrojen	0,1 – 0,3 wppm	0,4 – 0,6 wppm
Katışkı	> 1 mm ² /kg (Al ₄ C ₃)	0,5 < mm ² /kg (Al ₂ O ₃ , MgO, MgAl ₂ O ₄ , Al ₄ C ₃ , TiB ₂)
Alkali		
Sodyum	30 – 150 ppm	< 10 ppm
Kalsiyum	2 – 5 ppm	5 – 40 ppm
Lityum	0 – 20 ppm	< 1 ppm

2.1 Alüminyumda Gaz

Çoğu döküm metallerinde olduğu gibi alüminyum ve alaşımlarında da katılşmada gaz/gazların mevcudiyeti nihai parçalarda büyük sorunlar teşkil etmektedir. Çünkü gazlar sıvı fazda belirgin şekilde yüksel çözünürlüklere sahip iken çoğu zaman aynı metalin katı fazında onlarca kat daha düşük çözünürlüklere sahiptir. Kabarcık olarak gazın varlığı ile dendritler arası çekinti prosesine katkısı gözenek oluşumunda önemli bir faktördür. Çözünmüş gazlar yeni gazlı ürünler üretmek için katılşmada kimyasal olarak tepkimeye girebilir. Sıvı metaldeki önemli gazlar şöyle sınıflandırılabilir [2], [18];

- (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

Tepkimez gazlar sıvılarda çözünmezler. Hidrojen gibi iki atomlu basit gazlar sıvı yüzeyinde gaz moleküllerinden atomlarında ayrışır. Karmaşık gazlar ise farklı bileşenler arasında kimyasal tepkimeye girmesi ile meydana gelmektedir [2].

2.1.1 Hidrojen

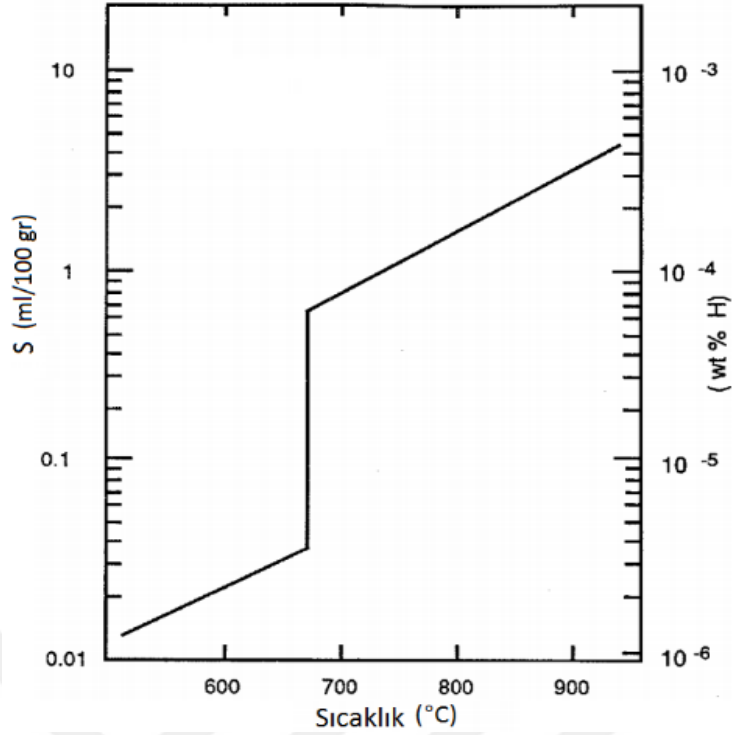
Hafif metaller ve alaşımları ergiyik fazlarında dikkate değer biçimde gaz soğururlar. Metalin yüzeyi tarafından soğurulan gazlar metalin içerisine atomik halde yayınabilme yeteneğine sahiptir. Oksijen, azot ve diğer gazlar sıvı metalin yüzeyinde kimyasal bileşikleri oluştururlar, bununla birlikte yığın sıvı içerisindeki çözeltide hesaba katılması gereken esas gaz olarak hidrojen göze çarpmaktadır [1], [2].

1880'de Dumas'ın ilk belirlemelerinden sonra çoğu araştırmacı katı alüminyumdaki hidrojen çözünürlüğünü ölçmek için girişimde bulunmuştur. Lakin elde edilen sonuçların yorumlanması oldukça zordu. Sievert daha sonrasında da Baukloh ile Oesterlen de katı alüminyumdaki hidrojenin çözünürlüğüne dair herhangi bir veri elde edememişlerdir. Diğer taraftan Portevin, vd. yüksek voltajlı pozitif iyon bombardımanı kullanarak 100 gr metalde 151 cm³ gaz tespit edebilmişlerdir. Winterhager ise şiddetli soğuk haddeleme sırasında tekrarlanan vakum açığa çıkarımı ile 161 cm³/100 gr değerine ulaşabilmiştir [19]. Katı alüminyumda hidrojen çözünürlüğü atmosfer basıncında (0,1 MPa) oldukça düşüktür ve alüminyumun ergimesi ile birlikte artar (lakin her zaman küçük miktarlarda kalır). Hidrojen çözünürlüğü 100 MPa gibi oldukça yüksek basınçlarda dahi ancak atmosfer basıncının tipik katı ve sıvı fazlarındaki değerlerinden sadece 10 katı kadar fazla olmaktadır [20].

Opie ile Grand [3] tarafından yapılan deneysel alüminyum-bakır ve alüminyum-silisyum alaşımlarını ayrı ayrı içermektedir. Bu çalışmalardan genel bir eşitlik türetilmiştir;

$$\log S = -\frac{A}{T} + B \quad (2.1)$$

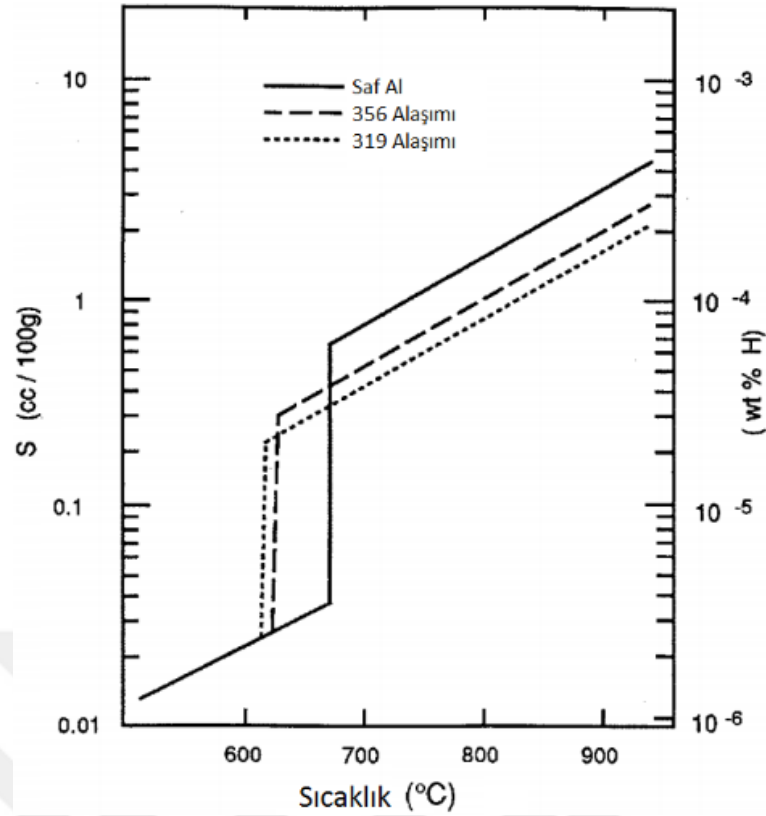
S; 100 gr metaldeki hidrojenin cm³ ya da ml cinsinden çözünürlüğüdür. Sabitler ise hesaplanmaktadır. Bakır ile silisyum her ikisi de alüminyumdaki hidrojen miktarını düşürmektedir. Bu iki alaşım elementi arasından ise bakırın daha etkin olduğu görülmüştür. En düşük hidrojen çözünürlüğü değerleri ağı.%50 Cu içeren alaşımda ve ağı.%18 Si içeren alaşımlarda görülmüştür. Sievert Kanunu 700 °C ile 1000 °C sıcaklık aralığında ağı.%(0–50,5) Cu ve ağı.%(0–18) Si içeren alaşımlarda geçerlidir [4]. Harvey ile Chartrand [17] daha önceden Opie ile Grand [4] tarafından yapılan çalışmalara teorik termodinamik yaklaşımı ile bir bakış açısı getirmek istemişlerdir. Tıpkı Al-Mg sisteminde olduğu gibi sıvı alüminyumda çözünmüş silisyum miktarının bir fonksiyonu olarak hidrojen çözünürlüğünde bir kırılma gözlemlenmiştir ve bunun teorik bir bakış açısı ile kolayca açıklanamayacağını bildirmişlerdir. Yalnızca yaptıkları termodinamik hesaplamaların Opie ile Grand [4] ve Anyalebechi [21] tarafından yapılan deneysel çalışmalar ile örtüştüğünü ispatlamışlardır [17]. Şekil 1'de saf alüminyumdaki sıcaklığa bağlı hidrojen çözünürlüğü gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Sıcaklığa bağlı hidrojen çözünürlüğü [16].

Burada S, 100 gr alüminyum içerisindeki hidrojenin mililitre cinsinden çözünürlüğüdür, T ise Celsius cinsinden sıcaklıktır. Şekil 1'den görüldüğü gibi alüminyum sıvı faza geçtiği ergime sıcaklığında hidrojen çözünürlüğü ciddi oranda artmaktadır. Lakin katı alüminyum içerisinde çok düşük miktarda hidrojen çözmektedir. Ergime sıcaklığında saf alüminyum içerisinde yaklaşık olarak 0,7 ml/100gr Al hidrojen çözmektedir.

Bu durum alaşım elementleri için içine girdiğinde biraz daha ilginç ve karmaşık bir hal almaktadır. Şekil 2'de farklı alüminyum alaşımlarının hidrojen çözünürlükleri gösterilmektedir. Alaşımların saf alüminyumdan daha düşük oranda hidrojen çözdüğü görülmektedir. Bunun sebebi alaşım elementlerinin ilavesi ile katılma sıcaklığının düşürülmesidir. Saf alüminyum katılma sırasında bünyesinde %4–5 civarında çözülmüş hidrojen barındırır iken alaşımlar için bu değer %6–7 bandına yükselebilmektedir. Böylelikle saf alüminyumda olduğu gibi döküm alaşımları için de sıvının içerisine hidrojenin yayılımı çok ciddi bir sorundur. Alaşıma ve proses edilen sıcaklığa bağlı olmak koşulu ile döküm alaşımları içerisinde 0,6–1 ml/100 gr Al civarında hidrojen çözmektedirler. Örneğin yeniden ergitilen birincil veya ikincil külçeler genellikle 0,2–0,3 ml/100 gr Al içerecek şekilde içyapılarında hidrojen barındırırlar [16].

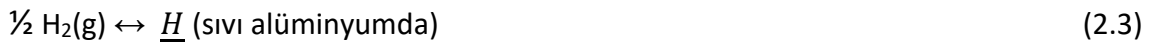


Şekil 2.2 Saf alüminyum ile 356 ve 319 alaşımlarının hidrojen çözünürlüğü açısından karşılaştırılması [16].

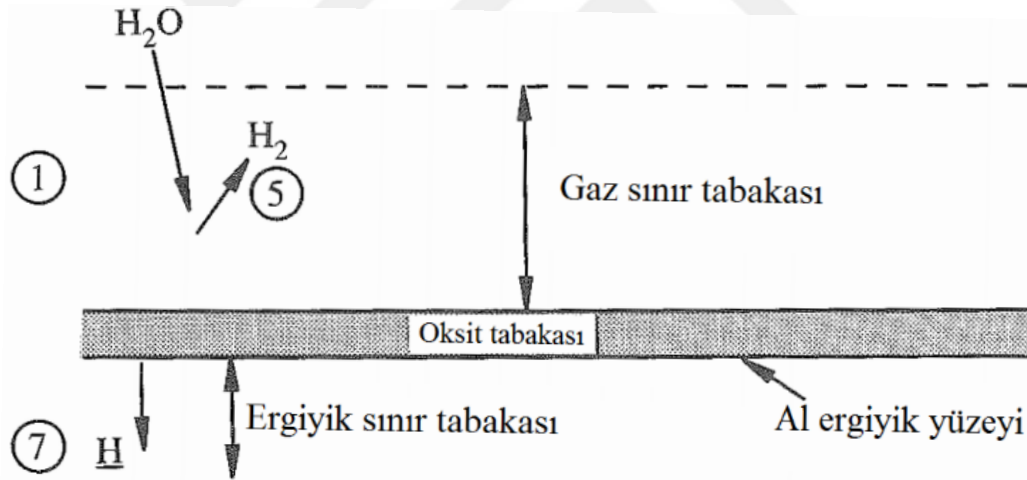
Ergiyik alüminyumdaki hidrojenin birçok kaynağı vardır; atmosfer, eritkenler, refrakterler, yanan gazlar, pota, kirli şarj malzemeleri gibi. Atmosfer çok büyük bir hidrojen kaynağıdır. Örneğin 26°C sıcaklıkta %65 nemli bir havada yaklaşık olarak 16gr/m³ su vardır. Böylesi bir örnekten de anlaşılacağı gibi nispeten daha az hidrojene sahip dökümler genellikle kuru havada ve kış aylarında yapılabilmektedir [2], [16]. Eritkenlerin çok kolay nem çeken kimyasal bileşikler olduğu bilinmektedir. Eğer ön işlem yapılmadan ergiyiğe katılır ise kayda değer bir hidrojeni ergiyik içerisine kasten ilave etmiş olunur. Bu yüzden eritkenler 100°C'nin üzerine ısıtılarak soğurduğu su uzaklaştırılmalıdır. Refrakterler de hava ile temas ettiği bölgelerinde doğal olarak nem bulundurma ihtimaline sahiptir. Bu nemin giderilmesi birkaç kez döküm yapılarak gerçekleştirilebilir. Çoğu yakıtın yanma ürünleri %(10–20) aralığında su buharı içerir. En mantıklı çözüm elektrik kaynağına sahip bir güç ünitesi ile ergitme işlemini gerçekleştirmektir. Hem daha ekonomik olur hem de daha az kirli metal oluşur. Yeni yapılmış pota mutlaka gözenek içermektedir ve bu gözeneklerde çok büyük ihtimalle refrakterler gibi nem ihtiva etmektedir. Bu nemi uzaklaştırmanın yolu da potayı

ısıtmaktır. Şarj malzemelerinin atmosfere açık yüzeylerinde nemli bir ortam oluşma ihtimali çok yüksektir. Buna benzer bir durum oluşmasa bile bazı malzemelerin yüzeylerinde muhtelif yağ türleri (örn. bor yağı) içermeye olasıdır [16].

Bu kaynakların arasında hidrojen ile ergiyik arasında en önlemez etkileşim atmosfer ile sıvı arasında olanıdır. Bu iki olgu arasında gerçekleşen kimyasal tepkime aşağıdaki gibidir [22];



Bu zararlı bir tepkimedir. Çünkü saf alüminyumun veya alaşımların Şekil 2.1 ve 2.2’de gösterildiği gibi katı fazda hidrojen çözünürlükleri düşmektedir. Bu durum hidrojen gazının çökelti olarak yapıda bulunmasına neden olabilir ve böylesi bir çökelti de gözenekliliği teşkil edebilir. Şekil 2.3’de Eşitlik 2.2 ve 2.3’de gerçekleşen tepkimelerin şematik mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Al ergiyiğine H geçişini içeren basamaklar [23].

Gazların çözünürlüğü özellikle iki atomlu gazların çözünürlüğü Sievert Kanunu ile açıklanabilmektedir. Şekil 2.3’deki sıvı metal yüzeyindeki iki atomlu gazlar burada iki atoma ayrışır. Bu tepkime geri dönüşümlü değildir. Hidrojen için tepkime Eşitlik 2.3’deki gibidir. Buradaki gaz atomları ara-yer olarak çözünmektedirler. Seyreltik çözeltiler için Henry Kanunu uygulanabilir; örneğin aktivite derişime orantılıdır. Metal ile temas halindeki atmosferde bulunan hidrojen gazının kısmi basıncı çözeltilde çözülmüş gazın derişimi ile ilişkilidir [21].

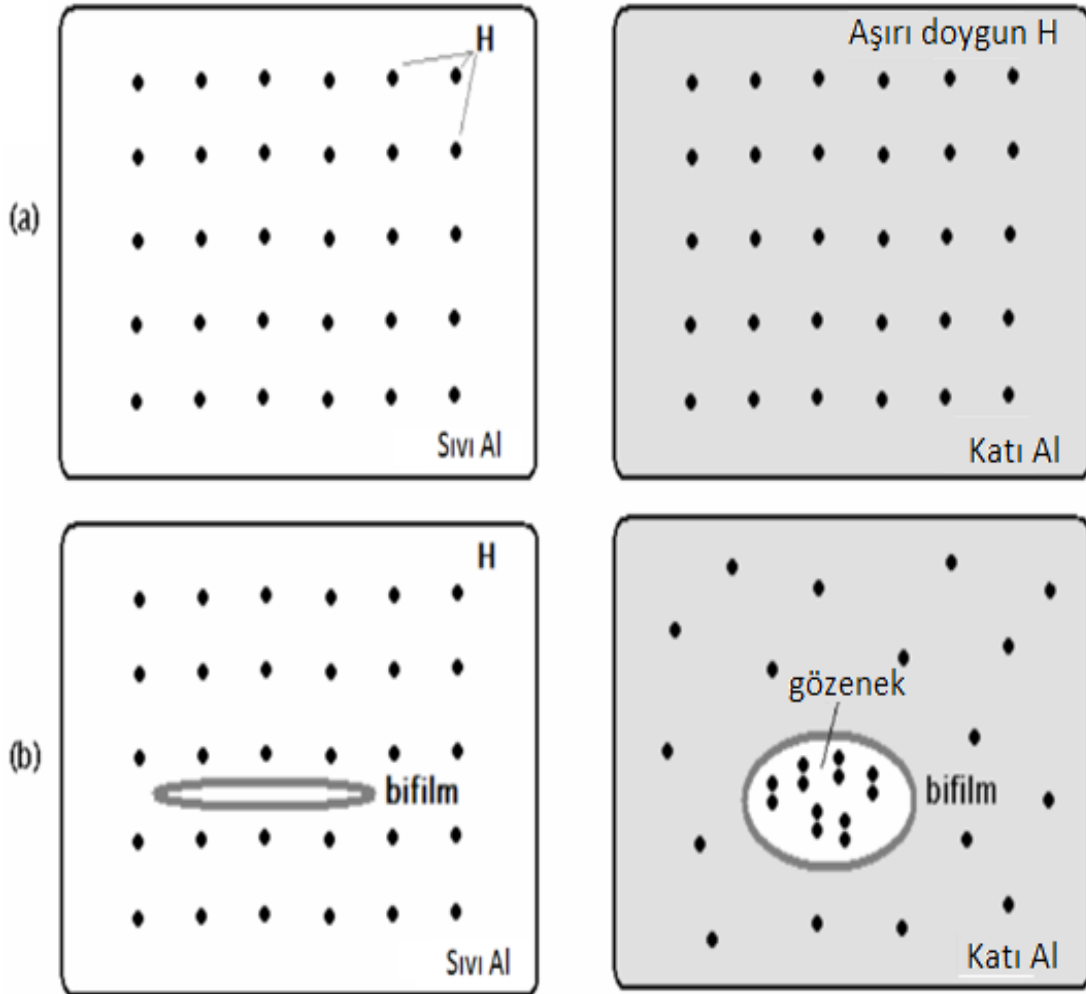
$$\rho_{H_2} = K_1[H]^2 \quad (2.4)$$

[H]; çözültideki hidrojen gazı derişimidir. Sievert Kanunu gazın kısmi basıncı ile gaz çözünürlüğü ile ilişkilidir [24];

$$\underline{H} = K_2\sqrt{\rho_{H_2}} \quad (2.5)$$

K_2 ; $1/K_1'$ 'dir.

Bununla birlikte Şekil 2.4'de resmedildiği gibi böylesi bir gaz çökeltisi uygun koşullara ihtiyaç duymaktadır. Aksi takdirde aşırı doymun halde çözültinin içerisinde kalmaya zorlanacaktır [25]. Bu zorlamanın nedeni bir sonraki kısımda daha detaylı irdelenecek olan çift katlı oksit filmleridir yani bifilmlerdir. Kısım 2.2'de daha detaylı olarak oluşum mekanizmaları, zararları, vs. gibi detaylara değinilecektir.



Şekil 2.4 Hidrojen ve bifilmin yapı içerisinde bulunması. a) Bifilmin olmaması durumunda hidrojenin aşırı doymun davranışı. b) Bifilmli alan arasındaki boşluklara hidrojenin yayılımı ve gözenek oluşumu [1].

Sıvı alüminyumun nemli refrakter veya nemli gazlar ile temas ettiği yerlerde çözeltideki gazın derişimini 10 ml/kg'a yakın olacak şekilde yükselmesine neden olan çevrenin su buharının 1 atm basınca yaklaşacağını belirtmektedir. Bu durum çoğu döküm için büyük bir felaket anlamına gelmektedir. Bunun gibi bir metal bu yüzden katılaşımadaki çekinti için bazı ölçülere kadar hidrojen gözeneklerinin çökeltisinin telafi edebildiği çoğu kritik olmayan parçaların üretiminde tercih edilir. Bu şekilde döküm kusurundan ve döküme ilave besleyici maliyetinden kaçınılır. Böylesine yüksek seviyelerdeki hidrojenin kullanıldığı alanlar geleneksel kullanıcıları boru ve gider gibi yağmursuyu ürünlerinin ve otomobil emme manifoldunun kalıcı kalıp dökümcüleridir. Bu parçaların yüksek uzunluk/kalınlık oranının hem maliyeti hem de uygulanabilirliği herhangi bir etkin besleyiciyi engeller [2].

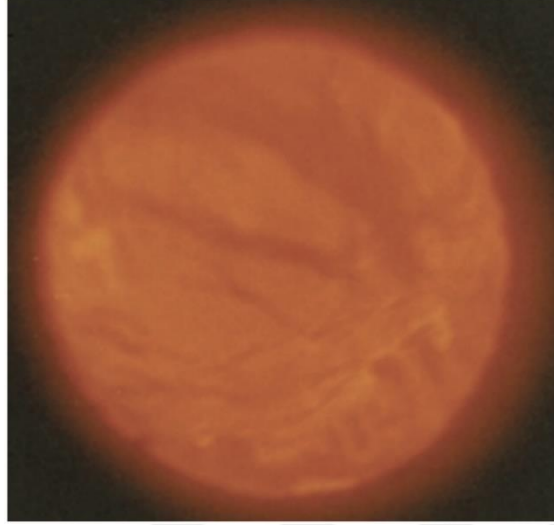
2.2 Oksit Filmi

Saf metal dışında hiçbir metal ya da alaşım oda sıcaklığında kararlı kalmaz [1]. Düşük miktarlarda dahi olsa mutlaka oksit ve/veya azot bileşiklerini oluşturmak için hava ile tepkimeye girme eğilimindedirler [26].

Önce oksijen ile sıvı alüminyumun tepkimesini ele alınır ise alüminyumda oksijenin çözünürlüğü oldukça küçüktür; yaklaşık 10^{35} veya 10^{40} atom içerisinde sadece bir atom kadardır. Şöyle ifade edilir ise belki daha iyi anlaşılacaktır; bu değer cevherden metal üretilmeye başlanılmasından bu yana tüm Dünya kaynaklarındaki bir atomdan daha küçük olması demektir. Bu yüzden oldukça güvenli bir şekilde oksijenin alüminyum içerisindeki çözünürlüğüne sıfır diyebiliriz. Gerçi alüminyum ve alaşımlarının tamamen oksitli olduğu herkesçe bilinir. Lakin dikkatlerden kaçan bir detay vardır. İçyapıdaki oksitler alüminyumun kesinlikle çözeltideki oksijen ile tepkimesi tarafından oluşamaz ve çökelemezler. Oksijen sadece sıvı metalin yüzeyi ile tepkimeye girebilir. Dahası yüzey sadece hapsolür veya kıvrılarak içeriye doğru katılır ise ancak bu şekilde metalin iç kısımlarına girebilir. Bu kimyasal değil tamamen mekanik bir prosestir. Bu şekilde alüminyum içerisindeki oksijenin varlığının sebebi kolayca anlaşılabilir [2], [25].

Tekrar ergiyik alüminyumun yüzeyindeki tepkimelere geri dönülür ise ergiyik ile havadaki nem tepkimeye girerek sıvı içerisinde çözünmüş hidrojen iyonu ve önce amorf akabinde kristalli alümina olarak bilinen katı bir alüminyum oksit filmi oluşturur [22],

[27]. Bu oluşumun tepkimesi Eşitlik (2.2)'deki gibi gerçekleşmektedir ve oluşan bu oksit filminin gerçek görüntüsü Şekil 2.5'de resmedilmektedir.



Şekil 2.5 Ergiyik alüminyum üzerini kaplayan alüminyum oksit filmi [22].

2.2.1 Sürekli ve Süreksiz Filmler

Proses sıcaklığı arttıkça oksitlenme veya nitratlanma oranı da artmaktadır. Bu duruma ters tek element gümüşdür. Bazı araştırmacılar bu oksit filmi davranışı üzerine çalışarak karakteristik durumunu incelemişlerdir. Filmin koruyucu davranışının bileşikteki oksidin molüküler hacminin metalin atomik hacmine oranı ile belirlenebileceğini tespit etmişlerdir ve bu orana Pilling-Bedworth oranı (P—B) ismi verilmiştir [1], [28].

$$(P-B) \text{ oranı} = \frac{w_0 d_M}{w_M d_0} > 1 \quad \text{Sürekli film} \quad (2.4)$$

$$(P-B) \text{ oranı} = \frac{w_0 d_M}{w_M d_0} < 1 \quad \text{Süreksiz film} \quad (2.5)$$

$W_{O/M}$: oksidin/metalin moleküler ağırlığı, $d_{O/M}$: oksidin/metalin yoğunluğu.

Eğer (P—B) oranı birden küçük ise metalin yüzeyini kaplamak mümkün olmadığından oluşan oksit tabakası süreksiz, gözenekli ve koruyucu değildir. Eğer (P—B) oranı birden büyük ise oksit filmine basma gerilmeleri oluşur ve 2–3'den daha büyük oranlarda oksit filminde çatlaklar ve pul pul dökülmeler nedeniyle bu durumda da koruyucu film tabakası oluşamaz ve sürekli olarak taze metal yüzeyi yüzeye çıkar. Metali koruyacak en

uygun (P—B) oranı 1'dir. Bu oranda metal tamamen korunaklı ve sürekli bir film tabakası tarafından atmosfer ile ilişiği kesilir ve taze metalin oksitlenmesi engellenmiş olur [28].

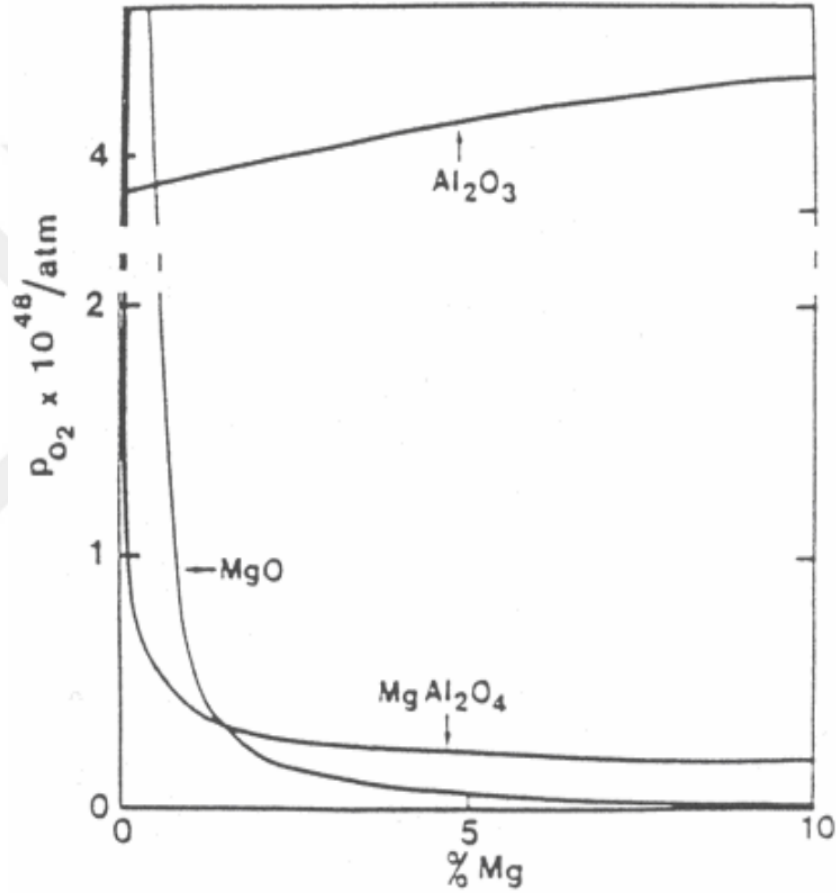
Sürekli koruyucu bir film oluşumunda oksitlenme hızı film boyunca oksijen atomlarının yayınımları ile sınırlıdır ve parabolik kurala göre zamanla azalacaktır. Süreksiz filmlerde ise oksijen yayınımları olmadan filmdeki boşluklar boyunca nüfuz edecektir ve oksitlenme hızı büyük ihtimalle doğrusal kurala göre artacaktır [1], [26], [28].

2.2.2 Al-Si-Mg Alaşımlarında Oksitlenme Davranışı

Bayer prosesi ile alümina üretiminde alüminyum hidratin kalsinasyonu sürecinde ilk olarak gama alümina oluşur sıcaklığın artışı ile 1200 derece gama alümina alfa alüminaya dönüşür ancak alüminyum yüzeyinde oluşan bu oksit filmlerinin uzun süreler boyunca yüksek sıcaklıklara maruz kalması ile oksit filmleri γ -Al₂O₃'den α -Al₂O₃'e dönüştüğü bildirilmektedir [29], [30], [31]. Kristalleştikten sonra kristalli oksit tabakası boyunca oksijenin yayınımları ile film iç kısımlara doğru büyür. Çevredeki su buharının düşürölmesi daha sonraki dönüşümlerin kolayca gerçekteşmesine yardımcı olur ve nihayetinde γ -Al₂O₃'den α -Al₂O₃'e çok daha hızlı dönüşüm meydana gelir [32], [33], [34]. Alaşımlarda oluşan oksitlerin doğası ergiyik bileşimine bağlıdır. Demir, bakır, çinko ve mangan gibi alaşım elementleri bu oksitlenme prosesine küçük etkilere sahiptirler. Ayrıca alaşım içerisinde %ağ. 0,005 civarında magnezyumun bulunması yüzey oksidi daha karmaşık bir yapı olan spinel olarak adlandırılan MgO·Al₂O₃ [25], [35], [36], [37]. şekil 2.6'da gösterildiği gibi alaşımın magnezyum miktarı yaklaşık %2'den fazla olduğunda oksit filminin saf magnezya yani MgO olması beklenmektedir [1].

şekil 2.6'daki grafikte oluşan MgO ile MgAl₂O₄ oluşumunu biraz daha açıklayıcı ifade etmek gerekir ise iki olası kurgudan bahsedilebilir. Birincisi dış kısımdaki MgO tabakasının varlığı şiddetle şu durumu vurgulamaktadır; amorf Al₂O₃ tabakasının ilk baştaki kalınlaşması sırasında Mg⁺² iyonları amorf Al₂O₃ tabakasına Al⁺³ iyonlarından çok daha hızlı yayınırlar. İkinci kurgu ise MgAl₂O₄'ün çekirdeklenmesidir. Mg oksitlenme kinetiği oksit tabakasındaki hatalar boyunca Mg'un yayınımları ile belirlenmektedir [1], [38]. Magnezyumun yüksek buhar basıncından dolayı magnezyum buharlaşır ve sürekli filmi parçalayarak koruyuculuğunu düşürmektedir [1], [39].

Wightman ile Fray alüminyum ve alaşımlarına yaptığı çalışmalarda sıvı metal içerisine CO₂ gazı püskürterek alaşımın dinamik oksitlenme davranışını incelemişlerdir. Alüminyum dinamik oksitlenmesinin CO₂'nin kısmi basıncıyla ve alaşımın yüksek Mg içermesi ve içermemesi ile ilişkili olduğunu saptamışlardır. Bu deneylerde yüksek Mg seviyelerinde sıvı içerisine gönderilen CO₂'yi Mg'un Al'dan önce ilk başta CO'e daha sonra da C'a indirgendığını tespit ederken düşük Mg seviyelerinde asıl oksijene ilginin alüminyumdan kaynaklandığını ve sıvı içerisine püskürtülen CO₂'in sadece CO'e indirgenebildiğini göstermişlerdir [31].



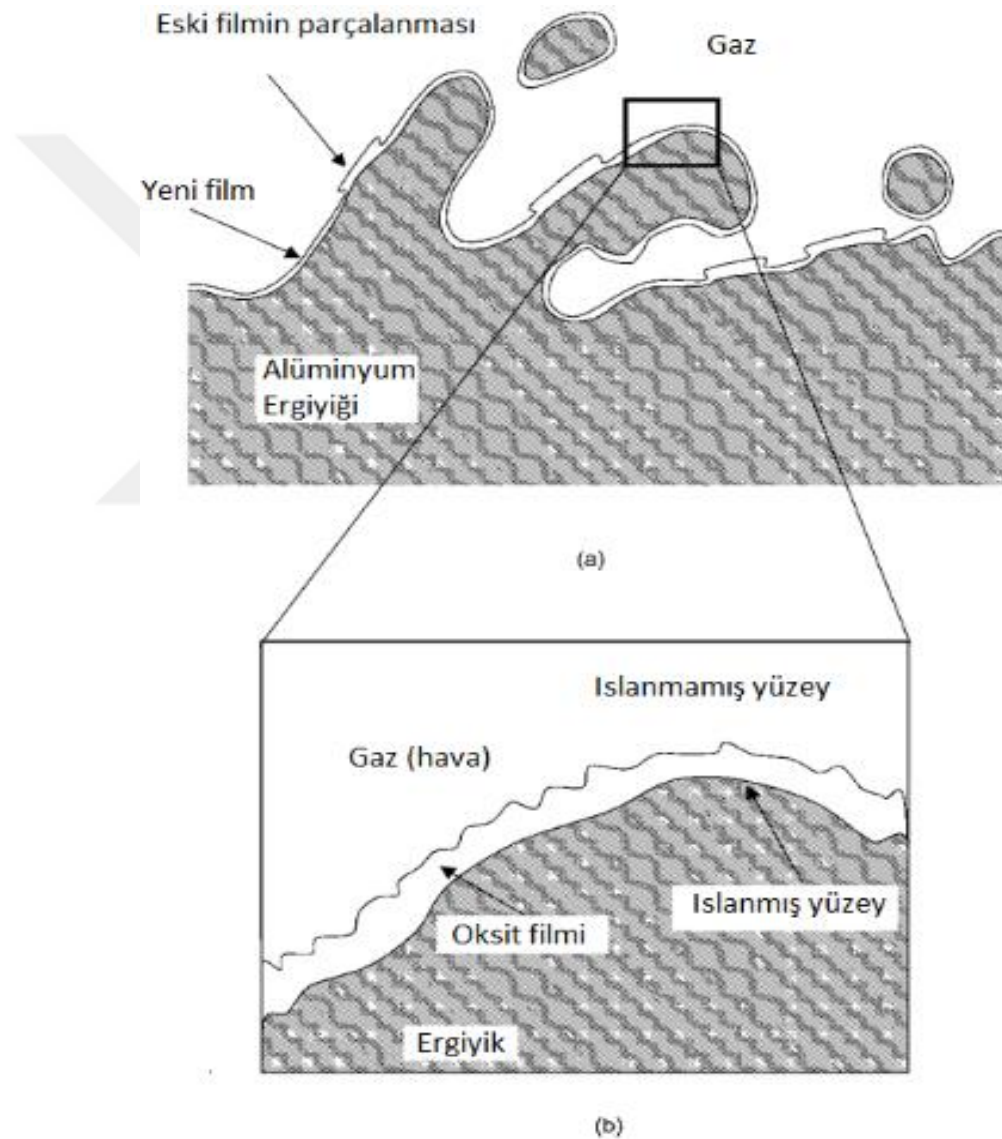
Şekil 2.6 Kısmi oksijen basıncı ile %Mg bileşimine bağlı olarak oluşan oksit fazları [1].

2.2.3 Eski ve Yeni Oksitler

Alüminyum oksit filmi sadece ergitme sırasında oluşmaz döküm sırasında burgaçla yapılan dökümlerde de meydana gelmektedir [1], [2], [25], [35], [40], [41], [42], [43]. Oksit filminin kalınlığı ilk defa Thiele tarafından ölçülmüştür. Yaptığı çalışmada 700°C'de 5 saniye sonraki yüzey oksit filminin kalınlığını 24 nm olarak, ergiyiği aynı sıcaklıkta 1 saat beklettikten sonraki ölçümünde yüzey filminin kalınlığını 900 nm olarak ölçmüştür [2],

[44]. Campbell ergiğiğın yüzeyindeki oksit filminin ağırlığııı ölçerek bekletme ocağıındaki oksit filminin kalınlaşma hızını öngörmektedir. Oksit filminin büyümesi yaklaşık olarak 7×10^{-7} (kg/m²)/sn şeklinde olduğunu göstermiştir. Bu değeri katı metallerdeki koruyucu filmlerin büyüme hızından yaklaşık on kat daha fazladır [2].

Basitçe ergitme sırasında açığı çıkan oksit filmlerine “eski oksitler”, döküm esnasında meydana gelen yeni yüzeylerden oluşan oksit filmlerine “yeni oksitler” denilmektedir [2], [5], [25], [35]. Bu durumun oluşum mekanizması Şekil 2.7’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.7 a) Alüminyum alaşımının yüzeyindeki oksit filminin şematik görüntüsü. Gerilmelere maruz kalmasının neticesinde filmdeki olası yırtılma (ve aniden yeniden oluşum). b) Hava veya gaz ile ergiğın arayüzeyinin karşılaştığı yüzey oksit filminin detaylı görünüşü [5].

Çizelge 2.2 Döküm parçalarında meydana gelen oksit filmlerinin karakteristikleri[44].

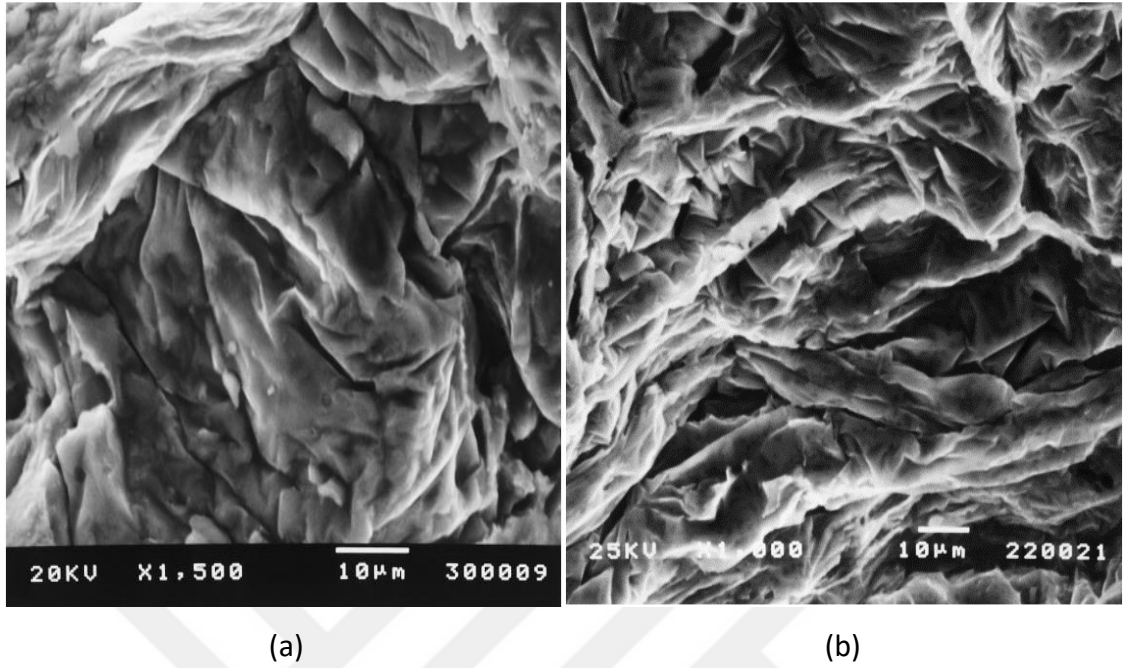
Film Tipi	Büyüme Süresi	Kalınlık (μm)	Tanımlama
Yeni Oksit Filmi	<0.01 sn	0.056 – 0.127	Sadece ergiyik yüzeyinin belirgin rengindeki değişim olarak gözlemlenir
	0,01 – 1 sn	0,05 – 0,50	Keskin bir şekilde katlanmış veya kırılmış kırılğan, saydam ve ince film
Eski Oksit filmi	10 sn – 1 dk	10	Esnek, uzun filmler
	10 dk – 1 sa	100	Daha kalınlaşmış, daha az esnek
	10 sa – 10 gün	1000	Eğilmez biçimsiz parçalar halinde bir araya gelmiş topaklar ve levhamsı

Eğer yeni oksitlere yeterli süre verilir ise onlar da yeterince kalınlaşarak eski oksitler olarak nitelendirilebilirler. Süreye ilaveten oksijen, alüminyum, magnezyum gibi elementlerin varlığı da yeni oksitlerin kalınlığının artmasını teşvik ederler. Eski oksit filmlerinin kalınlığı oldukça geniş bir aralıktadır ve mikron mertebesinden milimetrelere kadar değişkenlik gösterebilir [2], [25], [35]. Çizelge 2.2 kalınlığa göre ayrılabilen bu oksit filmlerinin detaylarını göstermektedir.

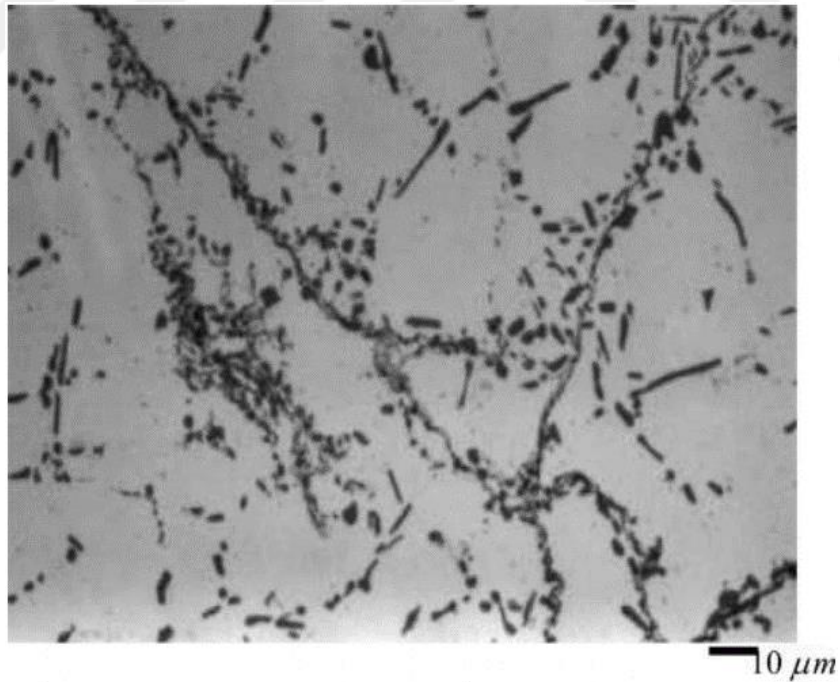
Şekil 2.8(a)'da ergitme sırasında oluşan eski oksitlere ait taramalı elektron mikroskobu görüntüsü mevcuttur. Yeni oksitler dolum ya da döküm esnasında oluştuğundan çok kısa sürede oluşup katılma mekanizmasının içerisinde harmanlanmaktadır [25]. Şekil 2.8(b)'de ise ergiyik alüminyum kalıp içerisinde ilerlerken ya da işlem potasına/bekletme potasına aktarılırken veya potadan kalıba döküm yapılırken meydana gelebilen yani sıvı metalin hava ile temas edebileceği her ortamdaki durum neticesinde her an oluşabilecek oksit filmleri gösterilmektedir.

Yığın ergiyik alüminyumun içerisinde mevcut olan yeni oluşan oksidin hapsolme durumu mutlaka kuru yüzey—kuru yüzey şeklinde meydana gelmektedir [1], [2], [5], [25], [35]. Ergiyik ile ıslatılmış ara-yüzeyler kıvrılmış çift katlı filmin dış kısmındadır. Bu çift katlı oksidin ıslanmamış iç kısmı sıvıdaki yapışmamış bir ara-yüzeyi dolayısıyla da etkili bir çatlak bileşeni olduğunu simgelemektedir [2], [5], [41]. Döküm işlemlerinde ergiyiğin burgaçlı aktarımı ya da kalıp dolumu genel yaşanan bir durumdur bu yüzden eğer dikkat edilmez ise alüminyum dökümleri bilerek, kasten, kendi ellerimizle çatlaklarla dolabilir

[2], [25], [35]. Şekil 2.9’da bu bahsedilen duruma benzer bir içyapıya sahip Al7SiMg (A356) alaşımının optik mikroskobu görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2.8 Al7SiMg (A356) alaşımının taramalı elektron mikroskobundan ikincil elektron özelliği ile alınmış (a) “eski oksit” ve (b) “yeni oksit” görüntüleri [41].

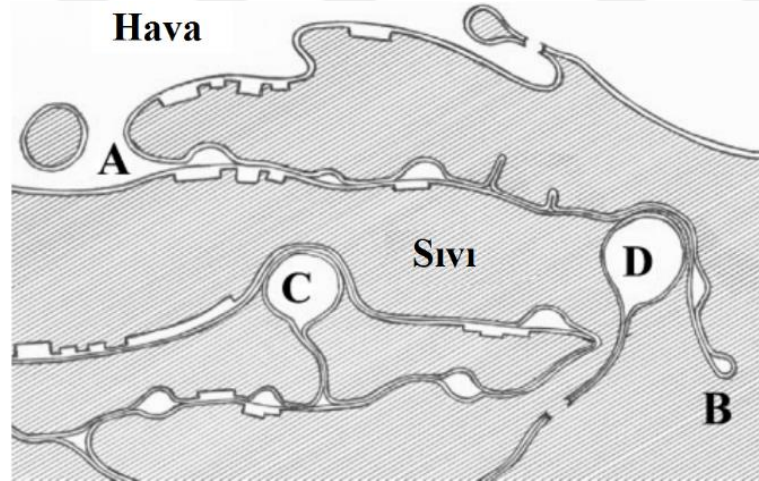


Şekil 2.9 Al7SiMg (A356) alaşımındaki karmakarışık oksit filmini gösteren optik mikroskobu görüntüsü [5].

2.2.4 Oksit Filmlerinin Döküm Parçalarında Hapsolması

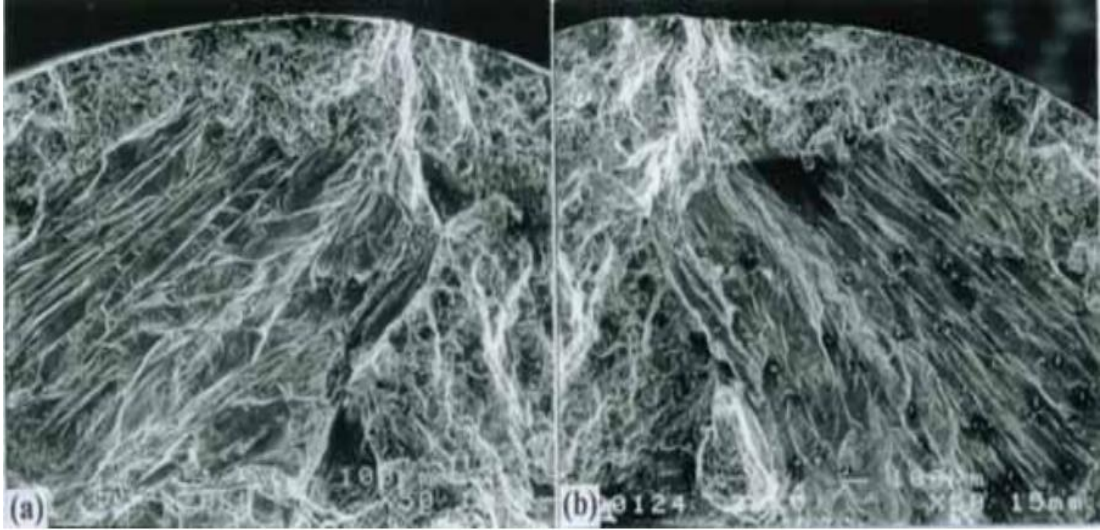
Ergitme sırasında alüminyumun doğası gereği yüzeyinde oluşan sürekli oksit filmleri sıvı metali hem oksitlenmesinden hem de gaz yayınımindan korur [2], [25], [43], [45]. Yüzey oksit filmleri sıvı metalin içerisine karışmadığı sürece aslında faydalı bir oluşum olarak davranmaktadırlar. Ancak herhangi bir şekilde bu yüzey oksitleri sıvı metalin içerisine girerler ise artık döküm parçaları için tehlikeli olmaya başlarlar [2], [25], [35], [43].

Bu oksit filmlerinin en olası şekilde ergiyiğın içerisine girme ihtimalleri temelde sıvı metalin içerisindeki kirlilikleri temizlemek için gaz giderme işlemidir diğeri ise nihai parça üretmek hazırlanan sıvı metalin kalıba dolumu sırasında gerçekleşmektedir. Her iki durumda da milisaniyeler mertebesinde hapsolma olayı gerçekleşmektedir [43] ve yüzey filmlerinin çok yüksek ihtimalle parçalanarak, katlanarak iki kuru yüzeyinin üst üste geldiği bir yapı oluşacaktır. Bu katlanmış, buruşuk yapı katılma sırasında içerisinde barındırdığı hapsolmuş gazın (hidrojen, azot, oksijen, vb.) açığa çıkmasıyla bir çatlak oluşturur [2], [5], [25], [35], [42], [43]. Bu çatlak gibi davranan katlanmış, buruşuk oksit filmleri yani bifilmler bir döküm kusur olarak addedilir [1], [2], [43], [44], [46]. Şekil 2.10'da oksit filmlerinin olası hapsolmasının şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 2.10 Gaz kabarcıkları ile ilişkili olan bifilmlerin hapsolmasına neden olan yüzey burgacının şematik gösterimi. Küçük hapsolmuş kabarcıklar AB çatlağı bifilmi donatan gözenekleri meydana getirir iken herhangi bir yerde yakalanmadan önce kabarcık izlerini oluşturan büyük kabarcıklar C ile D yüzeyde kalırlar [43].

Şekil 2.11'de ise yüzey burgacı ile meydana gelmiş oksit filmlerinin Al-Si-Mg alaşımlarında meydana gelmiş yapısının taramalı elektron mikroskobu ile saptanmış içyapı görüntüsü mevcuttur.



Şekil 2.11 Döküm Al-Si-Mg alüminyum alaşımının kırılma yüzeyindeki çift katlı oksit filmi (bifilm) kusurunun taramalı elektron mikroskobu görüntüleri [44].

Açık bir şekilde sıvının oksit filmine sahip yüzeyinin hapsolmesi yüzeyin bir miktar alanının kaybolması ile gerçekleşir. Bu kaybolma yüzeyin katlanması ile meydana gelmektedir. Şekil 2.10'daki şematik çizim incelendiğinde parçalanmış dalgaların belirgin bir şekilde sıvının yüzey alanını katlanmalar kapanana kadar arttırdığı görülmektedir. Bu oksit filmlerinin yani bifilmli alanın ani gelişen böylesi bir alan daralması dış yüzey alanının kaybolması demektir ve dış kısımdaki alan artık iç yüzey haline gelmiştir.

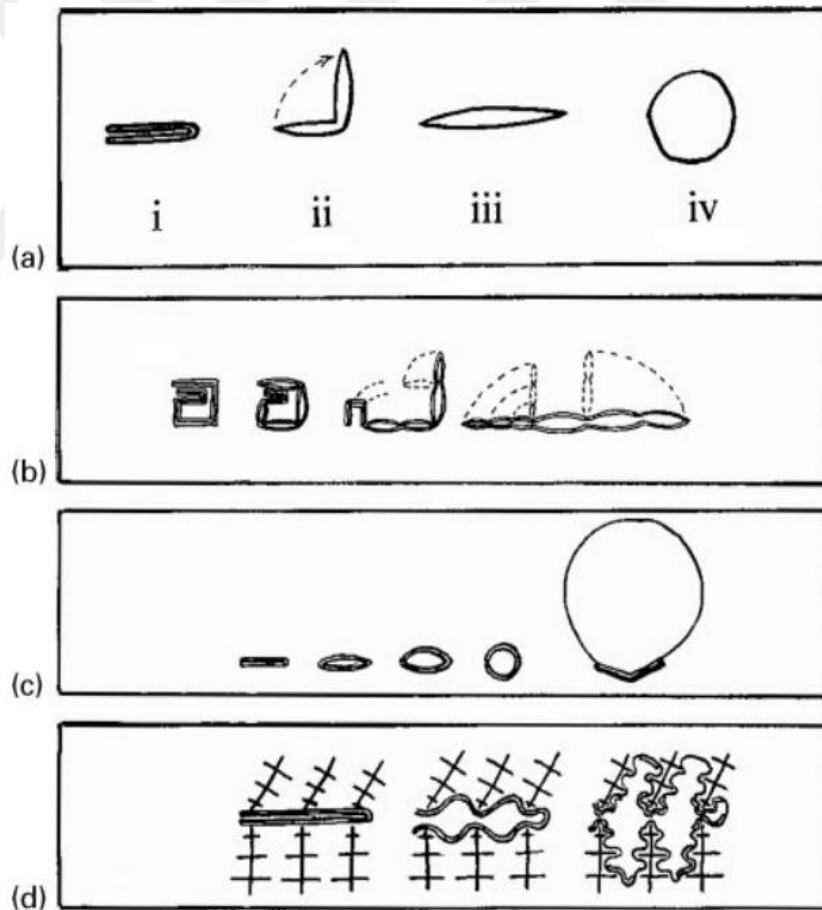
Kalıp dolumu sırasında böylesi bir burgacın meydana gelerek yüzey filmlerini yığın sıvı içerisine girmemesi için birçok araştırmacı sıvı metalin kritik hızının ne olması gerektiğini araştırmışlardır. Örneğin kalıp dolum kritik hızı alüminyum alaşımları için 0,5 m/sn olması gerektiği belirlenir iken alüminyum bronz için bu kritik hızın 0,4 m/sn olması gerektiği belirlenmiştir [44], [47], [48]. Campbell [2], [25] bütün ergiyik metaller için kritik hızın 0,35-0,50 m/sn aralığındaki hızların altında tutulmasının oksit filmini yerçekimi ile hapsolmesi metalin tekrar geriye katlanma olasılığını engelleyebileceğini ifade etmektedir.

2.2.5 Oksit Filmlerinin (Bifilm) Morfolojik Olarak Gelişimi

Alüminyum ve alaşımlarının dökümü esnasında yüksek dolum hızından kaynaklı olarak kalıp içerisinde sıklıkla akışkanın ilerlediği kısımlarda burgaç akabinde yeni yüzeyler meydana gelmektedir. Yüzey burgacı oksit filmini hapseder iken filmin üzerine çeşitli yönlerde etkiyen kuvvetler bu oksit filminin katlanmasına, bükülmesine ve iç

kısımlardaki burgaç kuvvetlerinden dolayı çoğu kez de küçük parçalara ayrılmasına neden olabilmektedir [43]. Bu oksit filmlerinin şekline diğer bir etkide uzun ve geniş oksit yüzeyinin oldukça karmaşık küçük yuvarlak şeklin içine kıvrıldığı bir geometriye sahip bir dönüşüm yaşayabilir [49]. Böylesine bir içyapıya sahip görüntü Şekil 2.9'da resmedilmiştir. Campbell [2] bu oluşuma "sarma" demiştir. Bu şekildeki bir oksit filmi esas şeklinin yani katlanmadan/kıvrılmadan/sarmalanmadan önceki halinin yaklaşık on katı kadar küçülebilir [1].

Bununla birlikte katılma sırasında düzlemsel bir çatlak şekline sahip yapısına dönüşmek için yeniden açılabilir [1]. Campbell [2], [25], [43] katılma esnasında hidrojen nüfuziyeti, dendrit büyümesi, hacimsel çekinti ve metaller arası bağ yapan fazlar (inter-metalik) büyüme gibi dört ana etkeni gözönünde bulundurarak "sarma" olayının zıttı olan birbirini izleyen "açılma" olayını Şekil 2.12'deki gibi ileri sürmüştür.



Şekil 2.12 Oksit filmlerinin (bifilm) şişmesi ve açılması: (a) basitçe katlanmış oksit filmi, (b) karmakarışık bükülmüş oksit filmi, (c) küresel bir gözeneği oluşturan oksit filminin aşırı şişmesi ve (d) dendritler arası gözeneği meydana getiren katılmadaki oksit filminin geç şişmesi [43].

Şöyle ki; Şekil 2.12'deki gibi tüm bu bağısız hapsolmuş arayüzeyler gözeneklerin devreye girmesi için mükemmel bölgeler teşkil etmektedir. Bununla birlikte bu paralel bağısız filmlerin ayrımı klasik olarak çekirdeklenmeye benzerlik göstermediğine dikkat edilmesi gerekir. Şu yüzden klasik olarak çekirdeklenme bakış açısı ile bakılmamalıdır çünkü gözenek bir atomsal düzenlenme tarafından meydana getirilmemiştir. Ayrıca gerçek çekirdeklenmede olduğu gibi herhangi bir çekirdeklenme bariyeri içermez, herhangi bir kritik embriyo yoktur ve herhangi bir sıvı yüzeyi barındırmadığı için herhangi bir yüzey gerilimi ya da yüzey enerjisi uygulanmaz. Daha detaylı olarak mevcut düşünce yapısı ile sıvı metaldeki çözeltinin gazı oksit filmlerinin içerisinde hapsolmuş gaz filmine rahatlıkla çökebilir. Böylesi bir durumda oksit filmi genişleyecektir ve tamamen genişleyene kadar katlana katlana açılacaktır. Bu durumun şematik gösterimi Şekil 2.12a ve b'de resmedilmiştir. Şekil 2.12c'de ise gazın sürekli olarak çökmesi gösterilmektedir. Bu gazın devamlı olarak çökmesi hacmini arttırmasına böylelikle de katlanmış oksit filmini ayırmaya neden olacaktır. Daha sonra bu gazın kökeni olan oksit filminden daha büyük bir hacme sahip olan küresel bir kabarcık haline gelmesine yol açılacaktır. Şekil 2.12d'de ise katılma süresince hala oksit filminin genişlemesi devam eden bir bifilmin genişlemesinin çevresindeki dendritler tarafından sıkıştırılmasına sebep olacaktır akabinde de bir döküm kusuru olan dendritler arası gözeneklilik oluşacaktır [1], [25], [43].

2.2.5.1 Hidrojen Nüfuziyeti

Sıvı alüminyumdaki hidrojen çözünürlüğü katı alüminyumdakinden yaklaşık on kat daha fazladır [2], [16], [25], [35]. Bu durum soğuma sırasında aşırı doygun bir koşul oluşturabilir. Böylesi bir koşula sahip döküm parçasında çözünmüş hidrojen dendritler arasına nüfuz edebilir ve tane sınırlarında veya dendrit hücrelerinin aralarında gözeneklilik oluşturabilir [2], [50], [51], [52].

Eğer ergiyiğin ilk baştaki hidrojen miktarı açık atmosferdeki denge miktarından daha yüksek ise hidrojen hapsolmuş hava kabarcıklarının içerisine doğru yayılır ve kabarcığın genişlemesine sebep olur [50].

Kabarcık olarak gazın varlığı ve dendritler arası çekinti prosesine katkısı gözeneklilikte önemli faktördür. Çözünmüş gazlar yeni gazlı ürünler üretmek için katılaşmada kimyasal olarak tepkimeye girebilirler [18].

2.2.5.2 Dendrit Büyümesi

Katılma başlamasıyla birlikte öncelikle oluşan faz dendritik morfolojiye sahip birincil Al fazıdır [15], [53], [54]. Katılan bu birincil Al fazlarının dendritleri muhtemel bir oksit filmi ile karşılaştıklarında oksit filmi boyunca büyüyemezler [2], [43], [50], [55]. Campbell [2], [55] dendrit kollarının katılma süresince oksit filmlerini ittirerek sıkıştırdığını belirtmektedir. Bu durum birçok oksit tabakasının tane sınırlarında görülmesinin nedenine izah getirmektedir lakin bu öngörüğü doğrudan destekleyici bir kanıt da henüz yoktur.

2.2.5.3 Hacimsel Çekinti

İstisnalar hariç (bizmut, grafitli dökme demirler, vs) bütün diğer metallerin çoğunda olduğu gibi alüminyum ve alaşımları da katılırlarken hacimsel olarak bir çekintiye uğrarlar [15], [53], [54]. Herhangi bir şekilde oluşan oksit filmlerine katılma bölgesindeki artan ters basınç tarafından gelişen kuvvet/kuvvetler etkiler ve bu çift katlı ya da daha fazla katlanmış olan oksit filmlerine değişik yönlerde çeki kuvveti uygularlar. Böylesine bir durumda çekinti kuvvetleri karmakarışık şekilde katlanmış oksit filminin açılmasına yardımcı olabilirler [2], [43], [50]. Bu durumun şematik gösterimi Şekil 2.12d'deki gibidir.

2.2.5.4 Metaller Arası Bağ Yapan Fazlar (İntermetalik)

Sıvı alüminyum içerisinde metalik olmayan katışkılar ve metaller arası bağ yapmış birçok faz bulunabilir [2], [50]. Metalik olmayan katışkılarının kaynağı çeşitlidir. Örneğin pota, kimyasal tepkimeler, vs gibi. Katışkılarını giderme yöntemleri sıvı metale gaz giderme işlemi yapılması ya da kalıpta süzgeç kullanılması gibi prosesleri kapsamaktadır [50], [56]. Bununla birlikte bazen oksit filmlerinin ıslatılmış kısımlarında da intermetalikler gözlemlenmektedir [50]. Islatılmayan yüzeyler çift katlı oksit filmlerinin içerisindeki hava ile tepkimeye girerek oksit katmanlarını meydana getirmektedir [50], [57]. Cao ile

Campbell [46], [58] bu ıslatılan yüzeylerde $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si$ veya $Al_{15}(Fe, Mn, Cr)_3Si_2$ gibi Fe- esaslı intermetalikler gözlemlenmişlerdir. Al-7Si-Mg alaşımında katılaşması sırasında bu intermetalik fazlara benzer oluşması muhtemel fazlar Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3 Katılaşma sırasındaki tepkimeler [59].

Tepkimeler	Gerçekleştiği sıcaklık (°C)
Dendritik ağın gelişimi	614
$Sıvı \rightarrow Al + Al_{15}(Mn, Fe)_3Si_2$	594
$Sıvı \rightarrow Al + Al_5FeSi + Al_{15}(Mn, Fe)_3Si_2$	594
$Sıvı \rightarrow Al + Si + Al_5FeSi$	575
$Sıvı \rightarrow Al + Si + Mg_2Si$	555
$Sıvı \rightarrow Al + Si + Mg_2Si + Al_8Mg_3FeSi_6^*$	554

* Bu tepkime yalnızca çok hızlı soğumalarda tespit edilir.

Islatılan oksit yüzeyinde oluşan kırılğan intermetalik fazların bifilmelerin yani çift katlı oksitlerin açılmasına yardımcı olduğu ileri sürülmüştür [50]. Büyüyen intermetalik fazlar özellikle β -Fe plakası karmakarışık olmuş bifilmi açar. İlk başta çift katlı oksit filmi yüzeyindeki intermetalik fazlar eğilmek için yeterince incedir daha sonra kalınlıkları arttıkça bükülmezlikleri/katılıkları da artmaktadır [2].

2.3 Gözeneklilik

Herhangi bir metalin dökümünde çok kolay bir şekilde karşılaşılabileceğimiz döküm kusurlarının başında gözeneklilik gelmektedir. Diğer metallerin dökümünde olduğu gibi alüminyum ve alaşımların dökümünde de gözenegin bulunmasından bir mertebeye kadar genellikle kaçılmayacak bir sorundur ve muhtemel bir gözeneklilik mekanik özelliklere ve yüzey kalitesine oldukça zararlı etkiye sahiptir [44].

Olası gözenek kaynakları kalıp dolumu sırasındaki hapsolan hava, katılaşma sırasında meydana gelen döküm parçasının merkez hattı boyunca gelişen çekinti, yeterince hava çıkışı sağlanamamış maçalardaki hava emilimi yapan delikler, kalıp duvarındaki tepkimeler, ergitmeden ve cüruftan kaynaklı çözünmüş gazlardır [2], [60].

Döküm parçalarındaki gözeneklilik mikro—gözeneklilik ve makro—gözeneklilik olarak boyutuna, nedenine göre de çekinti ve gaz olmak üzere sınıflandırılabilir [1], [2], [44],

[61]. Gaz gözenekliliği katılaşma sırasında oksit filmlerine olan çökeltme, yüzey burgacı ile mekanik olarak hapsolması ve ergiyik içerisinde yine mekanik olarak aniden sızması şeklinde olmaktadır [1], [2], [62], [63], [64], [65], [66].

Dendrit boyutundan büyük bir gözenek ise örneğin 100 µm civarında ya da daha büyük bir gözenek makro-gözeneklilik olarak ifade edilir iken [61], 100µm'dan daha küçük olanlar mikro-gözeneklilik olarak isimlendirilmektedir [44].

2.3.1 Hidrojen Gözenekliliği

Alüminyum ve alaşımlarının sıvı fazda çözdüğü hidrojeni katı fazlarında çözememiş olması, bünye içerisinde hapsolmuş hidrojenin çökeltmesi ile sonuçlanabilir. Ya da diğer bir ifade şekliyle gözenek oluşturabilir. Yapıdaki bu çözünmüş hidrojenin gözeneklilik oluşturabilmesi için klasik çekirdeklenme ve büyüme mekanizmalarına göre hareket etmelidir [67].

Gözenekliliği sınıflandırmadan önce oluşumu hakkındaki düşünceler irdelenir ise gözeneklilik oluşumunun çekirdeklenme ve büyüme proseslerini içerdiği görülmektedir [1], [68], [69].

2.3.1.1 Çekirdeklenme

Alüminyum ergiyiğinin katılaşma prosesi sırasında hidrojen kabarcıkları yeni gaz fazının çekirdeklenmesi ve büyümesi ile üretilmektedir. Metallerdeki kristalleşme prosesine benzer şekilde hidrojen kabarcıklarının çekirdeklenmesi de iki şekilde olmaktadır; benzeşik (homojen) ve ayrışık (heterojen) çekirdeklenme [22].

Şekil 2.13'de herhangi bir bölgedeki bir gözenegin çekirdeklenebilmesi için gerekli olan yüzey enerjisi ve bunu kompanse etmesi gereken hacimsel serbest enerji değişimleri verilmektedir [1].

Benzeşik (homojen) çekirdeklenmede ergiyik alüminyumda oluşan ve kararlı olarak kalan hidrojen kabarcıkları için kritik koşul şöyledir;

$$P_H \geq P_0 + P_1 + \frac{2\sigma}{r} \quad (2.6)$$

P_H ; kabarcıktaki hidrojenin kısmi basıncı, P_0 ; atmosfer basıncı, P_1 ; alüminyum ergiyiği tarafından kabarcık yüzeyine uygulanan statik basınç, σ ; ergiyik alüminyumun yüzey gerilimi ve r ; kabarcık yarıçapıdır.

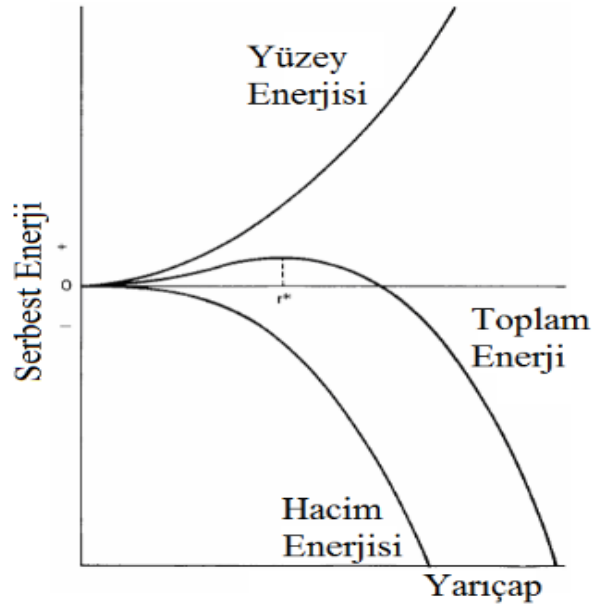
İlk başta oluşan kabarcık yarıçapı oldukça küçüktür dolayısıyla P_H Eşitlik (2.6)'ya göre oldukça büyüktür. Teoride eğer alüminyum ergiyiğinde hiç katışkı yok ise hidrojen kabarcıkları benzeşik (homojen) çekirdeklenme vasıtası ile oluşması imkânsızdır. Bu durumda ayrışık (heterojen) çekirdeklenme tek ve başlıca çekirdeklenme mekanizması olarak öne çıkmaktadır. Eğer kabarcığın yarıçapı r ise serbest enerji değişimi ΔG aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$\Delta G = k \cdot \left(4\pi r^2 \sigma - \frac{4\pi r^3 P_H}{3} \right) \quad (2.7)$$

k ; kabarcığın şekline bağlı sabittir, σ ; alüminyum ergiyiğinin yüzey gerilimidir. Eşitlik (2.7) içerisine Eşitlik (2.6)'yı yazarsak ayrışık (heterojen) çekirdeklenme için kritik yarıçap $d\Delta G/dR = 0$ 'ın uçdeğerinin bulunması ile elde edilerek Eşitlik (2.8)'deki bağıntıya dönüşmektedir;

$$r_c = \frac{2\sigma}{3(P_0 + P_1)} \quad (2.8)$$

Alüminyum oksit katışığı üzerindeki nano-ölçekli konik micro-gözeneklerin varlığı hidrojen atomlarının hidrojen molekülleri içerisine birikmesine uygun koşul oluşumuna yardım eder ve hidrojen kabarcıklarının büyümesi için derişim ve enerji dalgalanması sağlar. Hidrojen atomlarının boyutu yaklaşık 10^{-1} nanometre mertebesindedir böylece her bir mikro-gözenek hidrojen atomlarından sınırlı miktarda ihtiva edebilir [22]. Mikro-gözeneklerin muhtelif boyutlarına bağlı olarak mikro-gözeneklerde biriken hidrojen atomlarının sayısı da farklı olmaktadır. Örneğin ergiyik alüminyumda hidrojen zengin ve hidrojen fakir bölgeler mevcuttur. Diğer bir deyişle hidrojen atomları farklı enerjilere sahip katışkıların üzerindeki farklı kümelere dâhil olmaktadır ve bununun sonucunda da ergiyik alüminyumda enerji dalgalanması oluşmaktadır. Ergiyik alüminyumdaki hidrojen atomlarının derişim ve enerji dalgalanması bağlı olarak hidrojen atomları mikro-gözeneklere sahip katışkılar üzerinde yoğunlaşırlar ve mikro-deliklere dâhil olan hidrojen molekülleri içerisinde birikebilirler [25].



Şekil 2.13. Bir gözeneğin çekirdeklenmesi için gerekli enerji değişimleri [1].

Çekirdeklenme prosesinde sıvı metal içerisindeki hidrojen gazının varlığı, embriyo gözeneklerinin oluşumu ve kritik yarıçapın üzerinde olan gözeneklerin büyümesini içermektedir. Bu olguları kullanarak Fischer [70] benzeşik (homojen) çekirdeklenme için sıvıda bir kabarcığın oluşumu ile ilişkili iş miktarını vermiştir. V hacminde bir gözeneğin oluşumu $p_e V$ kadarlık bir işe ihtiyaç duymaktadır. Yani gözenek V hacminde bir kabarcık oluşturmak için gözenek sıvıyı yeterince uzağa itmelidir. p_e ; sıvının basıncıdır. A alanına sahip sıvı-gaz ara-yüzeyinin oluşumu ve genişlemesi de γA kadarlık bir işe ihtiyaç duymaktadır. γ ; birim alan için gerekli ara-yüzey enerjisi. p_i basıncındaki kabarcığı gaz ile doldurmak için gerekli enerji eksi değerlidir ve $-p_i V$ 'ye eşittir, çünkü kabarcığın içerisindeki basınç kabarcık oluşumuna yardımcı olmaktadır [1, 2]. r yarıçaplı ve küre şekilli bir kabarcık olduğu varsayılır ise toplam iş şu şekilde olmaktadır;

$$\Delta G = \gamma A + p_e V - p_i V \quad (2.9)$$

$$\Delta G = \gamma A + \Delta p V \quad (2.10)$$

$$\Delta G = (4\pi r^2)\gamma + \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)\Delta p \quad (2.11)$$

$$r^* = -\frac{2\gamma}{\Delta p} \quad (2.12)$$

r^* ; Şekil 2.13'deki büyümek için uygun yarıçapa sahip atomların oluşturduğu kabarcığın ayrışik (heterojen) çekirdeklenmesi için kritik yarıçap, Δp ; gözeneğin içindeki basınç farklılığı, γ ; sıvının yüzey gerilimi [1].

Sıvı alüminyumda gözenek oluşturmak için gerekli aktivasyon enerjisini/bariyerini belirleyebilmek için yapılan deneylerde ergiyik alüminyumdaki 10\AA çapındaki homojen bir gözenekliliğin çekirdeklenmesi için 30.000 atm civarında oldukça yüksek basınç değerlerine ihtiyaç duyulduğu görülmüştür [2], [67]. Ayrışik (heterojen) çekirdeklenme için bu değer 1.500 atm'ye kadar düşebildiği görülmüştür. Uygulamadaki döküm proseslerinde bu değerler ulaşılamayacak kadar yüksektirler. Hidrojenin yüzey gerilimlerinden dolayı benzeşik (homojen) çekirdeklenmesi mümkün değildir [67].

2.3.1.2 Büyüme

S Katılaşma esnasında katının çözebileceğinden daha fazla çözünmüş atomsal hidrojen var ise kabarcıkları meydana getirmek için moleküler duruma geçmeye eğilimli olabilirler. Gözeneklerdeki atomsal hidrojen miktarı "eşik hidrojen miktarı" olarak bilinmektedir. Bu durum sadece denge hidrojen basıncı yeterince yüksek olduğunda meydana gelir. Şöyle ki;

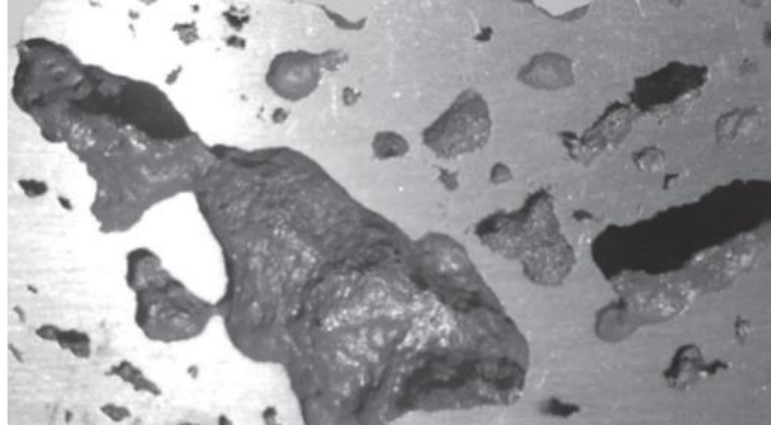
$$P_g + P_s > P_a + P_m + P_{st} \quad (2.13)$$

P_g ; ergiyikte bulunan çözünmüş gazın denge basıncı, P_s ; gözenek oluşumuna yardımcı olan katılaşma çekintisine bağlı basınç düşüşü, P_a ; atmosfer basıncı, P_m ; metalostatik basınç(ρgh), P_{st} ; yüzey gerilimine bağlı basınç ($2\gamma/r$).

Çekirdeklenmiş gaz kabarcığının içerisindeki basınç Eşitlik 2.10'daki değişkenlerin toplamından daha fazla olduğunda gaz kabarcığı büyüyecektir [71], [72], [73], [74], [75], [76]. Diğer bir ifadeyle eğer dış kısımdaki çekintiden kaynaklanan eksi yönde uygulanan basınç ile içeride hidrojen gazından kaynaklı oluşan artı yöndeki basınç oluşan embriyo kabarcık yüzeyi boyunca basınç farkı yüzey gerilimine bağlı olarak kısıtlayıcı basıncı aşar ise o zaman kabarcık büyüyecektir [1].

Katılaşma sırasında meydana gelen gaz kabarcığının çekirdeklenmesi ve büyümesi neticesinde nihai yapıda gözeneklilik oluşacaktır. Bu gözeneklilik oluşur iken oksit

katışkılarını büyüyen hidrojen kabarcıklarının bazılarını takılarak yukarı doğru hareket edebilirler. Katılma bittikten sonraki hidrojenin çökmesi ile neticelenen gözeneklilik Şekil 2.14'deki gibidir [22].



Şekil 2.14 Katılma sırasında oluşmuş gaz gözenekliliği [22].

Şu net olarak belirtilmelidir ki; hidrojen miktarı katışkı sayısına etki etmez lakin katışkılarının yüzeyde nasıl göründüklerine ve boyutu ile çok yakından ilişkilidir. Alüminyum ergiyiğindeki mikron mertebesinde çok daha küçük katışkılar hidrojen kabarcıklarının çekirdeklenmesini daha kolay artırır. Katışkılardaki nano-ölçekteki çok daha küçük mikro-gözenekler, daha fazla su buharı ve daha fazla hidrojenin soğurulması neticesinde çok daha fazla hidrojen kabarcığı üretilecektir [22]. Alüminyum ve alaşımlarının dökümlerinde karşılaşılabilecek muhtemel gözeneklilik oluşumu nedenleri Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4 Alüminyum dökümlerindeki gözenek oluşumuna etki eden unsurlar [1].

Kaynak	Gözenek Oluşumu				
	Hidrojen	Çekinti	Modifikasyon	Yüzey Gerilimi	Oksitler
Lee, vd. [71], [72], [73], [74], [75], [76]			Ötektik katılma modu baskındır		
Piwonka, vd. [77]	Eşik değerin altında hiç gözenek oluşumuna rastlanılmamıştır	Akışa direnç önemlidir		Gözenek oluşumu üzerine ilave kuvvet	
Kubo, vd. [78]	Beslenmeyen bölgelerde gaz atımı	Beslemenin sınırlandırılması gözenek oluşumuna neden olur			
Knuutinen, vd. [62], [79], [80]		Dendritler arası besleme			

Çizelge 2.4 Alüminyum dökümlerindeki gözenek oluşumuna etki eden unsurlar [1]
(devam)

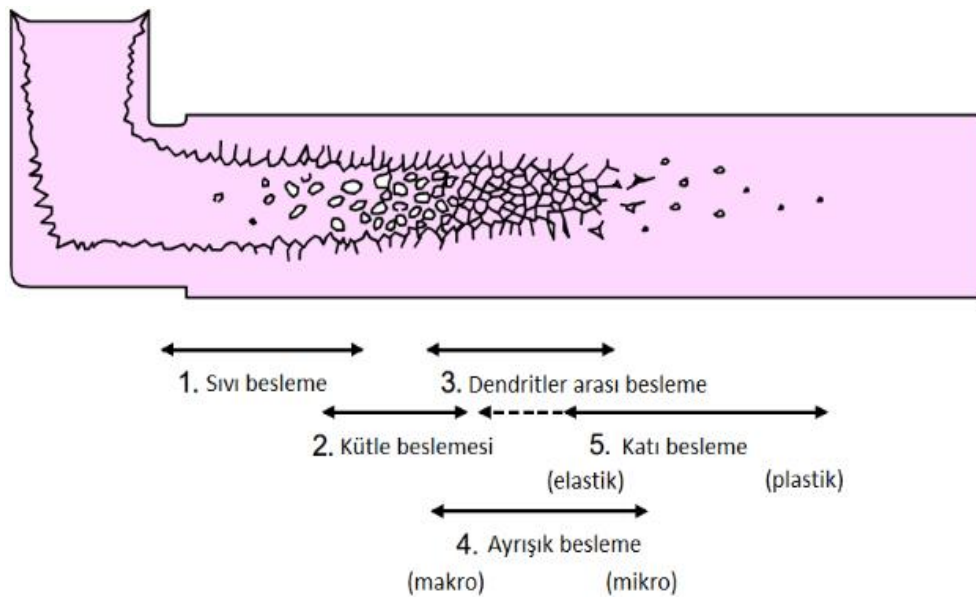
Kaynak	Gözenek Oluşumu				
	Hidrojen	Çekinti	Modifikasyon	Yüze Gerilimi	Oksitler
Taylor, vd.[81], [82], [83]		Besleme mesafesi önemlidir	Gözeneğin dağılımı üzerine etkili		
Gruzleski, vd. [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92]	Gözenek ile doğrusal ilişki	Besleme önemli	Hidrojen kapılmasını artırır, gözenek hacmini değiştirir lakin miktarına tesir etmez	Azalan yüzey gerilimi gözenek oluşumunu kolaylaştırır	Oksitler ve katışkılar gözenekliliği artırır
Samuel, vd. [93], [94], [94], [95], [96] [97]	Gaz gelişimi: çekirdeklenme dendrit kollarının kökünde başlar: geometri ve tasarım	Gözenek beslemenin sınırlı olmasından dolayıdır			
Tiwari, vd. [98]	Hidrojen katışkılar olmadığında çekirdeklenemez				Oksitler potansiyel çekirdekleyiciler gibi davranır
Li, vd. [99], [100] Li, vd. [101], [102], [103]	Modellemede ergitik hidrojeni yerine yerel katılma kinetiği dâhil edilmiştir; sonuç olarak çekirdeklenme için hidrojen gerekmektedir	ihmal edilebilir		ihmal edilebilir	
Chen, vd. [104]	Benzeşik(homojen) çekirdeklenme olası değildir, oksitler üzerinde ayrışık(heterojen) çekirdeklenme gerçekleşir	Hidrojen miktarına bağlıdır		Ayrışık(heterojen) çekirdeklenme için enerjyi düşürmeye yarayan bir etkendir	Oksitler üzerinde kolayca kabarcık oluşumu
Laslaz, vd. [105]	Hidrojen miktarı gözenek sayısını değil gözenek boyutuna etkir.		Gözenek oluşumu için temizlik en büyük etkendir		Oksitler üzerinde gözenek çekirdeklenmesi
Kuznetsov, vd. [106]	İlk baştaki ve eşik değerdeki hidrojen miktarı	Peltemsi bölge			
Porier, vd. [107], [108]		Gözenek oluşumundaki en baskın etken; dendritler arası beslemedir			
Sigworth, vd. [109], [110], [111], [112], [113], [114]		Besleme gözenek oluşumundaki baskın etkendir			

2.3.2 Çekinti Gözenekliliği

Çekinti hemen tüm metallerde katılaşma sırasında sıvı fazdaki alaşım ile katı fazdaki alaşımın yoğunlukları farkından dolayı gerçekleşmektedir. Genel olarak saf alüminyumda sıvıdan katıya dönüşür iken %7'lik bir hacimsel olarak daralma meydana gelmektedir. Genel alüminyum döküm alaşımları yaklaşık olarak %5—6 aralığında hacimsel çekintiye uğrarlar [44], [87].

Dökümlerde üç çeşit çekinti türü vardır; sıvıda çekinti, katılaşma sırasında ve katı fazdaki çekinti [115]. Katılaşma devam ettikçe sıvı metal yarı katı olan bölgedeki hacimsel değişimi telafi etmeye çalışacaktır. Bununla birlikte bu telafi etme çabası bölge bölge kanalların oluşumu ve sıvının ilerlemesini kısıtlayıcı unsurlar oluşturacağından besleme gittikçe zorlaşacaktır. Bu bölgelere dendritler arası ağ da denilmektedir [1], [44], [115]. Şekil 2.15'de katılaşma sırasında meydana gelen besleme olayları gösterilmektedir.

Katılaşma bittiği zamanda kanallar tamamen kapanır ve hala sıvı olan bir kısım metal yalıtılmış olur. Bu noktada yalıtılmış bölgelerde meydana gelebilecek olan olası herhangi bir çekinti sıvı içerisinde iç gerilmelere sebep olmaktadır ve tabiatı gereği bu iç gerilmeyi rahatlatmak/serbest bırakmak amacıyla boşluklar oluşacaktır [74]. Mikro-çekinti gözeneklerinin her birinin boyutu birkaç mikrondan birkaç milimetreye kadar değişebilecek aralıktadır [44].



Şekil 2.15 Besleme mekanizmaları [115].

2.4 İkincil Alüminyum Ergitilmesi ve Geri Dönüşümü

Kullanım ömrünü tamamlamış metallerin, üretim esnasında kullanılan besleyici ve yollukların, talaşlı işlemlerden açığa çıkan talaşlar, kırıntılar ve sakat parçaların yeniden kazanılması, çevreye ve ekonomiye sağladıkları katkı nedeniyle oldukça önemli bir husustur. Bu yüzden sanayide bu alanda gerçekleştirilen çalışmalar her geçen gün artmaktadır [116].

Alüminyuma ve alüminyum ürünlerine tüm Dünya’ca her geçen gün artan ihtiyaçtan dolayı alüminyum ve alaşımlarının üretim kapasiteleri her yıl artmaktadır. Alüminyuma bu kadar yüksek oranda talep olmasının sebebi çelik ile mukayese edildiğindeki düşük yoğunluk ve iyi mukavemet değerlerinin yanı sıra mükemmel korozyon dayancına sahip olmasıdır. Örneğin alüminyumdan üretilmiş parçalar otomotiv sanayisinde kullanıldıklarında hem enerji sarfiyatını hem de karbon emisyon oranını düşürürler [117]. Bir otomobildeki 1 kg’lık alüminyum tüm çalışma ömrü boyunca yaklaşık olarak 19 kg’lık CO₂ emisyonunu azalttığı bildirilmektedir [117], [118]. Ayrıca çelik yerine alüminyumun kullanılması ile her %10’lık ağırlık azaltılmasında %5—7 yakıt tasarrufu sağlanmaktadır [116].

Alüminyum geri dönüşümündeki proses adımları şöyledir [119], [120];

- a. Alaşım türünü göre hurdaların ayrılması,
- b. Yağ ve su gibi bazı kirlilikleri azaltmak için savurma veya merkezkaç yöntemi ile kurutma,
- c. Demir için manyetik ayırma,
- d. Ergitme,
- e. Katışkılar, oksitleri ve çözünmüş gazları gidermek için gaz giderme ve eritkenleme,
- f. Tutma ocağına döküm,
- g. Gerekli ise kimyasal analiz,
- h. Oluk vasıtasıyla dökümün transferi (sürekli döküm)
- ı. Otomatik döküm makinasındaki külçe ve kalıplara döküm.

Hurda türü ve geri dönüştürülebilir metal miktarı arasındaki ilişki sanayi ölçekli geri dönüşüm proseslerinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Farklı türdeki hurdaların ergime davranışının anlaşılması amacıyla termo–gravimetrik analiz kullanılarak ağırlık

kaybı hesaplanmıştır. Seçilen alüminyum hurdasının geri dönüştürme zorluğu hurda türü, hurda boyut dağılımı, kirliliğe ve hacim/yüzey alanı yani modüle bağlıdır [121].

2.5 Ergiyik Temizlenmesi ve Ölçüm Yöntemleri

Ergiyik kalitesinin belirlenmesindeki temel unsurlar çözülmüş gazlar ve askıda kalarak veya döküm sırasında oluşan ve giderilmeden sıvı metal ile kalıbın içerisine aktarılan katışkılardır. Bu sebeple hidrojenin varlığını ve miktarını ölçmek için birçok girişimde bulunularak yöntemler geliştirilmeye çalışılmıştır. Hidrojen mevcudiyetini tespit etmek için ilk defa 1950 yılında çalışmalar yapılmaya başlanılmıştır [1].

Bu çalışmaların neredeyse tamamı katılaşıma bağlı olarak VAK testi üzerinden yapılmıştır. VAK testindeki küçük numunelerin yoğunlukları ölçülmüştür ve teorik yoğunlukları ile mukayese edilerek açığa çıkan hidrojen miktarı ilişkilendirilmiştir [1], [122], [123]. Bu yöntem dikkate biçimde sağlam ve düşük maliyetlidir lakin herhangi bir mertebeye kadar doğruluğu ve güvenilirliği çözeltideki gazın sayısal veri olarak değerlendirilmesi hala güvenilir bir durumdadır [1], [2].

Şu anda mevcutta da kullanılan vakum altında katılaştırma (VAK) [124], Notorp [125], Alscan [126], Hyscan [127], Telegas [128] gibi hidrojen ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir [1]. Şekil 2.16'da Notorp türü hidrojen ölçüm sistemi gösterilmektedir.



Şekil 2.16 Notorp marka hidrojen ölçer [125].

2.6 Katışkı Ölçüm Yöntemleri

Uzun yıllardır sıvı alüminyumdaki hidrojen miktarını belirlemek amacıyla geliştirilen yöntemler ile birlikte katışkılarının da tespiti için çok sayıda girişimde bulunulmuştur ve bunların neticesinde akademik camia tarafından nispeten lakin sanayi tarafından kabul gören birkaç yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin eksik olduğu ya da tatminkar olmadığı düşünülüyor kısımlar yavaş olmaları, gereksiz yere karmaşık olmaları ve oldukça pahalı yöntemler olmalıdır. Çizelge 2.5’de bu yöntemlere ait detaylar verilmiştir [1], [2].

Çizelge 2.5 Oksit tespiti ve ölçüm yöntemleri [1].

Yöntem	Numune Ağırlığı (gram)	Parçacık boyutu (µm)
Gözenekli Disk Süzme Analizi (PoDFA) <ul style="list-style-type: none">➤ Sıvı Alüminyum Katışkı Numune Analizi (LAIS)➤ Basınçlı Süzme Yöntemi (PREFIL)	< 2000 < 1000	Tüm boyutlar
Elektriksel Özdirenç <ul style="list-style-type: none">➤ Sıvı Metal Temizlik Analizcisi (LiMCA)	< 100	> 15
Akustik Tespit <ul style="list-style-type: none">➤ Sinyal-gürültü tekniği➤ Darbe yankı tekniği		> 10
Elektro-kimyasal çözünme	< 100	Tüm boyutlar
Kimyasal Analiz <ul style="list-style-type: none">➤ Emisyon spektrometrisi, sıcak özütleme, yanma analizi, nötron etkileşim, gaz renk çözümü	0,5 – 30	Tüm Boyutlar
Eddy Akımı	*	*
Kapasitif Probu	*	*
X – ışını tespiti	Herhangi bir boyut	> 300
Elektromanyetik tespit	< 200	> 10

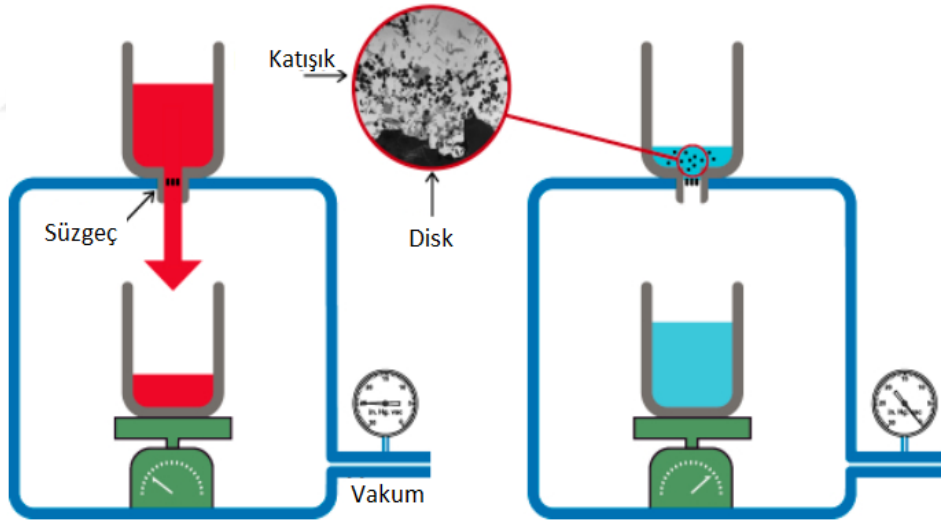
(* bilinmiyor)

2.6.1 Gözenekli Disk ile Süzerek Analiz (PoDFA ve PREFIL)

PoDFA (Porous Disk Filtration Analysis): Gözenekli disk ile süzme prensibinin kullanıldığı PoDFA ve PREFIL yöntemlerinde 15, 20, 30 ppi’lık disk şeklinde süzgeçler kullanılmaktadır. (0–5) kg aralığında çalışan sistemde, bu metal ağırlığının geçtiği

algılayan iç kısımda bir terazi bulunmaktadır. Üst limite ulaştığında vakum uygulaması kesilmektedir. Daha sonra üstteki potanın alt kısmına dâhil edilmiş gözenekli disk metalografik inceleme ile katışıkların tayininde kullanılmaktadır. Bilindiği üzere metalografik işlemler oldukça uzun süreçler alabilen bir prosestir. Bir de böylesi bir diskin hazırlanması, görüntünün elde edilmesi ve yorumlanması ciddi anlamda kalifiye olmayı gerektirmektedir [1], [129], [130], [131], [132]. Bununla birlikte üretim tesislerinde aynı koşullar altında her zaman uygulamayı gerçekleştirmek ve bu ölçümü alışlageldik bir temele oturtmak zordur [130], [131], [132].

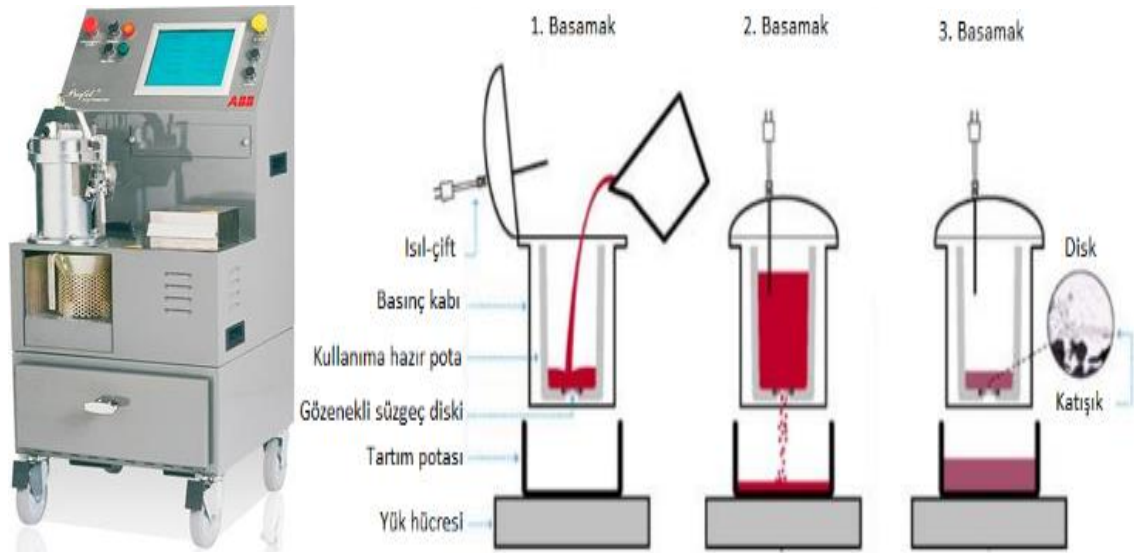
Ayrıca gözenekli diskin gözeneklerinin çok küçük olmasından dolayı TiB_2 gibi tane incelticiler, yüksek silisli alaşımlardaki birincil silisyum kristalleri veya diğer tür katışıkların büyük olanları süzgeci tıkayabilir ve böylece süzülme işlemi durur. Bu tarz durumlarda sorunun ne olduğunu anlamak için arayüzeyin metalografik olarak analizini yapmak gerekmektedir [131], [132]. Şekil 2.17’de PoDFA sisteminin çalışma prensibinin şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 2.17 Gözenekli Disk Süzme Analizi (PoDFA) [132].

PREFIL (Pressure Filtration Melt Cleanliness Analyzer): Bu yöntem metalin kalitesini ölçmek için sabit sıcaklık ve basınç altında gözenekli bir süzgeç diski boyunca ergiyik metalin akış oranını kullanmaktadır. Şekil 2.18’de kullanılan teçhizat ve uygulama esası resmedilmektedir.

Test üç basamaktan oluşmaktadır. Birinci basamakta metalin potaya dökümü, ikinci basamakta gözenekli disk boyunca tartım potasına metal akışı ve üçüncü basamakta ise gözenekli diskteki katışkı tayini yapılması için metalin katılaşması beklenmektedir. Deney boyunca sistem sürekli olarak tartı potası vasıtasıyla metalin ağırlığını ölçmektedir ve geçen zaman-biriken ağırlık grafiği göstermektedir. Daha temiz metal daha yüksek eğri oluşturacaktır lakin test sırasında süzgeç yüzeyinde hızlıca biriken oksit filmleri gibi metaldeki katışkılar süzgeç boyunca gerçekleşen akış hızını düşürmektedirler. Zaman bağlı süzülen ağırlığın eğimi ve toplamdaki şekli metaldeki mevcut olan katışkılarının seviyesini belirtir. Süzgecin üzerindeki artık metal metalografik inceleme için saklanabilir [133], [134], [135].



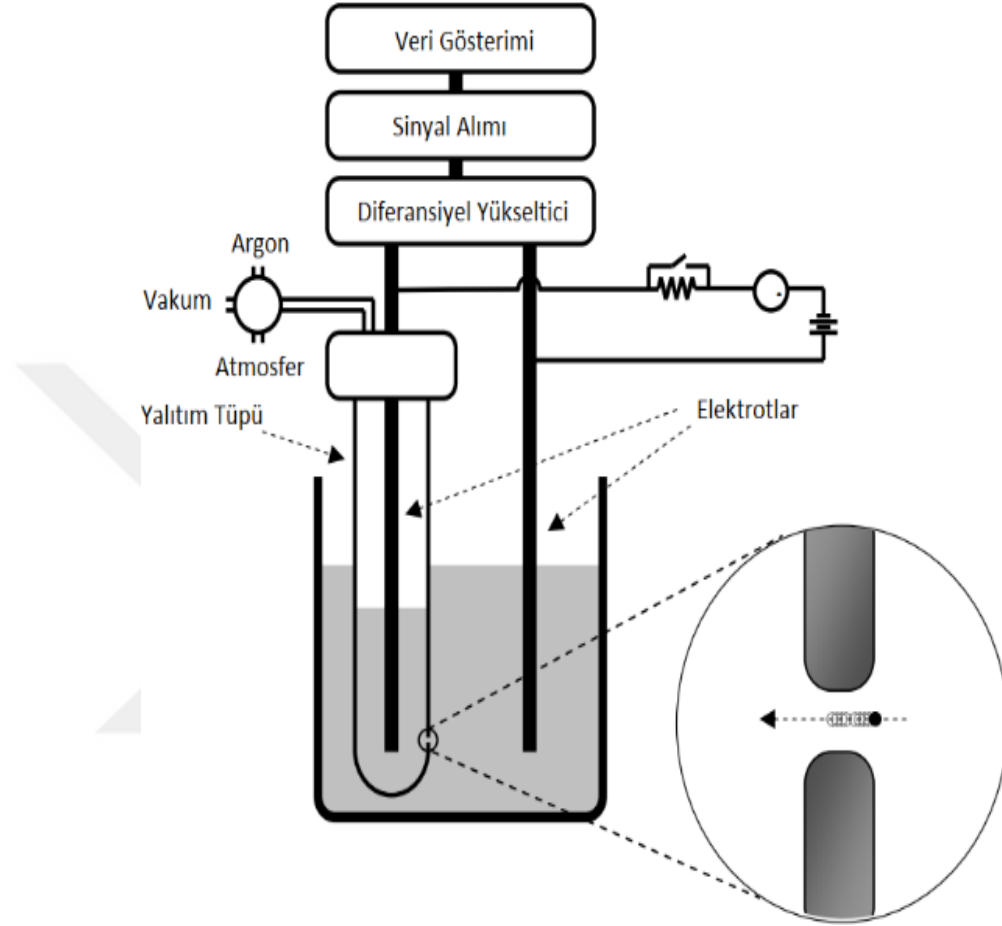
Şekil 2.18 (a) PREFIL cihazı, (b) PREFIL yönteminin uygulamasının şematik gösterimi [136].

Bu yöntemlerde ancak mikrometre mertebesindeki gözenekler tespit edilebilir, nanometre mertebesindeki filmler gözlemlenemez. Gözenekli disk ile analiz yöntemleri bu kadar yüksek hassasiyete sahip değildir [1], [2], [133], [134], [135].

2.6.2 Sıvı Metal Temizlik Analizcisi (LiMCA – Liquid Metal Cleanliness Analyzer)

Son yıllarda yapılan çalışmalarda sıvı metal temizlik analizcisi (LiMCA) ergiyik alüminyumdaki katışkılarının boyutu ve sayısının ölçümünde çok sık kullanılan bir araç olmuştur [137]. LiMCA genel olarak ergiyikteki katışkılarının sayısını iyi bir şekilde ölçebilmektedir lakin sıvı metal işlemleri (örn, gaz giderme) elde edilen sonuçlara etki

edebilirler. Örneğin LiMCA için gaz giderme cihazı tarafından oluşturulan mikrobarcıklar ile katışkılar arasındaki farkı ayırt etmek oldukça güç bir durumdur. Bu yüzden bir gaz giderme cihazının mevcut olduğu durumlarda katışkılar açısından sayısal veri elde edilmesi güçleşmektedir.



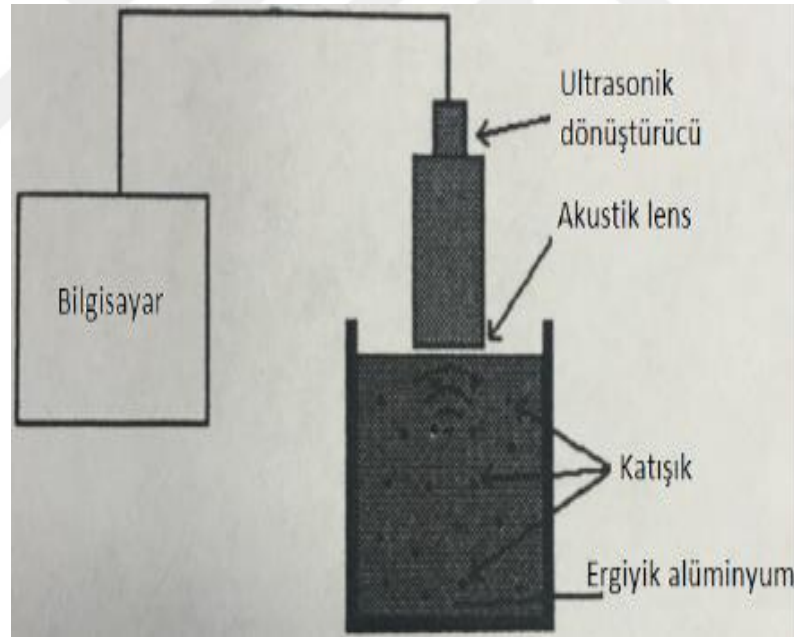
Şekil 2.19 LiMCA sisteminin şematik gösterimi [137].

LiMCA ergiyik alüminyumda bir prob vasıtasıyla ölçüm yapmaktadır. Bir elektriksel akım bu prob boyunca çalışmaktadır ve metalik olmayan bir parçacık bu probtan geçtiğinde bir voltaj darbesi üretilmektedir [137], [138], [139], [140], [141]. Şekil 2.19'da LiMCA cihazının çalışma prensibinin şematik gösterimi verilmiştir.

2.6.3 Ultrason

Ultrason tahribatsız bir şekilde malzemenin iç kısımlarına probu daldırarak ölçüm yapılabilmesi [142], [143], [144] ve büyük bir numune hacmine işlem yapılabilmesi ile her saniyede 100'den fazla numune alabilme yeteneğinden dolayı [145] ergiyik

alüminyumda katışkı tespitinde ilgi çekici bir seçenek olmaktadır [142]. Son zamanlardaki araştırmalar ergiyikteki parçacıklardan yansıyan sinyalleri tespit edilmesi üzerine olmuştur [145], [146], [147]. Tipik olarak 30 ppm'den daha az olmaları ergiyik alüminyumda bulunan katışkılarının çok düşük seviyelerine bağlı olarak ergiyikteki katışkılarının mevcudiyetini belirtmek için ultrasonik sinyalin hızı veya zayıflığındaki değişimleri kullanılması teorik olarak mümkün olmasına rağmen hızdaki ve sinyal zayıflığındaki değişimler ergiyiği yeterince kaliteli bir şekilde görüntülenememektedir. Tipik bir prob odaklanmış frekans yönlendirici olarak davranan genellikle 200 – 300 mm uzunluğunda olan hava soğutmalı tampon çubuğu vasıtasıyla ergiyik ile bağlantılanmış bir ultrasonik güç çeviricisinden oluşmaktadır. Böylece ultrasonik teknikler tek başına büyük fakat geniş olmayan oksit filmleri yerine küçük yansımalar veren oksit filmlerinin büzülmüş alanlarından yankı/yansımaları toplayarak ölçüm yapabilmektedir [1], [145], [146], [147]. Şekil 2.20'da ultrasonik yöntem ile katışkı tayininin şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 2.20 Ultrasonik yöntem ile katışkılarının belirlenmesinin şematik gösterimi [148].

2.6.4 Vakum Altında Katılaştırma Testi (VAK) (Reduced Pressure Test(RPT))

Straube-Pfeiffer Testi olarak da bilinen VAK testinde Arşimet prensibine dayalı ergiyik alüminyum çözeltisindeki hidrojenin tamamının katılaştıkça açığa sıkması sağlanmaktadır. VAK testi belirli bir basınç altındaki kapalı bir hazne içerisine ergiyikten

alınan küçük bir numunenin katılaştırılmasını içermektedir. Katının yoğunluğunu ölçerek gözenekliliği belirlenmektedir. Gözenekler tarafından işgal edilen hacmin bilinmesini sağlar ve basınç katılan metal tarafından açığa çıkan hidrojen miktarını belirlemeye yardımcı olur. Alüminyum alaşımının kütlesini bilinmesi hidrojen derişiminin hesaplanmasına imkân sağlamaktadır. Bununla birlikte uygulamada VAK testi çözünmüş hidrojen miktarının doğru bir şekilde ölçülmesini temin etmez. Ayrıca bu yöntem gerçek zamanlı sonuçlar veremez. VAK testi basitliği ve nispeten hızlılığı sayesinde birçok dökümhane tarafından kullanılmaktadır [124], [149]. Şekil 2.21’de VAK cihazı gösterilmektedir.



Şekil 2.21 Vakum altında katılaştırma cihazı (VAK) [150].

2.6.5 Bifilm İndeksi (B_i)

Bilindiği gibi alüminyum ve alaşımlarının dökümlerinde çok kolay oksitlenebilen alaşımlardır. Döküm sırasında oldukça ince bir film tabakası formunda olan lakin oldukça zararlı etkilere de sahip olan bifilm diye isimlendirilen oksit filmlerinin varlığı ile çekinti ve gaz gözenekliliğinin anlamı daha da büyük önem arz etmektedir. Bifilm gözenekliliğinin ve hataların başlangıcını teşkil etmektedirler. VAK testinin kullanımı ile bu oksit filmlerinin varlığını açık bir şekilde ortaya koyulabilmektedir. Şimdiye kadar bifilm tahmin edilemeyen davranışları VAK testinin sayısallaştırılmasını zor hale getirmiştir. Dışınar ve Campbell [1], [2] VAK testinin basitliğinden, kolay tekrarlanabilirliğinden, ucuzluğundan, çabuk cevap alabilmelerinden dolayı ve yoğun bir

şekilde dökümhanelerde tercih edilmesine dayanarak ergiyik metalin temizliğinin sayısallaştırılmasını amaçlamışlardır. VAK numunesinin parlatılmış kesiti üzerindeki bifilmelerin toplam uzunluklarını kullanarak “Bifilm İndeksi” kavramını geliştirmişlerdir. Tipik olarak toplam bifilm uzunluğu 3 mm’den 300 mm’ye kadar farklılık gösterebilmektedir. Dışınar [1] değişik Al–Si esaslı alaşımların bifilm indekslerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini çalışmıştır. Bu çalışmalarda bifilmelerin birer kompozit malzeme oluşturucu etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [158]. Yüksek oksit miktarı sünekliği düşürmektedir lakin aynı zamanda da mukavemet değerini arttırmaktadır. Buradaki bu fenomenin tam olarak açıklanamamış olması yapılan testlerdeki uygulanan yüklerin durumuna göre bifilmelerin ne şekilde konumlanmış olduğu ile alakalı olmasına bağlanmaktadır [25], [35].

Günümüze kadar VAK testi prensibi yoğunluk indeksi üzerinden yorumlanmıştır. VAK testi sonuçlarının yorumlanmasında eğer ergiyikte katışkılar mevcut ise hidrojen hakkında kesin bir ilişki kurulamayabilir. Çünkü ergiyik alüminyumdaki katışkılar gaz kabarcıklarının oluşumu için çekirdekleyici olarak davranırlar. Katışığın olmadığı durumlarda ise VAK testi 0,3 ml/100 gr Al’ın altındaki hidrojen miktarlarına kadar hassasiyet gösterebilir. Burada şunu da net bir şekilde belirtmek gerekiyor; gerçek hidrojen miktarı test edilen alaşımın katılaşıma karakteristiğine bağlıdır [151].

Bununla birlikte VAK testi tek başına ergiyik temizliği ile hidrojen miktarı arasındaki farkı ayırt edemez. Şu durumu tekrar vurgulamakta fayda vardır; bifilmelerin yokluğunda hidrojen hem benzeşik (homojen) hem de ayrışık (heterojen) çekirdeklenemez [2]. Bu yüzden hidrojenin varlığını belirlemek için VAK testinin kullanımı yanlış yönlendirilmiş bir yöntem olmaktadır. Ayrıca yoğunluk indeksi şeklinde testin kullanımı da benzer şekilde faydasız görünmektedir. Çünkü eğer aslında genellikle bu şekilde bir davranış sergileyen bifilmeler kapalı şekilde bulunurlar ise çok yüksek sayıdaki bifilmelerde dahi yüksek metalik yoğunluğu değeri elde edilecektir. Dışınar ve Campbell [152], [153] tarafından yapılan çalışmalarda VAK testinin parlatılmış kesitinden yapılan görüntü analizinde metal kalitesini belirlemek için çok uygun bir yöntem olduğu saptanmıştır. “Bifilm İndeksi” kullanarak metal kalitesini belirlemişlerdir. VAK testi numunelerinin parlatılmış yüzeyinden gözeneklerin en yüksek uzunluklarının toplamını kullanarak öngörülen

bifilmelerin toplam uzunluğu ile ifade edilen Bifilm İndeksi'nin bağıntısı şöyledir [152], [153], [154], [155], [156], [157], [158], [159], [160], [161];

$$\text{Bifilm İndeksi} = \sum (\text{gözenek uzunluğu})$$

Bifilm İndeksi'nin birimi milimetredir.

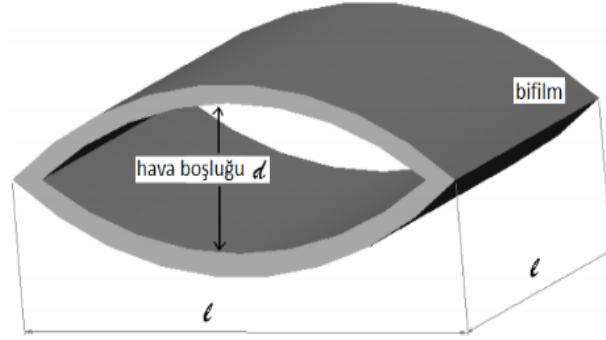


Şekil 2.22 Bifilm İndeks ölçümü [162].

Şekil 2.22'de verildiği gibi kesit yüzeyi taranarak resim formatına çevrilen numune görüntü analizi programına aktarılarak gözeneklerin işaretlenmesi sağlanır (kırmızı ile seçili bölgeler). Daha sonra bu gözeneklerin maksimum uzunlukları program vasıtasıyla hesaplanır ve toplam uzunlukları Bifilm İndeksi olarak verilir. Bu analizin her adımı detaylı olarak Dispınar, D., ve Campbell, J. "Reduced Pressure Test (RPT) For Bifilm Assessment" isimli kaynakta bulunabilir.

VAK testi kullanılarak üretilen Bifilm İndeksi basitçe gerçek dökümlerde karşılaşılabilecek olan sıvı metal temizliği hakkında doğru bilgiyi verebilmektedir. Bifilm İndeksi ayrıca basitlik ve düşük maliyet açısından da diğer yöntemler ile mukayese edilemeyecek kadar uygun bir yöntemdir. Bifilm İndeksi ile döküm kalitesine ciddi şekilde etki eden çift katlı oksitlerin yani bifilmelerin tespiti bakımından en önemli yöntemdir [1], [2], [13], [25], [35], [65], [66], [148], [152], [153], [154], [161].

Dışınar [1] olası bir çift katlı oksit filmi yani bifilmin basitçe şematik gösterimini şematik olarak göstermiş. Bu şematik gösterim Şekil 2.25’de sunulmuştur.

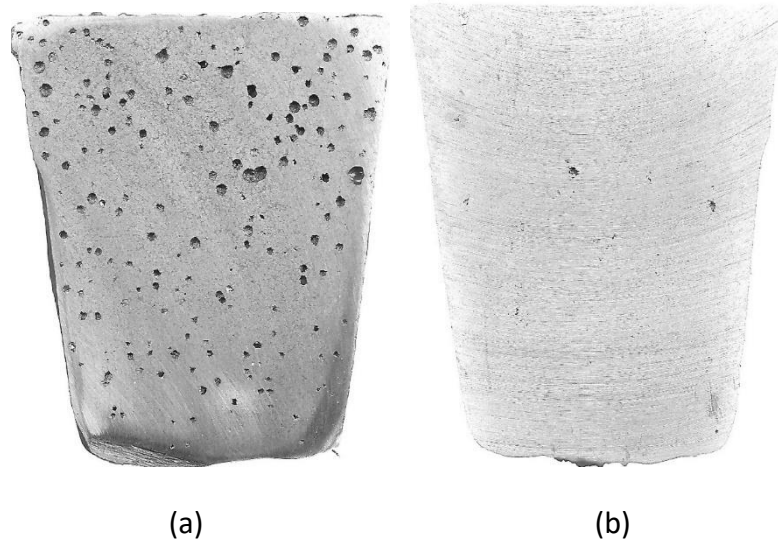


Şekil 2.23 Bir çift katlı oksit filminin (bifilm) şematik gösterimi [1].

Şekil 2.23’deki gibi basit bir bifilm geometrisi ele alındığında ve bifilm uzunluk açısından eşit olduğu varsayılır ise ortalama hava boşluğunun kalınlığı d kadar olur ve havanın hacmi ise V olduğunda şöyle basit bir denklik türetilebilir [1];

$$d = \frac{V}{(BI)^2} \quad (2.14)$$

BI ; Bifilm İndeksidir (mm) ve Şekil 2.23’deki l uzunluğudur. Bu değerin karesinin alınması ile bifilmin toplam alanı öngörülebilir [1]. Şekil 2.24’de gösterilen VAK testi numunelerinin gaz giderme öncesi ve sonrası görüntüleri mevcuttur.



Şekil 2.24 (a) VAK testi numunesinin gaz giderme ve eritkenleme işlemi öncesindeki görüntüsü ve (b) sonrasındaki görüntüsü.

2.7 Gaz Giderme

Ergiyik alüminyumda hidrojen hariç bilindik çoğu gaz kolayca çözünemez. Atmosfer basıncında ergime noktasında bulunan ergiyik alüminyumdaki hidrojen miktarı 0,036 ml/100gr Al'dan 0,69 ml/100gr Al'a kadar yükselebilmektedir. Sıcaklık 720 °C'nin üzerine çıktıkça 1 ml/100gr Al mertebesini de aşabilmektedir. Tipik olarak 0,2–0,3 ml/100gr Al aralığında bulunması gereken hidrojen miktarı olumsuz sıvı metal proseslerinde 0,6 ml/100gr Al (0,535 ppm)'dan daha yüksek seviyelere yükselebilir. Bu sebeple hidrojen miktarını sürekli olarak denetim altında tutmak gerekmektedir [2], [25], [35], [163].

Ergiyik alüminyumdan hidrojenin giderilmesi için en yaygın teknikler şunlardır;

- a. Ticari gaz giderme tabletleri,
- b. Tepkimez gaz kullanarak üfleç (lans) ile gaz giderme,
- c. Tepkinir gaz kullanarak üfleç ile gaz giderme,
- d. Tepkimez gaz kullanarak döner çark ile gaz giderme.

Gaz giderme prosesi gaz ile metal fazları arasındaki temasın artırılması ile başarılabilir. Bu durum temas alanı ile sıvı içerisinde gazın bulunma süresi ile elde edilebilir. Bu yolla ergiyikten gaza çözülmüş hidrojenin yayılımı da en yüksek seviyeye çıkmış olur. Buradan şu sonuç çıkmaktadır en yüksek derinliğe yani proses edilecek potanın en dip kısmına erişebilen bir gaz üfleme sistemi ile ince, küçük taneli gaz püskürtülmelidir. Gaz giderme işlemleri fırınlarda veya potalarda yapılabilir daha sonraki durumda proses edilme süresini telafi etmek için bir miktar aşırı ısıtma gerekli olabilir [163].

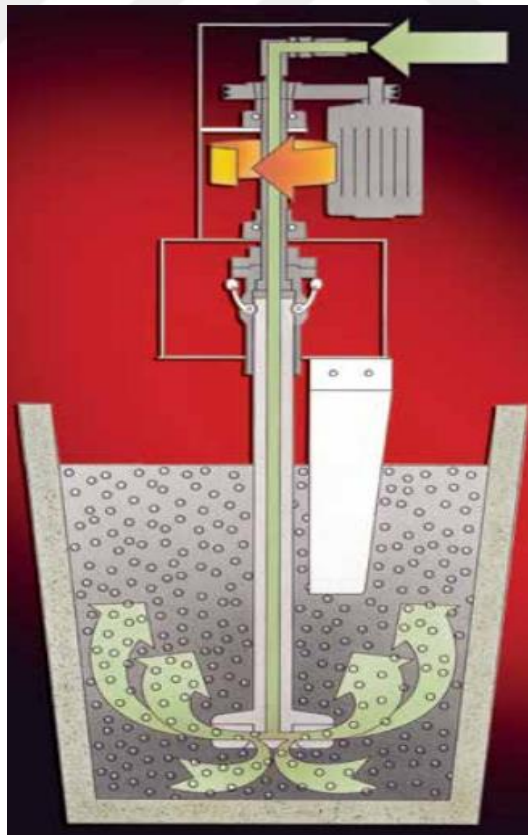
Tablet kullanarak yapılan gaz giderme işleminde oluşturulan kabarcıkların gelişiminin kontrolü zor olmasından ve klor içeriğine sahip olmasından dolayı kolayca HCl gazı ortaya çıkartarak çevreye ve işçi sağlığını tehdit edici olmasından ötürü dökümhaneler son zamanlarda tabletle gaz giderme işlemini kademeli olarak terk etmeye başlamışlardır [2], [163], [164].

Üfleç tasarımı genellikle grafit esaslı malzemelerden yapılmaktadır. Lakin uygun kaplayıcılar kullanılarak da çelik borulardan faydalandığı bilinmektedir. Aslında üfleç kullanılarak yapılan işlem de tabletle yapılan proses benzer şekilde büyük kabarcıklar oluşturur. Kabarcığın hacminin artması kabarcığın sıvı içerisinde kısa süre kalacağı

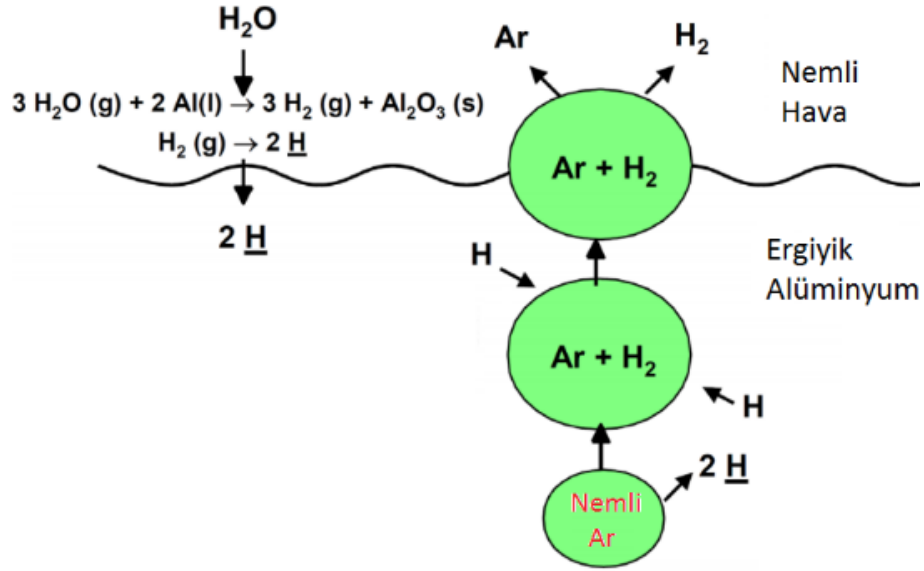
anlamına gelmesinden ötürü çok tercih edilen bir durum değildir. Argon ve azot gibi tepkimez gaz kullanarak üfleç ile yapılan gaz giderme işlemi istenen seviyelere ulaşabilmek için 15 dk'ya kadar uygulanabilir [163], [164], [165], [166], [167], [168], [169].

Sanayide en yaygın ölçüde kullanılan gaz giderme prosesi azot gazı kullanılarak yapılan döner çark (impeller) sistemine sahip gaz giderme prosesidir. Azot gazının hidrojen gidermedeki verimi tartışılrsa da ucuzluk ve kolay temin gibi sanayi bakış açısından dolayı hâlihazırda en geniş çapta kullanılan tepkimez gaz azottur. Gaz giderme verimi klor gibi tepkinir gaz kullanımı ile bir miktar arttırılabilir. Şöyle ki; Ar gazının süpürme etkisine, Cl₂ gazının H⁺ bağlama yeteneği ile birleştirilir. Şekil 2.25'de döner çark sistemine sahip gaz giderme prosesinin şematik gösterimi mevcuttur [163], [164], [167], [168], [169].

Şekil 2.26'da tepkimez gazlar kullanılarak hidrojenin giderilmesi sırasındaki mekanizma gösterilmektedir. Eğer gaz giderme prosesinde Cl gibi hidrojen ile bileşik oluşturabilen gaz kullanılır ise HCl oluşabilir [170].

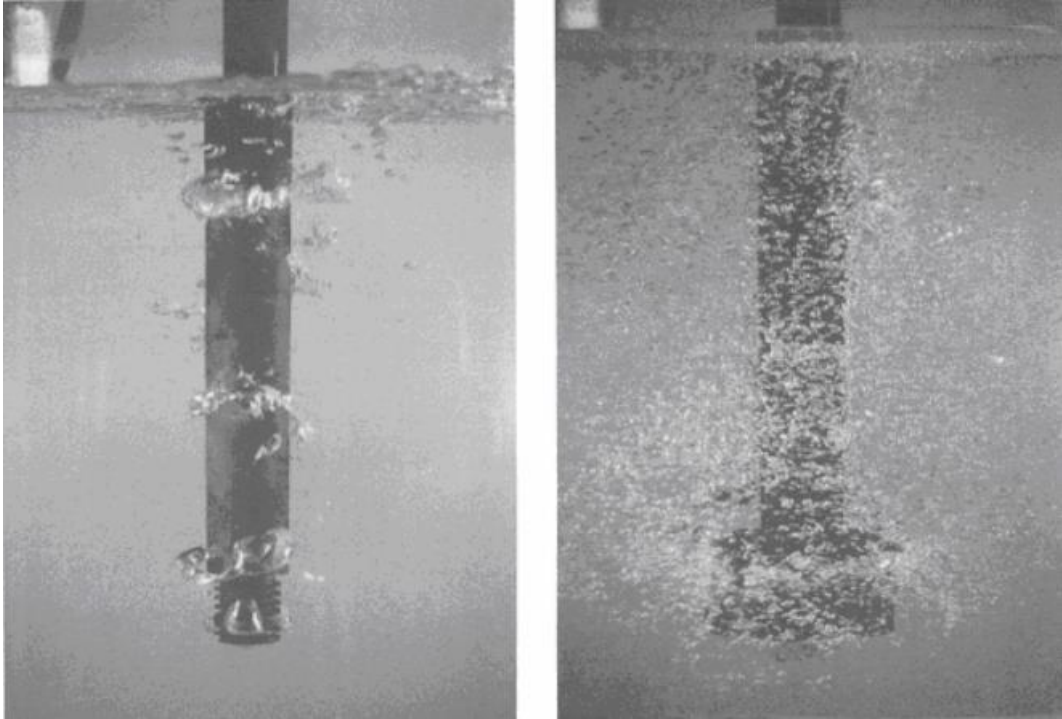


Şekil 2.25 Döner gaz giderme cihazının şematik gösterimi [165].



Şekil 2.26 Tepkimez gazlar kullanılarak hidrojen giderilmesi [171].

Gaz giderme sırasındaki hidrojenin yayınımına etki eden ana etmenler ergiyik ile gaz arasındaki temas yüzeyinin alanı ve gaz ile ergiyik arasındaki temas süresidir [1], [172], [173]. Bu iki özelliği sağlayabilmek için Şekil 2.27’de gösterildiği gibi farklı tipler de gaz giderme aparatları tasarlanmıştır [174].



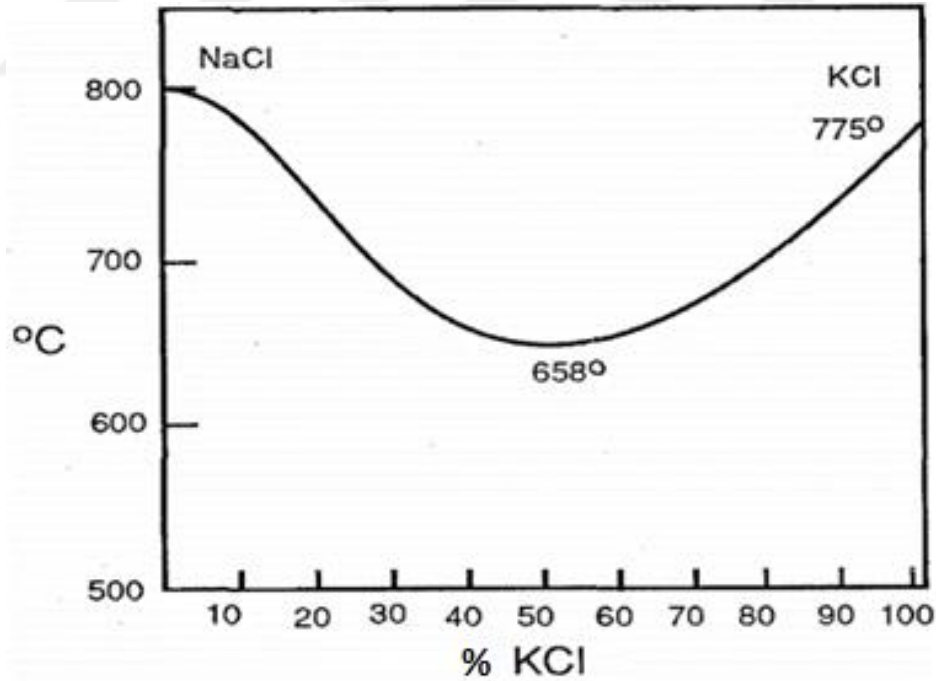
(a)(b)

Şekil 2.27 Farklı türdeki gaz giderme aparatlarının kabarcık boyutları ve dağılımları (a) üfleç, (b) döner gaz giderme kafası (rotor) [174].

2.8 Eritkenleme (Flakslama)

Alüminyum metalürjisinde yaklaşık olarak 150 çeşit eritken vardır. Bu eritkenlerin büyük çoğunluğunu ağırlıkça aynı olacak şekilde ayarlanmış NaCl-KCl esaslı bileşikler oluşturmaktadır. Bu NaCl-KCl esaslı bileşiklere sıvı metal işlemlerindeki istekleri karşılaması açısından CaF_2 , NaF, KF, AlF_3 , K_3AlF_6 , AlCl, NaAlCl_4 , KAlCl_4 , Na_2SiF_6 gibi bileşikler eklenebilir. Çok farklı bileşikler ile on binlerce döküm yapılmış olmasına rağmen günümüzde hala tam olarak eritkenleme proseslerinin mekanizmaları, etkinlikleri ve detayları anlaşılammıştır [16], [163], [175]. En yaygın olarak kullanılan eritken bileşikleri genel bir çerçevede Çizelge 2.6'da sunulmuştur.

Eritkenlerin ergime sıcaklıklarının kullanılacakları alaşımın ergime sıcaklığından daha düşük olması istenir. Bu sebeple Şekil 2.28'de gösterildiği gibi %50 NaCl-%50 KCl şeklinde düşük ergime sıcaklığına sahip olacak şekilde tasarlanırlar. NaCl-KCl karışımının nispeten düşük ötektik sıcaklık sergilemelerinden dolayı büyük çoğunlukla eritken bileşimlerinin temelini oluştururlar. Bununla birlikte Mg içeren alaşımlarda MgCl_2 -KCl karışımı da kullanılmaktadır [12], [175].



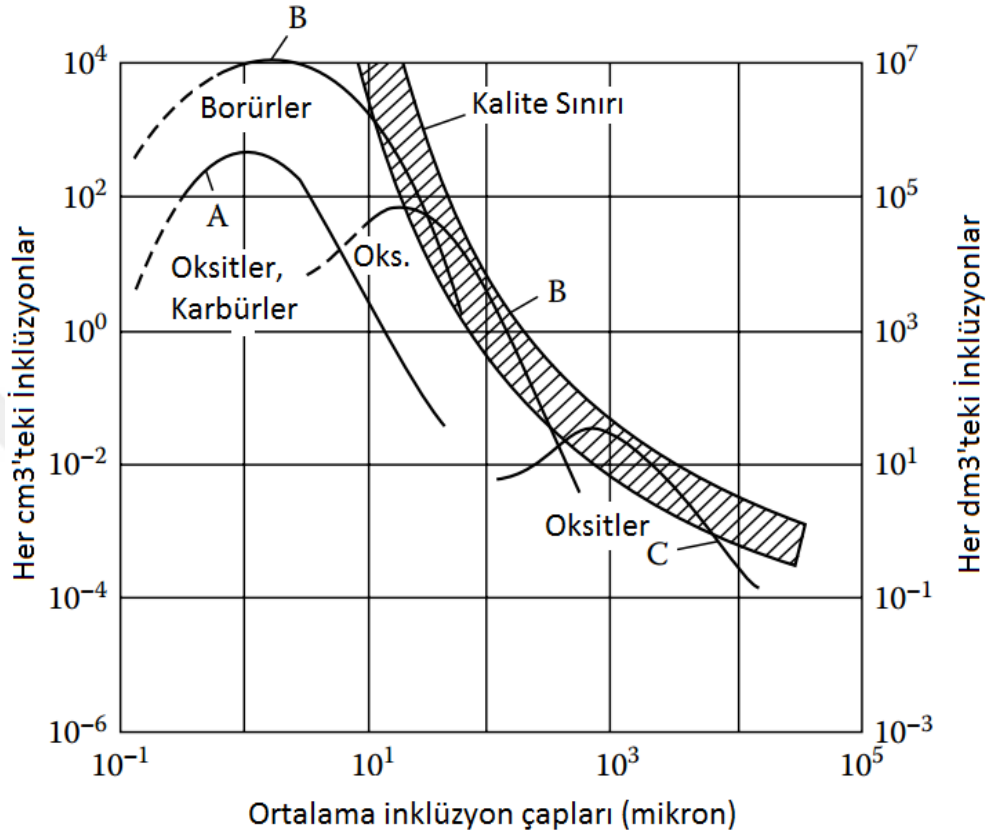
Şekil 2.28 Bileşim ile NaCl-KCl karışımının ergime noktasının değişimi [16].

Çizelge 2.6 Alüminyum alaşımları için eritken olarak kullanılan bazı bileşiklerin karakteristikleri [175].

Bileşik	Kimyasal Formülü	Yoğunluk (gr/cm ³)		Ergime Noktası (°C)
		Katı	Sıvı	
Alüminyum Klorür	AlCl ₃	2,440	1,31	190
Alüminyum Florür	AlF ₃	3,070	-	1040
Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	2,367	-	741
Kalsiyum Klorür	CaCl ₂	2,412	2,06	772
Kalsiyum Florür	CaF ₂	3,180	-	1360
Karnalit	MgCl ₂ KCl	1,600	-	487
Çinko Klorür	ZnCl ₂	2,910	-	262
Çinko Florür	ZnF ₂	4,840	-	872
Kriyolit	3NaFAIF ₃	2,970	-	1000
Lityum Klorür	LiCl	2,086	1,50	613
Lityum Florür	LiF	2,295	1,80	870
Magnezyum Klorür	MgCl ₂	2,325	-	712
Magnezyum Florür	MgF ₂	3,000	-	1396
Potasyum Klorür	KCl	1,984	1,53	776
Potasyum Florür	KF	2,480	8,80	880
Potasyum Borat	K ₂ B ₂ O ₄	-	-	880
Potasyum Sülfat	K ₂ SO ₄	2,662	-	1076
Potasyum Karbonat	K ₂ CO ₃	2,290	-	891
Kalsiyum Klorür	CaCl ₂	2,165	1,55	801
Kalsiyum Florür	CaF ₂	2,790	1,91	980

Alüminyum ve alaşımlarındaki katışkıların çeşitli birçok kaynağı vardır. Katışkıların bir kısmı, birincil alüminyum üretiminden gelen hidrojen, oksit, borür, karbür ve tuzlardır. Ayrıca bu bileşiklere ilaveten Na, K, Ca, Li gibi alkali ve toprak alkali safsızlıklar da bulunabilir. Şekil 2.29'de alüminyum ve alaşımlarında sıkça karşılaşılan katışkılar ve parçacık boyutları verilmektedir [176]. Taralı alan döküm alüminyumda bulabilen farklı boyutlardaki katışkıların derişimleri için kalite sınırlandır. Bu sınırlar işlem veya dövme alaşımlarında daha da düşüktür. Y-ekseni döküm haliyle içyapıdaki birim alana düşen katışkı derişimini ifade eder iken X-ekseni de katışkıların ortalama çaplarını belirtmektedir. C eğrisi döküm sırasında oluşan katışkılar tanımlamaktadır yani oksit tabakaları ile cüruf katışkılarıdır; dış kaynaklı katışkılar bu eğriyi düşürebilmektedir. B

eğrisi ergitme ve ergitme işlemleri sırasında meydana getirilen iç kaynaklı katışıkları ifade etmektedir. Genel olarak oksit katışıkları karbür veya borür parçacıklarının karışımlarından daha büyük olma eğilimindedirler ve kaliteli dökümler elde etmek için mutlaka giderilmesi gerekmektedir [124].



Şekil 2.29 Parçacık boyutuna bağlı ergiyik alüminyumda farklı tipteki katışıkların derişimleri [176].

Eritken kullanımı ile ergiyik metalin temizlenmesi (katışıkların giderilmesi), ergiyiğin oksitlenmesinin engellenmesi, ergiyik kayıplarının azaltılması, dökümden önce metalin gaz giderme işleminin yapılması, istenmeyen eser elementlerin giderilmesi, alaşımlama, tane inceltme veya modifikasyon ajanlarını içeren bileşikler kullanarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanabilir [2], [163], [175]. Lakin fırın duvarı temizleme, Mg giderme, vs. gibi işlemler diğer işlemler ile kıyaslandığında oldukça nadir kullanılmasından dolayı en genel çerçevede eritkenleme işlemi 4-ana başlık altında toplanabilir [177].

1. *Örtü eritkenleri*; ergiyiğin gaz kapmasını engellemek ve oksitlenmeye dayalı cüruf oluşumunu azaltmak için kullanılır.

2. *Aritma eritkenleri*; katı metalik olmayan katışıkları gidermek için kullanılır.

3. *Gaz giderme eritkenleri*; döküm gözenekliliğini teşvik eden hapsolmuş gazları gidermek için kullanılır.

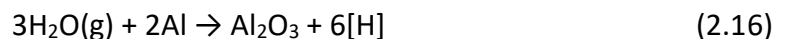
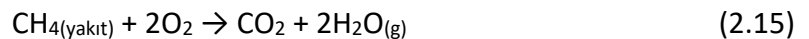
4. *Cüruf çekme eritkenleri*; cüruftan metal kazanımı sağlamak amacı ile kullanılır.

Çoğu farklı safsızlıklar uygun bir şekilde eritkenleme ile giderilir. Bunlar karbürlere (Al_4C_3), nitrürler (AlN , TiN , ZrN), oksitler (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO), spineller, alüminasilikat ($Al_2O_3 + SiO_2$) ve alkali metaller gibi diğer safsızlıkları içermektedir. Ayrıca eritken atmosfer ve yanma gazlarının giderilmesini sağlar ve ilave oksijen kapılmasını engel olur [12], [175], [178].

2.8.1 Örtü Eritkenleri

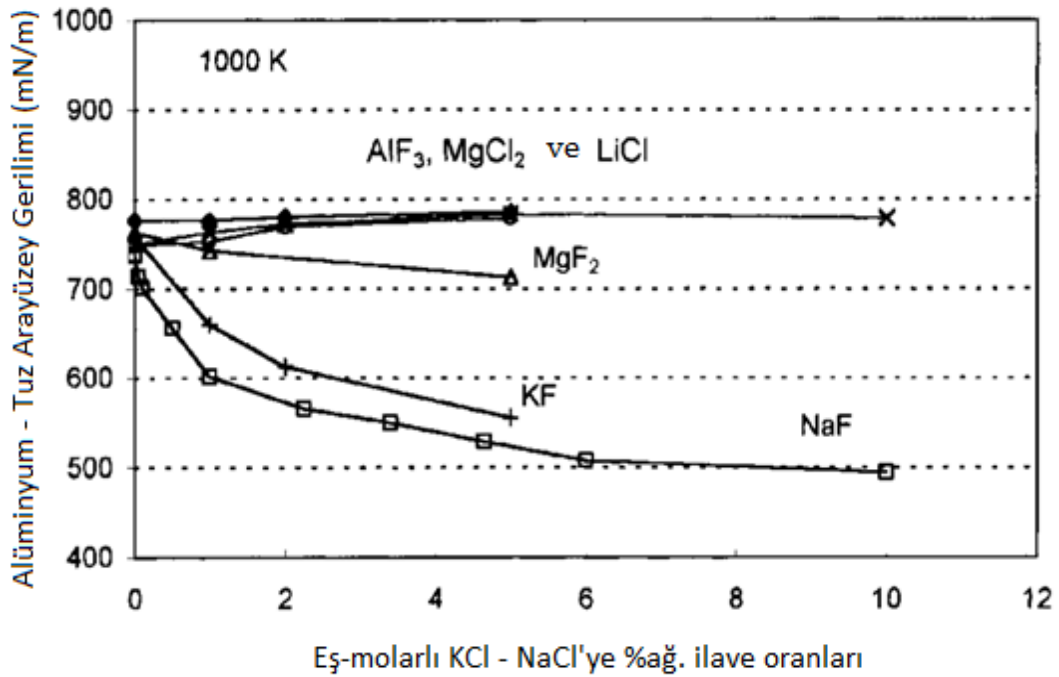
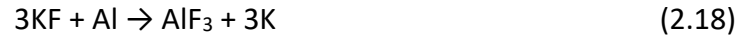
Örtü eritkenleri havadaki nem ile tepkimesinden ve oksitlenmesinden korumak amacıyla sıvı banyonun yüzeyinde ergiyik bir tabaka oluşturan çeşitli tuzların karışımıdır. Bu tuz karışımları atmosferden ergiyiği yalıtırlar ve ergiyiğe herhangi yeni bir elementin girmesine izin vermezler. Ticari olarak çok çeşitli örtü eritkenleri mevcuttur lakin tüm örtü eritkenleri çeşitli oranlarda alkali klorürler ile bir miktar florürler ihtiva etmektedir [16], [179].

Çoğu eritken akışkanlığını arttırmak için en düşük ergime sıcaklığına ($658\text{ }^\circ\text{C}$) sahip $KCl-NaCl$ karışımına dayanmaktadır. Yaygın olarak ilave edilen bileşikler NaF ve Na_3AlF_6 'dır ve tipik bir örtü eritkeni %47,5 $NaCl$, %47,5 KCl ve %5 florür tuzudur. Örtü eritkenleri oksitlenmeye bir fiziksel set gibi davranarak ergiyik alüminyumun oksitlenmesini engeller. Bu eritken alaşım %2 Mg içerdiğinde, talaş ve ince kırpıntıların ergitilmesinde, yüksek oksitlenme koşulları ($T_d > 775\text{ }^\circ\text{C}$) altında oldukça önemlidir. Bir örtü eritkeni hidrojen içeren yakıtlar kullanılarak ergitme yapıldığında oluşan H_2O ile alüminyum arasındaki tepkimeden hidrojen kapma hızını da düşürmektedir.



Örtü eritkenlerinin bir diğer sınıfı da $424\text{ }^\circ\text{C}$ gibi düşük bir ergime ötekliğine sahip $MgCl_2-KCl$ karışımıdır. Bu örtü eritkenleri yüksek akışkanlığa sahiptirler ve ergiyik yüzeyinde ince

bir tabaka oluştururlar. Ayrıca $MgCl_2$ nemkapar bir yapıya sahip olmasının yanı sıra pahalıdır. Öncelikli kullanım alanı oldukça düşük Na ve Ca miktarlarına sahip ve %2'den daha fazla Mg içeren alüminyum alaşımlarında kullanılır [175]. NaF ve KF esaslı tuzlar eritken ile metal arasındaki (Şekil 2.30) ve eritken ile oksitler arasındaki arayüzey gerilimini düşürmektedirler [180]. Bu sebepten dolayı florür içeren tuzlara sahip alüminyum aşağıdaki tepkimeye bağlı olarak kolayca bir miktar Na veya K kapabilir;

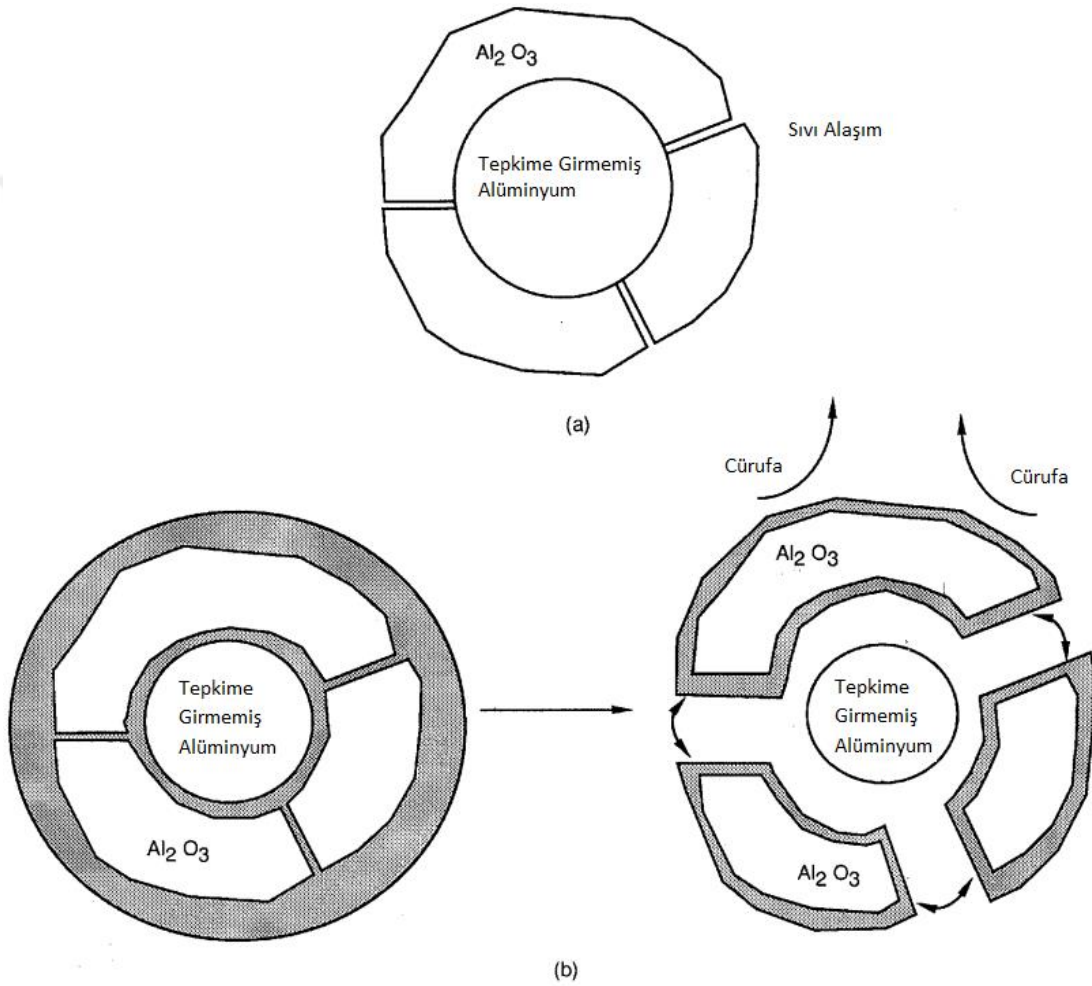
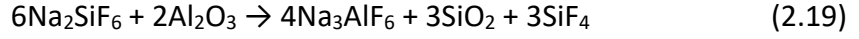


Şekil 2.30 Alüminyum – tuz arayüzey gerilimi [180].

Hem Na'nın hem de K'nın yüzey etkin elementler olmasından dolayı alüminyumun yüzeyinde yoğunlaşırlar. Bu yüzden flor tuzları ergiyik alüminyum ile temas ettirildiklerinde hızlı dönüşüm tepkimeleri gerçekleşecektir. Klorürler bu özelliği biraz düşük bir mertebede ortaya koyarlar. NaF ile KF cüruftan metalik alüminyumun ayrılabilmesini sağlar ve alüminyumdan da oksit katışıklarının ayrılmasında ıslatabilirliği de arttırır. Alkali flor tuzları metaldeki Na'un kapılmasını teşvik ederek metaldeki Na derişimini arttırırlar. Ayrıca imha edilmeleri çevresel düzenlemeler kapsamında çok katı kurallara bağlıdır [175], [181], [182].

2.8.2 Arıtma Eritkenleri

Arıtma eritkenleri ergiyikten alüminyum oksit (alümina) parçacıklarının gidermek için tasarlanmaktadır. Şekil 2.31’de temizleme/arıtma/saflaştırma durumunun şematik gösterimi verilmektedir. Buradaki tasarımda etkin içerik Na_2SiF_6 ’dır. Eritken karışımına sodyum florosilikat eklendiğinde aşağıdaki tepkimede de gösterildiği gibi alümina parçalanır;



Şekil 2.31 Na_2SiF_6 'nın Al_2O_3 'ü parçalayarak ergiyik metali arıtma etkisi. (a) Na_2SiF_6 eklenmeden önce, (b) Na_2SiF_6 eklendikten sonra [16].

Temizleme/arıtma hareketi yüzey enerjisi etkisine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Sodyum florosilikat Al_2O_3 ile tepkimeye girmeyen alüminyum arasını kaplar. Oksit araya giren sodyum florosilikatın etkisi ile mekanik olarak sıyrılır ve cürufa doğru yükselir.

2.8.3 Gaz Giderme Eritkenleri

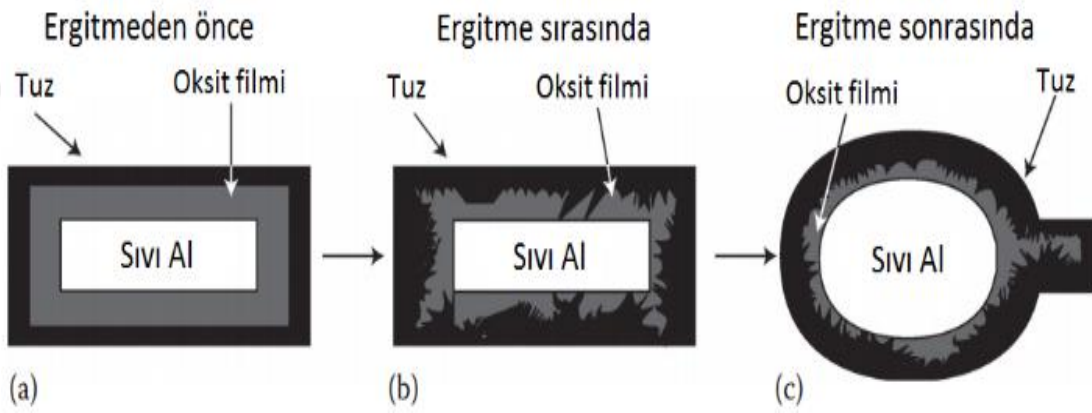
Klor ve flor içeren tuzlardan oluşan eritkenler aynı zamanda gaz giderme prosesinde de kullanılmaktadır. Gaz giderme eritkenleri granül, tozdan ziyade tablet şeklindedirler. Gaz giderme işlemi eritken tableti fırının dibine temiz, delikli ve ön-ısıtılmış bir çan ile daldırıldığında başlar. Eritken karışımları ile alüminyum tepkimeye girerek gazlı bileşikler oluştururlar ($AlCl_3$, AlF_3). Gaz kabarcıklar ve ergiyik dışına doğru yükselir. Oluşan kabarcıklarda hidrojenin kısmi basıncı çok düşüktür böylelikle kabarcıklar içerisinde ergiyik alüminyumdan yayınır. Kabarcıklar ergiyikten uzaklaşır ve gaz daha sonra gaz boşaltım sistemi tarafından uzaklaştırılır. Proses kabarcıklanma dinene kadar devam eder. Gaz giderme eritkeni püskürtme sistemi kullanılarak da ergiyiğe verilebilir. Bu durumda tepkimez bir gaz tanecik haline getirilmiş eritkeni taşıması için kullanılır. Gaz giderme etkisinin yanında gaz giderme işlemi ergiyikte askıda kalan metalik olmayan katışımların giderilmesine de imkân sağlar (arıtma etkisi) [179].

2.8.4 Cüruf Çekme Eritkenleri

Cüruf çekme eritkeninin işlevi oksitleri ve metalik olmayan malzemeleri soğurmak ve kolayca sıyrılabilinen metal içermeyen cüruf oluşturarak metalin temizlenmesidir. Potalı fırınlarda cüruf çekme eritkeni uygulandığında potanın kenarları kazınmış gibi bir hal alır ve uygulanacak gerekli miktar eritkenin örtüsü ile birlikte ergiyik yüzeyine serpiştirilir ve akkor bir cüruf tabakası elde edene kadar ergiyik yüzeyi üzerinde karıştırılır. Böylesi bir durumda metalsiz bir yapı oluşur ve delikli bir sıyrıcı ile bu tabaka alınabilir. Reverber ve kuyu tipli fırınlarda gerekli olan eritken miktarı şarj malzemesinin temizliğine ve metalin yüzey alanına dayanmaktadır. Örneğin 1-2 kg/m²'lik bir uygulama uygundur. Ergiyik cüruf çekme eritkeninin kullanımı için uygun olduğunda eritken metal yüzeyine serpiştirilir ve kaynaşması/ergimesi için birkaç dakika beklenir daha sonra birkaç dakika da cüruf içerisinde gelberi vasıtasıyla karıştırılır. En iyi sonuçları elde etmek için 700°C'nin üzerinde işlem yapılması gerekmektedir [183].

Özellikle cüruf çekme eritkenlerinde florürlerin kullanılma amacı Al_2O_3 gibi oksitlerin çözünürlüğünü arttırmaktır [184]. Florürlerin etkileri üzerine farklı birçok senaryo mevcuttur. Şekil 2.32'de ergiyik cürufundaki alüminyum damlacığının irileşmesindeki florür içeren eritkenlerin etkisi gösterilmektedir [185].

Bu bakış açısında eridikçe damlacıktaki alüminyumun şeklinin değişmesi oksit tabakasının kırılmasına neden olduğu düşünülmektedir. Çatlaklara nüfuz eden ergiyik eritken ergiyik damlacığı ile temas kurulmasını sağlamaktadır. Özellikle Na_3AlF_6 , NaF ile KF gibi flor esaslı eritkenlerin ilave edilmesi büyük ölçüde eritkenin damlacık yüzeyi boyunca yayılmasına neden olan ergiyik alüminyum üzerindeki ergiyik eritkenin yüzey gerilimini düşürmektedir [186]. Bu mekanizma geliştikçe oksit tabakasının kalıntıları metalden ayrılır ve diğerleri ile temas etmesi için serbest hale getirir. KNO_3 , Na_2CO_3 ve K_2SO_4 gibi oksitleyici bileşikler içeren bazı cüruf çekme eritkenleri de geliştirilmiştir [176].



Şekil 2.32 Flor esaslı tuzların oksit filmi üzerine etkileri. (a) metalin oksit filmine yapışması, (b) oksit tabakası boyunca eritkenin nüfuz etmesi, (c) metalin genişlemesi ve küresel bir geometri kazanması [185].

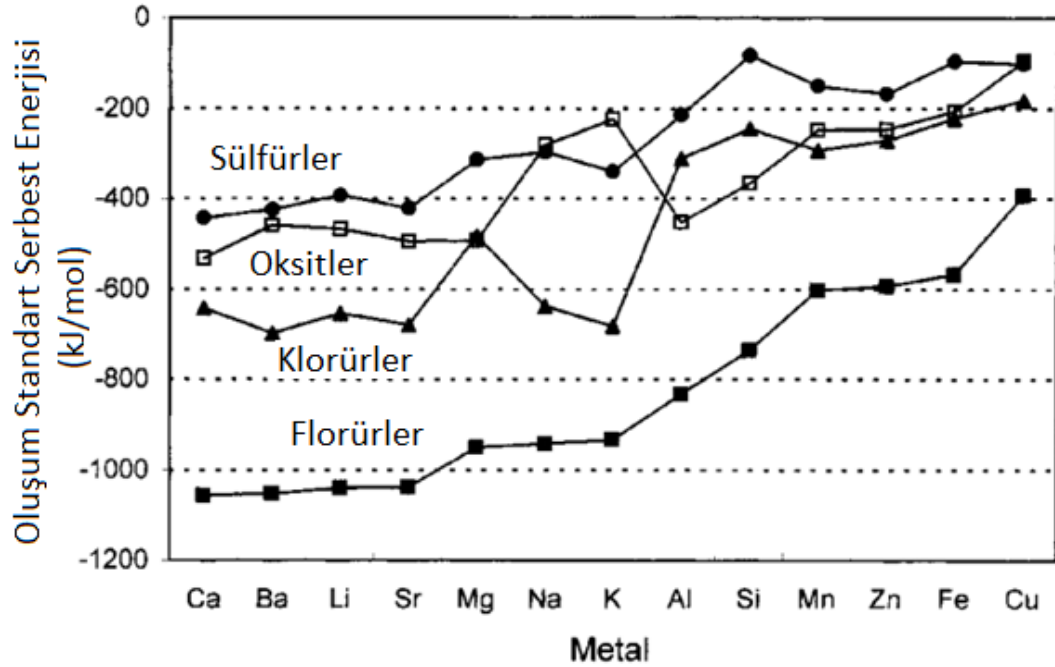
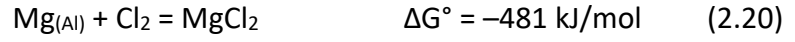
2.8.5 Alüminyum – Tuz Etkileşimi

Ergiyik alüminyumdaki ana metalik "safsızlıklar" küçük miktarlardaki Li, Na, Ca (<20ppm) ve büyük miktarlardaki magnezyumdur %(0,2–10). Şekil 2.33'de bazı bileşik türlerinin standart oluşum Gibbs enerjileri verilmiştir [187]. Küçük birkaç istisna ile birlikte termodinamik kararlılık aşağıda verilen dizilimdeki gibi florürlerden sülfürlere doğru azalır.

Florürler > Klorürler > Oksitler > Sülfürler

AlCl_3 'ün ΔG° değerinden çok daha eksi değerlikli ΔG° 'ye sahip metal klorürler AlCl_3 'den çok daha karardır. Bu demek oluyor ki birçok metalik element içeren alüminyumun içerisine Cl_2 püskürtüldüğünde, klor tercihi olarak bu metalik safsızlıklar ile tepkimeye girer. Aynısı florürlere de uygulanır. Li, Na, K, Ca, Mg ve Ba'nın tamamı alüminyumdan

daha kararlı klorürler ve florürler oluşturur. Bunlar ergiyiğe Cl_2 , F_2 , C_2Cl_6 veya SF_6 püskürtülmesi ile giderilebilir. Ergiyik içerisinde Mg elementi söz konusu olduğunda ise aşağıdaki gibi bir tepkime gerçekleşmektedir;



Şekil 2.33 723 °C'deki çeşitli sülfürler, oksitler, klorürler ve florürlerin oluşumunun Standart Gibbs enerjileri [187].

Şekil 2.34'de aşağıdakiler gibi tepkimeler için denge sabitleri gösterilmektedir;



X = Cl veya F

Me = Li, Na veya K



X = Cl veya F

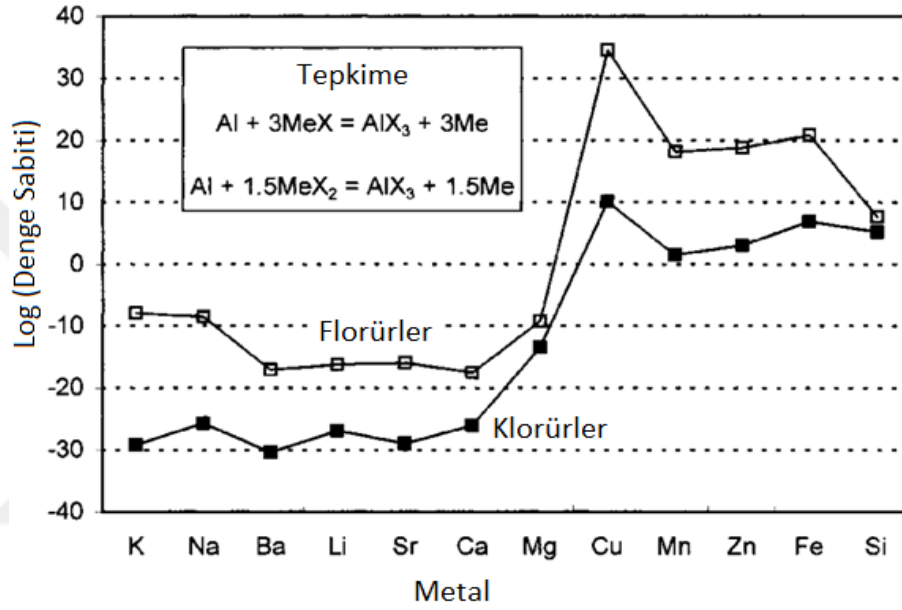
Me = Ca, Mg, Ba veya Sr

Denge sabitinin birden küçük değeri tepkimenin ters yönde ilerleyeceğini gösterirken, birden büyük değeri de tepkimenin yazıldığı gibi gerçekleşeceğini belirtir. Bu sebepten dolayı alkali veya toprak-alkali klorürler alüminyum ile tepkimeye girmeye eğilimli değildir lakin metal florürler çok daha tepkinirdir. Klor tuzları yüksek saflıkta alüminyum ürünlerinin üretimine imkân sağlamalarından dolayı Cl_2 püskürtülmesi sırasında klor tuzları örtü eritkeni olarak kullanılması uygundur. Klorlama veya florüleme ile Zn, Si, Fe ve Cu gibi safsızlıkların giderilmesi temelde imkânsızdır ve eritkenler bu metalleri

içerdiğinde alüminyumun kirleteceklerdir. Birincil alüminyumdan Na veya Li'un giderilmesi için metalin içerisine AlF_3 tozunun püskürtülmesi işlemini kapsayan TAC prosesi kullanılabilir.



Bu tepkimeler oldukça elverişli tepkimelerdir ve Na ve/veya Li'u alüminyumdan uzaklaştırır [12], [175], [177], [180], [187].



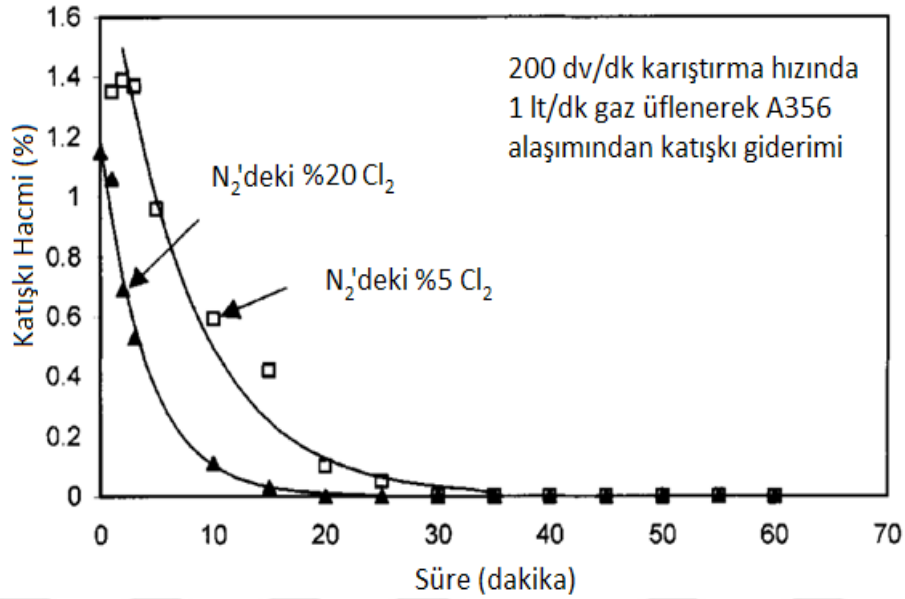
Şekil 2.34 723 °C'deki alüminyum, farklı metal klorürler ve florürler arasındaki denge [12].

2.8.5.1 Eritken Kullanımı ile Katışkı Giderilmesi

Alüminyum ve alaşımlarındaki genel katışkıları şu şekilde düşünülebilir; refrakter ile tepkimesi sonucu oluşan Al_4C_3 gibi birçok refrakter parçacığı; Al_2O_3 , MgO veya $MgAl_2O_4$ filmleri gibi oksit katışkıları; metal aktarımı, alaşımlama veya ergitme sırasındaki toplanma veya ayrışma; eritken ürünlerinin metalden iyi ayrılamamasından dolayı oluşan $CaCl_2$, NaCl ve/veya $MgCl_2$ 'den oluşan tuz parçacıklarıdır [12], [175].

Şekil 2.35'de gösterildiği gibi katışkı giderme verimliliği zaman ve bileşim açısından Cl_2 gazının düşük kullanımında hareketli bir şekilde metali karıştırarak başarılabilir. Cl_2 gazı katışkıların giderilmesinde etkili olmasına rağmen yetkililer tarafından katı çevresel kanunların hedefi haline gelmiştir. Son birkaç yılda yapılan deneysel çalışmalar

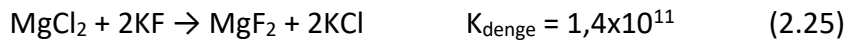
göstermiştir ki tuz eritkenleri başarılı bir şekilde Cl₂ gazının yerine geçmiştir [12], [175], [181]. Püskürtülen tuz eritkeni katışıkların üzerini kaplayabilir; ayrı parçacıkların birleşmesine ve alüminyumdaki katışıkların ıslatabilirliğine öncülük edebilirler. Sonuç olarak katışıklar ergiyik alüminyumdan kolayca ayrılabilir. Alümina katışıkları, NaF veya KF ilaveli klorür esaslı eritkende metal bekletilerek alüminyum-magnezyum alaşımlarından giderilebilir [12], [175].



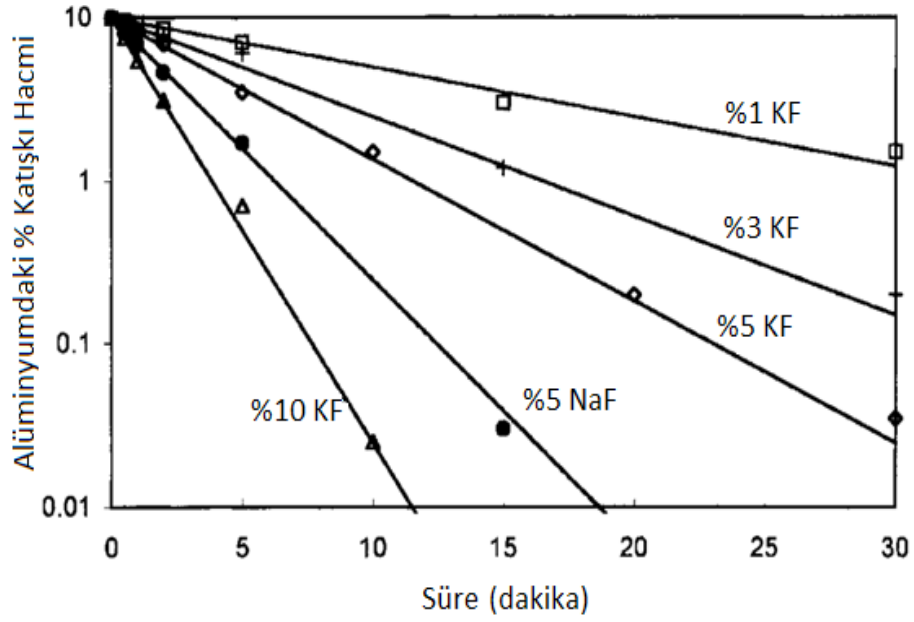
Şekil 2.35 Sabit dv/dk'daki iki Cl₂ miktarı için zamanla SiC katışığı yüzdesi değişimi (A356) [12].

Şekil 2.36'da görüldüğü gibi NaF ve KF miktarının artması katışığı giderme oranını da artırır. Beland, vd. [188] tesis ölçekli verileri tuz eritkeni püskürtülmesinin gerçekten de katışıkların giderilmesinde klorun tamamen yerini alacak potansiyelde olduğunu göstermiştir. Birçok işletmede döner eritken püskürtülmesi yöntemi en çok kabul gören proses olarak kullanılmaktadır [188].

MgCl₂-KCl esaslı tuzlar söz konusu olduğunda NaF ve KF ilavelerinin geciktirici etkisi gibi MgCl₂'nin de engel teşkil edici yönde davranacağı görülmektedir. Eritkenin yapısında %50 veya daha fazla MgCl₂ içeren durumlar için %10 KF eklenene kadar herhangi bir katışığı giderilme gözlemlenmemiştir. Bu durum aşağıdaki değişim tepkimesi ile açıklanabilir;



Bu tepkime KF'nin etkisini etkili bir şekilde engeller.



Şekil 2.36 NaCl-KCl karışımına KF'in ilavesi ile Al₂O₃ katışkılarının yüzdesindeki değişim [12].

Eritkende kullanılacak olan bileşenlerin seçimi alaşımdan istenen özellikler için belirlenen hedefe bağlıdır (alkali giderilmesi, temizlik, cüruf ayrıştırılması). Örneğin Na esaslı florür içeren eritkenler metali Na ile kirletmesinden kaçınmak için Al-Mg alaşımlarında kullanılmamalıdır. Yüksek Mg alaşımlarından Ca giderildiğinde yaklaşık %50 MgCl₂'lik bir eritken kullanılması önerilmektedir. NaF, KF ve Na₃AlF₆ ilaveleri küçük alüminyum parçacıklarının biriktirilmesi (topaklanması), alüminyumun geri kazanımı ve metalden katışkılarının uzaklaştırılması amaçlandığında kullanılması faydalıdır. Termodinamiksel bir bakış açısı ile metal florürler klorürlerden, oksitlerden ve sülfürlerden çok daha kararlılardır. MgCl₂, alkali ve diğer toprak alkali klorürler ile karşılaştırıldığında çok da kararlı bir tuz değildir. Lakin MgCl₂, MgCl₄⁻² ile karmaşık bir bileşik oluşturarak magnezyum klorürü daha etkin kararlı bir tuza dönüştürür. MgF₂ oldukça kararlı bir bileşiktir ve magnezyum içeren bir klor karışımına ilave edildiğinde tuzdaki magnezyumu kararlı hale getirecektir.

Liu, vd. [189] yaptığı çalışmada %40 NaCl, %30 KCl, %10 NaF ve %20 Na₃AlF₆ ilavesi ile katışkı miktarları %83,3'lük bir giderme oranı ile %2,1'den %0,35'e ve hidrojen miktarını da %68'lik bir giderme oranı ile 0,37 ml/100gr Al'dan 0,12 ml/100gr Al mertebesine düştüğünü göstermişlerdir.

2.8.5.2 Eritken ile Alüminyum ve Alüminyumdaki Katışkılar Arasındaki Arayüzey Gerilimi

Eritkenler ve alüminyum arasındaki arayüzey geriliminde tuz bileşiminin etkisi üzerine literatür [190], [191] eş-molarlı klor karışımına florür ilavelerinin arayüzey gerilimini düşürdüğünü göstermiştir.

Verimlilik sırası şöyledir [190];



Ho ile Sahai [191] aynı davranışı gözlemlemişlerdir ve MgF_2 ile CaF_2 'nin NaF 'tan daha düşük etkiye sahip lakin LiF 'den daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Yazarlara göre %10 mol üzerindeki NaF ilaveleri KF ilavelerinden daha düşük arayüzey gerilimleri ile neticelenmektedir. Arayüzey gerilim değeri $740\text{ }^\circ\text{C}$ 'de eş-molarlı NaCl-KCl karışımı ile alüminyum için 710 dyn/cm^3 ve aynı sıcaklıktaki eş-molarlı karışım ile $\text{Al-}\%1,6\text{ Mg}$ alaşımı için değer 550 dyn/cm^3 'tür.

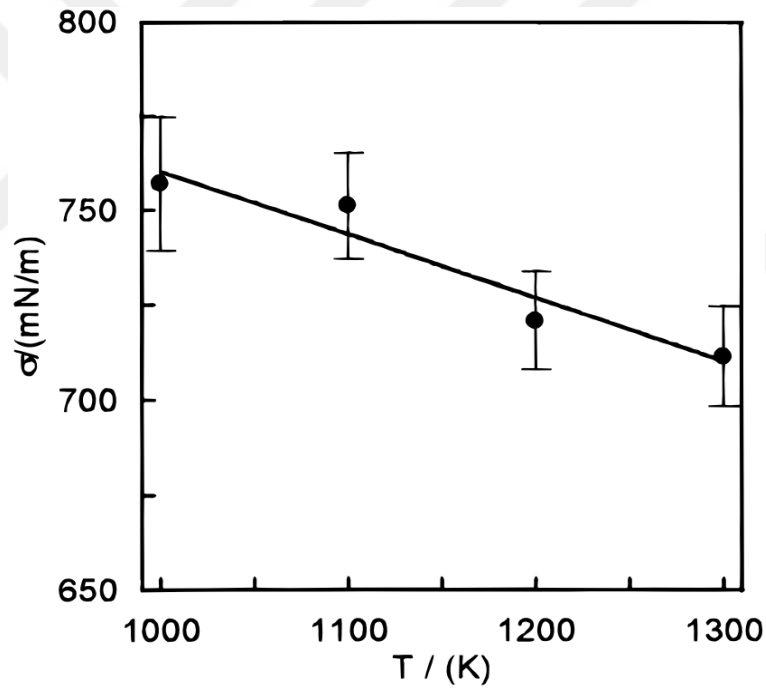
Van Linden, vd. [184] florür derişiminin %10'a kadar düşürüldüğünde alüminyum kazanımının daha etkili olduğunu ve ayrıca bu derişimin üzerinde verim CaF_2 ve MgF_2 ilaveleri ile elde edilmiş değerlere düştüğünü ve NaF ile KF ilaveleri için ise sabit kaldığını göstermişlerdir. Diğer taraftan Tenorio ile Delgado [192] NaF , KF , CaF_2 ve Na_3AlF_6 gibi florürlerin sadece %2,5'lik ilavelerinin verimi arttırmaya yettiğini ileri sürmüşlerdir.

Johnson ile Peterson [193] kullanılmış alüminyum içecek kutularının geri dönüşüm prosesinde alaşımdaki Mg derişiminin etkisini çalışmışlardır. $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ veya MgAl_2O_4 spinelinin varlığı cürufa siyahımsı bir renk vermektedir. Spinel alüminyumdan daha yoğundur dolayısıyla cüruf tabakasında kuvvetli bir geçiş eğilimine sahiptir. Bu gerçek alüminyum geri dönüşümünde bir düşüş olduğunu ifade etmektedir çünkü cüruf tabakasının altındaki oksidin zenginleşmesi cüruf tabakasının akmaazlığını (viskozitesini) arttıracaktır ve cüruftan alüminyumun ayrılmasında zorluklara neden olacaktır.

Stewart [194] alüminyum cüruflarında mevcut olabilen bileşiklerin şunlar olduğunu ileri sürmüştür; Al_2O_3 , AlN , AlC , MgF_2 , NaAlCl_4 , KAlCl_4 , SiO_2 , MgO , $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ve tuz bileşimleri. MgO ile NaF veya KF arasındaki tepkimenin sonucu olarak MgF_2 ortaya çıkabilmektedir.

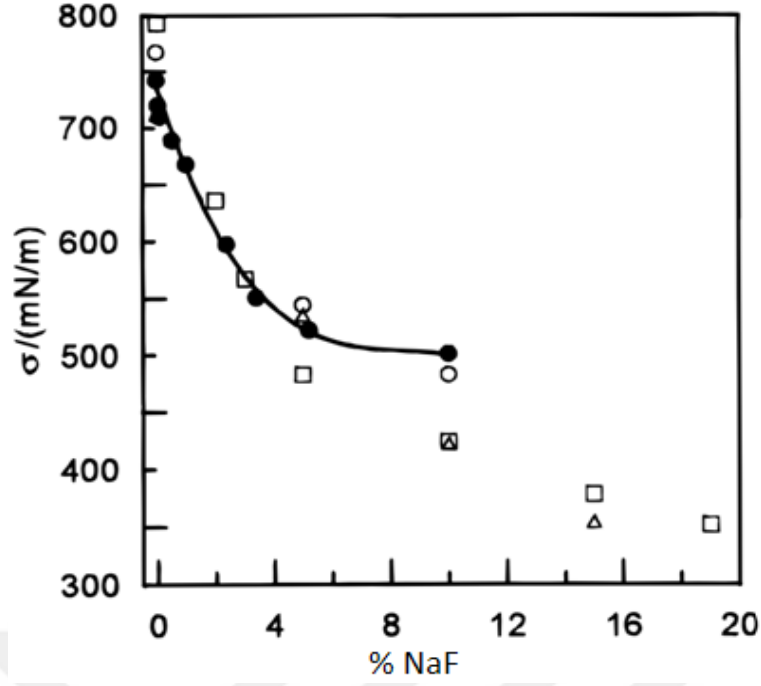
Masson ile Taghiei [195] tuz tabakasının içerisindeki alüminyum damlacıklarının kaynaşması tuz ile alüminyum damlacıkları arasındaki arayüzeydeki bir ara fazın ortaya çıkması tarafından etkilendiğini belirtmişlerdir. Bu tabaka esasen fırın koşullarında katı kalan KMgF_3 veya K_2NaAlF_6 'nın birleşimidir. Bu katı tabakanın ortaya çıkması alüminyum kaynaşma prosesi için ilave bir soruna/karmaşaya neden olmaktadır.

Alüminyum ile tuz arasındaki arayüzey gerilimi hem metal geri kazanımı hem de cüruf topaklanması bakımında çok önemli bir parametredir. Hurda metal her zaman bir oksit tabakasına sahip olmasından dolayı metalik damlacıkların kaynaşmasına imkân sağlamak için bu tabakanın hem mekanik hem de kimyasal anlamda kırılması gerekmektedir. Alüminyum ile eş-molarlı NaCl-KCl arasındaki arayüzey geriliminin 727°C (1000 K)'de yaklaşık 760 mN/m 'den 1023°C (1300 K)'de 712 mN/m 'ye doğrusal bir şekilde düştüğünü Şekil 2.37'de gösterilmektedir [196].



Şekil 2.37 Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Al ile eş-molarlı NaCl-KCl arasındaki arayüzey gerilimi [196].

Şekil 2.38'de görüldüğü gibi arayüzey gerilimi artan NaF miktarı ile belirgin bir biçimde düşmektedir. Eritken/alüminyum arayüzeyinde Na zenginleşmesi ile açıklanan bu etki alüminyum-kriyolit sisteminde de farklı araştırmacılar tarafından da önceden bulunmuştur.



Şekil 2.38 727 °C (1000 K)'deki NaF miktarının bir fonksiyonu olarak arayüzey gerilimi; (□) Martin-Garin, vd., 1979; (Δ) Kurdyumov, vd., 1973; (O) Ho ile Sahai, 1990; (●) Silny ile Utigard, 1996 [196].

Florürlerin ilavesi alüminyum ile tuzlar arasındaki arayüzey gerilimini muhtelif ölçülere kadar düşürmektedir. AlF_3 ilavesi en düşük etkiye sahip olmaktadır; LiF , MgF_2 , CaF_2 , BaF_2 veya SrF_2 ilaveleri orta derecede etkilidir; NaF ile KF ilaveleri arayüzey gerilimini en etkili şekilde azaltanlardır [197].

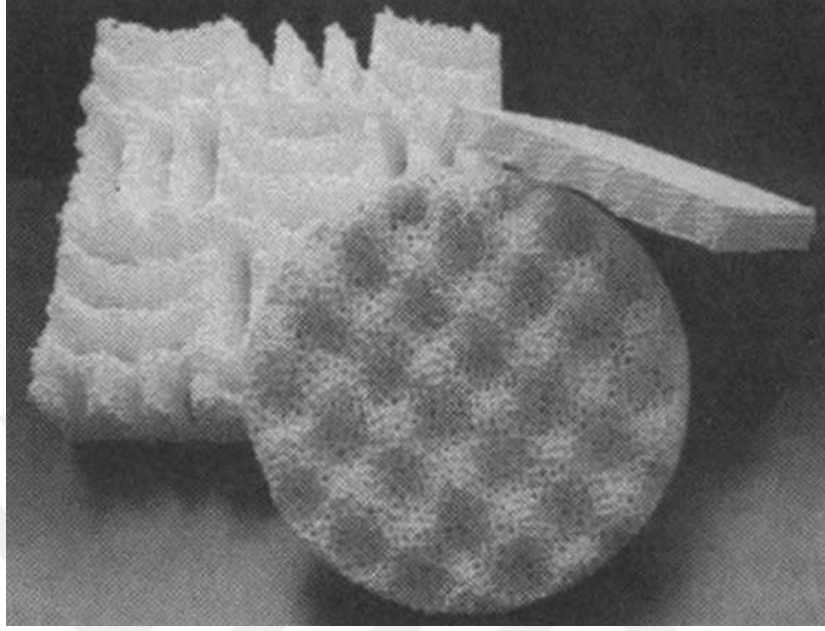
2.9 Süzme (Filtrasyon)

Mekanik özellikleri arttırmak için metalik olmayan katışkıların seviyesinin/miktarının azaltılması gerektiği çok iyi bilinmektedir. Bu sebeple çeşitli yöntemler sıvı alaşımların arıtılması için kullanılmaktadır. Süzme teknik yüzdürmeden (flotation) tamamen farklıdır ve en iyi özelliklere erişmek için zaruri olduğu düşünülmektedir. Süzme işlemi alüminyum alaşımlarının arıtılmasında başarılı bir şekilde kullanılmıştır ve son yıllarda demir esaslı alaşımlarda da kullanılmaya başlanmıştır.

Mekanizma olarak süzülme hem kimyasal hem de fiziksel olguların bir neticesidir. Metalik olmayan katışkıların giderilmesi aşağıdaki basamakları göz önünde bulundurarak açıklanabilir; sınır tabakasına nüfuziyet, süzgeç duvarına yapışma, süzgeç duvarı üzerinde sinterlenme. Sıvı alaşım süzülmesine etki eden en önemli değişkenler şunlardır;

süzgeç boyunca ergiyik hızı, süzgeç gözenek boyutu, süzgeç kalınlığı, süzgecin toplam yüzey alanı, süzgeç sıcaklığı, katışkılarının kimyasal bileşimi.

Şekil 2.39'de farklı boyut, geometri ve gözenekliliğe sahip süzgeçler gösterilmektedir.

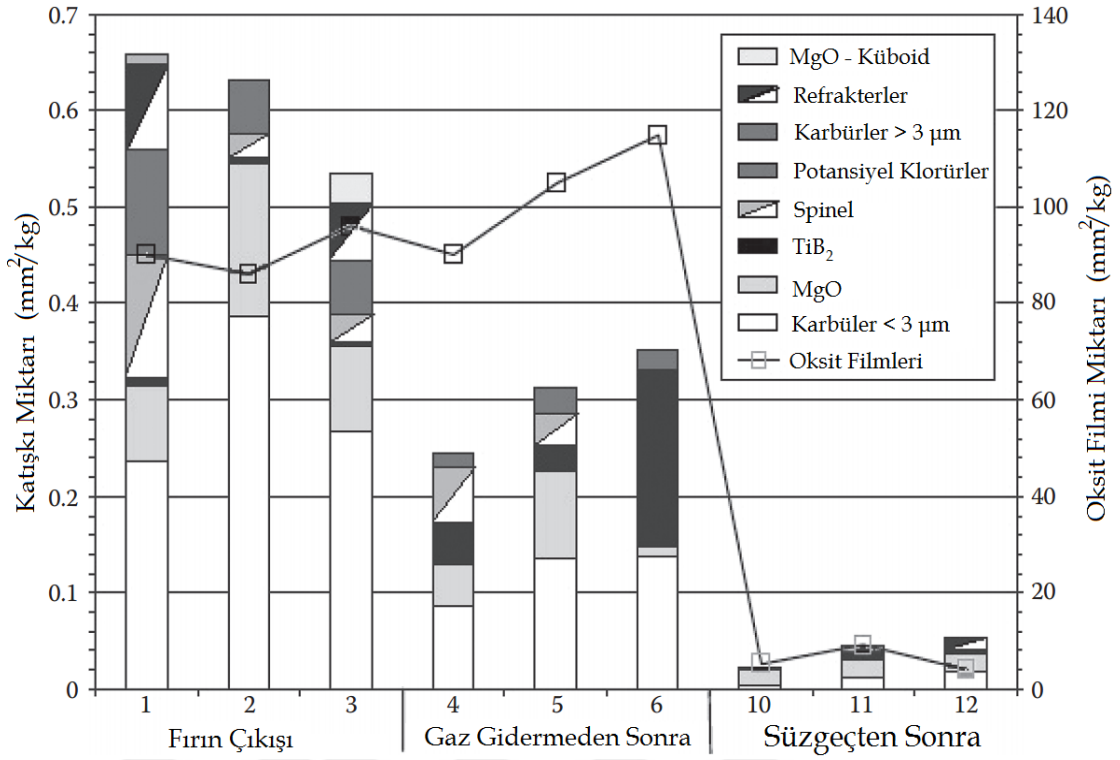


Şekil 2.39 Farklı şekillerdeki köpük süzgeçleri [198].

Alaşım-süzgeç, alایشım-katışkı ve katışkı-süzgeç ıslatma açısının önemi ve katışkı giderme verimliliği üzerine önemli etkileri olduğu tespit edilmiştir.

Katışkılarının 30 μm 'den küçük olduğu durumda süzgeç ortamı üzerindeki alikonulma ve taşınımın esası büyük ihtimalle akış dinamikleri ve yüzey kuvvetlerine bağlıdır. Ancak katışkılarının boyutu 30 μm 'den büyük olduğunda alikonulma mekanik hapselmeye bağlıdır. Ayrıca süzgeç yüzeyinde sinterlenen katışkılar yeni süzgeç yüzeyleri gibi davranırlar [199].

Süzme işleminden sonra geride kalan katışkılar büyük oranda küçük karbürler ve MgO içermektedir. Süzme işleminden sonra dahi bünyede bulunan bu küçük karbürlerin giderilmesi ergiyik alüminyumun saflaştırma teknolojilerinde hala ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Yeni yapılan çalışmaların bu karbürler üzerine olması hedeflenmektedir. Ayrıca Şekil 2.40'den görüldüğü gibi oksit filmi yani bifilm miktarı da %90 mertebesinde azaldığı görülmektedir.



Şekil 2.40 İkincil alüminyum üretimindeki katışkı derişimi üzerine gaz giderme ve seramik köpük süzgeci kullanımının etkileri [200].

2.10 Weibull İstatistiği

Bir mühendislik malzemesinin uygulamada kabul görmesi o malzemenin mekanik özelliklerinin tespit edilmesini ve daha sonra bu özelliklerin güvenilir, tekrarlı ve istikrarlı sonuçlar ortaya koyulmasını gerektirmektedir. Mekanik özelliklerden elde edilen bu sonuçların hasarlı olup olmadığının öngörülebilmesi için Weibull istatistiksel dağılımı kullanılmaktadır. Weibull dağılımı [201] deneysel bulgulardan elde edilen bağımsız sonuçlarını dağılımını, bu sonuçların arasındaki saçılımın ne denli büyük olduğunu incelemek ve deney sonuçlarının güvenilir seviyede olup olmadığının saptanmasında geniş bir ölçekte kabul görmekte ve kullanılmaktadır [202].

Temel Weibull dağılımı rastgele değişkenler x ile birikerek artan (cumulative) olasılığı $F(x)$ arasındaki grafikdir. Weibull dağılımının iki değişkenli şekli yaygın şekilde kabul görmüştür ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m} \quad (2.26)$$

$F(x) = x'$ in belirli bir değerinde veya altında hasara uğrayan numunelerin oranı (örneğin; ölçülmüş bir çekme dayancı, kırılma tokluğu, kopma uzaması, vs.), x_0 = numune sayılarının %63'ünün hasara uğradığı x' in karakteristik değeridir (ayrıca *alfa* (α) karakteristik ömür olarak da bilinir) ve $m = x$ —eksenine göre hasar verilerinin sapmasını karakterize eden bir sabit olan Weibull Modülü'dür (ayrıca beta (β) şekil parametresi olarak da bilinir. Weibull Modülü'nün mümkün olduğunda yüksek olması arzu edilir. Çünkü böylesi yüksek bir değer artan türdeşliği, daha az sapma ve daha tahmin edilebilir hasar davranışı olduğunu ifade etmektedir. Örneğin mekanik testlerden çekme dayancı sonuçları incelendiğinde Eşitlik (1) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir [202];

$$P(\sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m} \quad (2.27)$$

P = olasılık (grafik konumlarıdır (plotting positions)) ve σ = mukavemettir. Doğrusal ilişik aranması (linear regression) model parametrelerini belirlemek için kullanılır, m = şu haliyle basitçe grafiğin eğimidir:

$$\ln\left(\ln\left\{\frac{1}{1-P(\sigma)}\right\}\right) = m \cdot \ln(\sigma) - m \ln(\sigma_0) \quad (2.28)$$

Mukavemet değerleri (σ) düşükten yükseğe doğru sıralanır ve her biri sıralamasına bağlı olarak hasarın olasılığı olarak atanır. Literatürde birçok olasılık tahmin edici vardır. Bu olasılık tahmin edicilerin tamamının genel bir şekilde ifade edilişi aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$P = \frac{i - a}{n + b} \quad (2.29)$$

i = azalan sırada numunedeki veri noktasının sıralaması, n = numune boyutunu simgeler ve a ile b = konu ile ilgili katsayılarıdır. Eğer a ile b sıfır alınır ise o zaman bu durum ölçeğin dışında olan son noktadaki %100'ü verir. Weibull dağılım fonksiyonunun temel amacı verilerin düşük değerlerinden sonsuz boyutunun yoğunluğunu tahmin etmek için mühendislik verisi mümkün hale getirmektedir. Böylece bu sorunu düzeltmek için literatürde farklı olasılık tahmin ediciler keşfedilmiştir. Çizelge 2.7 sıralama yöntemleri de olarak bilinen genel olasılık tahmin edicileri özetlemektedir.

Çizelge 2.7 Genel olasılık tahmin ediciler [202].

Sıralamalı İlişki Arama Yöntemi	Tahmin Edici
Benard	$\frac{i - 0.3}{n + 0.4}$
Mean	$\frac{i}{n + 1}$
Hazen	$\frac{i - 0.5}{n}$
Filliben	$\frac{i - 0.3175}{n + 1.635}$
Blom	$\frac{i - 0.5}{n + 0.25}$
Gringorten	$\frac{i - 0.44}{n + 0.12}$

Kırtay ile Dışınar Çizelge 2.7'deki tüm hasar tahmin edicileri kullanarak yaptığı çalışmada [202] Hazen sıralamasının en düşük ilişki arama katsayısına sahip olduğunu tespit ederek deney sonuçlarının daha tutarlı, istikrarlı ve tekrarlanabilir olabileceğini göstermişlerdir.

Özetle Weibull Modülü (m)'nin artan değerlerinin incelenen verilerin yeniden uygulanmaları durumunda istikrarlı, güvenli ve tekrarlı olduğu bilinmelidir. Aksi durumda da düşük Weibull Modülü (m)'nin incelenen verilerin yeniden değerlendirilmesi ya da uygulanmasında birbirinden bağımsız ve saçılımlı sonuçlar doğuracağı anlaşılmalıdır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneylerde kullanılan şarj döngüleri sanayideki oranlar dikkate alınarak seçilmiştir. Sanayide sıvı metalin yaklaşık %30'una kadar döndü, hurda veya yolluk kullanılabilir. Bu sebeple mevcutta özellikle otomotiv sanayisinde kullanılan %30'luk ikincil oranını arttırmak için %50 mertebesinde hurda eklenerek şarj hazırlanmıştır. Bu hurda oranının geliştirilmesi için Cl ve F esaslı kimyasal bileşiklerden faydalanmıştır.

3.1 Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar

Şarjda kullanılan malzemeler ergiyik ağırlığının %50'si birincil alüminyum (külçe) ve %50'si ikincil alüminyum (talaş) şeklindedir. İkincil alüminyum yani hurda alüminyumun mahiyeti talaştır. Bilindiği üzere talaşların yüksek yüzey alanına karşın küçük hacimlere sahip olmaları yani düşük modülleri sebebiyle çabuk oksitlenmelerinden ve oksitlenen yüzeyin ergitmede sorun çıkarmasından dolayı ergitmede pek tercih edilmemektedirler.

3.1.1 Birincil Alüminyum Külçesi

Ergitmede kullanılan birincil alüminyum külçelerinin tedariki CMS Jant Makine Sanayii tarafından yapılmıştır. Külçelerin menşei Dubai'dir ve üretici firması DUBAL'dir. Muhtelif kilolarda olabilen birincil alüminyum külçelerinin ağırlıklıkları 7.500–8.000 gr aralığındadır ve boyutları da 756 mm x 54 mm x 75 mm'dir. Şekil 3.1'de kullanılan birincil alüminyum külçelerinin temsili resmi mevcuttur. Çizelge 3.1'de şarjda kullanılan birincil alüminyumun kimyasal bileşimi mevcuttur.

Çizelge 3.1 Birincil alüminyumun külçesinin kimyasal bileşimi.

Si	Mg	Fe	Ti	B	Ni	Sr	Al
7,31	0,32	0,07	0,11	0,00	0,01	0,02	92,16



Şekil 3.1 Birincil alüminyum külçesi.

3.1.2 İkincil Alüminyum (Talaş)

Ergitme kullanılan bir diğer şarj malzemesi de ergiyük ağırlığını %50'sini oluşturan talaştır. Talaşlar proses edilmiş sıvı metal içeriğine sahip olduğu için birincil külçeden nispeten farklı bir kimyasal bileşime sahiptirler. Bu farklılık Çizelge 3.2'de detaylı olarak ortaya konmaktadır. Şekil 3.2'de şarjda kullanılan talaşların resmi bulunmaktadır.

Çizelge 3.2 Talaşın kimyasal bileşimi.

Si	Mg	Fe	Ti	B	Ni	Sr	Al
7,28	0,227	0,07	0,11	0,003	0,004	0,013	92,29



Şekil 3.2 İkincil alüminyum (talaş).

3.1.3 Gaz Giderme

Gaz giderme prosesinde sanayi tipi döner gaz giderme aparatı kullanılmıştır. Rotari gaz giderme teçhizatı olarak da isimlendirilmektedir. Bu sistemde grafit ya da sıvı metal ile tepkimeye girmeyecek farklı malzemeler (çelik (kaplanmış), refrakter malzemeler, vs) sıvı metalin içerisine daldırılarak mekanik bir karıştırma işlemi gerçekleştirilmesi istenmektedir. Şekil 3.3'de Erdem Makine Ltd. tarafından yapılan laboratuvar ölçekli yerli üretim bir gaz giderme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.3 Döner gaz giderme cihazı.

Bu cihazda en yüksek 800 dv/dk'lık dönme hızına ulaşılabilmektedir. Tek seferde 700 sn işlem süresi vardır. Gaz gidermede kullanılan gaz azota göre nispeten daha pahalı olan lakin gaz giderme verimi daha yüksek olan argon gazı kullanılmıştır.

3.1.4 Eritken

Deneylerde kullanılan eritkenlerden ticari kriyolit hariç tamamı Yıldız Teknik Üniversitesi – Balkan İleri Döküm Araştırma Merkezi laboratuvarında hazırlanmıştır. Eritkenlerin bileşimlerinin doğru tespiti için önce detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Buradan elde edilen bilgiler ışığında deneylerde kullanılacak kimyasallar tespit edilmiş ve bileşimler belirlenmiştir. Deneylerde temel bileşenler NaCl-KCl ve MgCl₂-KCl olarak iki farklı eritken tuz karışımı seçilmiştir, diğer tüm bileşikler ilave/katkı malzemesi olarak nitelendirilmiştir. Kullanılan kimyasallar endüstriyel kalitededir.

Kullanılan tüm eritkenlerin tane boyutu dağılım aralığı 50 ila 300 µm olup ortalama tane boyutu 150 µm civarındadır. Eritkenler önce bilyalı karıştırıcılar vasıtasıyla 1 saat kadar öğütülmüştür. Akabinde nemi gidermek için 100°C'de 60 dk süreyle kurutma işlemi yapılmıştır.

Deneylerdeki NaCl ve KCl oranları her eritken karışımı için ağırlıkça eşit tutulmuştur. Tüm eritken karışımlarına ısıveren tepkimeler gerçekleştirebilen Na₂SO₄ ve Na₂CO₃'ün katkısı toplam ağırlıkça %15 (%7,5 + %7,5) olacak şekilde ilave yapılarak tepkime verimi artırılması amaçlanmıştır. Eritkenleme işleminde kullanılan eritken miktarı sıvı metal ağırlığının %2'si kadardır.

Çizelge 3.3 Eritken bileşimi haritası.

Ana katkı	Ana Katkı (ağırlık%)	Ek katkı	Ek katkı (ağırlık%)	Temel Karışım	Temel Karışım ağırlık(%)
Na ₃ AlF ₆ (Ticari Kriyolit)	10, 20, 30, 40	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃	15 (7,5 + 7,5)	NaCl - KCl	Arta Kalan
Na ₂ SiF ₆	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃	15 (7,5 + 7,5)	NaCl - KCl	Arta Kalan
NaF/AlF ₃ (KM) = 1,85	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃	15 (7,5 + 7,5)	NaCl - KCl	Arta Kalan
NaF	10, 20, 30, 40	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃	15 (7,5 + 7,5)	NaCl - KCl	Arta Kalan
NaF/AlF ₃ (KM) = 2,7	10, 20, 30, 40	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃	15 (7,5 + 7,5)	NaCl - KCl	Arta Kalan
NaF/AlF ₃ (KM) = 3	10, 20, 30, 40	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃	15 (7,5 + 7,5)	NaCl - KCl	Arta Kalan
Na ₂ SiF ₆	10, 20, 30, 40	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃	15 (7,5 + 7,5)	MgCl ₂ - KCl	Arta Kalan

3.1.5 Kalıp Ayırıcısı

Bazı ticari firmaların kendi ismi ya da kendilerine göre isimlendirdikleri kalıp ayırıcıları bulunmaktadır. Alüminyum yüksek oranda demir çözme eğiliminden dolayı eğer dökümlerde kokil kalıplar kullanılacak ise mutlaka kalıp ayırıcısı kullanılmalıdır. Aksi takdirde dökme alüminyumun kalıptan ayrılamaması gibi ya da kalıptan döküm parçasını ayırmak için gereksiz yere uygulanana fazla kuvvetlerin neticesinde kalıp ömrü azalabilir. Şekil 3.4'de dökümlerde kullanılan bor nitrür kalıp ayırıcısı gösterilmektedir.



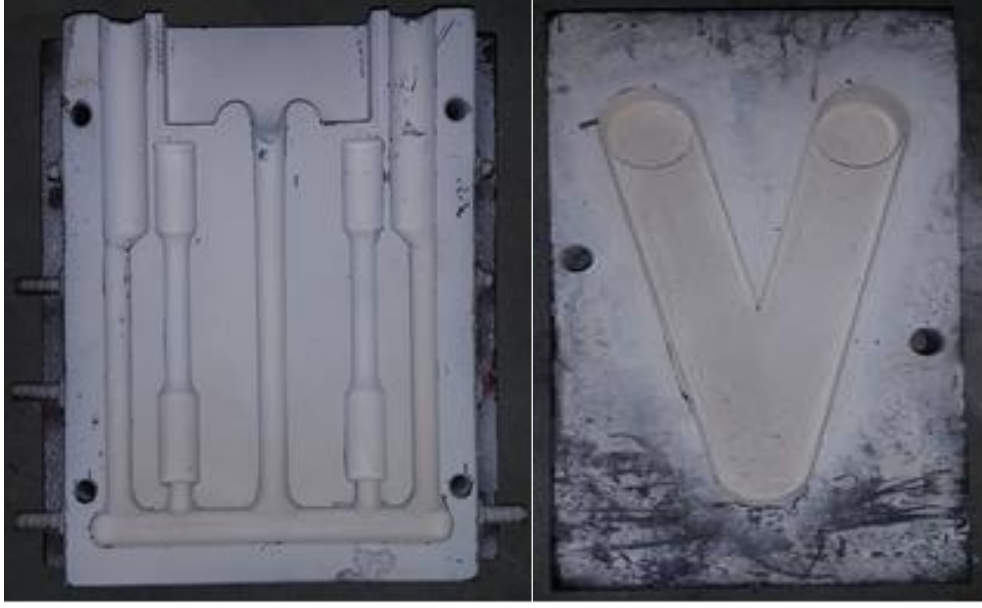
Şekil 3.4 Bor nitrür kalıp ayırıcısı.

3.1.6 Kalıp Malzemesi

Ergiyik metal Şekil 3.5'de gösterildiği gibi kokil kalıplara dökülmüştür. Burada iki farklı kokil kalıp kullanılmıştır. Çekme çubuğu geometrisine sahip kokil kalıp ve % çekinti miktarını hesaplayabilmek için de ördek ayağı diye isimlendirilen silindirik geometriye sahip kokil kalıplar AISI 1040 ıslah çeliğinden yapılmıştır.

Ördek ayağı kalıbı yani % çekinti hesaplanması için tasarlanan kalıp içerisinde iki adet silindirik kalıp boşluğu bulunmaktadır. Bu silindirik kalıp boşluklarından ince olanın ölçüleri 17x40 mm ve kalın olanın ölçüleri ise 24x40 mm'dir. Grafit pota ile yapılan dökümlerde bir seferde her iki silindirik kalıp boşluğunu doldurulacak şekilde döküm yapılmıştır. Ördek ayağı kalıbındaki bu kesit farklılıkları soğuma şartlarını değiştireceğinden katılaşma sırasındaki % çekintilerin değişkenlik göstermesi için tasarlanmıştır.

Çekme çubuğu kalıbında ise yanlarda iki adet besleyici kullanılarak sıvı metalin doğru bir şekilde yani burgaca uğramadan kalıp boşluğunu doldurması sağlanmıştır.



Şekil 3.5 Kokil kalıp (a) Çekme çubuğu, (b) Ördek ayağı.

3.1.7 Ergitme Ünitesi

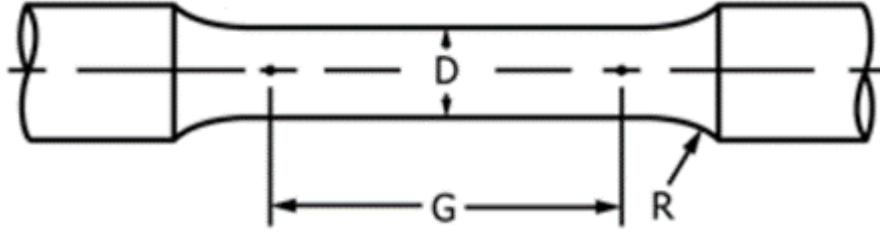
Ergitmelerde kullanılmak üzere Mahes Makine tarafından yerli üretim 50kW gücünde, 100 A, 5 KHz frekanslı 10kg indüksiyon ocağı kullanılmıştır. İndüksiyon ocağının kullanılmasının sebebi manyetik karıştırma neticesinde nispeten homojen bir sıvı metal sağlanmasıdır. Bu sebeple ilave edilen herhangi bir katkı malzemesi sıvı içerisinde türdeş bir karışım sağlayabilmektedir.



Şekil 3.6 İndüksiyon ocağı.

3.1.8 Çekme Testi

Dökülen numunelere ısı işlem uygulamadan döküm haliyle çekme testi 2000kN'lık BESMAK firmasına ait çekme cihazlarında Şekil 3.7'de gösterilen çekme çubuğu geometrisi ASTM B557-15 standardına göre 25 mm/dk'lık çekme hızı altında uygulanmıştır. Çekme testinde GGÖ'de 4 adet ve GGS'de 4 adet çekme çubuğu kullanılmıştır.



Şekil 3.7 Çekme testi numunesi. D; çap, R; kavis yarıçapı, G; ölçüm aralığı [203].

Çekme testinden çekme dayanıcı, akma dayanıcı, kopma uzaması ve tokluk değerleri elde edilmiştir. Çekme dayanıcı, akma dayanıcı ve kopma uzaması değerleri cihazdaki yazılımdan okunmuştur. Kopma uzaması değerlerinin çekme testi cihazının çenelerine çok duyarlı olması sebebiyle bu değerlerin doğrulunun sağlamlasını yapmak amacıyla elle de kopma uzaması değerleri ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Bunun için 60 mm olan numunenin ölçüm aralığına numunenin koptuğu noktadan sağa ve sola 30'ar mm ölçülerek çekme testi sonundaki toplam uzama saptanmıştır. Daha sonra Eşitlik (3.1)'de verilen klasik % uzama eşitliği kullanılarak her bir malzeme için kopma uzaması değerleri hesaplanmıştır.

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.1)$$

e = kopma uzaması, l = son boy (toplam uzama) ve l_0 = ilk boy (numunenin ilk ölçüm aralığı).

Tokluk hesaplaması deneysel olarak üretilen aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır:

$$\text{Tokluk} = \frac{(\text{Çekme Dayanıcı} + \text{Akma Dayanıcı})}{2} \times \% \text{Kopma Uzaması} \quad (3.2)$$

Şekil 3.8'de çekme testlerinin yapıldığı cihaz düzeneği resmedilmektedir.



Şekil 3.8 Çekme testi cihazı.

3.1.9 Döküm DeneYleri

Döküm deneyleri Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği'nde gerçekleştirilmiştir. Dökümlerin tamamında 5 kg'lık sıvı metal ağırlığı kullanılmıştır. Hep aynı şekilde ergitme prosedürü takip edilmiştir. Bu ergitme prosedürünün belirlenmesinde bu çalışmanın paydaşı olan CMS Makine A.Ş. firmasındaki ergitme şartları da gözönüne alınmıştır.

Ergitmede sıvı metalin ağırlıkça %50'si birincil alüminyum ve %50'si ikincil alüminyum olacak şekilde tasarlanmıştır. Birincil alüminyum Dubai firması DUBAL(EMAL)'den tedarik edilmiştir. İkincil alüminyum ise CMS Makine A.Ş. tarafından jant üretimi sırasında ortaya çıkan talaşlardır. Talaşlar bilindiği üzere yüksek yüzey alanına sahip olmalarından ve görece ince bir et kalınlığına sahip olmalarından dolayı yeniden ergitilmelerinde her daim sıkıntılar vuku bulmaktadır. Düşük hacim/yüksek yüzey alanı yani düşük modül değerinden dolayı aslında talaşların baskılanarak yığın(etli) hale getirilmesi ergitme kayıplarını azaltmak için akılcı bir çözüm olabilmektedir. Lakin talaşlı işlemlerden gelen takım ucu yağlayıcısının talaşın yüzeylerine yapışması talaşların ön-işlemlere tabi tutulmadan kullanılmalarının önündeki en büyük engeldir. Dolayısıyla mutlaka talaşlara ön-işlemler uygulandıktan sonra baskılanarak yığın hale

getirilebilmektedirler. Ön-işlemler yapıldıktan sonra yığın haline getirilemeyen talaşların yanma kayıplarını azaltmak için sıvıya kademeli besleme yapılabilir. Eklenmesi gereken talaş miktarı doğrudan tamamıyla ilave edilir ise talaşların yüzeyleri hızlı bir şekilde oksitleneceğinden hem ergitmede zorluklar hem de malzemede kayıplara yaşanılmaktadır. Şekil 3.9'da bahsi geçen talaş yüzeylerinin ani oksidasyonu ve buna bağlı olarak yaşanan malzeme kayıplarını belirten bir resim bulunmaktadır. Resimde görüldüğü gibi potanın dış kısımlarına doğru renk değiştirmiş (sararmış) talaşlar hızlı bir şekilde oksitlenmiştir. Böylesi bir şarj malzemesinin ergiyik kalitesine olumsuz yönde etkisi vardır. Olası bir mekanik karıştırma işlemi ile yüzeydeki bu oksitlenmiş talaşlar ergiyik içerisine alındığında makro ölçekli katışkılardan temeli teşkil edeceklerdir. Böylesi bir katışkı malzemenin mekanik özelliklerine ciddi oranda sirayet ederek mekanik özelliklerin olumsuz yönde etkilenmesine sebebiyet verebilmektedir.



Şekil 3.9 Ergitme sırasında karşılaşılan yanlış talaş eklenmesi.

3.1.10 Vakum Altında Katılaştırma (VAK) Cihazı

Vakum altında katılaştırma (VAK) testi olası bir çift katlı oksit filmi yani bifilmelerin açılmasına yardım olması amacıyla basıncın tersi olan vakum uygulanarak katılma sırasında açılması sağlanmaktadır. Elde edilen numeneler kesilip, metalografik olarak 600'e kadar zımparalanarak numunenin kesit alanındaki olası gözeneklerin hesaplanmasına yardımcı olmaktadır. VAK testinde en yüksek basınç 110 mbar'dır. Fakat

alüminyum ve alaşımları için 90 mbar'lık bir vakum uygulanması ile muhtemel gözeneklerin ortaya çıkartılması sağlanabilmektedir. Şekil 3.10'da deneylerde kullanılan VAK testi gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Vakum altında katılaştırılma (VAK) cihazı.

3.1.11 Gaz Giderme ve Eritkenleme

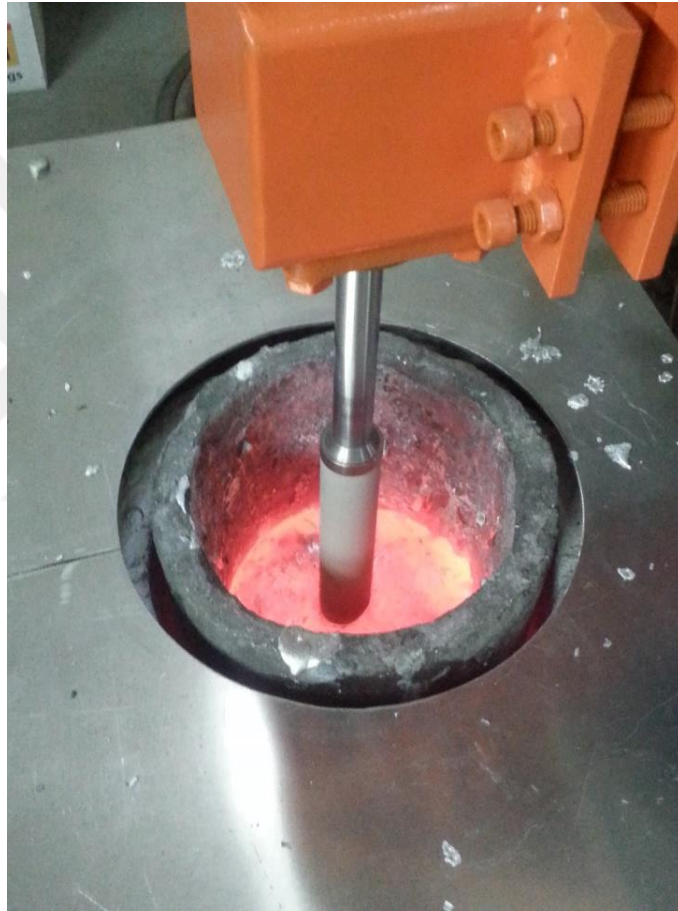
Alüminyum ve alaşımlarında ergiyik faza geçildiğinde üstel bir şekilde hidrojen çözme eğilimi bulunmaktadır. Hidrojen gazının sıvı metal işlemlerinde giderilememesi durumunda katıdaki çözme oranının düşük olmasında dolayı döküm parçasında gaz gözenekliliği teşkil edebilmektedir. Sıvı metal işlemlerinde hidrojeni gidermek için tepkimez gaz (N_2 , Ar, He, vs.) veya etkin gaz (Cl_2) olmak üzere iki tip gaz kullanılmaktadır. Cl_2 gazı etkili bir hidrojen giderici olmasına rağmen hidrojen ile birleşerek HCl asit oluşturan bu gazın işçi sağlığını ciddi şekilde tehdit etmesi bu gazın kullanımındaki en büyük engeldir.

Bununla birlikte tepkimez gazlardan azot birim maliyetten dolayı sanayide en yaygın olarak kullanılanıdır. Ancak gaz giderme verimliliği açısından argon azota göre daha etkili olmasından dolayı deneylerde yüksek safiyette argon kullanılmıştır.

Gaz giderme prosesinde döner (rotari) gaz giderme cihazı kullanılmıştır. Eritkenleme prosesinde argon gazını vermeden gaz giderme cihazı kullanılarak sıvıyı karıştırmak ilave edilen eritkenlerin verimi arttırabilmektedir. Çünkü katı eritkenleme yapılır iken ilave

edilen bileşiklerin özkütlesi ile sıvı alüminyumun özkütlesi neredeyse aynıdır ya da sıvı alüminyumunkinden daha düşüktür ki; kolayca proses edilerek yüzeye doğru hareketlenebilirler. Eğer katı eritkenleme sırasında argon gazı da cihazdan üflenir ise oluşan kabarcıklar kolaylıkla eritkenleri flote ederek yüzeye çıkartabilirler.

Eritkenleme işlemi Şekil 3.11’de görülen döner gaz giderme cihazının grafit döner çarkının uç kısmına gelecek şekilde konumlandırılan eritkenler ile uygulanmıştır. Eritkenler gaz vermeden yaklaşık 15 dk 400 dv/dk ile karıştırılmıştır. Daha sonra debisi 10 lt/dk olacak şekilde ayarlanarak 10 dk’de Ar gazı üflenmiştir.



Şekil 3.11 Gaz Giderme İşlemi

3.1.12 Ergitme İşlemi

Ergitme indüksiyon ocağında %50 birincil alüminyum + %50 ikincil alüminyum içerecek şekilde şarj hazırlanarak yapılmıştır. Ergitme prosesinde sürekli 5000 gr’lık bir şarj hazırlanmıştır. Bu şarjın yarısı birincil alüminyum diğer yarısı da talaşlardan oluşmaktadır. Öncelikle 2500 gr’lık külçeler grafit potaya sığacak şekilde dilimlenmiştir.

Daha sonra ergiyik faza geçmesi gözlemlendikten sıcaklık takibi yapılarak sıvı metal sıcaklığı 740 °C'ye ulaşıncaya talaş ilavesi yapılmıştır. 2500 gr olarak eklenmesi belirlenen talaşlar bir seferde ergiyiğe eklenmemiş olup birkaç kademeden oluşacak şekilde ilave edilmiştir. Bunun sebebi oksidasyonu azaltmaktır. Talaş eklendikten sonra sıvı metalin sıcaklığının düşmesi sebebi ile tekrar sıvı metal sıcaklığı 740 °C'ye ulaşması beklenmiştir. Talaşlar her bir şarjda toplamda 5 seferde ergiyiğe ilave edilmiştir.

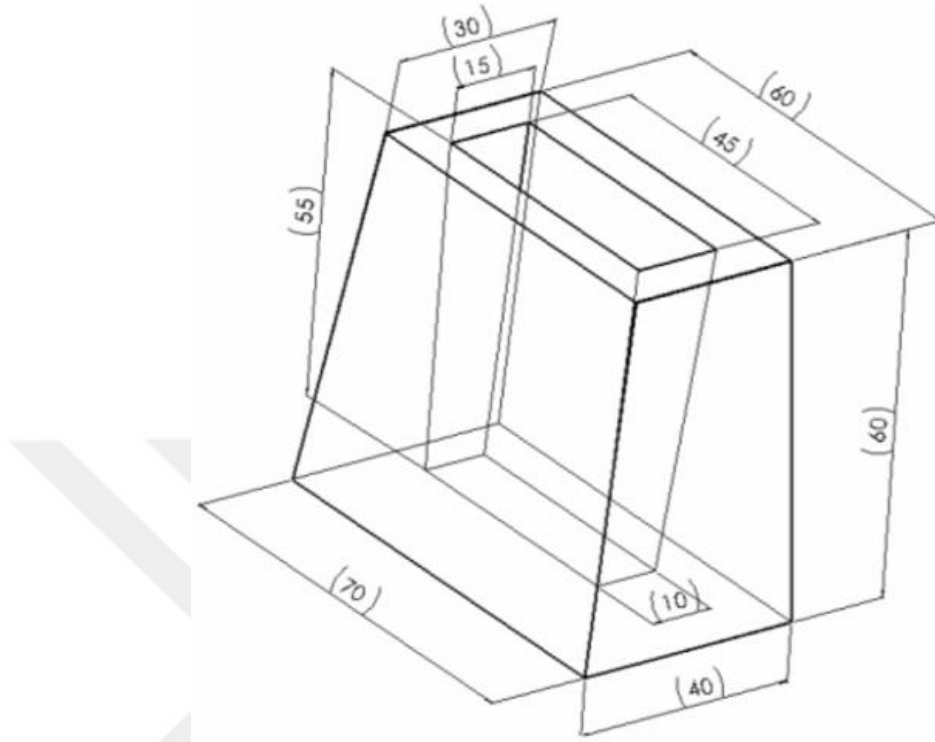
Talaş şarjı bittikten sonra sıvı metalin sıcaklığı yeniden denetlenerek 740 °C'ye ulaşıncaya yani gaz giderme + eritkenleme prosesinden hemen önce ergiyik kalitesini belirlemek için Bifilm İndeksi numunesi alınarak vakum altında katılaştırılmıştır. Bütün deneylerde bu işlem adımı bu şekilde gerçekleştirilmiş olup her bir ergiyiğin eklenen talaşların modüllerinin farklılıklarından dolayı kendine özgü karakteri olması sebebiyle sıvı metalin ne kadar iyileştirilebildiği gözlemlenme imkânı bulunmuştur. Daha sonra mekanik özellikler ve % çekinti değerlerini elde etmek için çekme çubuğu ve ördek ayağı kalıbına dökümler gerçekleştirilmiştir.

Daha sonra pota yeniden indüksiyon ocağına alınıp ergiyik sıcaklığını 750 °C'ye yükselmesi beklenilmiştir. Akabinde gaz giderme ve eritkenleme prosesine geçilmiştir. Gaz giderme prosesi olarak genel isimlendirilen bu işlem adımı aslında önce eritkenlemeyi ardında da tepkimez gazlar üflenerek gaz verilmeyi içermektedir. Dolayısı ile öncelikle eritken ilavesi yapılmıştır. Eritkenleri birden sıvı metalin içerisinde oluşturulan girdaba boca ederek verimlilikleri düşürülmemesi için kademeli olarak eklenmiştir. Her bir eritken ilavesi için 3 dk karıştırma yapılarak toplamda 5 kereden ilave edilen eritkenler için eritkenleme süresi 15 dk sürmüştür. Ardından hemen 10 lt/dk'lık bir debi ile Ar gazı sıvı metale 10 dk üflenmiştir.

3.1.13 Bifilm İndeksi ve % Çekinti Oranının Tespiti

Kısım 2.6.5'de anlatıldığı gibi hesaplanan Bifilm İndeksi ve % çekinti oranının tayinleri için Sigmascan görüntü analiz yazılımı kullanılmıştır. Bifilm İndeksi numuneleri VAK cihazı ve Şekil 3.12'de gösterilen seramik kalıp geometrisi kullanılarak dökülmüştür. Dökülen numuneler kesit alanından en yüksek verimde faydalanılacak şekilde ikiye kesilir ve metalografik numune hazırlama yöntemlerinden sadece zımpara basamağı kullanılır. Zımparalamada 240, 400 ve 600'lük aşındırıcı kâğıtların kullanımı gerekli yüzeyin

hazırlanması için kâfidir. Daha sonra zımparalanan yüzey bir bilgisayar tarayıcısı yardımıyla numunelerin kesit alanlarının görüntülerinin çözünürlükleri 600 dpi olacak şekilde elektronik ortama JPEG resim formatında aktarılmıştır.



Şekil 3.12 Görüntü analiz yazılımındaki görüntüler. (a) taranmış numune, (b) karşıtlık oluşturulmuş numune ve (c) numunenin analiz edilmesi ve elde edilen veriler [204].

Buradan elde edilen görüntüler görüntü analiz yazılımında karşıtlık oluşturularak gözeneklerin sadece siyah görüneceği şekilde ayarlanmıştır. Bu şekilde matris tamamen beyaz yani sorunsuz bölge, siyah yani gözenekli bölgeler ortaya çıkartılmıştır. Şekil 3.13 (a)'da zımpara işleminden sonra bilgisayar ortamına aktarılan numunenin görüntüsü, (b)'de gözeneklerin ortaya çıkartılabilmesi için oluşturulan karşıtlık ve (c)'de yazılımın taradığı karşıtlıktan dolayı oluşan değerleri görülmektedir.

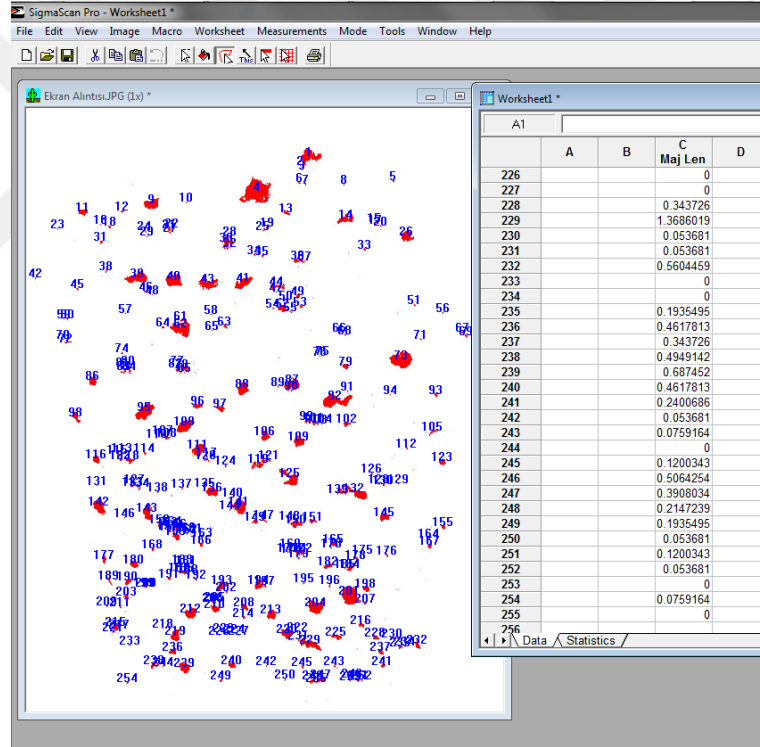
Tondan dolayı oluşan farklılık "siyah noktaların" ya da "gözeneklerin" uzunluklarının ölçülmesini sağlamaktadır. Ölçülen değerler excel dosyası içerisine aktarılarak sıralı hale getirilmiştir. Sıralı hale getirmek 0,4 mm'nin altındaki değerleri silmek için kolaylık sağlamaktadır. Çünkü Dışpınar [1] tarafından yapılan çalışmaların neticesinde 0,4 mm'nin altındaki değerler parazit olarak nitelendirilmektedir ve hesaplama katılmamaktadırlar. Geriye kalan değerlerin toplanması ile mm cinsinden Bifilm İndeksi üretilebilmektedir.



(a)



(b)

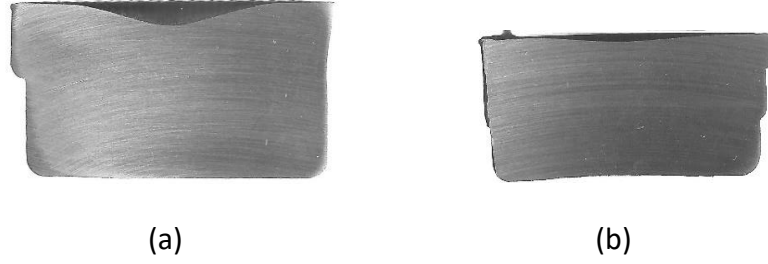


(c)

Şekil 3.13 Görüntü analiz yazılımındaki görüntüler. (a) taranmış numune, (b) karşıtlık oluşturulmuş numune ve (c) numunenin analiz edilmesi ve elde edilen veriler.

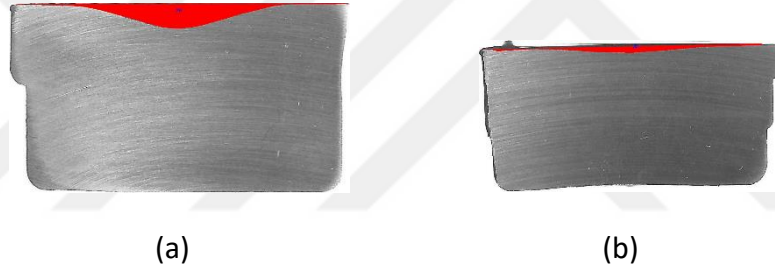
% çekinti değerleri ince kesit ve kalın kesit numunelerin her ikisi için de Bifilm İndeksi'ne benzer şekilde önce metalografik olarak hazırlanan ardından bilgisayar ortamına aktarılarak sayısallaştırma prensibine dayanmaktadır. Şöyle ki; döküm numuneleri

metalografide 240, 400 ve 600'lük zımpara yapıldıktan sonra taranarak elektronik ortama aktarılmıştır. Bilgisayardaki görüntüsü Şekil 3.14'de gösterilmektedir.



Şekil 3.14 % çekinti ölçümü için kullanılan numuneler (a) kalın kesitli (24 x 40 mm), (b) ince kesitli (17 x 40 mm).

Daha sonra numunenin yüzeyindeki çapakları yok ederek görüntü analizinde alansal olarak hesaplama yapılmıştır. Şekil 3.15'de gösterildiği gibi alansal olarak yapılan hesapta "siyah kısımlar" veya "çekintiler" B'deki gibi ton farkından faydalanılarak örnek bir % çekinti hesaplaması yapılmıştır.



Şekil 3.15 % çekinti ölçümü için kullanılan numuneler (a) kalın kesitli (24 x 40 mm), (b) ince kesitli (17 x 40 mm).

3.1.14 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu çalışmaları hem çekme testindeki çekme çubuğunun kırılma yüzeylerinden ve vakum altında katılaştırma testi numunelerinin kesitindeki gözeneklerin içerisinde JEOL marka JSM-5600 modelinde gerçekleştirilmiştir. Alaşımın bölgesel bileşiminin sayısallaştırılmış X-analizini için sıvı azotla soğutulmuş detektöre sahip IXRF Systems Inc. Markasının 550i modeli ile EDS (Energy Dispersive Spectrometer) analizleri yapılmıştır.

DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Deneysel çalışmalarda Al7Si0.3Mg (A356) alüminyum alaşımının ağ.%50 birincil + ağ.%50 ikincil olacak şekilde hazırlanmış alaşımlardan Bifilm İndeksi'leri çıkartılmıştır. Ergiyik kalitesini sayısallaştıran bu indeks ile ergiyik içerisindeki katışkı ile çekme dayancı, kopma uzaması, tokluk ve % çekinti oranı arasındaki ilişkiler tespit edilmiştir. Weibull İstatistiği kullanılarak ise çekme dayancı, % çekinti, kopma uzaması deneylerde kullanılan eritken oranının ne olması gerektiği ve en doğru eritken seçiminin tespiti gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Weibull istatistiği temeline dayanarak ergiyik kalitesini sayısallaştırabilen Bİ'nin GGÖ ve GGS verileri aralarındaki fark tespit edilerek ergiyiğin temizliğinin hem tüm deneyleri kapsayacak şekilde hem de eritkenlerin kendi içlerinde grup grup analizi yapılmıştır. Gaz giderme prosesi hem gaz verme hem de eritkenleme prosesini kapsamaktadır lakin ifade edilişte sadece gaz giderme olarak kullanılacaktır.

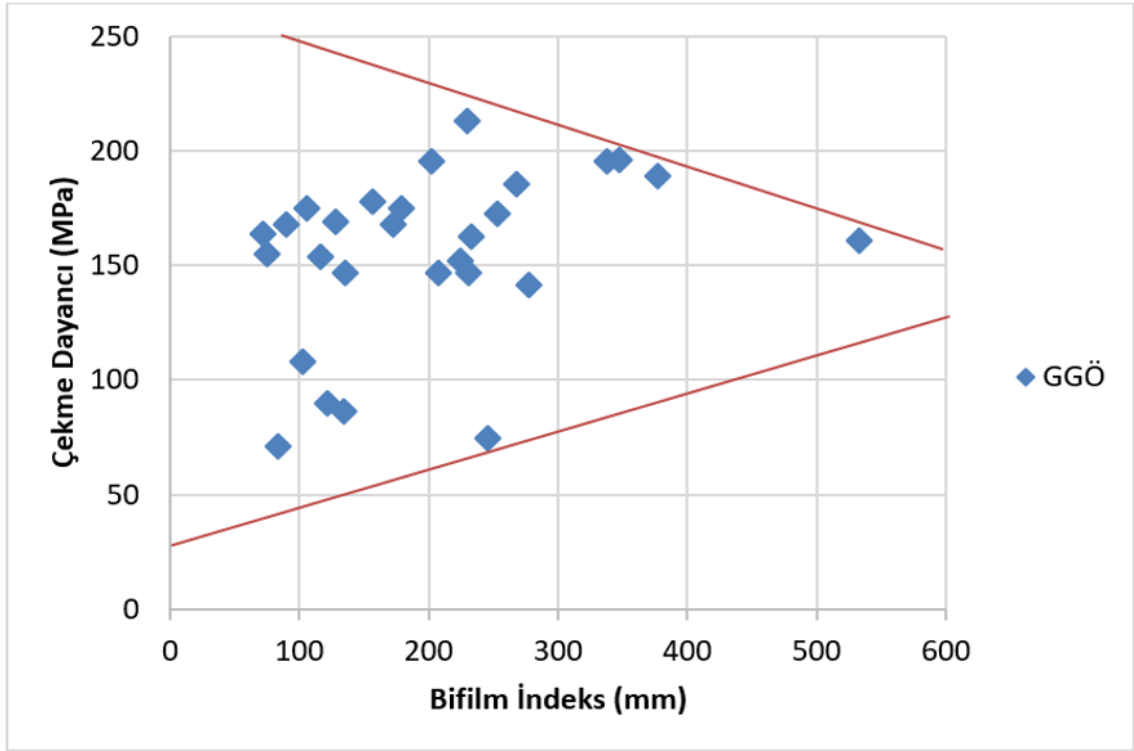
4.1 Bifilm İndeksi – Mekanik Özellikler İlişkisi

Sıvı metalin kalitesinin sayısal olarak belirlenmesini sağlayan Bİ'nin kullanılarak deneylerin öncelikle çekme dayancı ve kopma uzaması değerleri açısından irdelenmiştir. Daha sonra çekme dayancı ve kopma uzaması değerlerinden ortaya çıkan verilerin kullanımı ile tokluk değerleri hesaplanarak yorumlanmıştır.

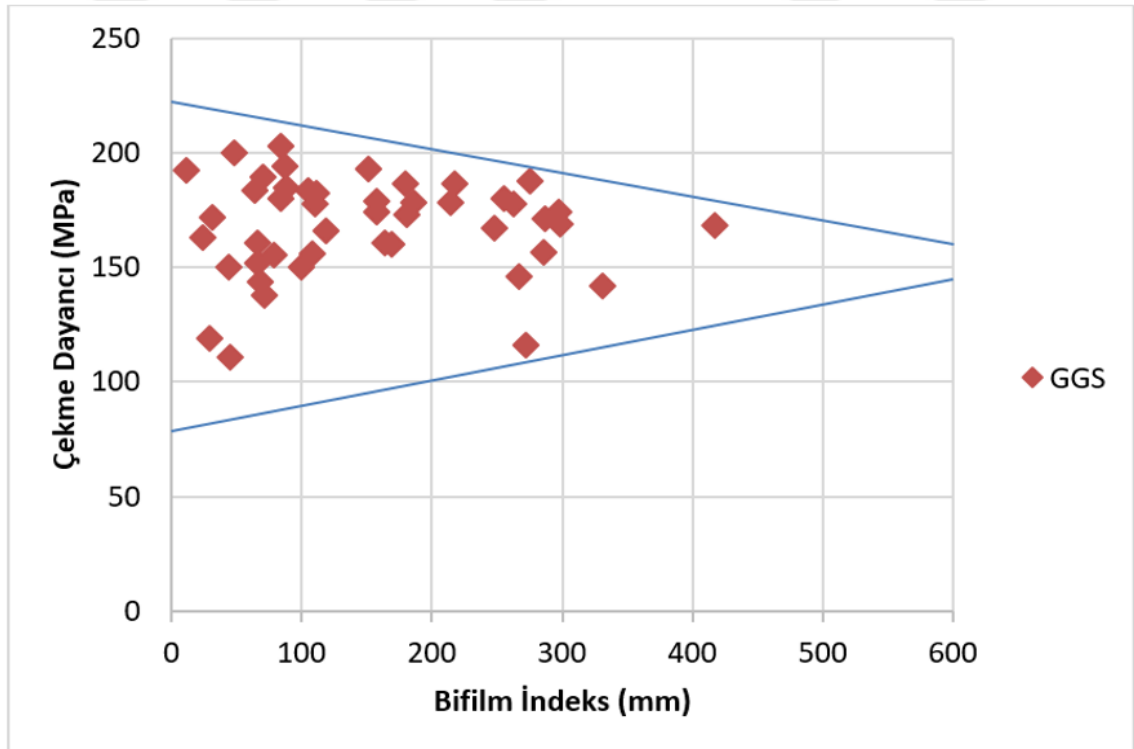
4.1.1 Bifilm İndeksi (Bİ) – Çekme Dayancı İlişkisi

Şekil 4.1 ve 4.2'de eğilim çubukları kullanılarak genel bir bakış açısı sağlanmaya çalışılmıştır. Grafikten okunan perspektif gaz giderme öncesi ve gaz giderme sonrası

olmak üzere her iki durumda da azalan Bifilm İndeksi ile çekme dayanıcı arasındaki ilişkinin saçılım göstermesine rağmen çekme dayançlarının iyileştiği görülebilmektedir.



Şekil 4.1 Bifilm İndeks ile Çekme Dayanıcı arasındaki genel ilişki (GGÖ).

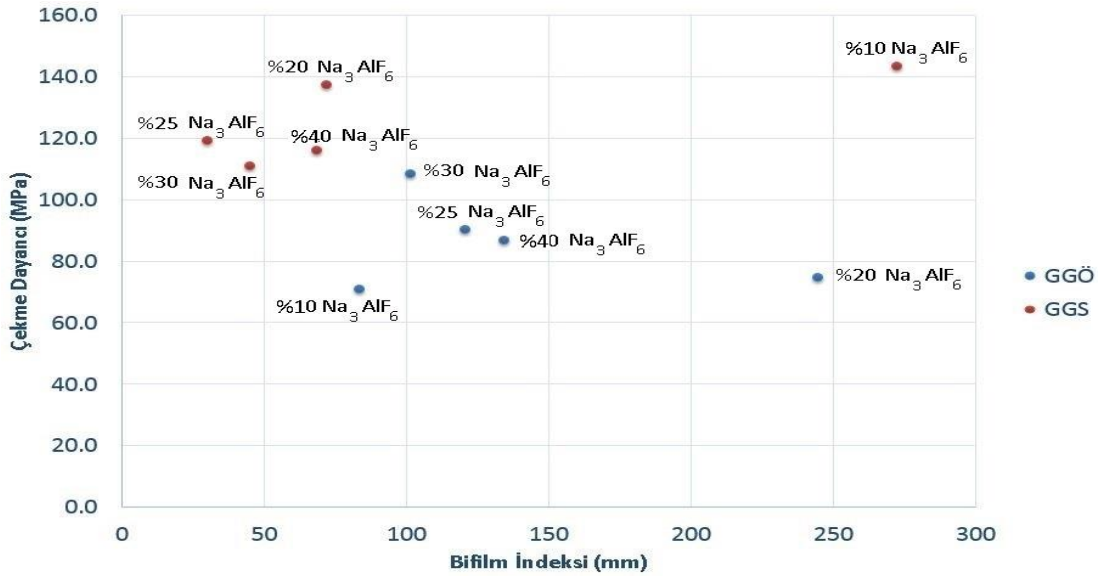


Şekil 4.2 Bifilm İndeks ile Çekme Dayanıcı arasındaki genel ilişki (GGS).

GGÖ artan Bİ ile çekme mukavemetinde düşüş gözlemlenmiştir. Benzer bir durum Şekil 4.2'deki GGS da artan Bİ ile düşüş gözlemlenmektedir. Fakat her iki durumda da azalan Bİ ile mukavemet değerinde doğrusal bir artış gözlemlenmemektedir. Ancak dikkat edilmesi gereken detay Bİ düştükçe örneğin 100 – 200 mm arasında daha belli belirsiz bir durum söz konusu iken Bİ < 100 mm'den daha düşük olduğunda sonuçların daha istikrarlı birbirine yakın ve saçılımın daha az olduğu görülebilmektedir.

Dışpınar ve Campbell [158] yaptıkları çalışmada Bifilm İndeksi'nin kabul edilebilir aralıkları için değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Bu çalışmaya göre Bifilm İndeksi 0 ile 40 mm arasında kalite bir sıvı metalin olduğunu ve 40 ile 350 mm arasında kalitesiz bir sıvı metalin olduğunu ileri sürmüşlerdir. Yine benzer şekilde artan Bifilm İndeksi ile kopma uzamasının düştüğü lakin mekanik özelliklerin de bazı durumlarda arttığını gözlemlemişlerdir. Böylesi bir durumu metal matrisli kompozit malzemelerinin yapılarında bulunan mukavemet arttırıcı etkiye sahip ikincil partiküllerin etkisine benzetmişlerdir. Aşağıdaki diyagramlar incelendiğinde de Dışpınar ve Campbell [1, 2, 23, 24, 158] tarafından tespit edilen neticelere benzer sonuçların bu tezde de elde edildiği gözlemlenmiştir.

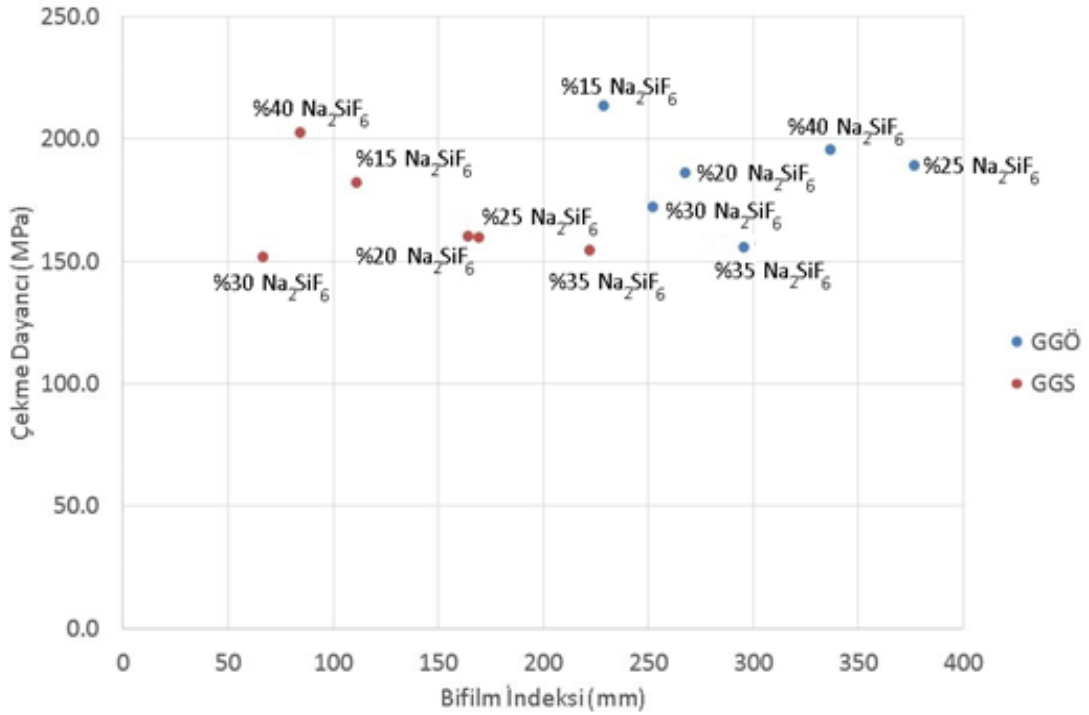
Yukarıdaki eğilimi desteklemesi için Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de gösterildiği gibi farklı ticari kriyolit ve Na_2SiF_6 oranlarının eklenmesi ile Bİ'ne bağlı olarak çekme dayançlarının nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 4.3 Farklı ticari Na_3AlF_6 (Kriyolit Modülü = 3) miktarları (NaCl-KCl) için Bİ-Çekme Dayancı ilişkisi.

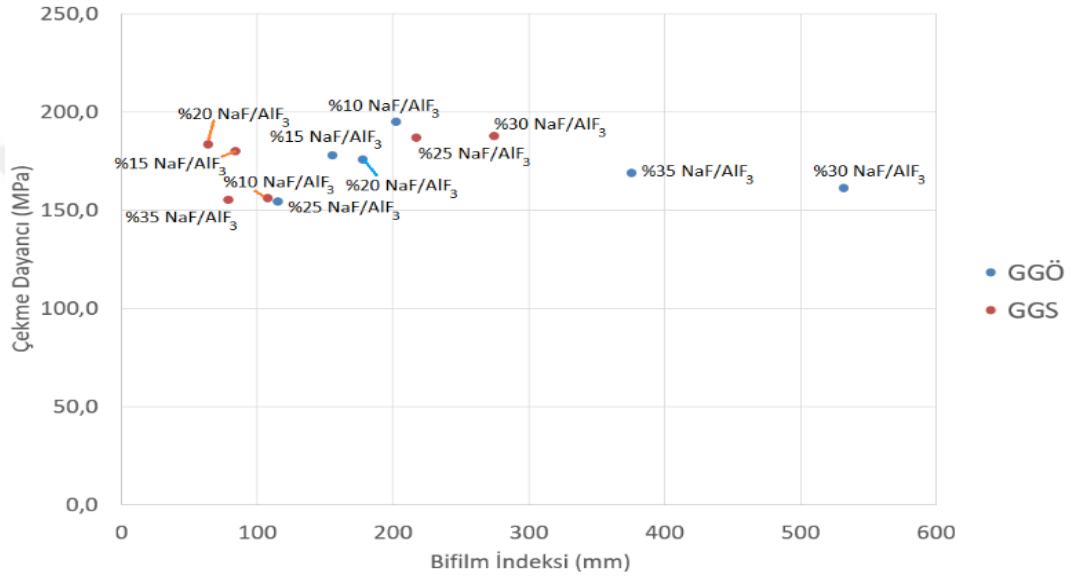
Şekil 4.3'de %10 kriyolit eklenmesi ile GGÖ'de 85 mm civarında olan Bİ azalmamış aksine 275 mm civarında olacak şekilde bir artış göstermiştir. Ancak aynı zamanda gaz giderme prosesi sonrasında en yüksek çekme dayancı da bu eritken bileşiminde elde edilmiştir. Bununla birlikte %25 kriyolit ilavesi ile GGÖ'de 125 mm civarında olan Bİ GGS'da yaklaşık dörtte birlik bir azalma ile 30 mm civarına düştüğü görülmüştür. En keskin düşüşü %25 ticari kriyolit içeren karışımdan elde edilmiştir.

Şekil 4.4'de farklı Na_2SiF_6 bileşiklerinin ilave edildiği dökümlerin Bİ ile çekme dayançları arasındaki grafik gösterilmektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi %40 Na_2SiF_6 ihtiva eden döküm GGÖ'de Bİ = 340 mm iken GGS'de Bİ = 80 mm seviyelerine düşerek yaklaşık %77'lik bir temizleme oranına sahiptir. Bununla birlikte %35 Na_2SiF_6 içeren dökümde GGÖ'de Bİ = 300 mm civarlarından GGS'de Bİ = 225 mm mertebesine düşmüştür. Ancak en düşük eritken eklenme oranı olan %15'de GGÖ'de Bİ = 235'den GGS'de Bİ = 110 mm'ye düşerek yani yaklaşık %50'lik bir temizleme oranına sahip olmasına rağmen çekme dayancı da düşmüştür. Buradan Na_2SiF_6 'nın iyi bir katışkı çözücü olduğu genellemesi yapılabilmektedir. Zaten benzer sonuçları Gruzleski [16], Tenorio, vd. [197] ve Utigard, vd. [12, 192, 193, 203, 204] da tespit ederek ayırma ya da temizleme eritkeni tasarlanmasında Na_2SiF_6 'un tercih edilmesini önermiştir.



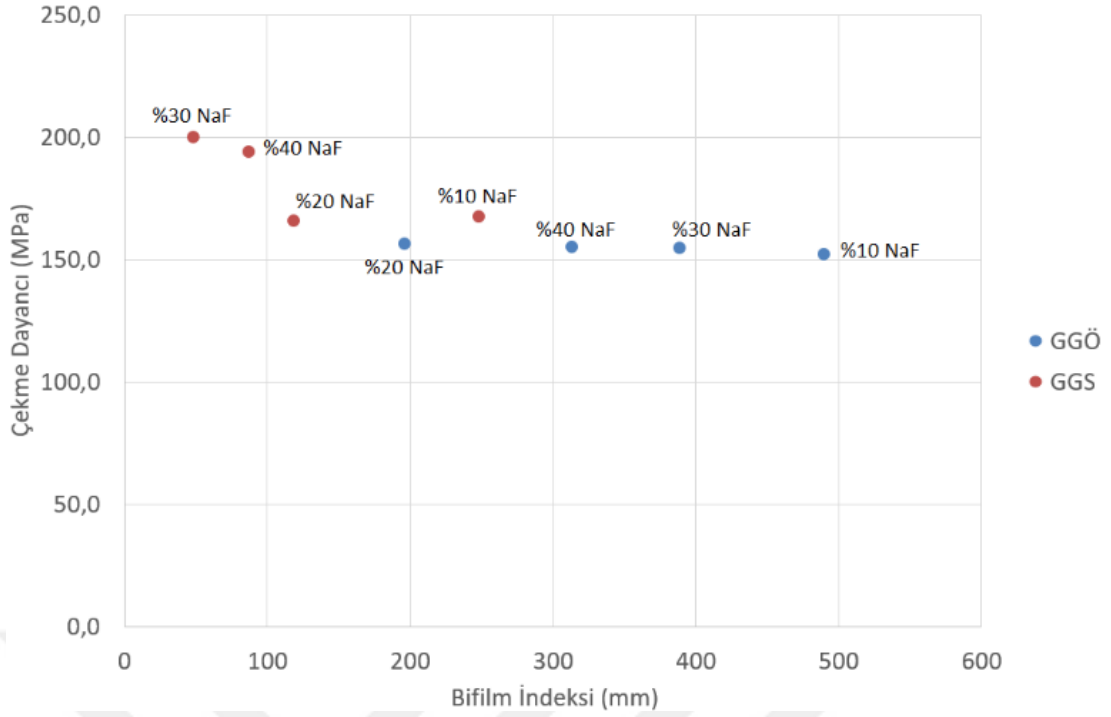
Şekil 4.4 Farklı Na_2SiF_6 (NaCl-KCl) miktarlarındaki Bİ-Çekme Dayancı ilişkisi.

Şekil 4.5’de ise ağırlıkça %5’ten %35’e kadar NaF/AlF₃ = 1,85 olacak şekilde eritken bileşiminin içerisine eklenmiştir. GGÖ’de en yüksek Bİ = 532 mm ile %30 NaF/AlF₃ eklenmiş olan dökümlerdir. GGS’da Bİ = 273 mm ile yaklaşık %50’lik katışkı giderme verimine sahip olmuştur. Bununla birlikte %20 NaF/AlF₃ eklenmiş olan dökümlerde ise GGÖ’de Bİ = 177 mm iken GGS’da Bİ = 64 mm’ye düşerek neredeyse %65’lik bir temizleme oranı ortaya çıkmıştır. %20 ve %30 NaF/AlF₃ içeren döküm grubu sırasıyla $\sigma = 186$ MPa ve $\sigma = 187$ MPa’lık çekme dayançları ile en yüksek mekanik özelliklere sahip olan eritken gruplarıdır.

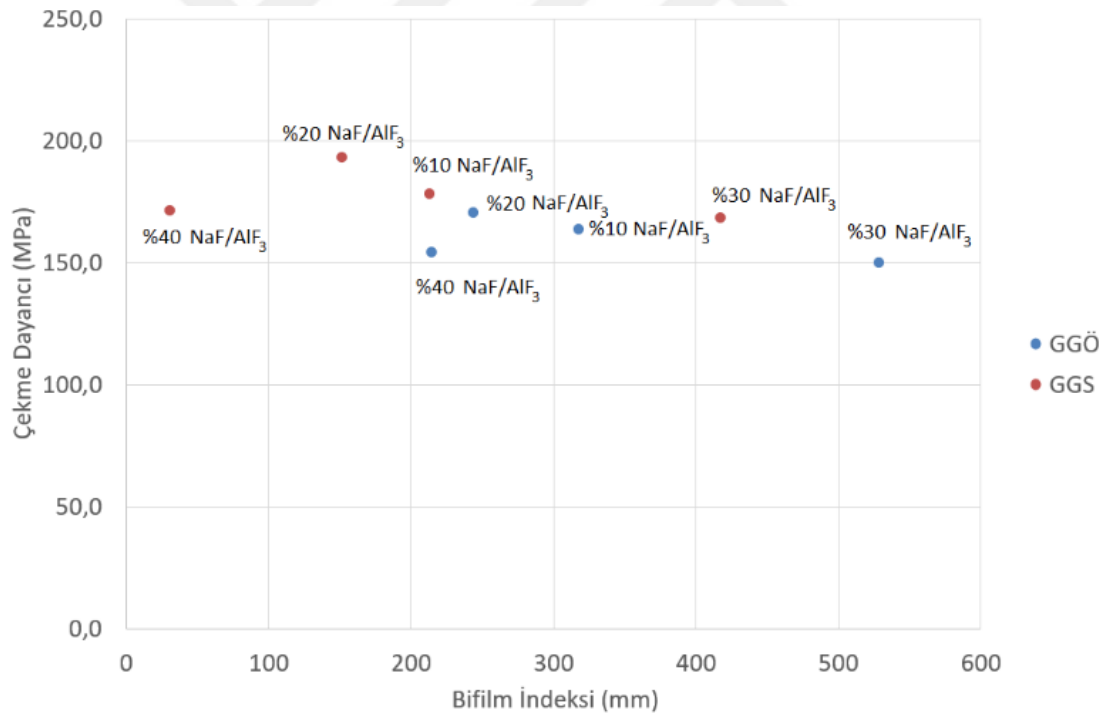


Şekil 4.5 Farklı NaF/AlF₃ = 1,85 (NaCl-KCl) için Bİ-Çekme Dayancı ilişkisi.

Şekil 4.6’da literatürün de önerdiği bir başka oksit çözücü olan NaF kullanılarak elde edilmiş Bİ ve çekme dayançları değerleri gösterilmektedir. Ağırlıkça % NaF miktarı arttıkça Bİ’de bariz düşüşler gözlemlenmiştir. Genel olarak GGÖ yaklaşık $\sigma = 150$ MPa civarında seyreden çekme dayanıcı değerleri GGS’da $\sigma = 200$ MPa civarına ulaşmıştır. Grafikten görüldüğü gibi %30 NaF içeren dökümler GGÖ’de Bİ = 389 mm iken GGS’da Bİ = 48 mm’ye düşerek yaklaşık %90’lık düşüş ile yüksek oranda temizleme veya arıtma işleminin gerçekleştiği görülebilmektedir. Aynı şekilde % azalma açısından irdelinir ise bu grup içerisinde %10 NaF içeren dökümler GGÖ’de Bİ = 489 mm’den GGS’da Bİ = 248 mm’ye düşerek yaklaşık %50 verim, %20 NaF içerenler GGÖ’de Bİ = 196 mm’den GGS’da Bİ = 118 mm’ye düşerek yaklaşık %40 verim ve son olarak %40 NaF’lı dökümler ise GGÖ’de Bİ = 313 mm’den GGS’da Bİ = 87 mm’ye yaklaşık %70 verime sahip olduğu görülmektedir.



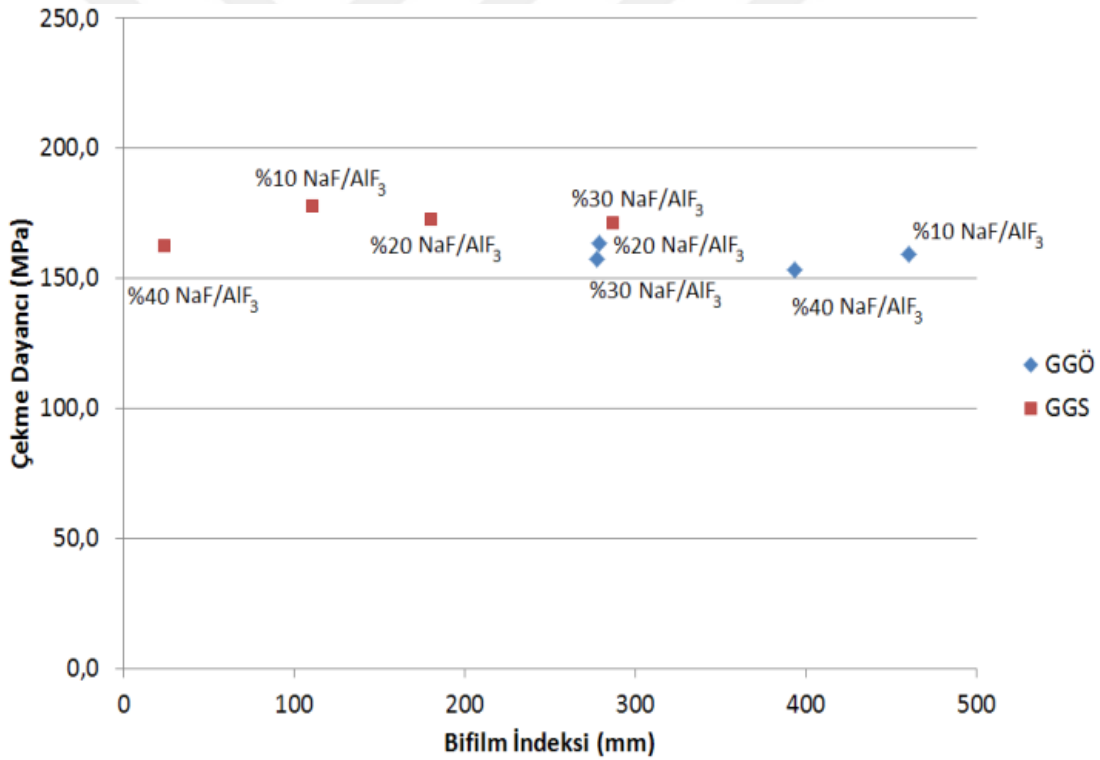
Şekil 4.6 Farklı NaF miktarları (NaCl-KCl) için Bİ – Çekme Dayancı ilişkisi.



Şekil 4.7 Farklı NaF/AlF₃ = 2,7 (NaCl-KCl) için Bİ-Çekme Dayancı ilişkisi.

Şekil 4.7’de gösterilen değerler Şekil 4.5’deki verilere NaF/AlF₃ yani kriyolit modülü açısından benzerlik gösterdiği düşünülse de Şekil 4.7’deki verilen NaF/AlF₃ = 1,85 olacak şekilde eritken kimyası hazırlanmıştır. Bu deney döngüsünde NaCl-KCl esaslı tuzlara %10’luk artışlar yapılarak ilaveler yapılmıştır. Genel olarak GGÖ yüksek Bİ sahip ergiyikler

GGs düşük Bİ sahip olmuşlardır. Sadece %30'luk katkıda küçük bir iyileşme gözlemlenmektedir. Bu iyileşmenin düşük seviyelerde kalmasının eritkeni sıvıya doğru verememe, sıvı metal sıcaklığını sabit tutamama, işlem adımlarında gecikmeler gibi birçok değişkene bağlı olmasından dolayı bu döngünün de tekrarlanarak sağlanması yapılabilir. Diğer katkılar ile hazırlanan şarjlarda benzer bir eğilim söz konusudur. %10, %20 ve %40'luk şarjların GGÖ $\sigma_{%10} < \sigma_{%40} < \sigma_{%20}$ iken GGS'de da $\sigma_{%10} < \sigma_{%40} < \sigma_{%20}$ olduğu görülmektedir. %10 katkılı dökümlerde GGÖ'de Bİ = 320 mm iken GGS'de Bİ = 210 mm olarak verimi %35'de kalmıştır. %20 katkılı dökümlerde GGÖ'de Bİ = 245 mm iken GGS'de Bİ = 150 mm olarak verimi %39 olmuştur. %40 katkılı dökümlerde ise GGÖ'de Bİ = 215 mm iken GGS'de Bİ = 35 mm'ye düşerek %84'lük bir temizleme verimine sahip olmuştur. Buradan katkı miktarının artması ile verimin arttığı ilişkisi nispi olarak tespit edilebilmektedir.



Şekil 4.8 Farklı NaF/AlF₃ = 3 (NaCl-KCl) için Bİ-Çekme Dayancı ilişkisi.

Şekil 4.8'de verilen Bİ – çekme dayancı ilişkisi kriyolit modülü NaF/AlF₃ = 3 olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu deneyin yapılmasının maksadı ticari kriyolitın doğrudan Na₃AlF₆ şeklindeki bileşiğini oluşturan NaF ve AlF₃ bileşiklerini serbest olarak ergiyiğe katarak katışkı giderme veriminin artırılması amaçlanmıştır. Nitekim bu deneme başarılı

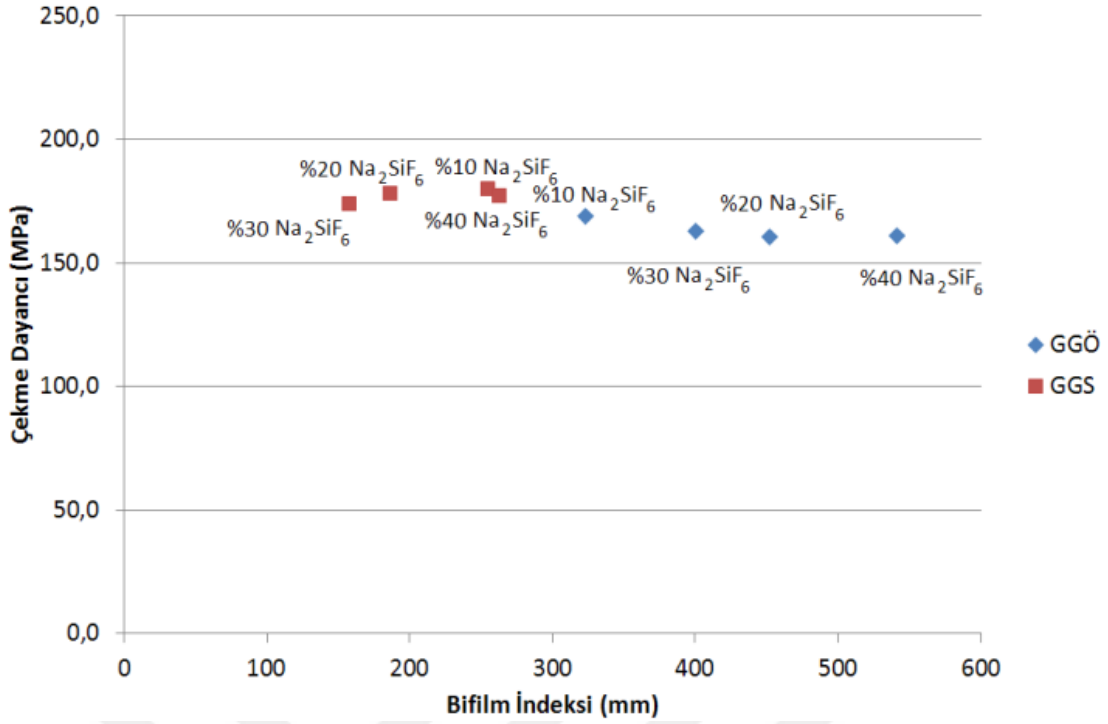
olmuştur. Şöyle ki; ticari kriyolitten elde edilmiş olan en yüksek çekme dayanıcı değeri 150 MPa civarında iken hesaplanarak eklenen NaF/AlF₃ = 3 deneylerinden en düşük 150 MPa civarında veriler elde edilmiştir.

Bu durum Utigard, vd. [12], Utigard, vd. [175] ve Tenorio ile Espinosa [190] çalışmalarında belirttiği eritkenlerin verimlilik sırası Na₃AlF₆ < LiF < NaF < KF ile açıklanabilir. NaF tek başına eklendiğinde çok daha etkili bir şekilde alümina çözebilmektedir. NaF ilaveli flaks ile karşılaşan Al₂O₃ partikülleri ve yüzey filmleri sıvılaştırılarak veya flaks ile bileşik oluşturularak gaz habbelerinin de yardımıyla yüzdürülerek yüzeye çıkarılmakta olup burada curuf içinde kalmaktadır. Takiben curuf çekilerek banyodan uzaklaştırılmaktadır.

Benzer şekilde dikkat edilmesi gereken bir diğer unsur %ağırlıkça NaF/AlF₃ veya doğrudan Na₃AlF₆ ilaveleri arttıkça Bİ düşmektedir ancak çekme dayanıcı da düşmektedir. Bunun temel sebebi Na'un elementel halde bulunma ihtimalinin arttırılması yani safsızlık (empürite) olarak içyapıya zarar vermesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca artan Na miktarı ile karmaşık bileşikler oluşma ihtimalinin de yüksek olması sebebiyle yapıda istenmeyen fazların bulunması olasıdır. Şekil 4.3 ve Şekil 4.8 incelenir ise her ikisinde de %10'luk ilavelerin en yüksek çekme dayanıcı elde ettiği görülmektedir. Bu bilgi Utigard, vd. [175] ve Tenorio ile Espinosa [190] çalışmalarında da sunduğu ağırlıkça %5-10 civarında florür ilavelerinin katışkı giderme verimliliği açısından önerilen değerlerde olduğu görülmüştür. Ticari kriyotli dökümlerde ve NaF/AlF₃ = 3 olacak şekilde hazırlanmış dökümlerde çekme dayançları arasında benzer şekilde şu ilişki elde edilmiştir;

$$\sigma_{%10} > \sigma_{%20} > \sigma_{%30} > \sigma_{%40} \quad (4.1)$$

Şekil 4.9'da NaCl yerine MgCl₂ eklenerek ağırlıkça olarak değişen Na₂SiF₆ miktarı ile Bİ ile çekme dayançları arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Hem Şekil 4.3'de gösterildiği gibi NaCl-KCl içeren Na₂SiF₆ deneylerinde hem de Şekil 4.9'daki MgCl₂-KCl içeren Na₂SiF₆ deneylerinde çekme dayançları 150–200 MPa aralığında değişmektedir. Her iki dökümde de genel eğilim Na₂SiF₆ miktarının artması ile Bİ düşmesi yönündedir.



Şekil 4.9 Farklı Na₂SiF₆ (MgCl₂-KCl) için Bİ-Çekme Dayancı ilişkisi.

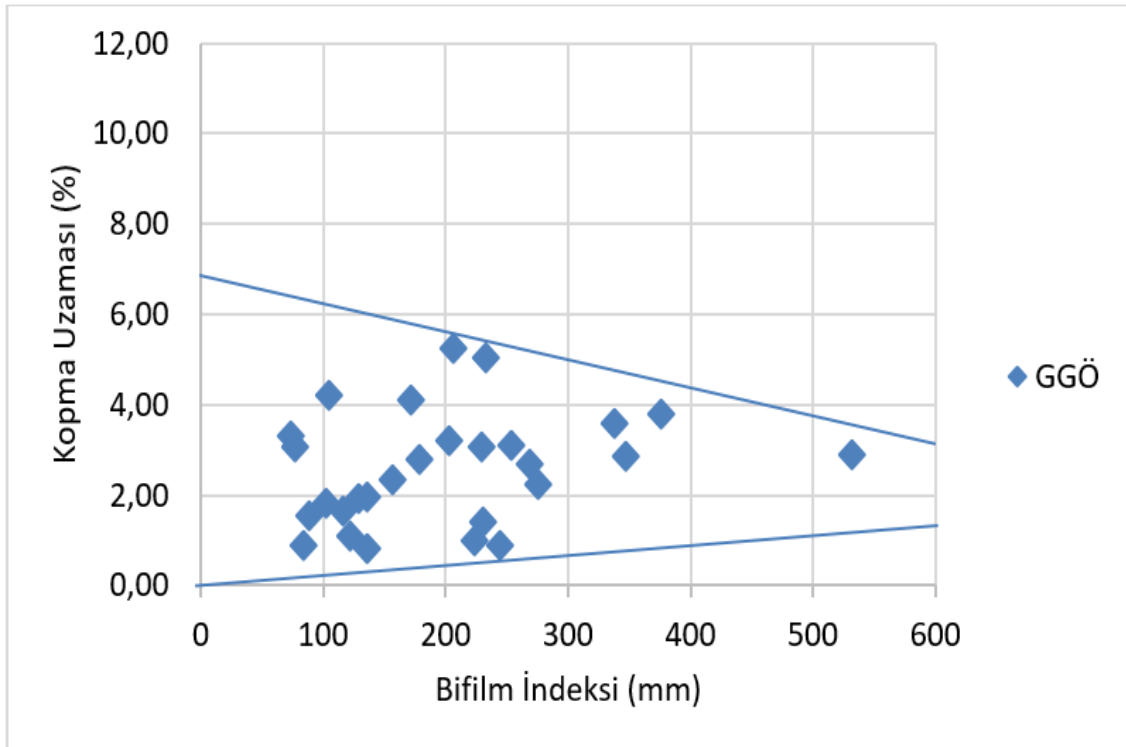
GGÖ verilere bakıldığında %40 Na₂SiF₆ içeren dökümlerin en yüksek kirlilik oranına sahip olduğu en yüksek Bİ değerlerine sahip olduğundan anlaşılır iken %10 Na₂SiF₆ içeren dökümlerin de hemen hemen yarısı kadar bir kirlilğe sahip olduğu açıkça görülebilmektedir. Ancak GGS verilerine bakıldığında bu iki farklı orana sahip dökümlerden elde edilen çekme dayancı değerlerinin birbirine yakın çıkmıştır. Burada verimlilik hususunda irdelenirse %40 Na₂SiF₆ GGÖ'de Bİ = 530 mm iken GGS'de Bİ = 250 mm olarak %53'lük verime sahip olmaktadır. Benzer şekilde %10 Na₂SiF₆ GGÖ'de Bİ = 320 mm iken GGS'de Bİ = 265 mm olarak sadece %18'lik bir verime sahiptir. Burada Na₂SiF₆'nın ciddi bir katışkı temizleyici olduğu bir kere daha ortaya konulmaktadır. Bununla birlikte %20 ve %30 Na₂SiF₆ katılı dökümler de kendi özelliklerinde incelenekce olursa; %20 Na₂SiF₆ GGÖ'de Bİ = 425 mm iken GGS'de Bİ = 195 mm olarak %55'lik verime sahip olmaktadır %30 Na₂SiF₆ GGÖ'de Bİ = 400 mm iken GGS'de Bİ = 160 mm olarak %60 verime sahiptir.

4.1.2 Bifilm İndeksi (Bİ) – Kopma Uzaması İlişkisi

Çekme dayancı-Bİ verilerine benzer durumlar % uzama değerlerinde gözlemlense de sıvı metalden gelen katı parça içerisinde bulunan katışkıların asıl karakteristik olarak kopma

uzamasına tesir ettiği çok daha açık bir şekilde göze çarpmaktadır. Artan Bİ ile kopma uzaması net bir şekilde azalır iken azalan Bİ ile dağınık olarak artış gözlemlenmektedir. GGÖ'de azami %5 uzama gözlenir iken GGS'de %10 seviyelerinde kopma uzamalarına rastlanmıştır.

Şekil 4.10'da GGÖ Bifilm İndeksi ile kopma uzamasının değişimini göstermektedir. Görüldüğü üzere geniş bir aralıkta saçılım yapmasına rağmen bifilm indeksinin düşmesi ile nispeten artış trendi gözlemlenmektedir.

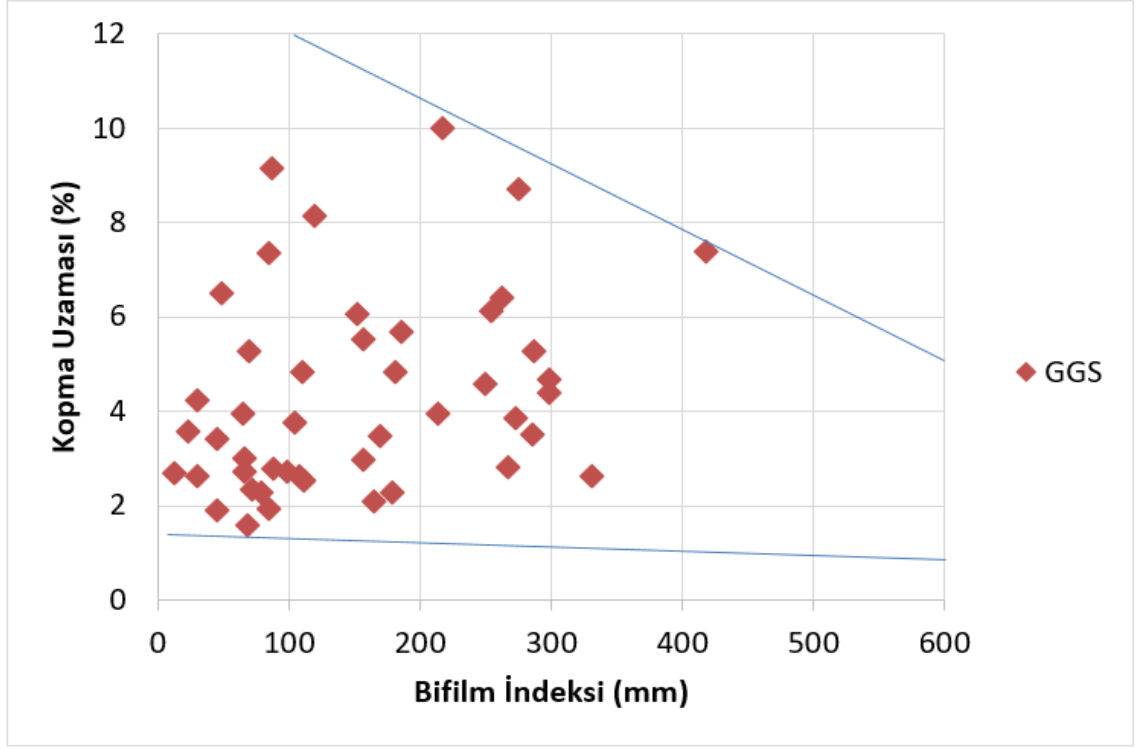


Şekil 4.10 Bifilm İndeksi ile Kopma Uzaması arasındaki genel ilişki. (GGÖ)

Şekil 4.11'de Şekil 4.10'dakine benzer bir karakteristik çizmiş gibi görünsede dikkatli incelendiğinde GGÖ'deki değerlerin dar bir aralıkta lakin çok dağınık bir davranış sergilerken GGS'deki değerlerin geniş bir aralıkta dağınık bir durum ortaya koymaktadır. Yani GGS'deki kopma uzaması değerleri %10 gibi oldukça yüksek değerlere ulaşabilir iken GGÖ'deki değerler ise %2 gibi düşük değerlerde kalmaktadır.

GGS numunelerinde eritken ve gaz giderme proseslerinin etkin bir şekilde uygulanması ile birlikte kopma uzaması değerlerinde GGÖ öncesine benzer bir durum gibi görülse de dikkat edilecek durumun ağırlıklı olarak $Bİ \leq 100$ mm olmasıdır. Bİ düşmesiyle birlikte kopma uzamasında dikkate değer artış söz konusudur. GGÖ'de yoğun bir şekilde kopma

uzaması değerlerinin %1-3 bandında seyrederken GGS'de en düşük elde edilen değerler %2'ler olmakla beraber kopma uzaması değerleri %10'lara kadar çıkmaktadır.



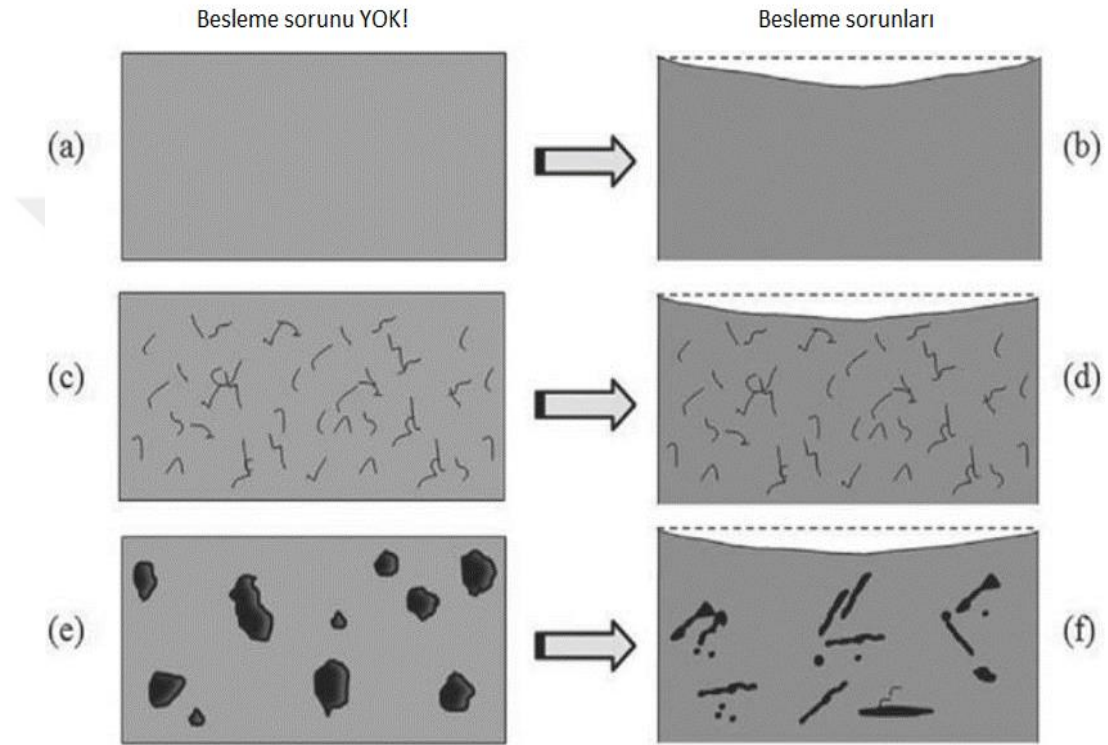
Şekil 4.11 Bifilm indeksi ile kopma uzaması arasındaki genel ilişki. (GGS)

4.1.3 Bifilm İndeksi (Bİ) - % Çekinti

İstisna birkaç alaşım grubu hariç metallerin büyük çoğunluğu katılaşma sırasında atomların daha düzenli bir yapıya geçişlerinden yani daha yoğun bir faza geçiyor olması sebebiyle çekintiye uğramaktadırlar. Katılaşan metalin içerisinde bifilmelerin bulunması katılaşma sırasında meydana gelecek olan çekintiyi telafi edebilir. Çekintinin bu telafi edilebilirliği Bİ ile belirlenebilir. Ancak daha da gerçekçi bir yaklaşım yapabilmek için Bİ yanında kesitten incelenen çekinti (ördek ayağı) numunelerinde bulunan gözeneklerin sayısına ihtiyaç duyulabilir. Bu şekilde gözenek uzunluğu (Bİ) ile gözenek sayısı birbirinin sağlamasını yapabilir. Dışpınar [1] yapmış olduğu doktora çalışmasında gözenek sayısının da belirleyici bir etken olarak kullanılabileceğini bildirmiştir.

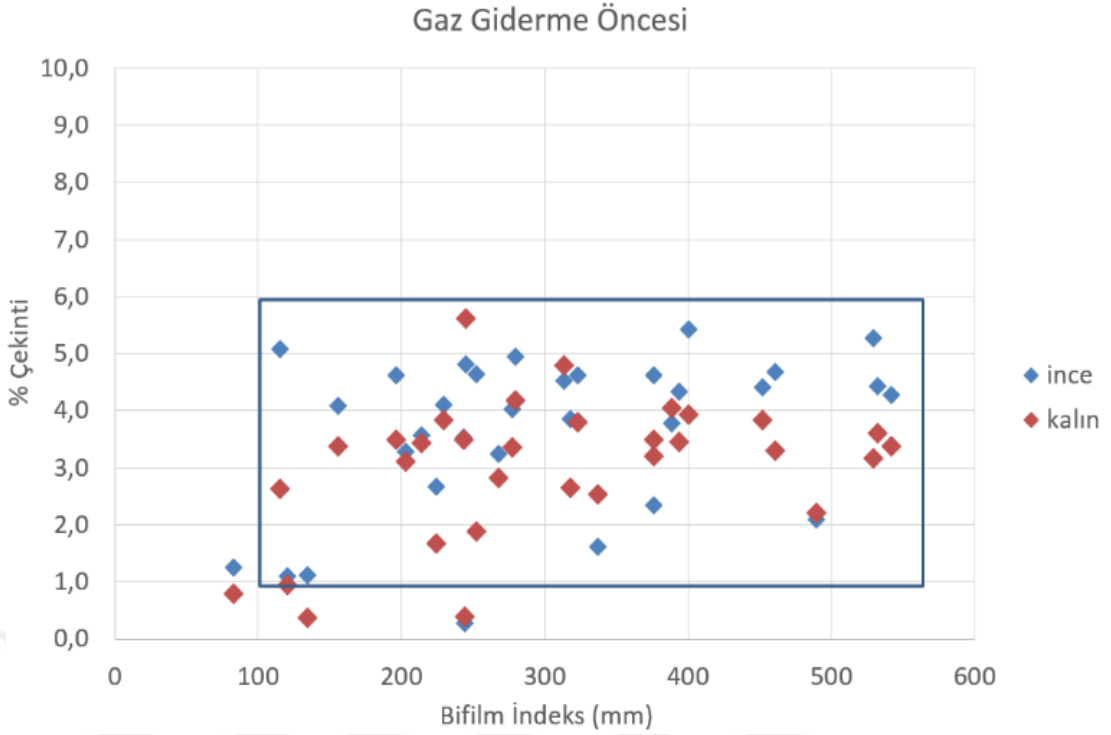
Şekil 4.12'de değişik koşullar altında yüzey çöküntüsü oluşumu ve dâhili olarak çekirdeklenmiş gözenekler gösterilmektedir. Şekil 4.12(a)'da ergiyik temizdir ve dökümün yüksek oranda yüzey çöküntüsüne sahip olması beklenir (Şekil 4.12(b)). Şekil 4.12(c)'de ise ergiyikte bir miktar bifilm mevcuttur lakin bu bifilmelerin açılmasına imkân

tanınmaması ya da düşük hidrojen derişimlerine sahip olmasından dolayı yine çekinti/yüzey çöküntüsü olması beklenir (Şekil 4.12(d)). Şekil 4.12(e)'de ergiyikte hem bifilmli hem de yüksek oranda hidrojen derişimi içermesinden kaynaklı açılan bifilmli katılaşma sırasındaki çekintiye karşı etki göstererek yüzey çöküntüsü/çekinti oluşumunu engellerler. Şekil 4.12(f)'de ise ergiyikte yüksek bifilm oranı olmasına rağmen çok düşük hidrojen derişimini ihtiva etmesinden dolayı (b) ve (d)'deki durumlara benzer bir çekinti oluşumu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.12 Çekinti davranışı üzerine bifilmli ve hidrojen derişiminin etkileri; (a–b) temiz metal ne hidrojen ne de oksijen içermektedir; (c–d) hidrojen derişimi çok düşük lakin bifilmli içeren ergiyik; (e) bifilmli ile yüksek hidrojen derişimine sahip ergiyik ve (f) bifilmli ile düşük hidrojen derişimine sahip ergiyik [205].

Şekil 4.13'de GGÖ'de Bi ile % çekintinin nasıl değişim gösterdiği resmedilmektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi kalın kesit (24 mm) ile ince kesit (17 mm) arasında % çekinti olarak nispeten ufak farklılıklar vardır. Burada dikkate edilecek husus aynı kalıpta, aynı şekilde doldurulan ve aynı Bi değerlerine sahip dökümler olmalarıdır. Bu şekildeki dökümler için kıstas katılaşma süresidir. İnce kesitli parçadaki katılaşma kalın kesitlidekine göre görece daha hızlı olmasından dolayı olası ya da mevcuttaki bifilmli açılmasına müsaade edilememektedir.

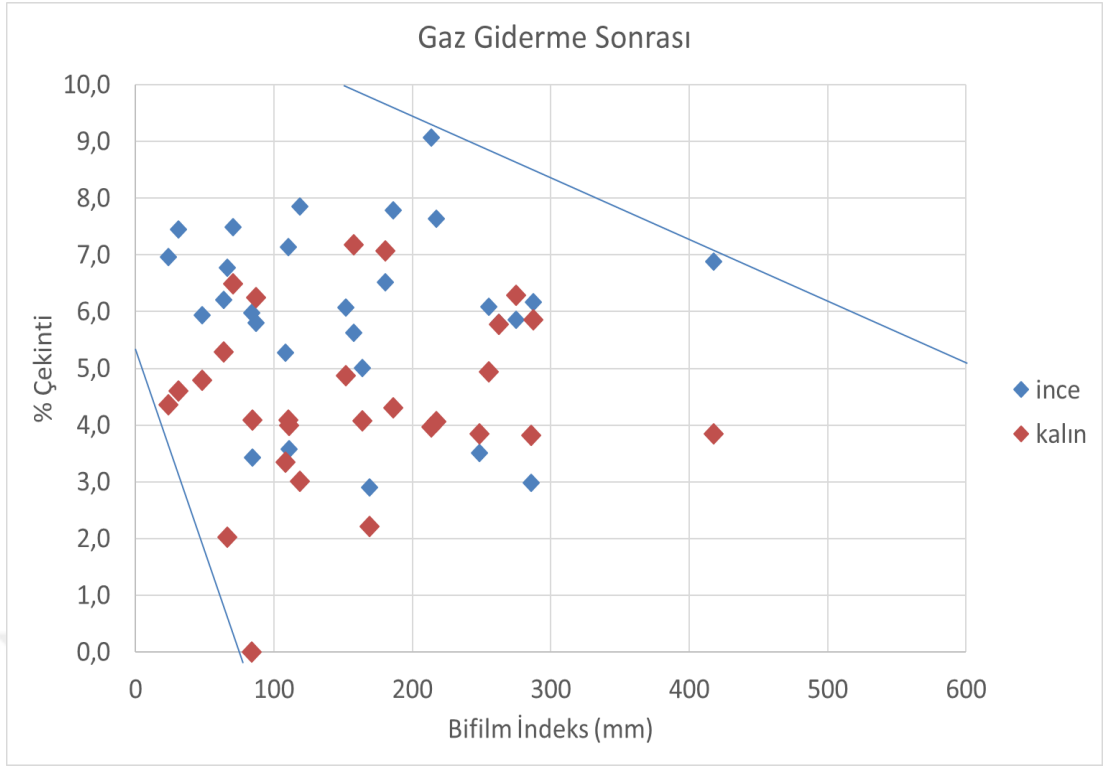


Şekil 4.13 Bifilm İndeksi ile % çekinti arasındaki genel ilişki (GGÖ).

Benzer şekildeki bakış açısı ile gaz giderme yapıldıktan sonraki numunelerdeki eğilimin ne şekilde geliştiği Şekil 4.14'de görülebilmektedir. Grafiklerin birbiri ile mukayesesi yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli detay Bİ'dir. Çünkü iki grafik incelendiğinde GGS'deki Bİ değerleri GGÖ'deki Bİ değerlerinin neredeyse %50 azalmış halidir.

GGÖ tüm deneyler için ortalama Bİ = 303 mm iken GGS'de bifilm indeksinin neredeyse %50 azalarak ortalama Bİ = 153 mm olarak ölçülmüştür. İnce kesitli numunelerde GGÖ'de %3,6 olarak tespit edilir iken GGS'de çekinti miktarı %5,3'e yükselmiştir. Benzer şekilde kalın kesitli numuneler için GGÖ'de yine tüm deneylerin tamamının ortalaması olarak çekinti miktarı %3 olarak ölçülür iken GGS'deki çekinti miktarı %4'e yükselmiştir.

Çekinti verileri incelendiğinde bir miktar kafa karıştırıcı olabilmesinin önüne geçmek amacıyla Şekil 2.4, Şekil 2.12 ve Şekil 4.12 tekrar incenir ise şöyle bir açıklama çıkacaktır; Eğer yapı içerisindeki çift katlı oksit filmlerinin sayısı fazla ise mevcut hacimde katılma sırasında genişleme eğilimi göstererek katılma çekintisini kompanse edecektir. Yani katılma sırasında malzeme karakteristiği olarak yüzeylerden büzölmeye karşı tıpkı şişen bir balon gibi ters kuvvet uygulayarak çekintiyi telafi etmeye çalışacaktır ki; deneylerden elde edilen veriler de işin mekanizmasının böyle olduğunu şiddetle açığa çıkarmaktadır (Şekil 4.14).



Şekil 4.15 Bifilm İndeksi ile % çekinti arasındaki genel ilişki (GGS).

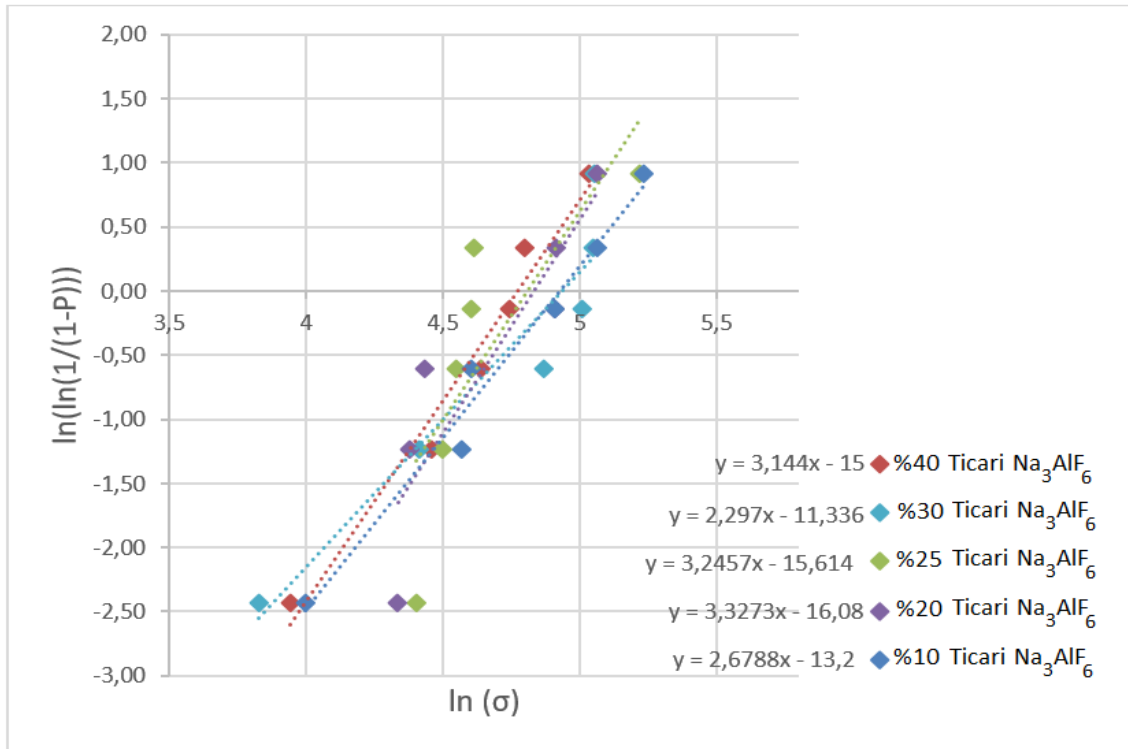
Sonuç olarak % çekinti oranlarından anlaşılacağı gibi örneğin Şekil 4.12(b), (d) ve (f) gibi durumların tamamında besleyici kullanmak gerekmektedir. Aksi takdirde örneğin şekilli parça gibi malzeme üretiminde nihai parçada mutlaka döküm kusur oluşacaktır. Buradan açık bir şekilde malzemenin karakteristik çekinti değerleri içerisinde bir çekinti sergilemeyen malzemelerin içerisinde ciddi miktarda çift katlı oksit filmleri bulunduğu anlaşılabilir.

4.2 Weibull İstatistiği ile Mekanik Özelliklerin İrdelenmesi

Kısım 2.10'da nasıl hesapladığı açıklanan Weibull Modülü tespit eden Weibull [201] malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde tekrarlanabilir, istikrarlı ve güvenilir sonuçlar gerektiğini belirtmiştir. Bu yüzden Weibull istatistik dağılımını geliştirerek yapılan testlerin sonuçlarının güvenilirlik seviyelerini belirlemiştir. Bu sebeple Kırtay ve Dışınar [202] hasar olasılığını tahmin etmek için literatürde ileri sürülen tüm teorileri kendi deneysel çalışmalarının sonuçları ile kıyaslayarak en istikrarlı, güvenli ve tekrarlanabilir yöntemin Hazen'inki olduğunu tespit etmişlerdir. Dolayısıyla bu çalışmada da Hazen yöntemi kullanılarak çekme dayancının ve kopma uzamasının istatistiksel değerlendirilmesi yapılmıştır.

4.2.1 Weibull İstatistiği – Çekme Dayancı İlişkisi

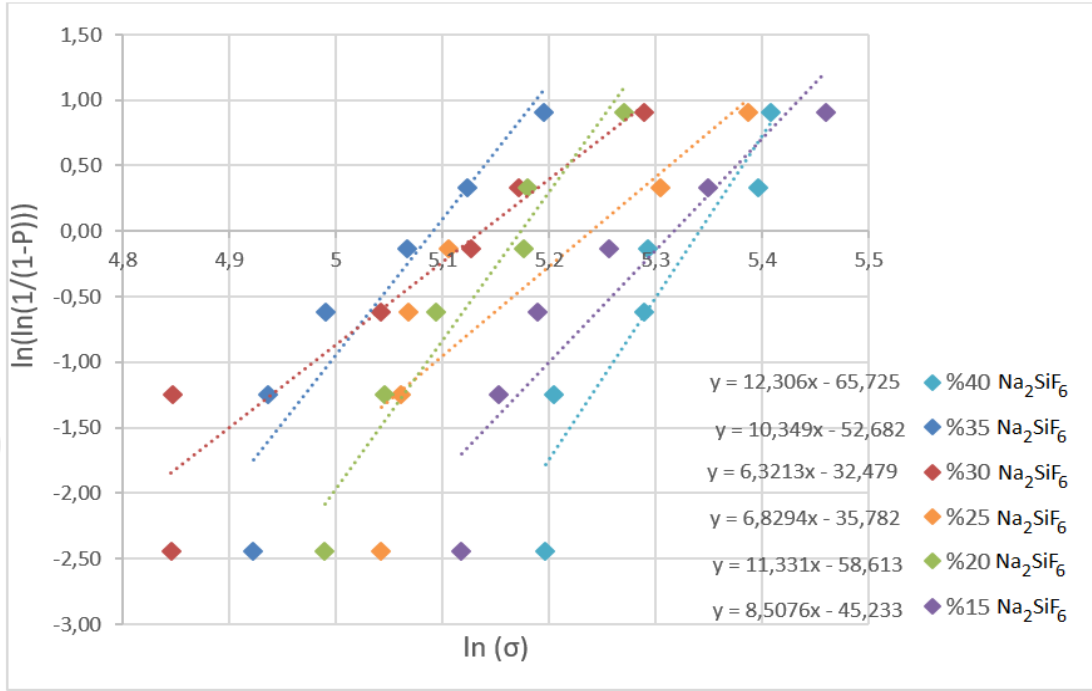
Şekil 4.16'dan görüldüğü gibi artan ticari kriyolit miktarı ile çekme dayancı arasında hem istatistiksel dağılım hem de ortalama değer olarak bir farklılık göze çarpmamaktadır. Weibull Modülleri üst üste geldiği gibi yaklaşık 2,94 civarında olup karakteristik çekme dayancı değeri 128 MPa seviyelerindedir. Dolayısıyla artan ticari kriyolit miktarının mekanik özelliklere belirgin bir etkisi olduğunu söylemek imkânsızdır. Ancak kendi içerisinde bir değerlendirme yapmak gerekir ise her zaman benzer sonuçları %25 kriyolit içeren karışımlardan sağlanabileceği görülebilmektedir.



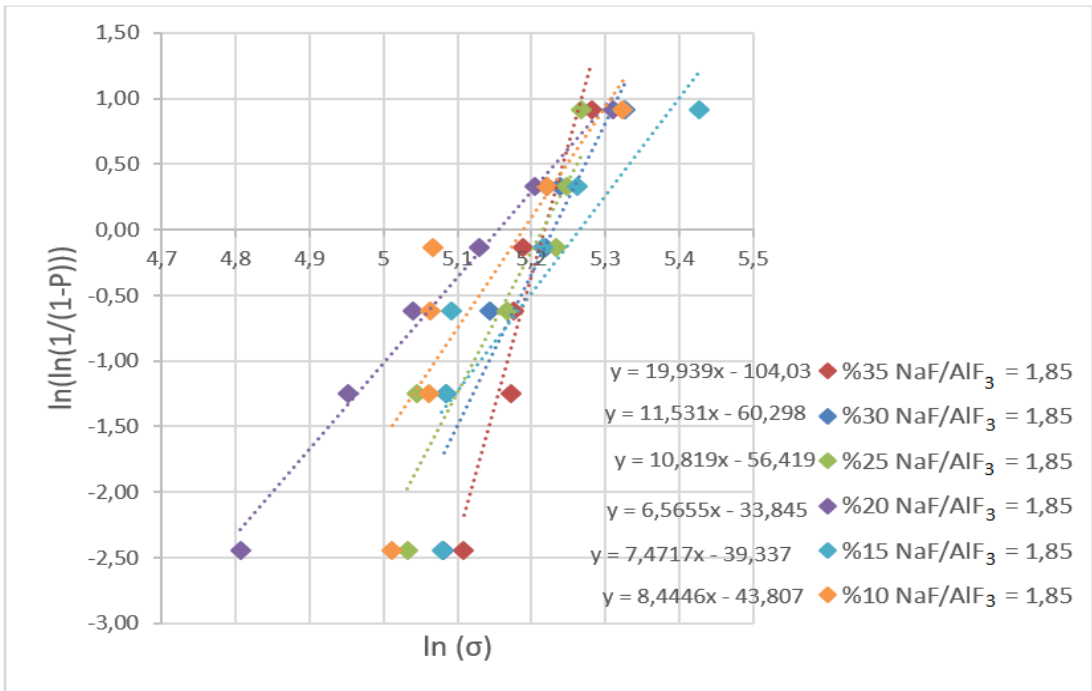
Şekil 4.16 Farklı Ticari Na_3AlF_6 (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayancı verilerinin Weibull ilişkisi.

Na_2SiF_6 oranı çekme mukavemetine ciddi derecede etki etmektedir. Şekil 4.17'de görüldüğü gibi her bir oran soldan sağa doğru paralel çizgiler ile Weibull dağılımı göstermişlerdir. Weibull Modülü yaklaşık 9,2 iken çekme mukavemeti 162 MPa'dan 208 MPa'a kadar değişim göstermektedir. Burada ilginç olan %15 Na_2SiF_6 'dan %35'e kadar gittikçe ortalama çekme mukavemeti düşerken %40'lukta en yüksek değere ulaşmıştır. Bu durum aynı zamanda Weibull Modülü'nün de en yüksek olduğu ve istikrarlı sonuçların elde edilebileceği karışımın da %40 olduğunu göstermektedir.

Li, vd. [206] de %25 Na₂SiF₆ eritken ile yaptığı sıvı metal temizleme çalışmalarında modifikatör içeren eritkenler kullanıldığında en yüksek çekme mukavemeti ve kopma uzamasını elde ettiğini belirtmiştir.



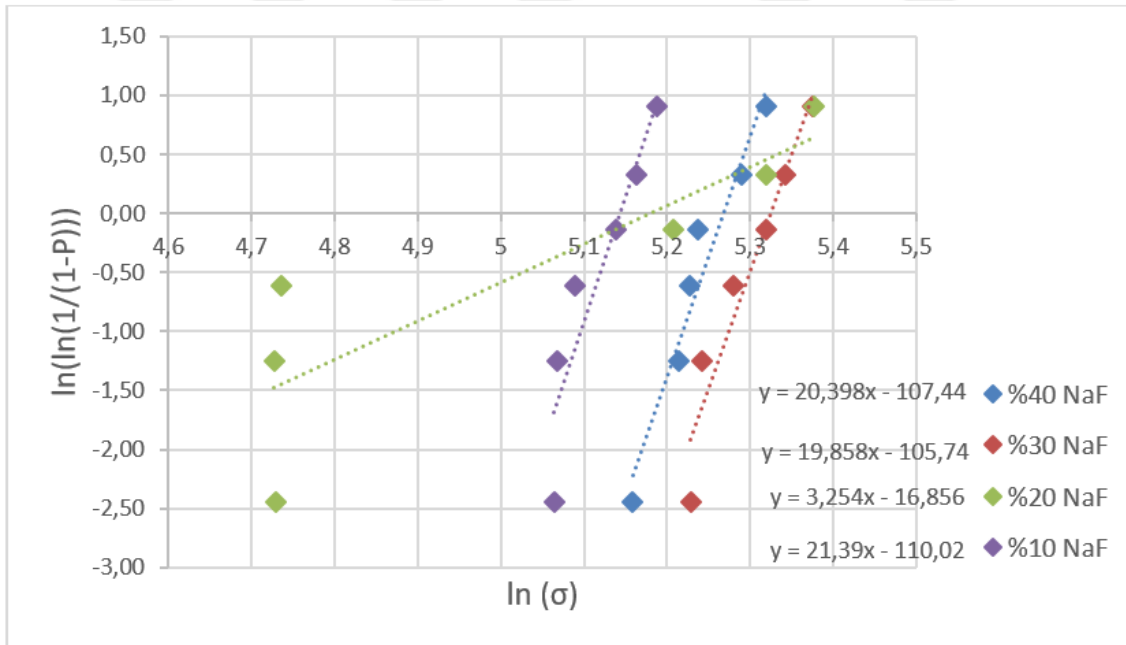
Şekil 4.17 Farklı Na₂SiF₆ (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayanıcı verilerinin Weibull ilişkisi.



Şekil 4.18 Farklı NaF/AlF₃ = 1,85 (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayanıcı verilerinin Weibull ilişkisi.

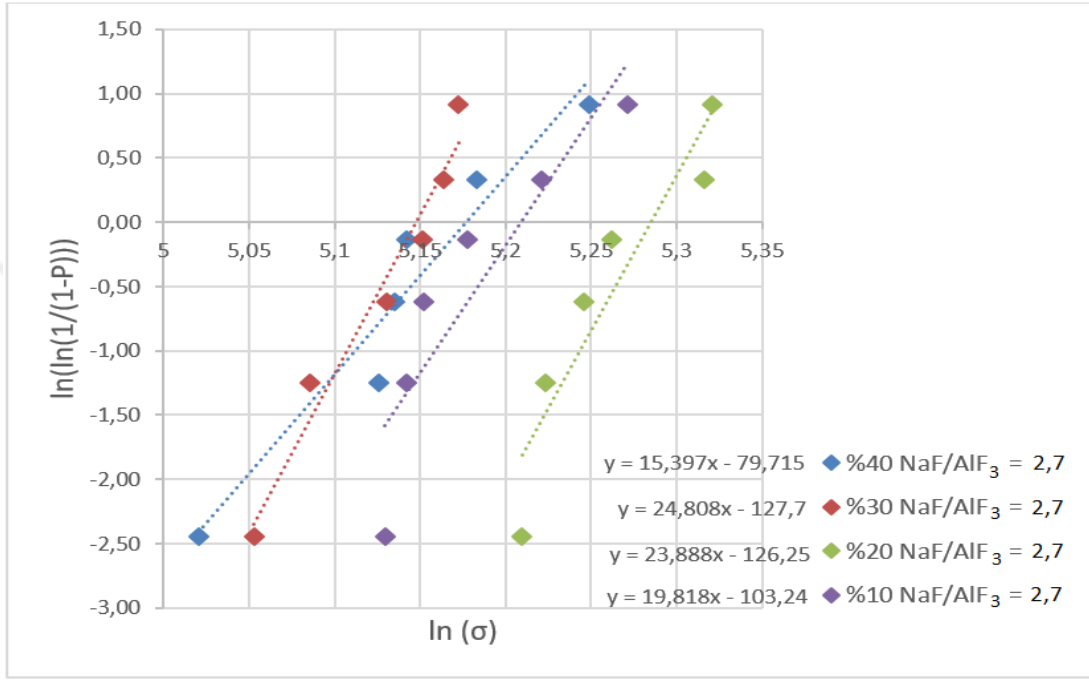
Şekil 4.18’de kriyolit modülüne (KM = 1,85) göre çekme değerlerinin Weibull dağılımına dikkat edilecek olunursa hemen hemen hepsinin aynı ortalama değerde (183 MPa) fakat farklı Weibull Modülüne sahip olduğu görülmektedir. Modül değeri 6’dan 19’a doğru değişim gösterir iken bu değerler artan kriyolit modülü ile paraleldir. Dolayısıyla %35 kriyolit kullanıldığı zaman daha istikrarlı tekrarlanabilir yüksek mekanik özellikler elde edilebilmektedir.

Şekil 4.19’da %20 NaF dışında diğer oranların her bir mekanik test sonucunun paralel olarak dağıldığı göze çarpmaktadır. %10’luk 171 MPa ile en düşük değerde iken %30’luk en yüksek ortalama değeri 205 MPa ile vermektedir. %20’lik ise aslında iki farklı Weibull dağılımı vermektedir. Üç tane çok düşük değer ile üç en büyük değeri ayrı ayrı Weibull dağılımı gibi incelenecek olunursa aslında diğer tüm verilere benzer paralel bir dağılım verebileceği göze çarpmaktadır. En kötü değerlerin 110 MPa civarında olup akma mukavemetine yakın olması bu dökümde muhtemel bir hatanın örneğin yüzey cürufu ya da iyi temizlenmemiş eritkenin sıvı metal ile birlikte yolluğa taşınmış olma ihtimalini göz önünde bulundurmak gerekir. NaF içeren eritken grubunda %40’lık karışımların en istikrarlı ve güvenilir karışım olduğu görülmektedir.



Şekil 4.19 Farklı NaF (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayancı verilerinin Weibull ilişkisi.

Şekil 4.20’de (KM = 2,7) görülen Weibull dağılımı tıpkı Şekil 4.18 ve 4.21’dekine benzer şekilde paralellik içermektedir. Fakat kriyolit oranı ile deney sonuçları arasında doğrusal bir ilişki yoktur. %30’luk en düşük değeri veririrken %10 ve %40 birbirine yakın değerleri verir iken en yüksek değer %20’de 197 MPa değeri ile elde edilmiştir. Ancak KM = 2,7’de en güvenilir, tekrarlanabilir ve istikrarlı karışım en düşük değeri de vermiş olsa %30’luk karışımlardır.

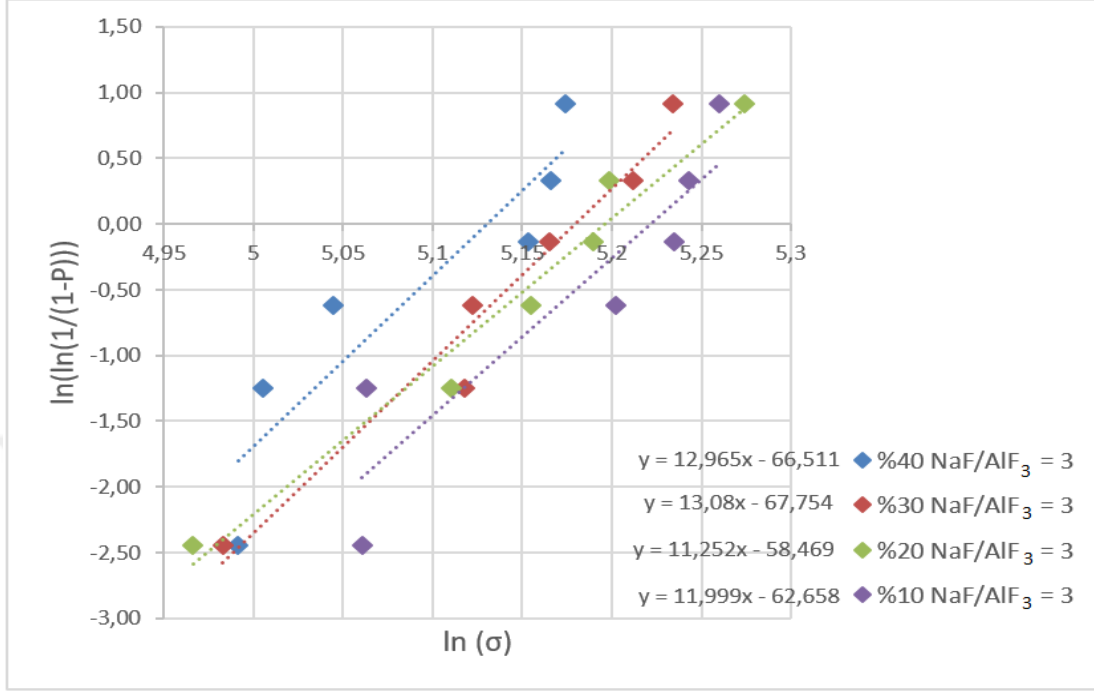


Şekil 4.20 Farklı NaF/AlF₃ = 2,7 (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayanıcı verilerinin Weibull ilişkisi.

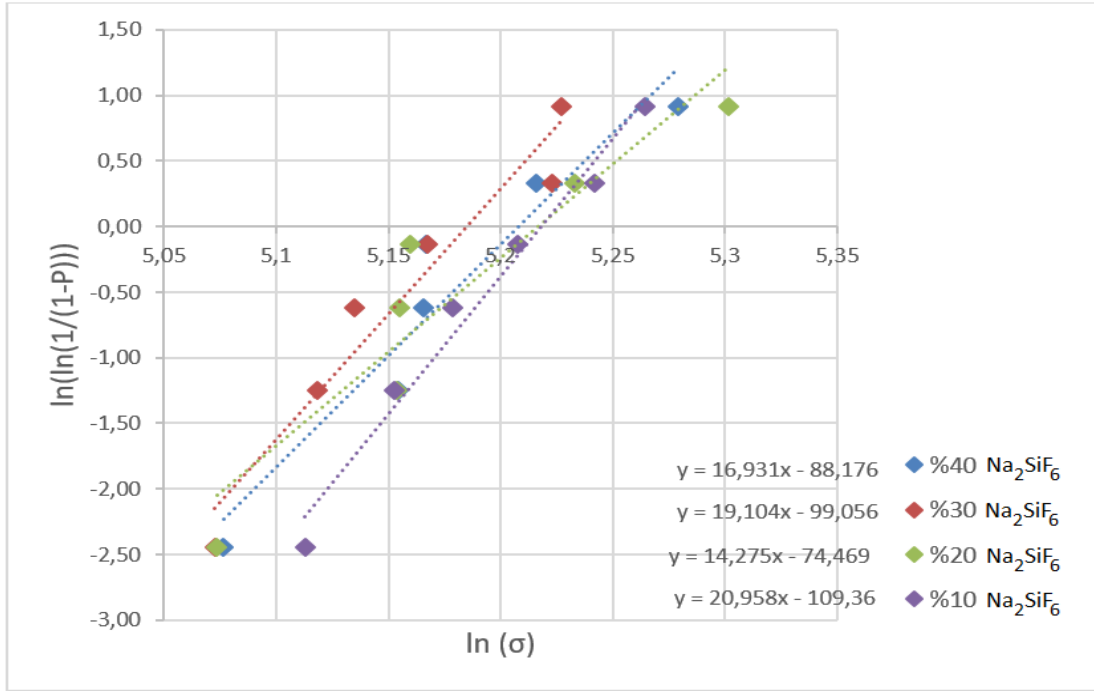
Şekil 4.21’de de yine paralel bir görüntü varken KM = 3 iken artan kriyolit ile mekanik özelliklerin düştüğü belirgin olarak gözükmemektedir. En yüksek değer 186 MPa ile %10’da elde edilir iken en düşük değer 171 MPa ile %40’da görülmüştür. Dolayısıyla artan kriyolit oranının mekanik özellikleri olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Laboratuvarında hazırlanmış olan ticari kriyolitteki KM’ye eşdeğer KM = 3 olan karışımlarda çekme dayanıklarının %10 kadar yüksek olmamasına rağmen her zaman en güvenilir karışım olduğu bilinmelidir.

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi MgCl₂ kullanıldığı zaman çekme dayanımı ile ilişkili Weibull dağılımları % Na₂SiF₆ oranından bağımsız bir şekilde oldukça istikrarlı ve tekrarlanabilir benzer sonuçları vermiştir. Weibull modüllerinin birbirine yakın ve bu çalışmadaki nispeten en yüksek değerlere sahip olması bu eritken grubunun en güvenilir karışıma

sahip olduğunu göstermektedir. Buradaki en uygun karışım aralığı %10 ile %30 oranında Na_2SiF_6 içerenlerdir. Eğer eritken içerisinde Na_2SiF_6 kullanılması amaçlanıyor ise en yüksek %30 en düşük de %10 oranında Na_2SiF_6 ihtiva etmesi tasarlanmalıdır.



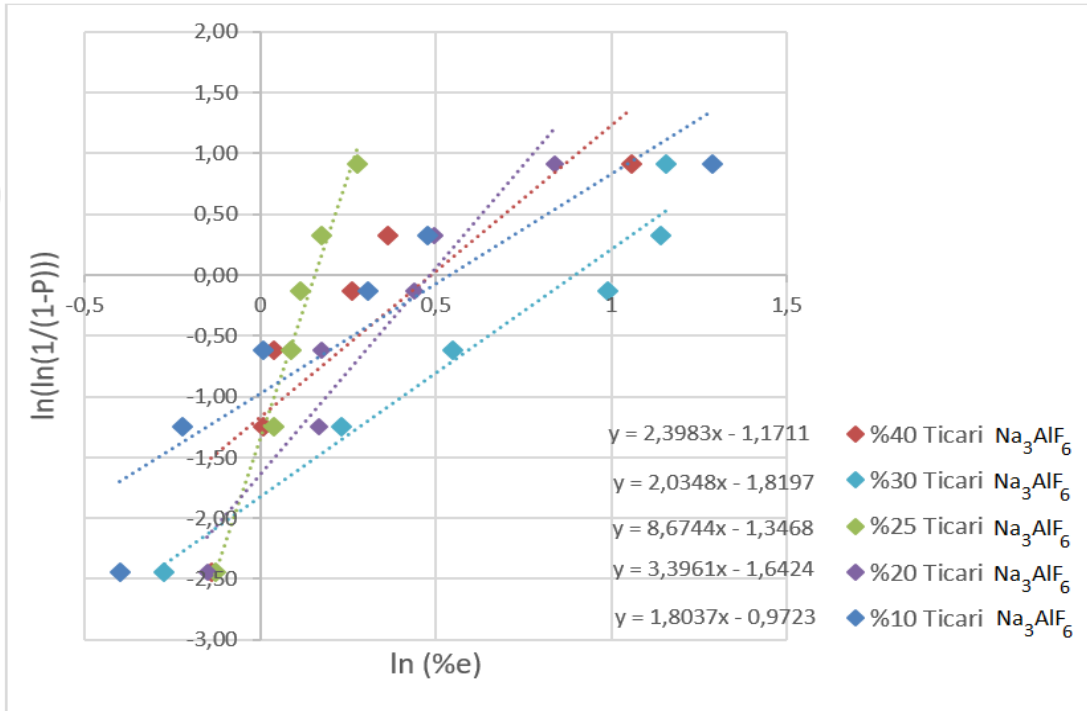
Şekil 4.21 Farklı NaF/AlF₃ = 3 (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayanıcı verilerinin Weibull ilişkisi.



Şekil 4.22 Farklı Na₂SiF₆ (MgCl₂-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayanıcı verilerinin Weibull ilişkisi.

4.2.2 Weibull İstatistiği – Kopma Uzaması İlişkisi

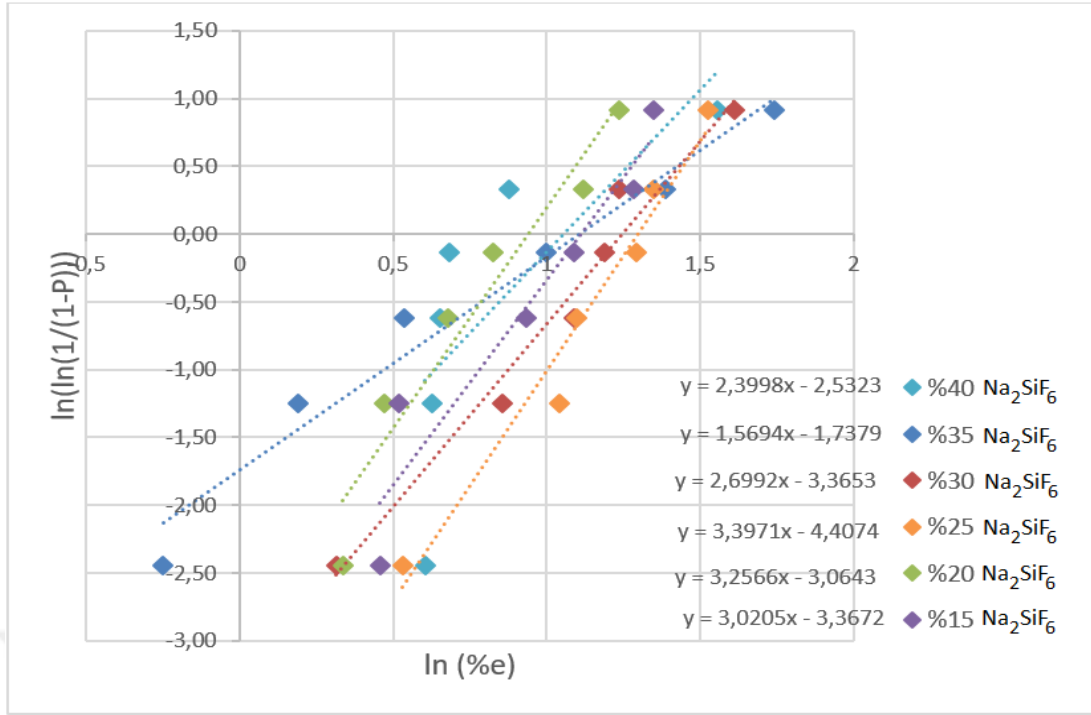
Şekil 4.23'deki ticari kriyolit oranına göre kopma uzaması Weibull dağılımları oldukça karmaşık ve sapsmalı bir dağılım sergilemektedir. İstatistiksel olarak en tekrarlanabilir değer %25 kriyolitte görülür iken en düşük kopma değeri de yine bu bileşimde görülmektedir. Dolayısıyla kesinlikle kötü sonuç vermeye açıktır. Diğer yandan farklı kriyolit oranlarında ise ortalaması yüksek olduğu halde dağılık sonuçlar elde edilmesi bu eritkenin güvenli kullanımını tehlikeye düşürmektedir.



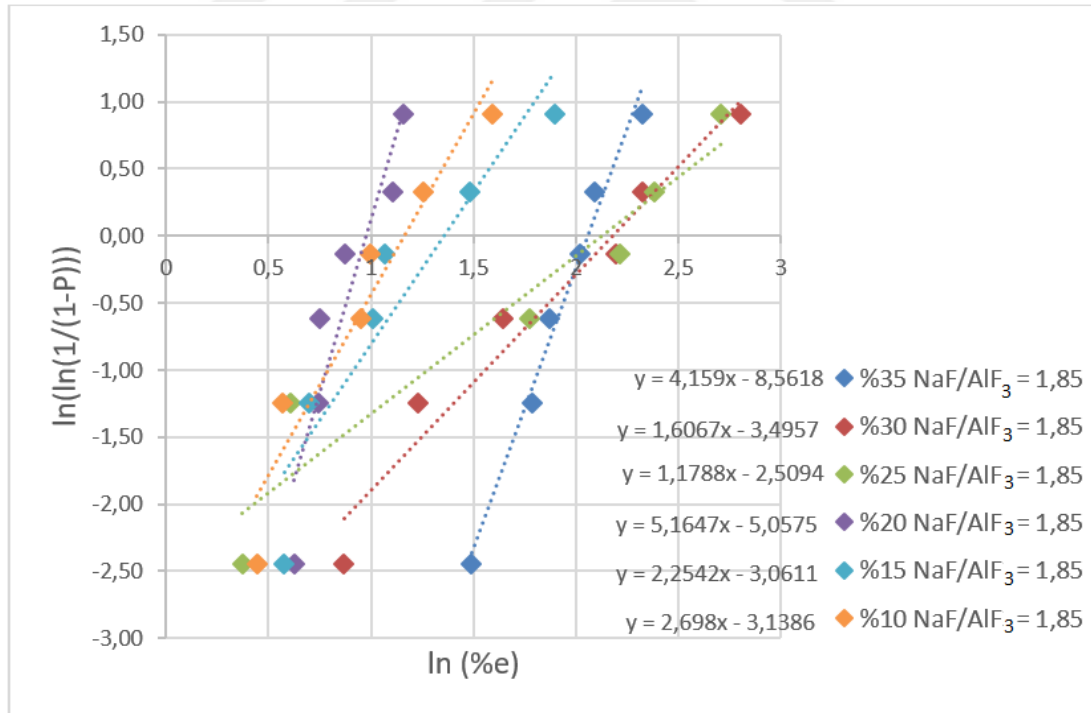
Şekil 4.23 Farklı Ticari Na_3AlF_6 (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen çekme dayancı verilerinin Weibull ilişkisi.

Şekil 4.24'ye göre farklı Na_2SiF_6 (NaCl-KCl) oranlarına bağlı olarak Weibull dağılımları hemen hemen birbirine paralel sonuçlar vermiştir. Buna göre her bir bileşimde benzer tekrarlanabilir sonuçlar elde edilebileceği tespit edilmiştir. Detaylı bakılacak olunur ise %25'lik oran 3,68 ile en yüksek kopma uzamasını vermiştir.

Şekil 4.25'de $\text{KM} = 1,85$ olan eritkenin kopma uzaması sonuçlarını vermektedir. Weibull dağılımları oldukça karmaşık olarak göze çarpmaktadır. Burada %10, 15 ve 20 grafiğinin en solunda olup çok düşük kopma uzamaları verdiği ifade edilmiştir. Diğer oranlar incelendiğinde ise %25 ve 30'da yüksek değerler göze çarpar fakat %35'lik en tekrarlanabilir ve istikrarlı sonuçları vermiştir.

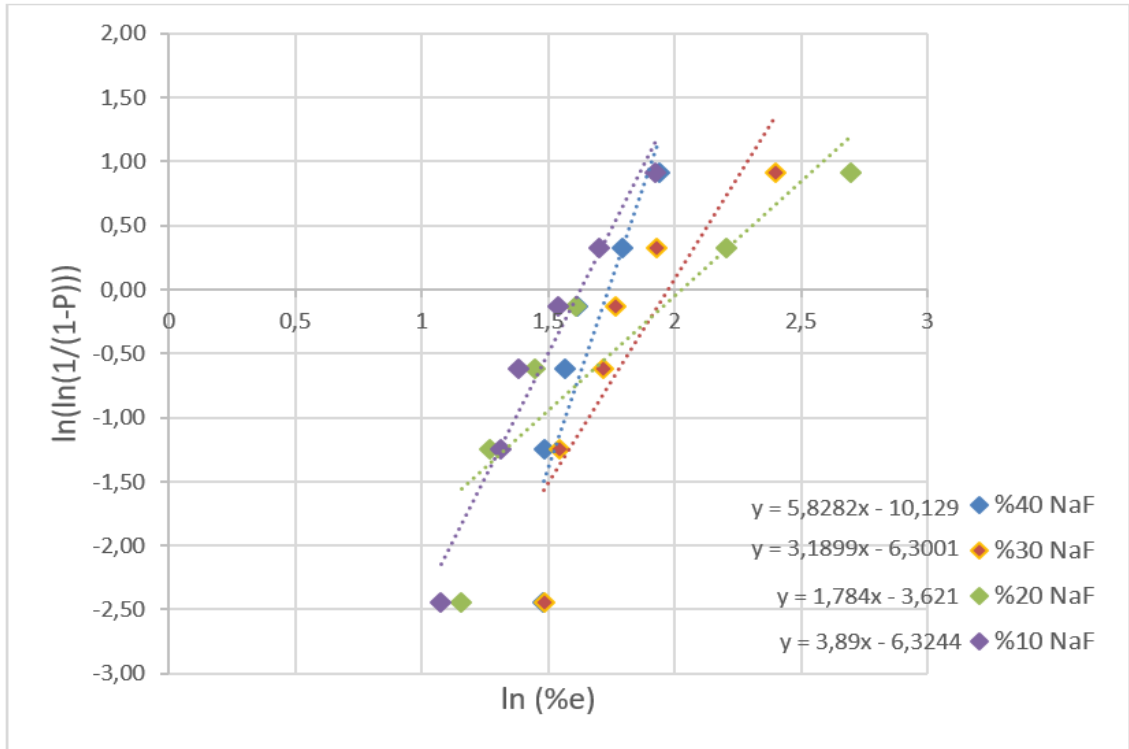


Şekil 4.24 Farklı Na₂SiF₆ (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen kopma uzaması verilerinin Weibull ilişkisi.



Şekil 4.25 Farklı NaF/AlF₃ = 1,85 (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen kopma uzaması verilerinin Weibull ilişkisi.

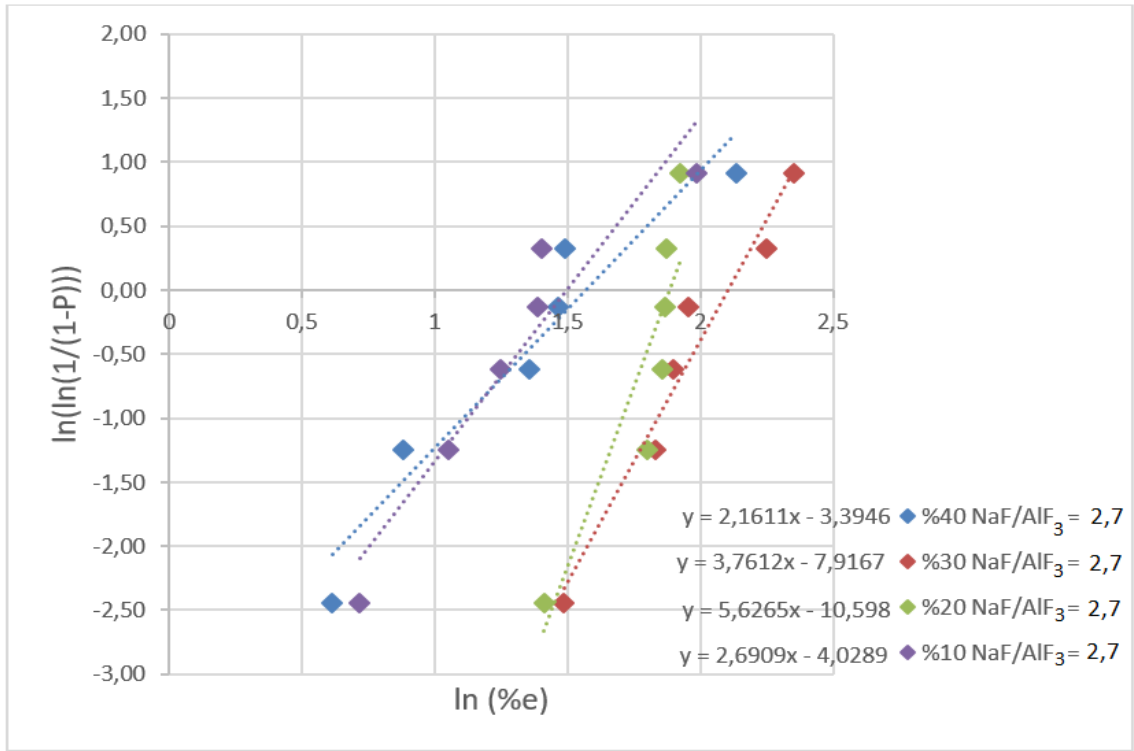
Şekil 4.26'de NaF oranı arttıkça kopma uzamasında yüksek değerlere rastlanabilmektedir. Ancak Weibull Modül değerlerine bakılacak olunur ise artan NaF ile azaldığı gözükmektedir. Bu şartlar altında %40'lığın ortalaması düşük gibi gözükmesine rağmen en tekrarlanabilir sonucu vererek güvenilirlik telkin etmektedir. Şekil 4.23-4.25'deki veriler ile kıyaslayacak olursak oldukça toplu bir şekilde birbirine yakın istikrarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Diğer veriler daha dağınık ve saçılımlı farklı karakteristik sonuçlar vermektedir. NaF döngüsünde bütün %'lere bakılacak olursa %6,4 seviyelerindedir.



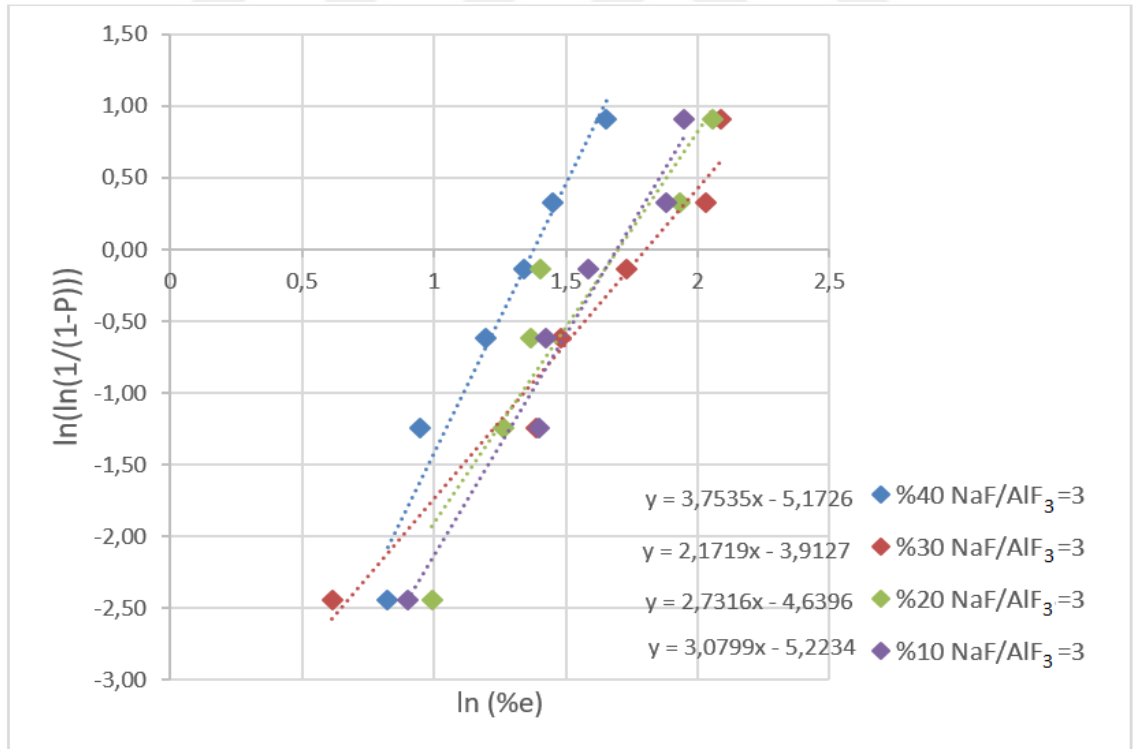
Şekil 4.26 Farklı NaF (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen kopma uzaması verilerinin Weibull ilişkisi.

Şekil 4.27'de Kriyolit Modülü 2,7 olduğu durumda en düşük kopma uzaması ba çalışmada denenen en düşük NaF/AlF₃ (%10)'a tekabül etmektedir. %20 ve %30'a arttırıldığında sırasıyla artarken %40 oranında ani bir düşüş gözlemlenerek %10 ile aynı değerler tespit edilmiştir. Bu doğrultuda en yüksek ve tekrarlanabilir sonuçlar %30 oranında elde edilmiştir.

Şekil 4.28'de görüldüğü gibi %10, 20 ve 30 karışımları üst üste birbirilerin yakın sonuçlar verirken %40'a çıktığında ciddi şekilde kötüleşmiştir.

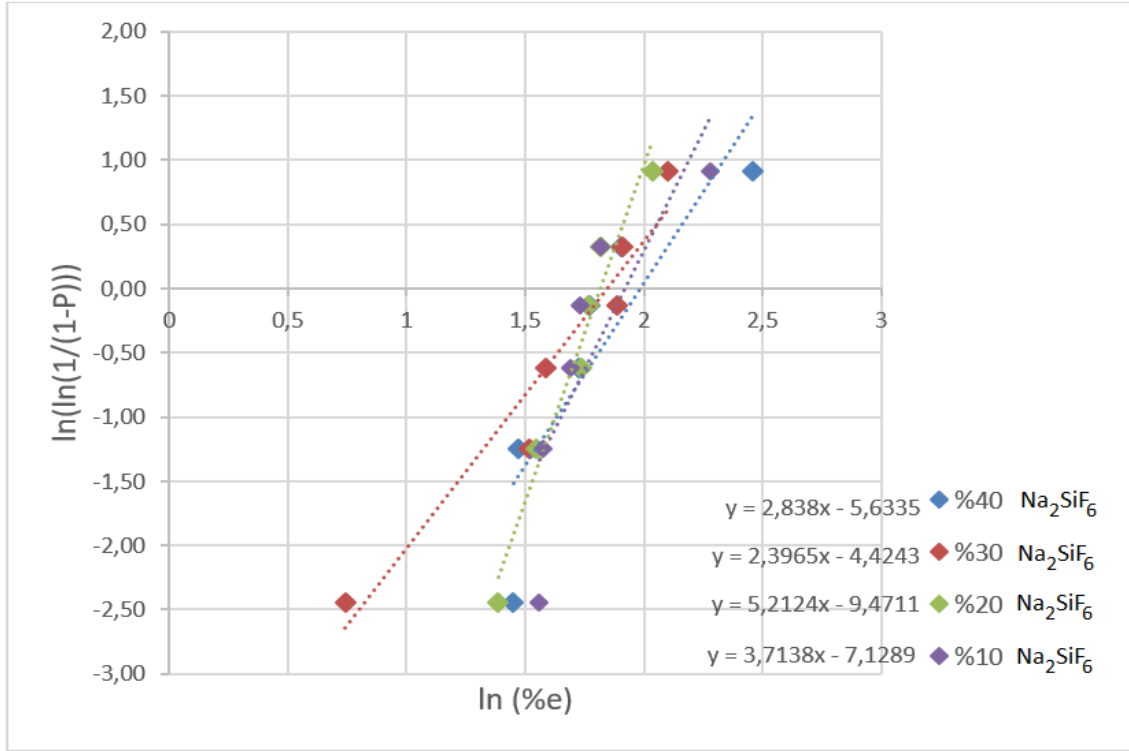


Şekil 4.27 Farklı $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 2,7$ (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen kopma uzaması verilerinin Weibull ilişkisi.



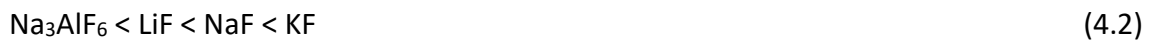
Şekil 4.28 Farklı $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 3$ (NaCl-KCl) eritkenlerinden elde edilen kopma uzaması verilerinin Weibull ilişkisi.

Şekil 4.29'da görüldüğü gibi artan Na_2SiF_6 'ya göre kopma uzamasında herhangi bir belirgin değişiklik görülmemektedir. Weibull karakteristiği %6.6'dır. Tüm bu veriler arasında %30'luk karışımda sadece bir tane numune çok düşük bir değer vermiştir. Fakat ortalamayı bozmadığı göze çarpmaktadır.



Şekil 4.29 Farklı Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) eritkenlerinden elde edilen % kopma uzaması verilerinin Weibull ilişkisi.

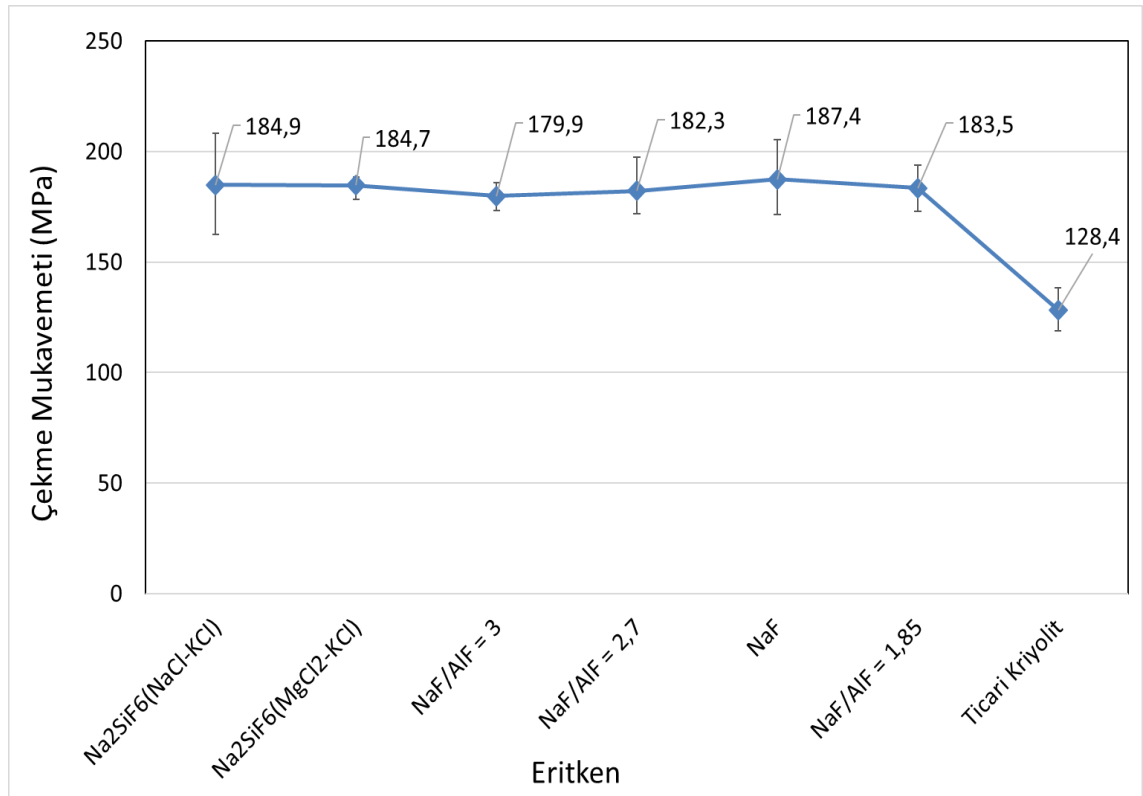
Eritken hazırlama aşamasında NaCl-KCl esaslı karışımlar kullanılmıştır ve bu karışımlarda kriyolit modülü değiştirilirken ergiyik ağırlığının %2'si dolayısıyla aynı miktardaki sıvı metal ile çalışıldığı için 100 gr eritken üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Bu doğrultuda modül değişimi için en temel değişken 100 gr içerisindeki NaCl-KCl miktarı olmuştur. Örneğin Kriyolit modülü 2,7 içeren eritken bileşimi için %10'luk karışım 38'er gram NaCl-KCl kullanılırken %40 karışım için 23'er gram kullanılmıştır. Tenorio ile Espinosa [190] florür bileşiğine göre verimlilik sırasını şeklinde vermiştir;



Eşitlik 4.2'deki benzer verimlilik oranları bu çalışmada da belirgin bir şekilde görülmüştür. NaF ciddi bir katışkı temizleyici olarak görülebilmektedir.

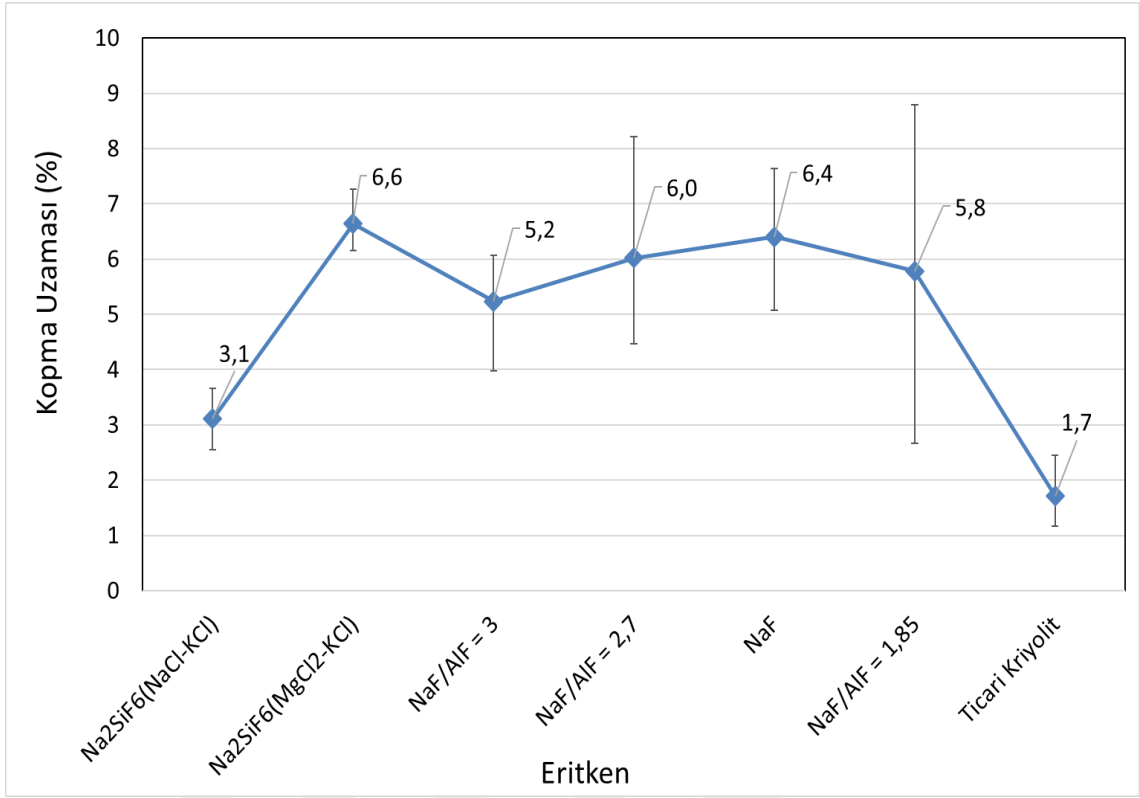
AlF_3 eklendiği durumlarda ise verimlilik, metal kalitesi ve mekanik özellikler düştüğü gözlemlenmiştir. Dolayısıyla AlF_3 eklemenin hiçbir faydalı etkisine bu çalışmada rastlanmamıştır. Aksine Şekil 4.30-4.32'den de görülebileceği gibi AlF_3 oranı arttıkça mekanik özelliklerde düşüş tespit edilmiştir.

Özellikle kopma uzaması ve tokluk belirgin bir şekilde azalırken diğer dikkati çeken nokta ise AlF_3 kullanılan deneylerde standart sapmanın gittikçe artış göstermesidir. Bu durumda sonuçların tekrarlanabilirliğinin ne kadar kötü ve güvenilirliğinin ne kadar düşük olduğunu ifade etmektedir.

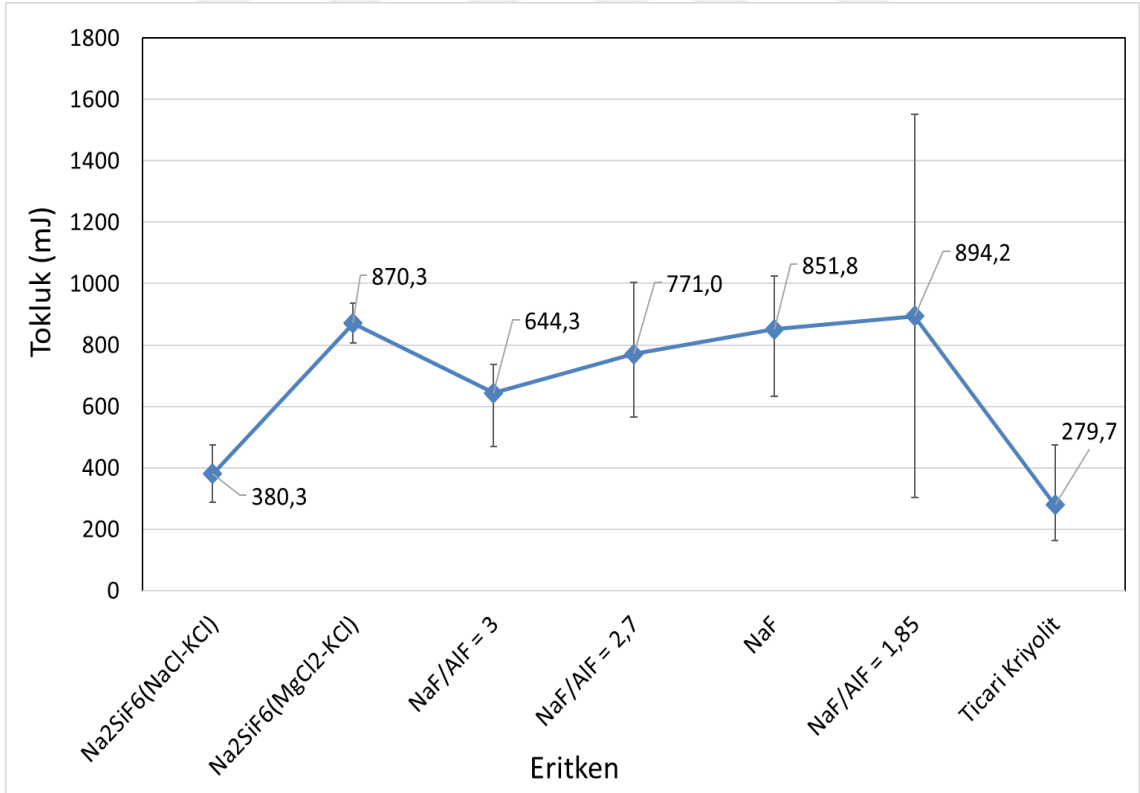


Şekil 4.30 Farklı eritken bileşimleri ile çekme dayanıcı ilişkisi.

Şekil 4.30'daki farklı eritken bileşimlerine göre çekme dayanıcının değişimi grafiğinden de görüldüğü üzere aslında alaşımın içerisine ilave edilen eritkenlerin karakteristik çekme mukavemeti değerlerini çok da etkilemediği görülmektedir. Sadece dikkat edilmesi gereken standart sapma değerleridir. Bu grafikten en iyi eritkenin literatürün de önerdiği NaF/AlF_3 (KM) = 3 olduğu ve Na_2SiF_6 ($MgCl_2-KCl$) karışımları olduğu görülmektedir. Burada dikkat edilecek bir diğer husus ise Na_2SiF_6 'dır. $NaCl-KCl$ ile $MgCl_2-KCl$ içerisindeki davranışları tamamen farklıdır.



Şekil 4.31 Farklı eritken bileşimleri ile kopma uzaması ilişkisi.



Şekil 4.32 Farklı eritken bileşimleri ile tokluk ilişkisi.

Şekil 4.31’de ise farklı eritkenlere bağlı kopma uzaması değerleri mevcuttur. Görüldüğü gibi kopma uzaması değerleri oldukça saçılımlı gibi görünmesine rağmen genel itibariyle %5 civarında bir ortalamaya sahiptirler. Burada da standart sapma değerleri dikkate alınır ise Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) karışımları önplana çıkmaktadır.

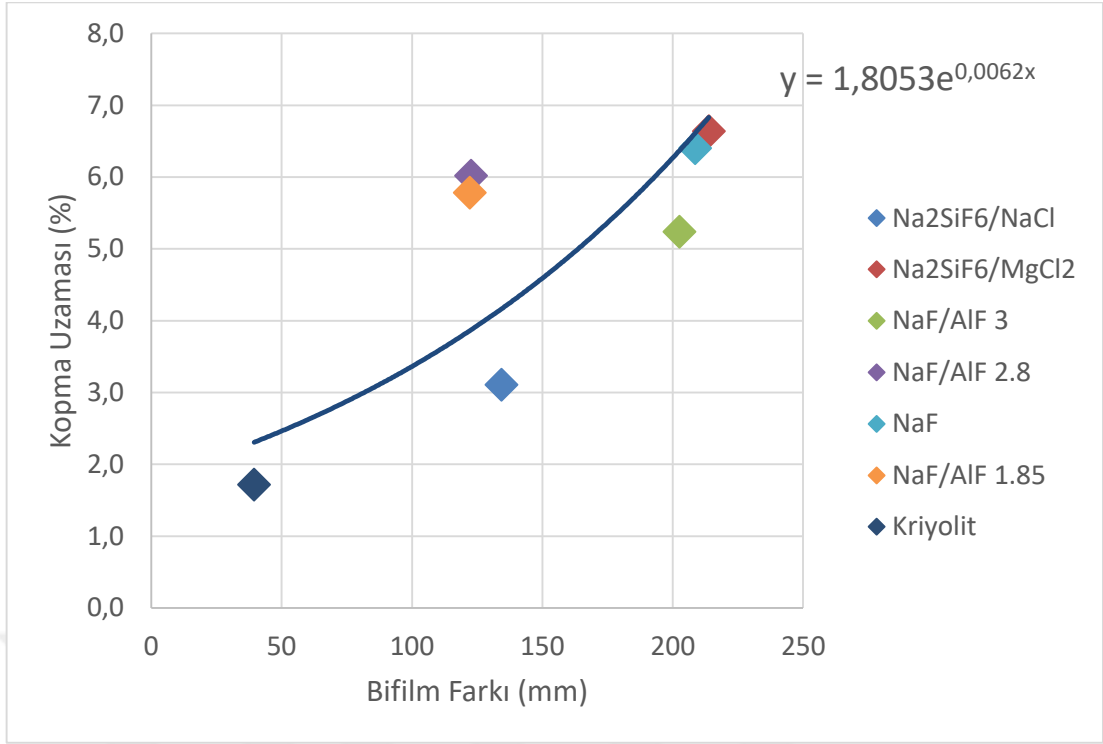
Şekil 4.32’de yine farklı eritken karışımlarının tokluk değerleri üzerine etkilerini gösteren bir grafik vardır. Burada NaF/AlF_3 (KM) = 1,85 eritken karışımları 890 mJ civarında bir değer ile en yüksek tokluk değerini veriyor gibi görülmekte aslında 870 mJ civarındaki Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) karışımlarının yine standart sapmasının en düşük olması bu karışımlara artı değer katmaktadır.

Şekil 4.33, 4.34 ve 4.35’de Bİ yerine $\Delta\text{Bİ}$ kullanılmıştır. Çünkü şimdiye kadar her bir eritkenin mekanik özellikler üzerine olan etkileri incelenmiştir. Şimdiden sonra Bİ de değerlendirmelere dâhil edilecektir. Bilindiği üzere Bİ değerleri sadece bir koşul (örn. GGÖ, vs.) için bir değer okumamıza yardımcı olmakta iken $\Delta\text{Bİ}$ değerleri iki koşul (örn. GGÖ ve GGS, vs.) durumunun değerlendirilmesini incelememize yardımcı olmasından dolayı kullanılacaktır.

Şekil 4.33’de görüldüğü gibi GGÖ ve GGS hesaplanan $\Delta\text{Bİ}$ ile kopma uzaması arasında üstel bir ilişki mevcuttur. Artan $\Delta\text{Bİ}$ ile kopma uzaması artmaktadır. Yani sıvı metal kalitesi iyileştirilebilir ise kopma uzamasında da iyileşme elde edilecektir. En yüksek $\Delta\text{Bİ}$ ve en yüksek uzama değerinin ölçüldüğü Na_2SiF_6 (MgCl_2 -KCl) eritkenleri de bu bulguya kanıt olarak gösterilebilir. Benzer şekilde en düşük $\Delta\text{Bİ}$ ve en düşük kopma uzaması değerinin gözlemlendiği ticari kriyolit karışımları da giderilemeyen çift katlı oksitlerin mekanik özellikler üzerinde ne denli zararlı bir etkiye sahip olduğunun diğer bir kanıtıdır. $\Delta\text{Bİ}$ ne kadar düşük ise aslında eritkenin katışkı temizleme verimliliğinin de o denli düşük olduğu anlaşılmaktadır. Buradan yola çıkılarak en verimsiz katışkı temizleme oranı ticari kriyolittedir.

Şekil 4.33’de verilen verilere göre en uyumlu ilişkiyi veren eğrinin denklemi aşağıdaki Eşitlik 4.3 gibidir.

$$y = 1,8053e^{0,0062x} \quad (4.3)$$

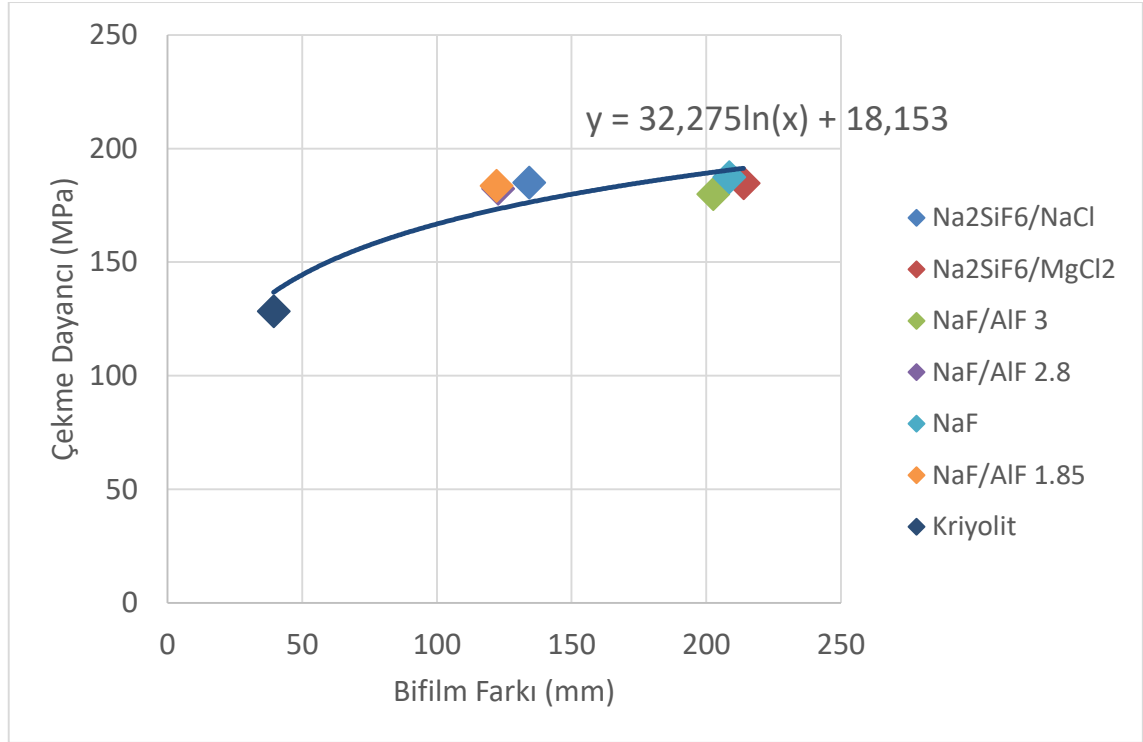


Şekil 4.33 Farklı eritkene göre GGÖ ve GGS Bifilm İndeks değişimi ile kopma uzaması arasındaki ilişki.

Bu denkleme göre y kopma uzamasını verir iken x ise ΔB_i 'dir. Bu doğrultuda B_i 'deki değişim 0 ($\Delta B_i = 0$) olacak olur ise diğer bir deyişle sıvı metal kalitesinde herhangi bir değişiklik olmadan çekme numunesi üretilmesi durumunda elde edilebilecek asgari kopma uzaması değeri %1,80 olacaktır. Bu da malzemenin karakteristik olarak en kötü şartlarda sahip olduğu uzama değerine takabül etmektedir. Yani içerdiği hata oranına göre malzeme her ne olursa olsun bir uzama gösterecektir.

Sonuç olarak %0 uzama veya gevrek bir davranış altında hiç uzama göstermeden kopma değeri vermeyecektir. Bu konuda Tiryakioğlu [207], [208] literatürden topladığı 49 ayrı referans ile $Al_7Si_{10}Mg_3$ (A356) alaşımının kalite indeksini tespit ettiği çalışmasında gösterdiği en küçük değer %1,5 olarak verilmiştir. Benzer şekilde Caceres [61], [209], [210], [211] yaptığı çalışmalarda çekme numunesinin kesit alanında var olabilecek hataların özellikle de gözeneklerin alansal oranına göre kopma uzamasındaki düşüş değerini verdiği grafiklerde %15'e kadar hacimsel hata oranında kopma uzamasının %1'lere kadar düştüğünü göstermiştir. Tiryakioğlu ve Caceres gibi araştırmacıların çalışmalarındaki değerler ile bu tezdeki verilere oldukça büyük yakınlık göstermektedir.

Eşitlik 4.3'e göre kopma uzamasının %100 olması için gerekli olan $\Delta B\dot{I}$ değerinin 648 mm olduğu tespit edilmiştir. Tabii ki bu değer sadece süper plastik malzemelerde elde edilebilen bir değerdir.



Şekil 4.34 Farklı eritkene göre GGÖ ve GGS Bifilm İndeks değişimi ile çekme dayancı arasındaki ilişki.

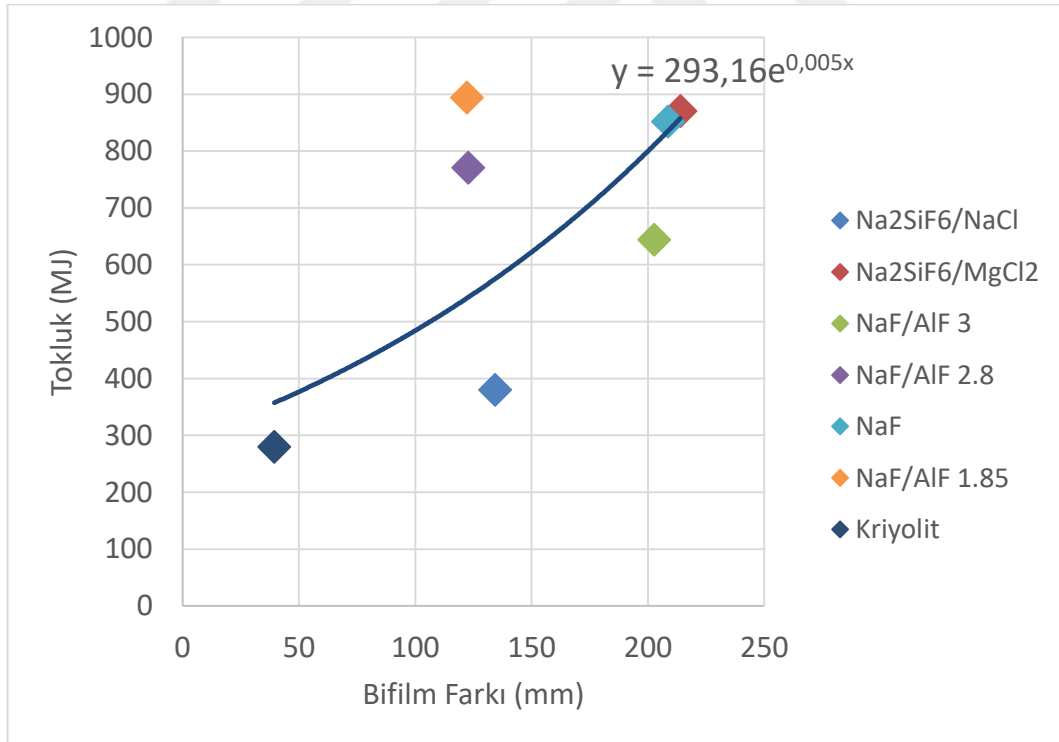
Şekil 4.34'de verilen grafikte çizilecek olan en uygun eğim denklemi aşağıda verilmiştir.

$$y = 32,275 \ln(x) + 18,153 \quad (4.4)$$

Bu denklemde $\Delta B\dot{I}_{\text{azami}} = 648$ mm değeri koyulduğunda en yüksek elde edilebilecek çekme dayancı değerinin 228 MPa olduğu bulunur. Dolayısıyla bu tez çalışmasındaki şartlar altında A356 alaşımının sahip olabileceği en yüksek değer de bu değer olduğu anlaşılmaktadır. Zaten elde edilen verilerden hiçbirisinde 220 MPa'ın üzerinde bir değer bulunmamıştır. Bu yüzden ikincil alaşımın en iyi şartlar altında dahi "döküm haliyle (as-cast/as-received)" sahip olabileceği karakteristik değer 228 MPa olacaktır.

Şekil 4.34'nin grafiğindeki verilerin eğiliminden de görülebileceği gibi Eşitlik 4.3'nin üstel olması makuldür. Çünkü $B\dot{I} = 0$ olsa dahi 1000 MPa gibi bir değer asla elde edilemez. Bu yüzden de Bifilm İndeksi – Çekme Mukavemeti arasındaki ilişki asla lineer olamayacaktır.

Şekil 4.35’de Bİ farkı ile tokluk arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 4.33 ile 4.34 arasındaki en temel fark kopma uzamasının üstel ilişki gösterip, çekme dayanımının ise logaritmik olmasıdır. Bu grafiklerin Şekil 4.35’de verilen tokluk değerleri ile kıyaslamasına dikkat edilecek olunur ise tokluk – Bİ farkı ilişkisi de kopma uzamasına benzer şekilde üstel olmasıdır. Geleneksel olarak malzeme seçimi ve tasarım parametresi olarak daima çekme mukavemeti esas alınmaktadır. Çekme dayanımının seçim kriterleri açısından değerlendirilemeyeceği zaten Şekil 4.30’dan da rahatlıkla anlaşılabilir. Hemen hemen tüm deney parametresinde çekme mukavemeti 180 MPa civarında olup standart sapmaları da birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Hâlbuki malzemelerin içerebileceği hataya göre mekanik yük altındaki davranışları direkt olarak kopma uzama değerlerinde daha açıkça ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla tokluk değerlerindeki değişimin kökeni aslında kopma uzamasındaki değişimdir. Elbetteki çekme dayanımının düşük ya da yüksek değerlerinin tokluk değerlerine etkisi mevcuttur. Ancak asıl etkinin kopma uzamasına sahip olduğu her iki grafiğin de üstel olmasından ve birbirine benzer eğilimde olmasından da anlaşılabilir.



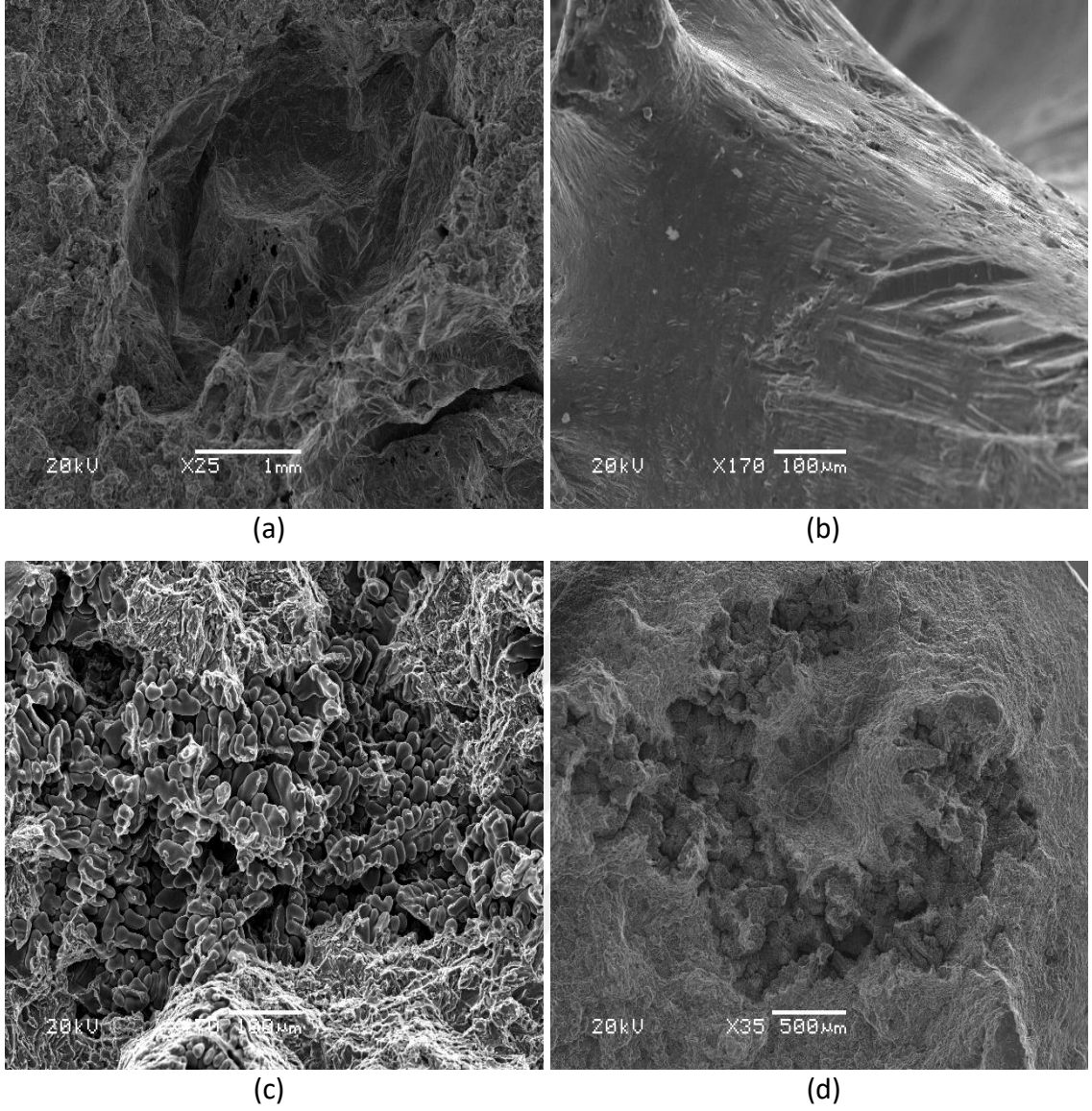
Şekil 4.35 Farklı eritkene göre GGÖ ve GGS Bifilm İndeks değişimi ile tokluk arasındaki ilişki.

malzemede ise bu çalışmada da bulunduğu gibi en yüksek tokluk değeri 900 mJ (0,9 J) olacaktır.

Bu çalışmada da gösterildiği gibi aslında açıkça malzeme seçimi ve tasarımında çekme dayanımının bir ölçüt olarak kullanılmaması gerektiğinin göstergesidir. Çünkü unutmamak gerekir ki; herhangi bir malzemenin akma ve çekme mukavemeti o malzemenin karakteristik özelliklerindedir ve teorik olarak temel/büyük bir hata olmadığı sürece bu değerler değişmez. Malzemenin kesit alanında herhangi bir hata bulunuyor ise bu hata en fazla % kopma uzaması değerini azaltacaktır. Çünkü hatanın dışında kalan kesit alanı yine karakteristik akma ve çekme mukavemetini taşıyabilecek dayanım değerlerindedir. İşte bu yüzden döküm hataları en kritik anlamda malzemenin tokluğu ilişkilendirilmelidir.

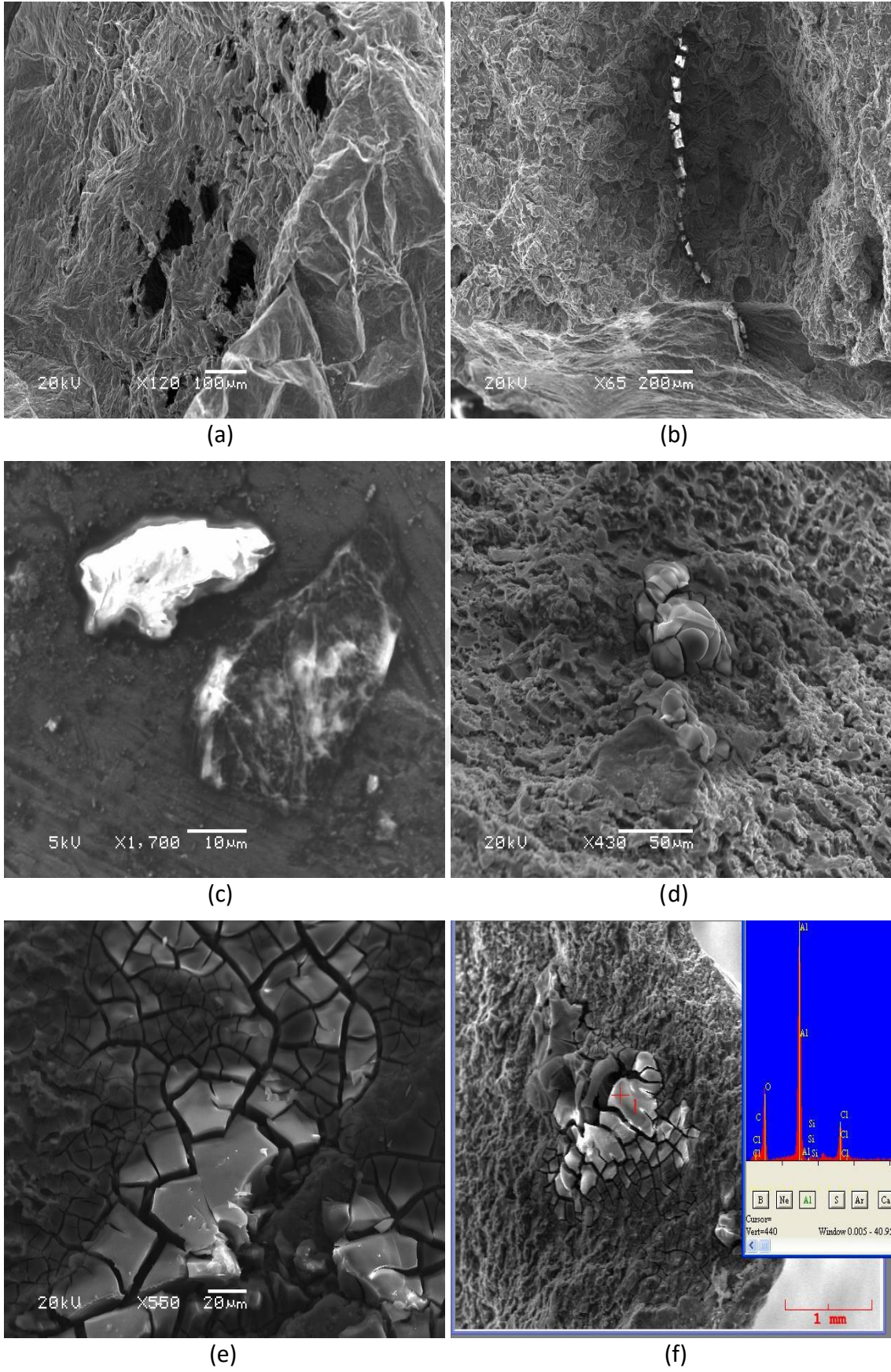
Şekil 4.34'de $B\dot{I} = 140 - 150$ mm aralığında üç farklı tokluk değerinin olması Campbell [2], [25], [212]'in tespitlerine benzerlik göstererek bu savın doğruluğunu kanıtlamaktadır. 400, 800 ve 900 mJ olan bu değerlerin hemen hemen aynı $\Delta B\dot{I}$ değişkenlik göstermesi bifilmli yapı içerisinde hapsolüp katılaşma sırasında çekme eksenine göre hangi oryantasyonda olduğu ilişkilidir. Örneğin bifilm boyutu 1 mm olan iki adet çekme çubuğu ele alındığında bir tanesinde bifilmli çekme eksenine paralel diğerinin de dikey olarak konumlandığını varsayacak olursak yatay konumdaki bifilmli çekme eksenine göre malzemenin efektif kesit alanını daraltacaktır (Şekil 4.36). Dolayısıyla bu malzemenin daha erken kopması kaçınılmaz olacaktır. Bu yüzden de aynı bifilmli içeriğinde farklı değerler elde edilebilir. Dışınar [1] da doktora çalışmasında 5 farklı alaşımla farklı döküm şartlarında yaptığı denemelerde bu tezdeki çalışmalara benzer ilişkiyi sürekli olarak gözlemlemiştir. Bu çalışmada da düşük $B\dot{I}$ farkı olduğunda kesinlikle kötü sonuç elde edildiği tıpkı Dışınar [1], [35], [63] gibi gözlemlenmiştir.

Şekil 4.37'de çekme numunelerinin kırık yüzeyinde yapılan SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler genel olarak en çok rastlananlardan bir özet şeklinde temsili olarak verilmiştir. Şekil 4.37 (a) ve (b)'de eski oksit yapısı karakteristik kalınlaşmış rijit yapısı ile gözüktür iken Şekil 4.37 (c) ve (d)'de ise yeni oksitlerin oluşturduğu Şekil 2.12'de şematik olarak verildiği gibi dendritler arasında kalarak gözeneği oluşturan bifilmli yapı genel yapısı görülmektedir.



Şekil 4.37 Çekme testi numunelerinin kırık yüzeyindeki SEM görüntüleri.

Şekil 2.31’de eritken varlığında oksitlerin parçalanarak gaz giderme + eritkenleme işlemi ile nasıl temizlendiği şematik olarak verilmiştir. Bu şematik yaklaşımın gerçek SEM görüntüleri de Şekil 4.38’de verilmiştir. Şekil 4.38 (a)’daki resimde sağ aşağıda gözükən eski oksidin sol üst tarafa doğru geçildikçe eritken etkisi ile nasıl parçalandığı açıkça görülmektedir. Bunun dışında (b)’den (e)’ye kadar parça parça oksit yapıları kimi zaman sıra sıra kimi zaman öbek öbek görülmektedir. (f)’de ise bu parçalanmış oksit yapılarının bir tanesinden yapılan SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir ve burada oksit pikinin yanı sıra Cl piki de net bir şekilde görülmektedir. Bu görüntüler tipik olarak birçok deney numunesinde gözlemlenmiştir. Burada sadece tekrardan kaçınmak amacıyla temsili örnekler kullanılmıştır.



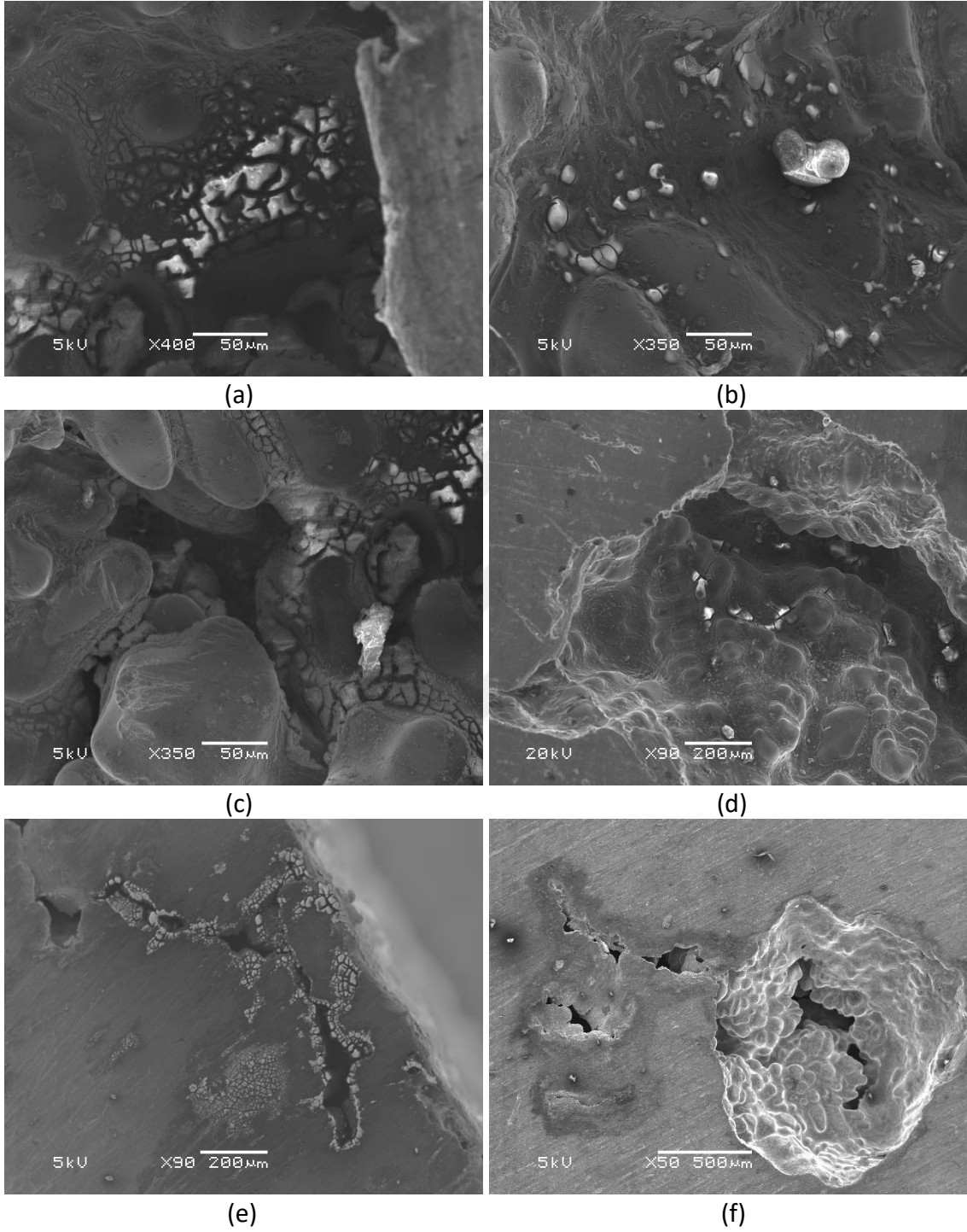
Şekil 4.38 Çekme testi numunelerinin kırık yüzeyindeki eritken/oksitin SEM görüntüleri.

Şekil 4.39'da tıpkı çekme numunelerinin kırık yüzeylerindeki analizlere benzer şekilde VAK numunelerinde de parçalanmış oksitler gözenekler içerisinde sıklıkla gözlemlenmiştir. Düşük büyütmelelerde sürünge derisini andıran bu yapılar yüksek büyütmelelerde ise kurak bir toprak yapısına benzer şekildedir. Özellikle Şekil 4.39(e) ve (f) burgaçlı döküm sonucu oluşmuş karmaşık geometrideki oksit yapısının sınırları civarında bu parçalanmanın oksit etrafında nasıl olduğunu açıkça göstermektedir. Hatta Şekil 2.32'deki şematik yaklaşım gözönünde bulundurulacak olunur ise gözenegin neresinden kesit alındığına bağlı olarak kimi yerde sadece ince çatlak benzeri görüntü varken kimi yerde gözenegin geri kalan büyük kısmı da Şekil 4.39(e) ve (f)'de açıkça görülmektedir. Bu durumda zaten katılma sırasındaki çekintinin yarattığı negatif basınç yüzünden açılan bifilmelerin gözenekleri oluşturduğunun göstergesidir. Tüm bunlar ve buraya kadar açıklanan SEM görüntülerindeki bu hatalar çekme testi sırasında malzemenin kopma uzamasını etkileyen en temel parametrelerdir. Dolayısıyla B1'deki düşüş arttığı sürece bu SEM görüntülerindeki hatalar azaldığı gibi hatta birçoğunda rastlanmamıştır. İncelenen bu numuneler zaten en yüksek kopma uzaması veren numunelerdir.

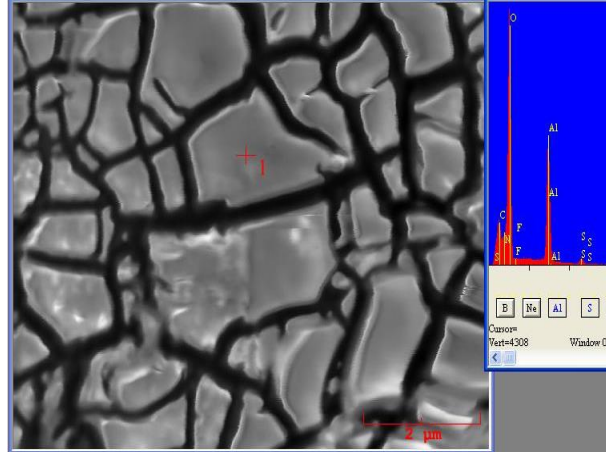
Şekil 4.39'da ayrıca (d) ve (f)'de görüldüğü gibi oksit filmleri ya da metalik olmayan katışkıların içlerine doğru dendrit oluşumları görülmektedir. Bu da aslında birçok araştırmacı [2], [84], [213], [214] tarafından da desteklenen heterojen çekirdeklenme mekanizması düşüncesinin gerçekten de bifilm tarafından tetiklenen birincil Al dendritlerinin oluşumunu açıklayabilmektedir.

Yine benzer şekilde Şekil 4.39 (g) için kurak toprak görüntüsüne sahip parçalanmış oksit filmi için de EDS sonuçlarındaki Cl ve F pikleri Gruzleski [16] tarafından şematik olarak açıklandığı gibi oksit filminin sarılarak parçalanması görülmektedir. Bu durum bir anlık kırık yüzeydeki SEM görüntülerine (Şekil 4.38(e)) benzetilebilir. Sanki bir çeki gerilmelerinin uyguladığı etkiden kaynaklı oksit/eritken oluşumunun parçalanması düşünülebilir. Lakin buradaki görüntüler VAK numunelerinin görüntüleridir ve atmosfer basıncı kadar ters basınç uygulanmaktadır. Bifilm atmosfer açık ortamlardaki katılmalarda kırılma, çatlama gibi karakterde yapı göstermezler [25]. Yani bu kurumuş toprak görüntüsünün kimyasal bir işlemde mütevellit olduğu fiziksel bir

etkiden kaynaklanmadığı Campbell [2], [25], [212] tarafından da bildirilmiştir. Okuyucu daha fazla bilgi için [212] nolu kaynağı inceleyebilir.



Şekil 4.39 VAK numunelerinin gözenek içerisindeki eritken/oksit görüntüleri.



(g)

Şekil 4.39 VAK numunelerinin gözenek içerisindeki eritken/oksit görüntüleri (devamı).

Genel olarak ifade etmek gerekir ise tasarlanan bileşimlerdeki sıvı eritkenlerin yoğunluğu $1,5 \text{ gr/cm}^3$ civarında ve ergime sıcaklıkları da aşağı yukarı $620 \text{ }^\circ\text{C}$ olduğundan banyo tabanına beslenen eritkenler eriyerek sıvı hale geçer mekanik karıştırmanın yardımıyla oksit parçacıkları ve yüzey filmleri ile karşılaştığında onları ıslatarak sarar ya eriyik bir faz oluşur ya da kısmen ergimiş bir faz oluşturarak yüzeye çıkarır. KCl-MgCl_2 matrisli flaksların ergime çok daha düşüktür. Ancak çarpışma teorisinde de olduğu gibi her türlü olasılığa açık olabilen eriyik işlemleri içerisinde bilmeyerek çift katlı oksit filmlerinin sıvı içerisine hapsedilmesine bağlı olarak SEM görüntülerinde gözlemlenen yapılar ile karşılaşmak da oldukça olasıdır.

GENEL SONUÇLAR

Deneysel sonuçlardan çıkarılabilecek genel sonuçlar veya eğilimler aşağıda açıklanmıştır.

Eğer ergiyik içerisinde düşük gaz içeriği var ise bifilmli açılmaz dolayısıyla çatlak benzeri kılcal hatalar şeklinde görülebilirler. Hidrojenin yapı içerisinde bifilm yok ise çökeliş gözenekli oluşturamayacağından dolayı aslında bir kusur olarak addedilememektedir. Gaz kusurları yapıdaki katışıklar ile iniltidir, bu sebeple doğrudan döküm kusurlarını teşkil edemezler.

Eğer sıvı metal içerisindeki gaz miktarı denetimsiz bir şekilde artar ise VAK testi numunelerinde vakum basıncı değiştirilmeksizin gözeneklerin gittikçe hacmini arttırarak mercek ya da göze benzer şekli aldığı ve eğer katılma süresini arttırılmasına imkân verilir ise bu gözvari ya da mercekvari yapıların gittikçe hidrojen gözenekli diye ithaf edilen yapıya kavuşmaları sağlanır. Yani VAK testindeki numunelerde gözenekler çok açılmış ise bu yüksek hidrojen göstergesi olarak kabul edilir. Yazar burada dikkat edilmesi gereken önemli noktaya tekrar vurgu yapılması gerekliliğine inanmakta olduğundan şu detayı tekrarlamakta fayda görmektedir; yapı içerisinde eğer katışkı (ör. bifilm/çift katlı oksit filmi) var ise ancak böylesi bir durumun gözlemlenebilir.

Talaşlar bilindiği üzere ağırlığına göre yüksek yüzey alanına sahip olmalarından ve görece ince bir et kalınlığına sahip olmalarından dolayı yeniden ergitilmelerinde her daim sıkıntılar meydana gelmektedir. Düşük hacim/yüksek yüzey alanı yani düşük modül değerinden dolayı aslında talaşların baskılanarak yığın(etli) hale getirilmesi ergitme kayıplarını azaltmak için akılcı bir çözüm olabilmektedir. Lakin talaşlı işlemlerden gelen takım ucu yağlayıcısının talaşın yüzeylerine yapışması talaşların ön-işlemlere tabi

tutulmadan kullanılmalarının önündeki en büyük engeldir. Dolayısıyla mutlaka talaşlara ön-işlemler uygulandıktan sonra baskılanarak yığın hale getirilmelidir.

Eritken seçiminde hem maliyet hem de etkinlik kabiliyeti göz önüne alınmıştır. Kullanılan NaCl ile maliyet düşerken KCl viskoziteyi ve yüzey gerilimini düşürür. İkisi bir arada kullanıldığında ise 665°C'de ötektik oluşturarak malzemenin dökülebilme kabiliyetini arttırmaları. Bunlara ek olarak Na₃AlF₆ oksitleri çözerek metali katışkılardan temizleme kabiliyetinin olduğuna inanılması sebebiyle kullanılmıştır. 7 farklı türdeki eritken bileşimi farklı oranlarda karışımlar oluşturacak şekilde hazırlanmıştır. Sonuç olarak kriyolit modülü 3 olan NaF/AlF₃'de GGÖ ve GGS'deki Bİ farkı en yüksek gibi gözükse de toplamda en çok bifilmi temizleyen karışım MgCl₂-KCl esaslı Na₂SiF₆'tür. Bu bileşime ait dökümlerde mekanik test sonuçları da birbirine yakın istikrarlı değerler vermektedir. Diğer eritkenlerin kullanıldığı dökümlerde ise verilerin daha dağınık ve saçılımlı olarak farklı karakteristik sonuçlar vermişlerdir.

Kriyolit, cevherden yani birincil alüminyumun üretim metalürjisinden de bilindiği üzere oldukça iyi bir alüminyum oksit çözücüsüdür. Bu özelliğinin yanısıra olası katışkılar soğurma yeteneğine de sahiptir. Kriyolitin bu özellikleri sayesinde sıvı metal temizliğine önemli katkıları bulunabilmektedir. Bu nedenle çoğu eritken bileşiminde kriyolit belirli oranlarda bulunmaktadır. Fakat tek başına kullanıldığında en dağınık Weibull mekanik test sonuçları ve en düşük mekanik test değerleri bu eritkende elde edilmiştir. Kriyolit modülü üç olan ticari kriyolitin artan oranlarda NaCl-KCl karışımına eklenmesi ile ergiyik içerisindeki katışkılarını gidermesi literatüre dayanarak öngörülebilmektedir. Lakin yapılan deneylerden de görüldüğü gibi kriyolit oranının artması ile katışkı miktarının azalması arasında doğrusal bir bağlantı bulunmamaktadır.

Ticari kriyolit ile NaF/AlF₃'den hazırlanmış eritkenleri de kendi içerisinde karşılaştırıldığında ticari kriyolitin tek bir bileşik ve onun etkinliğine bırakılmış bir tepkime durumu söz konusu iken NaF/AlF₃'den hazırlanmış eritken de her iki bileşiğin de karışımın tamamını teşkil etmesi açısından ticari kriyolite eşdeğer oranlarda karışımın içerisinde bulunmasına rağmen NaF ve AlF₃'ün serbest halde iki bileşik olmasından dolayı olası bifilmler ile karşılaşma ihtimallerinin yüksek olmaktadır. AlF₃ ile ticari kriyolite göre tepkinirlik düzeyi açısından NaF'ın daha yüksek olmasından dolayı bir miktar daha fazla temizlik ve nispeten daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmıştır.

Farklı oranlarda eklenen NaF/AlF₃ eritkenlerinden beklenen yüksek oranda alümina çözücüsü ihtiva eden eritken karışımların verimlilik açısından daha iyi olmasıdır. Bu olguyu kanıtlayan ve destekleyen deneysel bulgular %30'luk NaF/AlF₃ eritkeni ile işlem yapılan sıvı metalden elde edilen Bİ ve çekme dayancı değerleri ile ortaya koyulmaktadır. Ancak inklüzyonlar mikron mertebesinde mm mertebesinde olma ihtimalleri dahi olsa bile inklüzyonların genellikle ortalama boyutlarının (1—5) µm civarında [25], [35] olma ihtimalleri gözönüne alındığında eritkenlerin her seferinde inklüzyonlarla karşılaşmama/ buluşmama tam olarak verimli çalışması beklenilemeyebilir.

Bu deneysel kurgu içerisinde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise eritkenin tam olarak sıvı metal içerisine denetimli bir şekilde gönderilebilmesidir. Döner gaz giderme sistemindeki gibi eğer oluşturulan girdap içerisine eritkenin doğru bir şekilde girmesi sağlanamaz ise askıda kalan katışkılar ile eritkenlerin buluşma ihtimali de düşmüş olmaktadır. Bu ihtimalin arttırılması küçük tane boyutlu eritkenler ile çalışılması ile sağlanır.

Genel olarak literatür ve uygulamalardan Na₂SiF₆'nın da iyi bir katışkı çözücü olduğu bilinmektedir. Lakin çekme dayancı diyagramlarından da anlaşılacağı üzere artan Na₂SiF₆ miktarı ile mutlaka mekanik özellikler artacak diye bir genel kaide yoktur. Bununla birlikte Na₂SiF₆ bileşiğinin kullanıldığı iki farklı NaCl—KCl ve MgCl₂—KCl esaslı eritkenlerdeki deneylerin bulguları böylesi bir olasılığın varlığını desteklemektedir.

Deneylerdeki uygulamalara dayanarak alkali klorürler NaCl, KCl ve MgCl₂ bileşiklerine ilaveten literatürden CaCl₂'in de temizleme flakslarının ana bileşenleri olarak kullanılabileceği önerilmektedir.

Vurgulanması gereken bir diğer detay NaCl—KCl gibi nispeten yüksek ergime sıcaklığına yani sıvı metalin ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklara sahip eritkenlerde yüksek miktarlarda ilave edildiğinde ancak yüksek verim elde edilir iken KCl—MgCl₂ gibi daha düşük ergime noktasına sahip eritkenler kullanıldığında yüksek miktarda eritken kullanıma gerek kalmayabilir. Dolayısıyla aslında işin püf noktası eritkenin çok düşük sıvılaştırma sıcaklığına sahip bileşimde tasarlamak ve tatbik etmektir.

Eritkenin ilave edilmiş şeklinin bile katışkı giderme verimi üzerine büyük etkisi vardır. Bu çalışmada yayınlanmamış fakat yazarın şahsi tecrübe ve uygulamalarından da bildiği

üzere tablet, üfleç (lance), döner gaz giderme, vs. gibi yöntemlerin de birbirleri arasında olumlu ve olumsuz etkileri mevcuttur. Eritkenleme yani flakslama prosesi başlı başına uzmanlık gerektiren oldukça dikkatli uygulanması gereken bir prosestir. Çünkü örneğin üfleç ile yapılan gaz gidermelerde dipten yapılan kontrolsüz tepkimez gaz üflenmesi ile metalin fokurdamasına sebebiyet verilebilir. Bu fokurdama ile oluşan boyları birkaç cm mertebesinde değişebilen büyük kabarcıklar kolayca yüzeye çıkarlar. Ayrıca oluşan kabarcıkların boyutsal olarak büyük olmalarından dolayı düşük yoğunluğa sahip olacaklarından ve proses süresince alttan sürekli üflenmiş tepkimez gazdan dolayı kabarcıkların yükselmesi teşvik edilir. Böylesi bir durumda yüzeye çıkan oldukça büyük çaptaki kabarcıklar yüzeydeki ileriki oksitlenmelere ve nispeten hidrojen kapılmasına karşı koruyan sürekli yüzey oksit filmi parçalayarak tekrar metale girmesini sağlayabilir ya da yüzeyde yeni yüzeyler oluşturarak yüzey filminin kalınlaşmasını sağlayabilir ya da yeni yüzeyin oksitlenmesi sırasında sıvı metalin hidrojen kapma olasılığını arttırır. Ayrıca bunun gibi denetimsiz sıvı metal işlemleri ile yüzeydeki bu oksit filmi ergiyik banyo içerisine girebilir ve maalesef bu şekilde sıvı metalin kirlenmesine neden olabilir. Bunun yanı sıra oluşan kabarcığın boyutu ve yükseldiği mesafe boyunca sıvının kesit alanındaki dağılımı en büyük önemi arz etmektedir. Çünkü sıvı metal temizliği anlamında bir tane büyük yükselen kabarcık ile aynı alandan yükselen küçük milyonlarca kabarcık arasında mekanizmasal farklılık vardır. Büyük kabarcığa denk gelen bifilm tıpkı bir balonun yüzeyine denk gelen bir "tüy" gibi etrafından dönerek altta kalabilme ihtimaline sahiptir. Lakin bu farklı boyutlarda bir sürü kabarcık olsaydı bunlar tüyü alıp yukarı taşıyabilirdi. Bu örneklemeden de anlaşılacağı gibi eritkenler kabarcık boyutundan bağımsız bütün "tüylere" yapışıp yukarı çıkartıp temizlemesi gerekmektedir. Bu yapılan çalışmada teknik olarak bu etkinin gözlemlenmesi hedefleniyordu. Fakat her bir farklı eritken bileşiminde sürekli karmaşık sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla teori ile pratik arasındaki boşluk tekrar ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak bu durum bu konunun mekanizmasının halen ne kadar karmaşık olduğunun bir ifadesidir.

Proses içerisindeki bütün bu karmaşıklıklarla birlikte operatörler/uzman kişiler/ustaların sıkı denetimi altında sıvı metal proses edilmesi, aktarılması veya döküm yapıldığı halde çok iyi hazırlandığı düşünülen ergiyik sürekli sorunlu parça üretimine dolayısıyla da artan fire oranlarına neden olacaktır.

Diğer bir taraftan gaz giderme sonrası aynı bifilm indeksi değerine sahip olduğu halde numunelerdeki dayanım farklılıkları olabilmektedir. Bunun da sebebi olası bifilmelerin konumlarıdır. Bifilmeler uygulanan kuvvetlere dik, yatay veya çapraz olarak konumlanmış olması bile mekanik özellikler üzerinde ciddi etkilere sahiptirler. Kırılma yüzeylerinin incelenmesi bu farklılık hakkında detaylı bilgi verebilmektedir.

Yüksek oranda eritken ilave edildiğinde illa ki yüksek oranda Bİ azalacak diye kesin bir kural yoktur. Çünkü bu çalışmada da kabaca ergiyik ağırlığının %2'si kadar ilave edilen eritkenler birkaç mikronluk katışkılar ile ergiyik içerisinde rastlantısal bir şekilde karşılaşarak onları parçalayarak çözülmesine neden olması gerekmektedir. Böylesi bir durumun olasılıksal olarak değerlendirilmesi bile ciddi bir ihtisas alanıdır ve yapılacak olan modellemenin sıvı metalin karakteristiğini tam olarak yansıtamayabileceği de iyi bilinmelidir.

Her ne kadar da temiz bir ergiyik metal hazırlanmış olsa dahi döküm sırasında yanlış metal transferi, yüksek döküm hızı, yanlış yolluk tasarımı, yanlış kalıplama, vs. gibi unsurlar neticesinde meydana gelebilen burğaçtan dolayı yeni oksit filmlerinin oluşumu ile döküm parçasının mekanik özellikleri düşebilmektedir.

VAK numunesinin yüzeyindeki bifilm uzunluğunun incelenmesi ile tespit edilen Bİ, ucuzluğu ve kolay uygulanabilirliği hasebiyle en çok gelecek vaad eden teknik olarak görülmektedir. 100 milibar basınç altında katılaştıran numunelerde en güvenilir sonuçları vermektedir. Ayrıca bifilm sayısı ve Bİ'nin birlikte görüntülenebilmesi kalite değerlendirmeleri için en önemli, en pratik, en kolay parametre olabileceği ispatlanmıştır.

Bu çalışmada da literatüre ilk defa potansiyel kalite farkı (GGÖ ile GGS arasındaki Bİ farkı) ve bunun döküm kalitesi ile mekanik özelliklerine etkisi incelenip önerilmiştir. En yüksek bifilm giderme oranı 214 mm ile Na_2SiF_6 ($\text{MgCl}_2\text{-KCl}$) eritkenlerindedir. Bu eritkeni takip sırası ise şöyledir; 209 mm – NaF, 203 mm – NaF/ $\text{AlF}_3 = 3$, 139 mm – Na_2SiF_6 , 122 mm – NaF/ $\text{AlF}_3 = 2.7$, 121 mm – NaF/ $\text{AlF}_3 = 1.85$ ve 39 mm ile en kötü temizleyici de ticari kriyolittir.

% çekinti – Bİ ilişkisine bakıldığında GGÖ tüm deneyler için ortalama Bİ = 303 mm iken GGS'de Bİ değerlerinde neredeyse %50 azalarak ortalama Bİ = 153 mm olarak

ölçülmüştür. İnce kesitli numunelerde GGÖ'de %3,6 olarak tespit edilir iken GGS'de çekinti miktarı %5,3'e yükselmiştir. Benzer şekilde kalın kesitli numuneler için GGÖ'de yine tüm deneylerin tamamının ortalaması olarak çekinti miktarı %3 olarak ölçülür iken GGS'deki çekinti miktarı %4'e yükselmiştir. Sonuç olarak Şekil 4.13 ve 4.14 incelendiğinde ince kesitli parçaların kalın kesitlilere göre daha fazla çekintiye uğranması beklenen bir durumdu ve bu durum gözlemlenmiştir. Şekil 4.14'deki veriler incelendiğinde ince kesitlilerin kalın kesitlilere göre daha yüksek çekinti elde edilmesi beklenen bir durumdur. Zira ince kesitli parçaların dökümünde elde edilen % çekintilerin ortalaması kalın kesitlilerinkinden %0,5 civarında daha fazladır.

Şekil 4.33 – 4.35'deki Bİ farkının mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bu grafiklerden Bİ farkının artması ile yani sıvı metal temizliğinin artması ile mekanik özelliklerin iyileştiği görülmektedir. Lakin burada önemle dikkat edilecek bir husus şudur; örneğin GGÖ'de Bİ = 600 mm olan numune ile Bİ = 200 mm olan numunelerin her ikisi için de 150 mm'lik bir Bİ farkı yani bu mertebede bir sıvı metal temizliği sağlandığı düşünülür ise son durumda GGS'de Bİ = 450 mm ve Bİ = 50 mm olacaktır. Buradaki sıvı metal kalitesindeki iyileşmenin yani Bİ farkının ilk duruma doğrudan bağlı olduğuna dikkat edilmelidir.

Tüm verilerden türetilen Bİ değişimi ve mekanik özellikler arası ilişkiye bağlı olarak deneysel formül türetilmiştir. Kopma uzaması için bu formül:

$\%e = 1,8053 e^{0,0062(\Delta B_i)}$ iken çekme mukavemeti için;

$\sigma = 32,27 \ln(\Delta B_i) + 18,15'$ dir. Bu şartlar altında talaştan üretilen ikincil A356 alaşımının asgari karakteristik kopma uzaması %1,8 iken karakteristik azami çekme mukavemeti 228 MPa'dır.

Tokluk değeri ise;

$\kappa = 293,16 e^{0,005 (\Delta B_i)}$ ve maksimum tokluk değeri 900 mJ olarak bulunmuştur. Bu değer döküm haliyle ısı işlemsiz elde edilebilecek en yüksek değerdir. Döküm yöntemi, yapısal değişiklikler, ısı işlem ve NTE ilaveleri gibi özel yöntemler ve prosesler uygulandığında alaşımın potansiyel darbe enerjisi olan 25000 mJ'e ulaşılabilir [215].

Weibull modüllerine bakılarak en iyi eritken seçimi konusunda çekme dayancı ve kopma uzaması dikkate alındığında kendi içerisinde çekme dayancında ve kopma uzamasında

en istikrarlı ticari kriyolit için %25, Na_2SiF_6 (NaCl-KCl) için %25–40, $\text{KM} = 1,85$ için %20–35, NaF için %40, $\text{KM} = 2,7$ için %20–30, $\text{KM} = 3$ için %30–40 ve Na_2SiF_6 ($\text{MgCl}_2\text{-KCl}$) için %10–20 aralığındakiler seçilmelidir. Tek değerli yani aralık içermeyen karışımların güvenilirliği ve istikrarlı olmasından şüphe yoktur lakin mekanik değerlerin de istenen aralıkta olup olmaması temel bir ölçüt olduğu unutulmamalıdır. Bu çalışmadan elde edilmiş mekanik ve istatistiksel özellikler bakımında Na_2SiF_6 ($\text{MgCl}_2\text{-KCl}$) karışımları ve odaklanması gereken aralığın da %10–20 olduğu yazar tarafından önerilmektedir.

Bugüne kadar şematik olarak anlatılan parçalanma olayı ilk defa Şekil 4.37 – 4.39'deki SEM analizleri ile hem çekme çubuklarının kırık yüzeylerinde hem de VAK numunelerinin gözeneklerin iç kısımlarında görsel olarak tespit edilmiştir.

Şu unutulmamalıdır; proses edilerek veya kaliteli hammaddeden üretilen temiz metal, temiz döküm parçası demek değildir. Çünkü dökümcülük içerisinde yüzlerce değişkeni içeren olağanüstü büyük bir sektördür. Bu parametrelerin büyük çoğunluğu kişiden kişiye, kişilerin günlük hatta anlık psikolojilerine göre bile değişebilmektedir. Örneğin düşük Bİ elde edilebilmiş temiz bir ergiyik eğer uygun ve doğru döküm hızı ile dökülmez ise hazırlanmış temiz metalin hiçbir anlamı yoktur. Özellikle alüminyum ve alaşımları gibi ve diğer çabuk oksitlenebilen metallerin dökümünde oldukça titiz, denetimli ve dikkatli proses adımları izlenmelidir. Aksi halde asla beklenen verimde dökümler elde edilemeyecektir.

Bu çalışmanın devamında KF eritkenleri ile bu çalışmadan elde edilmiş en iyi sonuçları kapsayan karışımların içeriklerinin daha etkin hale getirilmesi için farklı bileşikler ilave edilecektir. Böylece en yüksek verimdeki eritken karışımı tayin yapılacaktır. Ayrıca Eskin [216] ultrasonik gaz giderme prosesinin sıvı metalde ergiyik temizliği açısından da etkili olabileceğini göstermiştir. Bunun üzerine bu çalışmanın devamında da ultrasonik gaz giderme prosesi kullanılarak metal kalitesinin artırılması gelecek işler adı altında planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Dışpınar, D., (2005). Determination of Metal Quality of Aluminium and Its Alloys, Doktora Tezi, Birmingham Üniversitesi, Birmingham
- [2] Campbell, J., (2002). Castings, Second Edition, Butterworth-Heinemann,
- [3] Han, Q. ve Viswanathan, S. (2002). "Hydrogen Evolution during Directional Solidification and its Effect on Porosity Formation in Aluminum Alloys", Metallurgical and Materials Transactions A, 33(7):2067–2072.
- [4] Opie, W.R. ve Grant, N.J. (1950). "Hydrogen Solubility in Aluminum and Some Aluminum Alloys", Transactions of AIME, 188(10):1237–1241.
- [5] Divandari, M. ve 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.
- [6] Zhao, L., Pan, Y., Liao, H. ve Wang, Q., (2012). "Degassing of Aluminum Alloys During Re-melting", Materials Letters, 66(1):328–331.
- [7] Popescu, G., Gheorghe, I., Dănilă, F. ve Moldovan, P., (1996) "Vacuum Degassing of Aluminium Alloys", Materials Science Forum, 217–222:147–152.
- [8] Han, Q., (2015). "Ultrasonic Degassing Of Aluminum Alloys", Materials Science Forum, 786:155–160.
- [9] Samuel, A.M. ve Samuel, F.H., (1992). "Various Aspects Involved in the Production of Low-Hydrogen Aluminium Castings", Journal of Materials Science, 27(24):6533–6563.
- [10] Wu, R., Qu, Z., Sun, B. ve Shu, D., (2007). "Effects of Spray Degassing Parameters on Hydrogen Content and Properties of Commercial Purity Aluminum", Materials Science and Engineering A, 456(1):386–390.

- [11] Xu, H., Meek, T.T. ve Han, Q., (2007). "Effects of Ultrasonic Field and Vacuum on Degassing of Molten Aluminum Alloy", *Materials Letters*, 61(4):1246–1250.
- [12] Utigard, T.A., Roy, R.R. ve Friesen, K., (2000). "The Roles of Molten Salts in the Treatment of Aluminum", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 40(3):27–334.
- [13] Tan, E., Tarakçı, A.R., Dışpınar, D., Çolak, M. ve Kayıkçı, R., (2011). "Reproducibility of Reduced Pressure Test Results in Testing of Liquid Aluminum Gas Levels", 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 Mayıs 2011, Elazığ, 16–18.
- [14] Bilgi, Ö., (2004). *Anadolu Dökümün Beşiği, Döktaş*, 2004.
- [15] Stefanescu, D.M., (2015). *Science and Engineering of Casting Solidification*, Third Edition, Springer.
- [16] Gruzleski, J.E., ve Closset, B.E., (1990). *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys*, American Foundrymen's Society.
- [17] Harvey, J.P. ve Chartrand, P., (2010). "Modeling the Hydrogen Solubility in Liquid Aluminum Alloys", *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 41(4):908–924.
- [18] Minkoff, I., (1986). *Solidification and Cast Structure*, John Wiley & Sons, Inc.
- [19] Dardel, Y., (1949). "Hydrogen in Aluminum", *Transactions of AIME*, 2(2):273–286.
- [20] San-Martin, A. ve Manchester, F.D., (1992). "The Al-H (Aluminum-Hydrogen) System", *Journal of Phase Equilibria*, 13(1):17–21.
- [21] Anyalebechi, P.N., (1995). "Analysis of the Effects of Alloying Elements on Hydrogen Solubility in Liquid Aluminum Alloys", *Scripta Metallurgica et Materiala*, 33(8):1209–1216.
- [22] Zeng, J., Li, D., Kang, M, He, H. ve Hu, Z., (2013). "Nanostructure of Aluminum Oxide Inclusion and Formation of Hydrogen Bubbles in Molten Aluminum", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 13(10):6948–6952.
- [23] Engh, T.A., (1992). *Principles of Metal Refining*, Oxford Publications.
- [24] Talbot, D.E.J., (1975). "Effects of Hydrogen in Aluminium, Magnesium, Copper, and their Alloys", *International Materials Reviews*, 20(1):166–184.
- [25] Campbell, J., "Özel Görüşme", 25 Mart 2016.
- [26] Kubaschewski, O. ve Hopkins, B. E., (1967). *Oxidation of Metals*, Butterworth-Heinemann.

- [27] Shimizu, K., Gotoh, A., Kobayashi, K., Thompson, G.E. ve Wood, G.C., (1990). "The Nucleation Sites of γ - Al_2O_3 Crystals in Thermal Oxide Films on Aluminium", *Microscopy of Oxidation*, 1:144-148.
- [28] Callister, W.D. (2010). *Materials Science and Engineering*, Wiley & Sons; Çeviri Düzeltmeni Genel, K., (2013). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Nobel Yayınları, Ankara.
- [29] Sleppy, W.C., (1961). "Oxidation of Molten High-Purity Aluminum in Dry Oxygen", *Journal of the Electrochemical Society*, 108(12,):1097–1102.
- [30] Cochran, C.N., Belitskus, D.L. ve Kinosz, D.L., (1977). "Oxidation of Aluminum-Magnesium Melts In Air, Oxygen, Flue Gas, and Carbon Dioxide", *Metallurgical Transactions B*, 8(1):323–332.
- [31] Wightman, G. ve Fray, D.J., (1983). "The Dynamic Oxidation of Aluminum and Its Alloys", *Metallurgical Transactions B*, 14(4):625–631.
- [32] Jeurgens, L.P.H., Sloof, W.G., Tichelaar, F.D. ve Mittemeijer, E.J. (2000). "Thermodynamic Stability of Amorphous Oxide Films on Metals: Application to Aluminum Oxide Films on Aluminum Substrates", *Physical Review B*, 62(7):4707–4719.
- [33] Jeurgens, L.P.H., Sloof, W.G., Tichelaar, F.D. ve Mittemeijer, E.J., (2002). "Growth Kinetics and Mechanisms of Aluminum-Oxide Films Formed by Thermal Oxidation of Aluminum", *Journal of Applied Physics*, 92(3):1649–1656.
- [34] Jeurgens, L.P.H., Sloof, W.G., Tichelaar, F.D. ve Mittemeijer, E.J., (2002). "Structure And Morphology of Aluminium-Oxide Films Formed by Thermal Oxidation of Aluminium", *Thin Solid Films*, 418:89–101.
- [35] Dışpınar, D. "Özel Görüşme," 28 Mart 2016.
- [36] Shimizu, K., Brown, G.M., Kobayashi, K., Skeldon, P., Thompson, G.E. ve Wood, G.C., (1998). "The Early Stages of High Temperature Oxidation of an Al-0.5wt% Mg Alloy", *Corrosion Science*, 40(4):557–575.
- [37] Impey, S., Stephenson, D. ve Nicholls, J.R., (1990). "A Study of the Effect of Magnesium Additions on the Oxide Growth Morphologies on Liquid Aluminium Alloys", *Int. Conf. on the Microscopy of Oxidation*, 26-28 Mart 1990, Cambridge, 238–244.
- [38] Zayan, M.H., Jamjoom, O.M. ve Razik, N.A., (1990). "High-Temperature Oxidation of Al-Mg Alloys", *Oxidation of Metals*, 34:323–333.
- [39] Nylund, A., Mizuno, K. ve Olefjord, I., (1998) "Influence of Mg and Si on the Oxidation of Aluminum", *Oxidation of Metals*, 50(3):309–325.

- [40] Dai, X. Yang, X., Campbell, J. ve Wood, J., (2003). "Effects of Runner System Design on the Mechanical Strength of Al-7Si-Mg Alloy Castings", *Materials Science and Engineering A*, 354(2):315–325.
- [41] Nyahumwa, C., Green, N.R. ve Campbell, J., (2001). "Influence of Casting Technique and Hot Isostatic Pressing on the Fatigue of an Al-7Si-Mg Alloy", *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 32(2):349–358.
- [42] Campbell, J. ve Tiryakioğlu, M., (2012). "Bifilm Defects in Ni-Based Alloy Castings", *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 43(4):902–914.
- [43] Campbell, J., (2006). "Entrainment Defects", *Materials Science and Technology*, 22(2):127–145.
- [44] Bangyikhan, K., (2008). "Effects of Oxide Film, Fe-Rich Phase, Porosity and their Interactions on Tensile Properties of Cast Al-Si-Mg Alloys", *Doktora Tezi, Birmingham Üniversitesi, Birmingham*.
- [45] Mi, J., Harding, R.A. ve Campbell, J., (2004). "Effects of the Entrained Surface Film on the Reliability of Castings", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35(9):2893–2902.
- [46] Cao, X. ve Campbell, J., (2000). "Effect of Precipitation of Primary Intermetallic Compounds on Tensile Properties of Cast Al-11.5Si-0.4Mg Alloy", *AFS Transactions*, 108:391–400.
- [47] Halvae, A. ve Campbell, J., (1997). "Critical Mold Entry Velocity for Aluminum Bronze Castings", *AFS Transactions*, 105:35–46.
- [48] Runyoro, J., Boutorabi, S.M.A. ve Campbell, J., (1992). "Critical Gate Velocities for Film-Forming Casting Alloys - A Basis For Process Specification", *AFS Transactions*, 100:225–234.
- [49] Nyahumwa, C., Green, N.R. ve Campbell, J., (1998). "Effect of Mold-Filling Turbulence on Fatigue Properties of Casting Aluminum Alloys", *AFS Transactions*, 106:215–223.
- [50] Park, J.M., (2009). "Behaviours of Bifilms in A356 Alloy during Solidification: Developing Observation Techniques with 3D Micro X-ray Tomography", *Yüksek Lisans Tezi, Birmingham Üniversitesi, Birmingham*.
- [51] Ransley, C.E. ve Neufeld, H., (1948). "The Solubility of Hydrogen in Liquid and Solid Aluminium", *Journal of the Institute of Metals*, 74(12):599–620.
- [52] Young, G.A.J. ve Scully, J.R., (1970). "The Diffusion and Trapping of Hydrogen in

- Steel", *Acta Metallurgica*, 46(18):147–157.
- [53] Flemings, M.C., (1974). *Solidification Processing*, McGraw-Hill.
- [54] Kurz, W. ve Fisher, J.D., (1998). *Fundamentals of Solidification*, Fourth Edition, Trans Tech Publications.
- [55] Campbell, J., (2006). "An Overview of the Structure and Properties of Cast Alloys", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 37B(9):857–863.
- [56] Samuel, F.H., Ouellet, P. ve Simard, A., (1999). "Assessment of Melt Cleanliness and Analysis of Inclusions in Al-Si Alloys using the Prefil Pressure Filtration Technique", *International Journal of Cast Metals Research*, 12:17–33.
- [57] Raiszadeh, R. ve Griffiths, W.D., (2006). "A Method to Study the History of a Double Oxide Film Defect in Liquid Aluminum Alloys", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 37(6):865–871.
- [58] Cao, X. ve Campbell, J., (2003). "The Nucleation of Fe-Rich Phases on Oxide Films in Al-11.5Si-0.4 Mg Cast Alloys", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34(7):1409–1420.
- [59] Backerud, L., Chai, G. ve Tamminen, J., (1990). *Solidification Characteristics of Aluminum Alloys. Vol. 2. Foundry Alloys*, American Foundrymen's Society.
- [60] Monroe, R., (2005). "Porosity in Castings", *AFS Transactions*, 5(4):1–28.
- [61] Cáceres, C.H., (1995). "On the Effect of Macroporosity on the Tensile Properties of the Al-7%Si-0.4%Mg Casting Alloy", *Scripta Metallurgica et Materiala*, 32(11):1851–1856.
- [62] Knuutinen, A., Nogita, K., McDonald, S.D. ve Dahle, A.K., (2001). "Modification of Al-Si Alloys with Ba, Ca, Y and Yb", *Journal of Light Metals*, 1(4):229–240.
- [63] Dişpınar, D. ve Campbell, J., (2011). "Porosity, Hydrogen and Bifilm Content in Al Alloy Castings", *Materials Science and Engineering: A*, 528(10):3860–3865.
- [64] Dişpınar, D., Akhtar, S., Nordmark, A., Di Sabatino, M., ve Arnberg, L., (2010). "Degassing, Hydrogen and Porosity Phenomena in A356", *Materials Science and Engineering A*, 527(16):3719–3725.
- [65] Akhtar, S., Dişpınar, D., Arnberg, L. ve Di Sabatino, M., (2009). "Effect of Hydrogen Content, Melt Cleanliness and Solidification Conditions on Tensile Properties of A356 Alloy", *International Journal of Cast Metals Research*, 22(1):22–25.
- [66] Dişpınar, D., Akhtar, S., Nordmark, A., Di Sabatino, M, ve Arnberg, L., (2011). "A356 Alaşımının Düşük Basıncılı ve Kokil Kalıba Dökümü Sırasında Porozite ve

Mekanik Özellikler Arasındaki İlişki”, 5. Ulusal Alüminyum Sempozyumu, 13-14 Ekim 2011, İstanbul.

- [67] Dışpınar, D. ve Campbell, J., (2007). “Alüminyum ve Alaşımlarında Porozite Olayı ve Döküm Kalitesinin Belirlenmesi”, Metal Dünyası, 190–195.
- [68] Campbell, J. (1968). “Pore Nucleation in Solidifying Metals”, Iron and Steel Institute, 1:19–26.
- [69] Rooy, E.L., (1992). “Mechanisms of Porosity Formation in Aluminum”, Metal Casting, 82(9):34–36.
- [70] Fisher, J.C., (1948). “The Fracture of Liquids”, Journal of Applied Physics, 19(11):1062–1067.
- [71] Lee, P.D. ve Hunt, J.D., (1997). “Hydrogen Porosity in Directional Solidified Aluminium-Copper Alloys: In Situ Observation”, Acta Materialia, 45(10):4155–4169.
- [72] Lee, P.D. ve Hunt, J.D., (1997). “Measuring the Nucleation of Hydrogen Porosity during the Solidification of Aluminium-Copper Alloys”, Scripta Materialia, 36(4):399–404.
- [73] Lee, P.D. ve Hunt, J.D., (2001). “Hydrogen Porosity in Directionally Solidified Aluminium-Copper Alloys: A Mathematical Model”, Acta Materialia, 49(8):1383–1398.
- [74] Lee, P.D., Chirazi, A. ve See, D., (2001). “Modeling Microporosity in Aluminum-Silicon Alloys : A Review”, Journal of Light Metals, 1:15–30.
- [75] Lee, P.D., Atwood, R.C., Dashwood, R.J. Nagaumi, H., (2002). “Modeling of Porosity Formation in Direct Chill Cast Aluminum-Magnesium Alloys”, Materials Science and Engineering A, 328(1):213–222.
- [76] Lee, P.D., Chirazi, A., Atwood, R.C. ve Wang, W., (2004). “Multiscale Modelling of Solidification Microstructures, Including Microsegregation and Microporosity, in an Al-Si-Cu Alloy”, Materials Science and Engineering A, 365(1):57–65.
- [77] Piwonka, T.S. ve Flemings, M.C., (1966). “Pore Formation in Solidification”, Transactions of AIME, 236(8):1157–1165.
- [78] Kubo, K. ve Pehlke, R.D., (1985). “Mathematical Modeling of Porosity Formation in Solidification”, Metallurgical Transactions B, 16(2):359–366.
- [79] Knuutinen, A., Nogita, K, McDonald, S.D. ve Dahle, A.K., (2001). “Porosity Formation in Aluminium Alloy A356 Modified with Ba, Ca, Y and Yb”, Journal of Light Metals, 1(4):241–249.

- [80] Nogita, K, Knuutinen, A., McDonald, S.D. ve Dahle, A.K., (2001). "Mechanisms of Eutectic Solidification in Al-Si Alloys Modified with Ba, Ca, Y and Yb", *Journal of Light Metals*, 1(4):219–228.
- [81] Taylor, J.A., Graham, D.A. ve Easton, M.A., (1997). "Redistribution of Shrinkage Porosity in Eutectic Al-Si Alloy by Addition of Ti-B Grain Refiner", *AFS Transactions*, 105:189–196.
- [82] Otte, M.O., McDonald, S.D., Taylor, J.A., StJohn, D.H. ve Schneider, W.E., (1999). "Controlling Porosity-Related Casting Rejects: Understanding the Role of Iron in Al-Si Alloys", *AFS Transactions*, 107:471–478.
- [83] McDonald, S.D., Nogita, K., Dahle, A.K., Taylor, J.A. ve StJohn, D.H., (2000). "Eutectic Solidification and Porosity Formation in Al-Si Alloys: The Role Of Strontium", *AFS Transactions*, 108:463–470.
- [84] Mohanty, P.S., Samuel, F.H. ve Gruzleski, J.E., (1993). "Mechanism of Heterogeneous Nucleation of Pores in Metals and Alloys", *Metallurgical Transactions A*, 24(8):1845–1856.
- [85] Anson, J.P. ve Gruzleski, J.E., (1999). "Effect of Hydrogen Content on Relative Shrinkage and Gas Microporosity in Al-7% Si Casting", *AFS Transactions*, 107:135–142.
- [86] Anson, J.P., Stucky, M. ve Gruzleski, J.E., (2000). "Effect of Sr Modification on Nucleation and Growth of Microporosity during the Solidification of Al-7% Si Foundry Alloy", *AFS Transactions*, 108:419–426.
- [87] Anson, J.P. ve Gruzleski, J.E., (1999). "The Quantitative Discrimination between Shrinkage and Gas Microporosity in Cast Aluminum Alloys using Spatial Data Analysis", *Materials Characterization*, 43(5):319–335.
- [88] Emadi, D. ve Gruzleski, J.E., (1994). "Effects of Casting and Melt Variables on Porosity in Directionally-Solidified Al-Si Alloys", *AFS Transactions*, 102:307–312.
- [89] Emadi, D. ve Gruzleski, J.E., (1995). "Combating Al-Si Porosity: The Strontium/Hydrogen Myth", *Modern Casting*, 46–47.
- [90] Emadi, D., Gruzleski, J.E., ve Toguri, J.M., (1993). "The Effect of Na and Sr Modification on Surface Tension and Volumetric Shrinkage of A356 Alloy and their Influence on Porosity Formation", *Metallurgical Transactions B*, 24(6):1055–1063.
- [91] LaOrchan, W. ve Gruzleski, J.E., (1992). "Grain Refinement, Modification and Melt Hydrogen-their Effects on Microporosity, Shrinkage and Impact Properties in A356 Alloy", *AFS Transactions*, 100:415–424.
- [92] Thomas, P.M. ve Gruzleski, J.E., (1978). "Threshold Hydrogen for Pore Formation

- during the Solidification of Aluminum Alloys”, *Metallurgical Transactions B*, 9(2):139–141.
- [93] Samuel A.M. ve Samuel, F.H., (1995). “A Metallographic Study of Porosity and Fracture Behavior in Relation to the Tensile Properties in 319.2 End Chill Castings”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26(9):2359–2372.
- [94] Samuel A.M. ve Samuel, F.H., (1993). “The Reduced Pressure Test as a Measuring Tool in the Evaluation of Porosity/Hydrogen Content in Al-7 Wt Pct Si-10 Vol Pct Sic(P) Metal Matrix Composite”, *Metallurgical Transactions A*, 24(8):1857–1868.
- [95] Roy, N., Samuel A.M. ve Samuel, F.H., (1996). “Porosity Formation in Al-9 Wt % Si-3 Wt % Cu-X Alloy Systems: Measurements of Porosity”, *Journal of Materials Science*, 31:1243–1254.
- [96] Liu, L., Samuel A.M., Samuel, F.H., Doty, H.W. ve Valtierra, S., (2002). “Role of Strontium Oxide on Porosity Formation in Al-Si Casting Alloys”, *AFS Transactions*, 110:449–462.
- [97] Samuel A.M. Gotmare, A. ve Samuel, F.H., (1995). “Effect of Solidification Rate and Metal Feedability on Porosity and SiC/Al₂O₃ Particle Distribution in an Al-Si-Mg (359) Alloy”, *Composites Science and Technology*, 53(3):301–315.
- [98] Tiwari, S.N. ve Beech, J., (1978). “Origin of Gas Bubbles in Aluminium”, *Metal Science*, 12(8):356–362.
- [99] Li, Y.M. ve Li, R.D., (2001). “Effect of the Casting Process Variables on Microporosity and Mechanical Properties in an Investment Cast Aluminium Alloy”, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2(1):277–280.
- [100] Li, Z., Samuel, A.M., Samuel, F.H., Ravindran, C., Valtierra, S. ve Doty, H.W., (2004). “Parameters Controlling the Performance of AA319-Type Alloys, Part I. Tensile Properties”, *Materials Science and Engineering A*, 367(1):96–110.
- [101] Li, K.D. ve Chang, E., (2004). “Mechanism of Nucleation and Growth of Hydrogen Porosity in Solidifying A356 Aluminum Alloy: An analytical solution”, *Acta Materialia*, 52(1):219–231
- [102] Li, K.D. ve Chang, E., (2002). “An Analysis on Porosity Formation in A356 Aluminium Alloy Castings”, *International Journal of Cast Metals Research*, 15(1):25–30.
- [103] Li, K.D. ve Chang, E., (2002). “A Modified Mechanism of Porosity Formation in A356 Alloy Permanent Mold Castings”, *AFS Transactions*, 110:331–338.
- [104] X. G. Chen, X.G. ve Engler, S., (1993). “Measuring Hydrogen Content in Molten Aluminium Alloys using The CHAPEL Technique”, *Cast Metals*, 6(2):99–108.

- [105] Laslaz, G. ve Laty, P., (1991). "Gas Porosity and Metal Cleanliness in Aluminum Casting Alloys", AFS Transactions, 99:83–90.
- [106] Kuznetsov, A.V. ve Vafai, K., (1995). "Development and Investigation of Three-Phase Model of the Mushy Zone for Analysis of Porosity Formation in Solidifying Castings", International Journal of Heat and Mass Transfer, 38(14):2557–2567.
- [107] Yeum, K. ve Poirier, D.R., (1998). "Predicting Microporosity in Aluminum Alloys", Light Alloys, 469–476.
- [108] Serratos, M., Poirier, D.R. ve Lyman, W., (2000). "Effect of Stirring on Oxide Skins and Porosity in a 356 Aluminum Alloy", AFS Transactions, 108:719–724.
- [109] Sigworth, G.K. ve Wang, C., (1992). "Evolution of Porosity during Solidification, Part 1: A Literature Review", AFS Transactions, 100:979–987.
- [110] Sigworth, G.K. ve Wang, C., (1992). "Evolution of Porosity during Solidification, Part 2: A Theoretical Analysis", AFS Transactions, 100:989–1004.
- [111] Sigworth, G.K. ve Wang, C., (1993) "Evolution of Porosity in Long Freezing Range Alloys", Metallurgical Transactions B, 24(2):365–377.
- [112] Sigworth, G.K. ve Wang, C., (1993). "Mechanisms of Porosity Formation during Solidification: A Theoretical Analysis", Metallurgical Transactions B, 24(2):349–364.
- [113] Sigworth, G.K. Shivkumar, S. ve Apelian, D., (1999). "The Influence of Molten Metal Processing on Mechanical Properties of Cast Al-Si-Mg Alloys", AFS Transactions, 99:811–824.
- [114] Sigworth, G.K. ve Engh, T.A., (1991). "Chemical And Kinetic Factors Related to Hydrogen Removal from Aluminum", Journal of Electronic Materials, 20(12):447–460.
- [115] Harding R.A. ve Campbell, J., (1994). "The Feeding of Castings", TALAT, 3206:1–24.
- [116] Dışpınar, D. ve Campbell, J., (2004). "Sekonder Alüminyum Üretim Prosesi Boyunca Metal Kalitesinin İncelenmesi", IMSP'10, Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, 14-16 Nisan 2004, Denizli.
- [117] Cui, J. ve Roven, H.J., (2010). "Recycling of Automotive Aluminum", Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 20(11):2057–2063.
- [118] European Aluminium Association, (2016). "Automotive Aluminium in Cars and Trucks".

- [119] Lazzaro, G. ve Atzori, C., (1991). "Recycling of Aluminum Trimmings by Conform Process", TMS 1991 (The Minerals, Metals & Materials Society), 1379–1384.
- [120] Dişpınar, D. ve Campbell, J., (2004). "Metal Quality Studies in Secondary Remelting Of Aluminium", Foundry Trade Journal, 178(3612):78–81.
- [121] Xiao, Y ve Reuter, M.A., (2002). "Recycling of Distributed Aluminium Turning Scrap", Minerals Engineering, 15(11):963–970.
- [122] Ransley, C.E., Talbot, D.E.J. ve Barlow, H.C., (1957). "An Instrument for Measuring the Gas Content of Aluminum Alloys during Melting and Casting", Journal of Institute of Metals, 86:212–219.
- [123] Ransley, C.E. ve Talbot, D.E.J., (1955). "The Routine Determination of the Hydrogen Content of Aluminium and Aluminium Alloys by the Hot-Extraction Method", Journal of the Institute of Metals, 84:445–452.
- [124] Schlesinger, M.E., (2014). Aluminum Recycling, Second Edition, CRC Press.
- [125] TYK Corporation, "www.tyk.co.jp/en", 13 Şubat 2016.
- [126] ABB, (2013). "AISCAN and AISCAN Argon - Hydrogen analysis in liquid aluminum - User Manual".
- [127] Mechatech Systems - High Vacuum Systems & Freeze Dryers, Hyscan Hidrojen ölçüm sistemleri, "www.mechatechsystems.net", 25 Ocak 2016 .
- [128] Anderson, D.A., Granger, D.A. ve Stevens, J.G., (2013) "'Telegas II' For On-Line Measurement Of Hydrogen In Aluminum Alloy Melts", Production and Electrolysis of Light Metal, 163–172.
- [129] ABB Group, Automation and Power Technologies, "www.abb.com", 14 Şubat 2016.
- [130] Canullo, M.V., Jaitman Labaton, M.F. ve Acufia Laje, R., (2003). "Cleanliness Of Primary A356 Alloy: Interpretation And Standardisation Of Podfa Laboratory Measurements", Aluminium Cast House Technology - Eighth Australasian Conference - TMS, 2003, 341–355.
- [131] ABB, (2013). "PoDFA Sampling in Cold Metal".
- [132] ABB, (2015). "PoDFA - Kullanım Kılavuzu".
- [133] Enright, P.G., Hughes, I.R., Pickering, J., Simard, A. ve Proulx, J., (2003). "Characterisation of Molten Metal Quality using the Pressure Filtration Technique", AFS Transactions, 86(2):1–11.

- [134] Simard, A.A., Dallaire, F., Proulx, J. ve Rochette, P., (2000). "Cleanliness Measurement Benchmarks of Aluminum Alloys Obtained Directly At-Line using the Prefil-Footer Instrument", *Light Metals 2000*, 739–744.
- [135] Prillhofer, B., Antrekowitsch, H., Böttcher, H. ve Enright, P.G., (2008). "Nonmetallic Inclusions in the Secondary Aluminum Industry for the Production of Aerospace Alloys", *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)*, 603–608.
- [136] ABB, (2015). "Prefill Footer - Kullanım Kılavuzu".
- [137] Ware, T.N., Cooksey, M. ve Couper, M.J., (2001). "Measurement of the Performance of In-Line Processes using LiMCA", *7th Australian Asian Pacific Conference, Aluminum Cast House Technology*, 23-26 Eylül 2001, Hobart, 45–54.
- [138] Cooksey, M., Ware, T. ve Couper, M.J., (2001). "Effect of Pressure Cycle and Extension Probe on LiMCA Measurement of Inclusions", *Light Metals 2001*, 965–971.
- [139] Krug, H.P. ve Schneider, W., (1998). "A Contribution to Inclusion Measurement after In-Line Degassers with PoDFA and LiMCA", *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)*, 1:863–870.
- [140] Martin, J. ve Painchaud, F., (1994). "On-line Metal Cleanliness Determination in Molten Aluminum using the LiMCA II Analyzer", *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)*, 1:915–920.
- [141] Comerford, E.U. ve Hudson, L.G., (1994). "Extended User's Experience with the LiMCA Technology to Continuously Monitor and Improve Can Body Stock Quality", *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)*, 1:1083–1091.
- [142] Poynton, S., Brandt, M. ve Grandfield, J., (2009). "The use of Electromagnetic Fields for the Detection of Inclusions in Aluminium", *Materials Science Forum*, 630:155–164.
- [143] Jen, C.K., Legoux, J.G. ve Parent, L., (2000). "Experimental Evaluation of Clad Metallic Buffer Rods for High Temperature Ultrasonic Measurements", *NDT and E International*, 33(3):145–153.
- [144] Ihara, I., Burhan, D., Aso, H., Kamado, S. ve Kojima, Y., (2002). "Ultrasonic In-Line Sensors for Inclusion Detection in Liquid Metals", *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 8-11 Ekim 2002, Münih, 811–814.
- [145] Aubrey, L.S., Smith, D.D. ve Martins, L.C.B., (2001). "New Product Developments for Aluminum Cast Houses", *7th Australian Asian Pacific Conference on Aluminum Cast House Technology*, 23-26 Eylül 2001, Hobart, 22–43.
- [146] Ono, Y., Moisan, J.F., Zhang, Y., Jen, C.K. ve Su, C.Y., (2004). "An On-Line Ultrasonic

Cleanliness Analyzer for Molten Light Metals”, JOM - The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 2:59–64.

- [147] Ono, Y., Moisan, J.F., Jen, C.K. ve Frana, D.R., (2002). “Development of Ultrasonic Techniques with Buffer Rod in Molten Aluminum”, Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 8-11 Ekim 2002, M¼nih, 805–810.
- [148] Dışınar, D. ve Campbell, J., (2007). “A Comparison of Methods used to Assess Aluminium Melt Quality”, 136th TMS Annual Meeting, Shape Casting 2nd International Symposium, 25 Şubat-1 Mart 2007, Orlando, 11–18.
- [149] Velasco, E. ve Montalvo, F., (2012). “Influence of Reduced Pressure on Density of Aluminium Extrusion Alloy”, International Journal of Cast Metals Research, 25(1):59–64.
- [150] Palmer Manufacturing & Supply, Inc., “Portable rotary degasser for aluminum”, 12–13.
- [151] Brondyke, K.J. ve Hess, P.D., (1964). “Interpretation of Vacuum Gas Test Results for Aluminum Alloys”, Transactions of AIME, 230(12):1542–1546, 1964.
- [152] Dışınar, D. ve Campbell, J. (2004). “Critical Assessment of Reduced Pressure Test. Part 1: Porosity Phenomena”, International Journal of Cast Metals Research, 17(5):287–294.
- [153] Dışınar, D. ve Campbell, J. (2004) “Critical Assessment of Reduced Pressure Test. Part 2: Quantification”, International Journal of Cast Metals Research, 17(5):287–294.
- [154] Dışınar, D. ve Campbell, J. (2006) “Use of Bifilm Index as an Assessment of Liquid Metal Quality”, International Journal of Cast Metals Research, 19(1):5–17.
- [155] Dışınar, D. ve Campbell, J. (2009) “Al¼minyum ve Alaşımlarının D¼k¼m Kalitesinin Belirlenmesi”, 4. Al¼minyum Sempozyumu, 15-16 Ekim 2009, İstanbul, 394–404.
- [156] Dışınar, D., Kvithyld, A., ve Nordmark, A., (2011). “Quality Assesment of Recycled Aluminium”, TMS Light Metals, 27 Şubat - 3 Mart 2011, San Diego, 731–735.
- [157] Dışınar, D. ve Campbell, J., (2004). “Al¼minyum D¼k¼m Kalitesinin Vakum Altında Katılaştırma Testi ile Belirlenmesi”, 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, 14-16 Nisan 2004, Denizli, 524–531.
- [158] Kvithyld, A., Dışınar, D. ve Nordmark, A., (2013). “Quality Assessment of Secondary Aluminium”, 44th World Chemistry Congress, 11-16 Ağustos 2013, 409–425.

- [159] Dışpınar, D. ve Campbell, J., (2006). "Vakum Altında Katılaştırma Testinde Kullanılan Kalıplarda Bağlayıcı Miktarının Porozite Üzerine Etkisi", 11. Malzeme Sempozyumu, 19-26 Nisan 2006, Denizli, 782–786.
- [160] Dışpınar, D. ve Campbell, J., (2004). "Vakum Altında Katılaştırma Testinin Sıvı Alüminyum Metal Kalitesini Belirlemede Kullanımı", 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, 14-16 Nisan 2004, Denizli, 523–531.
- [161] Dışpınar, D., Kvithyld, A. ve Nordmark, A., (2012). "Melt Quality Measurement of Recycled Aluminium Alloys", IMMC' 16. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 14-15 Eylül 2012, İstanbul, 703–710.
- [162] Dışpınar, D. ve Campbell, J., (2014). "Reduced Pressure Test (RPT) for Bifilm Assessment", TMS Shape Casting: 5th International Symposium, 16-20 Şubat 2014, San Diego, 241–251.
- [163] The Institute of British Foundrymen (1997). Manual of Foundry Technology, England.
- [164] Peterson R.D. ve Wells, P.A., (1993). "The Effect of Fluxing Gas Composition on Removal Kinetics for Hydrogen and Light Metals", TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 891–898.
- [165] Foseco, (2015). "FDU Foundry Degassing Unit - Kullanım Kılavuzu".
- [166] Foseco, (2009). "The Technology of Batch Degassing for Hydrogen Removal from Aluminium Melts Utilising Different Rotor Designs", Foundry Planet, 256:11–17.
- [167] Dışpınar, D., Nordmark, A. ve Syvertsen, F., (2010). "The Degassing Phenomena in Aluminium Castings", 13. Uluslararası Malzeme Sempozyumu (IMSP' 2010), 13-15 Ekim 2010, Denizli, 1369–1375.
- [168] Dışpınar, D., Akhtar, S., Nordmark, A., Di Sabatino, M. ve Arnberg, L., (2010). "Rotary Degassing and Porosity Phenomena in Aluminium Castings", 15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 11-13 Ekim 2010, 1983–1989.
- [169] Dışpınar, D., Nordmark, A., Di Sabatino, M. ve Arnberg, L., (2009). "Alüminyum ve Alaşımlarının Dökümü Sırasında Gaz Giderme İşlemi ve Döküm Kalitesi Üzerine Etkileri", 4. Alüminyum Sempozyumu, 15-16 Ekim 2009, İstanbul, 405–410.
- [170] Frank, R.A. ve Flisakowski, P.J., (2004). "In-Furnace Refining using Pyrotek's HD-2000 and FIF-50 Rotary Injector Systems", TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 779–787.
- [171] Pyrotek, Sıvı Metal Temizliği, [www.pyrotek.info/documents/techpapers/2005-11--MQW3--SNIF In-line Refining--Robert Frank.pdf](http://www.pyrotek.info/documents/techpapers/2005-11--MQW3--SNIF%20In-line%20Refining--Robert%20Frank.pdf), 25 Şubat 2016.

- [172] Corns , R.R. ve Rack, T.P., (1989). "Practical Implementation of Aluminum Degassing using a New Non-Toxic Gas Mixture", AFS Transactions, 97:983–988.
- [173] Parmenter, L., Apelian, D. ve Jensen, F., (1998). "Development of a Statistically Optimized Test Method for the Reduced Pressure Test", AFS Transactions, 106:439–452.
- [174] Gruzleski, J.E., La Orchan, W. ve Mülazimoğlu, H., (1995). "New Reduced Pressure Test Quantifies Hydrogen Content", Modern Casting, 9:47–49.
- [175] Utigard, T.A., Friesen, K., Roy, R.R., Lim, J., Silny, A. ve Dupuis, C., (1998). "The Properties and Uses of Fluxes in Molten Aluminum Processing", JOM - The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 11:38–43.
- [176] Altenpohl, D. G., (1998). Aluminum: Technology, Applications, and Environment, Sixth Edition, TMS - AIME.
- [177] Zalensas, D.L., (2001). Aluminum Casting Technology, 2nd ed. AFS Des Plaines, 2001.
- [178] Youngblood D. ve Moore, T., (2013). "Solid Flux Use in the Aluminum Industry", Die Casting Engineer, 5:16–18.
- [179] SubsTech: substances & technologies, Eritkenler ve kullanım yerleri, www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=fluxes_for_melting_aluminum, 25 Ocak 2016.
- [180] Silny, A. ve Utigard, T.A., (1997). "Interfacial Tension between Aluminum and Flux", TMS Light Metals, 1:971–878.
- [181] Utigard, T.A. ve Toguri, J.M., (1985). "Interfacial Tension of Aluminum in Cryolite Melts", Metallurgical Transactions B, 16(2):333–338.
- [182] Utigard, T.A., Toguri, J.M. ve Grjotheim, K., (1987). "Interfacial Tension of the Aluminum-Cryolite and Iron-Slag Systems", Canadian Metallurgical Quarterly, 26(2):129–135.
- [183] Brown, J.R., (1999). Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook, Butterworth-Heinemann.
- [184] van Linden, J.H.L. ve Stewart, D.L., (1988). "Molten Salt Flux Composition Effects in Aluminum Scrap Remelting", TMS Light Metals, 1:391–396.
- [185] Friesen, K.J., Utigard, T.A., Dupuis, C. ve Martin, J.P., (1997). "Coalescence Behaviour of Aluminum Droplets under a Molten Salt Flux Cover", in Light Metals 1997, 1:857–864.

- [186] Ho, F.K. ve Sahai, Y., (1990). "Interfacial Phenomena in Molten Aluminum and Salt Systems", TMS - Proceedings of the Second International Symposium Recycling of Metals and Engineered Material, 1990, pp. 85–102.
- [187] Utigard, T.A., "Thermodynamic Considerations of Aluminum Refining and Fluxing", Extraction, Refining, and Fabrication of Light Metals: Proceedings of the International Symposium on Extraction, Refining and Fabrication of Light Metals, 18-21 Ağustos 1991, 353–365.
- [188] Béland, G., Dupuis, C., Riverin, G., Desmeules, R. ve Rose, L., (1998). "Rotary Flux Injection: Chlorine-Free Technique for Furnance Preparation", TMS Light Metals 1998, 1:843–847.
- [189] Liu, C., Hu, Z.L. ve Zeng, J.M., (2012). "Removal of Impurities in Aluminum by Uses of Fluxes", Advanced Materials Research, 509:152–155.
- [190] Tenorio J.A.S. ve Espinosa, D.C.R., (2002). "Effect of Salt/Oxide Interaction on the Process of Aluminum Recycling", Journal of Light Metals, 2:89–93.
- [191] Ho, F.K. ve Sahai, Y., (1990). "Interfacial Tension in Molten Aluminum and Salt Systems", TMS Light Metals 1990, 1:717–720.
- [192] Tenorio, J.A.S. ve Delgado, F., (1997). "Optimization of Salt Composition in the Recycling of Aluminum Cans", TMS Light Metals 1997, 1:717–720.
- [193] Johnson, T.J. ve Peterson, R.D., (1985). "The Role of Magnesium in fluxing UBC", International Symposium on Recycle and Secondary Recovery of Metals and Fall Extractive and Process Metallurgy Meeting, 1985, 417–428.
- [194] Stewart, D.L., van Linden, J.H.L., LaCamera, A.F., Pierce, T.V., Parkhill, J.O., Urbanic, J.M. ve Hornacek, T.R., (1991). "Salt-Based Melting Process," US5057194 A.
- [195] Masson, D.B. ve Taghiei, M.M., (1989). "Interfacial Reactions between Aluminum Alloys and Salt Flux during Melting," Materials Transactions, JIM, 6:411–422.
- [196] Silny, A. ve Utigard, T.A., (1996). "Interfacial Tension between Aluminum and Chloride - Fluoride Melts", Journal of Chemical & Engineering Data, 41(96):1340–1345.
- [197] Roy, R.R. ve Utigard, T.A., (1998). "Interfacial Tension between Aluminum and NaCl-KCl-Based Salt Systems", Metallurgical and Materials Transactions B, 23:821–827.
- [198] Parker, G., Williams, T. ve Black, J., (1999). "Production Scale Evaluation of a New Design Ceramic Foam Filter", TMS Light Metals 1999, 1:1057–1062.

- [199] Brabie, V., Moldovan, P., Stefinescu, F., Neagu, G., Cristea, L., Catalina, A. ve Nastac, L., (1993). "The Mechanism and Kinetics of Alloy Filtration", International Journal of Materials and Product Technology, 8(1):49–57.
- [200] Enright, P.G., (2007). "Molten Metal Treatment Technologies for Secondary Aluminium Processing", 9th OEA International Aluminium Recycling Congress, Almanya.
- [201] Weibull, W., (1951). "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", Journal of applied mechanics, 18:293–297.
- [202] Kırtay, S. ve Dışpınar, D., (2012). "Effect of Ranking Selection on the Weibull Modulus Estimation", Gazi University Journal of Science, 25(1):175–187.
- [203] ASTM B557-15, (2016). Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products, ASTM, Philadelphia.
- [204] Koca, E., Yüksel, Ç., Erzi, E. ve Dışpınar, D., (2016). "Quality Assessment of A356 Ingots from Different Supplier in Wheel Production", Shape Casting: 6th International symposium, TMS, 14-16 Şubat 2016, Nashville, 77–84.
- [205] Ludwig, T., Di Sabatino, M., Arnberg, L. ve Dışpınar, D., (2012). "Influence of Oxide Additions on the Porosity Development and Mechanical Properties of A356 Aluminium Alloy Castings", International Journal of Metalcasting, 6(2):41–50.
- [206] Liu, P.Y., Jia, J. ve Guo, J.J., (2000). "Melt Treatment of A357 Alloy by Flux Injection" Materials Science Forum, 331(337):283–288.
- [207] Tiryakioğlu, M., Campbell, J. ve Alexopoulos, N.D., (2009). "Quality Indices for Aluminum Alloy Castings: A Critical Review," Metallurgical and Materials Transactions B, 40(6):802–811.
- [208] Tiryakioğlu, M., Campbell, J. ve Alexopoulos, N.D., (2009). "On the Ductility of Cast Al-7 Pct Si-Mg Alloys," Metallurgical and Materials Transactions A, 40(4):1000–1007.
- [209] Cáceres, C.H., Davidson, C.J. ve Griffiths, J.R., (1995). "The Deformation and Fracture Behaviour of an Al-Si-Mg Casting Alloy," Materials Science and Engineering A, 197(2):171–179.
- [210] Cáceres, C.H., ve Selling, B.I., (1996). "Casting Defects and the Tensile Properties of an Al-Si-Mg Alloy," Materials Science and Engineering A, 220(1–2):109–116.
- [211] Wang, Q. ve Cáceres, C.H., (1998). "The Fracture Mode in Al-Si-Mg Casting Alloys," Materials Science and Engineering: A, 241(1–2):72–82.
- [212] Campbell, J., (2015). Complete Casting Handbook, Second Edition, Elsevier.

- [213] Majidi, O., Shabestari, S.G. ve Aboutalebi, M.R., (2007). "Study of Fluxing Temperature in Molten Aluminum Refining Process," *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1–3):450–455.
- [214] Miller, D.N., Lu, L. ve Dahle, A.K., (2006). "The Role of Oxides in the Formation of Primary Iron Intermetallics in an Al-11.6Si-0.37Mg Alloy," *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 37(6):873–878.
- [215] Shivkumar, S., Wang, L. ve Keller, C., (1994). "Impact Properties of A356-T6 Alloys," *Journal of Materials Engineering and Performance*, 3(1):83–90.
- [216] Eskin, G.I. ve Eskin, D.G., (2014). *Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts*, CRC Press.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Çağlar YÜKSEL
Doğum Tarihi ve Yeri : 25/01/1984 – İzmir
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : cyuksel@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Malzeme Bilimi	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Yüksek Lisans	Üretim	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Fırat Üniversitesi	2008
Lise	Fen Bilimleri	Rahmi Kula Anadolu Lisesi	2002

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010 – Halen	Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2008 – 2010	Önmetal Döküm Sanayi	Dökümhane Şefi
2007 – 2008	Eksen Çelik	Üretim Şefi

YAYINLARI

Makale

Uluslararası Makale

1. Yüksel, Ç., Tamer, Ö., Erzi, E., Aybarç, U., Çubuklusu, E., Topçuoğlu, Ö. Çiğdem, M., ve Dışınar, D. (2016). Quality assessment of scrap aluminum. *Archives of Foundry Engineering, AFE*, 16(3), 151 – 156.
2. Guzel, E., Yuksel, C., Bayrak, Y., Sen, O., ve Ekerim, A. (2014). Effect of Section Thickness on the Microstructure and Hardness of Ductile Cast Iron. *Materials Testing*, 56(4), 285-288.
3. Ozer, G., Yuksel, C., Comert, Z. Y., ve Guler, K. A. (2013). The Effects of Process Parameters on the Recycling Efficiency of Used Aluminium Beverage Cans (UBCs). *Materials Testing*, 55(5), 396-400.
4. Güler, K. A., Kısasöz, A., Yüksel, Ç., ve Karaaslan, A. (2012). Mechanical Properties of A6063/SiC Composites Produced Using the Lost Foam Casting Process. *MP Materials Testing-Materials and Components Technology and Application*, 54(3), 189-192

Uluslararası Bildiri

1. Yüksel, Ç., Çiğdem, M., Erzi, E., Dışınar, D., Aybarç, U., Çubuklusu, E., ve Topçuoğlu, Ö. (2016). "The effect of secondary scrap ratio on the quality of LPDC cast wheels", *High Tech Die Casting, Associazione Italiana Di Metallurgia, Venice, Italy*.
2. Erzi, E., Gürsoy, Ö., Dışınar, D., Yüksel, Ç., ve Küçük, A. O. (2016). "Characterisation of properties of V, B, Mo, Sr additions on HPDC of A380 alloy", *High Tech Die Casting, Associazione Italiana Di Metallurgia, Venice, Italy*.
3. Erzi, E., Dışınar, D., Yüksel, Ç., ve Koca, E. (2016). "Quality control and its importance on rejection rate of LPDC cast wheels", *High Tech Die Casting, Associazione Italiana Di Metallurgia, Venice, Italy*.
4. Vardar, O., Ergün, I., Erzi, E., Dışınar, D., ve Yüksel, Ç. (2016). "Optimization of production parameters for semisolid casting of 6082", *High Tech Die Casting, Associazione Italiana Di Metallurgia, Venice, Italy*.
5. Yüksel, Ç., Tamer, Ö., Erzi, E., Dışınar, D., ve Çiğdem, M. (2016). "Effect of scrap on the mechanical properties of low pressure die casting products", *Advances in Applied Physics and Materials Science. APMAS 2016*.
6. Erzi, E., Yüksel, Ç., Gürsoy, Ö., ve Dışınar, D. (2016). "Mould filling ability and mechanical properties of SIMA produced 7075", *Advances in Applied Physics and Materials Science. APMAS 2016*.
7. Yüksel, Ç., Gürsoy, Ö., Erzi, E., ve Dışınar, D. (2016). "Effect of vanadium on the mechanical properties of A360 HPDC", *Advances in Applied Physics and Materials Science. APMAS 2016*.
8. Seçil, D., Gürsoy, Ö., Yüksel, Ç., Erzi, E., ve Dışınar, D. (2016). "Wear properties of B refined hypereutectic Al-Si alloy", *Advances in Applied Physics and Materials Science. APMAS 2016*.

9. Gürsoy, Ö., Yüksel, Ç., Erzi, E., ve Dışpınar, D. (2016). „Ti grain refinement myth and tensile properties of A356 alloy”, Advances in Applied Physics and Materials Science. APMAS 2016.

10. Yorulmaz, A., Yüksel, Ç., Erzi, E., ve Dışpınar, D. (2016). “Effects of Casting Conditions on End Product Defects in Direct Chill Casted Hot Rolling Ingots”, 2016 TMS Annual Meeting & Exhibition, Shape Casting: 6th International Symposium. Nashville, Tennessee, ABD.

11. Gürsoy, Ö., Yüksel, Ç., Erzi, E., ve Dışpınar, D. (2016). “Effect of Duration on Ti Grain Refinement of A356 and Melt Quality”, 2016 TMS Annual Meeting & Exhibition, Shape Casting: 6th International Symposium. Nashville, Tennessee, ABD.

12. İpek, S. K., Yüksel, Ç., Erzi, E., ve Dışpınar, D. (2016). “Change in Si Morphology with Time and Temperature in Sr Modified A356”, 2016 TMS Annual Meeting & Exhibition, Shape Casting: 6th International Symposium. Nashville, Tennessee, ABD.

13. Vardal, Ö., Ergün, İ., Yüksel, Ç., Erzi, E., & Dışpınar, D. (2016). “Mould Filling Ability Characterisation of SIMA Produced 6063 Alloy”, 2016 TMS Annual Meeting & Exhibition, Shape Casting: 6th International Symposium. Nashville, Tennessee, ABD.

14. Gürsoy, Ö., Yüksel, Ç., Erzi, E., ve Dışpınar, D. (2016). “Effect of duration on Ti grain refinement of A356 and melt quality”, 2016 TMS Annual Meeting & Exhibition, Shape Casting: 6th International Symposium. Nashville, Tennessee, ABD.

15. Aydın, E., Yüksel, Ç., Erzi, E., ve Dışpınar, D. (2016). “SiC particle reinforced Al matrix composite by SIMA”, 2016 TMS Annual Meeting & Exhibition, Shape Casting: 6th International Symposium. Nashville, Tennessee, ABD.

16. Akçakoca, İ., Erzi, E., Yüksel, Ç., ve Dışpınar, D. (2015). “Deformasyon Oranına Göre 4006 ve 99,5 Al Alaşımında İletkenlik Değişimi”, 7. Alüminyum Sempozyumu. ALUS '07, (pp. 584-592).

17. Yüksel, Ç., Erzi, E., Tamer, Ö., Dışpınar, D., ve Çiğdem, M. (2015). „Yeniden Ergitilmiş A356 Alüminyum Alaşımı Hurdasının Çekme Dayancı Üzerine Olan Etkileri“, 7. Alüminyum Sempozyumu. ALUS '07, (pp. 359-364).

18. Yüksel, N., Tomoğlu, S., Erzi, E., Yüksel, Ç., ve Dışpınar, D. (2015). “Kaybolan Köpük Yöntemi Kullanılarak Al-Si Alaşımlarının Akışkanlığının İncelenmesi”, 7. Alüminyum Sempozyumu. ALUS '07, (pp. 325-332).

19. Gürsoy, Ö., Erzi, E., Dışpınar, D., ve Yüksel, Ç. (2015). “A356 Alüminyum Döküm Alaşımına Al-5Ti-1B Tane İnceltici İlavesinin Süreye Bağlı Etkisi”, 7. Alüminyum Sempozyumu. ALUS '07, (pp. 318-324).

20. Aydın, E., Erzi, E., Yüksel, Ç., ve Dışpınar, D. (2015). “SIMA Yöntemi ile SiC Takviyeli A380 ve 6063 Kompozit Üretimi”, 7. Alüminyum Sempozyumu. ALUS '07, (pp. 555-563).

Ulusal Bildiri

1. Özgür, A., Yüksel, Ç., Gürsoy, Ö., Songül, E., Erzi, E. ve Dışpınar, D., (2016). “İnsansız Hava Araçları Motor Bloğu Olarak Kullanılabilecek Alüminyum Alaşımının Tercihî”, Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 28-30 Eylül 2016, UHUK-2016-107.

PROJELERİ

1. Al7Si0.3Mg Alüminyum Alaşımlarında Ultrasonik Gaz Giderme Yöntemlerinin Gaz Giderme İşlemine Uyarlanması ve Konvansiyonel Gaz Giderme Yöntemleri ile Karşılaştırılması, *TÜBİTAK*, Aralık 2016 – Ocak 2017, Araştırmacı.
2. Alüminyum Ergitmesinde ve Geri Dönüşümünde Metal Kayıplarının ve Ergitme Kayıplarının Azaltılması ve Sıvı Metal Kalitesinin Artırılması, *YTÜ BAPK Projesi*, Mart 2013-2016, Araştırmacı.
3. Geri Dönüşüm Alüminyum Alaşımların Metal Kalitesinin İyileştirilmesi ve Kullanımının Artırılması, *SANTEZ*, Mart 2015-Temmuz 2016, Bursiyer
4. Alüminyum Alaşımlarında İnküzyonların Giderilmesi, *TÜBİTAK*, Temmuz 2014-Temmuz 2016, Araştırmacı.
5. Havacılık Sektörüne Yönelik Alüminyum Alaşımlı, Yüksek Mukavemetli, Porozitesiz Motor Bloğunun Prototip İmalatı, *TÜBİTAK*, Ocak 2015-Mayıs 2016, Araştırmacı.
6. Rüzgâr Türbini Pervane Göbeği Üretimi ve Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi, *SANTEZ*, Aralık 2009 – Mart 2011, Bursiyer.

ÖDÜLLERİ

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilim Teşvik Ödülü, 2014.
2. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilim Teşvik Ödülü, 2013.
3. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilim Teşvik Ödülü, 2012.