

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUMUN GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Necdet İZGİ**

Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Üretim Metalurjisi ve Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof.Dr. M. Ercan AÇMA

MAYIS 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUMUN GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Necdet İZGİ
(506071227)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 06 Mayıs 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mahmut Ercan Açma (İ.T.Ü.)

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Alim Gül (İ.T.Ü.)

Yrd. Doç. Dr. Cevat Bora Derin (İ.T.Ü.)

MAYIS 2011

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca tez yönetimimi üstlenen değerli hocam Prof.Dr. Mahmut Ercan AÇMA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen Metalurji Yüksek Mühendisi arkadaşım Gökhan KİPER'e, Metalurji Yüksek Mühendisi arkadaşım Güvenç GÜVEN'e ve bütün DT Metal San.Tic.A.Ş çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2011

Necdet İZGİ
(Metalurji Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Alüminyum Geri Dönüşümünün Kısa Tarihçesi.....	2
1.2 Geri Dönüştürmenin Avantajları ve Güçlükleri.....	4
2. ALÜMİNYUM GERİ DÖNÜŞÜM EKONOMİSİ.....	9
2.1 Alüminyum Üretiminin Tarihi	9
2.2 Birincil Alüminyum Üretimi.....	10
2.3 Kullanımları	11
2.4 Alüminyumun Geri Dönüşümü	12
2.4.1 Kullanılmış alüminyum kutularının geri dönüşümü.....	15
3. ZENGİNLEŞTİRME TEKNOLOJİSİ	19
3.1 Parçalama	19
3.2 Ayrıştırma	24
3.2.1 Elle ayırma	24
3.2.2 Hava ile ayrıştırma	26
3.2.3 Manyetik ayrıştırma.....	27
3.2.4 Heavy-Media Separation (HMS) yöntemiyle ayrıştırma.....	32
3.3 Boyanın Temizlenmesi	36
3.4 Partiler Halinde Ergitme	36
3.5 Terleterek Ergitme	37
4. ERGİTME FIRINLARI HAKKINDA TEMEL BİLGİLER.....	39
4.1 Isı Transfer Kinetikleri	39
4.2 Fırının Yanması.....	41
4.3 Flaksın Temel Kimyası.....	42
4.4 Refrakter (Ateşe Dayanıklı) Ekileşimleri	44
5. ERGİTME FIRINI VE PARÇALARI	47
5.1 Brülörler	47
5.1.1 Zenginleştirilmiş havanın kullanılması.....	47
5.1.2 Alev manipülasyonu	49
5.1.3 Perdeler / Bölmeler	50
5.2 Refrakterler	50
5.3 Karıştırma	51
6. FOSİL YAKITLI FIRINLAR	55
6.1 Tek Bölmeli Fırınlar	55

6.2 Çok Bölmeli Fırınlr	60
6.3 Küçük Hacimli Fırınlr	63
6.4 Döner Fırınlr	63
6.5 Bekletme ve Dozlama Fırınlr	65
7. ELEKTRİKLİ ERGİTME FIRINLARI	67
7.1 İndüksiyon Fırınlr	68
7.2 Çekirdeksiz Fırınlr	69
7.3 Rezistanslı Fırınlr	73
8. METALİ RAFİNE ETME VE SAFLAŞTIRMA	77
8.1 Ergiyik Alüminyum İçerisindeki Yaygın Safsızlıklar	78
8.2 Safsızlık Temizleme İşleminin Temel Özellikleri	81
8.2.1 Hidrojen	81
8.2.2 İnküzyonlar	85
8.3 Rafine Etme Stratejisi	87
8.3.1 Ergitme fırını	88
8.3.2 Pota ön işlemi	88
8.3.3 Döküm fırını	89
8.4 Sıralı Gaz Alma	91
9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	95
9.1 Deneylerde Kullanılan Sarf Malzemeleri	96
9.2 Deneylerde Kullanılan Alet ve Cihazlar	98
9.3 Deneyisel Çalışmalarda Belirlenen Parametreler	100
9.4 Ergitme	101
9.4.1 Alüminyum içecek kutularının ergitmesi sırasında gözlenen kayıplar ...	101
9.4.2 İçecek kutusu yeniden ergitme spektrometre analizi karşılaştırması:	101
9.4.3 Deney sonuçları	102
9.5 Rafinasyon	103
9.5.1 N ₂ + Cl ₂ Karışımının ergitme fırınında bir lans aracılığı ile verilmesi ile yapılan deneyler	103
9.5.2 Gaz giderici tabletler ile yapılan deneyler	104
9.5.3 Flaksın N ₂ ile akışkanlaştırılarak sıvı metale püskürtülmesi ile yapılan deneyler	104
9.5.4 Deney sonuçları	104
9.5.5 Deney sonuçları	111
9.6 AITİB Mastır Alaşımı İlavesinin AA 3105 Döküm Alaşımı Üzerinde Tane inceltme Etkisinin İncelenmesi	116
9.6.1 Deneyin uygulanması	117
9.6.2 AA 3105 hurda (dökümhane döngüsü) alaşımı tane inceltme deneyleri sonuçları	119
9.6.3 Deney sonuçları	121
9.6.4 Tane incelticilerin karşılaştırılması	121
10. GENEL SONUÇLAR	125
11. SONUÇLARIN İRDELENMESİ	127
12. ÖNERİLER	129
KAYNAKLAR	131
ÖZGEÇMİŞ	135

KISALTMALAR

KMK	: Kullanılmış Meşrubat Kutuları
KGDE	: Konteynır Geri Dönüştürme Enstitüsü
ECS	: Eddy-Current Sorting
HMS	: Heavy-Media Separation
PVC	: Polyvinyl Chloride

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	: 2000 – 2004 yılları arasında ABD’de alüminyum üretiminin istatistiği (Tietenberg, 2006).	13
Çizelge 3.1	: Bazı metallerin δ/ρ değeri (Mutz, 2003).	29
Çizelge 3.2	: Alüminyum ve genel atıkların yoğunlukları (Mutz, 2003).	33
Çizelge 8.1	: Birincil ve ikincil alüminyum eriyiğindeki yaygın safsızlıklar (Fielding, 1996).	78
Çizelge 9.1	: 1050A Alüminyum alaşımının kimyasal içeriği.....	96
Çizelge 9.2	: 3105 Alüminyum alaşımının kimyasal içeriği	97
Çizelge 9.3	: 8006 Alüminyum alaşımının kimyasal içeriği	97
Çizelge 9.4	: 8011A Alüminyum alaşımının kimyasal içeriği.....	97
Çizelge 9.5	: Promag® R1 Flaksının Başlıca Özellikleri	98
Çizelge 9.6	: İçecek kutusu (AA3105) yeniden ergitme spektrometre analiz değerleri.....	102
Çizelge 9.7	: Alüminyum AA 3105 kompozisyon değerleri	102
Çizelge 9.8	: 8011A alaşımı ile yapılan gaz giderme sonuçları.....	105
Çizelge 9.9	: 1050 alaşımı ile yapılan gaz giderme sonuçları.....	105
Çizelge 9.10	: 8006 alaşımı ile yapılan gaz giderme sonuçları.....	106
Çizelge 9.11	: 3105 alaşımı ile yapılan gaz giderme sonucu.....	106
Çizelge 9.12	: 8006 alaşımı ile yapılan tekrarlı gaz giderme işlemi sonucunda metalde kalan hidrojen değerleri	107
Çizelge 9.13	: 30 kg/30 ton alaşım dozajında tablet ilavesinde alaşımda kalan hidrojen miktarları	108
Çizelge 9.14	: 60kg/30 ton alaşım dozajında tablet ilavesinde alaşımda kalan hidrojen miktarları	108
Çizelge 9.15	: Black Lab Corp. FF05 tipi enjeksiyon cihazı ile karnalit flaksı ve azot gazı ile yapılan gaz giderme işlemlerinde kalıntı hidrojen miktarları	109
Çizelge 9.16	: Black Lab Corp. FF05 tipi enjeksiyon cihazı kullanılarak azot gazı ile yapılan gaz giderme işlemlerinde örtü flaksı ilaveli deneylerde kalıntı hidrojen miktarları.....	110
Çizelge 9.17	: Değişik gaz giderme yöntemlerinde metalde kalan magnezyum ve sodyum miktarları	110
Çizelge 9.18	: Üç gaz giderme yönteminde ulaşılan nihai hidrojen kalıntı ve ametal/mm ² miktarları.....	111
Çizelge 9.19	: Tane inceltme deneme parametreleri ve sonuçları	122

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: 1913–2000 yılları arasında ABD’de geri dönüşüm yoluyla elde edilen alüminyum tüketim yüzdesi (Alüminyum Derneği, 2000).....	2
Şekil 1.2	: 1946-1989 döneminde Üretici tipine (A Eğrisi), hurda tipine (B eğrisi) göre alüminyum geri kazanımı (van Linden, 1990).....	3
Şekil 1.3	: Cevherden alüminyum üretimi için enerji gereksinimi (13.6 GJ/ton enerji) (Rombach, 1998).....	5
Şekil 1.4	: Hurdadan alüminyum üretimi için enerji gereksinimi (13.6 GJ/ton enerji). (Rombach, 1998).	5
Şekil 2.1	: 1992–2004 yılları arasında Dünya’da alüminyum üretimi (Tietenberg, 2006).	14
Şekil 2.2	: 2000-2004 yılları arasında Dünya ve ABD’deki birincil alüminyum üretimi (Tietenberg, 2006).....	14
Şekil 2.3	: 1990–2004 yılları arasında geri dönüştürülmüş alüminyum kutularının oranı (Tietenberg, 2006).....	15
Şekil 2.4	: 1980–2005 yılları arasındaki alüminyum fiyatları (Tietenberg, 2006).	17
Şekil 3.1	: Timsah makaslar (Kiser, 2003).	20
Şekil 3.2	: Vince monte edilmiş kesici (Kiser, 2003).....	21
Şekil 3.3	: Giyotin kesici (Kiser, 2003).	22
Şekil 3.4	: Çarpmalı kesiciden bir görünüm (Kiser, 2003).	22
Şekil 3.5	: Çift rotorlu döner kesici (Kiser, 2003).....	23
Şekil 3.6	: Döner kesici bıçakları (Sullivan, 1985).....	23
Şekil 3.7	: Zig-zag hava tasnif cihazı (Mutz, 2003).	26
Şekil 3.8	: Hava masası (Mutz, 2003).....	27
Şekil 3.9	: Dram ve taşıyıcı kemer manyetik ayırıştırıcılar (Mutz, 2003).	28
Şekil 3.10	: Kıyıcıdan geçirilerek yapılan manyetik ayırıştırma işlemi (Mutz, 2003).	28
Şekil 3.11	: Eddy-Current ayırıştırıcısının şeması (Mutz, 2003).	30
Şekil 3.12	: Konveyör tipi Eddy-Current ayırıştırıcısının şeması (Mutz, 2003).	31
Şekil 3.13	: İndüksiyonla ayırıştırma yöntemiyle metallerin non-metallerden ayrılması işlemi (Mutz, 2003).	32
Şekil 3.14	: Hidrolik ayırıştırıcı (Mutz, 2003).	34
Şekil 3.15	: Heavy–Media ayırıştırıcı (Mutz, 2003).....	35
Şekil 3.16	: Büyük döner fırın (Nijkerk ve Dalmijn, 1998).....	38
Şekil 4.1	: Reverber fırınının kesiti (Wechsler ve Gitman, 1990).....	39
Şekil 4.2	: Brülör (Wechsler ve Gitman, 1990).....	41
Şekil 4.3	: Florür içeren eritkenlerin ergiyik cüruftaki damlaların birleşmesi üzerindeki etkisi (Van Linden, 1990).....	43

Şekil 4.4	: Alüminyum silisyum faz diyagramı (Quesnel, Afshar ve Allaire, 1996).....	45
Şekil 5.1	: Oksijen zenginleştirmenin doğalgaz alev sıcaklığı üzerindeki etkisi (Wechsler ve Gitman, 1990).....	48
Şekil 5.2	: Oksijen zenginleştirmesinin doğalgaz alevi akışkanlığı üzerindeki etkisi (Wechsler ve Gitman, 1990).....	48
Şekil 5.3	: Ergitme fırını için kompozit tek parça refrakter yapısı (Afshar ve Allaire, 1996).....	51
Şekil 5.4	: Jet karıştırıcı şeması (Henderson, 1996).....	53
Şekil 5.5	: Ergitme fırınına monte edilmiş bir elektromanyetik pompa (Henderson, 1996; Peel, 2003).....	53
Şekil 5.6	: Tabana monte edilen elektromanyetik karıştırıcının şeması (Peel, 2003).....	54
Şekil 6.1	: Islak tabanlı ergitme fırını (Anderson, 1931).....	56
Şekil 6.2	: Bacalı ergitme fırını (Groteke 1992).....	58
Şekil 6.3	: Dikey kuleli ergitme fırını (Groteke 1992).....	59
Şekil 6.4	: Premelt Systems vorteks fırını (Groteke 1992).....	61
Şekil 6.5	: Lotuss hurda daldırma sistemi (Van Linden, 1998).....	61
Şekil 6.6	: Kirli hurdalar için ikiz bölmeli ergitme fırınının üstten görünüşü (van Linden, 1990).....	62
Şekil 6.7	: Döner ergitme fırınından bir görüntü (Peterson, 1990).....	64
Şekil 7.1	: Çekirdeksiz indüksiyon fırının yapısı (Perkul, 1972).....	70
Şekil 7.2	: Çekirdeksiz indüksiyon fırın yükü ile farklı frekanslardaki karşılaştırılması (Smith ve Hayes, 1992).....	72
Şekil 7.3	: Rezistanslı bekletme fırınından bir kesit (Smith ve Hayes, 1992).....	75
Şekil 8.1	: 727 °C’de alüminyum eriyiğinin metal flüorür safsızlıklarıyla olan reaksiyonunda kullanılan denge sabitinin logaritması (Sigworth, 1999).....	83
Şekil 8.2	: Derin yatak filtreleme mekanizması (Peterson, 1995).....	86
Şekil 8.3	: Alüminyum ergitme ve rafine etme akış şeması (Peterson, 1995).....	87
Şekil 8.4	: Alüminyum ergiyiğinde Ar ve Ar-5% Cl ₂ karışımı kullanılarak rafine etme sırasında ergiyikteki hidrojen içeriğinin karşılaştırılması (Fielding, 1996).....	90
Şekil 8.5	: Alüminyum ergiyiğinde Ar ve Ar-5% Cl ₂ karışımı kullanılarak rafine etme sırasında ergiyikteki inklüzyon oranlarının zamana bağlı olarak karşılaştırılması (Fielding, 1996).....	90
Şekil 8.6	: Alüminyum ergiyiğinde Ar ve Ar-5% Cl ₂ karışımı kullanılarak rafine etme sırasında ergiyikteki magnezyum ve alkali oranlarının zamana bağlı olarak karşılaştırılması (Fielding, 1996).....	91
Şekil 8.7	: SN1F gaz giderme makinesinin şeması (DeRidder and Terrier, 1999).....	91
Şekil 8.8	: Alcan kompakt gaz gidericinin şeması (Fielding, 1996).....	92
Şekil 9.1	: DT Metal Dökümhane Yerleşme Düzeni A)Sürekli Döküm Hatları Ergitme Fırınları B)Yarı Sürekli Döküm Hattı Ergitme Fırınları C)Sürekli Döküm Hattı Bekletme Fırınları D)Yarı Sürekli Döküm Hattı Bekletme Fırını E)İkiz Merdane Tipi Sürekli Döküm Hattı F)Yarı Sürekli Bilet Döküm Hattı.....	96

Şekil 9.2	: Black Lab Corp. FF05 gaz alma ve flaks enjeksiyon cihazı.....	99
Şekil 9.3	: Leco RH 402 hidrojen analiz cihazı.....	99
Şekil 9.4	: ARL Spektrometre.....	100
Şekil 9.5	: Metalografi Laboratuvarları	100
Şekil 9.6	: 8006 alaşımının tablet ile degaze edilmesinden sonra elde edilen metalografik imaj (X100)	114
Şekil 9.7	: 8006 alaşımının %90azot+%10klor karışımı ile degaze edilmesinden sonra elde edilen metalografik imaj (X100)	115
Şekil 9.8	: 8006 alaşımının enjeksiyon cihazı ile degaze edilmesinden sonra elde edilen metalografik imaj (X100).....	115
Şekil 9.9	: Tane inceltme numunesinin soğutmasının yapıldığı düzeneğin şematik gösterimi.	117
Şekil 9.10	: Tane inceltme deney külçesi	118
Şekil 9.11	: Tane inceltme deney numunesi ölçüleri.....	118
Şekil 9.12	: a) Al5Ti1B ilavesiz, b) Al5Ti1B ilavesinden 5 dk. sonra tane yapısı.....	120
Şekil 9.13	: a) Al5Ti1B ilavesinden 25 dk sonra, b) Al5Ti1B ilavesinden 60 dk. sonra	120
Şekil 9.14	: AA 3105 hurda alaşımına katılan Al5Ti1B mastır alaşımının bekletme zamanına göre tane boyutu değişimi	121
Şekil 9.15	: Tane inceltme denemelerinde verimlilik karşılaştırmaları.....	122
Şekil 9.16:	Al5Ti1B (%0.10) Mikroyapıdaki Dendrit kolları uzunlukları.....	123
Şekil 9.17	: COVERAL MTS 1584 (% 0.04) Mikroyapıdaki Dendrit kolları uzunlukları.....	123

ALÜMİNYUMUN GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Alüminyum metalinin üretimiyle ilgili kitapların hepsi önceleri doğal ham maddelerden geri kazanımı üzerinde odaklanmıştır. Alüminyumun ana doğal cevheri hidratlı alüminyum oksit içeren bir maden olan boksittir. Alüminyum Bayer prosesi olarak bilinen (Wolf ve Hoberg, 1997), safsızlıkların geride bırakılarak alüminyumun çoğunluğunun çözündüğü seçici bir çökeltme işlemiyle boksitten kazanılmaktadır. Alüminyum, alüminyum hidroksit olarak çökeltilerek solüsyondan geri kazanılır. Ardından hidroksit kurutulur ve saflaştırılmış alümina elde etmek için kalsine edilir. Kalsine edilen alümina kriyolit (Na_3AlF_6) bazlı ergiyik tuz elektroliti içeren elektrolitik hücrelere beslenir. Alümina kriyolit içinde çözünür ve ergiyik alüminyum metali ve karbondioksit gazı oluşturacak biçimde elektrolize olur. Bu proses 1800'li yılların sonlarından bu yana itibaren alüminyum metalinin üretilmesinde birincil yöntem olarak kullanılagelmıştır ve daha uzun bir süre daha bu rolü sürdüreceğe benzemektedir.

Bu tez hurda alüminyumun geri dönüşüm sürecine göre okuyuculara rehberlik edecektir. Tez cevher gövdesinde yer alan “minerallerin” (alüminyum alaşımları) tanıtımıyla başlayacak ve içinde hurda alüminyum barındıran çeşitli “madenleri” tanıtacaktır. Ardından, hurda alüminyumu katışık olduğu diğer maddelerden ayırmak için kullanılan uygulamaları ve kaplamalardan ve diğer safsızlıklardan arındırma yöntemlerini ele alacaktır. Devamındaki bölümler de ise geri kazanımı yapılan hurdanın yeniden eritilmesinde kullanılan fırınları ve alüminyumun saflığını ve kalitesini arttırmak için kullanılan rafine etme tekniklerini anlatacaktır.

RECYCLING OF ALUMINIUM AND IMPROVING ITS QUALITIES

SUMMARY

Books on the production of aluminium metal have previously focused on its recovery from naturally occurring raw materials. The primary natural ore for aluminium is Bauxite, a mineral consisting primarily hydrated aluminium oxides. Aluminium is recovered from Bauxite by a selective leaching sequence known as the Bayer Process (Wolf and Hoberg, 1997), which dissolves most of the Aluminium while leaving impurities behind. The aluminium is recovered from the leach solution by precipitating by its aluminium hydroxide. The hydroxide is then dried and calcined to generate purified alumina. The calcined alumina is fed to electrolytic cells containing a molten salt electrolyte based on cryolite (Na_3AlF_6). The alumina dissolves in cryolite and is electrolyzed to generate molten aluminium metal carbon dioxide gas. This process has been the sole approach for producing primary aluminium metal since the late 1800s and will likely continue in this role for decades to come.

This thesis will lead readers through the sequence used for recycling scrap aluminium. It will start with a description of the minerals (‘‘aluminium alloys’’) that are contained in the ore body and describe the various ‘‘mines’’ where aluminium scrap is found. It will then describe the practices used to separate scrap aluminium from the other materials with which it is mixed and the means for purifying it of coatings and other impurities. Subsequent chapters will the furnaces used for remelting the recovered scrap and the refining techniques using for improving its purity and quality.

1. GİRİŞ

Alüminyum madeninin endüstriyel ölçekli olarak kullanılmasının sadece yüzyıllık bir geçmişi vardır. Ancak bu kısa süre zarfında sektör, metal üreticileri arasında demir- çelik sanayinden sonra ikinci sırayı alacak kadar gelişmiştir (Mahi, 1990). Alüminyum kullanımının yaygınlaşması özellikle II. Dünya Savaşı'nın ardından olmuş ve sanayinin her dalında bir kuşak öncesine kadar alüminyumdan üretilmeyip de şu anda başlıca üretim maddesi olarak alüminyumun kullanıldığı çok sayıda ürüne işaret edilmektedir. Diğer binlerce ürünün yanında içecek kutuları, spor ekipmanları, elektrik trafoları, pencereler hepsi alüminyumdan üretilmektedir.

Ancak, geride bıraktığımız son on yirmi yıllık sürede dünya alüminyum ihtiyacının büyük bir bölümü başka bir "cevher" kaynağından gelmiştir. Bu cevher endüstriyel atıklardan ve atılan tüketici ürünlerinden geri dönüşüm yoluyla kazanılan alüminyumdur. Bu yeni alüminyum metali ve alaşımları üretmek üzere hurdanın işlenmesi geri dönüşüm olarak bilinmekte ve bu yolla üretilen metal genellikle ikinci derece olarak ifade edilmektedir. Günümüzde dünyada üretilen alüminyumun üçte biri ikincil kaynaklardan elde edilmekte ve bazı ülkelerde bu oran daha da yüksektir. Sonuç olarak geri kazanım yoluyla alüminyumun ekstraksiyonu tartışmaya değer bir konu haline gelmektedir. Alüminyum hurdasının geri dönüşümünde kullanılan süreçler metalin ilk üretiminde kullanılanlardan oldukça farklıdır ancak birçok yönden aynı genel sırayı izlemektedir. Bu sıra cevherin "çıkartılmasıyla" başlar, madenin işlenmesi, ısıl ön işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve eritme aşamasıyla devam eder. Metal rafine edilir, külçeler halinde dökülür, silindire levhalar haline getirilir ve müşterilere gönderilir. Alüminyum geri dönüşüm kuruluşları da metalin ilk üreticilerinin yüz yüze kaldıkları benzer zorluklarla karşılaşmaktadırlar: Gerekli kimyaya uygun tutarlı bir alaşım üretme ihtiyacı, enerji kullanımını en aza indirme, üretilen atık miktarını en aza indirme, kimyası ve durumu belirsiz çeşitli maddelerden mümkün olan en düşük maliyetle en yüksek kalitede ürün üretme.

1.1 Alüminyum Geri Dönüşümünün Kısa Tarihçesi

Alüminyumun başarılı biçimde geri dönüşümü bazı faktörlere bağlıdır:

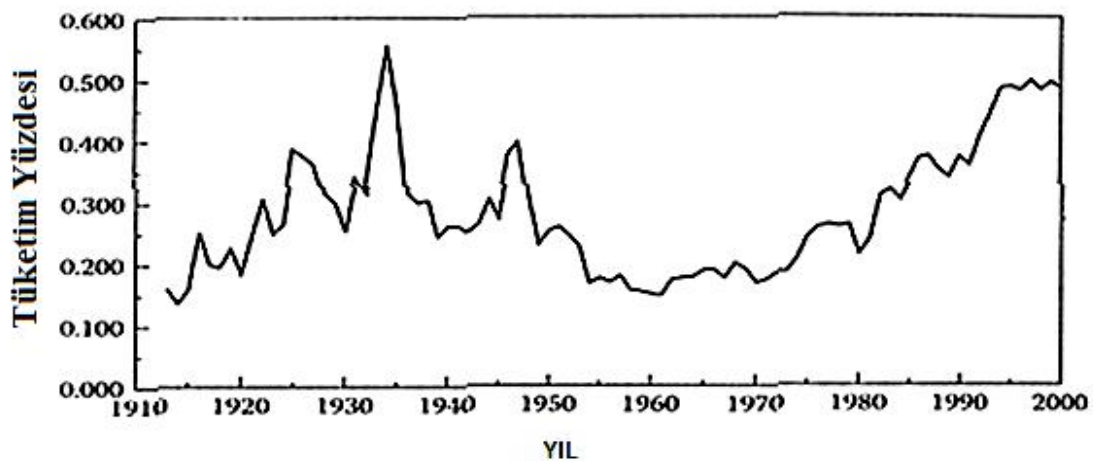
Toplama maliyetini düzenlemek için bir alanda yoğunlaşan yeterli ve sürekli metal kaynağının bulunması.

Hurda metallerin toplanması, safsızlıkların arındırılması ve geri dönüşüm tesisine gönderilmesi için bir madencilik altyapısının bulunması.

Madenin ilk kaynağından üretilmesiyle ekonomik olarak rekabet edebilecek metal geri dönüşüm yönteminin kullanılması.

Maden olarak çıkarılan haliyle aralarında kalite farkının bulunması halinde geri dönüşüm yoluyla elde edilen metal için pazar bulunması.

Büyük ölçekli alüminyum üretimi Hall- Heroult'un ergiyik tuz banyosundan alüminyum metalini geri kazandığı elektrolitik prosesini geliştirdiği 1890'lı yıllara kadar yapılmıyordu. Bu nedenle, alüminyum geri dönüşümünün başlangıcı 1900'li yılların başlarına kadar yapılmadı (Alüminyum Derneği, 2000). Aşağıdaki Şekil 1.1 1913- 2000 yılları arasında Amerika Birleşik Devletlerinde geri dönüşüm yoluyla elde edilen alüminyumun tüketim yüzdesini göstermektedir (en eksiksiz istatistiklerin kaynağı). Değişen yüzdeler cevherden maden elde etmek yerine hurdanın işlenerek geri kazanılmasına etki eden bazı faktörleri göstermektedir:

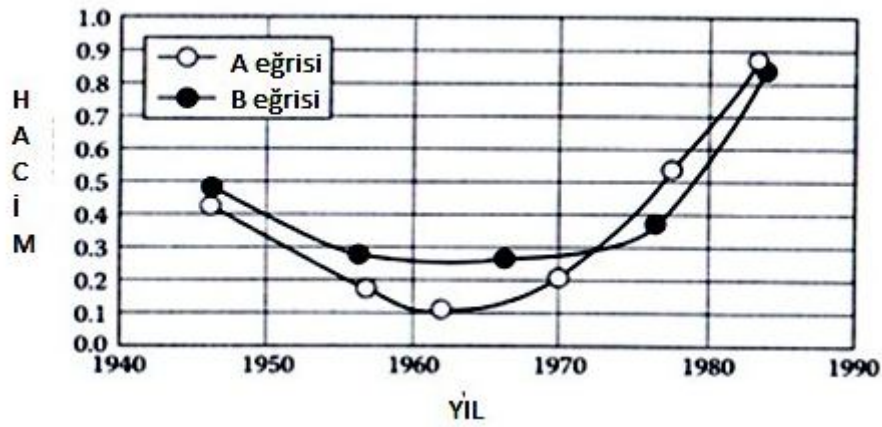


Şekil 1.1 : 1913–2000 yılları arasında ABD’de geri dönüşüm yoluyla elde edilen alüminyum tüketim yüzdesi (Alüminyum Derneği, 2000).

Talepteki ani artış: Alüminyum kaynağı olarak hurdanın önemi özellikle dünya savaşları sırasında sıçrama göstermiştir (Anderson, 1931; Smith, 1946; Martchek,

1997; Morrison, 2005). Bunun nedeni de alüminyuma olan ihtiyacın yeni döküm fırınlarının inşa edilebileceği süreden daha hızlı artış göstermiş olmasıdır. Cevherden maden üretim kapasitesi talebe cevap vermeye başlayınca, ikincil kaynaklardan alüminyum elde etme işinin de payı azalmıştır.

Şekil 1.2'deki B eğrisi, zaman içinde Amerika Birleşik Devletlerinde kullanılan “eski” (tüketim sonrası) hurdanın “yeni” (endüstriyel) hurdaya olan oranını göstermektedir (Van Linden, 1990). Savaş zamanı hurda akışı nedeniyle bu oran 1940’larda 1950’lere kıyasla daha fazlaydı.



Şekil 1.2 : 1946-1989 döneminde üretici tipine (A Eğrisi), hurda tipine (B eğrisi) göre alüminyum geri kazanımı (van Linden, 1990).

Cevherden alüminyum üretiminin maliyeti: 1930’lu yılların sonlarıyla 1950’li yıllarda ABD’de alüminyum üretiminde hurdanın önemi azaldı. Bunun nedeni ise büyük miktarlarda düşük maliyetli hidroelektrik enerjisi. Bu da karşılık olarak yeni alüminyum döküm fabrikalarının inşasını teşvik etti ve hurdaya olan talebi azalttı (Van Linden, 1985). Son yıllarda, enerji maliyetlerindeki artış Amerika Birleşik Devletleri’nde ve Avrupa’da cevherden alüminyum üreten fabrikaların kapanmasına ve hurdadan alüminyum üretiminin daha önemli hale gelmesine neden olmuştur. Şekil 1.2’deki A eğrisi Amerika Birleşik Devletlerinde yıllara göre ana alüminyum üreticileri tarafından kullanılan hurdanın ikincil (geri dönüşüm) dökümhanelerce kullanılan kısmına oranını göstermektedir (Van Linden, 1990). Ucuz cevherden üretilmiş alüminyum hurda alımlarını masraflı hale getirince 1950’lerde ve 1960’lılarda bu oran en az seviyeye indi. 1970’lerde ve 1980’lerde cevherden alüminyum üretim maliyetleri arttığı için, ana üreticiler için hurda daha çekici hal

almaya başladı ve ana endüstride geri dönüşüm yoluyla kazanılmış hurdanın payı da paralel olarak artış göstermiştir. Şu andaki oran 1.0'ı aşmaktadır.

Hükümetin etkisi, 1960'lardan başlayarak her düzeydeki hükümetler sanayi toplumları tarafından atılan atıkların miktarı konusunda giderek daha fazla endişe duymaya başladılar. Bunun sonucu olarak atık bertarafının en aza indirilmesini ve geri kazanımı teşvik etmek için tasarlanmış bir dizi yasa ve düzenleyici inisiyatifin geliştirilmesi olmuştur. Şekil 1.2'deki B eğrisinde görülen 1970'lerden itibaren eski-yeni hurda oranındaki artış çoğunlukla alüminyumdan yapılmış kullanılmış içecek kutularının toplanmasından ve geri dönüşümünden elde edilmiştir. Bu gayretler teneke kutular üzerindeki sınırlamaları ve zorunlu depozitolardan kaçmaya çalışan alüminyum endüstrisi tarafından da desteklenmiştir.

Kalitenin artması, sanayinin ilk yıllarında geri dönüşüm tesislerince üretilen ikincil alüminyumun cevherden üretilen alüminyumdan daha düşük kalitede olduğu düşünülmüştür (Anderson, 1931; Smith, 1946). Bu da büyük oranda yapılan kimyasal kontrollerin zayıf olmasından dolayı belirsiz bileşik oranlarından kaynaklanmıştır. Yine aynı şekilde posa ve cürufaların yeterince atılamaması metalde çok sayıda safsızlığın da yer almasına neden olmuştur. Daha sıkı nitelik kontrolleri uygulamaya konulduktan ve gelişmiş rafine teknolojisi daha fazla safsızlığı ve katışık maddeleri temizleyince, bu kötü şöhret de kendiliğinden yok olmaya başlamıştır.

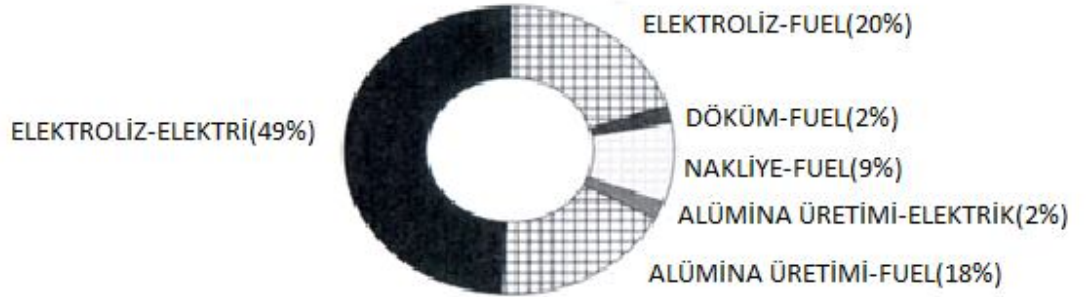
Alüminyum geri dönüşüm önce doğrudan dökümhaneler tarafından ön işlem (arıtma) yapılmadan doğrudan tüketilen satın alınmış hurdayla gerçekleştirilmiştir (Alüminyum Derneği, 2000). Ancak, hurda daha uzun mesafeler kat etmeye başlayınca ve içerikle ilgili güvenilirlik artınca, daha yüksek tutarlılığa sahip hurda ürün üretme istenilen bir durum haline geldi.

Bunun sonucu olarak da ikincil izabe tesisleri de 1910'dan itibaren görülmeye başlanmıştır (Hollowell, 1939). Bu izabe tesisleri birden fazla standardize tenörden eşleşen bir tanesini içeren karışık hurda yüklerinden ikincil külçeler üretmektedir.

1.2 Geri Dönüştürmenin Avantajları ve Güçlükleri

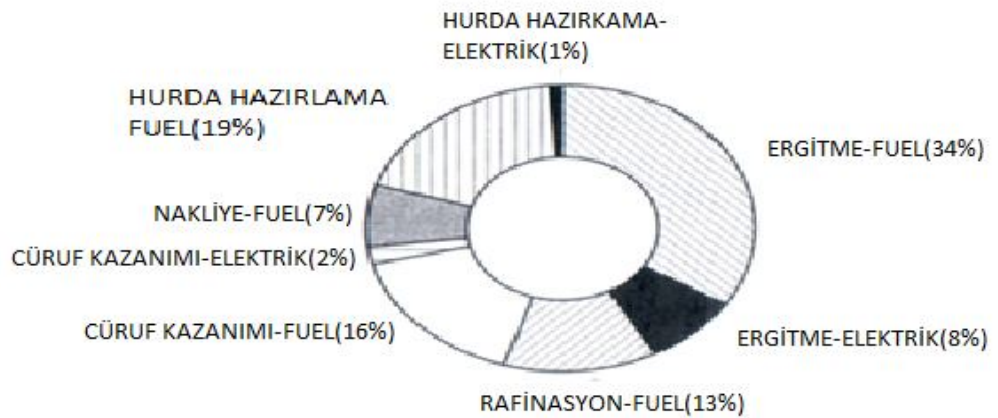
Boksit cevherleri kullanarak cevherden üretmek yerine alüminyum hurdadan üretmenin toplum açısından bazı avantajları bulunmaktadır.

Enerji tasarrufu, cevherden alüminyum üretimi Şekil 1.3'te gösterildiği gibi ciddi bir enerji kullanımını gerektirir (Rombach, 1998). Bu enerji kullanımının büyük bir bölümü alüminanın ergiyik tuzda elektroliz edilmesinden kaynaklanmaktadır. Karbon elektrotlarının üretilmesi ve elektroliz yoluyla üretilen külçelerin yeniden eritilmesi için fosil yakıt gerekmektedir ve elektrolit direncinin üstesinden gelinmesi ve havuzda çözünen alüminanın parçalanması için büyük miktarda elektrik enerjisi gereklidir. Şekil 1.3'te gösterilen 113 GJ/ton değeri sadece alüminyum madeninin kendisinin üretiminde kullanılanı göstermektedir; elektrik üretimindeki yetersizlikler de göz önüne alındığında, toplam enerji tüketimi 174 GJ/tona yükselmektedir.



Şekil 1.3 : Cevherden alüminyum üretimi için enerji gereksinimi (13.6 GJ/ton enerji) (Rombach, 1998).

İkincil (geri kazanılmış) alüminyum üretimindeki doğrudan enerji kullanımı Şekil 1.4'te gösterildiği gibi çok daha azdır.



Şekil 1.4 : Hurdadan alüminyum üretimi için enerji gereksinimi (13.6 GJ/ton enerji). (Rombach, 1998).

En çok enerji kullanımı gerektiren bölüm ise fosil yakıtla veya elektrik kullanılarak yapılabilen eritme aşamasıdır. Her halükarda, doğrudan enerji kullanımı cevherden alüminyum üretmeye kıyasla %88 daha azdır. Elektrik üretim yetersizlikleri de dikkate alındığından, geri kazanılmış maddeden alüminyum üretimi toplam enerji tüketimi 20 GJ'ye yükselir; bu da cevherden alüminyum üretme prosesine kıyasla % 88 daha düşük bir orandır.

Daha az nihai atık: Cevherden alüminyum üretimi prosesin her safhasında katı atık üretir. Belli başlı atıklar maden atıkları, alümina saflaştırma sırasında oluşan kırmızı çamur kalıntısı ve elektrolitik hücrelerindeki kullanılmış pota astarıdır (Wolf ve Hoberg, 1997). Alüminyum geri kazanımı da katı atık üretmesine rağmen (özellikle yeniden ergitme sırasında ortaya çıkan maden cürufu ve tuzlu atık) bunların hacimleri oldukça küçüktür. Avrupa tahminleri 1 ton geri kazanılmış alüminyumun üretiminde ortaya çıkan katı atık kütlelerinin cevher metalden alüminyum üretiminden %90 daha az olduğunu savunmaktadır (Martchek, 1997). Geri kazanılmış alüminyumun üretilen her ton metalde tehlikeli atık üretimini 100 Kg'den fazla azalttığını savunmaktadır.

Düşük emisyonlar, cevherden alüminyum üretimi hem tehlikeli (flüorür, sülfür dioksit) hem de tehlikesiz (karbondioksit) emisyonlar üretir. Hurdadan alüminyum üretiminin de kendine has hava kalitesi zorlukları bulunmasına rağmen, bunların sayısı oldukça azdır. Alüminyum cevher yerine hurdadan üretildiği zaman her tonluk üretimde CO₂ miktarı ve toplam hava emisyonları %90 oranında azalmaktadır.

Daha az yatırım maliyeti: Cevherden alüminyum üretilmek istediğinde bu, maden çıkarma işlemlerini, saf alümina elde etmek için Bayer prosesi tesisi ve alüminyum metalini alümina da ekstrakte etmek için elektrolitik pota hattı kurulmasını gerektirecektir. Hurdadan alüminyum üretiminde kullanılan yatırım ekipmanları daha az karmaşık ve bu nedenle de daha ucuzdur. 1976 yılında yapılan bir çalışma cevher yerine hurdanın geri kazanımı yoluyla alüminyum üretiminin ton başı yatırım maliyetlerini %80-85 arasında azalttığını ortaya koymuştur (Mahi, 1990).

Sektördeki güçlükler arasında şunlar yer almaktadır:

Yeterli kaynağın garanti edilmesi, tek bir yerde toplu halde bulunmak yerine genellikle çok geniş bir coğrafyaya yayılmış olarak bulunduğu için hurda kullanımı oldukça zor bir cevher gövdesidir. Sonuç olarak toplanması bir sorun olabilir.

Özellikle eski hurdaların toplanmasında bu çok doğrudur. Eski hurdanın toplanma ve işleme maliyeti bu tür geri dönüşüm işlemini kulfetli hale getirmektedir.

Emisyon kontrolü, cevherden alüminyum üretimiyle kıyaslandığında hurda alüminyumun yeniden ergitilmesinde ortaya çıkan gaz emisyonları oldukça düşük olmasına rağmen, ikincil alüminyum izabe tesisleri ve yeniden ergitme tesisleri kentsel alanlarda (Anderson, 1931) yer almakta bu da daha sıkı emisyon standartlarının uygulanmasını gerektirmektedir (Martchek 1997). Ayrıca, ikincil üreticilerden kaynaklanacak olası emisyonlar birincil üreticilerden farklılık gösterebilir. Organik reçine ve cila kaplı olanların yanı sıra gresli ve yağlı hurdanın işlenmesi yok edilmesi gereken organik bileşikli baca gazlarının oluşumuna neden olur.

Yan ürünlerin işlenmesi ve bertarafı, alüminyumun geri kazanımı cevherden alüminyum üretiminde ortaya çıkmayan katı atık ürünler ortaya çıkarmaktadır. Bunlardan en önemlisi bir tuz akışının altında eritme yapılmasından kaynaklanan tuz kekidir (Alüminyum Derneği, 2000). Bir diğer atık ise sahip olduğu geri kazanılabilir metalleri birbirlerinden ayırtmak için hurda otomobillerin parçalara ayrıldığı zaman üretilen talaş tozudur. Geri kazanım işiyle uğraşanlar bu katı atıkların işlenmesi ve mümkün hallerde bunların yok edilmesi için yeni yöntemler üzerinde çalışmaktadır.

2. ALÜMİNYUM GERİ DÖNÜŞÜM EKONOMİSİ

Alüminyum piyasasında geri dönüşüm, sıklıkla ekonomik açıdan tercih edilir. Alüminyumun geri dönüşümü sonucu önemli miktarda enerji geri kazanılır ve alüminyum madenciliği sonucu çevreye verilen zarar ve artan enerji kullanımında azalma görülür. Geri dönüşümün çok açık görülen sosyal avantajlarına karşın, son 10-15 yılda (enflasyona göre düzeltilmiş dönemlerde) birincil maden fiyatlarında düşüş görülmüştür. Ayrıca alüminyum içecek kutuları gibi atık materyallerin geri dönüşüm hızları %50'nin altına inmiştir. Bazı analizciler alüminyum fiyatlarının çok düşük olma sebebinin, birincil ve geri dönüşüme uğramış alüminyumun kusurlu olmasından dolayı olduğunu ve fiyatların alüminyum madenciliğinin sosyal bedellerini tam olarak yansıtmadığını söylüyorlar. Diğerleri ise, alüminyum piyasasındaki başarısızlığın oldukça az olduğunu ve alüminyum fiyatlarının düşüklüğünün madenin çokluğuna ve bunu çıkarmak için gereken teknolojinin oldukça güçlü olmasına bağlıyorlar.

Bu bölümde alüminyum piyasası (birincil ve geri dönüştürülmüş olmak üzere) ekonomik açıdan irdelenmektedir. Alüminyumun tarihi, üretiminde kullanılan teknolojiler, ekonomik kullanımı ve alüminyum geri dönüşümünün çeşitli ekonomik durumları incelenmektedir.

2.1 Alüminyum Üretiminin Tarihi

Alüminyum yerkabuğunda en çok bulunan metalik elementtir ve oksijen ve silikondan sonra, kütlece üçüncü sırada en çok bulunan elementtir. Kütlece yerkabuğunun %8'ini oluşturur. Hemen hemen bütün kayaların yapısında ve mineral birikintilerinde az miktarda bulunur. Bununla birlikte, atom numarasının 13 olması yani, dış kabuğunda 3 elektronun bulunması sebebiyle, diğer elementlerle özellikle oksijenle bağ yaparak, çok sağlam oksitler (örneğin Al_2O_3) ve silikatlar yapabilir. Bu sebeple doğada saf metalik formunda bulunamaz.

Alüminyum bileşiklerinin kararlılığından dolayı 1808'e kadar alüminyumun varlığı belirlenmemiştir. 13 yıl sonra 1821'de alüminyum oksitçe zengin kil benzeri materyal, Güney Fransa'da bulundu. Buna boksit (bauxite) adı verildi. Boksit depozitleri dünya genelinde bulunur ve alüminyum metali için öncelikli kaynaktır.

1825'te Hans Christian Oersted, ilk kez küçük miktarda alüminyum üretmeyi başarmıştır. 1854'te Henry Deville, alüminyum metali yapımında kullanılan ilk ticari prosesi icat etmiştir. 1886'da iki genç bilim adamı, Charles Martin (US) ve Paul Louis Heroult (Fransa) birbirlerinden habersizce, alüminyum madeninin ergiyik kriyolit içinde çözündüğü ve çok miktarda elektrik kullanılarak çöktürüldüğü özdeş prosesin patentini aldılar. Şimdi bu indirgeme prosesi Hall-heroult prosesi olarak bilinmektedir. Alternatif prosesler bulma çabalarına karşın, Hall-Heroult prosesi hala ticari miktarda alüminyum üretiminde en etkili yöntemdir.

Hall-Heroult prosesi alüminyum üretiminin modern çağında öncü olmuştur. 1800'lerin ortalarında alüminyum o kadar küçük miktarlarda vardı ki, alüminyum değerli bir metal olarak düşünülüyordu. 1852'de alüminyum yaklaşık olarak pound başına 550 dolara (2006'da >3000\$/pound) satıldı. 1854'te Deville prosesinin bulunuşundan sonra, fiyatlar 1857'de yaklaşık 25 dolara düştü. Hall-Heroult prosesinin 1890'da mükemmelleştirilmesinden sonra ise 2\$/pound satılmaya başlandı.

Alüminyum fiyatlarındaki düşüş, dünya çapında alüminyum üretimindeki birden büyümeye tekabül eder. 1900'de birincil alüminyumun yıllık üretimi 800 metrik tondur. 1920'de (16 faktörü ile) 128 bin metrik tona çıktı. 18 yıl içerisinde 2. dünya savaşının başlamasından kısa bir süre önce üretim, 537 bin metrik tona çıktı. 2004'te dünya çapında alüminyum birincil alüminyum üretimi toplamda 30 milyar metrik tona (9 milyon metrik ton eski ve yeni geri dönüştürülmüş atıklarla beraber) çıktı. 1910 ve 2004 arasında dünya çapında birincil alüminyum üretimi ortalama yıllık %8.5 hızla arttı.

2.2 Birincil Alüminyum Üretimi

Birincil alüminyum, boksit maden cevherlerinden elde edilen alüminyumdur. Birincil alüminyum üretimi temelde beş adıma indirgenebilir; ham materyalin çıkarılması (öncelikle boksit), alümina üretimi (Al_2O_3), birincil alüminyum üretimi,

alüminyumun fabrikasyonu ve bitmiş alüminyum ürününün üretimi. Boksit genelde en az %50 oranında alüminyum içeren ekonomik olarak uygun bir kaynaktır. Birleşik Devletler’de alüminyumca yoğun depozit içeren yerler Arkansas’ta bulunur (Plunkert, 2000).

Boksit genellikle yüzeye yakın yerlerde bulunur, bu yüzden çoğu boksit cevherleri açık çukurlardan çıkarılır. Maden ocaklarında yapılan işlemler çok azdır, çoğu zaman ezme ve kurutma ile sınırlıdır. Ezilmiş boksit daha sonra Karl Josef Bayer’in 1889 yılında bulduğu prosese tabi tutularak boksitteki alüminyum alüminaya çevrilir.

Dönüştürülen alumina, birincil tasfiyenin elektrolitik Hall-Heroult prosesi ile yapıldığı indirgeme tesisine (reduction plant) gönderilir. 1 poundluk saf alüminyum metali elde etmek için; 2 pound alumina, az miktarda karbon ve kriyolit ile yaklaşık 10000 watt/saatlik elektrik gerekir. Birincil alüminyum elde etmek için yapılan alüminanın tasfiyesi işlemi, geri dönüşüme uğramış eski ve yeni alüminyumun ikinci tasfiye işlemiyle desteklenir. İkinci tasfiye işleminde, birinci tasfiye işlemine nazaran önemli miktarda az enerji kullanılır.

Saf haldeki alüminyum oldukça zayıftır. Fakat az miktarda çinko, demir, nikel, kurşun, bakır ve kadmiyum gibi alaşım metalleri alüminyumun kuvvetini ve sertliğini arttırmak için eklenebilir. Bir kez alüminyum alaşımı elde edildiğinde metal; metal, levha, şilt üreten tesislere gönderilir. Yarı fabrikalanmış (semi-fabricated) bu ürünler daha sonra fabrikasyon tesislerine sevk edilerek tüketiciler için ürünler yapılır.

2.3 Kullanımları

Alüminyum Amerikan ekonomisinde birçok uygulama alanı bulur. Alüminyumun en önemli karakteristik özellikleri kuvveti (eğer doğru olarak alaşım haline getirilirse) ve hafif olmasıdır (Demirin 1/3’i oranında yoğunluğu vardır). Korozyona karşı dirençlidir ve ısı ve elektriği çok iyi iletir. Amerika’da alüminyum kullanımının en çok olduğu üç piyasa; ulaşım (%33,9), Konteynırlar ve paketleme (%20,3), bina ve inşaat (%14,8) sektörüdür.

Ulaşım sektörü alüminyumu; uçaklarda, havacılık ve uzay sanayinde, kamyonlarda, otobüslerde, arabalarda ve römorklarda kullanır. Fakat önemli atılımlar son 15 yılda otomobil endüstrisinde olmuştur. Bu artan alüminyum kullanımı şanzımanda ve

tekerleklerde gerçekleşmiştir. Fakat, mühendisler son zamanlarda alüminyumun öncelikli bileşen olarak kullanılacağı otomobil gövdeleri üzerinde çalışmaktadırlar.

Konteynır ve paketleme sektörü alüminyumı içecek kutularında, yiyecek konteynırlarında ve evsel ve endüstriyel alüminyum folyo yapımında kullanılır. Alüminyum içecek kutuları bu sektörde en çok kullanılan ürünlerdir. 2004'te 100,5 milyar alüminyum kutu satılmıştır. Alüminyum içecek kutuları ayrıca Amerika'da geri dönüşüme uğrayan alüminyumun en büyük kaynaklarından biridir. İnşaat sektöründe alüminyumun temel kullanımları; çatıda, kaplamada, ısıtmada ve cam çerçevesindedir.

Üç ana uygulamanın yanı sıra alüminyum kullanımı elektrik sektöründe de önem taşır. Alüminyumun bir kısmı elektrik iletiminde bakır ile değıştirilir. Ayrıca teleskop aynalarının sır kaplamasında kullanılır.

2.4 Alüminyumun Geri Dönüşümü

Metaller önemli, tekrar kullanılabilen kaynaklardır. Metaller, kereste gibi kaynakların tersine yenilenemedikleri halde madencilikteki ve geri dönüşüm teknolojisindeki ilerlemeler ile yeryüzünden büyük miktarlarda kaynak elde etmeyi mümkün kılmıştır.

Birincil metal üretimi maden filizinden direkt çıkarılan ürün demektir. İkincil üretim ise geri dönüşüm sonucu elde edilen materyal demektir. Potansiyel olarak geri dönüştürülebilecek metal atığı iki eşite ayrılabilir: Yeni ve eski atık (Tietenberg, 2006). Üretim sırasında fazla olduğu için kullanılmayan atıklar yeni kategorisine girer. Örneğın alüminyum içecek kutularının üretimi sırasında üstünden ve altından kesilen dairesel fazlalıklar yeni atık olarak düşünülür. Geri dönüşüme uğramış tüketici ürünleri örneğın bitmiş haldeki içecek kutuları eski atık kategorisindedir.

Alüminyum geri dönüşümünü ekonomik olarak çekici yapacak fiziksel özelliklere sahiptir. Bunlardan en teşvik edici olanı, maden filizinden elde edilen miktarı daha az enerjiyle geri dönüşümden elde edebilmektir. İstenilen miktar geri dönüşüm ile üretildiğinde madenciliğinde kullanılan enerjinin sadece %5'inin gerektiğı görülmüştür.

Çizelge 2.1 2000-2004 arasındaki yerli birincil alüminyum üretim ve geri dönüşümüyle ilgili genel bir bakış sunmaktadır. ABD'de üretim 2.52 milyon metrik

ton iken alüminyumun yeni hurdadan ikincil üretim ise 3.03 milyon metrik ton (%62) olmuştur. Sonuç olarak 2004 yılında yerli üretim alüminyumun yaklaşık yüzde 55'i geri dönüştürülen alüminyumdan yüzde 45'i de birincil ham maddeyle yapılmıştır.

Çizelge 2.1 : 2000 – 2004 yılları arasında ABD’de alüminyum üretiminin istatistiği (Tietenberg, 2006).

Yıl	Yeni Hurdadan Geri Dönüşüm	Eski Hurdadan Geri Dönüşüm	Toplam Geri dönüşüm (1+2)	Yerel Birincil Üretim	Toplam Üretim (3+4)	Geri Dönüştürülmüş Ürünlerin Yüzdesel Değeri	Net İhracat	Arz (5+7)	Geri Dönüşümle Karşılanan Arzın Yüzdesel Değeri
2004	1870	1160	3030	2516	5546	55	2900	8446	36
2003	1750	1070	2820	2703	5523	51	2590	8113	35
2002	1750	1170	2930	2707	5637	52	2470	8107	36
2001	1760	1210	2970	2637	5607	53	2150	7757	38
2000	2080	1370	3450	3668	7118	48	2150	9268	37

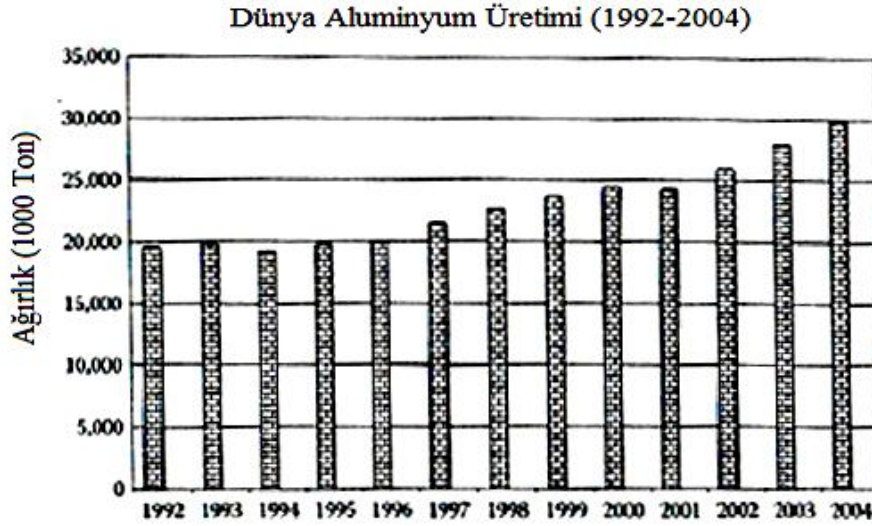
Çizelge 2.1 ayrıca yerli alüminyum endüstrisinde başka trendler de göstermektedir. 2000-2004 periyodunda yerli alüminyum endüstrisi alüminyum üretimi 7.12 milyon metrik tondan 5.5 milyon metrik tona yani yaklaşık yüzde 22 düşmüştür. 2000-2004 periyodunun devamında yerli alüminyum üretimi 1.15 milyon metrik tonla 31% den fazla düşmüştür. Bu periyotta yeni ve eski hurdadan elde edilen alüminyum üretimi de 0.42 metrik ton yani yaklaşık yüzde 12 düşmüştür. Geri dönüştürülmüş hurdadan elde edilen alüminyum üretimi 2000 yılında yüzde 48 iken 2004’te tarihi bir şekilde yüzde 55’e yükselmiştir (Tietenberg, 2006).

Çizelge 2.1’de farkedilebilecek bir başka ilginç trend ise 2000-2004 arasındaki net ithalattaki (net ithalat = ithalat – ihracat) şiddetli artıştır, 0.75 milyon metrik tonla %35.

Yerli alüminyum üretiminde bir trendin oluştuğu göze çarpmaktadır. İleriki yıllarda alüminyum tedariki birincil yerel üretim, toplam geri dönüştürülmüş ürün ve ithalatın toplamının ihracata farkına eşit olacaktır. 2000 yılında birincil yerel üretim tarafından tedarik edilen, toplam geri dönüştürülen hurda ve net ihracatı yapılan alüminyumun yüzdeleri sırasıyla 40, 37 ve 23 aynı rakamlar 2004 yılında 30, 36 ve 34 olmuştur. Trend, genel olarak tedarikin bileşimindeki, yerli üretim yerine net

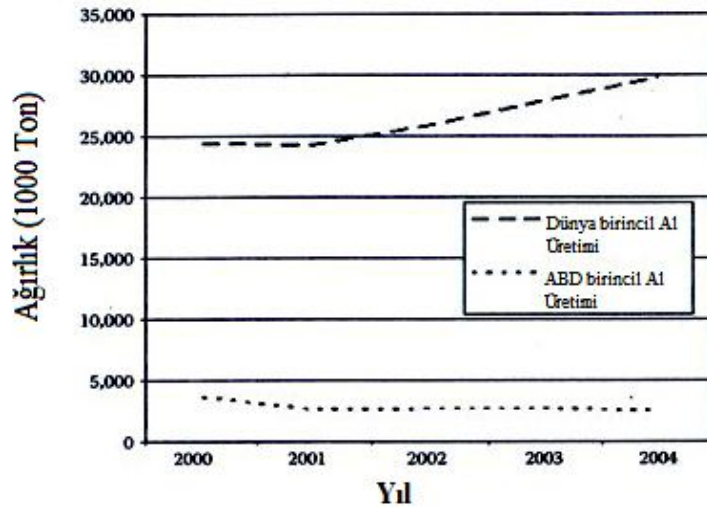
ithalatın onun yerini alması yönündedir. Buna karşın 2000-2004 yılları arasında hurda tedariki nispeten stabil kalmıştır.

Aynı zamanda birincil alüminyum üretimi ABD’de düşmüştür, Dünya’da ise yükselmiştir. Şekil 2.1 birincil alüminyum üretimin Dünya çapında 1993’teki 19.3 milyon metrik tondan 2004’e kadar 30 milyon metrik tona, yıllık %3.5 gibi bir rakamla artışını göstermektedir.



Şekil 2.1 : 1992–2004 yılları arasında Dünya’da alüminyum üretimi (Tietenberg, 2006).

Şekil 2.2 ise 1993’ten 2004’e kadar Dünya çapında hurda dönüştürülerek yapılan birincil alüminyum üretiminin %30’larda olan ortalamasını göstermektedir. Mesela, 2004 yılında Dünya çapında hurdadan üretilen alüminyumun yaklaşık 1 milyon metrik ton olduğu görülmektedir.

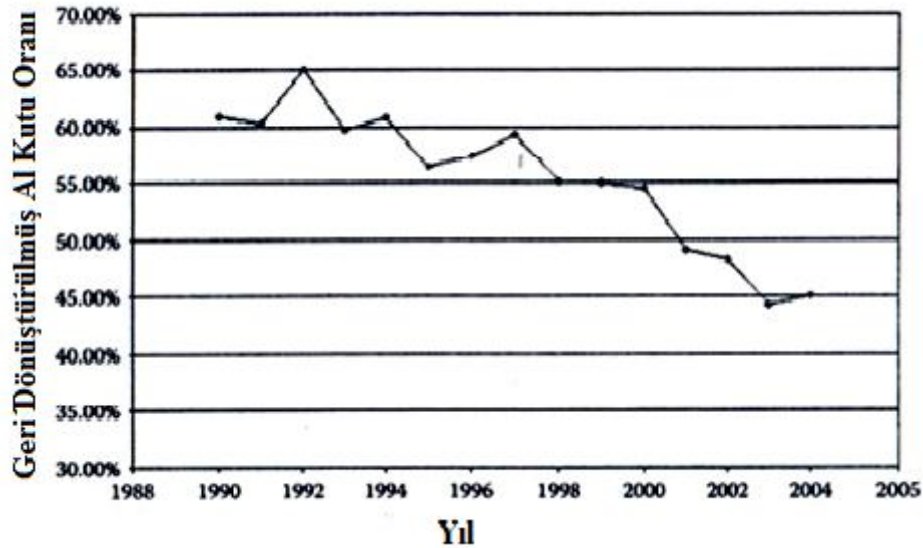


Şekil 2.2 : 2000-2004 yılları arasında Dünya ve ABD’deki birincil alüminyum üretimi (Tietenberg, 2006).

2.4.1 Kullanılmış alüminyum kutularının geri dönüşümü

Eski atık geri dönüşüm piyasasının belkemiği kullanılmış alüminyum kutularıdır. Alüminyum kutular ile tanışma 1970’lerin başlarına tekabül eder ve ilk başlarda halk bu kutuları “atılabilir” olarak nitelendirmiştir. Fakat 70’lerin sonlarına doğru alüminyum kutuların geri dönüşümü endüstrisi başlamıştır ve halk bunun ekonomik ve çevresel yararlarını görmeye başlamıştır. Geri dönüşüm merkezleri ve materyal iyileştirme tesisleri halka atık materyallerin toplanması ve işlenmesi için yeni bir etki kazandırmıştır. 80’lerin sonlarına doğru milyonlarca Amerikalı geri dönüşüm programlarına katılmıştır.

Bugün hurda alüminyumun %40’ı eski hurda ve %50’si de kullanılmış meşrubat kutularından (KMK) elde edilmektedir. Şekil 2.3 alüminyum elde edilmesinde KMK’ların kullanımlarının 1990’dan 2004’e kadar ki oranını grafiksel olarak çevre koruma kurumunun yeniden dönüşüm oran metodolojisiyle göstermektedir. KMK’ların ABD’de geri dönüşüm oranının 1992’de %65’le tepe yapmasından sonra 2004’te %45.1’e düşmesi de not edilmelidir. Konteynır Geri Dönüştürme Enstitüsünün (KGDE) raporuna göre 2005’te 2004’e kıyasla geri dönüşüm oranları artmasına rağmen hala %50’nin altındadır.



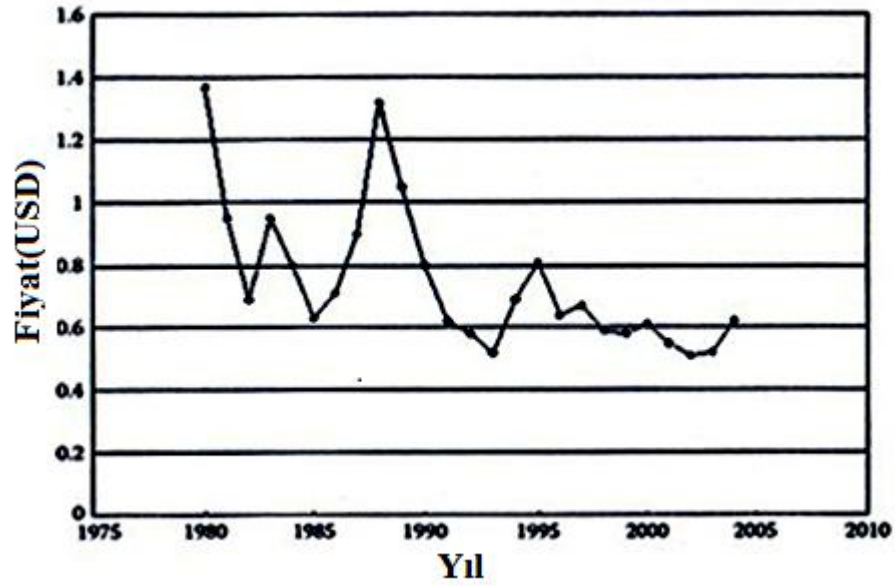
Şekil 2.3 : 1990–2004 yılları arasında geri dönüştürülmüş alüminyum kutularının oranı (Tietenberg, 2006).

2000’li yıllardan beri KMK’ların geri dönüşüm oranlarının neden inatla yüzde 50’nin altında kaldığı sorulmalıdır. Endüstri ve çevre grupları alüminyum geri

dönüşümünün sayısız sosyal yararı hakkında konuşmakta haklılar. Mesela alüminyumun oksit ve silikat bileşiklerinden ayrıştırma sürecinin gerektirdiği yüksek enerji ihtiyacı ve alüminyumun düşük erime noktası göz önünde bulundurulursa alüminyum hurdanın geri dönüşümünden elde etmek boksitten elde etmeye çalışmaktan çok daha enerji tasarruflu olacaktır. Alüminyum hurdasını yeniden eritmek boksitten alüminyum elde etmeye oranla %95 daha az enerji gerektirmektedir. Kıyasla, geri dönüşümle 20 alüminyum kutu üretilebilirken aynı enerjiyle saf alüminyumdan bir tek kutu yapılabilir. KGDE'nin tahminlerine göre 46 milyar geri dönüştürülmüş alüminyum kutu ABD'nin bir günlük kullanımına yakın 14 milyon varil petrole ya da bir yılda 22.7 milyon eve yetecek kadar elektrik enerjisine denk tasarruf sağlamıştır. KGDE ayrıca 1972'den beri toplam 1.1 trilyon alüminyum meşrubat kutusunun çöpe atıldığını tahmin etmektedir. Eğer bu kutular geri dönüştürülse 520 milyon varillik petrolden tasarruf edileceği belirtilmiştir.

Çevre grupları, alüminyumun saf boksitin kazılıp çıkarılmasının toprak ve suya zarar verdiğini, boksit ve kömürün kazılıp çıkarılması sürecinde ortaya toksit atıkları çıkardığını belirtmektedirler. Bazı sosyal ve çevre grupları da 3. Dünya ülkelerinde boksit madeninin çıkarılmasının yaban hayatına ve yerel kültürlerimize verdiği zararın altını çizmektedirler. Bu gruplar ayrıca çevre ve sosyal problemlerin azaltılması için KMK geri dönüşümünün artırılabilirliğini öngörmektedirler.

Alüminyumun geri kazanılmasının yararlarından bahsettikten sonra 2 soru gündeme gelmektedir: Birincisi, geri dönüşümün gözle görülür yararlarına rağmen neden KMK geri dönüşüm oranları azalmaktadır. İkincisi ise, bu oranların azalmasını önemsemeli miyiz? Son 10 yılda KMK geri dönüşümünün ABD'de azalmasının birkaç sebebi olabilir. Birincisi, büyük ihtimalle de en geçerlisi, birincil alüminyumun fiyatının düşmesi, şekil 2.3'te görünen alüminyum geri dönüşümünün düşüşü enflasyona göre ayarlanmış. Şekil 2.4'te gösterilen saf alüminyum fiyatlarıyla paraleldir. KGDE'nin değerlendirmesine göre ortalama hurda alüminyum kutu fiyatı 2000-2004 arasında pound başına 0.54 dolardı. Bu sayı pound başına 33 kutu ile çarpılınca kutu başına 1.5 cent olarak yansımaktadır, bu da KMK geri dönüşümü yapan birisi için çok ta büyük bir geri dönüş sağlamayacaktır.



Şekil 2.4 : 1980–2005 yılları arasındaki alüminyum fiyatları (Tietenberg, 2006).

Gerçek alüminyum fiyatlarının düşüşüne ek olarak KMK geri dönüşüm oranlarının düşüşünü izah edecek başka sebepler de vardır, yaşam tarzının değişmesi, daha fazla mobilite ve ABD vatandaşlarının daha çok seyahat şansına sahip olmaları alüminyum kullanımının artışı açıklayabilir. Alüminyum kutular evden uzağa, dolayısıyla geri dönüşüm kutularından da uzağa taşınmaktadır. Bazı eyaletler 70-80’lerde alüminyum kutular için geri depozito yapılmasını sağlamışlardır. Fakat enflasyon bu 5 centlik depozitoların değerini bitirmiştir. 1990-2000 arasındaki güçlü Amerikan ekonomisi düşük işsizlik oranları, alüminyum kutuların bulunması için gereken sürenin caydırıcılığı ve ülke olarak çöp atacak alanlarımızın bitmediğinin farkedilmesi geri dönüşümün aciliyetinin üstündeki odağı azaltmıştır.

3. ZENGİNLEŞTİRME TEKNOLOJİSİ

Madenin çıkartılmasından sonraki geleneksel metal ekstraksiyonundaki bir sonraki aşama cevherdeki değerli madenleri malzemedeki değersiz kısımdan ayrıldığı bölüm olan maden işleme bölümüdür. Bu işlemin ardından, kendi fiziksel özellikleriyle ekonomik değeri olmayan madenler arasındaki farklılıklar kullanılarak ayrı bir akış içerisinde birbirlerinden ayrılır. Bazı durumlarda, konsantre madenlerinden safsızlıkların temizlenmesi için kimyasal ve ısıl proseslerin kullanılması gerekebilir. Son aşama olarak, konsantre hale getirilen madenler taşınmasını kolaylaştırmak ve daha sonraki döküm proseslerini kolaylaştırmak için bir araya toplanır.

Bu bölümde hurda alüminyumun kirletici maddelerden ayrılması için kullanılan teknik ve ekipmanları tanınmaktadır. Ardından bu teknolojinin uygulanma şekli 4. Bölümde anlatılmaktadır. Geleneksel madenlerde olduğu gibi hurdanın zenginleştirilmesi dört proses tipine ayrılabilir: Parçalama, ayrıştırma, ısıl işlemden geçirme ve son olarak da toplama.

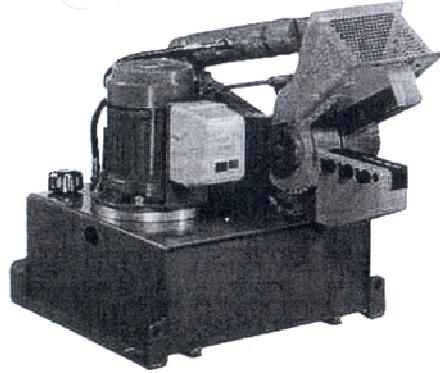
3.1 Parçalama

Alüminyum hurda çok çeşitli ebatlarda ve koşullarda gelir. Parçalar elektronik ekipmanlarda kullanılan alüminyum teller kadar küçük parçalar ile jet uçaklarına kadar büyük parçalar da olabilir. Hurda bazen serbest yani üzerinde başka herhangi bir malzeme parçası bulunmadan gelir. Çoğunlukla, diğer parçalara cıvatalanmış, kaynaklanmış veya bir şekilde tutturulmuş olarak bulunur. Yeniden eritilebilmesi için, hurdanın bu diğer maddelerden arındırılmak zorundadır. Otomobillerin elle sökülmesi ve diğer geniş kurulumlar bunu bir dereceye kadar başarmaktadır. Ancak, çoğu durumda, elle söküm yoluyla geri kazanılan hurdanın değeri bu emek-yoğun işin maliyetini haklı çıkarabilecek kadar yeterli değildir.

Çoğu ayırma süreci, sürecin etkin olabilmesi için hurdanın belirli büyüklükte olmasını gerektirmektedir. Ayrıca, fırınların alabilecekleri azami hurda büyüklükleri

de bellidir. Bazı ayrıştırma cihazların uygun biçimde çalışması için partikül büyüklüğünün tutarlı olması gerekmektedir. Bazı hurdaların boyutları otomatik ayrıştırmaya uygundur. Ancak hurdaların çoğunluğunun boyutu buna uygun değildir. Parçalama daha sonraki işlemler için büyük hurda parçalarının uygun büyüklüklere küçültülmesi sürecidir. Doğal olarak oluşan madenlerin parçalama işlemi genellikle daha küçük taş parçaları halinde kırmak suretiyle olur. Ancak, metal hurdası bu yolla daha küçük parçalara dönüştürülemez. Bunun yerine, metal hurdaların yırtılarak parçalanması gerekmektedir. Metal hurdaların parçalanması için yüzlerce makine geliştirilmiştir. Bu bölümde söz konusu makineler üç kategoriye ayrılmıştır: Makaslar, darbeli parçalayıcılar ve döner parçalayıcılar.

Kullanılan makasların büyük çoğunluğu timsah makas veya giyotin makaslarıdır. Şekil 3.1'de menteşeli kesme hareketi bir timsahın ağzına benzediği için böyle anılan tipik bir timsah makasını göstermektedir (Kiser, 2003). Bıçağı sertleştirilmiş çelikten yapılmıştır, körelmesi halinde bilenebilmektir. Kesilecek maddenin cinsine ve büyüklüğüne göre makinenin ebatları ve gücü değişiklik göstermektedir.



Şekil 3.1 : Timsah makaslar (Kiser, 2003).

1900'lü yılların başlarından bu yana timsah makasları kullanılagelmiştir. Ana tasarımda yapılan önemli değişiklikler şunları içermektedir:

Mekanik dişli motor yerine hidrolik motor kullanılmaktadır. Hidrolik motorlar makinenin zarar görmesini veya operatörün yaralanmasını engellemek için makinenin anında durdurulabilmesini sağlamaktadır; bu özellikle mekanik çarklı motorlarda bulunmamaktadır.

Kesme esnasında hurda parçalarının sabit tutulmasını sağlamak için baskı çenesi, operatörlerin yaralanmasını engellemek için makinenin çevresine korumalar takılmıştır.

Çoğu ülkede bir zorunluluk olan bu korumalar takılmadan önce timsah makaslar güvenlik/ emniyet tehlikeleri bakımından kötü bir üne sahipti.

Timsah makasların avantajlarından biri çok yönlülükleridir. Bu özellikle farklı formlarda olabilen alüminyum hurdasının işlenmesi bakımından önemlidir.

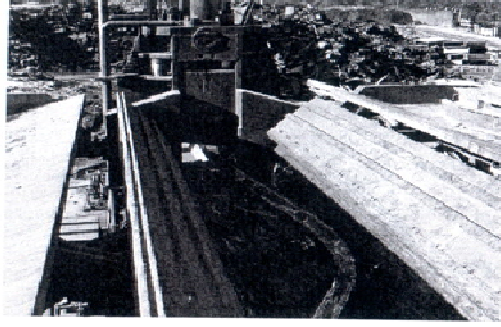
Şekil 3.2 işleme tesisine getirilemeyecek olan hurdanın geri kazanımı için kullanılan vince monte edilen makaslar/ kesiciler hurda uçak, gemi, demiryolu araçları ve diğer büyük hurda makinelerden alüminyum parçaları çıkarmakta kullanılır. Diğer bir özel timsah kesici de civata ve sıkma bilezikleri gibi metal ataçmanları sökmek için kullanılan çiğneyici, veya metal temizleyici makastır. Metal temizleme kesicileri özellikle çelik parçaların kablo hurdalarından ayırmak için kullanılmaktadır.



Şekil 3.2 : Vince monte edilmiş kesici (Kiser, 2003).

Şekil 3.3 insanları idam etmek için kullanılan aygıtla aynı çalışma prensibiyle çalışan giyotin kesiciyi göstermektedir. Hurda kesici bıçağın altına yerleştirilir. Vince monte edilen makaslar/ kesiciler hurda uçak, gemi, demiryolu araçları ve diğer büyük hurda makinelerden alüminyum parçaları çıkarmakta kullanılır. Diğer bir özel timsah kesici de civata ve sıkma bilezikleri gibi metal ataçmanları sökmek için kullanılan çiğneyici, veya metal temizleyici makastır. Metal temizleme kesicileri özellikle çelik parçaların kablo hurdalarından ayırmak için kullanılmaktadır. Dikey kılavuz raylar yardımıyla hurdanın üzerine düşer. Hurdayı kesmek insan kafalarını kesmekten daha zor olduğu için, sadece yer çekimine güvenmek yerine bıçağı hızlandırmak için hidrolik gücü kullanılmaktadır. Giyotin kesiciler timsah kesicilerden daha verimlidirler ve daha güçlüdürler. Sonuç olarak başta çelik hurdaların kesilmesi

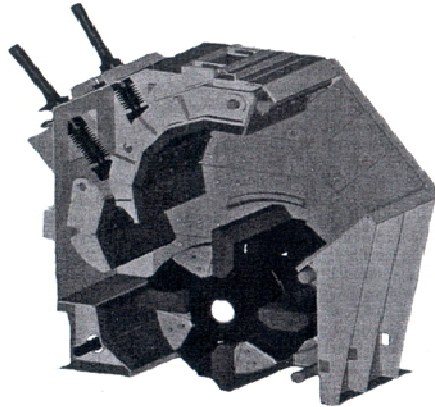
olmak üzere çoğu uygulamada timsah kesicilerin yerini almışlardır. Ancak, bu tür kesiciler alüminyum hurdanın işlenmesinde daha az önemlidir.



Şekil 3.3 : Giyotin kesici (Kiser, 2003).

Gerçekten yüzlerde farklı parçalayıcı/ kesici tasarımı bulunmaktadır ve bunların her birinin tanıtımı için ayrı bir kitap yazmak gerekmektedir. Burada ele alınanlar sadece daha önemli adledilen tiplerin birer özetidir.

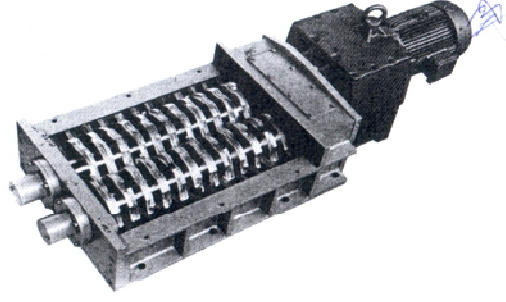
Şekil 3.4 büyük ve ağır hurdaların kesilmesinde de kullanılan çarpmalı kırıcının çapraz kesitini göstermektedir. Çarpmalı kırıcı çekiçli değirmene benzer bir sistemdir ancak serbest biçimde dönen örümcek takımı değil sabit çekiçler kullanmaktadır. Burada tek bir örsün yerini bir dizi kırıcı yüzey almıştır. Çarpmalı kırıcı metal hurdalardan daha çok madenlerin kırılmasında kullanılmaktadır bu nedenle otomobillerin parçalanmasında nadiren kullanılmaktadır.



Şekil 3.4 : Çarpmalı kesiciden bir görünüm (Kiser, 2003).

Çarpmalı kırıcı, otomobillerde olduğu gibi büyük demir hurda parçalarının kesilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Sonuç olarak, bu makineler muazzam enerji tüketirler, kolaylıkla kesilen malzemelerde çok fazla ince madde üretirler (20 numara elek veya

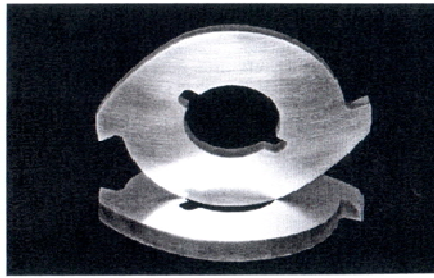
0.76 mm den küçük parçalar) ve çok gürültülüdürler. Daha hafif ve daha zayıf maddelerin kesilmesinde daha etkin makinelerin kullanılması gerekmektedir. Şekil 3.5 çift rotorlu döner kesiciyi (ayrıca döner kıyıcı olarak da bilinir) göstermektedir. Bu kesiciler daha çok kağıt ve plastiklerin işlenmesinde kullanılır (Kiser, 2003). Ancak özellikle folyo ve kullanılmış içecek kutuları gibi hafif metal levhaların işlenmesinde de kullanılmaktadır.



Şekil 3.5 : Çift rotorlu döner kesici (Kiser, 2003).

Bunlar ayrıca hurdadan metal geri kazanımında kabloların kıyılmasında en yaygın olarak kullanılan ekipmanlardır (Sullivan, 1985). Çarpmalı kesicilerde olduğu gibi çok sayıda farklı tasarımı bulunmaktadır.

Döner kesicideki rotorlar birbirlerinin tersi yönlerde dönerler. Her birinde Şekil 3.6'da gösterildiği gibi kesici bıçaklar bulunmaktadır. Her kesici bıçakta bir hurda parçalarını, bıçaklar tarafından daha küçük parçalara dilimlenecekleri rotorların arasındaki boşluğa doğru çeken bir yada daha fazla sayıda kanca bulunmaktadır.



Şekil 3.6 : Döner kesici bıçakları (Sullivan, 1985).

Kesilen parçalar ya dışarıya çıkartılmak üzere doğrudan bant üzerine veya büyük parçaların yeniden kesiciye beslenmesi için bir eleğin üzerine düşer. Kesilen parçaların büyüklüğü kesicinin tasarımına bağlıdır; rotor sayısının artırılması parça büyüklüğünü düşürür, rotor çapının küçültülmesi de aynı etkiyi göstermektedir.

Döner kesiciler elektrikli veya hidrolik motor kullanır ve doğrudan veya dolaylı enerji verilebilir.

Döner kesiciler, çekiçli değirmenlerdeki düşük tork ve yüksek hız yerine yüksek tork ve düşük hızla (5-50 rpm) değiştirir. Sonuç olarak, çift rotorlu kesicilerin güç tüketimi çekiçli değirmenlerin güç tüketimine benzerdir. Ancak, daha düşük hız daha tekdüze ürün elde edilmesini sağlar, toz ve ince madde oluşumunu azaltır ve kesim işlemini daha az gürültülü hale getirir. Bu cihazlarla kesilen hurdalar, çekiçli değirmenden gelenlerden daha az birbirine geçmiştir; bu da boya ve kaplamanın daha etkili biçimde çıkartılabilmesini sağlar. Döner kesiciler aynı zamanda durağan bir çevrede de çalışabilir bu da patlama riskini azaltmaktadır. Yüksek enerji maliyetini azaltma yöntemlerinden biri metalin kesilirken sabit bir plakaya dayanarak kesildiği tek rotorlu kesici kullanımındır.

3.2 Ayırıştırma

3.2.1 Elle ayırma

Adından da anlaşılacağı gibi, bu istenen parçaların elle çıkarıldığı ve daha sonra işlenmek üzere ayrı kaplara konulduğu bir besleme sistemidir.

Çöpün ve hurdanın birbirinden ayrılmasında ilk kullanılan yöntemdi ve halen popülerliğini sürdürmektedir. Elle ayırmanın en yaygın olarak kullanıldığı saha evsel atıkların ilk işlenmesi sürecidir. “Mavi torba” uygulaması geri dönüştürülebilir/kazanılabilir maddeleri diğer çöplerden elle ayırmanın bir başka biçimidir. Belediyenin kendi geri kazanım tesislerinin bulunduğu çoğu şehir kendi elle ayırma işlemini çöp ana işleme tesisine gelince yapmaktadır (Glenn, 1991; Sandoval, 2005). Çöpten çıkartılan maddeler tesisler arasında farklılık göstermektedir ancak hemen hepsinde metal hurdalar özellikle de bakır, pirinç ve alüminyum hurdaları ortak olanlardır.

Elle ayırmanın bir diğer ortak yeri metal kesim yerlerinin üretim akışlarıdır (Mutz, 2003). Manyetik kesim motor ve diğer elemanlar gibi kirletici unsurları da beraberinde içerebilir. Bu maddelerin çıkartılması demir hurdalarındaki safsızlık seviyelerinin düşürülmesinde yardımcı olabilir. Manyetik olmayan kesim de diğer ayırma cihazlarının kullanılmasına rağmen çoğunlukla elle ayırma yoluyla ayrılmaktadır. Bu aynı yoğunlukta fakat farklı bileşime sahip maddelerin ekarte

edilmesine yardımcı olur. Buna bir örnek olarak alüminyum hurda içinde yer alan bakır parçaları verilebilir. Bu tellerin plastik veya kauçuk kaplamaları bu maddelere alüminyumunkine benzer bir yoğunluk verir ve bakırın iletkenliği de indüksiyon akımına (burgaçlı akım, Foucoult akımı da denir) tepki vermesine neden olur. Kabloların elle ayrılması makine kullanılarak yapılamayacak bir ayrımın yapılabilmesini sağlar. Kablo hurdasında alüminyumun bakır telden ayrılması da yine elle ayırma sürecine bir örnek olarak verilebilir.

Elle ayırma açıkça emek- yoğun bir iştir ve ayrıca hoş olmayan ve muhtemelen de sağlıklı olmayan bir iştir. Ancak, işçilik maliyetlerinin düşük olduğu dünyanın çeşitli yerlerinde hurdaların ayrılmasında elle ayırma halen tercih edilen bir yöntemdir. Kuzey Amerika’da ve Avrupa’da otomobillerin parçalanmasından kaynaklanan demir içermeyen atıklar elle ayırmanın gelişmiş ülkelerdeki otomatik proseslerden daha ucuz olduğu Çin’e gönderilmektedir. Aynı zamanda çöplerin ayrılmasında da yine halen tercih edilen bir yöntemdir (Sandoval, 2005).

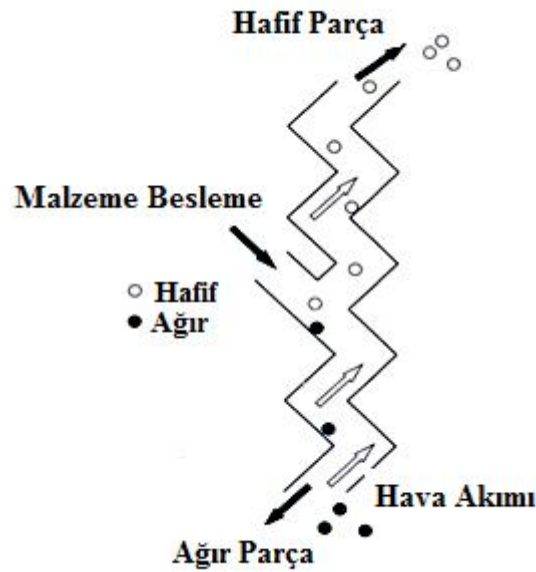
Elle ayırıcılar besleme akışında arzu edilen maddelerin tespit edilmesinde bazı görsel tanımlama araçları kullanmaktadır. Renk, metal maddelerin metal olmayanlardan, bakır, pirinç ve kurşunun ise diğer metallerden ayrılmasına imkan veren en önemli özelliktir. Çatal bıçak gibi eşyalar paslanmaz çelikten, kutular alüminyumdan veya çelikten, plastik süt kutuları yüksek yoğunluklu poliüretan malzemeden üretildiğinden çöpün ayrılmasında şekil de önemlidir. Alüminyumun geri kazanımındaki en önemli güçlük meyve suyu kutuları gibi kompozit aseptik ambalajlardan alüminyumun geri kazanılmasıdır. Meyve suyu kutuları çoğunlukla kağıt ve plastik içerirler ve yoğunluk farkı ve metalik özelliklere dayalı yöntemlerle diğer çöplerden ayırt edilemezler. Görsel tanıma ve arıtma ayrı bir arıtma sürecine yetecek kadar bu türden ambalaj toplanmasını sağlayabilir.

Elle ayırmanın kendi sınırlılıkları vardır. Boyanmış veya başka bir metalle kaplanmış metal parçalar yanlış tanımlanabilir. Bazı parçalar seçilen alaşımlardan üretilmektedir; bu nedenle, şekle dayalı tanıma bu tür metalin ayrılmasında yeterli olmayabilir. Son olarak, eğer işçilik ücretleri çok yüksekse (Sandoval, 2005) geri kazanılan maddelerin değeri bu maddelerin ayrıştırılmasına ve tasnifine değmeyebilir (özellikle MRF operasyonlarında). Sonuç olarak, elle ayırmanın yerini alabilecek bir görsel ayırma geliştirmek için çaba sarf edilmiştir (Mutz 2003; Gubeno, 2005). Bu saha henüz çocukluk dönemindedir.

3.2.2 Hava ile ayırıştırma

Ayrıştırılacak olan ham malzemenin içinde düşük yoğunluklu parçaların fazla olduğu durumlarda, hava tasnif (sınıflandırma) cihazları kullanışlı hale gelir. Bu cihazlar plastik ve kağıdı metalden uzaklaştırmak için yukarı doğru bir hava akışı kullanır. Birçok hava tasnif cihazı geliştirilmiştir: Burada biraz daha önemli olan iki tanesi anlatılacaktır.

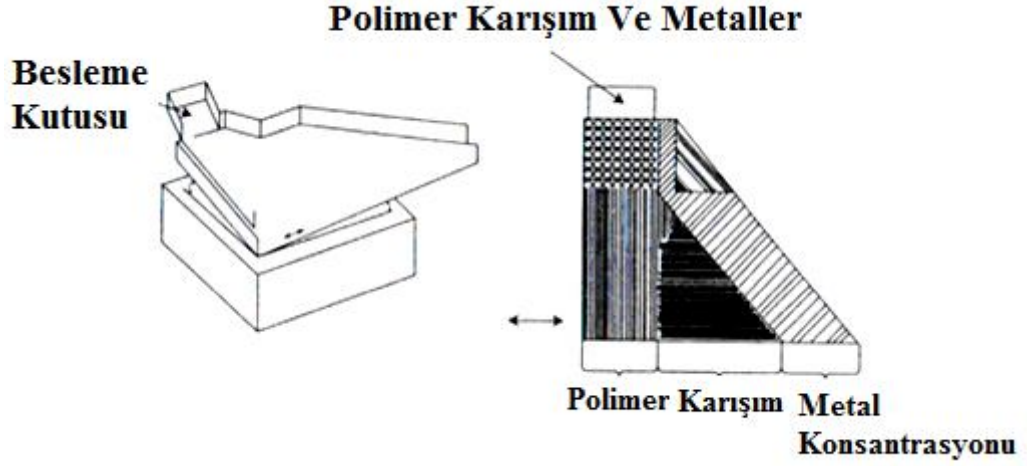
Şekil 3.7 daha çok belediyelerin katı atıklar için kullandığı dikey zig-zag hava tasnif cihazını göstermektedir. Aşağı doğru hareketlendirilen hava yüksek yoğunluklu metal atıkların aşağı düşmesini sağlarken düşük yoğunluklu maddenin yukarı ve dışarı doğru iter. Zig-zag tasarım içeriğin etkili bir şekilde sarsılmasını artırır. Bu kağıt ve metalin birbirlerine yapışmasını veya birbirlerinin yollarını kapatmalarını engeller. Zig-zag tasnifçiler otomatik dilimleyicilerden metal geri dönüşümünde de kullanılırlar.



Şekil 3.7 : Zig-zag hava tasnif cihazı (Mutz, 2003).

Şekil 3.8 dilimlenmiş tel ve kablodan metal geri dönüşümü için yaygın olarak kullanılan bir hava masasını gösterir. Dikey hava tasnifçilerinde büyük maddeler ayrıştırılabilmesine rağmen bu cihaz küçük parçacıklara sahip olmasından dolayı daha nazik işlerde çalıştırılması gerekir. Üst soldaki kutudan yavaşça masaya doğru bırakılan ayrıştırılmamış madde eğimli masada uzak noktaya doğru harekete geçer. Aynı zamanda masanın küçük hollerine doğru verilen hava besleme içindeki daha

hafif olan plastik ve lastiği kaldırarak onları masanın yakın kenarına doğru iter. Metal hurdalar hava akımından daha az etkileneceğinden masanın uzak tarafında toplanır. Karşılıklı taraflardan ayrılmış parçaları toplama sonucunda iki farklı yoğunlukta madde elde edilir. Bir üçüncü ayrıştırma işlemi orta ayrıştırma için kullanılacak çok fazla plastik ve metal tekrar besleme kutusuna atılır. Dilimlenmiş elektronik hurdaların ayrıştırılmasında da hava masaları kullanılır.



Şekil 3.8 : Hava masası (Mutz, 2003).

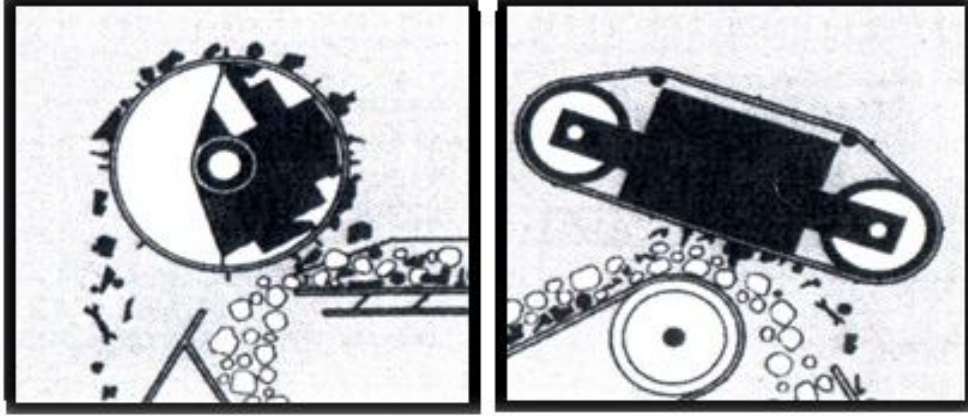
3.2.3 Manyetik ayrıştırma

Bu alüminyum hurdanın ayrışmasında geliştirilen adımların en basitidir. Amacı eğer varsa demir ve çelik ve nikel bazlı alaşımları temizlemektir. Bu amacı gerçekleştirmeye yönelik birçok farklı ayrıştırıcı vardır; en yaygınları dram mıknatıs ve asılı kemer mıknatıslardır. Bir dram mıknatıs kendi etrafında döner ve hareketsiz mıknatıs gibi davranır. Manyetik olmayan maddeler dramdan aşağı düşer ve aşağıda akan taşıyıcılar tarafından toplanır, manyetik maddeler drama yapışır ve manyetik olarak oluşturulan alanı geçinceye kadar öylece kalır. Manyetik parçacıklar bu manyetik alanın toplayıp üst kemerine yapıştırdığı toplama ortamının altında çalışan taşıyıcıya kadar döndürülür. Bu kemer manyetik alandan uzaklaştığı zaman manyetik parçalar düşer ve taşıyıcılar tarafından toplanır. Manyetik olmayan parçalar manyetikten etkilenmez ve taşıyıcı kemerin üzerinde kalırlar.

Şekil 3.9 otomatik dilimlemenin manyetik ayrıştırması için özgün bir stratejiyi göstermektedir. Bu durumda manyetik parçalar bir dram ayırıcıdan onları aşağıda ikinci bir dram taşıyıcıya götüren taşıyıcı kemere düşer. Amaç manyetik maddeleri

birinci dramdan kazara geçen kağıt veya diğer manyetik olmayan maddelerden temizlemektir.

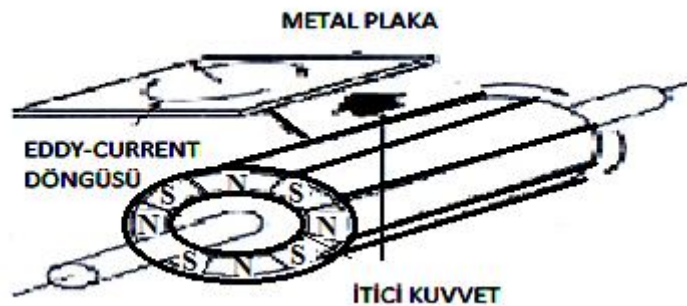
Alüminyum atıkların demir empüriteleri giderek kabul edilemez hale geliyor, bu yüzden alüminyum atıkların hem yukarı çıkış esnasında hem de ergimeye gitmeden önce manyetik ayırıcıların altından geçmeleri engellenmelidir.



Şekil 3.9 : Dram ve taşıyıcı kemer manyetik ayırıştırıcılar (Mutz, 2003).

3.2.3.1 Eddy-current sorting (ECS) yöntemiyle ayırıştırma

Şekil 3.10 sabit bir mıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alana giren iletken parçayı (bir miktar hurda gibi) göstermektedir. Manyetik alan iletken parçaya doğru bir elektrik akımı oluşturur. Bu akım EDDY-CURRENT olarak bilinir. Akımın büyüklüğü manyetik alanın direnci, parçanın elektriksel iletkenliği ve büyüklüğü ve parçanın şekli tarafından kararlaştırılır. Dönüşteki akım girdabı parçanın etrafında birincil manyetik mıknatıs tarafından oluşturulan birincil manyetik alanla sıralı ikinci bir manyetik alan oluşturur.



Şekil 3.10: Kırıyıcıdan geçirilerek yapılan manyetik ayırıştırma işlemi (Mutz, 2003).

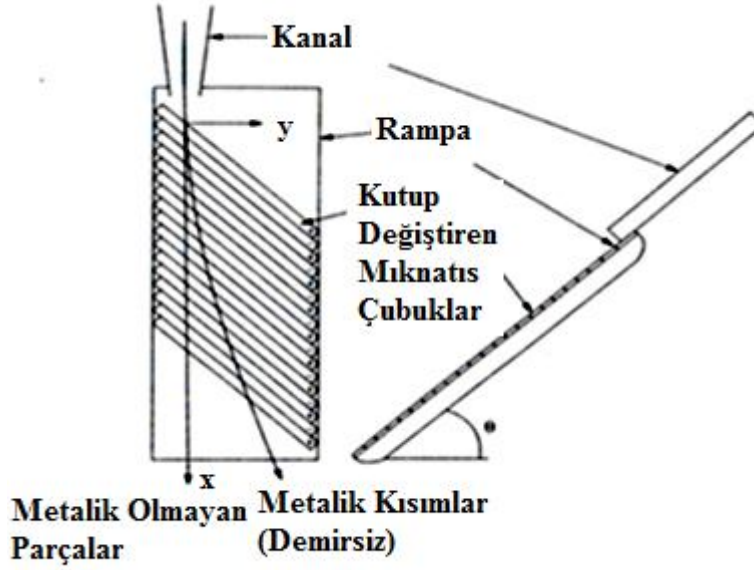
Bu parça zıt kutuplu bir mıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alandan geçtiği anda, ikinci manyetik alan birinci manyetik alanın zıttıdır. Bu parçayı hareketlendiren bir itici Lorentz Force oluşturur ve yeni birincil manyetik alanla birlikte hizalar. Parça hareketlendiği gibi sahip olduğu yönde döner. Parçayı döndüren derece farklı etkenler tarafından belirlenir, fakat en önemlisi maddenin kendisidir. Çizelge 3.1 birtakım metallerin σ/ρ değerlerine göre listesini göstermektedir (σ elektriksel iletkenlik, ρ yoğunluk). Alüminyum ve magnezyumun iletkenliği yüksek yoğunluğu düşüktür. Bunun anlamı sıralı kutuplu mıknatıs dizisinden verilen istikamette geçirilirlerse kolayca döndürülebilirler demektir. Bakırda çok iletkenidir, fakat yoğunluğu çok daha yüksektir. Bunun anlamı bir miktar hurda parçası sıralı alanlardan çok daha az etkilenir demektir. Paslanmaz çelik çok daha az etkilenir. Bu önemlidir çünkü paslanmaz çelik alüminyum sıralayıcılar tarafından kolay ayrıştırılamaz ve manyetik ayırıcılar tarafından da temizlenemez. Sonuç olarak plastik ve kağıt yalıtkan maddelerdir ve manyetik alandan etkilenmezler. Manyetik kutuplar onlar üzerinde hiçbir etki oluşturmaz.

Çizelge 3.1 : Bazı metallerin σ/ρ değeri (Mutz, 2003).

Malzeme	σ/ρ ($M^2/\Omega \cdot kg - 10^2$)
Alüminyum	14,0
Magnezyum	12,9
Bakır	6,7
Gümüş	6,0
Çinko	2,4
Altın	2,1
Pirinç	1,8
Kalay	1,2
Kurşun	0,45
Paslanmaz Çelik	0,18
Cam	0,0
Plastik	0,0

Şekil 3.11 Eddy-Current ayırıcısının ilk lineer-motorlu tipinin tasarımını göstermektedir. Ayırıcı eğimin her iki tarafına yerleştirilmiş kutupları değiştiren sabit mıknatıslar dizisinden oluşmaktadır. Mıknatısın direği eğimlidir ve kentsel çöp ve hurda karışımı ham maddenin eğimden aşağı düşmesi sağlanır. σ/ρ değeri yüksek olan parçalar dikey istikamette fazla etkilenir ve grup III toplanır. σ/ρ değeri düşük olanlar daha az etkilenir ve grup II olarak toplanır. Yalıtkan maddeler ise eğimden direk aşağı düşer ve grup I olarak toplanır. Bu tür ayırıcılar hurda ve çöplerin

ayrıştırılması için ilk olarak 1980'lerin başlarında kullanılmaya başlandı. Fakat bu ayırıcıların birçok dezavantajı vardı. Çok fazla mıknatısa ihtiyaç duyulması kurulumlarını çok pahalı bir hale getiriyor. Daha da önemlisi manyetik ayırıcıdan kaçabilen ferromanyetik parçalar ECS'ye girdiği anda ilk mıknatısa yapışacaktır. Bunun sonunda ayırıcıyı tıkayacak, demirli parçaların temizlenmesi için ayrı bir işlem gerektirecektir.



Şekil 3.11: Eddy-Current ayırıcısının şeması (Mutz, 2003).

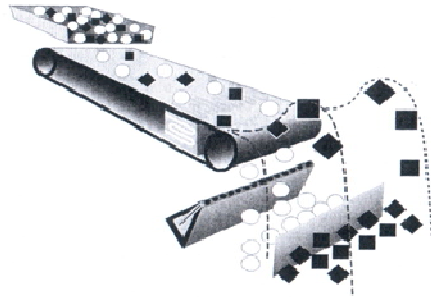
Besleme değişen kutuplarla sıralı sabit bir mıknatıs içeren dönen bir dramın üzerinden geçen bir taşıyıcının üzerine yerleştirilmiştir. Mıknatısların üzerinden geçen taşıyıcı kemerin üzerindeki parçalar lineer-motor ayırıcı ile aynı sırayla ayrılır. Fakat, bu durumda ayırma iletken parçaların taşıyıcının sonuna fırlatılmasına neden olur; σ/ρ değeri yüksek olan parçalar en uzak noktaya gider. Yalıtkan parçalar yani σ/ρ değeri düşük olanlar basitçe taşıyıcının sınırından düşerler. Demirli parçalar diğerinde olduğu gibi mıknatısa yapışır, fakat taşıyıcı onları dramdan uzağa taşıdığı için düşerler, kemerdan temizlenmek zorunda kalınmaz.

Malzemeye ek olarak diğer faktörlerde parçaların ECS taşıyıcıdan ne kadar uzağa fırlatılacağını etkiler.

Mıknatısların kapsama gücü: Daha büyük mıknatıslar Eddy-Current ünitesinin ayırma gücünü artırır. Fakat maliyeti de artırır.

tersi yönde döndürme, taşıyıcıyı dönen mıknatıs dramın altında çalıştırma ve yeni High-Force ECS ünitesi denenmiştir. ECS ünitelerinde bir diğer olası gelişim daha önce kullanılan sabit mıknatıslar yerine elektronik mıknatıs kullanmaktır. Elektronik mıknatıslar daha hafif ve daha ucuz ve duruma göre alanın gücünü değiştirmek için daha kolay ayarlanabilir.

Bir hurda yığınının metalleri metal olmayanlardan ayırmak için kullanılan ayırma teknolojilerine 10 yılı aşkın süredir metallerin iletkenliği damgasını vurmaktadır. Induction ayırıcı yerdeki küçük metalleri bulmak için kullanılan metal dedektörleriyle aynı prensipte çalışır. Bakır bir taşıma bobini altına doğru veya üstüne doğru gelen hurdadaki daha küçük bobinleri etrafına sarar. Metal bobini geçtiği zaman, alıcı bobin parçanın büyüklüğü ve iletkenliğiyle orantılı bir sinyal üretir. Şekil 3.13 bunun hurda yığınlarının nasıl ayrıştırıldığını göstermektedir.



Şekil 3.13: İndüksiyonla ayrıştırma yöntemiyle metallerin non-metallerden ayrılması işlemi (Mutz, 2003).

Alıcı bobinden gelen sinyaller kullanılarak hava jetleri çalıştırılır ve metalik hurda yalıtkan kağıt ve plastikten temizlenir. İndüksiyon ayırıcı metalleri metal olmayanlardan ayırır fakat alüminyum diğer metallerden ayırmak için kullanılmaz, böylece ECS ve Heavy-Media ayırıcı ünitelerinin işlemlerini iyileştirir. Duyarlılığı kaybolabilen veya elle toplayıcılar tarafından saptanamayan 2 mm den daha küçük parçaların geri dönüşümünü sağlayabilir. Bu metali dilimleyici ıskartasını ve atık plastik akıntısını temizlemede ve ek olarak fazladan metal geri dönüşümüne yardımcı olur.

3.2.4 Heavy-Media Separation (HMS) yöntemiyle ayrıştırma

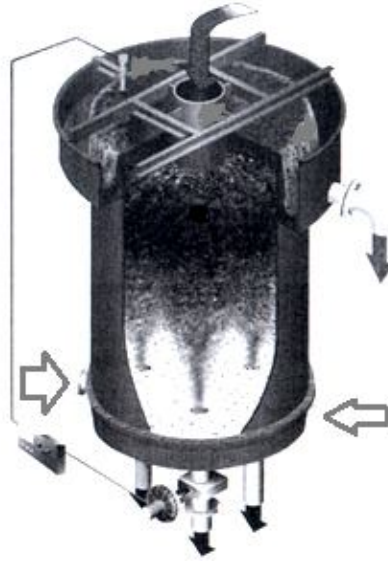
Çizelge 3.2 alüminyum ve genel atıkları alüminyum hurdadaki yoğunluklarını listelemektedir. Bu maddeleri alüminyumdan ayırmanın kolay bir yolu karışık hurdayı yoğunluğu alüminyumun yoğunluğu ile atık yoğunluğu arasında olan sıvının

içine koymaktır. Yoğunluğu sıvının yoğunluğundan büyük olan maddeler batarken yoğunluğu sıvının yoğunluğundan küçük olan maddeler yüzecektir. HMS bu tür ayırıcılar oluşturabilmek için “designer fluid” geliştirmenin ilk adımlarını attı.

Çizelge 3.2 : Alüminyum ve genel atıkların yoğunlukları (Mutz, 2003).

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)
Alüminyum	2,7
Bakır	8,97
Gümüş	10,5
Çinko	7,14
Kurşun	11,3
Kalay	7,28
Pirinç	8,4
Paslanmaz Çelik	7,9
Magnezyum	1,87

İlk şekli suydı. Bütün metallerin ve bazı plastiklerin yoğunlukları 1.0 dan büyüktür, fakat tahta, kağıt, dilimleyici talaşı ve bir çok plastik sudan daha hafiftir ve yüzecektir. Kentsel geri dönüşüm tesislerinin birçoğu metal oranı çöpten fazla olan atıkları ayırmak için su bazlı ayırma cihazları kullanmaktadır. Şekil 3.14 içinden bir kolon doğrultusunda yukarı doğru su pompalanan, düşük yoğunluklu parçaları üst kısımda ve yüksek yoğunluklu parçaları aşağıda geri dönüşüm için toplayan bir Rising Current Ayırıcıyı veya Su Sınıflayıcıyı göstermektedir. Sadece su bazlı HMS yüksek oranda metal içeriğe sahip olunan durumlarda çok iyidir.

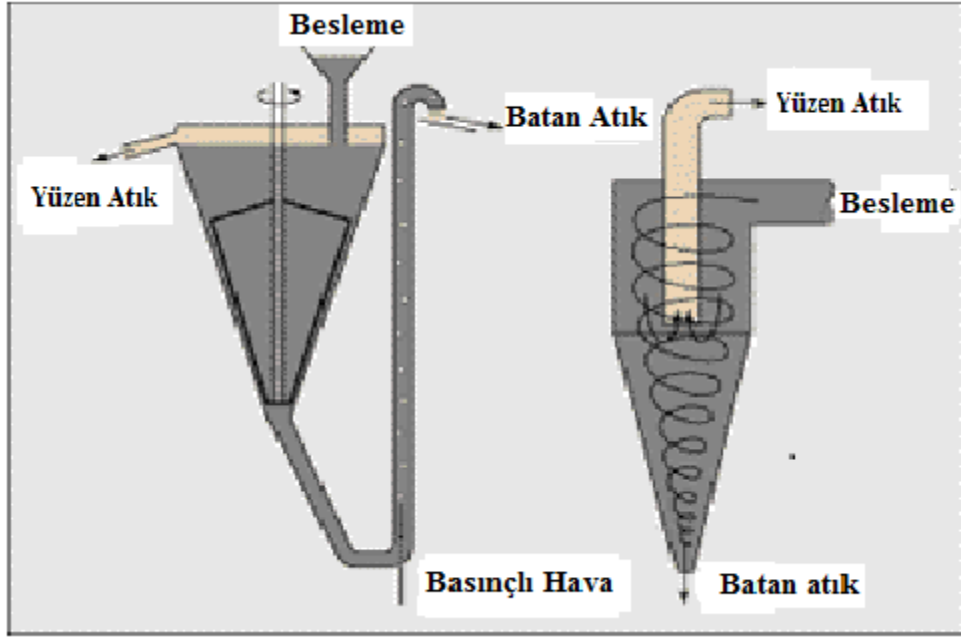


Şekil 3.14: Hidrolik ayırıştırıcı (Mutz, 2003).

Çözünmemiş tuz eklemek 1.0'dan büyük özel yoğunluklar oluşturabilir. Kalsiyum klor, kalsiyum nitrat ve potasyum karbonatta bu işlem için sıkça kullanılır. Nihai çözüm PVC (polyvinyl chloride)'den daha yoğun özel ağırlığa sahip olmaktır, kablo kaplamada en yaygın olarak plastik kullanılır. Sonuç olarak çözünmemiş tuz çözümü kablo doğrama işlemlerinde en yaygın kullanılan çözümdür. Magnezyumdan daha büyük özel ağırlıktaki çözünmemiş tuz çözümünü hazırlamak zordur. Bunun için bu beslenen madde içindeki metal olmayanları metallerden temizlemek zordur.

En yaygın kullanılan akışkan tipi içinde suda asılı kalan yoğun katı parçacıklarının bulunduğu Suspended-Solid Slurrydir. Katı cisim genelde ferrosilikon (%84 demir , %16 silikon) veya manyetit (Fe_3O_4)'dir. Bu materyaller onların çözümden kolayca ayrılabilmesini sağlayan ferromanyetiklerdir. Aynı zamanda aşınmaya karşı dayanıklıdır, bozulması veya kaybolmasına karşı risksizdirler ve pahalı değildir. Farklı düzeylerde ferrosilikon veya manyetit eklenerek karışımın özgül ağırlığı 3.0 seviyesinin üzerine çıkarılabilir. Bu iki tür heavy-media karışımının endüstriyel alanda kullanılmasına olanak sağlar. Özgül ağırlığı 2.0 civarında olan ilki, besleme kümesinin içindeki alüminyum ve daha ağır metalleri magnezyum, plastik ve daha hafif diğer metallerden ayırır. Özgül ağırlığı 2.4'ten büyük olan ikincisi, diğer metaller batık içinde yer alırken yüzen alüminyumunu geri dönüştürür.

Şekil 3.15 HMS için kullanılan bir dram ayırıcı göstermektedir. HMS karışık hurda içinden alüminyumun geri dönüşümü en yaygın kullanılan ayırma yöntem olmasına karşın bir takım dezavantajları vardır.



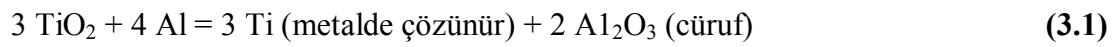
Şekil 3.15: Heavy–Media ayırıştırıcı (Mutz, 2003).

Besleme içindeki çamur ve kir karışımı özgül ağırlığı etkileyebilmektedir ve kontrolü zorlaştırabilmektedir. Orta ağırlıklı birleşik materyaller yanlış ayırışmalar oluşturabilir. Örneğin plastik kaplamalı bakır kablo alüminyumla karıştırılabilecek bir özel ağırlığa sahiptir. Sulu bir işlem olduğu için ayırtırmadan sonra ürünlerin kurutulması gerekmektedir. Aynı zamanda ürünlerin yıkanıp temizlenmesi gerekir ve ek olarak bu büyük maliyet gerektirir. Ürünlerle birlikte karışımın azalması kirliliğe sebep olabilir. Eğer alüminyum hurda içindeki demir içeriğini minimuma indirmek önemli ise bu ciddi bir problemdir. İşlem maliyetini artıran ürün içindeki media kaybı düzeltilmelidir.

Bu nedenlerden dolayı süspansiyon karışımın yerine kullanılabilecek kuru heavy-media sistemi geliştirildi. Kuru sistem elektrikli titreşimcilerle hareket halinde tutulan akışkan kum yatağı kullanır. Kullanılan kum çeşidini değiştirerek kum yatağının özel ağırlığının 2.3 ile 4.6 arasında olması sağlanabilir. Akışkan yatağa yapılan hurda beslemesi özel ağırlığına göre batar ya da yüzer. Kuru HMS alüminyumunu daha hafif metallerden ayırmada çok kullanışlı değildir. Fakat daha ağır metallerden ayırmada kullanılabilir. Fakat yine de bu yaklaşımda da maliyet düşmemektedir.

3.3 Boyanın Temizlenmesi

Kaplama, sıyırma ve piroliz, organik kaplamalardan ve kirleticilerden hurda alüminyumun ayrılmasında etkili bir yöntemdir. Ancak, alüminyum hurdaların çoğu boyalıdır ve boyanın temizlenmesi ise oldukça zordur. Boyanın organik bileşeni buharlaştırılabilir, fakat boya genellikle termal işleme tepki vermeyen inorganik bileşenler de (özellikle TiO_2) içermektedir (Bateman, 1999). İnorganik bileşikler hurdada kalır ve hurda yeniden eritildiğinde cürufu dolaşmaktadır. Bu ergiyik kaybını artırır ve başa çıkılması gereken cüruf miktarını da arttırmaktadır. Ayrıca, alüminyumun eritilmesiyle içindeki TiO_2 'nin bir bölümü de azaltılabilir.



Bir dereceye kadar, sıyırma sürecinde aşındırma yöntemiyle boya kaldırılabilir. Döner fırın işlemi sırasındaki dönme hareketi (takla atma) boyanın bir bölümünü kazır (Bateman, 1999). Akışkan yatak yöntemiyle sıyırma işlemi sırasındaki akışkan ortamın neden olduğu aşındırma ise daha da etkilidir. Yapılan araştırmalar formik asit halojenli asetik asit çözeltisinin boyayı kabarttığını ve kutudan kaldırdığını böylelikle de boyayı tamamen çıkartmayı kolaylaştırdığını göstermiştir (Fujisawa, 2000). Ancak, yoğun boyalı yüksek miktardaki hurdanın dışında bu yaklaşımın uygulanabilirliği şüphelidir.

3.4 Partiler Halinde Ergitme

Bir önceki bölümde alaşım içeriği esasına göre alüminyum hurdayı ayırmanın değeri ele alınmıştır. Bu amaca ulaşmada takip edilen ilk yaklaşımlardan bir tanesi farklı alaşımların tam katılma sıcaklıklarıdır. Tam katılma sıcaklığı alaşımın erimesinin başladığı sıcaklığı göstermektedir. Uygun faz diyagramına göre, içinde yüksek miktarda katkı maddesi (döküm alaşımlar gibi) içeren alaşımların tam katılma sıcaklığı alaşımlı dövme bileşiklerden daha düşük olabilir (Maurice, 2000). Bu özellikle yüksek miktarda bakır içeren alaşımlar için doğrudur. 1980'li yıllarda Amerikan Madencilik Bürosu tarafından gerçekleştirilen araştırma dövme ve döküm hurda karışımını 540-590 °C arasındaki sıcaklıklarda ısıtarak bu solidus farkından istifade etmeyi amaçlamıştır (Ambrose, 1983). Isıtılan hurda ardından bir laboratuvar tipi çeneli konkasör ile işlenmiştir. Tam katılma/sıvılaşma sıcaklığından daha

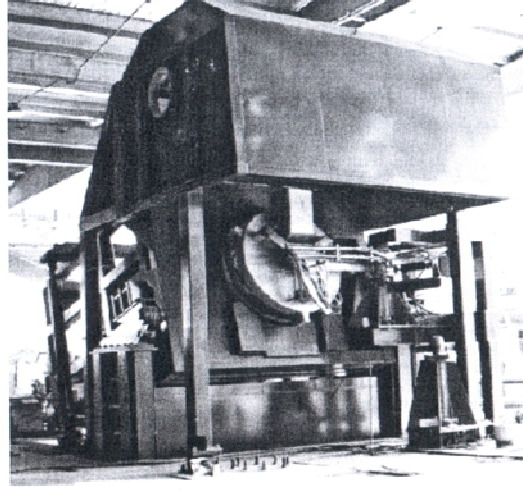
yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtıldığında döküm hurda parçaları kolaylıkla ezilirken, dövme alaşım parçaları çok az bir yassılaşıma göstermiştir. Sonuç olarak eziciden geçen ürünün elenmesi döküm hurdanın başarıyla dövme hurdadan ayrılmasına sağlamıştır.

Bu araştırma döküm hurdanın dövme hurdadan ayrılmasında ticari bir süreç geliştirmek için hiçbir zaman kullanılmamıştır. Aynı laboratuarda daha sonra yapılan araştırma daha önce elde edilen sonuçların doğruluğu konusunda şüphe uyandırmıştır (Maurice, 2000). Ancak, alaşımların ayrıştırılmasında mutlak katılaşma sıcaklıkları arasındaki farklılıkların kullanılması kavramı sonunda farklı bir süreçte kullanılmıştır. Alüminyum içecek kutuları tipik olarak şu üç dövme alaşımdan yapılmaktadır: düşük alaşım gövdesi (3003 veya 3004) ve üst ve alt için 5182 gibi yüksek magnezyumlu alaşımlar. 3004 alaşımının tam ergime sıcaklığı 629 °C, 5182 alaşımının tam ergime sıcaklığı ise 581 °C'dir, yani birincisinden 48 °C daha düşüktür. Bu bilgiyi kullanarak Alcoa ara sıcaklıkta çalıştırmak için KMK'ler için döner vernik temizleme fırını tasarlamıştır (Bowman, 1985). Fırının kendi ekseninde takla hareketi kaplamanın ayrışması için yeterli olacak, bunun yanında gövde de herhangi bir kötü etki yaratmayacaktır. Ürünün elenmesiyle iki alaşım birbirinden ayrılır. Bu 3004 alaşımı üretmek için kutuların yeniden kapalı döngü içerisinde eritilmesini ve benzer şekilde ayrı kapak stokları üretmek için de 5182 alaşım parçalarının kapalı döngü içerisinde yeniden eritilebilmesine imkan sağlar. Ancak, karışık alaşım hurdaların birbirlerinden ayrılması için kısmi olarak eritilmesinin ekonomik olmadığı kesin olarak ortaya konulmuştur.

3.5 Terleterek Ergitme

Alüminyum hurdası kesilerek kendisine yapışık olan diğer metallerden ayrılabilmesine rağmen, istisnalar da bulunmaktadır. Bazı alüminyum parçaları o kadar karışık biçimde demir parçalara geçmiştir ki bunları basit bir kesme işlemiyle birbirlerinden ayırmak mümkün olmaz. Şanzıman, silindir kafaları ve manifoldlar bunlara örnek olarak verilebilir. Yüksek demir içeriklerinden dolayı (%50 veya bazen daha fazla) yüksek demirli hurda olarak bilinirler. Bu tür hurda demir hurdası olarak sınıflandırılmayacak kadar alüminyum içeriği vardır ve aynı şekilde ikincil izabe tesislerinde eritemeyecek kadar çok da demir içeriği bulunmaktadır.

Şekil 3.16 bu soruna getirilen geleneksel bir çözümü göstermektedir (Nijkerk ve Dalmijn, 1998); terletme fırını. Terletme fırınları burada gösterildiği gibi döner tipte veya daha az karmaşık olan sabit kuru ocak tasarımında olabilir.



Şekil 3.16: Büyük döner fırın (Nijkerk ve Dalmijn, 1998).

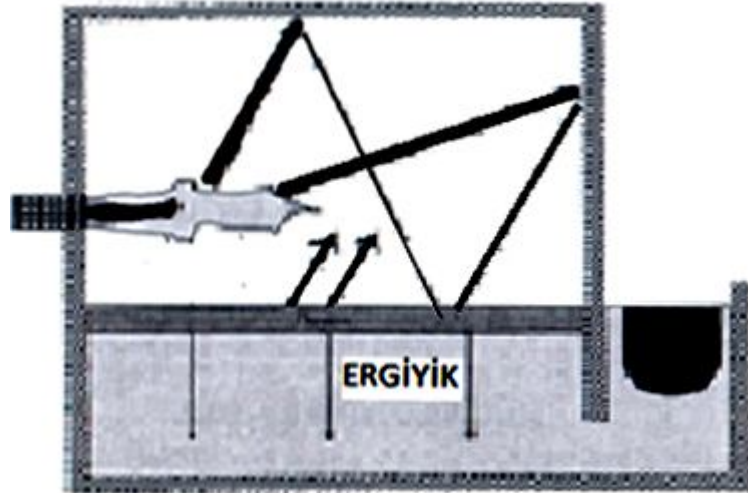
Her halükarda çalışma prensibi basittir. Yüksek demir içeriğine sahip hurda, fırına verilir ve alüminyumun ergime sıcaklığının üzerinde (660°C) bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu sıcaklıkta alüminyum yavaşça erimeye başlar (bu nedenle terleme terimi kullanılmaktadır) ve geriye ise ergime sıcaklığı daha yüksek olan demir kalmaktadır. Sıvı alüminyum fırının altından drenajla akar dişi ve erkek domuzcuklar halinde donar (bu ürün genellikle terli domuz olarak bilinir). Fırınlar çok değişik yakıtlarla çalıştırılabilir ve aynı zamanda daha düşük sıcaklıklarda hurda radyatörlerdeki çinkonun alüminyumdan ayrıştırılması için de kullanılabilir (bu sayede çinkoyla birlikte alüminyumun da geri kazanımı yapılmış olur). Döner fırınlar ergiyik haldeki alüminyumu demir parçalarından ayırmada oldukça iyi iş görürler ve böylece düşük demir içeriğine sahip döküm elde edilmiş olur. Terleme fırınlarında eritilen alüminyum hurdası normal olarak alaşım olarak dökülür, bu nedenle bakır içeriği %2.5-30 arasında olabilir, normal silis aralığı %6.0-9.0'dur ve manganez de %0.2-2.0 arasında olabilir. Terli domuz genellikle tekrar eritildiği ve diğer hurdalarla karıştırıldığı ikinci izabe tesislerine satılır.

4. ERGİTME FIRINLARI HAKKINDA TEMEL BİLGİLER

Hurda alüminyumların çoğu, fosil yakıtlar kullanılarak fırınlarda tekrar eritme yoluyla geri dönüştürülür. Bütün fırınlar tasarım olarak zaman içinde değişse de kullanılan yöntemin temeli hep aynı kalmıştır. Bu temel bilginin öğrenilmesi bu tip fırınların ve ekipmanların tasarımını anlamada önemlidir.

4.1 Isı Transfer Kinetikleri

Şekil 4.1’de görülen fırın doğalgazla çalışan ısının doğrudan sıvı-katı alüminyum alaşımına aktarıldığı tipik bir reverber fırınıdır. Isının bir kısmı doğrudan alevden metale transfer edilirken, bir kısmı da fırının duvarlarından yansarak metale etki eder. Isı fırın duvarlarından yansarak merkezdeki alüminyumda hapsolür. Bazen alüminyum iyi bir ısı yansıtıcısı olması sebebi ile ısı birkaç kez sekerek metal tarafından emilir.



Şekil 4.1 : Reverber fırınının kesiti (Wechsler ve Gitman, 1990).

Isı 2 şekilde metale geçer :

Konveksiyonel olarak

Doğrudan temas ile

Transferi kontrol eden formül aşağıdaki gibidir :

$$q_s = \epsilon \sigma A (T_g^4 - T_s^4) \quad (4.1)$$

q_s = Yüzeyin metrekare başına transfer aldığı ısının watt cinsinden değeri

A = Isıya maruz kalan yüzey alanı

σ = Plank sabiti

ϵ = Merkezin alüminyum ısı transfer sabiti

T_g ve T_s = Alevin ve katı alüminyumun ısısı

Verilen bu formül sadece doğrudan ışıma yoluyla olan ısı transferini gösterir. Doğrudan olmayan ışıma için başka faktörler vardır.

Aleve yakın olan metal yüzeyi uzak olan dipteki metalinkinden daha fazla ısı alır. Bu da onun daha fazla oksitlenmesine yol açar. Dolayısıyla metal kaybı artar.

Konveksiyonel olan ısı transfer oranının formülü basitçe aşağıdaki gibi de gösterilebilir :

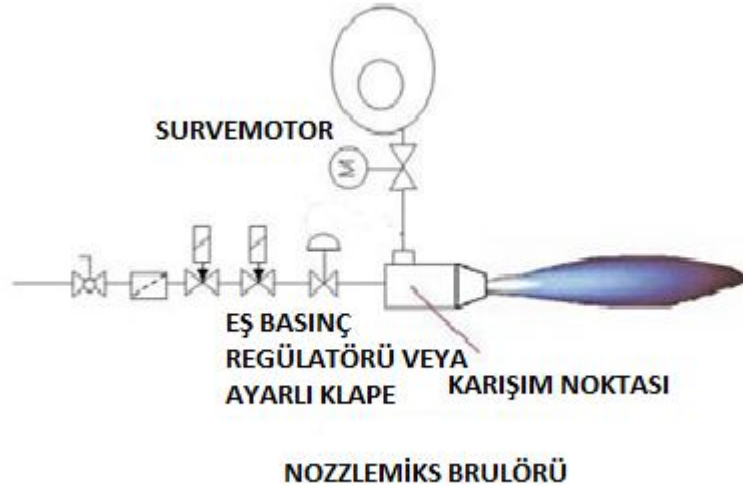
$$q_s = h (T_g - T_s) \quad (4.2)$$

Burada h konveksiyonel ısı transferi faktörüdür. Basıncın artırılmasıyla yüksek h değeri metal üstündeki gaz akışını paralel şekilde arttırır. Bu tür ısı transferi daha az alev gerektirse de yine de yüksek sıcaklık ister. Doğrudan olan ısı transferi reverber fırınlarda % 80 oranında gerçekleşmektedir.

Katı alüminyumun ısı iletkenliği sıvı alüminyumunkine oranla fazladır. Ama bu fark hurda alüminyumlarda azalmaktadır. Yüzeyde pas tutan kısım genelde ısı transfer oranını azaltır. Isı metalin üstünden alt kısma doğru iletildiği için üst kısmın sıcaklığı hep fazladır. Eğer bu fark 100 °C'yi geçerse olumsuz sonuçlar olabilir. Dolayısıyla burada konveksiyonel ısı transfer faktörü önemlidir. Sıcaklık ve metalin alaşımı sabit tutulduğu sürece karıştırma yöntemiyle ısı transfer faktörü arttırılabilir.

4.2 Fırının Yanması

Yanma için gerekli hava ve gaz, brülörün çıkış noktasında karışarak alevi oluşturur. Gaz olarak kullanılan doğalgaz CH_4 (metan) + C_2H_6 (etandan) oluşur. Şekil 4.2’de bu tarz bir brülöre örnek verilmiştir.



Şekil 4.2 : Brülör (Wechsler ve Gitman, 1990).

Asıl tepkime aşağıdaki gibidir :



Bu reaksiyonun enerjisi alevin bilindik sıcaklığını oluşturur. Çıkan ısı doğrudan veya konveksiyonel olarak metale geçer. Alevin karakteristiği ayarlanabilir. Ama önemli olan alevin sıcaklığıdır. Normal hava %21 oksijen ve %79 azottan oluşur. Azot yanmaz ama enerjiyi emer. Dolayısıyla alev ısını düşürerek kayba neden olur. Eğer hava saf oksijenle karıştırılırsa kayıp azalır ve alev sıcaklığı birkaç yüz derece artabilir. Başka bir yolda verilen havanın önceden ısıtılmasıdır.

Yüksek sıcaklıktaki alevlerin avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Oluşan fazla ısıdan dolayı sıcak nokta problemi yaşanabilir. Bu durum fırının ömrünü kısaltır. Diğer bir sorun ise 2000°C üzerinde istenmeyen tepkimelerin ortaya çıkmasıdır.



NO ve NO₂ önemli kirlenmelere yol açarlar. Isı arttıkça oluşma olasılıkları da artar. N₂ yüksek O₂ içerikli hava ile engellenebilir ve sıcaklık düştükçe NO ve NO₂ tekrardan O₂ ve N₂ 'ye dönüşebilir.

4.3 Flaksın Temel Kimyası

Fırına beslenen tüm alüminyum hurdanın yüzeyinde alüminyumun havayla olan kendiliğinden oksidasyonundan kaynaklanan çok ince bir alüminyum oksit tabakası bulunmaktadır. Bu tabaka normal sıcaklıklarda çok yavaş gelişir ve bu nedenle de genellikle yüzeyde belirgin değildir. Hurda fırında ısıtıldığı zaman, yüksek sıcaklık, özellikle hurdanın havada veya oksitleyici bir çevrede ısıtılması halinde, bu tabakanın daha hızlı biçimde gelişmesine neden olur.

Alüminyum eridiği zaman Al₂O₃ cüruf olarak bilinen ikinci fazı oluşturacak biçimde yüzeyde yüzer. Kabuğun yüzey geriliminden dolayı, metalik alüminyum da cürufta hapsolür. Cürufun metal içeriği ergitme koşullarına bağılı olarak %15-80 arasında herhangi bir değerde olabilir. Sonuç olarak, cüruftaki metal kaybı oranlarının azaltılması hurdaların yeniden eritilmesinde dikkate alınması gereken önemli bir husustur.

Metal kaybı oranını azaltmaya çalışan izabe tesisi işletmecilerinin seçeneklerinden biri oksit tabakasını kırmak ve hapsolmuş metali açığa çıkarmak için tasarlanmış olan cüruf eritkenliğini kullanmaktadır. (Peterson 1990) bir eritken için aşağıdaki gereklilikleri listeler:

Ergiyik haldeki metal kaplamalı ve daha fazla oksidasyon olmasını engellemelidir.

Kiri, oksitleri ve diğer metal olmayan maddeleri çözündürmeli veya uzaklaştırmalıdır.

Al₂O₃ katmanını sıyırarak cüruftaki metal damlacıklarının birleşmesini sağlamalıdır,

Alüminyumdan daha düşük bir ergime sıcaklığına (660°C) sahip olmalıdır,

Ergiyik alüminyumdan daha düşük bir yoğunluğa (2.3 g/cm³) sahip olmalıdır

Ergiyik alüminyumla reaksiyona girmemeli ve kontamine olmamalıdır,

Fırın refrakterleriyle tepkimeye girmemelidir,

Toksik olmamalıdır,

Düşük buhar basıncına sahip olmalıdır,

Higroskopik olmamalıdır (suyu çekmemelidir),

Ucuz olmalı ve kolayca geri dönüşümü yapılabilmelidir,

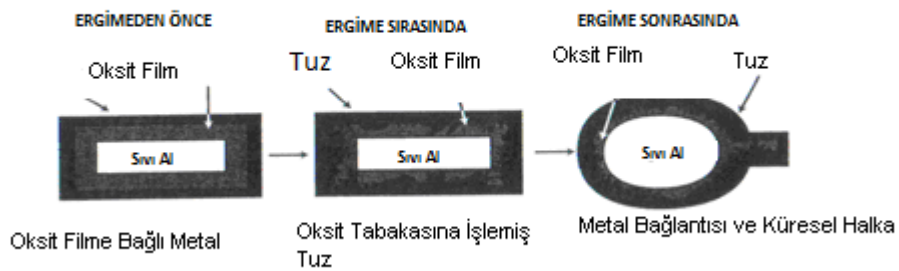
Düşük akışkanlığa sahip olmalıdır,

Temizce metalden ayrışabilmelidir.

Bu gereklilikler kullanılabilecek madde listesini sadece klorür ve florür tuzlarının yer aldığı kısa bir listeye indirgemektedir. Zamanla ağırlıkça 50% NaCl, 50% KCl'den oluşan standart bazlı eritken bileşimi yaygınlık kazanmıştır (Peterson, 1990). (eşmolar 56% KCl ve 44% NaCl analiz eritkeni de kullanılmaktadır.) Ancak, bu erikten metallerin geri kazanımında etkili olmasına ve bir dereceye kadar oksitleri çözmesine rağmen, birleştirmede daha düşük bir etkinliğe sahiptir. Fırın işletmecileri baz cüruf ergiyeğine küçük miktarlarda flüorür tuzu eklemenin birleşmeyi arttırdığını ve içinde daha az metal içeren cüruf ürettiğini keşfetmişlerdir. En yaygın olarak eklenen flüorür kriyolittir (Na_3AlF_6), ancak NaF ve KF de etkilidir.

Flüorür katkılarının neden etkili olduğu ise tartışılan konulardan biridir. Başlarda eklenen florürün, Al_2O_3 dahil eritkendeki oksitlerin çözünürlüğünü arttırdığı ve oksit tabakasının da basitçe çözündüğü öne sürülmüştür (Van Linden, 1990).

Şekil 4.3'de yakın tarihli bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 4.3 : Florür içeren eritkenlerin ergiyik cüruftaki damlaların birleşmesi üzerindeki etkisi (Van Linden, 1990).

Bu görüşe göre, eridiğinde bir damla içindeki alüminyumun değişen şekli oksit tabakasının çatlamasına neden olmaktadır. Çatlaklardan giren ergiyik haldeki erikten ergiyik haldeki damlaya temas etmektedir. Her seferinde eklenen flüorürün (özellikle

de Na_3AlF_6 , NaF , ve KF 'nin) ergiyik haldeki alüminyumun yüzey gerilimini büyük oranda azalttığı ve bunun da eritkenin damlacık yüzeyinden dışa çıkmasına neden olduğunu göstermiştir. Bu meydana geldiğinde, oksit tabakasının geriye kalan kısmı metalden ayrılır ve böylelikle damlacık etrafındaki diğer damlacıklarla birleşmek için daha iyi bir ortam bulmuş olur.

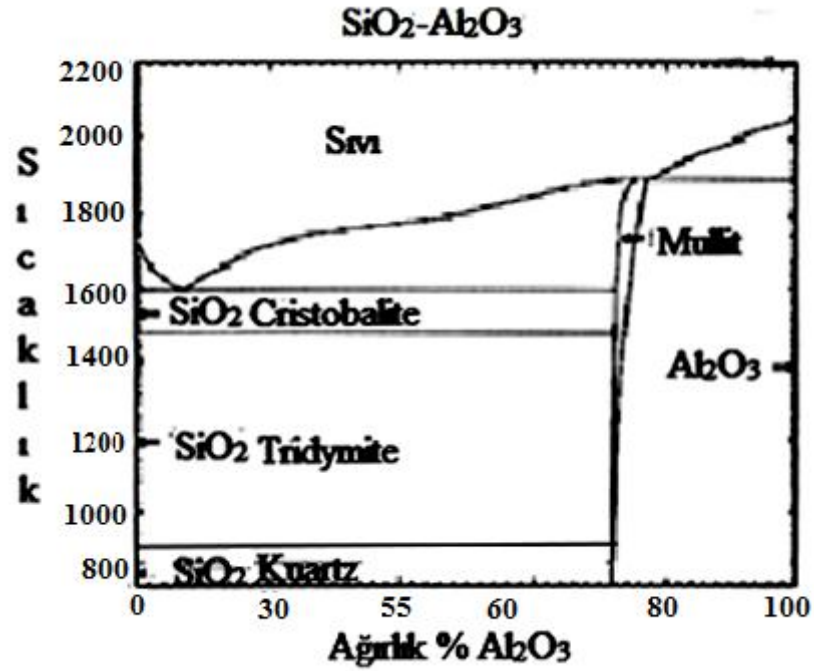
4.4 Refrakter (Ateşe Dayanıklı) Ekileşimleri

Alüminyum ergitme ve tutma fırınlarındaki refrakterlerle ilgili talepler diğer ergiyik metal proseslerinde olduğu kadar ciddi değildir. Ancak yine de bazı gereklilikler bulunmaktadır:

- Ergiyik alüminyumla reaksiyona girmemesi gerekmektedir.
- Ergiyik haldeki ergiyik içersinde düşük çözünürlüğe sahip olmalıdır.
- Cüruftaki Al_2O_3 ile reaksiyona girmemesi gerekmektedir.
- Düşük termal iletkenliğe sahip olmalıdır.
- Hidrasyon direncine sahip olmalıdır (erimeden sonra yakıtın yanmasından dolayı yüksek miktarda su buharı içeriği bulunduğundan dolayı önemlidir).
- Oksidasyona karşı mukavemeti bulunmalıdır.
- $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar stabil kalabilmelidir (brülörlerde oksijen açısından zengin hava kullanılıyorsa daha yüksek olabilir).
- İyi mekanik dayanıma sahip olmalıdır (Fırının sürekli katı atıkla doldurulduğu düşünülürse önemlidir).
- Elbette, en önemli özellik düşük maliyettir.

Geriye kalan ergitme ve bekletme fırınlarında en yaygın olarak kullanılan seçenekler arasında alümina- silika sistem bazlı refrakterler bulunmaktadır. Şekil 4.4 saf korundum (Al_2O_3) ve silika (SiO_2)'ya ek olarak mullitle ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{10}$) birlikte üçlü bileşik oluşturan sistemi göstermektedir. Alüminyum ergitme ve tutma fırınlarındaki ergiyik metal ve cüruflla temas halinde kullanılan refrakterlerde yüksek miktarda alümina içeriği (% 60-85 arası Al_2O_3) bulunmakta ve genellikle de korundum ve mullit karışımından oluşmaktadır. Ancak, bileşim (CaO genellikle bu refrakterlere eklenir) ve mineraloji bakımından (alüminyum silikat refrakterler genellikle ciddi

seviyede serbest silika içerirler) çeşitlilik göstermektedir. Refrakter bileşimindeki ve seçimindeki yeni gelişmeler bir sonraki bölümde ele alınacaktır.



Şekil 4.4 : Alüminyum silisyum faz diyagramı (Quesnel ve diğ.)

Ergiyik haldeki alüminyumda refrakter kullanımındaki en büyük sorun özellikle de ergime hattında veya karın kuşağındaki korozyondur. Korozyon ergiyik haldeki alüminyum ile refrakter arasında korundum ve silikon elementi oluşturan bir reaksiyondan kaynaklanmaktadır (Quesnel ve diğ.)



Her iki reaksiyon da fırın sıcaklıklarında termodinamik olarak elverişlidir. Ancak, ergiyik hattı altında, reaksiyon metalin refrakterin altına işlemesine engel olan ve reaksiyonu engelleyen korundum katmanının oluşumuyla sınırlı kalmaktadır.

Ergiyik alaşım daha yüksek çinko veya magnezyum içerdiği zaman, yüzey katmanı daha az yapışkandır ve refrakter korozyon bu şartlarda daha ciddi bir durumdur.

Karın kuşağında ise bitişik fırın çevresindeki oksijen varlığı nedeniyle koşullar farklıdır. Ergiyik metal refrakterin gözeneklerine girdiğinden, korundum oluşturmak üzere oksijen doğrudan alüminyum ile reaksiyona girer (Mc Collum, 1989). Karın

kuşagındaki daha yüksek sıcaklıklar reaksiyonun daha da çabuk meydana gelmesine neden olur ve refrakterin gözenekliliği metalin tuğladan yukarı doğru hareket etmesine ve ergiyik hattının üzerindeki yerlerde korundum oluşturmaya imkan verir. Bunun sonucu da fırının kapasitesini düşürecek kadar geniş ve temizleme sırasında mekanik olarak beraberinde refrakterin kendisinden de parçalar koparabilecek kadar yapışkan korundum birikintisinin oluşmasıdır.

5. ERGİTME FIRINI VE PARÇALARI

Hurda alüminyum için çok sayıda gaz yakan ergitme fırını bulunmaktadır. Bu fırınların parçalarının büyük bir bölümü ortaktır. Bu parçalardaki gelişmeler tüm fırın tiplerini etkilemektedir. Bu gelişmeler arasında, zaman zaman veya yarı zamanlı olarak kullanılmak üzere fırının ana gövdesine takılan ekipman olarak düşünülebilecek aksesuarların geliştirilmesi de yer almaktadır. Bu parçaların ve aksesuarların amacı alüminyum hurdasını mümkün olan en kısa sürede, en yüksek verimlilikle ve en az ergiyik kaybıyla eritebilmektir.

5.1 Brülörler

Gelişmiş brülörün geliştiricileri bazıları birbirleriyle çelişkili birkaç amacı gerçekleştirmeye çalışmaktadır:

- Fırınların çoğunda %30'dan daha az olan termal verimliliğin artırılması,
- Yakıt maliyetlerinin azaltılması,
- Nihayetinde fırın yükümlülüğünü arttıran yüke ısı transfer oranının artması,
- Ergiyik kaybının azaltılması,
- Özellikle eritme hattında veya üzerinde refrakter ömrünün artırılması,
- Başta NO olmak üzere kirleticilerin emisyonlarının azaltılması.

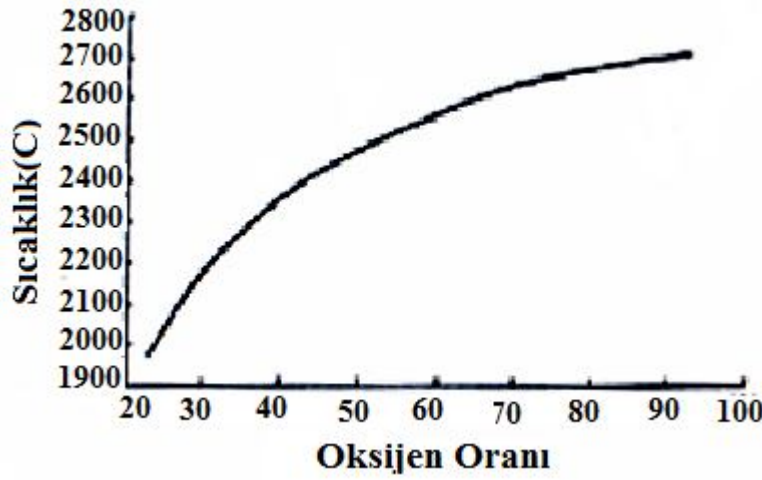
Çok sayıda yeni tasarım önerilmiştir. Brülör tasarımında ve işletmesinde daha önemli olan trendlerden bazıları aşağıda açıklanmıştır:

5.1.1 Zenginleştirilmiş havanın kullanılması

Havada %79 oranında azot bulunmasının yarattığı zorluklar bir önceki bölümde anlatılmıştı. Bu zorluklardan en büyüğü, bacayı terk ettiği zaman azottaki ısının kaybolması doğal olarak da bunun israf edilmiş enerji ve para olmasıdır. Fırın ortamındaki yüksek azot miktarı ayrıca gerekli olan kanalın ebadının da artmasına neden olur, alev sıcaklığını azaltır. Bu da bazı fırınlarda istenmeyen sonuçlar ortaya

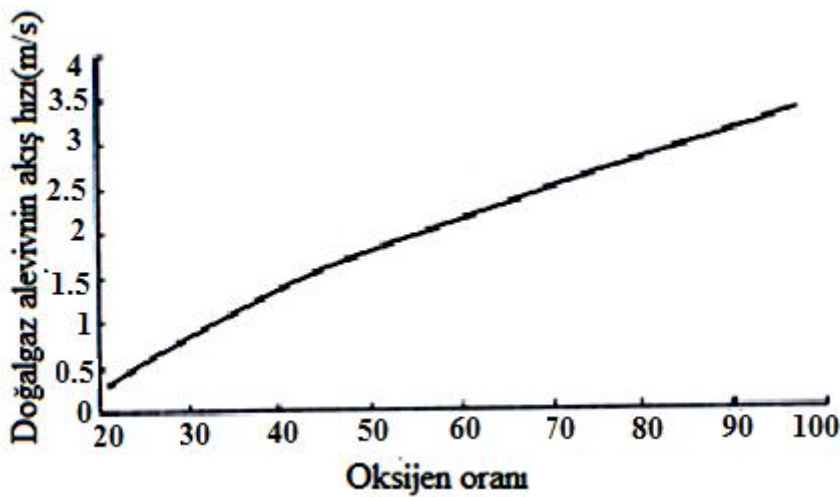
çıkartabilir. Sonuç olarak bazı ocak operatörleri oksijen beslemek suretiyle yanmayı zenginleştirmektedir.

Şekil 5.1 oksijen zenginleştirmenin alev sıcaklığı üzerindeki etkisini göstermektedir. Daha önceki bölümde de belirtildiği gibi, daha sıcak olan alev ısıyı altındaki metale daha çabuk iletir bu da verimliliği artırır. Oksijenle zenginleştirilmiş yanmanın düşük azot çıktısı, azotla daha az ısı kaybedilmesi ve böylelikle de verimliliğin artırılması anlamına gelmektedir.



Şekil 5.1 : Oksijen zenginleştirmenin doğalgaz alev sıcaklığı üzerindeki etkisi (Wechsler ve Gitman, 1990).

Şekil 5.2 oksijen zenginleştirmenin başka bir sonucunu göstermektedir.



Şekil 5.2 : Oksijen zenginleştirmesinin doğalgaz alevi akışkanlığı üzerindeki etkisi (Wechsler ve Gitman, 1990).

Konveksiyon yoluyla ısı transferi daha fazla gaz türbülansı ile arttırılmaktadır. Bu özellikle katı alüminyumun ısıtılmasında yararlıdır. Ancak, oksijen zenginleştirme yüzdesi de başlı başına bir güçlüktür. Daha yüksek alev sıcaklıkları ısıtma oranlarını geliştirebilir ancak lokal aşırı ısınmalara ve daha yüksek ergiyik kaybına yol açabilir (Wechsler ve Gitman, 1990). Sonuç olarak zenginleştirilmiş hava kullanımına yönelik brülör tasarımları genellikle sıcaklığı azaltacak ve NO_x çözünmesini teşvik edecek özellikler içermektedir. Çünkü oksijen zenginleştirmesinin büyük bir bölümü ilk aşamada meydana gelir.

5.1.2 Alev manipülasyonu

Fırın operatörleri ergitme sürecinde farklı noktalarda farklı tipte alevin gerekli olduğunu keşfetmişlerdir. Örneğin, eritmenin ilk aşamalarında, metal alüminyumun düşük salım gücü ısıtma yoluyla ısı transferini oldukça güçlendirir. Bu aşamada konveksiyon yoluyla daha fazla enerji transfer edilen alev arzu edilmektedir. Metal eridikten sonra, üstteki cüruf tabakası daha fazla ısıyı absorbe eder, türbülans egzoz gazının cüruf tabakasında yarattığı türbülans da ergiyik kaybının artmasına neden olur. Bu nedenle, daha iyi ısıtma özellikleri olan bir alev tercih edilmektedir. Ek olarak, tek bir nokta yerine bir alandan ışıyan bir alev metal ve refrakterin aşırı ısınmasını azaltır.

Bunun karşılığında da brülör üreticileri birkaç biçimde alevi manipüle eden tasarımlar geliştirmişlerdir. Geçerli olan manipülasyonlardan bir tanesi alevin asimetrik bir koni biçiminde değil enlemesine olarak yayıldığı düz alev adı verilen durumdur. Hava ve yakıtın kademeli olarak verilmesi alevin tek bir nokta yerine belirli bir alana yayılmasını sağlamaktadır (Lied, 1990; Wechsler ve Gitman, 1990; Schalles, 1998). Havanın kademeli olarak alınması aynı zamanda yakıtın ilk yanmasını da teşvik etmektedir. Bu da bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi piroliz ile sonuçlanmaktadır. Pirolizin neden olduğu kurum alevi daha parlak yapar ve ısıtma yoluyla ısı transferini kolaylaştırır. Oksijen zenginleştirilmesi kullanıldığında, alev genellikle geri dönüşüm egzoz gazında gizlenir; bu da daha fazla egzoz gazı oluşturmada alev sıcaklığını düşürür. Yakıtın ve hava akışının arttırılması daha uzun bir alev oluşmasına yardımcı olur. Bu da aşırı ısınmayı azaltır.

5.1.3 Perdeler / Bölmeler

NO_x üretiminin en aza indirilmesi ergitme fırınları için brülör tasarımı en öne çıkan faktör haline gelmiştir (Lied, 1990). Bu da genellikle alev sıcaklıklarının düşük tutulmasını gerektirmektedir.

Ayrıca, yakıtın tam olarak yanmadığı düşük alev kullanılması tavsiye edilmektedir. Alevin azaltılması içinde çok az oksijen basıncının olduğu egzoz üretilmesini sağlar. NO ve NO₂ oluşumunu geciktirmektedir. NO_x'i azaltmanın bir diğer yaklaşımı da brülörün tasarımı perdelerin/bölmelerin kullanılmasıdır. Bölmeler ürün gazlarında hava ve yakıt jetleri çevresinde tuzığa düşürölmesine, böylelikle de alev sıcaklıklarının düşmesine neden olur.

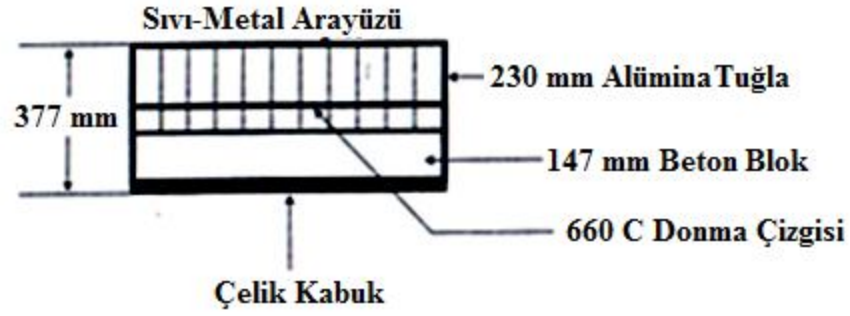
5.2 Refrakterler

Alüminyum eritme ve bekletme fırınlarındaki refrakterlerin performanslarıyla ilgili zorluklar bir önceki bölümde ele alınmıştır. Verilen cevaplar operatörden operatöre farklılık göstermektedir ancak bazı trendlerin olduğu açıktır:

Tuğlalardan tek parça astarlara geçilmiştir (Allaire, 1992). Bunların montajı daha kolaydır ve hiçbir ortak geçişi yoktur. Ancak, tek parça artarlar tuğlalarla aynı mekanik dayanıma sahip değillerdir ve bu nedenle fırına şarj döküldüğünde kolaylıkla zarar görebilir. Düşük çimentolu dökülebilirler ve püskürtme karışımının gelişimi özellikle önemli olmuştur.

Daha yüksek kalitede refrakter, serbest silikanın yok edilmesi özellikle korundum oluşumunu azaltmak bakımından önemlidir (Afshar ve Allaire, 1996).

Şekil 5.3'te gösterildiği gibi sıcak yüzeyinde korozyona karşı dayanıklı refrakter ve altında da ısı kayıplarını azaltmak için düşük yoğunluklu yalıtım malzemesi bulunan kompozit refrakter duvarların, yüksek sıcaklık refrakterine giren metalin katılaştığı donma düzlemi içinde kalacak kalınlıkta olması çok önemlidir. Yalıtım tuğlası ergiyik haldeki metale karşı daha az mukavemet gösterir ve bu nedenle ergiyik metale maruz bırakılmamalıdır. Ayrıca, ergiyik metalin yüzey refrakterin kalınlığını aşması halinde, metal yüzey refrakteriyle yalıtım malzemesi arasında donduğu zaman astar duvardan veya tabandan kabarmabilir.



Şekil 5.3 : Ergitme fırını için kompozit tek parça refrakter yapısı (Afshar ve Allaire, 1996).

5.3 Karıştırma

Karıştırma terimi çoğunlukla belirli fırın mimarileri için tasarlanmış geniş bir teknoloji yelpazesini kapsar. Karıştırma işlemi bir veya daha fazla amaca ulaşmak için yapılır (Henderson, 1996).

Termal basamakların yok edilmesi: Bir eritme fırınında ısı transferi üstten şarja/ yüke doğru olduğundan, üstteki ergiyeğin sıcaklığı 100°C'ye kadar yükselebilir; bu sıcaklık tabanda daha da yüksek olabilir. Termal basamaklar aşırı cüruf oluşumuna ve ergiyik kaybına (metalin en üstte en sıcak olması), değişken kimyaya ve değişken sıcaklıklara sahip metalin kademelendiği zaman dökümle ilgili sorunlara neden olmaktadır. Karıştırma işlemi ise metal sıcaklığının düz bir seyir izlemesini sağlar. Böylelikle de ürün kalitesini artırır ve ergiyik kaybını azaltır. Ayrıca, metal yüzeyinin sıcaklığını düşürür, bunun karşılığında da ergiyik üzerindeki refrakter sıcaklıkları düşer.

Hafif hurdanın batması: Kullanılmış içecek kapları gibi hafif metaller yüklendiklerinde ergiyik metalin en üstünde yüzme eğilimindedir. Bu hafif hurdaların oldukları yerde kalması, aşırı metal kaybına neden olur, bu nedenle bu tür hafif hurdanın mümkün en kısa sürede batırılması çok önemlidir.

Katkı maddelerinin temizlenmesi: Dökümhanelerin çoğunda iyi kalite kontrol filtrasyon gerektirirken, ergiyik alüminyumdaki daha büyük inklüzyonlar eklenen argon baloncukları içinde yüzdürülerek veya fırın duvarlarına yapışarak temizlenebilmektedir. Karıştırma işlemi ise bunu kolaylaştırır.

Daha yüksek ergiyik oranı: Karıştırma, ergiyiğin üstünden altındaki metale veya hurdaya olan ısı transferini geliştirerek geçirgen ısı transfer katsayısını yükseltir. Bu da ergiyik oranlarını artırır.

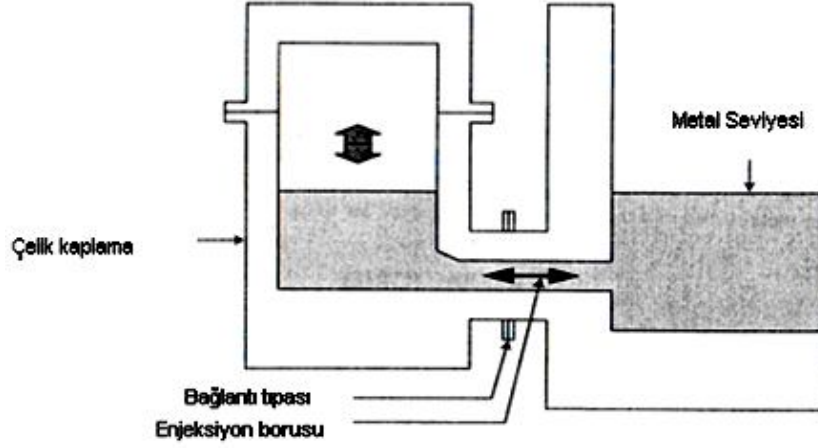
Ergiyik metalin karıştırılması için kullanılan çeşitli cihazlar beş ana cihaz kategorisine ayrılabilir: balon enjeksiyonu, mekanik pompalar, havalı karıştırıcılar, elektromanyetik pompalar ve elektromanyetik karıştırıcılar.

Balon enjeksiyonu iki yoldan yapılabilir: Fırın tabanında yer alan gözenekli bir tapa vasıtasıyla veya üstten takılan delikli bir mızrak veya akış sopası içinden. Baloncuklar argon veya argon- klor karışımıdır ve enjekte edilmesinin ana nedeni karıştırma değil; ergiyiğin gazının alınması veya akışkanlığın sağlanmasıdır. Yakın bir geçmişte geliştirilen döner akış enjektörleri karıştırmada daha etkilidir ancak yine aynı şekilde başka amaçlar için geliştirilmiştir.

Ergiyik haldeki alüminyumda kullanılan mekanik pompaların büyük bir bölümü, büyük deşarj hacimleri ve santrifüj pompa tasarımlarının hızları nedeniyle, gel-git pompa değil santrifüj pompadır.

Bu pompaların birim kapasite maliyeti diğer karıştırma cihazlarına göre daha düşüktür; ayrıca işletme maliyetleri de daha azdır (Henderson, 1996); bakım maliyetleri yüksektir ancak geliştirme çalışmaları bu tür pompaların güvenilirliklerinin geliştirilmesi üzerine odaklanmaktadır. Mekanik pompalar genellikle taşınabilir pompalardır ve birden fazla fırın için kullanılabilirler. Bu tür pompalar genellikle sadece açık kuyu fırınlarda kullanılır (Henderson, 1996); fakat, kapalı sistem fırınlar farklı bir karıştırıcı gerektirirler. Bunlar fırın boşaltıldığında metalin pompadan boşaltıldığı fırınlarda zorluk çıkartırlar; bu nedenle de yuvarlak ve kuru tabanlı fırınlarda daha az tercih edilmektedir. Yine de, düşük maliyeti ve işletim kolaylığı bu pompaları en yaygın olarak kullanılan metal karıştırma cihazı haline getirmiştir.

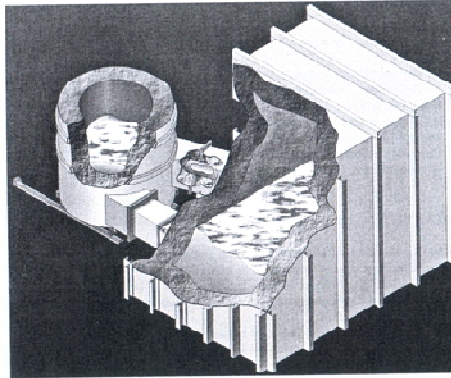
Şekil 5.4 1990'lı yıllarda Alcan tarafından geliştirilen jet karıştırıcının arkasındaki temel ilkeyi göstermektedir. Jet karıştırıcı burada da gösterildiği gibi ana bölümdeki metal seviyesini yükseltmek ve alçaltmak için sabit vakum ve basınç değerinin sürekli bazda döngüsüne dayanan havalı bir karıştırıcıdır.



Şekil 5.4 : Jet karıştırıcı şeması (Henderson, 1996).

Metal seviyesi yükselip alçaldıkça, metal alttaki enjeksiyon ağzı vasıtasıyla sürekli olarak emilir ve itilir. Emme ağzının küçük olması makul bir karıştırma işlemi için yeterli hızın elde edilebilmesini sağlar; jet karıştırıcılar her türlü fırına monte edilebilir. Ancak, jet karıştırıcılar mekanik pompalardan daha pahalıdırlar ve işletme maliyetleri de daha yüksektir (Henderson, 1996); bu nedenle de kullanımları yaygın değildir.

Şekil 5.5 yaklaşık 15 yıl önce alüminyum sanayinde kullanılmaya başlanan elektromanyetik pompanın en yeni versiyonu arkasındaki çalışma şeklini göstermektedir (Henderson, 1996; Peel, 2003).



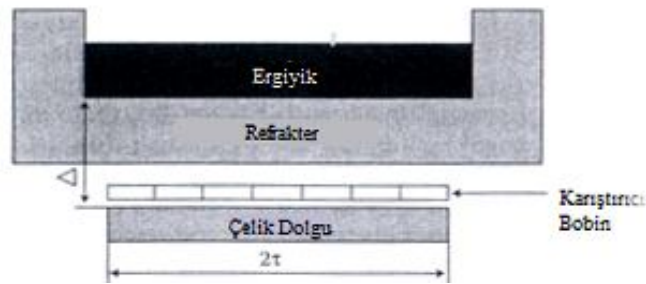
Şekil 5.5 : Ergitme fırınına monte edilmiş bir elektromanyetik pompa (Henderson, 1996; Peel, 2003).

Ekipman yük alümina refrakterlerle aynı biçimde astarlanmış bir kuyu, silikon karbit girişi tüpünün çevresine dolanmış pompanın kendisinden oluşmaktadır. Pompa içinden şebeke alternatif akımının geçtiği tüp çevresine dolanmış bobin içermektedir; tüp içindeki metale uygulanan kuvvetler indüksiyon akım ayracı için 4. Bölümde anlatılanlarla aynıdır. Bu durumda, metal ergiyiği üzerine böyle bir kuvvetin

uygulanması metalin tüpten akışına sebep olmaktadır (aynı prensip indüksiyon fırınlarının da çalışma prensibini oluşturmaktadır. Elektromanyetik pompalar yuvarlak ve kuru tabanlı eritme fırınlarında mekanik pompalardan daha verimlidir ve ayrıca enerji tüketimi ve bakım maliyetlerinde de tasarruf sağlar; ancak bu tür pompaların kurulum maliyetleri daha yüksektir. Sonuç olarak, elektromanyetik pompaların kullanımı özellikle yeni tesislerde artmaktadır.

Elektromanyetik karıştırıcılar eritme için kullanılan indüksiyon fırınlarıyla aynı prensibe göre çalışmaktadır. Fırının dışına monte edilen elektromanyetik karıştırıcılar suyla soğutulan karıştırıcı bobinlerine bitişik bir demir göbekten oluşmaktadır (Peel, 2003). Karıştırıcı bobinlerinden geçen AC elektrik akımı manyetik bir alan oluşturmaktadır; bu da akabinde fırındaki metal ergiyiğinde ikincil bir elektrik akımı üretmektedir.

Akım salındıkça metaldeki değişen manyetik alan metali karıştıran indüksiyon akımları üretir. İndüksiyon fırınlarında olduğu gibi, düşük frekanslar manyetik alanın daha derinine nüfuz eder. Böylelikle de normal kalınlıkta refrakterlerin kullanılmasına imkan verir. Şekil 5.6'da gösterildiği gibi elektromanyetik karıştırıcılar fırının altına veya yana takılabilirler.



Şekil 5.6 : Tabana monte edilen elektromanyetik karıştırıcının şeması (Peel, 2003).

Verimlilikte kazanımı ve elde edilebilecek ürün kalitesini maksimuma çıkaran elektromanyetik karıştırıcılar diğer her türlü karıştırıcı cihazdan daha verimlidir. Ancak, bunların yatırım maliyetleri diğer tüm karıştırma cihazlarından daha yüksektir ve işletme maliyetleri de paralel olarak daha yüksektir (Henderson, 1996). Ayrıca, sıvı hareketliliğindeki artış ergiyik hattı altındaki refrakterin yıpranmasını arttırabilir. Sonuç olarak, bu karıştırıcı cihaz türünün kullanımı oldukça yavaş artmaktadır.

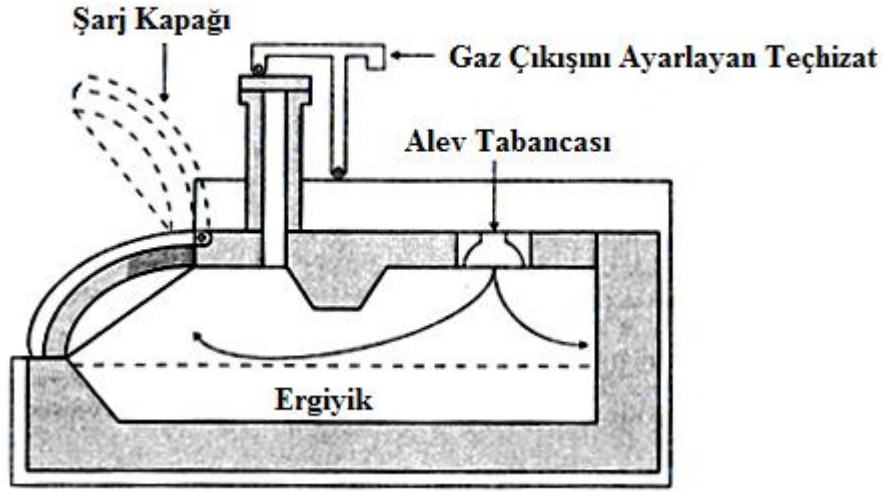
6. FOSİL YAKITLI FIRINLAR

Alüminyum hurdasının ergitilmesinde kullanılan yansımali alevli fırının çeşitli tasarım ve ebatları bulunmaktadır; düzenli olarak da yeni tasarımlar çıkmaktadır. Fırının her zaman sabit olan tasarım amacı birim hacim başına en yüksek ergitme kapasitesine ulaşmak ve yakıt maliyetlerini azaltmak için de termal verimliliği en yükseğe çıkarmaktır. Diğer hususlar arasında fırının aşırı ergiyik kaybına neden olmaksızın ince dağıtılmış hurdayı işleyebilmesi, eğer ön yüzey sıyırma işlemi yoksa kaplı hurdayı işleyebilme yeteneği, bakım maliyetlerinin en aza indirilmesi ve yükseleme ve boşaltma işlemlerinin en kolay hale getirilmesi yer almaktadır.

Fırın tasarımlarını sınıflandırmanın sayısız yolu bulunmaktadır. Bu bölümde fırın tasarımları tek bölmeli ve çok bölmeli fırınlar olarak ayrılacaktır. Ayrıca diğer bölümler özel iki tür gazlı fırın olan döner fırını ve potalı fırını anlatmaktadır.

6.1 Tek Bölmeli Fırınlar

Şekil 6.1 en eski ve en basit yansımali alevli, ıslak tabanlı tek bölmeli fırın tasarımını göstermektedir (Anderson, 1931). Hurda bu tür bir fırının içine doldurulur veya yüklenir, fırın kapağı kapatılır ve ergitme başlar. Metal ergiyiği istenilen sıcaklığa ulaştığı zaman, ya pompayla yada alttaki bir delikten akıtılarak dışarıya alınır. Brülörler fırının yükleme kuyusunun karşısına monte edilir; bacanın yükleme kuyusunun yakınına monte edilmesi, bacaya doğru hücum ettikçe sıcak yanıcı gazların metal ergiyiğine daha fazla ısı transferi yapmalarını sağlamak içindir. Brülörler çatıya veya bir kenara da monte edilebilirler; daha büyük kapasiteye sahip fırınlarda pozitif geri beslemeli brülörlerin veya ön ısıtmalı havanın kullanılması avantajlıdır. Tek bölmeli fırınlardaki yaygın uygulama bir sonraki yüklemenin daha kolay eritilmesini sağlamak, fırının içine boşaltılan hurdanın refrakterlerin tabanına zarar verici darbelerinin önüne geçmek için boşaltma işleminden sonra fırın tabanında bir miktar metal ergiyiğini fırının içinde bırakmaktır.



Şekil 6.1 : Islak tabanlı ergitme fırını (Anderson, 1931).

Islak tabanlı ve diğer fırınlardan metalin çıkartılması üç yoldan biriyle gerçekleştirilir. Hidrolik pompa kullanımı en eski uygulamadır ve genellikle bir ergitme, bekletme veya döküm hattına entegre edilmemiş fırınlarda kullanılır. Ancak, pompaların bakımı ve periyodik olarak değiştirilmesi gerekmektedir; güvenlik de işin bir başka boyutudur. Daha yaygın olarak kullanılan başka bir yaklaşım da fırının tabanından bir delik delinmesini, bu deliğin hızlı kuruyan bir harç tapayla doldurulmasını gerektirir. Metal ergiyiği boşaltmaya hazır hale geldiği zaman, tapa sökülür ve yerine metal ergiyiğinin bir oluk içersine veya transfer kepçesine akıtılmasını sağlayan başka bir tapayla değiştirilir. Fırın tamamen boşaltıldığında, taze harç deliğe tekrar basılır ve böylelikle tapa yenilenmiş olur. Metalin boşaltılması özellikle fırındaki metal ergiyik seviyesinin iyice azaldığı sonlara doğru yavaşlayabilir. Ayrıca, dökülen bu harç metalin içindeki katışıklığın bir kaynağını da teşkil edebilir. Geliştirilen en yeni akıtma yaklaşımı fırını burnunun ucuna dikmek ve öne takılan bir boşaltma hunisi yardımıyla sızdırılmasını içermektedir.

Eğerek boşaltmak ciddi bir maliyet gerektirir ve maliyet açısından da boşaltmaktan daha külfetlidir. Aynı zamanda boşaltmadan daha fazla drenaj kontrolü sağlar ve metal içersindeki inklüzyon daha azdır. Bu nedenle eğerek boşaltmalı fırınlar daha çok yeni tesislerde tercih edilir.

Islak tabanlı fırının bazı kısıtlamaları vardır; bunlardan en ciddiisi nispeten daha dar bir açıklıktan yükleme yapma sorunudur. Fırının tasarımında yapılan gelişmelerin başında, fırına daha büyük yüklerin yüklenmesini sağlayan daha geniş yükleme

kapılarının tasarımı gelmektedir. Ancak, fırınların bu şekilde yüklenmesi yavaş olmaktadır. Bir sonraki aşama ise yan brülörlerin ve çıkartılabilir tavanın bulunduğu döner ergitme fırının tasarımı olmuştur. Fırının üstünün tamamen çıkartılabiliyor olması tek kepçe hurdayla fırına yükleme yapılabilmesini sağlamakta; böylelikle de hem yükleme zamanını azaltmakta hem de fırın çevresine çalışanların çok sık yaklaşmasının önüne geçmektedir. Ancak yine de, ıslak tabanlı fırınlarda bunların dışında başka kısıtlamalar bulunmaktadır:

Yetersiz termal verimlilik ve yüksek yakıt faturaları,

Yüke ısı transferinin zayıf olması ve bu nedenle de ergitme oranlarının düşük olması, Özellikle kullanılmış içecek kutuları gibi küçük hurdalarda ergiyik kayıp oranlarının yüksek olması,

Kaplamalı veya kontamine hurdanın ergitilmesi sırasında çevre sorunlarına neden olabilecek şekilde fırının sızdırmazlığını sağlamanın güç olması,

Başta demir saplamalar ve ataşmanlar olmak üzere hurdadaki metal safsızlıkların metal ergiyiğini kontamine etmesi,

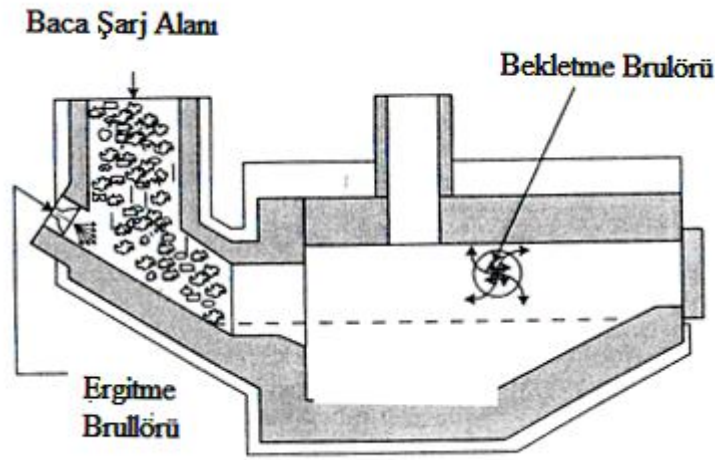
Sonuç olarak, ıslak tabanlı fırınlar terletme fırınlarındaki dökümler gibi yüksek kaliteye sahip hurdaların, geniş dökümlerin ve diğer temiz hurda yığınlarının ergitilmesi için uygundur.

Bu tür iyi temiz çöpü bulmak oldukça zordur; o nedenle, daha iyi tasarıma sahip fırına ihtiyaç olduğu kesindir.

Kuru tabanlı fırınlar, ıslak tabanlı fırınlarda yaşanan bazı sorunları çözmektedir. Bu fırınların en açık avantajı katı hurda ve metal havuzunda farklı tipte alevlerin kullanılmasından kaynaklanan ergiyik kaybını azaltmasıdır. İletken alevler kuru taban alanında katı hurdaya olan ısı transferini maksimuma çıkartmak için kullanılır; düz parlak alevler ise metal ergiyiğinin ısıtılmasında daha iyi iş görmektedir. Üstten yüklemeli kuru tabanlı fırınla kapasitenin maksimize edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak kuru tabanlı fırınlar büyük ve yığın halindeki hurdanın ergitilmesi için kullanılan en yaygın yaklaşımdır.

Ancak, kuru tabanlı fırınların da kendi sınırlamaları vardır. Tabanın yükseltili kısmında kalan refrakterler herhangi bir yastık etkisi yapmadan yüklenen katı hurdanın darbelerine karşı savunmasız durumdadır. Yanıcı gazlar ile yükün arasında

doğrudan bir temasın bulunmaması termal verimliliğin halen düşük olacağı anlamına gelmektedir (%30-35). Hurda büyüklüğü de halen bir sınırlamadır, çünkü tabana yığılı küçük hurdaların orada kalması muhtemeldir. İlerlemedeki bir sonraki aşama ise Şekil 6.2’de gösterilen bacalı fırındır. Burada hurda doğrudan egzoz bacasından yüklenir, egzoz gazı ise bacayı terk etmek için hurdadan geçmek zorundadır. Hurda meyilli tabana ısınmış olarak geleceğinden, buradaki brülörler ertitecek ve ertiyik havuzunun içine boşalmasını sağlayacaktır. Akabinde bu da meyilli tabana daha fazla hurdanın gelmesini sağlar; böylelikle de yarı sürekli bir ertitme operasyonu gerçekleştirilmiş olur.



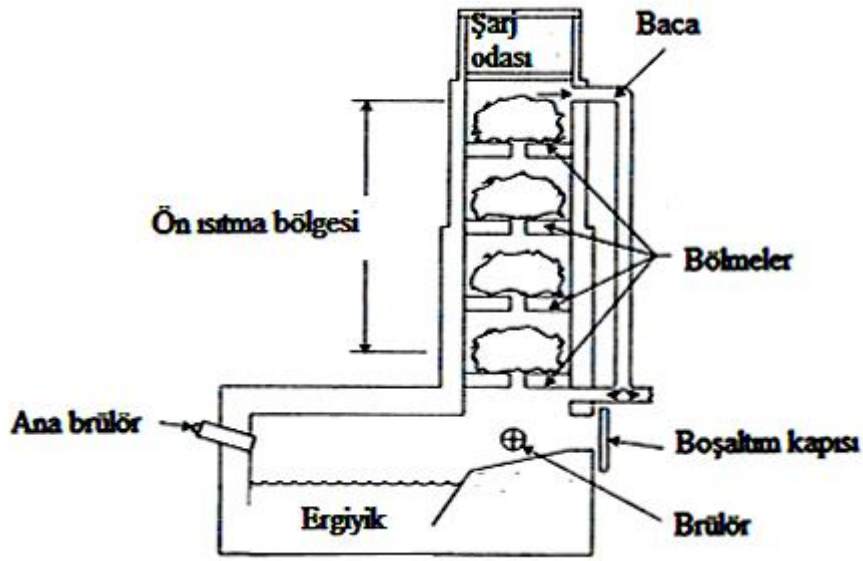
Şekil 6.2 : Bacalı ertitme fırını (Groteke 1992).

Geleneksel ıslak yataklı ve kuru yataklı ertitmeyle kıyaslandığında bacalı ertitmenin bazı avantajları vardır. Bunlardan en önemlisi verimin artmış olmasıdır. Egzoz gazından geri kazanılan ısıyla (çıkış sıcaklıkları 500 °C veya daha azı) % 50’ye kadar enerjinin geri kazanımı yaygındır (Groteke 1992). Hurdanın egzoz gazıyla ön ısıtmaya tabi tutulması ayrıca fırın içindeki ertitme süresini de kısaltarak fırının verimliliğini arttırmış olur. Açık yükleme kuyusunun da ortadan kalkması ertiyik kaybını %80’e kadar azaltır ve emisyonları asgari seviyeye indirir. Bacalı ertitme çok büyük hurdalar için uygun değildir ancak baca kat kat yüklenen maddelerin tutulduğu kuru tabanla birlikte yapılabilir. Bu avantajları çoğunlukla bacalı fırın için gerekli olan ek yatırım maliyetini karşılamaktadır.

Basit tek bölmeli fırınlarla kıyaslandığındaki ciddi bir gelişme olarak algılanmasına rağmen bacalı ertitmenin de bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi kontrol edilebilirliktir; eridikçe hurda daha çok aşağı ineceğinden, ertitme

oranını yavaşlatmak da bir o denli zor olacaktır. Bacadaki hurdanın basıncı baca içine yığılabilecek olan hurda miktarını sınırlandırmaktadır bu da ön ısıtma yapılabilecek olan sürenin sınırlandırılmasına sebep olacaktır. Eğer yüklenen hurda değişik ebatlardaysa düz bir ısıtma da ayrı bir endişe kaynağı olacaktır.

Şekil 6.3 Japonya’da 1970’li yılların başlarında kullanılmaya başlayan bir sonraki aşamayı kuleli fırınları göstermektedir. İçinden baca gazının geçtiği kule birbirlerinden döküm demir çubuklarla ayrılan bir kat katlı bölmeden oluşmaktadır.



Şekil 6.3 : Dikey kuleli ergitme fırını (Groteke 1992).

Hurda üst bölmeden yüklenir ve fırındaki ergitme işlemi de aşağıdaki tabanda tamamlanır. Metal fırından boşaltıldığı zaman her bölmedeki demir çubuklar sırasıyla çekilir ve hurda bir sonraki bölmenin içine düşer. Gerektiği hallerde ana fırındaki kuru taban bölümüne doğrudan çok büyük hurdaların yüklemesi yapılabilir. Tasarım sütun/ baca içersinde daha fazla hurdanın bekletilebilmesine olanak sağlar; böylelikle de ısı geri kazanımı ve fırın verimliliği arttırılmış olur (% 60-77) arasında geri kazanım sağlanır). Alevle hurda arasında doğrudan bir temas olmaması da ergiyik kaybının azaltılmasına yardımcı olur. Ancak, kuleli fırınların maliyeti diğer fırınlardan daha yüksektir ve hareketli parçalarının sayısının çok olması bakım personeli için gerçek bir baş ağrısı nedenidir. Sonuç olarak, kuleli ergitme fırınlarının kullanımı yaygın değildir.

6.2 Çok Bölmeli Fırımlar

Yan kuyulu fırın, ergiyik kaybını ve cüruf oluşumunu arttıran yanıcı gazlar ile katı hurda arasındaki doğrudan etkileşimi ortadan kaldırmak üzere tasarlanmıştır. Bunun yerine, yüksek parlaklığa sahip alevlerle (daha önceki bölümde ele alınmıştır) sadece soldaki temiz odada bulunan ergiyik haldeki metal ısıtılmaktadır. Aşırı ısıtılan metal ergiyiği bir bölmenin altından akar ve önce ısıtmak nihayetinde de ergitmek üzere yan kuyuya yüklenen katı hurdayla temas eder.

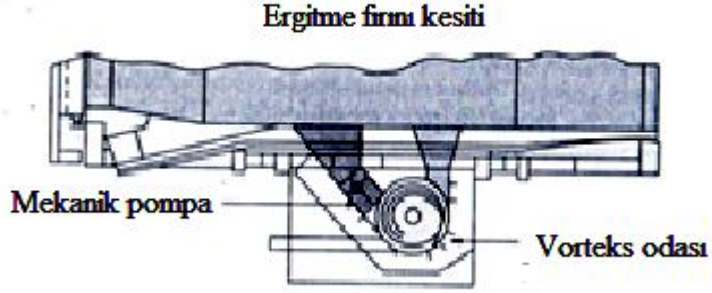
Yük eritildiğinde, metal ergiyiği kaynama sıcaklığına kadar yeniden ısıtılır ve boşaltılır ve bu süreç bu şekilde tekrarlanır.

Yan duvarlı fırınlar minimal ergiyik kaybıyla kullanılmış içecek kutuları gibi hafif hurdaları ergitmede etkili bir yöntemdir. Ancak, bu fırınlar kullanılmaya başlandığından itibaren geliştirilmeleri arzu edilmektedir. Çünkü hiçbir şekilde hurdanın ön ısıtmaya tabi tutulması söz konusu değildir ve yakıt verimlilikleri zayıftır. Bunun neticesinde verimliliği arttırmak için pozitif geri besleme veya hava zenginleştirme yapılması yaygın hale gelmiştir. Daha büyük sorun ise metal ergiyiğinin bölmenin altından akarak kuyudaki hurdayla temas edebilme oranının sınırlı kalmasıyla ergitme kinetiklerinin yavaş meydana gelmesidir. Daha önceki bölümde anlatılan bölme çevresinde metal akış oranlarını geliştirmek ve ergitme oranlarını arttırmak için metal pompalama cihazları geliştirilmiştir. Hem mekanik hem de elektromekanik pompalar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Her ne kadar yan duvarlı fırın hurdanın yanıcı gazlarla olan doğrudan temasını engellemesine rağmen, ince bir dağılım gösteren malzeme ısıtma sırasında yeterince cüruf oluşturacak biçimde metali oksitlendirmektedir. 1990'lı yıllara kadar buna karşı alınan tek önlem cüruftaki metal ergiyiği miktarını en aza indiren ancak çevresel açıdan istenmeyen bir atık üreten tuzun akışıdır. Sonuç olarak eritilirlerken hurda parçalarının yan kuyuda metal eriği içersinde çökmesini sağlayacak, böylelikle de metal oksidasyonunu en aza indirerek flakslama ihtiyacını ortadan kaldıracak yöntemler geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu maksatla iki farklı yöntem geliştirilmiştir.

Şekil 6.4 Premelt Systems tarafından pazarlanan ilkinin göstermektedir. Bu teknoloji ana fırın bölmesinden metal ergiyiği içersine grafit gazlı emme tulumbasının takılı olduğu ayrı bir yükleme kuyusu kullanmaktadır. Metal ergiyiğinin yüksek akışkanlığı ve yükleme kuyusunun tasarımı hurdanın oksitlenmeden batmasını

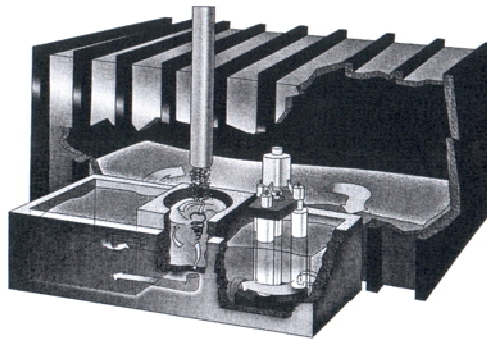
sağlayan bir vorteks oluşturmaktadır. Yükleme kuyusunun üzerinde yer alan seramik kapak ayrıca durağan bir ortamda yükleme yapılabilmesini sağlayarak oksidasyonu azaltır. Gazlı emme tulumunun kullanılması hiçbir hareketli parçaya ihtiyaç duyulmaması ve bakım maliyetlerinin azaltılması anlamına gelmektedir.



Şekil 6.4 : Premelt Systems vorteks fırını (Groteke 1992).

Şekil 6.5 ikinci hurda batırma teknolojisi olan LOTUSS'u göstermektedir (Van Linden, 1990).

Böylelikle aşırı ısıtılmış metal ergiyeğinin vortek odasına basılması için mekanik bir pompa kullanılmaktadır. Basma odasına ve yükleme kuyusuna ek olarak Lotus Fırınları, vorteks ile ana bölme arasında ergitme sırasında oluşan cürufun (veya yüklenen hurdadan kopan gevşek parçaların) yüzdüğü ayrı bir kuyuya sahiptir. Bu da cürufun temizlenmesini kolaylaştırmaktadır.



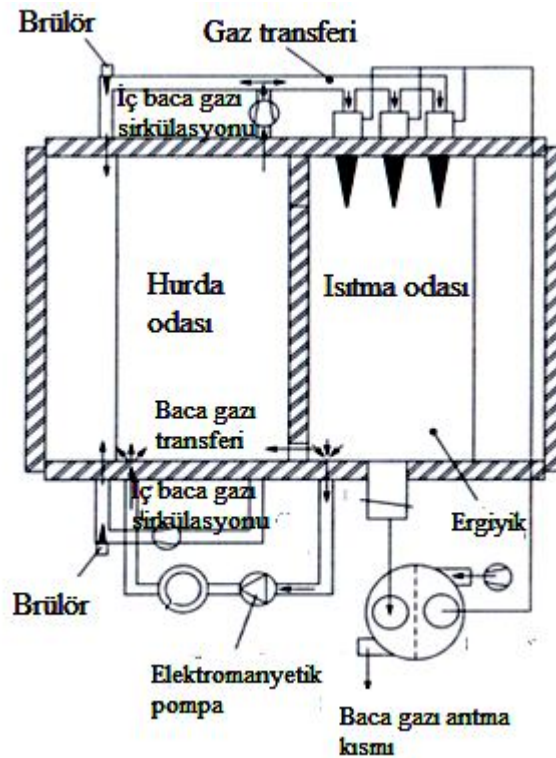
Şekil 6.5 : Lotuss hurda daldırma sistemi (Van Linden, 1998).

Malzeme ocağa yüklendiğinde üzerlerinde halen kaplama malzemesi ve diğer organikler mevcutsa küçük hurdaların ergitilmesi sorunu daha büyük bir sorun haline gelmektedir. Kullanılmış içecek kutuları gibi tutarlı tipteki hurdalarda ön yüzey

sıyırma işlemi (bakınız 5. Bölüm) savunulur ancak karışık hurda yükleri genellikle hiçbir yüzey sıyırma işlemine tabi tutulmadan doğrudan ergitme fırınına yüklenir.

Kaplamalarda yer alan karbon alüminyum karbit oluşturmak üzere alüminyumla reaksiyona girdiğinden, bu durum daha fazla ergiyik kayıplarına yol açmaktadır. Kaplamaların çözünmesiyle ortaya çıkan gazlar da çevre açısından sorun teşkil edebilir.

Şekil 6.6 Almanya’da geliştirilen bu soruna çözüm getiren iki bölmeli fırını göstermektedir. Fırın geniş bir yan kuyu olan bir adet hurda bölmesinden ve metal ergiğinin kızdırıldığı ısıtma bölmesinden oluşmaktadır. Bir elektromanyetik pompa bu iki bölme arasındaki metali deveren ettirmekte ve brülörlerin pozitif geri beslemesi termal verimliliği arttırmaktadır. Fırındaki en belirgin gelişme baca gazı devresinin yeniden dolaşımının sağlanmasıdır böylelikle kaplamaların çözünmesiyle ortaya çıkan gazlar ek enerji geri kazanımı için yakılmakta ve emisyon değerleri de doğal olarak daha düşük olmaktadır. Piroliz oranlarını en yüksek seviyede tutmak için hurda bölümünün en üstündeki sıcaklık 550°C’de kontrol edilmektedir. Fırındaki oksitlenmeyi önleyici hava ergiyik kaybını en aza indirger ve böylece tuzsuz bir işletmeyi mümkün kılar.



Şekil 6.6 : Kirli hurdalar için ikiz bölmeli ergitme fırınının üstten görünüşü (van Linden, 1990).

Eğer hurda kaynağının kalitesi yeterince tutarlı değilse çevresel açıdan güvenilir bir ergitme için, bu fırınlar iyi birer seçimdir. Kaplamalı hurdaların düzenlilik arz ettiği yerlerde ayrıca yüzey sıyrıcıların bulunması daha rekabetçi bir seçim olabilir.

6.3 Küçük Hacimli Fırınlar

Bundan önceki bölümlerde anlatılan fırınlar genellikle büyük hacimli uygulamalar için geliştirilmiş çözümlerdir (>1000 kg/saat ergiyik oranı). Daha küçük hacimli ergitme operasyonlarında sermaye giderlerinin en aza indirilmesi enerji verimliliği pahasına da olsa en önemli husustur. Küçük hacimli fırınlar da büyük ergitme operasyonlarında kullanılan sabit durumlu operasyonlar yerine açık ve kapalı esasına göre kolaylıkla işletilebilir olmalıdır. Bu da fırının tamamen boşaltılabilecek ve soğuk çalıştırılabilecek şekilde daha küçük termal hacme sahip olması gerektiği anlamına gelmektedir. Bu tip uygulamalar için genellikle elektrikli fırınlar kullanılmaktadır, ancak elektriğin çok pahalı olduğu yerlerde gazlı fırınlar da kullanılmaktadır.

Sabit ve eğilebilir potalı fırın modelleri mevcuttur. Sabit fırınlarda çıkartılabilir veya sabit (paraşütlü) potalar bulunmaktadır. Yakın bir geçmişte Japonya’da bu tür fırınlarda getirilen yenilik dıştan yaylı potaların geliştirilmesi oldu. Bu yenilik yanıcı gazların potayla temasta kaldığı süreyi uzatarak yakıt tüketiminin %20 oranında düşürülmesini sağlamıştır. Islak ve yağlı hurdaların eritilmesi için de küçük kuru tabanlı fırın geliştirilmiştir.

6.4 Döner Fırınlar

Yüksek oksitli hurdalarda eritme sırasında flaks kullanımı bir gerekliliktir. Yeterli çalkalama olmadan biriken tuz cürufunun metalden ayrılması oldukça zordur. Bu sorunun üstesinden gelmek için Şekil 6.7.’de gösterilen döner fırın geliştirilmiştir. Döner fırın yüklemek ve ateşlemek üzere geriye cüruf ve metal ergiyiğinin boşaltılması için de ileriye doğru yatan uzun eğimli bir tüptür. Yanda doğal gaz ve zaman zaman da fueloil kullanılarak tabanda gerçekleşir. Sıcak egzoz gazı fırının içinde üste doğru yol aldığı anda, yükün içinden geçer ve bacalı fırında olduğu gibi yükü ön ısıtmaya tabi tutar. Gaz aynı zamanda fırının refrakter duvarlarını da

ısıtır; bu da ısıtım ve aktarımın yanı sıra duvarlardan iletim yoluyla yükün ısıtılmasına olanak sağlar (Peterson, 1990).

İçerik istenilen sıcaklığa yükseldiğinde fırın eğilir, metalle tuz cürufu boşaltılır. Büyük hurda parçalarının veya cürufun refrakterlere zarar vermesini önlemek için ergitme sürecinin ilk aşamalarında fırının dönmesi yavaştır; ergiyik havuzu oluşmaya başlayınca, dönme hızı içten içe saniyede 7–8 metreye yükseltilir. Ergitme süreleri fırın büyüklüğüne ve yüke bağlı olarak değişir ancak genellikle ıslak tabanlı fırına kıyasla daha kısadır.



Şekil 6.7 : Döner ergitme fırınından bir görüntü (Peterson, 1990).

Döner fırınlar geleneksel yansız alevli fırınlara nazaran daha hızlı ve daha verimlidir. Ancak, bu tür fırınların yatırım ve bakım maliyetleri diğer fırın tipine göre daha yüksektir. Sonuç olarak, cüruf ve diğer oksitli hurdaların eritilmesi için en uygun fırınlardır. Bu fırında yanıcı gazlar fırına monte edilen seramik borular içinden geçer, bu borular ısındıkça aşağısındaki metal ergiyiğine enerji yayarlar. Bir boru kullanılmış olması da yanıcı gazları metalden ayırır; bu da oksidasyon ve katışıklığın sınırlandırılmasına ve ergiyik kaybının azaltılmasına yardımcı olur. Çatıya yerleştirilen elektrik rezistanslı elemanlar da aynı etkiyi göstermektedir. Parlak alev koşullarında çalışan yansız alev fırınları daha ucuz ve daha yaygındır.

6.5 Bekletme ve Dozlama Fırınları

Küçük ergitme tesislerinde ergitme fırınından boşaltılan metal ergiyiği döküm öncesinde genellikle bir oluğa aktarılır. Daha büyük tesisler ise metalin sıcaklığının ve bileşiminin ayarlanabilecek bir bekletme fırını kullanmaktadır. Bu da ergitme fırının daha çok kendi kullanım amaçları için kullanılmasına ve verimliliğinin arttırılabilmesine imkan verir. Bekletme fırının kullanımı aynı zamanda ergitme fırının katı hurdanın ısıtılması için en uygun koşullarda çalıştırılabilmesini (indirgeme durumu, iletken ısı transferi), verimlilik ve ergitme oranlarının arttırılabilmesine imkan tanır.

Çok farklı bekletme fırınları bulunmakla beraber, genelde gazla çalışan fırınlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

7. ELEKTRİKLİ ERGİTME FIRINLARI

Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, alüminyum hurdanın büyük bir bölümü doğal gaz, petrol ve hatta kömür gibi fosil yakıt kullanılarak ısıtılmaktadır. Ancak, daha önce de tartışıldığı gibi enerji kaynağı olarak fosil yakıtların kullanılmasının bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar arasında, yanıcı ürünlerin alüminyum ergiyeyle olan etkileşimi, baca gazında toksik ve tehlikeli bileşiklerin bulunması, bazı ocaklarda düşük verimlilik, diğerlerinde yüksek yatırım, işletme ve bakım maliyetleri, bazı alanlarda fosil yakıtların bulunmasındaki güçlükler sıralanabilir.

Bir süredir elektrik alüminyum hurdanın ergitilmesinde alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Hurda eritmek amacıyla ilk elektrikli fırın 1918 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde kuruldu (Anderson, 1931) ve hemen ardından da Avrupa’da görüldü. Bu tür fırınlar söz konusu tarihten bu yana kullanımdadır ve zaman içinde evrim geçirmişlerdir. Getirilen en büyük yenilik 1930’larda indüksiyon fırınlarının kullanılmaya başlanmasıydı. Bu fırınlar o zamana kadar kullanılmakta olan rezistanslı ve ark fırınlarının yerini almıştır.

Elektrikli fırınların alüminyum hurdaların eritilmesinde fosil yakıt kullanan fırınlar karşısında önemli avantajları bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi daha temiz metal geri kazanımıdır. Elektrik ocağı ortamında hiçbir yanıcı ürün bulunmadığından, cüruf oluşumu ve gaz birikmesi daha azdır. Sonuç olarak da ergiyik kaybı daha azdır (Groteke, 1992) ve metal saflığı yüksektir. İndüksiyon fırının karıştırma hareketi ergiyik içindeki sıcaklık katlaşmasını en aza indirir ve tutarlılığı artırır. Elektrikli fırınlar, özellikle de küçük boyuttakiler gazla veya petroller çalışan fırınlardan daha verimlidir. Yanıcı yakıtın bulunmaması demek sıfır veya çok az baca gazının olması, bu da tabii ki çevreye dost bir proses anlamına gelmektedir. Ayrıca, elektrikli ocaklar daha az gürültülüdür. Ancak, bazı dezavantajları da vardır. Homojenliği arttıran döndürme hareketi aynı zamanda cürufun ayrılmasına da mani olabilir ki bu inklüzyon riskini arttırmaktadır. Elektrikli fırınların oldukça verimli olmalarının yanında, elektrik genellikle katı yakıtlardan daha pahalı bir enerji kaynağıdır, bu nedenle de maliyet avantajı bulunmamaktadır.

Elektrikli fırınların yatırım maliyetleri aynı kapasiteye sahip fosil yakıt kullanan fırınlardan daha yüksektir. Daha da önemlisi, elektrikli fırınlar büyük yansıma alevli fırınların eritme kapasitesine ulaşmada zorluk çekmektedir (Groteke, 1992).

Sonuç olarak elektrikli fırınlar genellikle dökümhaneler gibi küçük hacimli operasyonlarda kullanılmaktadır. Cüruf oluşumunu en aza indirme ihtiyacı nedeniyle, bunlar daha çok hurda değil de külçe eritmede kullanılabilirler; bu fırınlarda hurda eritilmesi halinde, bu satın alınmış hurdalar değil genellikle evsel atıklardan toplanan hurdalar olmaktadır. Sonuç olarak, hiçbir istatistik bulunmamasına karşın bu fırınlarda eritilen alüminyum hurdası miktarı toplam içinde küçük bir paya sahiptir. Ancak, değişen çevresel kısıtlamalar ve bir ergitme fırınında daha temiz metal üretme ihtiyacı gelecekte elektrikli fırınların daha çok kullanılmasını teşvik edebilir.

Alüminyum eritmede kullanılan elektrikli fırınlar birkaç şekilde sınıflandırılabilir. En önemlisi indüksiyon veya rezistansla gerçekleştirilen elektrik ısısı üretim biçimidir. İndüksiyon fırınları da kendi içinde kanallı ve kablo çekirdeksiz ünitelerdir. İkinci tür sınıflandırma ise fırının fonksiyonuna göredir. Bazı elektrikli fırınlar eritme üniteleri olarak kullanılırken, bazıları bekletme fırını, bazıları ise her iki amaç için de kullanılabilmektedir. Frekans seçimi de yine elektrikli fırınların sınıflandırılmasında başka bir yoldur çünkü bu hangi metal ergiyiğinin çıkarıldığına göre belirlenir (ayrı bir potada, elle daldırmayla veya bir oluğa boşaltarak). Bu bölümde elektrikli fırınlar indüksiyon ve rezistanslı fırınlar olarak ayrılacak ardından diğer sınıflandırma yöntemlerine göre de sıralanacaktır.

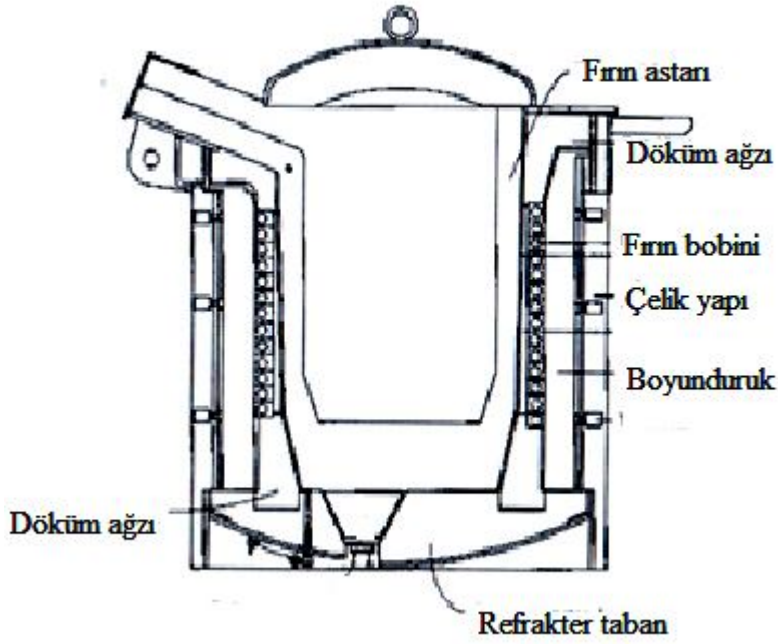
7.1 İndüksiyon Fırınları

İndüksiyon akım kavramını bir hurda akışında alüminyumun diğer manyetik olmayan metallerden ayrılmasında kullanılan bir teknoloji olarak gördük. İndüksiyon akımı (burgaçlı akım), bir iletkende bitişik manyetik veya elektrik akımıyla ilişkili olan bir manyetik alanla indüklenmiş elektrik akımını ifade etmektedir. Bir indüksiyon akım ayırıcısında, bu alanın oluşturulması için genellikle güçlü kalıcı mıknatıslar kullanılmaktadır. Farklı kutuplara sahip bir dizi mıknatıs üzerlerinden bir parça hurdanın geçirilmesi sürekli olarak hurda parçasını çeviren ve olduğu yoldan sapmaya zorlayan Lorentz kuvvetlerini oluşturmaktadır.

Eğer hurda parçası (veya diğer bir iletken) belirli bir süre alternatif akımın ürettiği manyetik alanda kalırsa, bunun alan tarafından üretilen ters indüksiyon akımına olan direnci hurdanın ısınmasına neden olacaktır. Buna indüksiyon ısınması adı verilir ve bazı metalurji uygulamalarında kullanılmaktadır. Ergitme amacıyla indüksiyon ısınmanın endüstride kullanılmaya başlanması 1930'lu yıllara dayanmaktadır; günümüzde bu fırınlar demir ve çeliğin yanı sıra çoğunlukla demir içermeyen metallerde kullanılmaktadır. İndüksiyon bazlı fırınların tasarımında iki genel yaklaşım seyredilmiştir. Birincisinde, çekirdeksiz bir fırında indüksiyon akımları vasıtasıyla katı metal doğrudan ısıtılır ve eritilir. İkincisinde ise, metal ergiyiği kanallı indüksiyon fırının tabanındaki yüksek sıcaklığa kadar eritilir, kızdırılan metal ergiyiği, fırının üstünden beslenen külçeleri veya diğer hurdaları da eritir.

7.2 Çekirdeksiz Fırınlar

Şekil 7.1 tipik çekirdeksiz indüksiyon fırının yapısını göstermektedir (Perkul, 1972). Metal yükü içeren astarın dışını çevreleyen indüksiyon sargısı korozyonu azaltmak ve ek destek sağlamak üzere seramik harcı içine gömülmüş su soğutmalı bakır tüpten oluşmaktadır. Çıkartılabilir potalı fırınlarda, sargı neredeyse fırının tepesine ulaşır. Burada görüldüğü gibi devirmeli fırınlarda, bölmenin ardından döküm ağzı gelmektedir. Sargı tarafından oluşturulan manyetik alan aynı şekilde iki yandan da eşit olarak güçlüdür; dış fırın kabuğunun ısınmasından kaynaklanacak kaçak flaksın önlenmesi için sargının dışında boyunduruk olarak bilinen dönüştürücü demirin dikey lamine levhaları bulunmaktadır. Bunun gibi devirmeli fırınlara ek olarak, çıkartılabilir potalı fırınlarla birlikte alttan boşaltılabilen çekirdeksiz fırınlar da bulunmaktadır.



Şekil 7.1 : Çekirdeksiz indüksiyon fırının yapısı (Perkul, 1972).

Bir çekirdeksiz indüksiyon fırının tanımlanmasında en büyük karar işletme frekansının seçilmesidir. 1970'lere kadar hiçbir seçenek yoktu ve çekirdeksiz fırınlar görünüşte 50-60 Hz şebeke frekansı ile çalışıyorlardı. Bunun bazı sonuçları oldu. Birincisi manyetik alan nüfuz derinliği üzerinde fırın frekansının etkisinden kaynaklanmaktadır. Robiette (1972) nüfuz derinliğini şu ifadeyle açıklamaktadır:

$$P = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (7.1)$$

burada p santimetre cinsinden nüfuz derinliği, ρ alanın etkilediği iletkenin direnci (yani, fırın yükü), μ iletkenin manyetik geçirgenliği, ve f frekans. Belirli bir malzemede, p $1/f^{0.5}$ 'e orantısaldır. Şebeke geriliminin yüksek nüfuzu geniş çaplı bir fırının sıçramayı önlemesi ve alanı iptal etmesi anlamına gelmektedir. Ancak, pratik hususlar sargı çapının dıştan dışa en fazla 3.65 m olmasını gerektirmektedir.

Sonuç olarak, şebeke frekanslı indüksiyon fırınları özellikle ergitme sırasında yükün direnci daha fazlaysa daha düşük verimlilikle çalışırlar (ve sonuç olarak p daha yüksektir). Ayrıca, Knodler çekirdeksiz bir fırında eritilebilecek asgari alüminyum hurda veya külçe büyüklüğünün 3.5 p olduğunu iddia etmektedir. Bu şebeke

frekansıyla çalışan indüksiyon fırınlarının en iyi döküm çarklar gibi büyük çaplı hurdalarla birlikte kullanılabileceği anlamına gelmektedir.

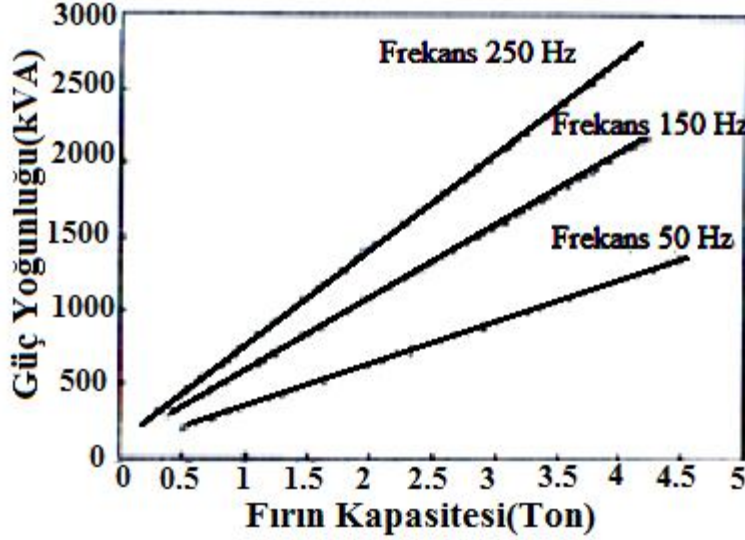
Şebeke frekansıyla fırının çalışmasının ikinci bir sonucu da ergiyiğin karıştırılmasında frekansın etkisidir. Shuichi (1988) karıştırma işlemini şu ifadeyle hesaplamaktadır:

$$F = \alpha \frac{P}{\sqrt{fDH}} \quad (7.2)$$

burada α is eritilen metalin cinsinden kaynaklanan bir sabit değer, P fırına verilen giriş enerjisi, D potanın çapı ve H de sargı yüksekliğidir. Daha düşük frekanslar karıştırmanın artması demektir. Bu karıştırma teorik olarak hurdayı sürekli olarak ergiyik yüzeyinin altında bırakarak hafif hurdaların eritmesini daha kolay hale getirmektedir. Ancak karıştırma işlemi atmosferle olan irtibatı arttırarak ve hidrojen emilimini arttırarak metal kalitesine zarar verebilir. Arttırılan karıştırma, aynı zamanda ergiyik metalin ergiyik üzerindeki kubbenin yani menisküsün yükselmesine neden olur. Çok yükselen menisküs metalin dökülmesine neden olabilir. Bunun önlenmesi için (a) enerjinin kesilmesi (ve fırın ergiyik kapasitesinin azaltılması) veya (b) pota duvarının sargıdan yüksekliğinin arttırılmasını gerektirir ki bu ikinci seçenek ergiyik içinde sıcaklık katmanlaşmasına neden olabilir. Sonuç olarak, hurda eritmede şebeke frekansıyla çalışan çekirdeksiz indüksiyon fırınlarının kullanılması yaygın değildir. Bu amaçla kullanıldıklarında ise içine hurdanın eklendiği sıcak topukla birlikte kullanılmaktadır (Smith ve Hayes, 1992). Bu şarjın direncini azaltır ve karıştırma işleminin ısıyı katı hurdaya daha etkin olarak iletmesini sağlar.

1970’li yıllarda katı halli frekans dönüştürücü (tristorize veya salınımlı devre) orta frekansla (150 - 600 Hz) fırının çalışmasını mümkün hale getirmiştir. Fırınların orta frekansla çalıştırılması şebeke frekansıyla çalışan frekanslarla kıyaslandığında sargının oluşturduğu nüfuzun derinliğini azaltmaktadır. Daha yüksek frekansta çalıştırma aynı zamanda karıştırmayı böylelikle de menisküs yüksekliğini düşürür.

Karşılığında bu da Şekil 7.2’de gösterildiği gibi belirli bir fırın büyüklüğünde kullanılabilecek güç yoğunluğunu arttırmaktadır.



Şekil 7.2 : Çekirdeksiz indüksiyon fırın yükü ile farklı frekanslardaki karşılaştırılması (Smith ve Hayes, 1992).

Bu enerji artışı eritme sürelerinin kısaltılması, orta frekansla çalıştırmanın yatırım maliyetlerini düşürmesi ve verimliliği arttırması gibi nedenlerle fırın ebadının küçültülmesi anlamına gelir. Bu azaltılan karıştırma ve kısaltılan ergitme süreleri, şebeke frekansı ile çalışma sırasında meydana gelenden daha az ergiyik kaybı ve küçük hurda parçalarının da ergitilebileceği olarak anlaşılabilecek daha düşük nüfuz derinliği olarak algılanabilir. Orta gerilimle ergitme yapmanın bir diğer avantajı da şebeke frekansı ile çalışan fırınlar genellikle ergiyik topuğu kullanırken orta frekansla çalışan fırınlarda soğuk yükün daha kolay eritilebilmesidir.

Hurda eritmek için çekirdeksiz indüksiyon fırınla kullanılması gereken optimal frekans kapasiteye, eritilecek olan maddenin büyüklüğüne, ekipmana ve elektrik maliyetlerine bağlıdır. Kapasite (ve fırın) ne kadar büyükse frekans da o kadar azdır.

Çekirdeksiz indüksiyon fırınları iki temel yöntemden biriyle çalışır (Perkul, 1972). Birincisi parti halinde çalışmadır ve ısıtmanın ardından fırın tamamen boşaltılmaktadır. İkincisi ise her ısıtmadan sonra içeriğinin yaklaşık %50'sinin boşaltıldığı ve fırının yarı sürekli çalıştırıldığı boşalt ve yükle şeklinde çalıştırma yöntemidir. Boşalt ve yükle işleminde sıcaklığın daha tutarlı olması refrakter ömrünün daha uzun olmasını sağlar; ancak, parti halinde çalıştırmada daha yüksek elektrik verimliliği sağlar. Boşalt ve doldur süreleri parti halinde ergitmede daha uzunken boşaltma sıklığının azaltılmış olması fırın kullanımını maksimize etmektedir. Ayrıca, orta frekanslı çekirdeksiz fırınların tamamen katı yüklerle çalışabilmesi, boşaltmadan

sonra hiçbir sıvı topuğu (iyileşme sırasında buharlaşan yağ ve su) bırakılmadığı sürece yaylı veya ıslak hurdanın da parti olarak yüklemeye kullanılabileceği anlamına gelmektedir. Islak hurdanın toplam yüklemenin beşte biri veya daha azı oranında olması tavsiye edilmektedir (Groteke, 1992).

Yükleme frekansı çalıştırma tipine (parti halinde veya boşalt-ve-yükle), fırın büyüklüğüne ve frekansına bağlıdır. Şebeke frekansı ile çalışan çekirdeksiz fırınlarda eritme kapasitesinin düşük olması bu fırınların daha sık yüklenmesi gerektiğini gösterir; orta frekanslı fırınlar sürekli bir yükleme cihazının kullanımı uygun olabilecek şekildedir (Groteke, 1992). Köprülenmeyi engellemek için çekirdeksiz bir üniteye yüklenen katı parçaların ebatları fırın çapının üçte ikisinden daha az olmalıdır (Perkul, 1972).

Çekirdeksiz fırınların işletilmesinde dikkat edilmesi gereken husus cürufun dağılımıdır. Normalde alüminyum ergitme fırınlarındaki cüruf sıyrıldıkları tepe noktasına kadar yükselir. Ancak, çekirdeksiz fırınlardaki karıştırma cürufu ergiyeğin içine doğru çeker (Smith ve Hayes, 1992). Metal devir daim yaptığı için cüruf fırın duvarlarında birikmektedir. Bunun bazı endişe verici yanları vardır. Her şeyden önce refrakter penetrasyonu (nüfuz) cürufun içersinde küçük miktarlarda tutulmuş metal bulunmaktadır; pota duvarı kenarında bu küçük metaller kızdırılmış olacaktır (bilindiği gibi pota duvarı sargıdan gelen manyetik alanın en kuvvetli olduğu yerdir). Kızdırılmış metal kolaylıkla refrakterin içine girer ve ömrünü kısaltır.

İkinci sorun ise cüruf emiliminden kaynaklanan astar kalınlığının artmış olmasıdır. Bu da eriyiğe uygulanan güç girişini düşürmektedir. Üçüncü bir endişe konusu da cürufun devri daim edilen metalle ve metaldeki helezonla bu yan tortulardan aşınmasıdır. Metal ergiyiği yüzeyine zarar vermeden biriken cürufu düzenli olarak temizlemek için tasarlanmış özel mekanik kazıyıcılar bulunmaktadır.

7.3 Rezistanslı Fırınlar

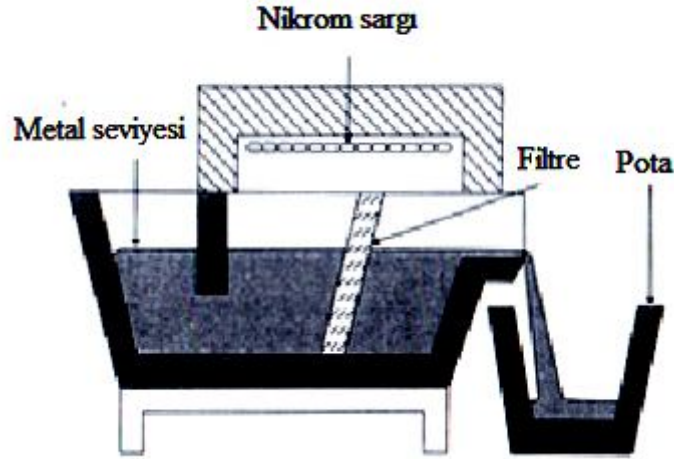
Elektrik rezistanslı fırınlar fırının çevresine dolanmış tel elemanından oluşmaktadır. Telden akım geçtiği zaman, direnci ısı üretir ve sıcaklığını artırır. Nihayetinde de elemanın sıcaklığı kızaracak dereceye kadar yükselir. Kızaran eleman ısıyı fırının içinde yer alan pota da dahil çevresine yayar. Bu da potanın içindeki metali ısıtır veya eğer ergiyik haldeki bir metalse sıcaklığını muhafaza eder. Elemana giden

akımın değiştirilmesi üretilen enerjiyi de değiştirir böylelikle de sıcaklık kontrolü sağlanmış olur.

Rezistans fırınlarındaki eleman nikel krom alaşımı olan Nikromdan yapılmıştır. Bu alaşımdaki krom eleman kullanıldığında geçirimsiz bir oksit tabakası oluşturur. Oksit tabakası elemanın daha fazla oksitlenmesini engeller ve elemanın değiştirilme ihtiyacı göstermeden uzun bir süre boyunca kullanılabilmesine imkan sağlar. Eleman genellikle yüksek saflığa sahip seramik borularla desteklenmiş açık sargı elemanı olarak monte edilir; elemanlar aynı zamanda, arızalandıklarında kolaylıkla çıkartılabilecekleri refrakter panellerine de yarı gömülmüş olarak da bulunabilirler (Atkins, 1992). Bu tipte daha yüksek güçlerde yükleme yapmanın mümkün olması nedeniyle (artan ergiyik oranı) alüminyum eritmede açık sargı elemanları tercih edilir ancak bu avantajı ortadan kaldıran gelişmiş yarı gömülü elemanlar da bulunmaktadır.

Rezistanslı fırınlar genellikle iki kategoriden birine aittir: küçük potalı paraşütlü fırınlar ve ısıma ısıtmalı bekletme elektrikli yansımali alevli fırınlar ve döküm tekneleri. Paraşütlü fırınların kapasitesi 1500 kg'a kadar yükseltilebilir ancak genellikle bu fırınlar daha küçüktür. Bir ergiyik ökçesiyle birlikte kullanılabilir ancak soğuk yüklenmektedir. Verimlilikleri yüksektir (%80) ancak düşük giriş enerjisi diğer fırınlara kıyasla eritme kapasitesinin daha zayıf olması anlamına gelmektedir. Bu fırınlarda hiçbir karıştırma olmadığı için, sadece yığın hurda kullanılabilir (birincil külçeyle birlikte). Ancak, elektrik kullanımı daha temiz metal, düşük cüruf üretimi gibi diğer elektrikli fırınların avantajlarıyla aynı avantajları sağlar. Kil-grafite nazaran daha yüksek termal iletkenliği olması sebebiyle potalar genellikle silikon karbitten yapılmıştır.

Elektrikli yansıtmalı fırınlar (bakınız Şekil 7.3) bekletme fırınları olarak kullanılırlar. Bu fırınlarda silikon karbit elemanlar genellikle fırın çatısına gömülü olarak bulunur ve genellikle daha küçük olmalarına rağmen 6000 kg metal ergiyiğini muhafaza edebilirler. Metal alüminyum ergiyiğinin yüksek yansıtma özellikle verimli bir ısıtma için geniş bir havuz yüzeyine ihtiyaç duyulacağı anlamına gelmektedir; bu da bekletme sırasında cüruf oluşumu ve hidrojen toplama potansiyelinin artacağı anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, bu tür fırınların kullanımı sınırlıdır.



Şekil 7.3 : Rezistanslı bekletme fırınından bir kesit (Smith ve Hayes, 1992).

Rezistans ısıtmalı fırınların dezavantajlarını ortadan kaldırmak için girişimler yapılmıştır. Bunlardan en ümit vaat edenlerden biri yükün ısıtılması ve ergitilmesinde katı yakıt, metal ergiyeğinin ısıtılmasında ve bekletilmesinde rezistanslı ısıtma kullanan hibrit fırındır. Böylelikle elektrikle ısıtmanın avantajları olan daha temiz metal ve düşük gaz toplama oranı devam ettirilirken ergiyik kapasitesini de geliştirmektedir. İkinci girişim ise silikon karbit potanın ısıtılmasında indüksiyon sargısı kullanan Inductotherm'in geliştirmiş olduğu doğrudan ısı konseptidir. Potanın öz direncinin yüksek olması çabuk ısınmasına içindeki metalin de ısıtılmasını sağlar. İndüksiyon alanı metale değil de potaya uygulandığından, diğer çekirdeksiz indüksiyon fırınlarının karıştırma işlemi ortadan kalkmış ve gaz birikmesi de azalmıştır.

Ancak, daha büyük hurdaların eritilmesinde elektrik fırınlarının kullanılması daha bir süre daha az tercih edilen bir seçenek olacağına benzemektedir.

8. METALİ RAFİNE ETME VE SAFLAŞTIRMA

Yıllarca hurdaların yeniden eritilmesiyle elde edilmiş alüminyum boksitten üretilmiş birinci el metalden daha az değerli görülmüştür. Bunun nedeni de genellikle cevherden üretilmiş metale göre geri kazanım yoluyla elde edilmiş metalin saflık derecesinin daha kötü oluşuydu. Alüminyum ergiyiğın saflaştırma teknolojisinin gelişmesiyle artık böyle bir kötü şöhret kalmamış olup, bu nedenledir ki geri dönüşümle elde edilen metal günümüzde her uygulamada cevherden elde edilen metallerle yarışmaktadır. Alüminyum ergiyiğının rafine edilmesinde kullanılan teknolojilerin büyük bir bölümü sadece 20 yıl kadar önce kullanılmaya başlanmış ve bir zamanlar alüminyum üretiminde küçük bir dipnot olarak anılan husus günümüzde ciddi bir seviyeye ulaşmıştır.

Hurda eritme fırınlarında kullanılan rafine etme stratejisinin ve teknolojisinin seçimi bazı faktörlere dayanmaktadır: Eritilen hurdanın tipi, kullanılan fırının tipi, üretilen ürünün tipi ve en önemlisi de müşterilerin ihtiyaçları. Sonuç olarak, evrensel bir rafine etme teknolojisi bulunmamaktadır. Buradaki komplike faktör hurdanın ergitme fırınlarında birincil metalle harmanlanması bu da iki tür metalin saflıklarıyla ilgili endişeleri de birleştirmektedir. Bu nedenle, eritilmiş alüminyum hurdanın rafine edilmesinde kullanılan teknolojilerin büyük bölümü aynı zamanda cevherden elde edilmiş metalin saflaştırılmasında da kullanılmaktadır. Temel ilkeler aynı olduğundan ikincil alüminyum için kullanılacak rafine etme teknolojisiyle ilgili tartışma genel olarak ergiyik alüminyumun rafine edilmesiyle ilgili gerekli bir tartışmadır.

Aşağıdaki bölümde ergiyik alüminyumun rafine edilmesinde kullanılan yöntem ve ekipmanlarla ilgili genel açıklamalar yer almaktadır. Bu teknolojiyle ilgili başlı başına bir kitap yazacak kadar derinlemesine bilgi mevcuttur.

8.1 Ergiyik Alüminyum İçerisindeki Yaygın Safsızlıklar

Çizelge 8.1 ergiyik alüminyumda en yaygın olarak yer alan safsızlıkların bir listesini ve bunların birincil ve ikincil metaller içindeki yoğunluklarını vermektedir. Safsızlıklar üç sınıfa ayrılabilir: Hidrojen, reaktif metaller (magnezyum dahil) ve inklüzyonlar.

Çizelge 8.1 : Birincil ve ikincil alüminyum eriyiğindeki yaygın safsızlıklar (Fielding, 1996).

Safsızlık	Birincil Alüminyumdaki Konsantrasyon	İkincil Alüminyumdaki Konsantrasyon
Hidrojen	0,1 - 0,3 wppm	0,4 - 0,6 wppm
İnklüzyon	>1mm ² /kg	0,5 > mm ² /kg > 5,0
(PoDFA Ölçeği)	(Al ₄ C ₃)	(Al ₂ O ₃ , MgO, MgAl ₂ O ₄ , Al ₄ C ₃ , TiB ₂)
Alkali:		
Sodyum	30 - 50 ppm	< 10 ppm
Kalsiyum	2-5 ppm	5- 40 ppm
Lityum	0-20 ppm	< 1 ppm

Hidrojen alüminyum eriyiğinde bulunan hidrojen su buharıyla alüminyum eriyiği arasındaki bir reaksiyondan meydana gelir (Fielding, 1996).



Yeniden eritilen alaşımda yer alan magnezyum ayrıca su buharıyla da reaksiyona girer:



Her iki reaksiyon da termodinamik olarak oldukça tercih edilebilir ve sadece su buharı ile metal ergiyiği arasında bir temas olmasını engelleyen metal yüzeyinde oksit tabakası oluşması gibi bir sınırlaması bulunmaktadır.

Bu reaksiyonları teşvik eden ve metalin çözünmüş hidrojen içeriğini arttıran faktörler şunlardır:

Reaksiyonları sağa çekecek biçimde atmosferdeki su buharı buhar basıncının daha yüksek olması (aynı zamanda daha yüksek rutubet).

Oksit tabakasını yok eden ve reaksiyonların devam etmesine olanak sağlayan metal türbülansı (Fielding, 1996),

Su buharını doğrudan metalin içine besleyen kuru ve ıslak yükleme.

Doğal rutubetin yanı sıra, fosil yakıtlı fırınlarda yanıcı ürünlerdeki su buharı da bir hidrojen kaynağıdır. Sonuç olarak transfer oluklarında yanıcı ürünlere daha uzun süre maruz kalınması çözünmüş hidrojen miktarını daha da arttırabilir. Bazı alaşım elementleri (Cu, Fe, Si, Zn) ergiyik alüminyumda çözünmüş halde bulunan hidrojenin aktiflik katsayısını yükseltmekte, çözünürlüğünü azaltmakta olup (Sigworth, 1999), diğer alaşımlar da (Li, Mg, Zr) aktiflik katsayısını düşürmekte ve çözünürlüğünü yükseltmektedir. Çizelge 8.1'de gösterdiği gibi yeniden eritilen hurdanın hidrojen içeriği genellikle cevher metalden daha yüksektir. Bu da çoğunlukla hurdada bulunan su buharından ve yeniden eritme için fosil yakıtların kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Alüminyum ergiyiğinde hidrojen analizinde kullanılan birim alışılmışın dışındadır. Hidrojen içeriği genellikle 100 g Alüminyum ergiyiği içinde yer alan H_2 gazının santimetre küp cinsinden hacmiyle ifade edilir. Bunun nedeni de hidrojenin genellikle katı alüminyum içersinde çözünemez oluşudur. Bu nedenden dolayı, metal ergiyiğinde çözünen her türlü hidrojen katılaşma sırasında uçacak ve yerine döküm ürünüde gözenekler kalacaktır. 100 gram katı alüminyumun teorik hacminin 37.04 cm^3 olduğu düşünüldüğünden $0.5 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ çözünmüş hidrojen içeriği katı üründe %1.33 seviyesinde gözeneklilik oluşturacak ve bu da neredeyse hiçbir uygulamada kabul edilebilir olmayacaktır. Müşteri şartnamelerinde satın alınan alüminyumdaki H seviyelerinin $0.18 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ hatta dövme alüminyum uygulamalarda daha da az olmasını gerektirmektedir (Fielding, 1996) ve bu dönerli bölümler incelidikçe ve

gözenekliliğe olan tolerans azaldıkça şartnamedeki değerler düşmeye devam edecektir.

Döküm alaşımlarda müsaade edilen hidrojen seviyeleriye daha yüksektir ($0.4 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$) ancak bu değerler halen ergiyik hurdaların bir çoğundaki ilk seviyeden daha düşüktür. Metal ergiyiklerindeki çözünmüş hidrojen seviyesi genellikle $0.5 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ seviyesini aşabilir.

Son 15 yılda alüminyum ergiyiğindeki hidrojen seviyelerini neredeyse anında ölçebilen online analitik araçların geliştirilmesiyle birlikte hidrojen analizi devrim geçirmiştir. Alüminyum ergiyiğindeki hidrojen seviyesinin ölçülmesi için kullanılan cihazların sayısı hepsi burada incelenemeyecek kadar çoktur ancak bu cihazlar dört sınıfa ayrılabilir.

Gösterme yöntemleri kapalı bir odacıkta katılaştıkları zaman metal numunesindeki açık yoğunluğu ölçmektedir. Metal ergiyiğinde hidrojen oranı ne kadar yüksekse, metal katılaştığında gözenekliliği de o derece artmış olur ve buna bağlı olarak da yoğunluğu düşük olur. Bu yöntem yavaş bir yöntemdir ve doğruluğu da sınırlıdır.

Doğrudan tespit yöntemleri bir ergiyik numunesinde çözünen hidrojene göre oluşan kısmi H_2 basıncını ölçer. Doğrudan tespit için kullanılan ekipmanlardaki yaygın gelişmeler bu cihazları hem büyük ergitme fırınları hem de dökümhaneler için giderek daha yararlı yapmıştır.

Doğrudan tespit yöntemiyle yapılan hidrojen analizinin güvenilirliğine etki eden iki komplikasyon bulunmaktadır.

Birincisi PH_2 ile çözünmüş hidrojen içeriği arasındaki ilişki alaşım içeriğinin ve metal sıcaklığının bir fonksiyonudur; bu nedenle, ölçümlerin yapılması sırasında bunların bilinmesi gerekmektedir. İkincisi de doğruluğa ulaşmak için doğru analitik tekniğin gerekmesidir ve bu halen gelişmektedir.

Analitik yöntemler katılma sırasında numuneden bir vakum veya taşıyıcı gaz içersine ne kadar H_2 ihraç edildiğini belirlemektedir. Bu yöntem daha doğrudur ancak hızlı geri dönüşün gerektiği yerlerde kullanmak için aşırı yavaş bir işlemdir.

Elektrokimyasal analiz hidrojen analiz yönteminin en yeni kategorisidir. Bu metal ergiyiğinde çözünen hidrojen tarafından üretilen protonları (H^+ iyonlarını) iletebilen

katı elektrolit kullanmaktadır; hidrojen içeriği ne kadar yüksekse elektrolitte üretilen iyon akımı da o denli yüksek olmaktadır.

8.2 Safsızlık Temizleme İşleminin Temel Özellikleri

8.2.1 Hidrojen

Ergiyik haldeki alüminyumdaki hidrojenin alınması için bilinen tek başarılı yöntem reaksiyon yoluyla bunun gaz fazına aktarılmasıdır:



Bu reaksiyondaki denge sabiti Sievert Yasasının bir biçimi olarak yeniden düzenlenebilir:

$$[H] = S(P_{H_2})^{1/2} \quad (8.4)$$

burada $[H]$, $cm^3/100$ g cinsinden alüminyumdaki hidrojen konsantrasyonu, P_{H_2} atmosferdeki kısmi hidrojen basıncı ve S de belirli bir sıcaklıktaki denge sabitidir (Sigworth, 1999). Bunların beşinin saf alüminyumun sıcaklık fonksiyonları olarak doğru biçimde ifade edilebilmesi için:

$$\log S = -2692/T + 2.726 \quad (8.5)$$

burada T 700 °C ifade edilen K (973 K), $S = 0.911$ olup, $0.4 cm^3/100$ g çözülmüş hidrojen konsantrasyona sahip alüminyum ergiyiği 0.156 atm'ye eşit pm üretecektir. Hidrojenin kısmi basıncı bundan daha az olduğu sürece gazdan arındırma işlemi yürüyecek; denge seviyesine ulaşıldığı zaman, tüm reaksiyon duracaktır. $0.2 cm^3/100$ g düzeyinde hidrojen üretmek 0.048 atm'den daha küçük kısmi H_2 basıncını gerektirir.

Reaksiyonunun yürüdüğü oran itici gücün (denge P_{H_2} ile buhar fazındaki gerçek P_{H_2} arasındaki fark) birim ergiyik hacmi başına ergiyik ile buhar fazı arasındaki arayüz alanının nispi yüzeyinin bir fonksiyonudur. Arındırma oranları şu yollarla arttırılabilir:

Ergiyikte vakum kullanarak veya içine gaz baloncukları göndererek gaz içindeki kısmi H_2 basıncının azaltılması,

Sıcaklığın arttırılması (bunun enerji maliyetlerini arttırılması ve H çözünürlüğünü yükseltmesine rağmen),

Ergiyiğe çok ince çok sayıda baloncuk ekleyerek daha fazla nispi yüzey alanı oluşturarak,

Dökülmek için kepçede beklerken ergiyik alüminyum içindeki gazların bir dereceye kadar çıkmasına rağmen, doğal yolla gaz çıkarma kabul edilebilir kalitede bir ürün için yeterli değildir. Sonuç olarak, bir anlamda planlı biçimde gazın çıkartılması gerekmektedir (Fielding, 1996).

Gaz arındırma ortamlarında klor kullanımının reaksiyon yoluyla hidrojenin arındırılmasına yardımcı olacağı düşünülmüştür (Peterson, 1995).



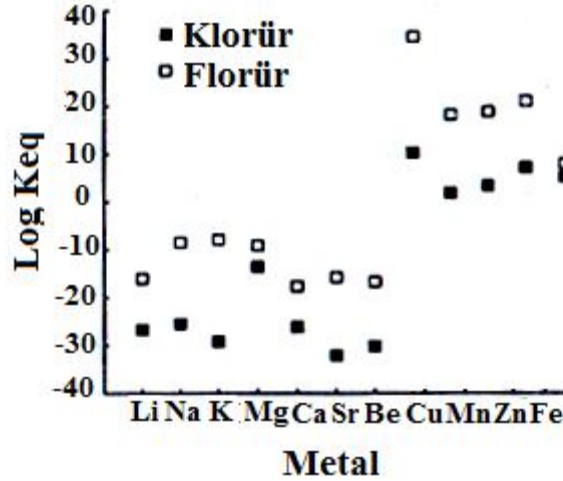
Ancak HCl termodinamik olarak $AlCl_3$ 'den daha az stabildir; bu nedenle, klorürün hidrojenin arıtılmasında etkili olacağı şüphelidir. 1990'larda gerçekleştirilen bazı deneyler alkalinin temizlenmesinde gerekli olmasına rağmen, gaz temizlemede klorürün hidrojen temizlemede başka bir gazın temizlenmesinde olduğundan daha etkin olmadığını göstermiştir.

8.2.2 Reaktif metaller

Şekil 8.1 727 °C'de reaksiyon için denge sabiti logaritmasını göstermektedir.



Burada M başka bir metal X ise klorür veya flüorürdür. Grafik alüminyumun klorür ve flüorür ile içindeki reaktif maddelerden daha az reaktif olduğunu göstermektedir (y- ekseninin negatif "log K_{eq} " değerlerinin gösterdiği gibi), sonuç olarak eklenen klorür veya flüorürün kalsiyum, lityum ve sodyum ile reaksiyona girmesi muhtemeldir.



Şekil 8.1 : 727 °C’de alüminyum eriyiğinin metal flüorür safsızlıklarıyla olan reaksiyonunda kullanılan denge sabitinin logaritması (Sigworth, 1999).

Birincil alüminyumun elektriksel eşleşmesinde ergiyik sodyum alüminyum flüorür tuzu banyosunun kullanılmasının ve bu banyoya lityum tuzları eklenebilmesinin sebebi de budur. Alüminyum hurda ergiyiğindeki kalsiyum ve sodyum safsızlıklarının temizlenmesinde de bu ilişki temel teşkil eder. Klorür gazı eklenir, bu da sodyum ve kalsiyum klorür oluşturmak için cüruf tuzunun üzerinde yüzen safsızlıklarla reaksiyona girer:



Klorür de tercihen magnezyumla reaksiyona girmekte ve alüminyum hurda ergiyiğinin magnezyumunu gidermede kilit rol oynamaktadır.



Klorür gazı alüminyum klor buharı oluşturacak biçimde alüminyum ile reaksiyona girdiğinden bu gazın kullanımı çevresel endişelere yol açmaktadır;



Bu reaksiyon diğer safsızlıkların konsantrasyonu düşük olduğu zaman meydana gelir ve bu da düşük magnezyum içeren ergiyik hurda veya birincil metalde meydana

gelir. Alüminyum klorür hidroklorür asit buharı oluşturmak üzere ergiyiğin üzerinde su buharıyla reaksiyona girer:



Ayrıca, reaksiyona girmeyen klorür ayrıca ergiyiğin üzerindeki atmosfer ortamında belirir. Bundan kaynaklanan hijyen ve çevresel unsurlar klorür gazı yerine rafine etme ajanının kullanılmasını gerektirmiştir (Peterson, 1995).

Flüorür gazı rafine etme amaçlı olarak kullanılmaz ancak safsızlıklarla reaksiyona girebilecek alüminyum florür içeren katı flakslar geliştirilmiştir:



Bunun yanında AlF_3 flaksları magnezyumlu alaşımlardan kalsiyum ve sodyumun temizlenmesinde kullanılamaz; AlF_3 magnezyumu da yok etmektedir. Bu tür alaşımlarda, MgCl_2 içeren flakslar geliştirilmiştir:



Gaz giderme kinetiklerinin geliştirilmesinde kullanılan aynı yöntemlerin büyük bir bölümü aynı zamanda reaktif metallerin arındırılmasına dair kinetiği de geliştirmektedir. Baloncuk büyüklüğü küçültülerek (nispi yüzey alanını arttırarak), ergiyiği karıştırarak (sınırlayıcı faktör olarak balon yüzeyine taşınmayı ortadan kaldırarak) ve sınırlı bir ölçüde gazda klor konsantrasyonunun artmasına izin vererek klorür enjeksiyonun etkinliği arttırılmıştır. Kalsiyum ve sodyumun temizlenmesi için flakslar etkin biçimde kullanılması küçük partikül büyüklüğünü ve bir parça çalkalamayı gerektirir.

8.2.2 İnküzyonlar

İnküzyonlar alüminyumdan üç yolla temizlenebilir. Birincisi inküzyon maddelerin doğal yollarla fırının tabanına çökmesini ifade eden çökeltmedir. Küçük partiküllerin sıvı içerisinde çökeltme oranı Stokes Yasasının bir versiyonuyla hesaplanır:

$$u_r = \frac{2\Delta\rho ga^2}{\rho v^9} \quad (8.18)$$

burada u_r , inküzyonların m/s cinsinden çökeltme oranını; $\Delta\rho$ inküzyon ile sıvı (bu durumda alüminyum ergiyiği) arasındaki yoğunluk farkını; g yer çekim sabitini (9.81 m/s^2); a metre cinsinden katışıklığın çapını; ρ ile v de sırasıyla alüminyum ergiyiğinin yoğunluğu ve kinematik akışkanlığıdır. Alüminyum ergiyiğindeki $100 \text{ } \mu\text{m}$ (10^{-4} m) alümina inküzyonları, $1.36 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ (8.16 cm/dk) oranında tipik inküzyon oranı hesaplamıştır. $100 \text{ } \mu\text{m}$ den daha küçük olan inküzyonların çökeltmeleri daha yavaştır; $10 \text{ } \mu\text{m}$ ebatlarındaki bir inküzyon bile 0.082 cm/dk oranında çökelecektir. Sonuç olarak, fırınların çoğunda inküzyonların temizlenmesinde önemli bir faktör değildir.

İnküzyonların arındırılmasında daha etkin olan bir yöntem inküzyonların gaz giderme ve reaktif maddelerin temizlenmeleri işlemlerinde olduğu gibi ergiyikte yükselen baloncukların içine hapsedilerek temizlendiği flotasyon (yüzdürme) yöntemidir. Gerek sürekli gerekli parti halinde yükleme yapılan reaktörlerde flotasyon/yüzdürme yöntemiyle inküzyonların temizlenme oranlarının hesaplanabilmesi için karmaşık modeller geliştirilmiştir. Temizleme oranı şunların birer fonksiyonudur:

Katışıklığın ebadı: Küçük inküzyonların yüzdürülmesi daha zordur.

Fırın birim hacme göre gaz akış oranı: Daha fazla gaz olması inküzyonların takılabileceği daha fazla balonun bulunmasını ifade etmektedir.

Fırın yüksekliği: Baloncuklar ne kadar yükseğe yükselirlerse, inküzyonlara rastlama yüzdeleri de o denli yüksektir.

Çarpışma verimliliği: Bu inküzyon çapının balon çapına oranının karesine eşittir.

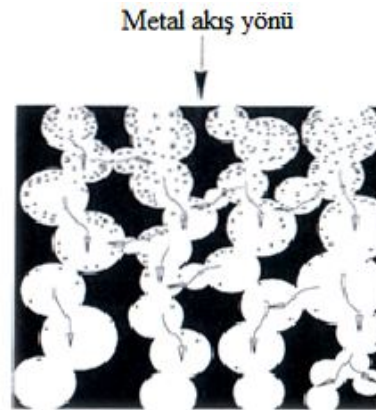
Balon ebadı: Küçük baloncuklar daha nispi yüzey alanı sağlamaktadır.

Balon içersindeki gaz: İnküzyonlar klorür içeren baloncuklara daha çok hapsolma eğilimindedirler.

Flotasyonun kendi başına bazı uygulamaların kalite şartnamelerine uygunluk sağlayabilecek kadar inküzyonları temizleyebildiği ileri sürülmüştür. Ancak, çoğu durumda özellikle de daha küçük inküzyonlarda ek saflaştırma işlemine ihtiyaç duymaktadır.

İnküzyonların temizlenmesinde son yirmi otuz yıldır kullanılan en önemli araç filtrelemedir. Endüstriyel filtrelemenin iki ana türü filtre keki ve derin yataktır. Filtre keki katı parçacıkları yüzeyinde durdurarak nihayetinde bir kek kalınlığına kadar üzerinde yığılır küçük gözeneklere sahip bir filtredir. Kek filtreleri oldukça etkindir ancak metali filtre kekinin içinden geçmeye zorlamak için gerekli olan metal statik basıncı bu uygulamayı kullanışsız ve çok pahalı hale getirmektedir. Sonuç olarak, filtre kekleri çok küçük uygulamalar dışında alüminyum ergiyeğinin filtrelenmesinde çok nadiren kullanılır.

Şekil 8.2 derin yataklı filtrelemeyi göstermektedir. Derin yataklı filtreleme yüzeyde bloke etmek yerine katı partiküllerin filtrenin duvar içlerine tutunmasına dayanmaktadır. Bu filtre yüzeyinde kek oluşumunu engeller ve aynı zamanda filtre keklerinin basınç düşmesi sorununu da ortadan kaldırır. Ancak, bu sadece katı partiküllerin filtrenin gözeneklerinden çok daha küçük olması halinde meydana gelmektedir. Sonuç olarak, derin yataklı filtreleme daha flotasyon/yüzdürme yoluyla büyük inküzyonların temizlenmiş olmasına bağlıdır. Önde büyük katı parçacıkların tutulması için büyük gözenekli bir filtre arkasında da küçük partiküllerin yakalanması için kullanılan ince filtre olarak ikili bir filtreleme düzeneği kullanılmaktadır.



Şekil 8.2 : Derin yatak filtreleme mekanizması (Peterson, 1995).

Derin yataklı filtreleme öncelikli olarak 5-20 µm çapındaki inklüzyonların temizlenmesi amacıyla tasarlanmıştır. Bu filtrelerin verimliliği şu hususlara bağlıdır:

- Inklüzyon büyüklüğü (büyük inklüzyonların yakalanması daha kolaydır),
- Birim ergiyik hacmine göre nispi filtre yüzey alanı,
- Dolambaçlılık (filtre yüzeyinin metalin akış yönündeki sürtünmesi),
- Filtre yüksekliği,
- Metal akış hızı (düşük tercih edilmektedir, çünkü daha yüksek akış oranları tutulmuş olan partiküllerin yeniden salınmasına neden olabilir).

Filtreleme verimliliğini maksimum seviyeye ulaştırmadaki zorluk metalostatik yükü kabul edilebilir limitlerin ötesinde yükseltmeden daha etkin bir filtrenin tasarlanmasıdır. Bu konuyla ilgili olarak bazı çözümler önerilmiş olup bunlar bölümün ilerleyen sayfalarında anlatılacaktır.

8.3 Rafine Etme Stratejisi

Şekil 8.3 alüminyum ergitme prosesinin genel akış şemasını göstermektedir. Tüm geri kazanım tesisleri burada gösterilen beş adımın tamamını kullanmasalar da (bazı tesislerde ergitme fırını ve döküm fırını aynıdır), yukarıda anlatılan rafine etme fonksiyonları burada gösterilen bir veya daha fazla teknenin içinde gerçekleştirilmektedir.



Şekil 8.3 : Alüminyum ergitme ve rafine etme akış şeması (Peterson, 1995).

Şekil elektrolitik hücrelerinden birincil metalin rafine etme sıralaması yeniden eritme fırınlarından alınan ikincil metalin rafine etme sıralamasına benzer olduğunu

göstermektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, rafine etme ilkeleri ve teknolojisi de benzerlik göstermektedir:

- Son 20 yıldır rafine etme teknolojisi bazı hedeflere ulaşılması üzerine odaklanmıştır:
- Alkali metal içeriğinin milyonda 3 veya daha az parçaya indirmek.
- Katışıklılık seviyesini (özellikle 5-20 µm arasındakileri) milyonda bir parça düşürmek.
- Hidrojen seviyelerini 0.20 cm³/100 g veya daha düşük seviyelere indirmek.
- İşleme sürelerini kısaltmak.
- Parti yükleme yerine sürekli yüklemeyi teşvik etmek.
- Klor gazı kullanımını azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak.

8.3.1 Ergitme fırını

Rafine etme işleminin eritme fırını içerisinde gerçekleştirilen ana aşaması magnezyumdan arındırma işlemidir. Daha önce anlatılan magnezyum arındırma flaksları bileşim olarak oksit safsızlıklarının absorbe edilmesinde kullanılan flakslardan farklı olduğu için bu süreç klor gazı kullanımı gerektirmektedir. Daha önce kullanılan klor bazlı magnezyum arındırma teknikleri yetersizdi ve aşırı miktarda kaçak klor gazı ve flüorür dumanına neden oluyordu. Gaz enjeksiyon pompası daha verimli olup şu anda magnezyum arındırma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ürün kalitesi amaçlarının gerektirdiği seviyelerde olmasa da inklüzyonlar için flotasyon ve alkali temizliği de yapılması yararlı olabilir. Eritme sırasında cürufun temizlenmesinde kullanılan flüorür bazlı flakslar da magnezyum ve diğer alkali maddelerin temizlenmesinde yardımcı olabilir.

8.3.2 Pota ön işlemi

Diğer rafine etme teknolojilerindeki gelişmeler daha gereksiz hale getirdiği için potanın ön işleminin yapılması evrensel bir uygulama değildir. Ancak, yine de özellikle alkalilerin temizlenmesi bakımından bazı avantajları bulunmaktadır. Pota işlemini avantajlarından bir tanesi klor gazı yerine katı flaksların kullanılabilmesine imkan vermesidir.

Bu flakslar $MgCl_2$ içerir; $MgCl_2$ önceden eritilmiş KCl ve $NaCl$ karışımının içinde tutulur. Karışımın ergime noktası $MgCl_2$ 'den daha düşüktür bu da reaksiyon oranını arttırmaktadır. Bu aynı zamanda saf $MgCl_2$ 'nin su toplama eğiliminin yaratmış olduğu sorunu da ortadan kaldırmaktadır. Cüruf temizleme işlemi ergitme fırınında gerçekleştirilmiş olduğundan, bu flaks özellikle alkali temizliği için tasarlanabilir ve flüorür eklenmesine de ihtiyaç yoktur. Döner flaks enjektörü daha önceden kullanılan mızrak tekniğine kıyasla katı flaks enjeksiyonu verimliliğini arttırmıştır.

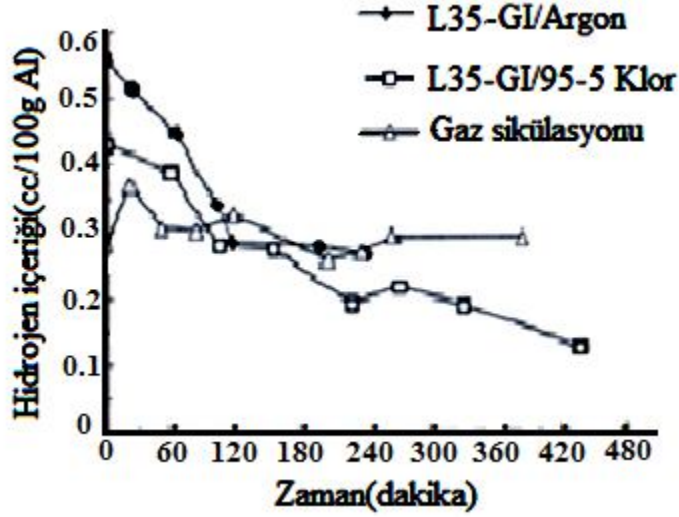
8.3.3 Döküm fırını

Tesislerin büyük bir bölümünde eritme ve döküm fırını aynı fırındır; bu nedenle, daha evvelki bölümde ergitme fırınlarıyla ilgili olarak anlatılan rafine etme uygulaması burada da aynıdır. Eğer pota işleme tesisi yoksa, döküm fırını alkali maddelerin temizleneceği ve ana gaz alma işleminin yapılacağı yerdir. Yansıma alevli ergitme ve döküm fırınları akılda ısı transferi tutularak tasarlanmıştır ve kimyasal reaktörler olarak iyi çalışmazlar.

Döküm fırınlarındaki rafine etme işlemi geleneksel olarak nitrojen ve klor gazları karışımının sabit bir mızrak kullanılarak enjekte edilmesi suretiyle gerçekleştirilmektedir. Büyük baloncuk ebadı ve bu mızrakların zayıf karıştırma özelliği düşük verimliliğe, klor israf olmasına ve işyerinin reaksiyona girmemiş klor nedeniyle risk altına girmesine neden olmuştur. Sonuç olarak, daha iyi bir teknolojinin geliştirilmesi döküm fırını rafine etmede ana odak noktası haline gelmiştir. Gaz giderme cihazları olarak fişlemeyi azaltmak için geçirgen huniler kullanılarak gözenekli tapalar bile kullanılmıştır.

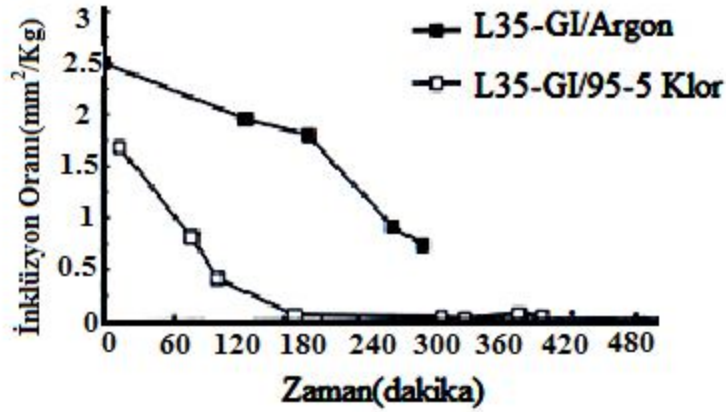
Fielding'in (1996) yapmış olduğu bir çalışmanın sonuçlarını gösteren Şekil 8.4– 8.6 döner gaz enjeksiyon pompası kullanılarak döküm fırınında elde edilebilecek sonuçları göstermektedir.

Şekil 8.4 farklı rafine etme koşullarında alüminyum ergiyiğinden hidrojen içeriğini göstermektedir (%2.5 Mg); arıtma gazında klor kullanımı hidrojen içeriğinin azaltılmasında hiçbir farklılık yaratmamaktadır.



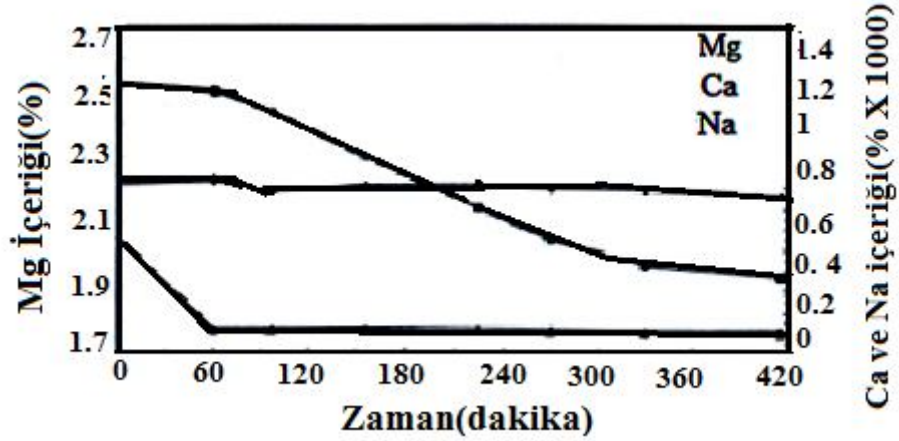
Şekil 8.4 : Alüminyum ergiyiğinde Ar ve Ar-5% Cl₂ karışımı kullanılarak rafine etme sırasında ergiyikteki hidrojen içeriğinin karşılaştırılması (Fielding, 1996).

Şekil 8.5 zaman fonksiyonu olarak inklüzyon içeriğini göstermektedir; burada gaza % 5 Cl₂ eklemenin etkisi açıkça görülmektedir.



Şekil 8.5 : Alüminyum ergiyiğinde Ar ve Ar-5% Cl₂ karışımı kullanılarak rafine etme sırasında ergiyikteki inklüzyon oranlarının zamana bağlı olarak karşılaştırılması (Fielding, 1996).

Şekil 8.6, Ar-5% - Cl₂ karışımı kullanarak elde edilebilecek olan alkali içeriği giderme sonucunu göstermektedir. Reaksiyonlarının sonucu olarak, magnezyum arıtılmadan kalsiyum ve sodyumun büyük bir bölümü arındırılmaktadır.

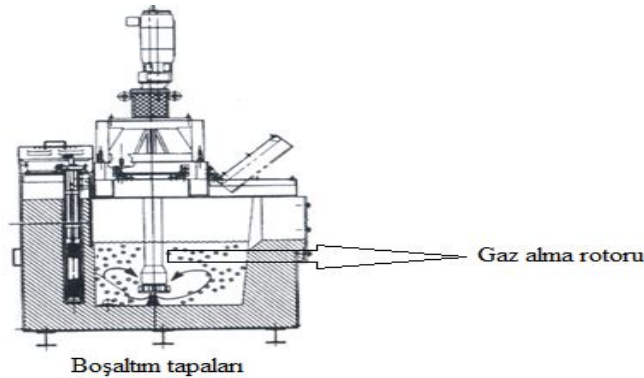


Şekil 8.6 : Alüminyum ergiyiğinde Ar ve Ar-5% Cl₂ karışımı kullanılarak rafine etme sırasında ergiyikteki magnezyum ve alkali oranlarının zamana bağlı olarak karşılaştırılması (Fielding, 1996).

Şekillerden de görüldüğü gibi, döküm fırınında rafine işlemi yapmak özellikle alkali maddelerin ve inklüzyonların temizlenmesinde etkilidir ancak oldukça yavaş ve verimsiz bir süreçtir. Bu nedenle, geçtiğimiz kuşaktaki trend döküm fırınında gaz alma işlemini en aza indirmek bunun yerine sıralı gaz alma ve filtrelemeyi getirmek olmuştur. Sıralı prosesler özellikle hidrojen ve inklüzyon temizleme amacıyla tasarlanmışlardır. Artan verimlilik ve kinetikler ek proseslere yapılan yatırım ve işletme harcamaların haklılığını göstermektedir.

8.4 Sıralı Gaz Alma

Şekil 8.7 1980'lerin ilk yıllarında kullanılmaya başlanan birkaç sıralı gaz alma cihazlarından biri olan SNIF prosesinden bir çapraz kesit göstermektedir. Cihazda alüminyum ergiyiği içersine yerleştirilen ve içinden gaz karışımı (genellikle Ar-5% Cl₂) geçen döner bir rotor (300 - 400 devir/ dakika) bulunmaktadır.

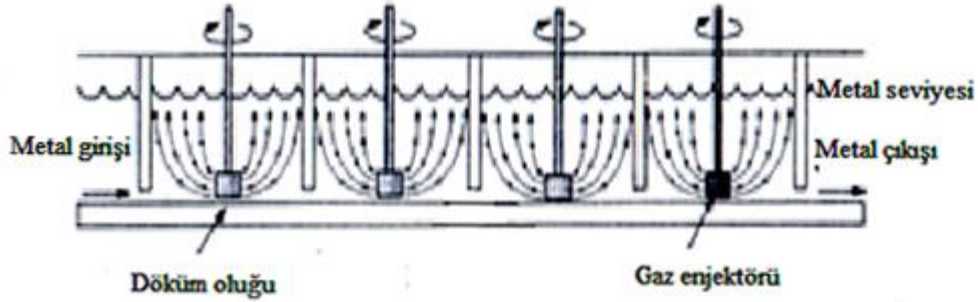


Şekil 8.7 : SNIF gaz giderme makinesinin şeması (DeRidder ve Terrier, 1999).

Döner rotor gaz kütlelerini küçük balonlara böler böylelikle metal ile gaz arasındaki nispi yüzey alanını arttırmış olur. Bu gaz giderme kinetiklerini ve verimliliği artırır. Bunun gibi sıralı cihazlar sürekli üstten alüminyum ergiyiği beslemek ve alttaki bir tapadan boşaltmak suretiyle sürekli olarak çalışmak üzere tasarlanmışlardır. Borunun ebadı metal akış oranına göre ve hidrojen seviyesinin istenen seviyeye düşürülmesi için gerekli olan süre dikkate alınarak belirlenir.

İlk kullanılmaya başlandıklarından itibaren bunun gibi sıralı gaz giderme ünitelerinde bir dizi geliştirmeler yapılmıştır. Çoklu kademelerin kullanımı aynı büyüklüğe sahip tek bir üniteye kıyasla daha düşük hidrojen seviyeleri üretir. Gaz giderici cihazlar havayla teması engellemek üzere sızdırmaz şekilde tasarlanmakta ve cüruf üretimini azaltmak için argonla yıkanmaktadır. Daha hızlı rotor (yeni Hycast ünitelerinde 900 rpm) daha küçük baloncukların elde edilmesini ve daha iyi kinetik sağlamaktadır. En son geliştirilen Alpür ve Hycast cihazları, metal ergiyiğinin dökümler arası üniteye tutulmak istendiği durumlarda önemli bir özellik olan metal ısıtma özelliği de içermektedir (De Ridder and Terrier, 1999).

Sıralı gaz çıkarmada en yeni trend gaz giderme kazanını komple ortadan kaldırmaktadır. Şekil 8.8 gaz giderme kazanı yerine döküm oluğu getiren Alcan Kompakt Gaz gidericinin çalışma prensibini göstermektedir.



Şekil 8.8 : Alcan kompakt gaz gidericinin şeması (Fielding, 1996).

Olukta yer alan perdeler her kompartmandaki döner gaz enjektörlü çok kademeli gaz giderme kazanının yaptığı işi görmektedir. Bu cihazın gaz giderme ve inklüzyon arındırma verimliliği borulu gaz giderme versiyonuna benzerdir; ancak, oluğun kullanılması alan gereksinimini büyük ölçüde düşürmüştür. Ayrıca, olukla gaz gidericinin kullanımı dökümler arası metal bekletmeyi sona erdirmektedir. Dökümler

arasında gaz giderme kazanında bekletilen metalin drenajının yapılması ve yeniden eritilmesi gerektiğinden bu çeşitli alaşımlar döken tesisler için önemlidir.

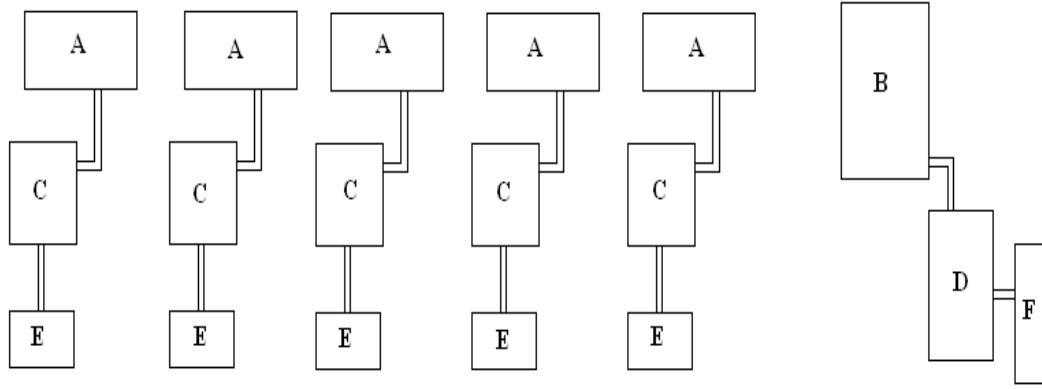
9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Alüminyum ve alaşımlarının dökümünde rafinasyon yöntemlerinin karşılaştırılması ile ilgili olarak yapılan deneysel çalışmalar DT Metal San. Tic. AŞ firmasının bünyesindeki alüminyum ergitme-döküm-haddeleme ünitelerinde endüstriyel boyutta gerçekleştirilmiştir. Tesiste bulunan sürekli döküm hatları üç ana bölümden oluşmaktadır:

Birinci bölüm : metal ergitme, flakslama ve gaz giderme işlemlerinin yapıldığı ergitme bölümüdür. Bu bölümde ergitme amacı ile kullanılan 5 adet levha dökümü için ve bir adet bilet dökümü için olmak üzere 6 adet gaz ergitmeli reverber tipi fırın mevcuttur.

İkinci bölüm : Metal bekletme bölümüdür. Bu bölümde ergimiş metal yine gaz ile ısıtılan bekletme fırınlarında ergimiş durumda tutularak döküm için hazır sıvı metal elde edilmektedir.

Üçüncü bölüm : Döküm hattıdır. Bu bölümde ikiz merdane tipi döküm makineleri mevcuttur. Bu bölümler arasındaki metal ve malzeme akışı yolluklar ve akıcı bantlarla sağlanmaktadır. Tesisin yerleşme düzeni şekil 9.1'deki akış şemasında gösterilmektedir. Bu üç bölümlü tesiste proses ergitme fırınında birincil ve ikincil alüminyumun şarjı, gerekli alaşım elementlerinin eklenmesi, flakslama, ergitme ve gaz giderme işlemlerinin ardışık yapılması ile başlar. Sürekli yapılan bu ergitme ve rafinasyon işleminden sonra cüruf çekilir ve metal rezerv görevi ve stabil sıvı metal akışı sağlayan bekletme fırınlarına alınır. Burada mümkün olan en az sıcaklık değişimi ile gaz giderme işlemindeki gazların metali tamamen terk etmesi sağlanarak koruma amaçlı ikinci bir flakslama işlemi uygulanır. Bu işlemin ardından metal döküm makinesine aktarılarak ikiz merdane döküm tekniği ile levha olarak dökülür. Gerekirse bilet dökümü de yapılabilir.



Şekil 9.1 : DT Metal Dökümhane Yerleşme Düzeni A)Sürekli Döküm Hatları Ergitme Fırınları B)Yarı Sürekli Döküm Hattı Ergitme Fırınları C)Sürekli Döküm Hattı Bekletme Fırınları D)Yarı Sürekli Döküm Hattı Bekletme Fırını E)İkiz Merdane Tipi Sürekli Döküm Hattı F)Yarı Sürekli Bilet Döküm Hattı

Bu genel çalışma prosesi içinde tez ile ilgili sırasıyla ergitme, flakslama, gaz giderme ve tane inceltme deneyleri ergitme ve bekletme fırını bölümlerinde deney parametrelerinin kontrolü amacı ile yapılan ölçümler merdane hattından alınan levha ve potadan alınan külçe numuneleri ile gerçekleştirilmiştir.

9.1 Deneylerde Kullanılan Sarf Malzemeleri

Alüminyum ve alaşımlarının dökümünde ergitme, rafinasyon ve tane inceltme yöntemlerinin deneysel olarak incelenmesinde gerçekleştirilen endüstriyel boyuttaki ölçümlerde 8006, 8011, 3105, 1050 serisi alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Bu alaşımların kimyasal özellikleri aşağıdaki çizelgelerde gösterilmiştir.

Çizelge 9.1 : 1050A Alüminyum alaşımının kimyasal içeriği

Element	% Ağ.	Element	% Ağ.	Element	% Ağ.
Al	Min 99.5	Mg	Max 0.05	Si	Max 0.25
Cu	Max 0.05	Mn	Max 0.05	Ti	Max 0.05
Fe	Max 0.4	Diğer	Max 0.03	Zn	Max 0.07

Çizelge 9.2 : 3105 Alüminyum alaşımasının kimyasal içeriği

Element	% Ağ.	Element	% Ağ.	Element	% Ağ.
Al	Max 96.1	Mg	0.2 - 0.8	Si	Max 0.6
Cr	Max 0.2	Mn	0.3 - 0.8	Ti	Max 0.1
Cu	Max 0.3	Diğer	Max 0.05	Zn	Max 0.25
Fe	Max 0.7	Diğer toplam	Max 0.15		

Çizelge 9.3 : 8006 Alüminyum alaşımasının kimyasal içeriği

Element	% Ağ.	Element	% Ağ.	Element	% Ağ.
Al	95.9 - 98.5	Mg	Max 0.1	Diğer toplam	Max 0.15
Cu	Max 0.3	Mn	0.3 - 1	Si	Max 0.4
Fe	1.2 – 2	Diğer	Max 0.05	Zn	Max 0.1

Çizelge 9.4 : 8011A Alüminyum alaşımasının kimyasal içeriği

Element	% Ağ.	Element	% Ağ.	Element	% Ağ.
Al	97.3 - 98.9	Mg	Max 0.05	Si	0.5 - 0.9
Cr	Max 0.05	Mn	Max 0.2	Ti	Max 0.08
Cu	Max 0.1	Diğer	Max 0.05	Zn	Max 0.1
Fe	0.6 - 1	Diğer toplam	Max 0.15		

Deneylerde kullanılan ve hidrojen gazının giderilmesi amacı ile sıvı metale alaşıma ilave edilen gaz gidericiler %99,7 ve %75 safiyette hegzakloreten tabletleri, teknik safiyetteki azot ve klor gazlarıdır.

Çalışmalar sırasında ergimiş metale flaks olarak; karnalit içerikli Pyrotek Promag® R1 marka tuz ve tesis içinde imal edilen NaCl ve KCl esaslı örtme tuzu kullanılmıştır.

Promag® R1 susuz sentetik karnalit esaslı bir flakstır. 440°C ve altında ergime noktasına sahiptir. Toz, sodyum ve florür içermeyen bir flakstır. Magnezyum klorür tozu içeren flakslara göre daha az higroskopiktir. Promag® R1 flaksının içeriği çizelge 9.5'teki gibidir.

Deneylerde Tane inceltici olarak Al5Ti1B ve Al5Ti3B master alaşımları ve FOSECO marka Coveral MTS 1584 kullanılmıştır.

Ergitme işlemleri İndüksiyon, reverber ve döner fırınlarda yapılmıştır. Ayrıca Refalco marka silisyum karbür pota kullanılmıştır.

Çizelge 9.5 : Promag® R1 Flaksının Başlıca Özellikleri

Kimyasal Bileşik	$K_3Mg_2Cl_7$
Magnezyum Klorür	%43
Potasyum Klorür	%57
Ergime noktası	440 °C
Görünüşü	Granül halde
Tane boyutu	1-3 mm

9.2 Deneylerde Kullanılan Alet ve Cihazlar

Deneylerin gerçekleştirilmesinde tesis içindeki endüstriyel boyutlu alet ve cihazlar kullanılmıştır. Gaz gidericilerin ilavesinde çelikten mamul lans boruları, gaz tankları, delikli çan manual olarak kullanılan alet ve cihazlardır. Ayrıca gaz verme sistemi olarak Black Lab Corp. FF05 marka gaz alma ve flaks enjeksiyon cihazından (şekil 9.2) yararlanılmıştır.



Şekil 9.2 : Black Lab Corp. FF05 gaz alma ve flaks enjeksiyon cihazı

Deney sonuçlarının karakterizasyonunda tesiste bulunan analiz cihazlarından yararlanılmıştır. Metaldeki hidrojen içerikleri Leco RH-402 marka cihazda (şekil 9.3)



Şekil 9.3 : Leco RH 402 Hidrojen analiz cihazı

ölçülmüştür. Alüminyum metal içindeki inklüzyon yapan empürite analizleri ise ARL marka spektrometrede (şekil 9.4) yapılmıştır. Deney numunelerinin metalografik incelemeleri ise şekil 9.5’de görülen tesis laboratuarlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9.4 : ARL Spektrometre



Şekil 9.5 : Metalografi Laboratuarları

9.3 Deneysel Çalışmalarda Belirlenen Parametreler

Alüminyum tane inceltme işlemleri 730°C, alüminyum flaksla temizleme işlemleri 730°C’de gerçekleşmiştir.

Fırınlarda gerçekleşen ergitme işlemi 750°C civarında gerçekleşmiştir. Gaz giderme işlemleri 730-750°C arasındaki ergimiş metal sıcaklıklarında uygulanmıştır.

Alınan numunelerde parlatılan yüzeyler yıkanıp kurutulduktan sonra dağlama için numuneler önce 80°C sıcaklıkta suda bir süre bekletilerek ısıtıldı ve soğutulmadan Paulton çözeltisi (%60 HCL, %30 HNO₃, %5HF, %5H₂O) ile dağlandı.

9.4 Ergitme

9.4.1 Alüminyum içecek kutularının ergimesi sırasında gözlenen kayıplar

Alüminyum yeniden değerlendirme sürecinde; alüminyum hurdalarından daha fazla verim almak için ergitme öncesi hazırlık işlemleri yapılması zorunludur. Alüminyum hurdalar içinde en yüksek kayıplar et kalınlığı ince olması, yağ ve boya ile kaplı olması nedeni ile alüminyum talaşlar ve içecek kutusu hurdalarında olmaktadır. İçecek kutusu hurdaları yeniden ergitme işlemi yapılmadan ihraç edilmektedir. Yurtiçi piyasaya günlük 35 ton içecek kutusu girmektedir. Kullanılmış olarak 15 ton geri kazanılabilmektedir. Alüminyum ürünlerin imalatından günlük onlarca ton alüminyum talaşları çıkmaktadır. Alüminyum içecek kutusu hurdaları, talaşları ve benzer hurda grupları ergitme öncesi hazırlık işlemleri yapılmadan yeniden ergitilmektedir.

Amacımız yeniden ergitme sürecinde daha fazla metalik alüminyum elde etmek, atık gazlardan yararlanmak, ortama kirli gaz yayılımını engellemek, üretimdeki işlemleri kolaylaştırmak, üretim maliyetlerini düşürmek, tehlikeli katı atık (cüruf) oluşumunu en aza indirmek alüminyum içecek kutusu hurdalarının, talaşların ve benzer hurda gruplarının verimli bir şekilde yeniden değerlendirmektir.

Alüminyum hurdalarının ergitme öncesi hazırlık işlemleri sırasında en önemli basamak kurutma ve ön ısıtma, boya ve lak giderme işlemidir. Bu işlemler için baca gazı ile çalışan bir döner fırın imal edilmiştir. Çalışmamızda; döner fırının yeniden boyutlandırılması, verimi, çıktıların analizlerinin karşılaştırılması ve döner fırının diğer teknik özelliklerin tam olarak belirlenmesi, lak ve boyadan çıkan dumanın yakılması sonucunda emisyon ölçümlerinin yapılması, sistemin benzer sistemlerle karşılaştırılması, sistemdeki kırıcılar, yıkama, santrifüj-sıkma, döner fırın ve ergitme fırınlarının birbirine uyumu, verimliliği, sistemdeki eksik ve fazlalıkların tespiti, alüminyum hurdaların sistemden geçişi sonunda meydana gelen kayıpların incelenmesi, spektral analiz sonuçlarının karşılaştırılması, alüminyumla ilgili muayene ve diğer analizlerinin sonuçlarının karşılaştırılması yapılmaktadır.

9.4.2 İçecek kutusu yeniden ergitme spektrometre analizi karşılaştırması:

Standardı AA 3105 olan içecek kutusu hurdalarının yeniden ergitilmesi sonucunda metalik alüminyumdan numune alınmıştır. Numunenin spektrometre analiz

değerlerinin (Çizelge 9.6) AA 3105 kompozisyon değerleri ile (Çizelge 9.7) karşılaştırması.

Çizelge 9.6 : İçecek kutusu (AA3105) yeniden ergitme spektrometre analiz değerleri

Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Pb	Si	Zn
96.6	0.136	0.626	0.7	0.816	0.0020	0.246	0.0187

Çizelge 9.7 : Alüminyum AA 3105 kompozisyon değerleri

Element	% Ağ.	Element	% Ağ.	Element	% Ağ.
Al	Max 96.1	Mg	0.2 - 0.8	Si	Max 0.6
Cr	Max 0.2	Mn	0.3 - 0.8	Ti	Max 0.1
Cu	Max 0.3	Diğer	Max 0.05	Zn	Max 0.25
Fe	Max 0.7	Diğer toplam	Max 0.15		

Sistemdeki sıcaklık ölçümleri:

Ergitme fırınından çıkan baca gazı yağ, lak ve boya giderme işlemlerinde kullanıldıktan sonra döner fırın bacasından terk edilir.

- 1.Ergitme fırını baca sıcaklığı: 1000°C
- 2.Döner fırın sıcaklığı: 450 °C
- 3.Döner fırın baca sıcaklığı: 150 °C
- 4.Yakıt hava karışımına verilen dumanın sıcaklığı: 250 °C

9.4.3 Deney sonuçları

Alüminyum içecek kutusu hurdalarından 620 kg yeniden ergitmek için sisteme verilmiştir. Ergitme sonucunda çıkan metalik alüminyum 545 kg. Cürufan elde edilen metalik alüminyum 13 kg olarak tartılmıştır. Bu da %10 metal kaybı demektir.

Daha sonra aynı alüminyum içecek kutusu hurdalarından 620 kg yeniden ergitmek için reverber fırınına verilmiştir. Ergitme sonucunda 465 kg metalik alüminyum elde edilmiştir. Bu da %25 metal kaybı anlamına gelmektedir.

9.5 Rafinasyon

Burada gerçekleştirilen deneyler ergitme, flakslama, gaz giderme, flakslama+gaz giderme, taneinceltme ve karakterizasyon grupları içinde yapılmıştır. Flakslama ve gaz giderme işlemleri bazı serilerde ayrı ayrı bazı serilerde ise birlikte uygulanmış ancak deney sonuçları flakslama ve gaz gidermenin beraber sonucu olarak ifade edilmiştir. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalar üç farklı gaz giderme ve metal temizleme metodu olarak uygulanmıştır. Gaz giderme işlemleri 730-750°C arasındaki ergimiş metal sıcaklıklarında uygulanmıştır.

9.5.1 N₂ + Cl₂ Karışımının ergitme fırınında bir lans aracılığı ile verilmesi ile yapılan deneyler

Bu deneylerde ergitme fırınına bir lans aracılığı ile klor ve azot karışımı gazlar verilmiştir. Gaz karışımı olarak %10 Cl₂ ve %90 N₂ kullanılmıştır. Bu gaz karışımı ile fırın 10 dakika süre ile süpürülmüştür. Ergimiş metalin fırın atmosferi ile temasını kesmek için NaCl, CaCl₂ ve %5 Kriyolit içeren örtü flaksı kullanılmıştır. Ergitme işlemi sonrası cüruf çekilerek drosun metal içeriği gözlemlenmiştir. Daha sonra bekletme fırınına aktarılan metal, tekrar 5 dakika süre ile yeniden süpürülerek rafinasyon yapılmıştır. Rafinasyon işlemi bittikten sonra metal, yolluklar ile döküm makinesine sevk edilmiştir. Bu işlemler sırasında alınan numunelerin metalografik incelemesi yapılmış ve de hidrojen ve de empürite analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu grup deneylerde numuneler fırın bölümlerinden sistematik olarak alınmıştır

1.1 Ergitme fırınından rafinasyon öncesi

1.2 Bekletme fırınından rafinasyon öncesi

1.3 Bekletme fırınının çıkışında yollukta rafinasyon öncesi

2.1 Ergitme fırından rafinasyon sonrası

2.2 Bekletme fırınından rafinasyon sonrası

2.3 Bekletme fırınının çıkışında yolluktan

9.5.2 Gaz giderici tabletler ile yapılan deneyler

Bu deneylerde ergitme fırını içinde iki farklı safiyette yani sırası ile %75 ve %99,7 oranında C_2Cl_6 aktif maddesi içeren gaz giderme tabletleri kullanılmıştır. Tabletler 30 kg/ 30 ton alüminyum ve 60kg /30 ton alüminyum dozajlarında verilmiştir. Bu grup deneylerde de örtü flaksı olarak yine NaCl, $CaCl_2$ ve %5 Kriyolit karışımı ilave edilmiştir. Numune alma sırası ve karakterizasyon prosedürü bölüm 9.5.1 ile aynıdır.

9.5.3 Flaksın N_2 ile akışkanlaştırılarak sıvı metale püskürtülmesi ile yapılan deneyler

Bu deneyler bölüm 9.2, şekil 9.2' deki cihazla gerçekleştirilmiştir. Flaks olarak susuz karnalit($K_3Mg_2C_{17}$) tuzu kullanılmıştır. Deneyler aşağıdaki üç aşamalı işlem ile gerçekleştirilmiştir.

1. 20 l/dakika debili azot gazı akışı ile 1 dakika süpürme
2. 40 l/dakika debili azot ile 1 kg/dakika flaksın akışkanlaştırılarak 10 dakika süre ile banyoya enjeksiyonu
3. 20 l/dakika debili azot gazı akışı ile 1 dakikalık son süpürme

Bu prosedürden sonra, dros çekilerek çıkan cürufun fiziksel özellikleri incelenmiştir. Daha sonra metal, bekletme fırınına aktarılmıştır. Metal bekletme fırınında bir önceki bölümlerde kullanılan örtü flaksı ilave edilerek tekrar dros alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Buradan çıkan metal döküm hattına gönderilmiştir. Deney numunelerinin alınışı ve karakterizasyon işlemleri yukarıdaki bölümlerde anlatıldığı şekilde gerçekleştirilmiştir.

9.5.4 Deney sonuçları

9.5.4.1 Birinci grup deneyler

Bu grup deneylerde %10 klor ve %90 azot içeren gaz karışımı kullanılarak elde edilen sonuçlar metalde kalan hidrojen içeriği olarak çeşitli alaşımlara ve numune bölgesine göre aşağıdaki çizelgelarda sıralanmıştır.

Çizelge 9.8 : 8011A alaşımı ile yapılan gaz giderme sonuçları

Rulo No				
Numune Yeri	5285	5291	5292	3161
Hidrojen içeriği ppm				
1.1	0,346	0,380	0,382	0,386
1.2	0,340	0,361	0,371	0,370
1.3	0,333	0,330	0,338	0,340
2.1	0,236	0,266	0,260	0,279
2.2	0,230	0,239	0,242	0,259
2.3	0,233	0,221	0,226	0,236

Çizelge 9.9 : 1050 alaşımı ile yapılan gaz giderme sonuçları

Rulo No		
Numune Yeri	4244	4246
Hidrojen içeriği ppm		
1.1	0,373	0,379
1.2	0,365	0,360
1.3	0,355	0,352
2.1	0,288	0,282
2.2	0,269	0,264
2.3	0,224	0,228

Çizelge 9.10 : 8006 alaşımı ile yapılan gaz giderme sonuçları

Rulo No				
Numune Yeri	1225	1230	1267	1268
Hidrojen içeriği ppm				
1.1	0,316	0,247	0,403	0,399
1.2	0,302	0,256	0,387	0,381
1.3	0,272	0,225	0,362	0,367
2.1	0,306	0,231	0,272	0,269
2.2	0,114	0,226	0,264	0,261
2.3			0,258	0,255

Çizelge 9.11 : 3105 alaşımı ile yapılan gaz giderme sonucu

Rulo No	
Numune Yeri	3137
Hidrojen içeriği ppm	
1.1	0,386
1.2	0,380
1.3	0,388
2.1	0,379
2.2	0,142
2.3	0,140

Bu çizelgelerden görüldüğü gibi azot ve klor gazı karışımı ile gaz giderme yapıldığında en düşük hidrojen içeriği mangani yüksek olan 8006 ve 3105 serisi alaşımlarda elde edilmektedir. Bu alaşımlarda erişilen nihai hidrojen kalıntısı 0,1 ila 0,15 ppm civarındadır. Düşük manganlı alaşım olan 8011, 1050 alaşımlarında ise kalıntı hidrojen değeri 0,2 ile 0,25 ppm arasındadır. 8006 serisinde 0,26 ppm civarında kalan hidrojenin yüksek olmasının nedeni bu alaşımın yüksek demir içeriğinden kaynaklanmaktadır. Aşağıdaki çizelgede 8006 alaşımı ile yapılan tekrarlı gaz giderme deneylerinin sonuçları da alaşımdaki demirin hidrojen kalıntı miktarını ispatlamaktadır.

Çizelge 9.12 : 8006 alaşımı ile yapılan tekrarlı gaz giderme işlemi sonucunda metalde kalan hidrojen değerleri

Rulo No		
Numune Yeri	1293	1294
Hidrojen içeriği ppm		
1.1	0,392	0,388
1.2	0,368	0,372
1.3	0,322	0,330
2.1	0,271	0,269
2.2	0,260	0,258
2.3	0,234	0,238

9.5.4.2 İkinci grup deneyler

Bu grup deneylerde %99,7 oranında aktif madde hegzakloreten içeren tabletler kullanılmıştır. Çizelge 9.13 ergitilmiş alaşıma 30 kg/30 ton alaşım dozajında tablet ilavesinde ulaşılan kalıntı hidrojen miktarları görülmektedir. Çizelge 9.14’de ise tablet ilave miktarının 60kg/30 ton alaşıma çıkarıldığı zaman metalde kalan kalıntı hidrojen miktarları özetlenmiştir. sonuçlardan da görüleceği gibi dozaj miktarının artırılması ile kalıntı hidrojen içeriğinde önemli bir değişiklik olmamaktadır. 30 kg

tablet ilavesinde ortalama kalıntı hidrojen içeriği 0,34 ppm iken ilave miktarı 60 kg'a çıkarıldığında ortalama kalıntı hidrojen değeri 0,33 ppm civarında olmaktadır.

Çizelge 9.13 : 30 kg/30 ton alaşım dozajında tablet ilavesinde alaşımda kalan hidrojen miktarları

	Rulo No	
Numune Yeri	5365	5367
	Hidrojen içeriği ppm	
1.1	0,380	0,376
1.2	0,353	0,362
1.3	0,347	0,359
2.1	0,322	0,350
2.2	0,320	0,342
2.3	-	-

Çizelge 9.14 : 60kg/30 ton alaşım dozajında tablet ilavesinde alaşımda kalan hidrojen miktarları

	Rulo No
Numune Yeri	5368
	Hidrojen içeriği ppm
1.1	0,374
1.2	0,355
1.3	0,348
2.1	0,333
2.2	0,330
2.3	-

9.5.4.3 Üçüncü grup deneyler

Bu grup deneylerde Black Lab Corp. FF05 tipi enjeksiyon cihazı ile %16 kriyolit içeren karnalit flaksı ile birlikte ergimiş banyoya azot gazı üflenmesi sonucunda ulaşılan kalıntı hidrojen değerleri çizelge 9.15’de gösterilmektedir.

Çizelge 9.15 : Black Lab Corp. FF05 tipi enjeksiyon cihazı ile karnalit flaksı ve azot gazı ile yapılan gaz giderme işlemlerinde kalıntı hidrojen miktarları

Numune Yeri	Rulo No							
	1405	1406	1407	1410	1411	1412	1413	1416
Hidrojen içeriği ppm								
1.1	0,352	0,373	0,369	0,376	0,396	0,388	0,391	0,378
1.2	0,256	0,249	0,244	0,250	0,271	0,261	0,259	0,266
1.3	0,320	0,332	0,344	0,346	0,365	0,352	0,358	0,366
2.1	0,228	0,219	0,220	0,222	0,244	0,224	0,233	0,236
2.2	0,315	0,325	0,325	0,330	0,338	0,326	0,319	0,337
2.3	0,302	0,212	0,212	0,210	0,219	0,212	0,218	0,220

Çizelgedeki sonuçlar enjeksiyon cihazı ile flakslı gaz giderme işleminde kalıntı hidrojen miktarlarının 0,21-0,34ppm aralığında değiştiğini ve dengesiz bir kalıntı hidrojen dağılımı olduğunu göstermektedir. Aynı cihaz ile aynı şartlarda örtü flaksı kullanılarak gaz giderme deneylerinde ise çizelge 9.16’daki sonuçlar ortaya çıkmıştır. Çizelgeden de görülebileceği gibi örtü flaksı ile kullanıldığında daha dengeli bir kalıntı hidrojen içeriğine ulaşılmaktadır. İşlemin uygulandığı şartlarda inilebilecek hidrojen seviyesi 0,3 ppm civarındadır.

Çizelge 9.16 : Black Lab Corp. FF05 tipi enjeksiyon cihazı kullanılarak azot gazı ile yapılan gaz giderme işlemlerinde örtü flaksı ilaveli deneylerde kalıntı hidrojen miktarları

Numune Yeri	Rulo No	
	1505	1511
	Hidrojen içeriği ppm	
1.1	0,383	0,380
1.2	0,346	0,341
1.3	0,366	0,362
2.1	0,312	0,310
2.2	0,354	0,349
2.3	0,310	0,306

9.5.4.4 Çeşitli gaz giderme yöntemleri sonunda metalde kalan empürite miktarları

Bu grup deneylerde önceki gaz giderme işlemlerinden elde edilen metallerde kalan empürite miktarları analiz edilmiştir. Çizelge 9.17’de alaşım içinde kalan magnezyum ve sodyum miktarları karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Çizelge 9.17 : Değişik gaz giderme yöntemlerinde metalde kalan magnezyum ve sodyum miktarları

Numune alınan yer	%Mg			%Na		
	Flux feeder	Cl ₂ +N ₂	Degazer tablet	Flux feeder	Cl ₂ +N ₂	Degazer tablet
Fırın içinde	0,0066	0,0107	0,0224	0,00022	0	0
Fırın çıkışı	0,00594	0,0109	0,0197	0,00021	0,00007	0
Bekletme fırını içi	0,00566	0,0105	0,0104	0,00032	0,00013	0
Bekletme fırını çıkışı	0,00543	0,11	0,0084	0	0,00054	0
Yolluk önce	0,00555	0,0115	0,0113	0,00007	0	0
Yolluktan sonra	0,00540	0,0114	0,0091	0	0	0
Levha	0,0056	0,114	0,0124	0	0	0

Çizelgeden da görüleceği gibi magnezyum ve sodyumun kalıntı miktarları flaks besleme cihazı kullanıldığında çok düşük seviyelere inmektedir. Bu da Black Lab Corp. FF05 cihazı ile yapılan gaz gidermeyi daha efektif olduğunu gösteren bir bulgudur. Aynı sonuca üç ayrı gaz giderme yönteminde kalıntı hidrojen ve birim alandaki inklüzyon miktarlarını gösteren çizelge 9.18’de de ulaşılmaktadır. Örneğin her üç gaz giderme yönteminde de nihai hidrojen kalıntısı 0,2 ppm civarında iken ametal/mm² miktarı 0,03 ile Black Lab Corp. FF05 cihazı ile en düşük değere gelmektedir.

Çizelge 9.18 : Üç gaz giderme yönteminde ulaşılan nihai hidrojen kalıntı ve ametal/mm² miktarları

Numune alma yeri	H ₂			Ametal/mm ²		
	Flux feeder	Cl ₂ +N ₂	Degazer tablet	Flux feeder	Cl ₂ +N ₂	Degazer tablet
1.1	0,37	0,393	0,38	0,06	0,11	0,17
1.2	0,262	0,304	0,248	0,06	0,06	0,11
1.3	0,352	0,376	0,347	0,06	0,08	0,08
2.1	0,244	0,262	0,226	0,03	0,06	0,06
2.2	0,326	0,341	0,32	0,03	0,06	0,06
2.3	0,216	0,224	0,211	0,03	0,08	0,06

9.5.5 Deney sonuçları

9.5.5.1 Tabletle gaz giderme yönteminin sonuçlarının irdelenmesi

Yapılan deneysel çalışmalarda üç tip gaz giderme yöntemi denenmiştir. Bunlardan birincisi hegzakloreten tabletler ile yapılan klasik gaz gidermedir. Çizelge 9.17 ve 9.18’deki sonuçlar incelendiğinde ortalama olarak bu metotla 0,3-0,35 ppm civarında bir kalıntı hidrojen miktarına ulaşıldığı bu değer birim ergimiş metal başına kullanılan tablet miktarı artırılrsa bile değişmediği görülmektedir. Bu seride yapılan gaz giderme deneylerinde kullanılan fırın endüstriyel bir fırın olup çalışma

şartlarında ergimiş metal banyosunun derinliği ve sıcaklığı aynı kaldığından tabletin parçalanmasından çıkan gazın aynı sürede banyoyu terk ettiği kabul edilebilir. Dolayısı ile farklı rulo numaraları ile verilen bütün deney periyotlarında aynı hidrojen kalıntı miktarlarına ulaşılmaktadır. Tablet dozajının 30 kg'dan 60 kg'a çıkarılmasının kalıntı hidrojen miktarını değiştirmemesi ise dekompozisyon sonucu oluşturulan klor gazının banyodaki çözünme miktarının banyoda çözünen klor gazı miktarından bağımsız olduğunun bir göstergesidir.

9.5.5.2 Azot ve klor gazı karışımı ile yapılan gaz giderme sonuçlarının irdelenmesi

Bu blok deneylerde gaz giderme için %90 azot + %10 klor karışımı kullanılmıştır. Bir lans vasıtası ile sıvı metal içine gazın üflenmesi ile gerçekleştirilen bu işlemlerde ölçülen nihai kalıntı hidrojen miktarları değişiklik arz etmektedir. Çizelge 9.8, 9.9, 9.10, 9.11, 9.12'den görülebileceği gibi kalan hidrojen miktarı gaz verme şekli ve süresi aynı olmasına rağmen ergitilen alaşımın türüne göre değişiklikler göstermektedir. Örneğin 8006 serisinde 0,11 ppm, 3105 serisinde, 0,14 ppm 8011A serisinde, 0,23 1050A serisinde ise 0,23ppm, sonuçlarına ulaşılmaktadır. Bu kalıntı hidrojen miktarlarının alaşımların kimyasal içerikleri ile ilgili olduğu ortaya çıkmaktadır. Çizelge 9.1, 9.2 9.3 ve 9.4'te verilen alaşımların kimyasal içerikleri incelendiğinde, 8006 ve 3105 serisinde mangan miktarlarının diğer alaşımlara göre yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Gaz giderme deneylerinde en düşük hidrojen kalıntısı bu alaşımlarda elde edildiğinden alaşımda kalan kalıntı hidrojenin artan mangan miktarı ile azaldığı ortaya çıkan ilginç bir sonuçtur.

9.5.5.3 Black lab corp. FF05 flaks enjeksiyon cihazı ile yapılan gaz giderme yönteminin sonuçlarının irdelenmesi

Bu grup deneylerde gaz giderme karnalit ile birlikte azotu sisteme verebilen bir enjeksiyon makinesi yardımı ile yapılmıştır. Buradaki gaz giderme tekniği lans ile yapılan teknikle benzerlik göstermesine rağmen flaks ilavesi ile gaz vermenin aynı anda yapılması temel farklılıktır. Elde edilen sonuçların çizelge 9.15 yardımı ile incelendiğinde çeşitli rulo numaraları ile verilen değişik deneysel periyotlarda çok farklı kalıntı hidrojen miktarlarına ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Bu miktarlar 0,2 ppm ile 0,4 ppm arasında değişmektedir. Diğer bir deyişle dengesiz bir gaz giderme işlemi söz konusudur. Bunun nedeni hidrojen giderici gazın enjeksiyon makinesinde flaks

ile birlikte verilmesidir. Flaksın gaz ile birlikte enjeksiyonu sırasında flaksın yerel cüruflaştırmalara neden olması banyodaki çözünmüş hidrojenin taşıyıcı gazla tam temasını önlemekte dolayısı ile kalıntı hidrojen miktarlarında homojensizlikler meydana gelmektedir. Nitekim enjeksiyon cihazından azot gazının flakssız olarak ergimiş banyoya verilmesi ve flaksın klasik anlamda banyo üstüne manuel olarak ilave edilmesi ile dağınık hidrojen miktarları toparlanmaktadır. Çizelge 9.16'daki sonuçlar incelendiğinde 0,3 ppm civarındaki dengeli kalıntı hidrojen miktarı bunun ispatıdır. Örtü flaksının manual eklenmesi durumunda ulaşılan nihai hidrojen miktarının (0,3 ppm) flaks+gaz enjeksiyonunda ulaşılan 0,2 ppmlik en az kalıntı değerinden yüksek olmasının nedeni ise örtü flaksı ile oluşan cürufun az da olsa azot gazının sıvı banyo içindeki hareketini engellemesidir.

9.5.5.4 Gaz giderme yöntemlerinin karşılaştırılması

Çizelge 9.17-9.18 uygulanan üç tür gaz giderme yöntemini, işlemten sonra metalde kalan yüzde magnezyum ve yüzde sodyum empürite miktarları, kalıntı hidrojen konsantrasyonu ve metalde bulunan inklüzyonların ametal/mm² cinsinden miktarını göze alarak karşılaştırılmalarını göstermektedir. En iyi hidrojen giderme seviyesi mukayese edildiğinde her üç yöntemle de 0,2 ppm civarında kalıcı hidrojen konsantrasyonlarına ulaşılmaktadır. Dolayısı ile bu kıstasa dayanılarak her üç gaz giderme yöntemi birbirlerine göre üstünlüklerinin olmadığı kanısına varılmaktadır. Ancak gaz giderme yönteminden sonra alüminyum bazlı alaşım bölgesinde kalan magnezyum ve sodyum miktarları incelendiğinde özellikle magnezyum açısından gaz enjeksiyon makinesi ile yapılan gaz gidermenin empürite açısından daha temiz bir metal ortaya çıkardığı anlaşılmaktadır. Gaz enjeksiyon sistemi ile yapılan gaz gidermelerde flaks+gaz enjeksiyonundan vazgeçilerek sadece gaz üfleme yapıldığı taktirde bu olumlu sonuç daha da bariz ortaya çıkmaktadır. Enjeksiyonlu gaz gidermenin olumlu etkisi alaşım metalinde kalan inklüzyon miktarları incelendiğinde de anlaşılmaktadır. Çizelge 9.18'de ametal/mm² cinsinden en düşük inklüzyon miktarına(0,03 ametal/mm²) bu sistemle ulaşılmaktadır.

Gaz giderme yöntemlerinin karşılaştırılmasında gaz giderici olarak kullanılan bileşiğin çalışma ortamına etkileri de göz önüne alınmalıdır. Klasik yöntem olan hegzakloreten tabletlerinin kullanılması aşırı derecede ve kontrolsüz klor gazının çıkmasına yol açmakta ve gazın metal banyosunu hızlı terk etmesi sebebi ile yeterli

hidrojen giderme işleminde problemler ortaya çıkmaktadır. Bu uygulamada klor gazının banyodan atmosfere salınması gerek işletme çalışanlarının sağlığı gerekse malzeme korozyonu açısından büyük zararlı etkiler yaratmaktadır. Bu zararlı etkinin azaltılması için klor gazının bir inert gaz ile seyreltilerek (azot veya argon) kontrollü debilerle verilmesi bu etkiyi azaltmaktadır. Lans ile üfleme tekniğinde gazın banyoya homojen dağılmaması tehlikesi ortaya çıkabilmektedir. Bu olumsuzluk da pratik uygulamada gazı enjeksiyon cihazlarından banyonun içine sparging tekniği ile vererek en aza indirilmektedir. Bu gaz enjeksiyon cihazlarının bu olumlu teknik yararını kısıtlayan en önemli dezavantajları klorun bu cihazdan banyoya flaks halinde verilmesi sırasında banyoda yerel cüruf oluşumları nedeni ile banyoda homojen olmayan bir kalıntı hidrojen konsantrasyonu yaratmasıdır. Ancak bu olumsuzlukta flaksın örtü flaksı olarak verilmesi ve cihazdan yalnızca gaz enjekte edilmesi ile aşılabilmektedir. İlave olarak bu cihazlara döner bir gaz dağıtma sistemi eklenmesi de yararlı olacaktır.

9.5.5.5 Deneysel sonuçlarının metalografik olarak irdelenmesi

Şekil 9.6, 9.7 ve 9.8 8006 serisi alüminyum alaşımının denenilen üç yöntemle degaze edilmesinden sonraki metalografik imajlarını göstermektedir.



Şekil 9.6 : 8006 alaşımının tablet ile degaze edilmesinden sonra elde edilen metalografik imaj (X100)



Şekil 9.7 : 8006 alaşımlının %90azot+%10klor karışımı ile degaze edilmesinden sonra elde edilen metalografik imaj (X100)



Şekil 9.8 : 8006 alaşımlının enjeksiyon cihazı ile degaze edilmesinden sonra elde edilen metalografik imaj (X100)

Bu şekiller birbirleri ile karşılaştırıldığında gerek bünyede kalan hidrojen boşluklarının miktarı gerekse inklüzyonların miktar ve dağılımları açısından gaz giderme yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları ortaya çıkmaktadır. Bu açıdan bir karşılaştırma yapıldığında, degazer tablet ile gaz giderme işleminde daha yoğun gaz boşlukları ve inklüzyonların miktar ve dağılımları açısından daha kaba bir yapı elde edilmektedir. Bu kaba metalografik görünüm azot+klor uygulamasında biraz azalırken gaz enjeksiyon cihazları ile elde edilen yapı alaşımdan beklenen mekanik özellikler açısından en uygun görünümü vermektedir.

9.6 AlTiB Mastır Alaşımı İlavesinin AA 3105 Döküm Alaşımı Üzerinde Tane İnceltme Etkisinin İncelenmesi

Bu çalışmada, en yaygın kullanılan Al-Ti-B mastır alaşımlarından birisi olan Al₅Ti₁B türü tane inceltici mastır alaşımının AA 3105 hurda alaşımı üzerinde tane inceltici etkisi bekletme zamanına karşı incelenmiştir.

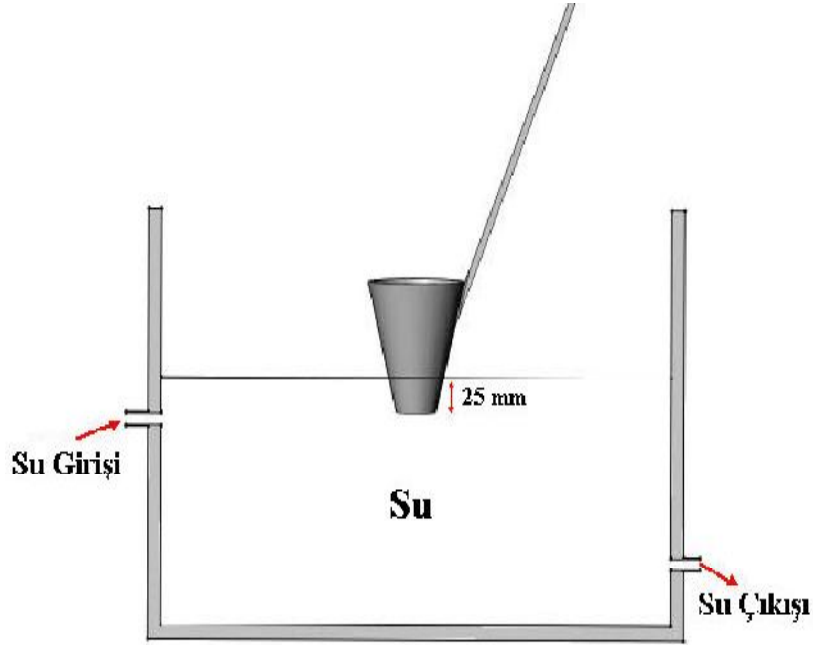
Sonuçlar Al₅Ti₁B mastır alaşımı ilave edilmiş AA 3105 hurda alaşımından dökülen numunelerde ortalama tane boyutunun mastır alaşımı ilavesinden sonra potada bekletme zamanı ile önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir.

Tane inceltme yapılmış alüminyum dökümlerinde tane inceltme yapılmamış olanlara göre akıcılığın ve beslenebilirliğin arttığı, daha gözeneksiz ve homojen bir yapı olduğu, mukavemet, yorulma direnci ve sızdırmazlık direnci değerlerinin yükseldiği bilinmektedir. Tane inceltme işlemlerinde alüminyum dökümhanelerinde en yaygın olarak Al-Ti-B tipi mastır alaşımları kullanılmaktadır. Bunların arasında da Al₅Ti₁B, Al₃Ti₁B ve Al₁Ti₁B oranlarındaki tane incelticiler daha çok tercih edilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar alternatif tane incelticilerin geliştirilmekte olduğunu rapor etmişlerdir. AlTiB tip mastır alaşımı ilave edilen alüminyum alaşımının tane inceltme mekanizması incelendiğinde mikroyapıda 1-2 µm büyüklüğünde TiB₂ ve 30-40 µm büyüklüğünde TiAl₃ intermetalik bileşikleri olduğu görülmüştür. Bu bileşiklerin oranı ve etkisi ilave edilen mastır alaşımındaki Ti:B oranına göre değiştiği ve tane boyutunun oluşumunda çok önemli rol oynadığı belirtilmiştir.

Tane incelticilerin ergiyik içerisine katıldıktan sonra tane inceltme etkisi zamanla değişmektedir. Tane inceltici mastır alaşımı ilaveden çok kısa bir süre sonra etki

etmektedir ve belli bir zamana kadar tane inceltme etkisi zamanla olumlu yönde gelişmektedir, fakat bu süre çok uzadığında tane inceltici etkisini yitirmektedir. Tane inceltici ilave oranları da tane boyutu değişiminde önemli hususlardan biridir. Alaşıma katılacak mastır alaşımı seviyesi; alaşımda kullanılan hurda döngü seviyesine, inceltici ilave etme metoduna, soğuma hızına ve alaşım bileşimine bağlı olarak 0,25–3 kg/ton arasında geniş bir aralıkta değişebilmektedir.

Al5Ti1B mastır alaşımı AA 3105 alaşımına nominal olarak %0,02 Ti ilavesi yapacak şekilde katılmıştır. Tane inceltme deneyleri şekil 9.9’da gösterilen standart tane inceltme testi düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada metalografi, optik mikroskop ve görüntü analizi teknikleri kullanılarak tane boyutu ölçümleri ve karşılaştırmaları yapılmıştır.



Şekil 9.9 : Tane inceltme numunesinin soğutmasının yapıldığı düzeneğin şematik gösterimi.

9.6.1 Deneyin uygulanması

AA 3105 hurda alaşımının ergitme işlemi 8 kg alüminyum ergitme kapasitesine sahip karbür esaslı pota içerisinde elektrik direnç ocağında gerçekleştirilmiştir.

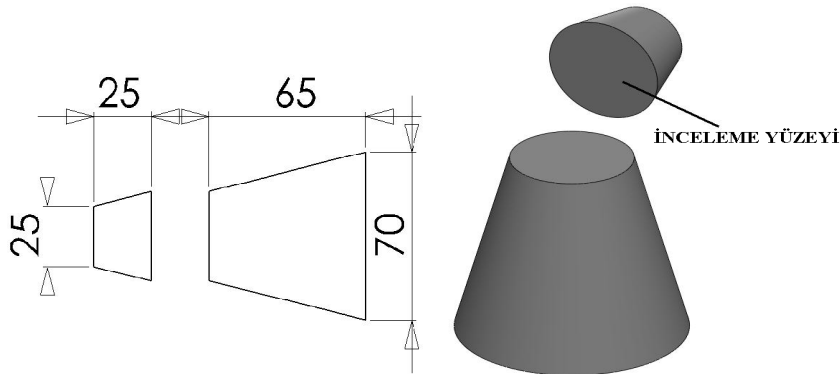
Sıvı metalin çözünmüş hidrojen gazından arındırılması amacı ile yaklaşık 750°C’ de potaya daldırılan grafit sabit lans yardımı ile sıvı azot ile yıkama işlemi gerçekleştirildi. Bu işlemden sonra sıvı metal üzeri bir ticari toz flaks ile kaplanarak metalin sıcaklığının pota içersinde 720°C’ ye düşmesi beklendi. Bu sıcaklıkta sıvı

metalin yüzeyinden sıyırma yöntemi ile cüruf tabakası temizlenerek AlTi5B1 ilave edilmemiş alaşımda tane boyutunu ölçmek için standart tane inceltme potası içersine numune alınarak şekil 9.9’da şematik görünümü verilen sabit su yüksekliğine sahip bir kapta soğutma işlemi gerçekleştirildi. Bu işlemten sonra ergiyik alaşıma ağırlıkça % 0,2 Ti ilave edecek şekilde önceden tartılmış Al5Ti1B mastır alaşımı daldırıldı.

Tane inceltici ilavesini takiben 5’er dakikalık düzenli aralıklar ile tane inceltme deney kalıbı içersine sıvı alaşım alınarak aynı şekilde soğutuldu. Katılaşma ve soğuma süresince soğutma kabı içersinde bekletilen konik alaşım külçesinin kesilmemiş halinin fotoğraf görüntüsü şekil 9.10’da verilmektedir. Sekil 9.11’de tane inceltme deney numunesinin kesilme ölçüleri ve numunenin inceleme yüzeyinin şematik görünüşü verilmiştir.



Şekil 9.10: Tane inceltme deney külçesi



Şekil 9.11: Tane inceltme deney numunesi ölçüleri

Her bir numune kesildikten sonra incelenecek yüzeyi metalografik açıdan hazır hale getirmek için kaba ve ince zımparalamanın ardından alümina süspansiyonu emdirilmiş keçede parlatma işlemleri gerçekleştirildi. Parlatılan yüzeyler yıkanıp kurutulduktan sonra dağlama için numuneler önce 80°C sıcaklıkta suda bir süre

bekletilerek ısıtıldı ve soğutulmadan Paulton çözeltisi (%60 HCL, %30 HNO₃, %5HF, %5H₂O) ile dağıldı.

9.6.2 AA 3105 hurda (dökümhane döngüsü) alaşımı tane inceltme deneyleri sonuçları

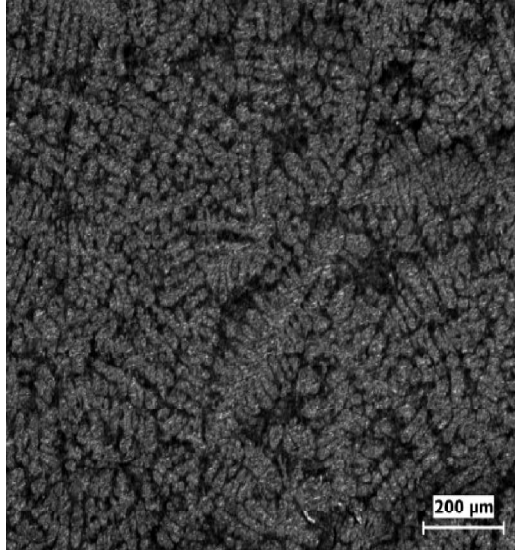
AA 3105 hurda alaşımı üzerine bekletme süresinin tane boyutu üzerine etkisi incelendiğinde, zamanın tane boyutu üzerinde önemli bir faktör olduğu ortaya çıkmaktadır.

Şekil 9.12.a'da tane inceltici ilave edilmeden yapılan döküm numunesinin mikro yapı resmi görülmektedir. Şekil 9.12.a'dan görüldüğü gibi alfa alüminyum kristalleri oldukça kaba taneli ve dentritik bir yapıya sahiptir. Yapılan ölçümlerde tane boyutunun ortalama 520–580 µm seviyelerinde olduğu görülmüştür.

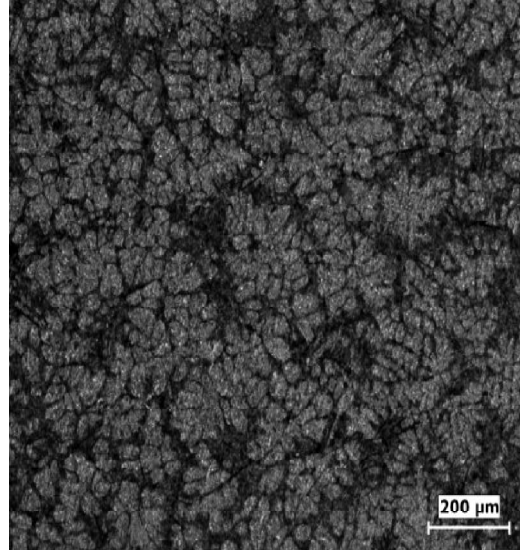
Şekil 9.12 b'de ise inceltici ilavesi etkisini çok kısa sürede göstererek tane boyutunun alfa alüminyum tanelerinin ortalama 280-340 µm civarında bir boyuta sahip oldukları görülmektedir.

Hurda alaşımında en ince taneli yapı 25 dakika sonra alınan numunede belirlenmiştir. Al₅Ti₁B ilavesinden 25 dakika sonra alınan numunenin mikroyapı resmi şekil 9.13 a'da görülmektedir. Mikroyapı resminden de görüldüğü gibi ortalama tane boyutu 180-210 µm civarındadır.

Al₅Ti₁B ilavesi 25 dakikadan sonra zaman artışıyla birlikte etkisini yitirmeye baslar ve 60 dakika sonra alınan numunede ortalama tane boyutu 270-320 µm seviyelerine çıkmaktadır. Şekil 9.13 b'de hurda alaşımına tane inceltici ilavesinden 60 dakika sonra dökülen numune mikroyapısı görülmektedir.

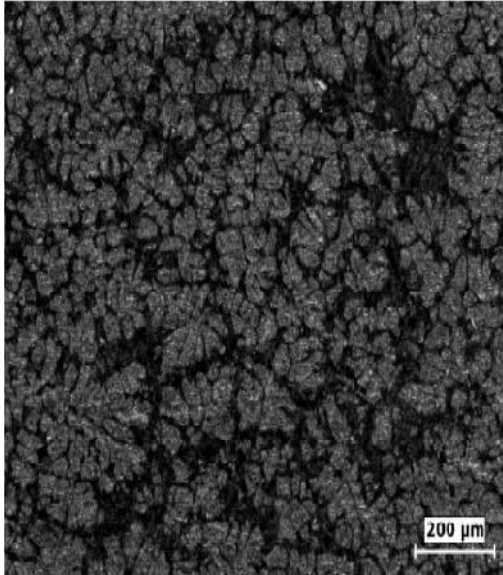


(a)

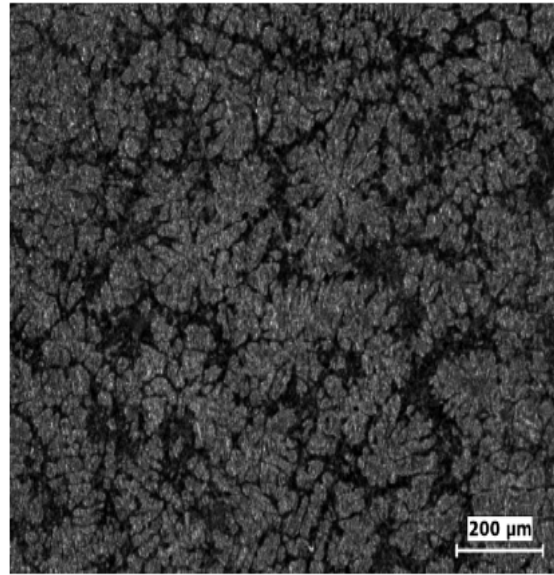


(b)

Şekil 9.12 : a) Al5Ti1B ilavesiz, b) Al5Ti1B ilavesinden 5 dk. sonra tane yapısı



(a)

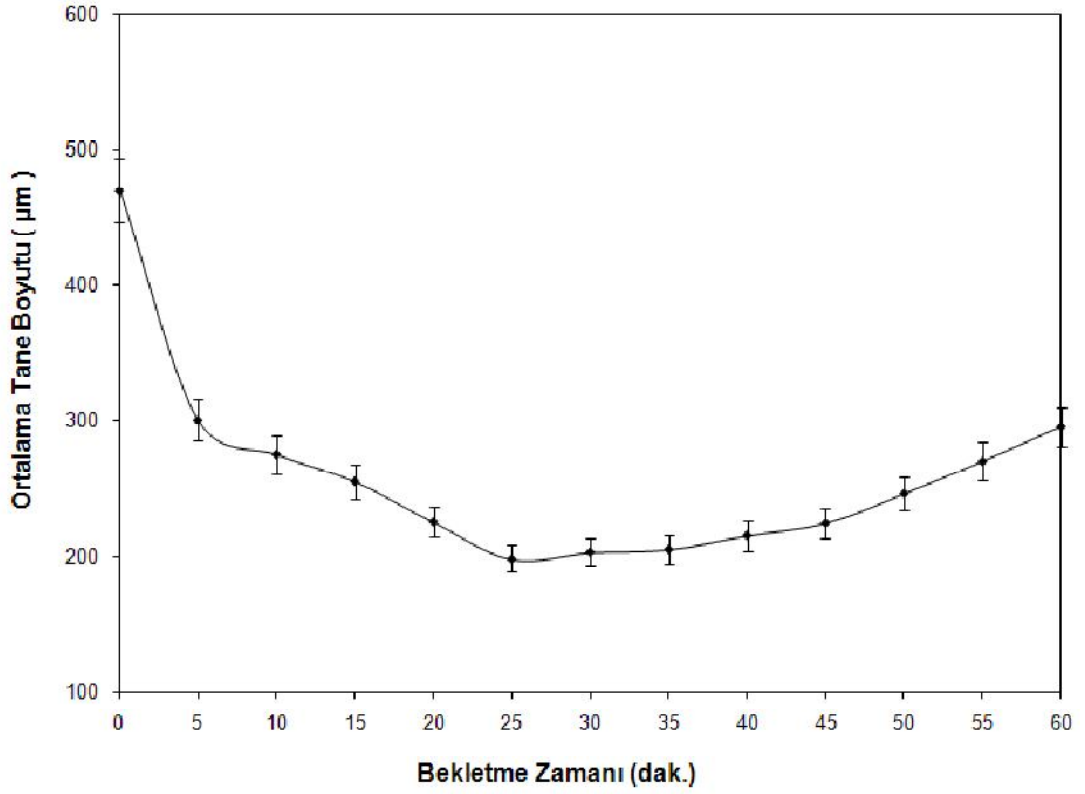


(b)

Şekil 9.13 : a) Al5Ti1B ilavesinden 25 dk sonra, b) Al5Ti1B ilavesinden 60 dk. sonra

AA 3105 hurda alaşımına katılan tane incelticinin bekletme zamanının tane boyutu oluşumu üzerine etkisi şekil 9.14’de verilmiştir. Grafîge baktığımızda tane inceltici ilavesi olmadan yapılan döküm numunesindeki ortalama tane boyutunun 470 μm seviyelerinde olduğu ve tane inceltici ilavesiyle tane boyutunun çok kısa sürede 300 μm seviyelerine kadar gerilediği görülmektedir. Hurda alaşımına tane inceltici ilavesiyle oluşan en ince taneli yapının 25 dakika sonra alınan numunede 195 μm olarak tespit edilmiştir. Tane incelticinin ilavesinde optimum zaman 25 dakika olarak

belirlenmiştir. Bu dakikadan sonra grafikte de görüldüğü gibi bekletme zamanının artışı tane boyutuna olumsuz yönde etki ederek tane incelticinin etkisinin geçen zamanla paralel olarak azalmaktadır. 60 dakika sonra alınan numuneden yapılan ölçümlerde ortalama tane boyutunun 300 μm seviyelerine kadar çıktığı görülmüştür.



Şekil 9.14: AA 3105 hurda alaşımına katılan Al5Ti1B mastır alaşımının bekletme zamanına göre tane boyutu değişimi

9.6.3 Deney sonuçları

AA 3105 hurda alaşımına tane inceltici ilavesinden sonra tutma zamanının etkisini incelediğimizde hurda alaşımı içinde optimum zaman 25 dakika ve tane boyutu 195 μm seviyesindedir. Hurda alaşımında da optimum süreden sonra bekletme tane boyutuna olumsuz yönde etki ederek 60 dakika sonra alınan numuneden yapılan ölçümlerde tane boyutunun 300 μm seviyelerine çıkmaktadır.

9.6.4 Tane incelticilerin karşılaştırılması

Döküm alaşımının tane boyutu ergiyik içerisindeki soğuma seviyesine bağlı olarak katılaşmaya başlayan çekirdek sayısına bağlıdır. Tane inceltme alüminyum alaşımlarında sıcak yırtılma direncini artırır, porozitenin zararlı etkilerini düşürür ve

çekinti porozitesini dağıtır. Titanyum, boronla birlikte kuvvetli çekirdeklenme etkisi olan en çok kullanılan tane incelticidir.

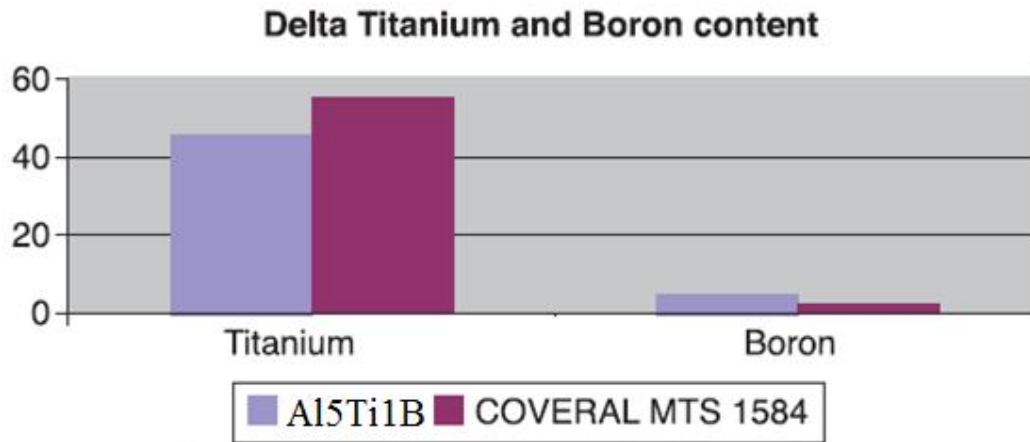
9.6.4.1 Deney sonuçları

COVERAL MTS 1584 ile Al5Ti1B çubuk tane incelticileri karşılaştırılmıştır. İşlem elektrikli bekletme ocaklarında yapılmıştır. (Çizelge 9.19)

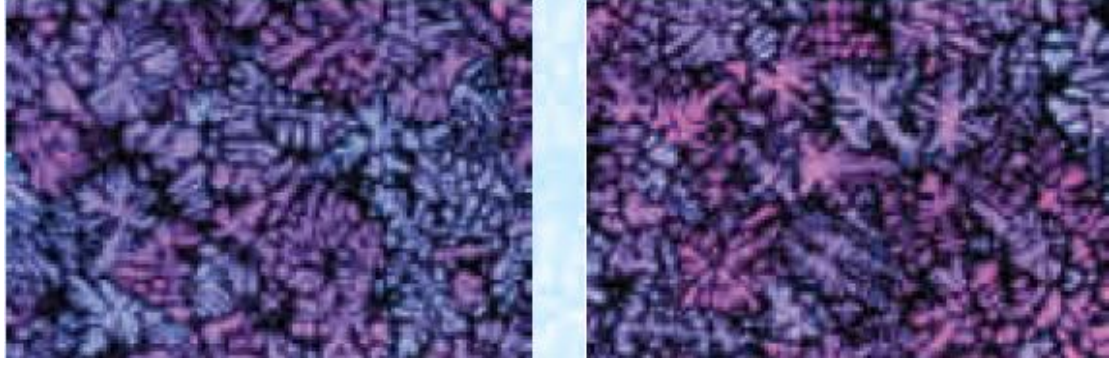
Çizelge 9.19 : Tane inceltme deneme parametreleri ve sonuçları

Alüminyum Dökümhanesi	Elle Yapılan İşlem	Flaks Alma cihazı ile Yapılan İşlem
Kullanılan ürünler	Al5Ti1B	COVERAL MTS 1584
Kullanılan alaşım	AlSi7Mg	
Ocak tipi ve kapasitesi	800 kg; elektrikle ısıtılan pota	
İşlem sıcaklığı	730°C	
İlave oranı	0.10 %	0.04 %
Titanyum verimliliği	46 ppm	55 ppm
Boron verimliliği	4 ppm	3 ppm
İşlem başına curuf ağırlığı	12.0 kg	4.5 kg

İki işlemin verimlilik değerleri ve mikroyapıları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



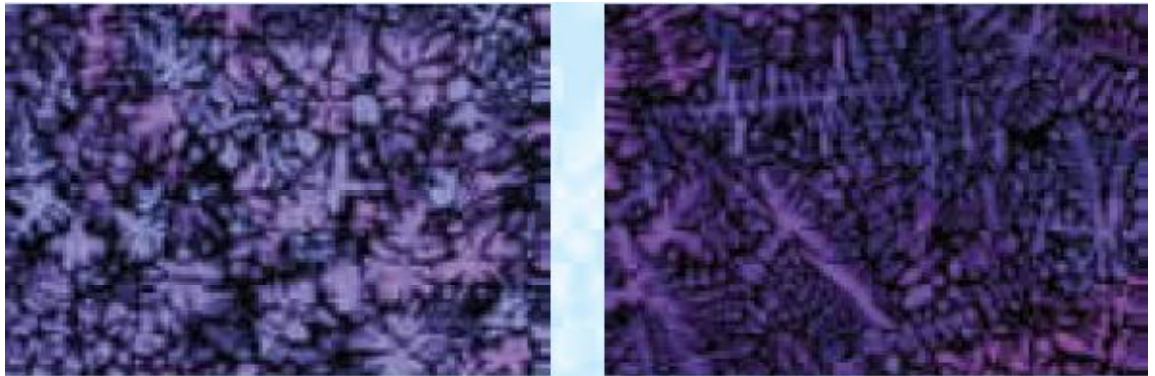
Şekil 9.15: Tane inceltme denemelerinde verimlilik karşılaştırmaları



Önce 207 µm

Sonra 161 µm

Şekil 9.16: Al5Ti1B (%0.10) Mikroyapıdaki Dendrit kolları uzunlukları



Önce 186 µm

Sonra 120 µm

Şekil 9.17 : COVERAL MTS 1584 (% 0.04) Mikroyapıdaki Dendrit kolları uzunlukları

Özel master alaşım fiyatlarına bağlı olarak işlem başına malzeme maliyeti Al5Ti1B master alaşımı (ilave oranı 0.10%) ve COVERAL MTS 1584 (ilave oranı 0.04%) aşağı yukarı aynıdır. COVERAL MTS 1584 kullanımı ile parçanın mikro yapısı iyileştirilmiş, termal analiz eğrileriyle sonuç desteklenmiştir.

10. GENEL SONUÇLAR

1. Malzeme içindeki alaşım elementleri kayıplarının en aza indirilmesi ile alaşımın oranlarının korunması ve kendi kullanım alanlarında yeniden kullanılabilmesi sağlanmıştır.
2. Çevreye kirli gaz yayınımlı olmadan yağ, lak, boya giderme ve ergitme işlemlerinin tamamlanması sağlanmıştır.
3. Ergitme sonucunda oluşan cürufun (katı atık) en az seviyeye inmesi ile daha fazla metalik alüminyum elde edilmiştir.
4. Çeşitli tipteki alüminyum alaşımlarının endüstriyel boyuttaki ergitme ve dökülmesi sırasında hidrojen gazının havadaki nem ve baca gazları ve refrakter ile etkileşimi ile sıvı alüminyumda çözünmesi ergitme işleminde olumsuzluklar yaratmıştır.
5. Ergitilmiş alüminyum alaşımının dökülmesi ve plastik şekil verme işlemlerine tabi tutulmadan önce gaz giderme işlemlerinin uygulanması alaşımdan beklenen mekanik özelliklerin sağlanması açısından vazgeçilemez bir prosestir.
6. Gaz gidermede değişik teknikler kullanılabilir. Bunlardan tablet uygulaması klasik yöntem iken lans ve enjeksiyon cihazı uygulamaları daha yeni yöntemlerdir.
7. Yapılan deneysel çalışmalarda endüstriyel boyutta her üç gaz giderme yöntemi ile de 0,2 ppme kadar kalıntı hidrojen miktarlarına inilebilmektedir. Bu değer literatürlerde (2-5,7,11) belirtilen ve gaz boşluğu yaramama sınırı olan 0,15-0,2 ml H₂/ 100g metal değerine ulaşan bir kalıntı hidrojen miktarıdır.
8. Kalıntı hidrojen miktarı açısından kullanılan her üç yöntemde farkı olmamasına rağmen gaz giderme sonucunda kalan sodyum ve magnezyum empürite miktarlarının en az seviyede olduğu yöntem cihazla enjeksiyon yöntemidir.
9. Enjeksiyon cihazı ile gaz giderme yönteminde diğer yöntemlere göre 0,03 ametal/mm² ile en düşük inklüzyon miktarlarına ulaşılmıştır.

10. Gaz ile enjeksiyon sisteminin en yararlı gaz giderme yöntemi olduğu 8006 alaşımı için çekilen metalografik imajların karşılaştırılması ile de ortaya çıkmıştır.

11. Tane inceltici ilavesinde bekletme zamanında optimum süreden sonra tane boyutunun tekrar büyümesinin sebebi olarak; tane inceltici ilavesiyle alaşım içerisinde oluşan TiB_2 ve $TiAl_3$ gibi intermetalik bileşiklerin zamanla çözünmeye başlaması ve bunların birbiriyle birleşerek büyümesi olarak görülmektedir.

12. Tane incelticisiz olarak yapılan döküm numunesinde hurda alaşım tane boyutu $470\text{ }\mu\text{m}$ iken, eğer primer alaşımda döküm numunesi alsaydık $560\text{ }\mu\text{m}$ seviyelerinde olacaktı. Aradaki tane boyut farkı ise hurda malzemenin daha önceki dökümlerinde tane inceltme işlemine tabi tutulmasından dolayı içeriğinde hazır bulunan titanyumdan kaynaklandığı varsayılmaktadır.

11. SONUÇLARIN İRDELENMESİ

1. Hurda ergitme işlemi için döner fırınların reverber fırınlara oranla çok daha yüksek verimde çalışabildiğini söyleyebiliriz. Hem fırının dönmesiyle ısının ocak içinde daha iyi yayılmasını, hem de şarjın homojen karışmasını sağlayarak ergimeyi hızlandırır. Ayrıca çıkan cüruftan alüminyumun geri kazanılması için de çok daha verimli fırınlardır. Bu tez çalışmasında döner fırınlarda yapılan hurda alüminyum ergitme işlemi sonunda reverber fırınlarla yapılan hurda ergitme işlemine oranla yaklaşık olarak 2 kat daha fazla metal kazancımızın olduğu görülmüştür.
2. Yapılan deneysel çalışmalarda alüminyum alaşımlarda bulunan yüksek manganın alaşımda kalan hidrojen miktarına azaltıcı yönde etkide bulunduğu tespit edilmiştir.
3. Yapılan deneylerde gaz giderme yöntemlerinde en iyi sonuç kalıcı empürite miktarları ve inklüzyon seviyesi ve metalografik kalite açısından en iyi sonucu enjeksiyon cihazları vermiştir.
4. AA 3105 alaşımına ilave edilen Al5Ti1B tane incelticinin bekletme zamanına göre etkisinin incelendiği bu çalışmada; hurda alaşımında bekletme zamanının önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir.
5. Foseco markalı COVERAL MTS 1584 tane inceltici çubukla, piyasada genel olarak kullanılan Al5Ti1B tane inceltici çubukları karşılaştırdığımızda daha az COVERAL MTS 1584 ilavesiyle çok daha iyi mikroyapılar elde ettiğimizi görülmüştür.

12. ÖNERİLER

Kullanılan malzemeler ve uygulanan yöntemlerle birlikte aşağıdaki faydalar sağlandı:

1. Yüksek manganlı alüminyum alaşımlarında hidrojen gazı giderme deneylerinin çoğaltılması yerinde olur.
2. Enjeksiyon cihazlarında otomatik flaks vermenin olumsuz etkilerinin giderilmesi ve gaz vermenin döner bir dağıtıcı sistem ile banyoya iletilmesi yararlı olacaktır. Dolayısıyla enjeksiyon cihazlarını degazer tabletler yerine tercih etmek çok daha verimli olacaktır.
3. Alüminyumda çözünmüş hidrojenin giderilmesinde HCl oluşturmak kaçınılmazdır. Ancak klor gazının sıvı metalde molekül halinden değil Cl^- olarak çözünmesi daha olumlu sonuçlar verecektir. Böylelikle pahalı bir gaz olan klorun boşuna harcanması ve çevresel etkilerinin en aza indirilmesi sağlanabilecektir.
4. Gaz verme sistemlerinde ekonomik ve verimli çalışma önemli bir gerekliliktir. Bu nedenle sparging etkisi de yaratacak enjeksiyon cihaz tipindeki gaz gidericilerin geliştirilerek kullanılması lüzumlu görülmektedir
5. Dökümhanelerde genel tane inceltici olarak kullanılan Al_5Ti_1B çubukların yerine değişik marka ve alaşımlardaki tane incelticelerini deneyerek daha uygun maliyetlerle daha iyi mekanik özellikler elde edebiliriz.

KAYNAKLAR

- Afshar, S. ve Allaire, C.,** 1996. The Corrosion Of Refractories By Molten Aluminum, JOM, 48(5), 23.
- Allaire, C.,** 1992. Refractories For The Lining Of Holding And Melting Furnaces, In Int.Symp.Adv. Prod. Fabr. Light Met. Met. Matrix. Comp. Avedesian, M.M., Larouche, L.J., and Masounave, J., Eds. CIM, Montreal, p.163.
- Alüminyum Derneği,** 2000. Aluminum Recycling Casebook, Washington, DC.
- Ambrose.,** 1983. Hot-Crush Technique For Separation Of Cast-Wrought-Aluminium Alloy Scrap, Conserv. Recycle, p. 6,63.
- Anderson,R. J.,** 1931. Secondary Aluminum,Sherwood Pres,Cleveland, OH
- Atkins,R.,** 1992. New Developments In Electric-Resistance-Heated Melting And Holding Furnaces, Foundry Int., 15(4), 166.
- Bateman, W.,** 1999. Decoating Of Aluminium Products And The Environment,In Light Metals 1999, Eckert, C.E., Ed., TMS AIME, Warrendale, PA, p.1099.
- Bowman, K. A.,** 1985. Alcoa's Used Beverage Can (UBC) Alloy Separation Process.In Recycl.Second. Recovery,Met. Taylor,P.R.Sohn, H.Y., Jarerett, N.,Eds.,TMS-AIME, Warrendale, PA, p. 429.
- Dalmijn, W. L.,** 1990. Practical Applications Of Eddy Current Separators In The Scrap Recycling, In 2nd Int. Symp Recycl, Met. Eng. Mater., Van Linden, J.H.L, Stewart, D.L., and Sahai,Y.,Eds., TMS-AIME, Warrendale, PA, p.303.
- De Ridder, J. ve Terrier, J.,** 1999 The Solution For Low Cost Degassing And Filtration, In Light Metals, Eckert, C.E., Ed., TMS-AIME Warrendale, PA, p.649.
- Fielding, R. A. P.,** 1996. The Role Of Grain Refining, Degassing And Filtration, In The Production Of Quality Ingot Products, Light Metal Age, 54(8), 46.
- Fujisawa, K.,** 2000. A Basic Study On Development Of A Swell-Peeling Method In UBC Recycling System, in 4th Int. Symp. Recycl. Met. Eng. Mater, Stewart, D.L., Stephens, R., and Daley, J.C. Eds, TMS AIME, Warrendale, PA, p. 835.
- Glenn, J.,** 1991. Innovations In Processing And Sorting Recyclables, Biocycle, p. 35.
- Groteke, D. E.,** 1992 Aluminum Crucible Melt Shop Considerations, Modern Casting, 82(12), 47.
- Gubeno, J.,** 2005. Opting For Optical, Recycl.Today, 43(5), 58.

- Henderson, R. S.,** 1996. New Electromagnetic Circulation Pump For Aluminum Reverberatory Furnaces, In Light Metals 1996, Hale, W., Ed., TMS-AIME, Warrendale, PA, p. 869.
- Hollowell, R. D. T.,** 1939. Secondary Aluminium And Its alloys, Met. Ind. p. 54, 387.
- Kiser, K.,** 2003. Equipment Focus: Low-Speed Shredders, Scrap, 60(2), 119.
- Lied, C.R.,** 1990. Reduction Methods And Effects On Burner Efficiency, In Energy Conservation Workshop XI: Energy and The Environment In The 1990s, Aluminum Association, Washington, DC. p. 227.
- Mahi P.,** 1990. Trends In Aluminium Recycling In The United Kingdom, In Recycling Of Metalliferous Materials, IMM, London, p.133
- Martchek K. J.,** 1997. Life Cycle Benefits Challenges And The Potential Of Recycled Aluminium, In Proc. Air & Waste Manage. Assoc. 90th. Ann. Meet. Exhib. p. 97-RP124B.01.
- Maurice, D.,** 2000. Thermomechanical Treatments For The Separation Of Cast And Wrought Aluminium, In 4th Int. Symp. Recycl. Met. Eng. Mater., Stewart, D.L., Stephens, R., and Daley, J. C., Eds., TMS-AIME, Warrendale, PA, p.1251.
- Mc Collum, J. M.,** 1989. Advanced Refractories For Aluminum Melting, Furnaces In Light Metals 1989, Campbell, P.G., Ed. TMS-AIME, Warrendale, PA, p. 807.
- Morrison J.,** 2005. European Aluminium Recycling Under Treatment Alum. Int. Today, 17(1), 17.
- Mutz, S.,** 2003. Picking An “old” Process For Separation Of Non-Ferrous Metals, In EPD Congress 2003, Schlesinger, M.E., Ed., TMS-AIME, Warrendale, PA, p.301.
- Nijkerk, A. A. ve Dalmijn, W. L.,** 1998. Handbook Of Recycle Techniques, Nijkerk Consultancy, The Hague, Netherlands.
- Peel, A. M.,** 2003. A Look At The History And Some Recent Developments In The Use Of Electromagnetic Devices For Improving Operational Efficiency In The Aluminium Cast House, In Alum.Cast House Technol: 8th Australas. Conf. Whiteley, P.R., Ed., TMS-AIME, Warrendale, PA, p.71.
- Perkul, R. Y.,** 1972. Induction Furnaces, In Metals Handbook, Vol. 15, Casting, 9th ed. ASM International, Materials Park, OH, p.368.
- Peterson, R. D.,** 1995. Effect Of salt Flux Additives On Aluminum Droplet Coalescence, In 2nd Int. Symp, Recycle Met. Eng. Mater., Van Linden, J.H.L., Stewart, D.L., and Sahai, Y., Eds. TMS-AIME, Warrendale PA, p.69.
- Quesnel, S., Afshar, S., ve Allaire, C.,** 1996. Corrosion Of Refractories At The Bellyband Of Aluminum Melting And Holding Furnaces, In Light Metals. 1996, Hale, W., Ed., TMS-AIME, Warrendale, PA, p.661.
- Rombach, G.,** 1998. Integrated Assessment Of Primary And Secondary Aluminium Production In Future, Aluminium Products and Processes, DMG Business Media, Ltd. Surrey, UK, Chap. 10.

- Sandoval, D.**, 2005. Stepping Things Up, *Recycl. Today*, 43(6), 44.
- Schalles, D. G.**, 1998. The Next Generation Of Combustion Technology For Aluminium Melting, In *Light Metals 1998*, Welch, B., Ed., TMS-AIME, Warrendale, PA, p.1143.
- Sigworth, G. K.**, 1999. Gas Fluxing Of Molten Aluminum, Part 1, Hydrogen Removal, In *Light Metals, 1999*, Eckert C.E. Ed., TMS-AIME, Warrendale, PA, p.641.
- Smith, L. ve Hayes, P. J.**, 1992. Recycling Aluminium Scrap In Coreless Induction Furnaces In *Int.Conf.Recyc.Metals*, ASM International, Materials, Park, OH, p.151.
- Smith.F. H.**, 1946. *Secondary Aluminium Metallurgia*, Warrendale, PA, p. 33, 207.
- Sullivan,J.P.**, 1985. Recycling Scrap Wire And Cable: The State Of The Art, *Wire J. Int.*, 18(11), 36.
- Tietenberg.**, 2006. *T. Environmental And Natural Resource Economics*.7th Ed. Addison-Wesley, Reading. MA.
- Van Linden, J. H. L.**, 1990. Aluminium Recycling; Everybody's Business, Technological Challenges And Opportunities, In *Light Metals 1990*, Bickert, C.M.Ed. TMS-AIME, Warrendale, PA, p.675.
- Van Linden,J. H. L.**, 1985. Aluminium Recycling,From Junkyard To Boardroom, In *Recycle And Secondary Recovery Of Metals*, TMS-AIME, Warrendale, PA, p.34.
- Wechsler,T. ve Gitman G.**, 1990. Use Of The Pyretron Variable Ratio Air/Oxygen/Fuel Burner System For Aluminum Melting, In *Energy Conservation Workshop XI: Energy And The Environment In the 1990s*, Aluminum Association, Washington, DC, p.269.
- Wolf, S. ve Hoberg. H.**, 1997. Recycling Of Aluminium And Its Effect On Sustainable Development, In *3rd ASM Int. Conf. Recycle. Metals*, ASM International, Brussels, Belgium, p.257.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Necdet İZGİ
Doğum Yeri ve Tarihi : Hannover/Almanya 08.06.1982
Adres : Osmaniye Mahallesi Bildik Sokak Kızılırmak
Apartmanı Daire : 11 Bakırköy/İstanbul
Lisans Üniversite : Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme
Mühendisliği