

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM BEYAZ DROSLARININ PİROMETALURJİK  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hasan GÜNEY**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2024**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM BEYAZ DROSLARININ PİROMETALURJİK  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hasan GÜNEY  
(506211206)**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Onuralp YÜCEL**

**HAZİRAN 2024**



**ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL**

**PYROMETALLURGICAL EVALUATION OF ALUMINUM WHITE DROSS**



**M.Sc. THESIS**

**Hasan GÜNEY  
(506211206)**

**Department of Metallurgical and Materials Engineering  
Production Metallurgy and Technologies Engineering Programme**

**Thesis Advisor: Prof. Dr. Onuralp YÜCEL**

**JUNE 2024**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 506211206 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hasan GÜNEY, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ALÜMİNYUM BEYAZ DROSLARININ PİROMETALURJİK DEĞERLENDİRİLMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Onuralp YÜCEL** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Filiz ÇINAR ŞAHİN** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Ahmet TURAN** .....

Yeditepe Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : **23 Mayıs 2024**

**Savunma Tarihi** : **27 Haziran 2024**





**Aileme,**



## ÖNSÖZ

Yüksek lisansım boyunca derin bilgi ve birikimleriyle beni yönlendirerek çalışmalarımın düzenli ve tutarlı bir şekilde yürümesini sağlayan, gerek bilimsel gerekse hayata dair konularda yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam Prof. Dr. Onuralp YÜCEL'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Sahip olduğu yüksek bilimsel ve etik değerleriyle çalışmam boyunca görüşlerine sıklıkla başvurduğum, deneysel metotları öğrenmemde, cihazların kullanımında ve her seferinde bilgi ve deneyimlerini cömertçe paylaşan çok değerli abilerim Ar.Gör. Dr. Kağan BENZEŞİK ve Ar.Gör. Selçuk KAN'a teşekkür ederim.

Tüm yüksek lisans hayatım boyunca sürekli olarak desteğini esirgemeyen Prof.Dr. Filiz ÇINAR ŞAHİN ve Doç.Dr. Ahmet TURAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmamız boyunca gerekli hammaddenin tedarikinde ve analiz desteği konusunda paylaşımlarını esirgemeyen ETİ Alüminyum ailesine çok teşekkür ederim.

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 122N040 nolu "*Alüminyum Taşıyan Hammaddelerin Alüminyum Metal, Diğer Metaller ve Bileşiklerinin Üretiminde Değerlendirilmesi*" projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. ERAMIN III çerçevesinde yapılan bu çalışmanın tüm proje çalışanlarına katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

Bu tez, MYL-2023-44673 numaralı proje kapsamında İTÜ Bap tarafından desteklenmiştir.

Mayıs 2024

Hasan GÜNEY



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
SEMBOLLER .....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ALÜMİNYUM .....</b>	<b>3</b>
2.1 Alüminyumun Özellikleri .....	4
2.2 Alüminyum Kullanım Alanları .....	5
2.3 Alüminyumun Tarihçesi.....	8
2.3.1 Kimyasal yöntemle üretilen alüminyum .....	9
2.3.2 Elektrokimyasal yöntemle üretilen alüminyum .....	10
2.4 Alüminyum Üretim Miktarı ve Tüketim Değerleri.....	11
<b>3. ALÜMİNYUM ÜRETİMİ .....</b>	<b>15</b>
3.1 Birincil Alüminyum Üretimi.....	17
3.2 İkincil Alüminyum Üretimi.....	21
<b>4. ALÜMİNYUM DROS .....</b>	<b>25</b>
4.1 Dros Oluşum Adımları .....	26
4.2 Beyaz ve Siyah Dros .....	30
<b>5. ALÜMİNA .....</b>	<b>33</b>
5.1 Ergimiş Alümina .....	33
5.2 Kahverengi Ergimiş Alümina .....	35
5.3 Beyaz Ergimiş Alümina .....	37
5.4 Pembe ve Yakut Ergimiş Alümina.....	40
5.5 Elektrik Ark Fırınında Ergimiş Alümina Üretimi .....	42
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>45</b>
6.1 Deneylerde Kullanılan Hammaddeler .....	49
6.2 Deneylerin Yapılışı .....	52
6.2.1 Metalik kısımdan alüminyum eldesi .....	52
6.2.2 Metalik olmayan kalıntıdan (MOK) ergimiş alümina üretimi .....	54
6.3 Deneysel Sonuçları .....	68
6.3.1 Metalik Kısımdan Alüminyum Eldesi .....	68
6.3.2 Metalik olmayan kalıntıdan ergimiş alümina üretimi .....	71
<b>7. SONUÇLAR .....</b>	<b>83</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>89</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>93</b>



## **KISALTMALAR**

<b>A</b>	: Amper
<b>AC</b>	: Alternatif Akım
<b>DC</b>	: Doğru Akım
<b>EAF</b>	: Elektrik Ark Fırını
<b>g</b>	: Gram
<b>ITU</b>	: İstanbul Teknik Üniversitesi
<b>J</b>	: Joule
<b>K</b>	: Kelvin
<b>KEA</b>	: Kahverengi Ergimiş Alümina
<b>kVA</b>	: Kilo-Volt-Amper
<b>kWh</b>	: Kilowatt saat
<b>MTA</b>	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
<b>Pa</b>	: Pascal
<b>UHP</b>	: Ultra Yüksek Performans
<b>V</b>	: Volt
<b>W</b>	: Watt
<b>XRD</b>	: X-ışını Difraksiyonu
<b>XRF</b>	: X-ışını Floresansı



## SEMBOLLER

$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat Derece
<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>Al(OH)<sub>3</sub></b>	: Alüminyum Hidroksit
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alümina
<b>Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub></b>	: Alüminyum Karbür
<b>AlN</b>	: Alüminyum Nitrür
<b>C</b>	: Karbon
<b>CaO</b>	: Kalsiyum Oksit
<b>CH<sub>4</sub></b>	: Metan
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Krom (III) Oksit
<b>H<sub>2</sub></b>	: Hidrojen
<b>H<sub>2</sub>S</b>	: Hidrojen Sülfür
<b>KCl</b>	: Potasyum Klorür
<b>MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub></b>	: Magnezyum alüminat
<b>MgO</b>	: Magnezyum Oksit
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	: Sodyum Oksit
<b>NaCl</b>	: Sodyum Klorür
<b>NH<sub>3</sub></b>	: Amonyak
<b>PH<sub>3</sub></b>	: Fosfin
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Silisyum dioksit
<b>TiO<sub>2</sub></b>	: Titanyum dioksit
<b><math>\alpha</math></b>	: Alfa
<b><math>\gamma</math></b>	: Gama
<b><math>\theta</math></b>	: Teta
<b><math>\Delta G</math></b>	: Gibbs Serbest Enerjisi



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Alüminyumun fiziksel ve kimyasal özellikleri. ....	5
Çizelge 2.2 : 2022 yılı bölgelere göre alümina (bin metrik ton). ....	11
Çizelge 2.3 : 2016-2022 yılları arası alümina üretimi (milyon metrik ton).....	11
Çizelge 2.4 : 2023 yılı için birincil alüminyum üretimi bölgesel dağılımı (bin metrik ton). ....	12
Çizelge 2.5 : Birincil ve ikincil alüminyum üretim süreçlerinin karşılaştırılması....	13
Çizelge 2.6 : 2022 yılı için alüminyum sektöründeki CO <sub>2</sub> salınımı (milyon ton). ....	14
Çizelge 3.1 : EMF Serisi.....	15
Çizelge 3.2 : Gibbsite, Boehmite ve Diasporun karşılaştırılması.....	18
Çizelge 4.1 : Dros üretimi ve geri kazanım sayıları tahmini (metrik ton). ....	28
Çizelge 4.2 : Beyaz dros: Alüminyum metal içeriği.....	30
Çizelge 4.3 : Siyah dros: Alüminyum metal içeriği. ....	31
Çizelge 5.1 : Alüminanın mekanik özellikleri @20°C.....	33
Çizelge 5.2 : Farklı ergimiş alümina türlerinin enerji gereksinimleri ve fırın verimleri. ....	35
Çizelge 5.3 : Kahverengi ergimiş alümina kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri...	37
Çizelge 5.4 : Beyaz ergimiş alümina kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri. ....	39
Çizelge 5.5 : Pembe ergimiş alümina kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri. ....	41
Çizelge 5.6 : Yakut ergimiş alümina kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri. ....	41
Çizelge 5.7 : Ferro-Silisyum içeriğine göre curuftaki alümina içeriği (ağırlıkça %).	42
Çizelge 6.1 : Beyaz drosun kimyasal analizi (ağırlıkça %). ....	49
Çizelge 6.2 : Metalik olmayan kalıntının kimyasal analizi (ağırlıkça %). ....	50
Çizelge 6.3 : Kalsine edilmiş metalik olmayan kalıntının kimyasal analizi (1100 °C – 4 saat) (ağırlıkça %). ....	50
Çizelge 6.4 : Metalik kısım kimyasal analizi (ağırlıkça %).....	50
Çizelge 6.5 : Metalik olmayan kalıntı ve metalik kısım XRD analiz ve Rietvelt hesaplama sonuçları. ....	51
Çizelge 6.6 : Metalik kısmı ergitme için kullanılan flaksın kimyasal analizi.(ağırlıkça, %). ....	53
Çizelge 6.7 : Elektroliz kalite alüminanın kimyasal analizi (ağırlıkça,%). ....	54
Çizelge 6.8 : Elektroliz kalite alümina numunelerinin XRD Rietveld analizi ....	55
Çizelge 6.9 : Reflot örneklerinin XRD analizi ile Ritvelt belirlenen fazları. ....	56
Çizelge 6.10 : Reflot SP 400 beyaz ergimiş alümina kimyasal analizi (ağırlıkça%).	56
Çizelge 6.11 : Reflot SP 1200 beyaz ergimiş alümina kimyasal analizi (ağırlıkça%). ....	56
Çizelge 6.12 : Deney 1’de kullanılan elektrotun boyutları.....	60
Çizelge 6.13 : Deney 1 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ve sıcaklık ölçümü. ....	60
Çizelge 6.14 : Deney 2’de kullanılan elektrotun boyutları.....	61
Çizelge 6.15 : Deney 2 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ve sıcaklık ölçümü. ....	61

<b>Çizelge 6.16</b> : Deney 3’de kullanılan elektrotun boyutları.....	<b>61</b>
<b>Çizelge 6.17</b> : Deney 3 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ve sıcaklık ölçümü.....	<b>62</b>
<b>Çizelge 6.18</b> : Deney 4 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ölçümü.....	<b>63</b>
<b>Çizelge 6.19</b> : Kalsinasyon değerleri (850°C, 5 sa).....	<b>64</b>
<b>Çizelge 6.20</b> : Deney 5 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ve sıcaklık ölçümü.....	<b>64</b>
<b>Çizelge 6.21</b> : Deney 6 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ölçümü.....	<b>65</b>
<b>Çizelge 6.22</b> : EAF 7 Deneyi için kalsine edilen metalik olmayan kalıntı kısmın kimyasal analizi (ağırlıkça, %). .....	<b>66</b>
<b>Çizelge 6.23</b> : Deney 7 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ve sıcaklık ölçümü.....	<b>67</b>
<b>Çizelge 6.24</b> : Deney 8 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ve sıcaklık ölçümü.....	<b>68</b>
<b>Çizelge 6.25</b> : Beyaz drosdan mekanik yöntemler ile ayrılan alüminyumca zengin kısmın (Al <sub>Dros</sub> ) alüminyum alaşım elde etmek amacıyla yapılan ergitme işlemi başlangıç ve ürün verileri. ....	<b>69</b>
<b>Çizelge 6.26</b> : Elde edilen metallerin kimyasal analiz sonuçları (ağırlıkça, %). .....	<b>69</b>
<b>Çizelge 6.27</b> : Deney 1’in kimyasal analizi. birinci bölge. ....	<b>72</b>
<b>Çizelge 6.28</b> : Deney 1’in kimyasal analizi. ikinci bölge.....	<b>72</b>
<b>Çizelge 6.29</b> : Deney 1’in kimyasal analizi. üçüncü bölge. ....	<b>72</b>
<b>Çizelge 6.30</b> : Deney 2’nin kimyasal analizi. birinci bölge. ....	<b>73</b>
<b>Çizelge 6.31</b> : Deney 2’nin kimyasal analizi. ikinci bölge.....	<b>73</b>
<b>Çizelge 6.32</b> : Deney 2’nin kimyasal analizi. üçüncü bölge. ....	<b>74</b>
<b>Çizelge 6.33</b> : Deney 3’ün kimyasal analizi. birinci bölge.....	<b>75</b>
<b>Çizelge 6.34</b> : Deney 3’ün kimyasal analizi. ikinci bölge.....	<b>75</b>
<b>Çizelge 6.35</b> : Deney 3’ün kimyasal analizi. üçüncü bölge. ....	<b>75</b>
<b>Çizelge 6.36</b> : EAF 3 deney ürünlerinin tekrar edilen kimyasal analizi. ....	<b>75</b>
<b>Çizelge 6.37</b> : Deney 4’ün farklı bölgelerdeki kimyasal analizi. ....	<b>76</b>
<b>Çizelge 6.38</b> : Deney 5’in farklı bölgelerdeki kimyasal analizi. ....	<b>77</b>
<b>Çizelge 6.39</b> : Deney 6’nın farklı bölgelerdeki kimyasal analizi. ....	<b>78</b>
<b>Çizelge 6.40</b> : Deney 7’nin farklı bölgelerdeki kimyasal analizi .....	<b>79</b>
<b>Çizelge 6.41</b> : Deney 8’in farklı bölgelerdeki kimyasal analizi. ....	<b>80</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Alüminyum kullanım alanları dağılımı . . . . .	6
Şekil 2.2 : Dünya alümina üretim miktarı ve 2019 yılına göre bölgesel dağılımı ....	11
Şekil 2.3 : 2023 yılı için birincil alüminyum üretimi harita üzerinden bölgesel dağılımı . . . . .	12
Şekil 2.4 : 2016-2023 yılları birincil alüminyum üretim miktarları (bin metrik ton) . . . . .	13
Şekil 3.1 : Ellingham diyagramı . . . . .	16
Şekil 3.2 : Birincil alüminyum üretimi akış şeması . . . . .	17
Şekil 3.3 : Boksit madenciliği adımları . . . . .	18
Şekil 3.4 : Bayer prosesi adımları . . . . .	19
Şekil 3.5 : Hall-Heroult elektroliz hücresi . . . . .	21
Şekil 3.6 : İkincil alüminyum üretim süreci akış şeması . . . . .	21
Şekil 3.7 : Alüminyum üretiminde kütle akış şeması . . . . .	22
Şekil 4.1 : Dros oluşum aşamalarının gösterimi . . . . .	26
Şekil 4.2 : Dros soğutmanın şematik gösterimi . . . . .	27
Şekil 4.3 : Drosun üretim sektörüne göre yüzdesi . . . . .	28
Şekil 4.4 : Drosun bölgelere göre yüzdesi . . . . .	28
Şekil 4.5 : Alüminyum üretiminden kaynaklanan atık ürünler şunları içerir: (a) beyaz dros; (b) siyah dros; (c) tuz keki; ve (d) torba tozu . . . . .	29
Şekil 4.6 : Beyaz dros . . . . .	31
Şekil 4.7 : Siyah dros . . . . .	32
Şekil 5.1 : Kahverengi ergimiş alümina . . . . .	37
Şekil 5.2 : Beyaz ergimiş alümina. . . . .	39
Şekil 5.3 : Beyaz ergimiş alümina basitleştirilmiş akış şeması . . . . .	40
Şekil 5.4 : Pembe ergimiş alümina. . . . .	40
Şekil 6.1 : Dros işleminin endüstriyel akış şeması. . . . .	46
Şekil 6.2 : Bilyalı öğütücü. . . . .	46
Şekil 6.3 : Manyetik ayırıcı. . . . .	47
Şekil 6.4 : Torbalı filtre. . . . .	47
Şekil 6.5 : Metalik olmayan kalıntı. . . . .	47
Şekil 6.6 : Metalik kısım. . . . .	48
Şekil 6.7 : Bu projenin akış şeması. . . . .	48
Şekil 6.8 : Beyaz drosun XRD analizi. . . . .	49
Şekil 6.9 : Metalik olmayan kalıntı XRD analizi. . . . .	50
Şekil 6.10 : Metalik kısım XRD analizi. . . . .	51
Şekil 6.11 : Kalsine edilmiş metalik olmayan kalıntının XRD analiz sonuçları. (1100° - 4 saat). . . . .	52
Şekil 6.12 : İndüksiyon fırını ve içerisinde ergitmenin yapıldığı F9 potası. . . . .	53
Şekil 6.13 : Deney sonucunda elde edilen ergiyik fazın dökümü. . . . .	54
Şekil 6.14 : Elektroliz kalite alüminanın XRD analizi. . . . .	55
Şekil 6.15 : Reflot SP 400 beyaz ergimiş alümina XRD analizi. . . . .	55

<b>Şekil 6.16</b> : Reflot SP 1200 beyaz ergimiş alümina XRD analizi. ....	<b>56</b>
<b>Şekil 6.17</b> : (a) Laboratuvar boyutunda 270 kVA DA EAF'nin yerleşim planı ve (b) şematik görünümü. ....	<b>57</b>
<b>Şekil 6.18</b> : UHP Grafit (a) alındığı haliyle elektrot, (b) kesme ve dilimleme işlemlerinden sonra, (c) tornalama işlemlerinden sonra ve (d) son işlemden sonra. ....	<b>57</b>
<b>Şekil 6.19</b> : Çelik fabrikasından temin edilen elektrot bloğunun yeniden şekillendirilmesi için hazırlanan teknik resim. ....	<b>58</b>
<b>Şekil 6.20</b> : Elektroliz kalite alüminadan elde edilen ergimiş alümina üstten ve yandan görselleri (Deney 3). ....	<b>58</b>
<b>Şekil 6.21</b> : Numune alma noktalarının şematik görünümü. ....	<b>59</b>
<b>Şekil 6.22</b> : Elektroliz kalite alüminanın elektrik ark fırınında ergitme işlemi. ....	<b>59</b>
<b>Şekil 6.23</b> : Deney 4'ten elektrik ark fırını görüntüleri. ....	<b>62</b>
<b>Şekil 6.24</b> : Deney 5'ten elektrik ark fırını görüntüsü. ....	<b>63</b>
<b>Şekil 6.25</b> : Deney 6'dan elektrik ark ocağı görüntüleri. ....	<b>65</b>
<b>Şekil 6.26</b> : Deney 7'den görüntüler. ....	<b>66</b>
<b>Şekil 6.27</b> : Al <sub>Dros</sub> deney 1 ve 2 ürünleri. ....	<b>70</b>
<b>Şekil 6.28</b> : Al <sub>Dros</sub> deney 3, 4 ve 5 ürünleri. ....	<b>71</b>
<b>Şekil 6.29</b> : Al <sub>Dros</sub> deney 6, 7 ve 8 ürünleri. ....	<b>71</b>
<b>Şekil 6.30</b> : Al <sub>Dros</sub> deney 9, 10 ve 11 ürünleri. ....	<b>71</b>
<b>Şekil 6.31</b> : Al <sub>Dros</sub> deney 12, 13 ve 14 ürünleri. ....	<b>71</b>
<b>Şekil 6.32</b> : Deney 1'in ürünü. ....	<b>72</b>
<b>Şekil 6.33</b> : Deney 1'in farklı bölgelerdeki XRD analizi. ....	<b>73</b>
<b>Şekil 6.34</b> : Deney 2'nin ürünü. ....	<b>73</b>
<b>Şekil 6.35</b> : Deney 2'nin farklı bölgelerdeki XRD analizi. ....	<b>74</b>
<b>Şekil 6.36</b> : Deney 3'de elde edilen ergimiş alümina. ....	<b>74</b>
<b>Şekil 6.37</b> : Deney 3'ün farklı bölgelerdeki XRD analizi. ....	<b>75</b>
<b>Şekil 6.38</b> : Deney 4 üretilmiş ergimiş alümina. ....	<b>76</b>
<b>Şekil 6.39</b> : Deney 4'ün farklı bölgelerdeki XRD analizi. ....	<b>76</b>
<b>Şekil 6.40</b> : Deney 5 üretilen ergimiş alümina. ....	<b>77</b>
<b>Şekil 6.41</b> : Deney 5'in farklı bölgelerdeki XRD analizi. ....	<b>78</b>
<b>Şekil 6.42</b> : Deney 6 üretilen ergimiş alümina. ....	<b>78</b>
<b>Şekil 6.43</b> : Deney 6'nın farklı bölgelerdeki XRD analizi. ....	<b>79</b>
<b>Şekil 6.44</b> : Deney 7'de üretilen ergimiş alümina. ....	<b>79</b>
<b>Şekil 6.45</b> : Deney 7'nin farklı bölgelerdeki XRD analizi. ....	<b>80</b>
<b>Şekil 6.46</b> : Deney 8 üretilen ergimiş alümina. ....	<b>80</b>
<b>Şekil 6.47</b> : Deney 8'in farklı bölgelerdeki XRD analizi. ....	<b>81</b>
<b>Şekil 6.48</b> : Üretilen ürünlerin yoğunluk karşılaştırılması. ....	<b>81</b>
<b>Şekil 6.49</b> : Üretilen ürünlerin sertlik karşılaştırılması. ....	<b>82</b>

## ALÜMİNYUM BEYAZ DROSLARININ PİROMETALURJİK DEĞERLENDİRİLMESİ

### ÖZET

Dünyada artan alüminyum üretimiyle birlikte ergitme işleminde ortaya çıkan alüminyum dros miktarı da artmaktadır. Ortaya çıkan drosler içerdiği metalik alüminyum miktarına göre siyah ve beyaz dros olarak ayrılmaktadır. Hem içerdiği yüksek alüminyum metal oranı hem de üretim miktarı daha yüksek olan beyaz drosun geri dönüşüme kazandırılması yüksek önem arz etmektedir. Normal şartlarda mekanik yöntemlerle iki farklı kısma ayrılan beyaz dros, metalik alüminyumca zengin kısmı geri dönüşüm ile değerlendirilirken, metalik olmayan kalıntı ise atık depolama sahalarında gömülerek bertaraf edilmektedir. Metalik olmayan kalıntı içerdiği bileşiklerden dolayı depolandığı alanda çevreye olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Bu çalışmada ise beyaz drosun tamamıyla geri dönüşüme katılması için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk deney grubunda iki farklı flaks kullanımı ile indüksiyon fırınında farklı sıcaklık ve sürelerde ergitme yöntemi ile alüminyum alaşım külçesi üretimi yapılmıştır. Üretilen alüminyum külçelere yapılan kimyasal analizler yardımı ile kütle denklik hesabı yapılarak alüminyum geri kazanım verimi hesaplanmıştır. Belirlenen optimum şartlar ile %98,36 safiyette alüminyum külçe üretimi, %85,81 oranında alüminyum kazanım verimi ile gerçekleştirilmiştir. İkinci deney setinde ise beyaz drosun metalik olmayan kalıntı kısmı, atık gömme alanlarında bertaraf edilmek yerine içerdiği yüksek alüminyum oksit içeriği sebebiyle bir hammadde olarak kullanılmış ve tekno-ekonomik değeri olan ergimiş alümina dönüştürülmüştür. Elektrik ark fırınında ergimiş alümina üretimi sırasında hammadde olarak kullanılan boksit alternatif olarak metalik olmayan kalıntı kısmı kullanılmıştır. Deneylerde 270 kVA DC gücündeki laboratuvar tipi elektrik ark fırınında hammadde olarak ilk elektroliz kalite alümina kullanılarak, ergimiş alümina eldesi için bilgi ve tecrübe biriktirilmiş, fırın konfigürasyonları yapılmıştır. Daha sonra metalik olmayan kalıntı kısmı hammadde olarak kullanılmış ve farklı parametreler ile ergimiş alümina üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ürünlere kimyasal analiz, XRD analizi, yoğunluk ve sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçta standartlara uygun ergimiş alümina üretimi yapılabildiği belirlenmiştir.

İlk deney grubunda hali hazırda küçük geri dönüşüm işletmelerinde ilkel yöntemler ile işlenen metalik alüminyumca zengin kısım, yüksek safiyette ve yüksek kazanım verimleri ile ergitilerek ingot halinde döküm için çalışmalar yapılmıştır.



## **PYROMETALLURGICAL EVALUATION OF ALUMINUM WHITE DROSS**

### **SUMMARY**

With the increasing production of aluminum worldwide, the amount of aluminum dross generated during the production process is also significantly increasing. Aluminum dross is categorized into black and white dross based on the metallic aluminum content. White dross (or wet dross) occurs in primary aluminium production. White dross has a high concentration of metals and lesser amounts of salts and oxides. The metallic aluminium content can range from 20% to 80%. It occurs as compact material in large pieces or blocks. White dross is ground and sieved to separate the metallic aluminium from the oxides and iron impurities. White dross is considered a valuable material because the metallic aluminium can be recovered and the oxides can be used to make other refractory materials. Black dross (or dry dross) derives its name from its dark characteristic colour. It has a granular structure with a low metal content and a high salt and oxide concentration. Black dross is generated during aluminium recycling and, depending on the recycled scrap and processing conditions, the recoverable aluminium content is typically between 5% and 25%. Black dross mainly consists of metallic aluminium, aluminium nitride, alumina, sodium chloride, potassium chloride and silica.

White dross is particularly important for recycling due to its high metallic aluminum content and larger production quantities. Typically, white dross is mechanically separated into two parts: the part rich in metallic aluminum is recycled, while the non-metallic residue is disposed of in landfills. However, the non-metallic residue contains compounds that can have negative environmental impacts. This situation can lead to serious environmental and economic issues, such as soil and water contamination, which can harm local ecosystems and human health.

In this study, two different experimental sets were prepared to fully recycle white dross. The first experimental set focused on the evaluation of the part rich in metallic aluminum, which is also used in the industry. In the first experimental set, aluminum alloy ingots were produced by melting with different parameters in an induction furnace using two different salt methods. The salts and melting parameters used in this process are crucial for the quality and efficiency of the produced product. For instance, the type of salt and the temperature at which melting occurs can significantly influence the purity and yield of the aluminum ingots. Chemical analysis was performed on the produced ingots, and the aluminum recovery efficiency was calculated using mass balance calculations. These chemical analyses play a critical role in determining the purity of the obtained aluminum alloys and the proportions of other elements present. High-purity aluminum ingots are essential for various industrial applications, including the manufacturing of electronics, automotive parts, and aerospace components. As a result, an ingot containing 98.36% aluminum was produced, and an aluminum recovery rate of 85.81% was achieved from the waste raw material. This high recovery rate demonstrates the efficiency and economic viability of the process,

indicating that a significant portion of the aluminum contained in the dross can be successfully recovered and reused.

In the second experimental set, the non-metallic residue of white dross was evaluated. Due to its high aluminum oxide content, this residue was used as a raw material to produce fused alumina. During this process, which was carried out in an electric arc furnace, the non-metallic residue was used as an alternative to bauxite. This method contributes to environmental sustainability by reducing the use of natural resources like bauxite, which is a primary ore of aluminum. Bauxite mining can have severe environmental impacts, including deforestation, habitat destruction, and water pollution. By using the non-metallic residue of white dross as a substitute, these negative effects can be mitigated. In the experiments conducted in a 270 kVA DC laboratory-type electric arc furnace, initially, electrolysis-grade alumina was used to gain knowledge and experience, and furnace configurations were made. Proper furnace configurations are essential for optimizing the melting process, ensuring uniform heating, and achieving the desired chemical composition in the final product. Subsequently, the non-metallic residue was used as a raw material, and fused alumina was produced with different parameters. The obtained products were subjected to chemical analysis, XRD analysis, density, and hardness tests. These analyses are important for evaluating the quality and industrial potential of the produced alumina. High-quality fused alumina is used in various applications, including refractory materials, abrasives, and ceramics, highlighting the industrial value of recycling non-metallic residues.

As a result, the experimental studies showed that both the part of white dross rich in metallic aluminum and the non-metallic residue can be recycled. This process offers significant economic and environmental benefits. Recycling white dross not only recovers valuable aluminum metal but also prevents the disposal of environmentally harmful waste. This is crucial for sustainable industrial practice and helps make aluminum production processes more environmentally friendly and efficient. Additionally, these recycling methods provide innovative solutions in industrial waste management, contributing to waste minimization and resource efficiency goals. Effective waste management is essential for industries to reduce their environmental footprint and comply with increasingly stringent environmental regulations.

Studies on the recycling of white dross can be integrated into industrial applications and applied on a large scale. These applications can be standardized in aluminum production facilities, creating a model for large-scale recycling projects. Furthermore, such recycling projects can improve waste management strategies, contribute to the conservation of natural resources, and ensure environmental sustainability. These processes not only provide economic benefits but also play an important role in fulfilling social and environmental responsibilities. Industries that adopt sustainable practices can enhance their reputation, meet the expectations of environmentally conscious consumers, and gain a competitive advantage in the market.

In summary, the recycling of white dross presents a significant opportunity for the aluminum industry both economically and environmentally. This process not only conserves valuable resources but also reduces the environmental impact of industrial waste, taking an important step towards a more sustainable future. Effective recycling of white dross contributes to the proliferation of innovative and environmentally friendly practices in aluminum production, enhancing the overall performance and sustainability of the industry. The findings of this study form an important basis for

the development and application of recycling technologies. By demonstrating the feasibility and benefits of recycling aluminum dross, this research encourages further investment and innovation in recycling technologies, ultimately leading to more sustainable industrial practices and a reduction in the environmental impact of aluminum production. The advancement of recycling technologies will ensure the efficient use of resources and the spread of environmentally friendly production processes. This will be a critical step for the future growth and development strategies of the aluminum industry, contributing to both economic and environmental sustainability in the long term.





## 1. GİRİŞ

Alüminyum, teknolojik imkanlar sebebiyle ancak 19. Yüzyılda endüstriyelleşmesine rağmen şu anda dünyada en çok üretilen ikinci metaldir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde pek çok farklı alanda kullanım için tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Alüminyum ve alaşımları yüksek mukavemet/yoğunluk oranına sahip ve korozyona karşı yüksek direnç göstermesi gibi özellikleri sayesinde pek çok alanda çelik ve alaşımlarının yerini almayı başarmıştır.

Her geçen gün dünyada artan alüminyum üretimi, yanında bazı sorunları da beraberinde getirmiştir. Birincil alüminyum üretimindeki yüksek enerji gereksinimi ve üretim maliyetlerinin yanında hammadde olarak kullanılan boksit kritik hammaddeler listesine girmiştir. Bu sebeplerden dolayı alüminyum geri dönüşümü çok önemli bir mühendislik konusu haline gelmiştir.

Üretim sırasında açığa çıkan dros, daha önceleri atık olarak değerlerilse de günümüzde geri dönüşümün bir parçası haline gelmiştir. Dros, alüminyumun ergitme işlemleri sırasında oksijen ile temasından dolayı banyo yüzeyinde oluşan ve yüksek miktarda metalik alüminyum barındıran bir atık malzemedir. İçerdiği önemli miktarda ki alüminyum sebebiyle geri kazanım konusunda önemli bir hammadde görevi görmektedir.

Dros içerdiği alüminyum miktarına göre beyaz ve siyah dros olmak üzere iki grupta sınıflandırılmıştır. Siyah dros %25'e kadar alüminyum içerirken bu oran beyaz drosta %45'lere kadar yükselmektedir. Endüstriyel olarak droslardaki metalik alüminyumun geri kazanılmasına yönelik uygulamalar vardır. En çok uygulanan yöntem öğütme ve boyutuna göre ayırma işlemidir. Bilyalı değirmenlerde öğütülen drosların yapısında bulunan metalik kısım yassılaşıarak değirmen tabanında birikirken, daha çok oksitlerden oluşan ve öğütme ile ince toz haline gelen kısım ise bir fan vasıtasıyla uygulanan emiş ile çekilerek torbalı filtrelerde toplanmaktadır. Değirmen tabanından alınan iri taneli metalik kısım, çeşili ergitme yöntemleri ile ergitilerek ingot halinde dökülmekte ve endüstrinin kullanımına sunulmaktadır. Filtrelerde toplanan metalik

olmayan kalıntı kısmı ise atık olarak nitelendirilmekte ve gömülerek bertaraf etmek üzere atık gömme sahalarına gönderilmektedir.

Atık malzemeler gömme sahalarında su, toprak ve hava kirliliğine sebep olmaktadır. Alüminyum drosunun yer altı suları ile teması sonucunda  $NH_3$ ,  $PH_3$ ,  $H_2S$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$  vb. gibi toksik ve patlayıcı gazlar ortaya çıkartmakta, bulunduğu bölgedeki toprağın pH seviyesinin değişikliğine sebep olarak bölgedeki canlı yaşamını etkilemektedir.

Bu tez çalışmasında alüminyum alaşımlarının ergitilmesi sırasında açığa çıkan ve dros adı verilen ergirme atıklarının hem atık minimizasyonu hemde döngüsel ekonomi kavramlarına uygun olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Günümüzde halen geleneksel yöntemler ile sadece içerdiği metalik kısmını kurtarmak amacıyla ölçme ve değerlendirme kriterlerinden uzak şekilde işlenen drosların, sıfır atık hedefine uygun olarak geri dönüştürülmesi ve yeni ürünlerin üretim koşullarının belirlenmesi bu tez çalışmasının amacını oluşturmuştur. Bu amaca uygun olarak tez çalışması için hammadde olarak seçilen beyaz droslardan hem metalik kısmın yüksek saflık ve yüksek kaanım verimi ile üretimi, hem de metalik olmayan kalıntı kısımların gömülerek bertarafını önlemek için egimiş alümina gibi tekno-ekonomik değeri yüksek yeni ürünlere dönüştürülmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır.

## 2. ALÜMİNYUM

Dünyada en çok bulunan ikinci metalik element alüminyumdur. Alüminyum, 19. yüzyılın sonlarında rekabetçi bir mühendislik konusu haline gelmiştir. Daha önce kullanılmamasının nedeni ise alüminyumun cevherinden elde edilmesinin o dönemki teknolojik şartlarından kaynaklı zorluğudur [1].

Alüminyum ve alaşımları, çok sünek ambalaj tabakalarından en zor teknik uygulamalara kadar çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. En versatil malzemelerden birisi alüminyum ve alaşımlarıdır. Yapısal metaller açısından, alüminyum alaşımları kullanım açısından çelikten sonra ikinci sıradadır [2].

Alüminyumun yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$  olup çeliğin yaklaşık üçte biri kadardır ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ). Bu düşük ağırlığın belirli alüminyum alaşımlarının yüksek mukavemetiyle (yapısal çelikten daha mükemmel) birleştirilmesi, özellikle uzay araçları, uçaklar ve birçok kara ve deniz aracı gibi hareketli nesnelere için yararlı olan sağlam, hafif yapılar oluşturmayı mümkün kılar [3].

Çeliğin paslanmasına neden olan oksidasyon türü alüminyuma zarar veremez. Oksijen açıkta kalan metal yüzeyle etkileşime girdiğinde yaklaşık bir inçin on milyonda biri kalınlığında bir alüminyum oksit tabakası oluşur ve metalin daha fazla oksitlenmesini önler. Demir üzerinde oluşan pasın aksine, alüminyum oksit tabakası soyularak oksitlenebilecek yeni bir yüzey ortaya çıkarmaz. Pilling-Bedworth oranı (P-B oranı), bir metal oksitin kristal yapısının hacminin, ilgili metalin (oksidin oluşturulduğu) kristal yapısının hacmine oranıdır.

P-B oranına dayanarak, metalin kuru havada koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak pasifleşip pasifleşmeyeceğine karar verilebilir. Oranın 1'den az olması halinde oksit tabakası korumasız olacaktır çünkü metal yüzeyinde oluşan film gözenekli ve/veya çatlaktır. Tersine, oranı 1'den yüksek olan metaller koruyucu olma eğilimindedir çünkü havanın metali daha fazla oksitlemesini önleyen etkili bir bariyer oluştururlar. Ancak oran 2'den yüksek olduğunda oksit kaplama parçalanır ve hiçbir koruyucu etki

sağlamaz. Alüminyum'un P-B oranı 1,28 ile P-B oranı 2,14 olan demire karşı paslanmaya, korozyona ve dökülmeye karşı çok daha dayanıklıdır [4].

Alüminyum, alaşımlandığında ve doğru kullanıldığında, çok çeşitli fizikokimyasal ve kimyasal ajanlara ek olarak tuz, su ve diğer birçok çevresel faktörden kaynaklanan korozyona dayanabilir. Alüminyum çok yansıtıcı olabilir. Özellikle alüminyumun elektroliz yöntem ile oksidasyonu sağlanarak, hem korozyon direncini arttırmak hem de fonksiyonel özellik kazandırabilmek için eloksal kaplama diye isimlendirilen işlem yapılmaktadır. Eloksallı ve koyu eloksallı yüzeyler ışığı, elektromanyetik dalgaları, radyan ısıyı ve radyan enerjiyi emebilse veya yansıtılabilsede radyan enerjiyi yansıtımda daha etkilidirler. Geniş bir dalga boyu aralığında yüksek oranda yansıtıcı olduğundan, parlatılmış alüminyum çeşitli işlevsel uygulamalar için de uygundur.

## 2.1 Alüminyumun Özellikleri

Alüminyum, aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda ve endüstriyel süreçlerde yaygın olarak kullanılmasına yol açan çeşitli benzersiz niteliklere sahiptir:

- Çelikten daha düşük yoğunluğu nedeniyle alüminyum hafif bir metaldir.
- Alüminyumdan yapılan alaşımlar büyük bir mukavemet/yoğunluk oranına sahiptir.
- Düşük sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilmesi nedeniyle alüminyum soğutma uygulamalarında sıklıkla kullanılır.
- Alüminyum, tipik çalışma koşulları altında yüksek aşınma direncine sahiptir ve komşu yüzeyleri lekeleyen veya temas ettiği şeyleri kirleten renkli tuzlar geliştirmez.
- Alüminyum yüksek derecede yansıtma özelliğine sahiptir ve güçlü bir ısı ve elektrik iletkenidir.
- Ferromanyetizmasının olmaması nedeniyle alüminyum, elektrik, elektronik sektörlerinde kullanmak için iyi bir malzemedir.
- Piroforik davranış göstermediğinden, yanıcı veya patlayıcı maddelerin manipülasyonunu veya bunlarla teması içeren uygulamalar için değerli bir malzemedir.

- Alüminyum insan tüketimi için güvenlidir ve bu nedenle genellikle yiyecek ve içecek ambalajlarında kullanılır. Parlak ve pürüzsüz veya parlak ve ışıltılı görünebilen alüminyumun doğal yüzeyi estetik açıdan göze hoş gelmektedir.
- Alüminyum geri dönüştürülebilir bir malzemedir. Alüminyum için geri dönüşüm pazarı iyi kurulmuştur ve yüksek bir hurda değerine sahiptir, bu da çevresel ve ekonomik avantajlar sağlar.
- Alüminyumun şekillendirilmesi ve üretilmesi için tüm geleneksel metal işleme ve birleştirme prosedürleri kullanılabilir.

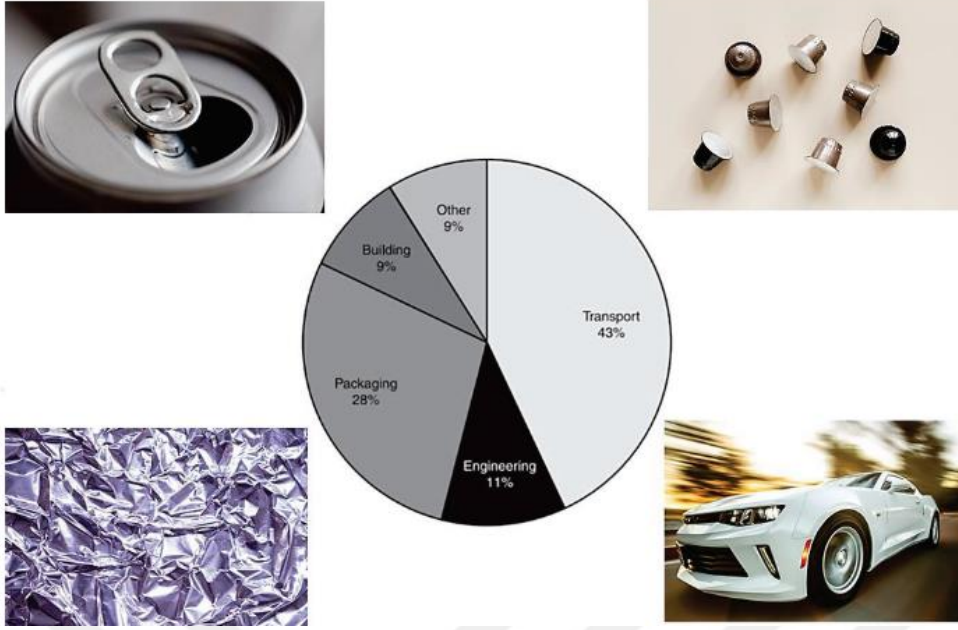
**Çizelge 2.1 : Alüminyumun fiziksel ve kimyasal özellikleri [5].**

Özellikler	Değer	Birim
Yoğunluk	2,7	g/cm <sup>3</sup> (25 °C'de)
Sıvı haldeki yoğunluk	2,3	g/cm <sup>3</sup> (660,32 °C'de)
Ergime noktası	933	K (660,32 °C)
Kaynama noktası	2792	K (2518,85 °C)
Ergime ısısı	10,7	kJ/mol
Buharlaştırma ısısı	294	kJ/mol
Isı kapasitesi	24,2	J/(mol.K)
Elektrik direnci	26,5	nΩ.m (25 °C'de)
Isıl direnci	237	W/(m.K)
Isıl genişleme	23,1	µm/(m.K) (25 °C'de)
Elastik Modülü	70	GPa (20 °C'de)
Çekme Mukavemeti	90	MPa (20 °C'de)

## 2.2 Alüminyum Kullanım Alanları

Alüminyum, yer kabuğunda en bol bulunan metaldir (%8,1). Geniş bir kullanım alanına sahip olan alüminyum, benzersiz özellikleri nedeniyle enerji hatlarında, binalarda, pencere çerçevelerinde, elektronikte, ev ve endüstriyel cihazlarda, uçaklarda, uzay araçlarında, gemilerde ve otomotivde kullanılabilir.

Alüminyumun kullanım alanlarının dağılımı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Ulaştırma ve ambalaj sektörleri kullanım alanları içinde en yüksek paya sahiptir [6].



Şekil 2.1 : Alüminyum kullanım alanları dağılımı [6].

### **Enerji hatları**

Alüminyum, elektrik uygulamalarında en sık kullanılan malzemelerden biri olan bakırdan daha iyi bir iletkenlik / ağırlık oranına sahiptir. Alüminyum bakırdan %30 daha hafif olduğu için, aynı elektrik direncine sahip çıplak bir tel yarı ağırlığındadır. Alüminyum ayrıca bakırdan daha ucuzdur, bu da onu ekonomik açıdan daha cazip hale getirir [7].

### **İnşaat**

Alüminyum, işlenebilirliği, mukavemeti ve çok yönlülüğü nedeniyle yüksek yapılarda ve gökdelenlerde kullanılan değerli bir malzemedir. Çelik aynı zamanda kuleleri daha ağır hale getirecek, daha yüksek temeller gerektirecek ve inşaat maliyetlerini artıracaktır [7].

### **Pencere çerçeveleri**

Alüminyum çerçeveler evler ve işyerleri için iyi bir alternatiftir. Ayrıca hafif ve darbelere karşı dayanıklıdır, bu da şiddetli rüzgarlara ve fırtınalara eğilimli bölgelerde önemlidir. Alüminyumdan yapılmış pencereler daha az maliyetlidir ve ahşap pencerelere göre daha az bakım gerektirir [7].

### **Elektronik**

Alüminyum akıllı telefonlarda, tabletlerde, dizüstü bilgisayarlarda, düz ekran TV'lerde, bilgisayar ekranlarında ve diğer cihazlarda giderek daha fazla

kullanılmaktadır. Alüminyum, şık ve güvenilir görünebilen çok yönlü bir malzemedir. Alüminyum son zamanlarda elektronikte çelik ve plastiğin yerini almıştır. Yüksek ısı iletkenliği onu CPU ve grafik cihazlarını soğutmak için mükemmel hale getirmiştir. Modern cihazlar alüminyum gövdelere ve muhafazalara sahiptir [7].

Alüminyumun plastikten daha güçlü ve güvenilir, çelikten ise daha hafif olması, pazar lideri üreticiler arasında alüminyum kullanımının artmasına yol açmıştır.

### **Ev ve endüstriyel aletler**

Alüminyum, dondurucular ve klimalar için hassas borularda kullanılır, ancak başka uygulamaları da vardır. Ticari cihazlara ek olarak, birçok ev aleti alüminyum çerçeve kullanır. Alüminyum soğutma ve dondurma için harika bir malzemedir çünkü hızlı ve verimli bir şekilde soğutmaya yardımcı olan özelliklere sahiptir. Alüminyumun faydaları olmasaydı modern buzdolapları oldukça farklı olurdu [7].

### **Uçak ve uzay aracı bileşenleri**

Alüminyum, yüksek mukavemet/yoğunluk oranı, işlenebilirliği ve korozyona karşı direnci nedeniyle havacılıkta kullanılmaktadır. Wright kardeşler ilk ahşap gövdeli uçağın motor karterini yapmak için alüminyum kullandığından beri insanlar uçabiliyor. Alüminyum çelikten daha hafiftir; bu nedenle uçak yapımında kullanılması kargo ve yolcu kapasitesini artırırken yakıt tüketimini azaltır. Alüminyumun mükemmel korozyon direnci, hava yolculuğunda temel bir ihtiyaç olan uçağın ve yolcuların güvenliğini sağlamaya yardımcı olur. Modern uzay aracı ve roket teknolojileri gelişmiş alüminyum alaşımlarına dayanmaktadır. Alüminyum-lityum alaşımları NASA'nın uzay programında programın başlangıcından bu yana kullanılmaktadır. Kurşun geçirmez malzemeler üretmek için kullanılan şeffaf bir seramik olan alüminyum oksinitrür, uzay aracı pencereleri yapmak için kullanılan tekniklerden biridir [7].

### **Denizcilik**

Gemiler, özellikle yük taşıırken hafif ve güçlü malzemelerden yararlanır. Alüminyumun düşük kütlesi ve yüksek yüzey alanı, tekne mukavemetinden ödün vermeden daha fazla yüzey alanı ve daha az kütle sağlar. Bu sayede daha fazla ürün, insan veya yakıt yüklenebilmektedir. Alüminyum aynı zamanda yat, sürat teknesi ve su altı araçları yapımında da kullanılır [7].

## Otomotiv

Alüminyum, güvenlik ve dayanıklılığı artırırken performansı, yakıt verimliliğini ve emisyonları iyileştirmek için en uygun maliyetli ve çevre dostu seçenek olarak tanıtılmaktadır. Otomobil üreticileri, dayanıklılığı ve çevresel faydaları nedeniyle giderek daha fazla alüminyum kullanılmaktadır. Daha hafif ve daha çevik araçlar, güç veya dayanıklılıktan ödün vermek zorunda değildir. Otomobillerde alüminyum kullanımı, geri dönüşüm kolaylığı nedeniyle de daha sürdürülebilirdir [7].

## Ambalaj ürünleri

Alüminyum, ambalaj sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum kutular tadı ve içeceklerin ve yiyeceklerin besin değerini yıllarca koruyabilir. Uzun saklama süreleri nedeniyle, ambalaj-gıda etkileşimi minimum düzeyde tutulmalıdır. Bu nedenle, organik bir katman kutuyu gıda etkilerinden korur ve kutunun metali ile gıda arasındaki kimyasal reaksiyonları önler [7].

## 2.3 Alüminyumun Tarihi

Antoine Laurent Lavoisier'in (1743-1794) çalışma arkadaşı olan kimyager Louis Guyton de Morveau (1736-1816), alumun içerdığı sülfatlardan biri için 'alümin' kelimesini icat etmiştir. Alümin, Roma döneminde potasyum alum  $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$  için kullanıldığı söylenen Latince 'alumen' kelimesinden türetilmiştir. Alüminyum bileşikler antik çömlekçilikte, boyar madde olarak ve tıpta kan durdurucu olarak büyük miktarlarda kullanılmıştır. Alüminyum cevherini tanımlamak için kullanılan kelime 'alumine' değil, 'bauxite' kelimesidir. Bunun nedeni, 1821 yılında bir maden mühendisi olan Pierre Berthier'in (1782-1867) Fransa'daki Les-Baux-de-Provence köyünün kırmızı toprağının ağırlıkça %40-50 oranında 'hidratlı alümina' olarak adlandırdığı maddeyi içerdiğini keşfetmesidir [8].

Daha sonra, 1861 yılında Fransız kimyager Henri Sainte-Claire Deville cevhere 'boksit' adını vermiştir. Aslında, boksit bileşimleri cevher kaynağına bağlı olarak değişir ancak genellikle gibbsit  $Al(OH)_3$ , boehmit  $\gamma-AlO(OH)$  ve diaspor  $\alpha-AlO(OH)$  gibi alüminyum hidroksitler içerir, geri kalanı esas olarak demir oksitler ve hidroksitlerden, özellikle hematit,  $\alpha-Fe_2O_3$  ve goetit  $FeO(OH)$  (kırmızı renginin kaynağı) ve alüminosilikat kil minerali kaolinit,  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 'ten oluşur [8].

Yerkabuğunda en bol bulunan metal (83.000 ppm) ve oksijen ve silisyumdan sonra en bol bulunan üçüncü element olmasına rağmen, alüminyum 19. yüzyılın sonundan önce endüstriyel bir metal haline gelmemiştir. Alümina, -1,582 kJ-mol<sup>-1</sup> (demir oksitin entalpisi -1,015 kJ-mol<sup>-1</sup>) olan  $\Delta G$  oluşum entalpisi ile tüm oksitler arasında en kararlı olanlardan biridir. Bu nedenle alüminayı indirgemek çok zordur [8].

Metalik alüminyumun keşfi Sir Humphrey Davy'ye (1778-1829) atfedilir. Kendisi 1809 yılında 'alüminyum' terimini kullanmıştır. Demir katot kullanarak ergimiş alüminyum tuzlarının elektrolizi ile demir ile alüminyum alaşımı elde etmiştir. Kimyager Hans Christian Oersted (1777-1851) ve daha sonra Friedrich Wöhler (1800-1882) alüminyum klorürü potasyum ile indirgemeyi başarmıştır. Klorür, karbon varlığında boksitin klorlanmasıyla hazırlanmıştır. Wöhler 1827'de, başta düşük yoğunluğu olmak üzere bazı özelliklerini belirlemek için yeterince saf bir metal üretmeyi başarmıştır [8].

Alüminyumun endüstriyel üretimi için başlangıçta iki yol vardı:

- Kimyasal bir yöntemle (1856-1889);
- 1886'da icat edilen ve bugün hala kullanılmakta olan elektrokimyasal süreçle.

### 2.3.1 Kimyasal yöntemle üretilen alüminyum

1854 yılında Henri Sainte-Claire Deville (1817-1881) Wöhler'in prosesini geliştirdi. İki nedenden dolayı potasyumu sodyumla değiştirdi: 1 mol Al'un indirgenmesi için 117 g'a denk gelen 3 mol potasyum yerine 60 g'a denk gelen 3 mol sodyum kullanılıyordu. Ayrıca oldukça uçucu olan alüminyum klorürü sodyum alüminyum klorür ile değiştirdi. İlk tesis 1856'da Paris'te, 'La Glacière' bölgesinde kuruldu, ancak kısa süre sonra kapatılmıştır [8].

1857 baharında Sainte-Claire Deville fabrikayı yerleşim alanlarından uzakta Nanterre'e (Paris yakınlarında) taşıdı. 1859 yılında üretim 500 kg'a ulaştı. Aynı yıl, Louis Le Chatelier sodyum karbonat ile alümina indirgeme prosesinin patentini aldığı anda, Fransa'nın Gard bölgesindeki Ales'e yakın Salindres'te, boksit kaynaklarından ve La Camargue'in tuz alanlarından uzak olmayan bir tesis inşa edildi. Salindres'deki üretim, tesis 1860'ta faaliyete geçtiğinde 505 kg'dan, bu işlemin durdurulduğu 1880'de 2.959 kg'a kadar değişmiştir [8].

1856'da üretilen ilk kilogram alüminyum, gümüşten biraz daha pahalıya, yaklaşık 300 franka, yani 2016'da 3.200 ABD dolarına eşdeğer bir fiyata satılmıştır. 1880-1889 yılları arasında Salindres'de üretilen metalin kilosu 60 ila 70 frank arasında satılıyordu ki bu da 2016 yılında 750-800 ABD dolarına denk geliyordu. Sainte-Claire Deville'in gümüşe benzetmekten hoşlandığı alüminyum, çoğunlukla gümüş eşya ve mücevherat için kullanılmış, Parisli ünlü gümüşçü Charles Cristofle (1805-1863) ağırlıkça %2 bakırla alaşımlandırılmış alüminyumdan döküm sanat eserleri üretmiştir. 1858 yılında Napolyon III'ün oğluna alüminyumdan yapılmış bir çingirak hediye edilmiştir [8].

### **2.3.2 Elektrokimyasal yöntemle üretilen alüminyum**

1871 yılında Zénobe Gramme (1826-1901) dinamo adı verilen ilk döner makineyi icat etti. Güçlü doğru akım kaynaklarının kullanımı, elektrolize dayalı üretim yöntemlerinin öngörülmesini mümkün kılmıştır. Sainte-Claire Deville ergimiş alüminyum klorürü elektrolize etmeyi denemiştir ancak olumlu bir sonuç alamamıştır. Ergimiş alüminanın elektroliziyle alüminyum üretim süreci Fransa'da 23 Nisan 1886'da patent başvurusu yapan Paul Louis Toussaint Héroult (1863-1914) ve Amerika Birleşik Devletleri'nde 9 Temmuz 1886'da patent başvurusu yapan Charles Martin Hall (1863-1914) tarafından geliştirilmiştir. Her ikisi de alüminayı (erime noktası 2030°C) 97°C'de eriyen kriyolit  $3\text{NaF}\cdot\text{AlF}_3$  içinde çözmeyi başarmış ve endüstriyel eriyik yaklaşık ağırlıkça %2-3 alümina içermiştir [8].

1887'de Bayer, boksitin sıcak kostik soda ile etkileşimine dayanan boksitten alümina çıkarma yöntemi için bir patent başvurusunda bulunmuştur. Héroult, prosesini kurmak için İsviçre'nin Neuhausen kentine gitmiş ve ertesi yıl Fransa'ya dönüp, 1888'de Fransa'da Grenoble yakınlarındaki Froges tesisini kurmuştur. 1889'da üretim 1.100 kg idi. Fransa, İsviçre ve Amerika Birleşik Devletleri'nde çeşitli tesisler kurulmuştur. 1900'de altı bin metrik ton üretilmiş ve alüminyumun satış fiyatı kilogram başına 3,30 ABD Doları civarında sabitlenmiştir. Bu, alüminyumun endüstriyel serüveninin başlangıcıydı. Birincil alüminyum olarak adlandırılan dünya üretimi 1900 yılında 6.000 tona ulaşmış ve özellikle 1950'den bu yana sürekli olarak artmıştır [8].

Korozyona karşı doğal direnci nedeniyle ve son zamanlarda alüminyum geri dönüşümünün gelişmesiyle, toplam dünya alüminyum üretiminin %75'inin (~750 MT) hala üretken kullanımda olduğunu belirtmek gerekir (1888'den beri) [8].

## 2.4 Alüminyum Üretim Miktarı ve Tüketim Değerleri

Birincil alüminyum üretiminde hammadde olarak boksit kullanılmaktadır. Dünya boksit rezervleri pek çok bölgede olmasına rağmen, en önemli boksit rezervleri Gine, Avustralya, Vietnam ve Brezilya'da bulunmaktadır. Boksit rezervlerinin bilinen miktarı yaklaşık olarak 31 milyar ton civarındadır. 2022 yılında ise toplamda 380 milyon ton boksit üretimi gerçekleştirilmiştir. MTA verilerine göre Türkiye'deki boksit rezervi ise 70 milyon ton civarlarında olup dünya payının yalnızca binde 1,8 gibi çok küçük bir payına sahiptir [9].

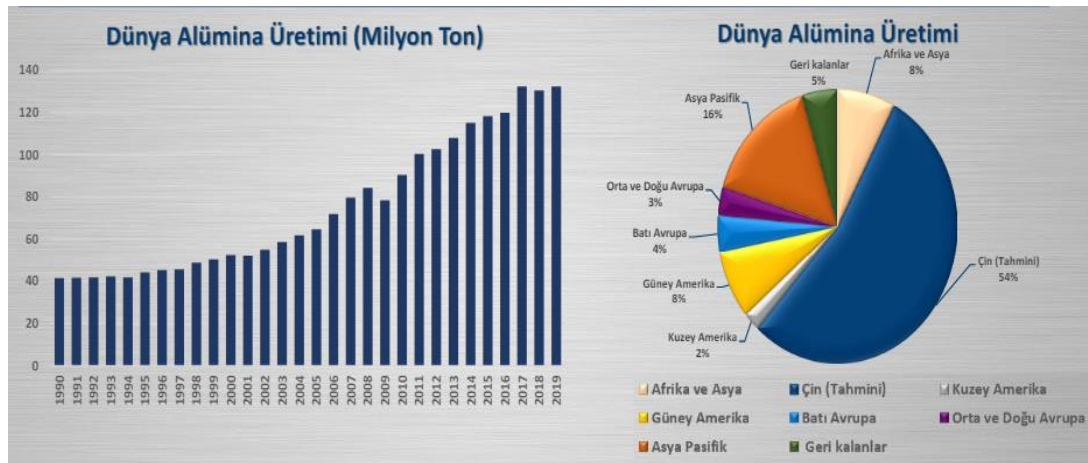
Dünya boksit ihtiyacının %89'u Avustralya (%26), Çin (%24), Yeni Gine (%23), Brezilya (%9) ve Endonezya (%7) olarak 5 ülke tarafından karşılanmaktadır. 2022 yılında ise dünya alümina üretimi 140 milyon tona %1,4 oranla artarak yükselmiştir. Toplam dünya alümina üretiminin %54'ünü ise 76 milyon ton ile Çin'de gerçekleştirilmiştir [10].

**Çizelge 2.2** : 2022 yılı bölgelere göre alümina (bin metrik ton) [10].

Afrika ve Asya (Çin Hariç)	Kuzey Amerika	Güney Amerika	Avrupa (Rusya dahil)
13.792	2.414	11.634	8.219
Okyanusya	Çin (Tahmini)	Tahmini Bildirilmeyen	Total
20.116	79.760	6.292	142.227

**Çizelge 2.3** : 2016-2022 yılları arası alümina üretimi (milyon metrik ton) [10].

2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
119.853	132.390	130.542	131.910	133.078	138.587	142.227

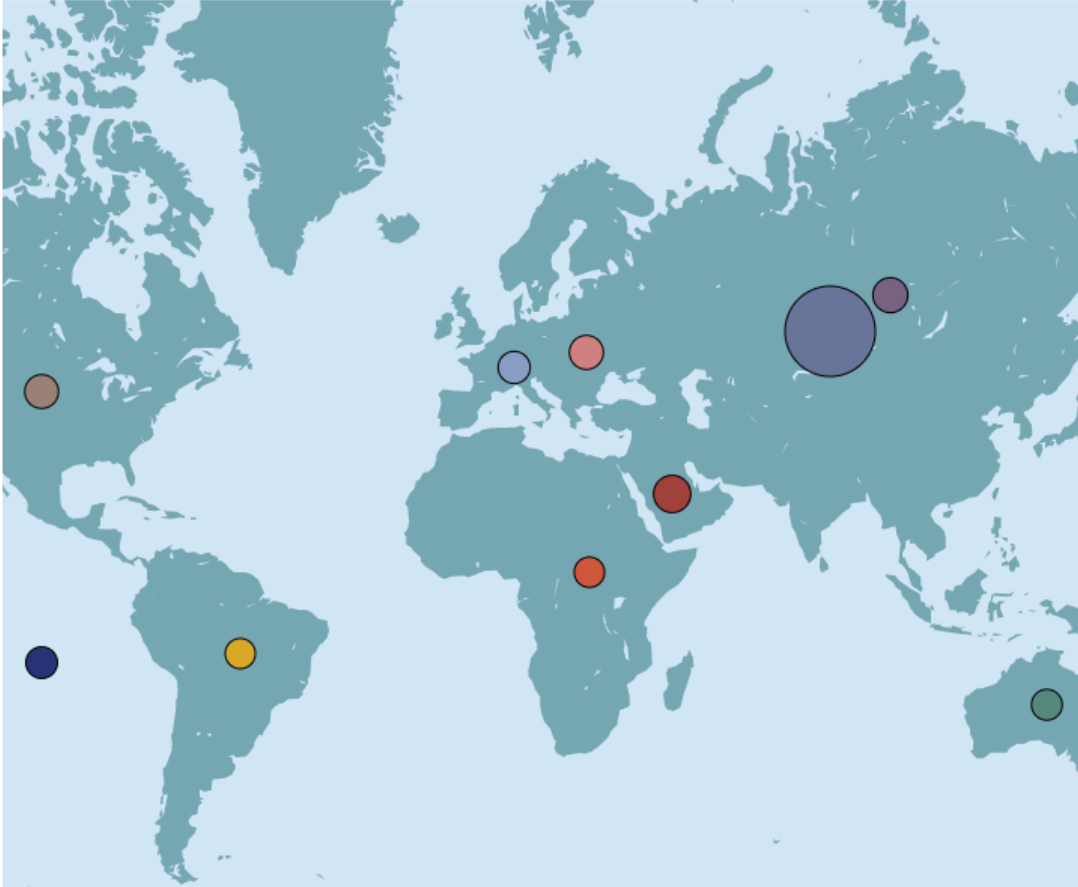


**Şekil 2.2** : Dünya alümina üretim miktarı ve 2019 yılına göre bölgesel dağılımı [11].

Dünyadaki birincil alüminyum üretiminin büyük bir çoğunluğu Çin’de gerçekleştirilmektedir. 2023 yılında toplamda birincil üretim 70.581 bin metrik ton civarındadır. Bu üretimin yaklaşık olarak 41.666 bin metrik tonu ise Çin’de bulunmaktadır ki bu da dünya üretiminin %59’una tekabül etmektedir.

**Çizelge 2.4** : 2023 yılı için birincil alüminyum üretimi bölgesel dağılımı (bin metrik ton) [10].

Afrika	Kuzey Amerika	Güney Amerika	Asya (Çin Hariç)	Batı ve Merkez Avrupa	
1.594	3.897	1.466	4.673	2.713	
Rusya ve Doğu Avrupa	Okyanusya	Orta Doğu	Çin	Tahmini Raporlanmayan	Toplam
4.016	1.884	6.217	41.666	2.455	70.581



**Şekil 2.3** : 2023 yılı için birincil alüminyum üretimi harita üzerinden bölgesel dağılımı [10].



**Şekil 2.4 :** 2016-2023 yılları birincil alüminyum üretim miktarları (bin metrik ton) [10].

Diğer malzemelerle karşılaştırıldığında alüminyum üretimi, birincil ve ikincil üretim arasındaki en büyük enerji farkını gösteren enerji yoğun bir endüstridir (birincil üretim için yaklaşık 174-186 MJ/kg, ikincil üretim için 10-20 MJ/kg). İkincil alüminyum üretiminin çok daha az enerji tüketmesinin nedeni, ham maddesinin alüminyum hurdaları ve birincil metalik alüminyum olmasıdır. Bu nedenle, günümüzde alüminyum iki farklı yolla üretilmektedir: boksit cevherinden çıkarılan alüminadan birincil alüminyum üretimi ve alüminyum hurdalarından ve kullanılmış alüminyum ürünlerinden (folyolar, ekstrüzyon, tornalar) ikincil alüminyum üretimi. Çizelge 2.5, alüminyum üretiminin birincil ve ikincil süreçlerinin bir karşılaştırmasını göstermektedir. Çizelge 2.5'de verilen verilere göre, birincil alüminyum üretimi ikincil alüminyum üretimine kıyasla çok daha fazla enerji ve su tüketimi gerektirmektedir. Ayrıca, birincil alüminyum üretimi, ikincil alüminyum üretimine kıyasla önemli atmosferik emisyonlar ve katı atıklar açığa çıkarmaktadır [12].

**Çizelge 2.5 :** Birincil ve ikincil alüminyum üretim süreçlerinin karşılaştırılması [12].

Parametre	Birincil Üretim	İkincil Üretim
Enerji Tüketimi (GJ/t)	174-186	10-20
Atmosferik Emisyonlar	204	12
Katı Atık (kg/t)	2100-3650	400
Su Tüketimi (kg/t)	57	1,6
Yatırım Maliyeti	Yüksek	Düşük
Emisyon	Yüksek Seviye	Düşük Seviye

**Çizelge 2.6 : 2022 yılı için alüminyum sektöründeki CO<sub>2</sub> salınımı (milyon ton) [10].**

	Rafinasyon	Anot Üretimi	Elektroliz	Geri Dönüşüm	Yarı Üretim	Dahili Hurda Yeniden Eritme	Toplam
Elektrik (Dolaylı)	22	2	616	4	14	3	663
Perfluorocarbon (Direkt)	0	0	52	0	0	0	52
Proses (Direkt)	0	8	103	0	0	0	111
Yardımcı Malzemeler (Dolaylı)	30	45	5	0	0	0	80
Termal Enerji	114	6	0	19	22	9	177
Taşıma (Dolaylı)	16	0	13	0	0	0	29
Toplam	183	60	789	23	36	11	1.112

### 3. ALÜMİNYUM ÜRETİMİ

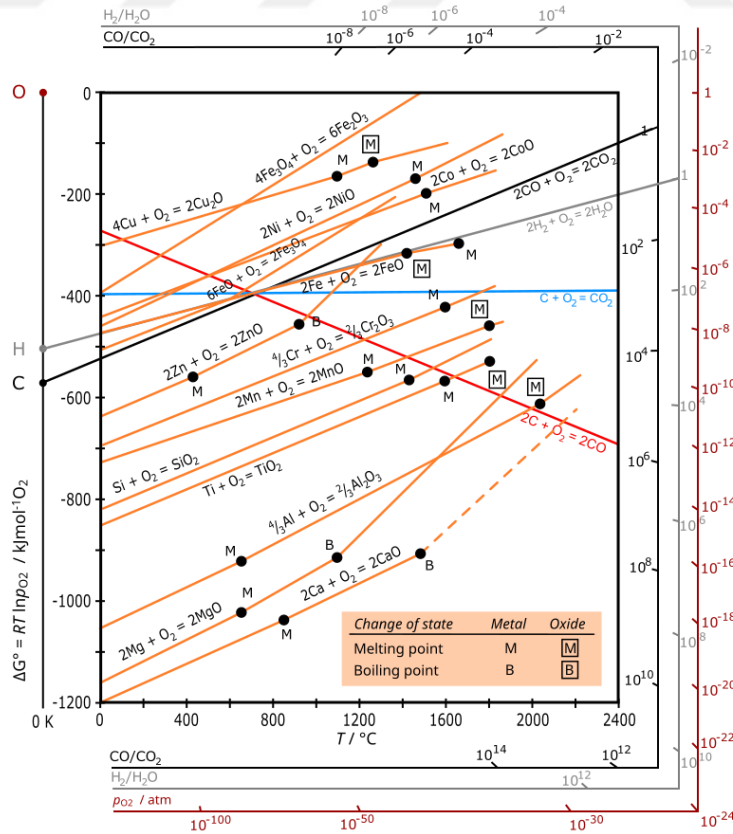
Alüminyumun diğer metallere kıyasla daha geç keşfedilip üretilmesinin nedeni, doğada saf halde bulunmaması ve son derece reaktif bir metal olmasıdır. Bu özellikleri nedeniyle, geleneksel yöntemlerle işlenmesi mümkün olamamıştır. Alüminyumun ticari olarak üretilebilmesi ancak elektriğin ve elektroliz yönteminin icadıyla mümkün olmuştur. Alüminyum, yüksek oksijen afinitesi ve erime noktası gibi faktörler nedeniyle, demir ve diğer metallere olduğu gibi karbon kullanılarak basit bir şekilde çıkarılamaz. Bu nedenlerle alüminyum, diğer metallere göre daha genç bir teknoloji ürünü olarak karşımıza çıkmaktadır. Alüminyum, aşağıdaki nedenlerden dolayı demir ve diğer metaller gibi karbon tarafından basit bir şekilde çıkarılamaz [1];

**Elektrokimyasal Özellikler:** Alüminyum oldukça reaktif bir metaldir. Bir metal ne kadar reaktif olursa, onu cevherinden çıkarmak o kadar zor olur. Bu nedenle örneğin potasyum veya alüminyum, karbon ile ekstrakte edilemez (yani metalik elemente indirgenemez). Alüminyum havaya maruz kaldığında yüzeyinde güçlü bir oksit tabakası oluşturur. Bu oksit tabakası alttaki metali daha fazla oksidasyondan korur. Karbon, reaksiyon için gereken yüksek enerji nedeniyle alüminyum oksidi ( $Al_2O_3$ ) indirgeyerek saf alüminyum çıkaramaz. Kaba kuvvet yöntemi, yani elektrik kullanılmalıdır. Bu durumda elektrolizin endüstriyel işlem olarak kullanılmasının nedeni budur. Bunu görselleştirmenin hızlı bir yolu, EMF serisidir. EMF serisi, farklı metallerin ve yarı metallerin standart elektrot potansiyellerine göre sıralandığı bir dizidir. Üst sıradaki metaller katodik (reaktif değil) iken, alt sıradakiler anodiktir (reaktif) [6].

**Çizelge 3.1 : EMF Serisi [6].**

Elektrot Reaksiyon	Standart Elektrot Potansiyeli, $V^0$ (V)
$Au^{3+} + 3e^- \rightarrow Au$	+1,420
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	+1,129
$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$	+0,800
$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$	+0,340
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	0,000
$Pb^{2+} + 2e^- \rightarrow Pb$	-0,126
$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$	-0,250
$Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$	-0,440
$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	-0,763
$Al^{3+} + 3e^- \rightarrow Al$	-1,662
$Na^+ + e^- \rightarrow Na$	-2,714
$K^+ + e^- \rightarrow K$	-2,924

**Termodinamik:** Alüminyum oksidin karbon tarafından indirgenmesi, alüminyumun erime noktasının altındaki sıcaklıklarda termodinamik olarak uygun değildir. Alüminyum oksidin karbon tarafından indirgenmesi için standart Gibbs serbest enerji değişimi pozitifdir, bu da kendiliğinden gerçekleşen bir süreç olmadığı anlamına gelir. Bir metalin karbon ile redüklenebilirliğini anlamak için ilk olarak Ellingham diyagramına bakılabilir. Ellingham diyagramı, çeşitli metallerin oksitlenme reaksiyonlarının Gibbs serbest enerjisini sıcaklıkla birlikte gösteren bir grafikdir. Bu diyagram, metal oksitlerin indirgenebilirliğini ve metalurjik işlemlerde kullanılan indirgeme ajanlarının etkinliğini belirlemede kullanılır. Karbon, karbonun kendisinden daha az reaktif olan metalleri (karşılık gelen metal oksitlerden) çıkarmak için iyi bir indirgeyici maddedir. Bu tür metallerin tipik örnekleri çinko, kurşun, kalay, demirdir. Ancak asıl mesele, yukarıda adı geçen metallerin bulunduğu cevherlerin tamamının karbon tarafından oksitlenebilmesi ve dolayısıyla karbondioksit (veya monoksit) oluşturabilmesidir. Metal iyonu böylece elementel metale indirgenmek için elektronları alır. Tipik bir örnek ise demir oksitin karbon ile redüklenmesi sonucu demir ve karbondioksit açığa çıkartmasıdır. Öte yandan alüminyum, karbondan daha reaktifdir ve bu nedenle cevherlerinden karbonla çıkarılamaz [6].



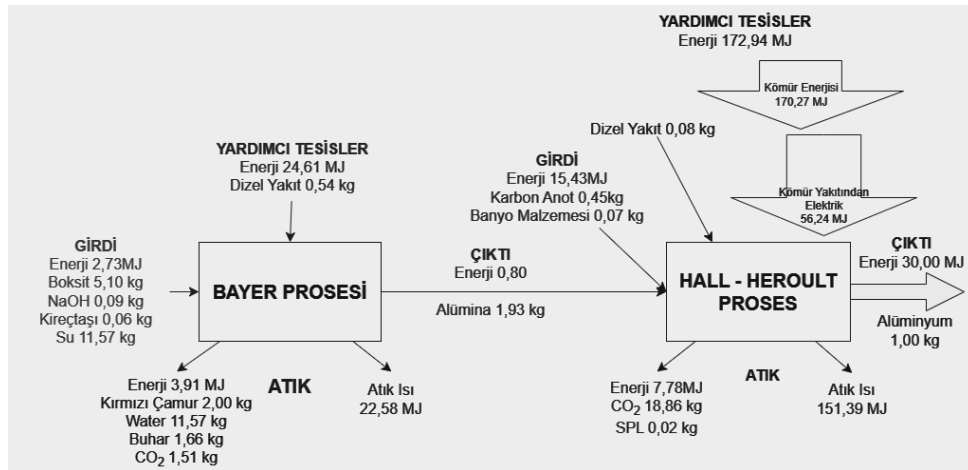
Şekil 3.1 : Ellingham diyagramı [6].

**Karbürlerin Oluşumu:** Alüminyum oksit yüksek sıcaklıklarda karbon tarafından indirgendiğinde, saf alüminyum metal yerine alüminyum karbürler oluşturma eğilimindedir. Bu karbürler kolayca saf alüminyuma dönüştürülmez ve bu da çıkarma işlemini verimsiz hale getirir [1].

Karbon kullanmak yerine, alüminyumun çıkarılması genellikle Hall-Héroult işlemiyle yapılır; bu işlem, yüksek sıcaklıklarda ergimiş kriyolitte (bir mineral) çözünen alüminyum oksidin elektrolizini içerir. Bu işlem enerji yoğun olmasına rağmen saf alüminyum üretimine olanak tanır[13].

### 3.1 Birincil Alüminyum Üretimi

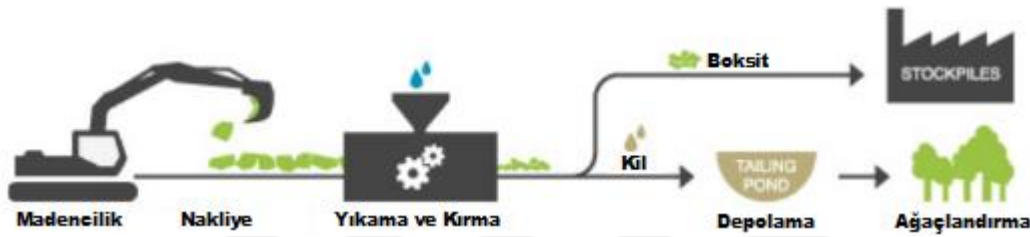
Birincil alüminyum üretimi iki aşamalı bir süreçtir. Öncelikle alümina rafine edilir ve daha sonra metalik alüminyuma indirgenir. Boksit, yüksek konsantrasyonda alüminyum hidroksit mineralleri (>%35) içeren bir cevherdir ve neredeyse tüm alümina üretiminin başlangıç malzemesidir [13]. Alümina üretimi, esas olarak alümina ( $Al_2O_3$ ) ile eser miktarlarda demir, silisyum ve titanyumdan oluşan hidratlı bir alüminyum oksit olan boksit cevherinin madenciliği ile başlar. Bayer prosesi, boksiti alüminaya dönüştürmek için kullanılır. Hall-Heroult prosesi alüminayı elektrometalürji ile alüminyum metaline dönüştürmek için kullanılır [13]. 1 ton alüminyum metali üretebilmek için Hall-Heroult prosesinde yaklaşık olarak 2 ton alüminaya ihtiyaç duyulmaktadır ve 2 ton alümina elde edebilmek için ise Bayer prosesinde ise yaklaşık olarak 4 ton boksit cevherine ihtiyaç duyulmaktadır. Boksit cevheri ve üretim sırasında tüketilen enerji, Bayer prosesinin en maliyetli iki bileşenidir [14].



**Şekil 3.2 :** Birincil alüminyum üretimi akış şeması [15].

## Boksit madenciliği

Boksit, alüminyum hidroksit minerallerinin konsantrasyonu %35'in üzerinde olan cevherlere verilen isimdir. Hemen hemen tüm alümina üretiminin birincil bileşeni olarak hizmet eder. Kristal yapısına ve hidratlı su moleküllerinin miktarına bağlı olarak boksit üç ana tipte bulunabilir. Gibbsit, boehmit ve diaspor üç formasyonun adlarıdır [13]. Boksitin açık (yüzey) madenciliği sırasında yüzey toprağını ve aşırı yükü kaldırmak için buldozerler ve kazıyıcılar kullanılır. Boksit madenciliğinin dört ana adımı vardır. Bu adımlara maden sahasının hazırlanması, boksit madenciliği, kırma, cevher taşıma ve rehabilitasyon adı verilmektedir.



Şekil 3.3 : Boksit madenciliği adımları [16].

Çizelge 3.2 : Gibbsite, Boehmite ve Diasporun karşılaştırılması [13].

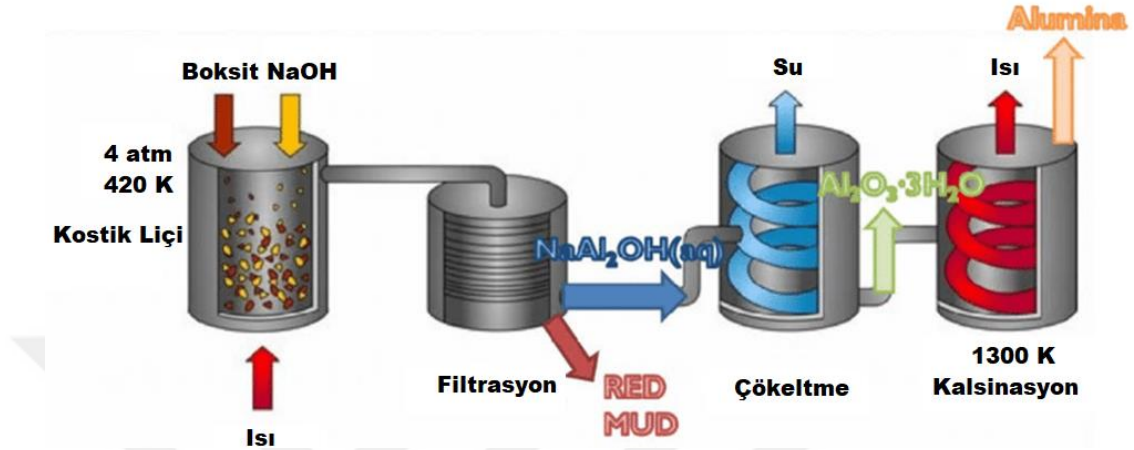
	Birim	Gibbsite (Hydragillite)	Böhmite (Gibbsite-Böhmite Karışımı)	Diaspore
Proses		Bayer	Bayer	Soda-Lime Sinter
Bileşim		$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\beta\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Alümina içeriği	%	45-65	47-85	47-85
Silika	%	1-5	2-5	4-16
Alümina/silika oranı		19	12	~4
Kristal sistemi		Monoclinic	Orthorhombic	Orthorhombic
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	2.42	3.01	3.44
Sıcaklık hızlı dehidrasyon	°C	150	200-250	~450
Sıvıda Na <sub>2</sub> O	g/l	120-150	205-245	240-360
Basınç	MPa	1	1	~3.5
Enerji	GJ/t	7.5-12	11-16	34-45

## Bayer prosesi

Bayer prosesi en basit tanımı ile, boksit cevherinin işlenmesiyle alümina üretilmesidir. Daha yaygın olarak alümina olarak adlandırılan alüminyum oksit, alüminyum ve oksijenden oluşan bir tür amfoterik oksittir. Boksit, ağırlıkça %30-60 oranında

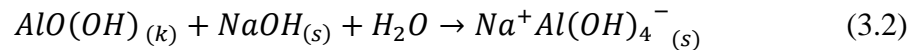
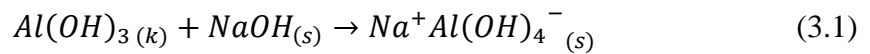
alüminyum oksitin yanı sıra silika, demir oksitler ve titanyum dioksit içerir. Bayer işlemi, boksiti alüminaya dönüştürmek için en sık kullanılan yöntemdir [13].

Bayer alümina üretim prosesi kostik liçi, filtrasyon, çökeltme ve kalsinasyon olmak üzere dört adımdan oluşur. Bayer proses adımları şu şekilde özetlenmiştir:



Şekil 3.4 : Bayer prosesi adımları [16].

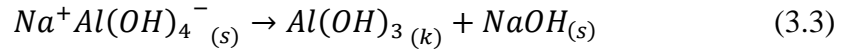
**Kostik liçi:** Bayer işleminin bu adımı, çözümlendirme liç kinetiğini artıran boyut küçültme için kırma ve boksit içindeki alüminyum oksitten yabancı maddeleri ayırmak için boksit cevherinin yaklaşık 150-200 °C sıcaklıkta sodyum hidroksit ile ısıtılmasını içerir. Bu koşullar altında cevherdeki alüminyum içeren türler çözülebilir. Sodyum hidroksit, sodyum alüminat oluşturmak için boksitin alüminyumlu mineralleriyle etkileşime girer. Kırmızı çamur adı verilen çözünmeyen yabancı maddeler süspansiyon halinde kalır ve filtrelemeyle ayrılır. [17] Sodyum liçindeki reaksiyonlar şunlardır:



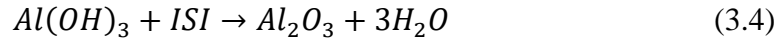
**Filtrasyon:** Liç işleminden gelen çözelti içerisinde çözünmeyen bileşenler bu aşamada uzaklaştırılır. Boksit cevherindeki alüminyum içeren türlerin çoğu çözülür ve geriye esas olarak demir oksitler, kuvars, sodyum alüminosilikatlar, kalsiyum karbonat, kalsiyum alüminat ve titanyum dioksitten (genellikle eser seviyelerde bulunur) oluşan çözünmeyen bir kalıntı (kırmızı çamur) kalır ve bu kalıntı çökeltme filtrasyonu ile giderilir [17].

**Çökeltme:** Alümina ürünü, sıvının soğutulması ve daha sonraki alt akıştan geri dönen ince ürünle aşılması yoluyla gibbsit formunda alümina trihidrat olarak geri kazanılır.

Genellikle sürekli bir kademeli işlem olarak bir dizi çalkalanmış çökticiden geçirilir. Çökticiler atmosferik basınçta ve 70°C'den 45°C'ye kadar sıcaklıklarda çalıştırılır. Çözeltinin çöktirme tanklarında bekleme süresi 36 saate kadar çıkabilmektedir [18].



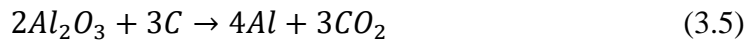
**Kalsinasyon:** Bayer prosesinin son adımı alüminyum hidratın kalsinasyonudur. Alüminyum hidroksit ( $Al(OH)_3$ ), döner fırınlarda yaklaşık 1100 °C'de gerçekleştirilen kalsinasyon işlemiyle alüminaya ( $Al_2O_3$ ) dönüştürülür [18].



### Hall-Heroult prosesi

Birincil alüminyum üretimindeki son aşama ise Hall-Heroult Prosesi'dir. Metalik alüminyumun ticari üretimi 1889'da Hall-Heroult prosesi ile kriyolit-alümina eriyiğinin elektrolizi ile başlamıştır. O zamandan bu yana yapılan teknolojik iyileştirmelerin dışında, elektrolitik alüminyum prosesi temel olarak 135 yıl öncekiyle aynı kalmıştır [19].

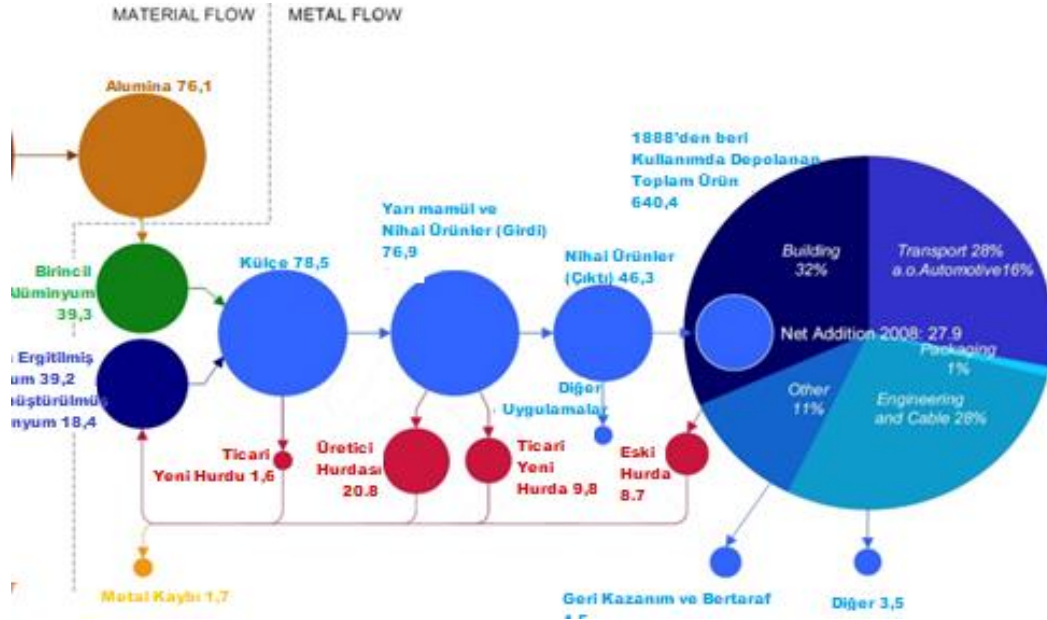
Bayer Prosesi'nden elde edilen alüminaları metalik alüminyuma indirgenmesi için 100-400kA altında, ortalama 965°C sıcaklıktaki kriyolit-alüminyum florür ergimiş tuz ortamına ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer bir adıyla elektrolit olan tuz ortamının içerisinde çözünüp indirgenen alüminyum, banyonun alt kısmında (yoğunluk farkından dolayı) sıvı fazda birikmesi sonucunda hem katot görevi görmektedir hem de üretilmektedir. Alümina bileşiğinde bulunan oksijen ise reaksiyon sonucunda açığa çıkmakta ve karbon esaslı tüketilebilir anot ile birleşerek CO, CO<sub>2</sub> gibi gaz formunda sistemden uzaklaşmaktadır. Kapalı vakum potası yardımıyla düzenli aralıklarla sıvı alüminyum boşaltılmaktadır [19].



Bayer Prosesi'nden elde edilen 2 ton alüminaya karşılık yaklaşık olarak 1 ton metalik alüminyum üretimi gerçekleşmektedir. Birincil alüminyum üretim prosesinin en önemli maliyet faktörü ise üretimin tamamının son girdisi elektroliz hücresi olduğundan dolayı elektrik enerjisidir. Elektrik tüketim değerlerinden dolayı alternatif bir üretim yöntemi arayışları devam etmesine rağmen, sanayi ölçekli bir karşılığı halen keşfedilememiştir [20].



Üretimin başlangıcından bu yana, sac, dövme ve ekstrüzyon imalatından elde edilen "proses içi" hurda metal geri dönüşüm için eritme fırınlarına dönüş yaptığında, boksitten temel alüminyum üretmek için gereken enerjinin yalnızca %5'ini kullanmaktadır. Alüminyumun geri dönüşümü, ikincil metal üretiminde birincil metale göre %5'i kadar enerji kullandığından ve %95 daha az sera gazı emisyonu ürettiğinden, birincil metal üretimi için gereken enerjinin %95'ine kadar tasarruf sağlayabilir. Bir kilogram alüminyumun geri dönüştürülmesiyle yaklaşık 8 kilogram boksit, 4 kilogram kimyasal ürün ve 14kWh enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Atık depolama sahalarına atılan alüminyum miktarını ve bununla ilişkili diğer maliyetleri (depolama sahası, taşımacılık vb.) de yanında azaltmaktadır [22].



Şekil 3.7 : Alüminyum üretiminde kütle akış şeması [23].

Alüminyum üretiminin kütle akış şeması Şekil 3.7'da görülmektedir. 2008 verilerini gösteren diyagramda 208,3 milyon ton boksit kullanılmıştır. Boksit miktarının yaklaşık olarak üçte biri alüminaya dönüştürülebilmektedir. Külçe üretimi sırasında, ticari yeni hurdanın (Traded New Scrap) 1,6 milyon ton açığa çıktığı gösterilmiştir. Bu ağırlık miktarı ise dros alma işlemindeki metalin ağırlığını temsil etmektedir ancak dros ağırlığı bu miktarın yaklaşık iki katı olacaktır. Her geçen gün artan ikincil alüminyum üretimi sırasında birincil alüminyum üretimine kıyasla daha fazla miktarda dros açığa çıkmaktadır. Yüksek miktarda içerisinde metal barındıran alüminyum droslarından metal geri kazanımı giderek önem kazanmaktadır. Kütle akış şeması aynı zamanda Al üretimindeki metal kaybını da göstermektedir. 2008 yılında 1,7 milyon

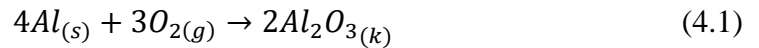
ton metal kaybedilmiştir. Ayrıca Dai bu işin ekonomik etkisinden şu şekilde bahsetmiştir: Drostan alüminyum geri kazanımının en önemli etkilerinden birisi enerji tüketimindeki azalmadır. Ek olarak, depolama sahalarındaki potansiyel sızıntıyı azaltmak da çevresel etki anlamında büyük önem arz etmektedir [23].

Alüminyum üretim atığı olan dros, sodyum klorür (NaCl) ve potasyum klorür (KCl) gibi tuz flakslarının yanı sıra değişen miktarlarda metalik alüminyum (Al) ve alüminyum karbür ( $Al_4C_3$ ), alüminyum nitrür (AlN) ve alüminyum oksitler ( $Al_2O_3$ ) gibi alüminyum bileşiklerinin bir karışımıdır. Bu atıklar "dros", "beyaz dros", "siyah dros" ve "tuz keki" olarak bilinir Birincil ve ikincil işleme ve saflaştırmada, bu kelimeler mevcut alüminyum miktarını ve ergimiş alüminyum yüzeyinden kazınan atığın şeklini tanımlar [22].



#### 4. ALÜMİNYUM DROS

Birincil ergitme tesislerinde, dökümhanelerde ve geri dönüşüm tesislerinde, alüminyum ve alaşımlarının ergitme işlemi ve dökümü sırasında ortaya çıkan dros, alüminyum ve bileşiklerini içeren bir kalıntıdır. Yüzeyde oluşan doğal oksit tabakası, hurda alüminyum gibi katı hammaddeler yeniden eritildiğinde drosun birikmesine neden olur. Dros ayrıca, eriyik şarj edilirken, rafine edilirken veya diğer ilgili işlemler yapılırken bir fırın içinde de üretilir. Kombine hazırlık sırasında alüminyum ısıtma ortamına maruz kalır ve alüminyumun dışında gerekli ve isteğe bağlı alüminyum ürünleri oluşur. Alüminyum drosunda alümina, nitrür, karbür ve tuz metal oksit gibi metal ve metal olmayan bileşenler bulunur. Sıvı alüminyum atmosferik oksijenle reaksiyona girdiğinde, metalik alüminyum üzerinde alüminyum drosu adı verilen bir oksit kaplama oluşur. Alüminyum drosu, sıvı alüminyumdan fiziksel olarak uzaklaştırılan bir oksit maddesidir. İzabe işlemlerinde kullanılan tuz geçişleri ve alüminaya karışmış metalik alüminyumun bir karışımıdır [24]. Alüminyum drosu, alüminyum üretimi sırasında üretilen geri dönüştürülebilir bir atık olarak kabul edilir, ancak sadece metalik alüminyum içeriği için değil, aynı zamanda ergimiş alüminyumun oksidasyonu sonucu oluşan alümina içeriği için de oldukça önemlidir. Bu alüminyum metalinin yüksek oksijen ilgisi dros oluşumu için esastır. Dros oluşumu bu alüminyum metalinin oksijene olan yüksek ilgisine bağlıdır. Denklem 6 uygun oksidasyon reaksiyonunu göstermektedir. Bu büyük ölçüde ekzotermik olduğundan, dros 1400°C'ye kadar sıcaklıklara ulaşabilir. 400°C'nin altında reaksiyon sona erer [25].

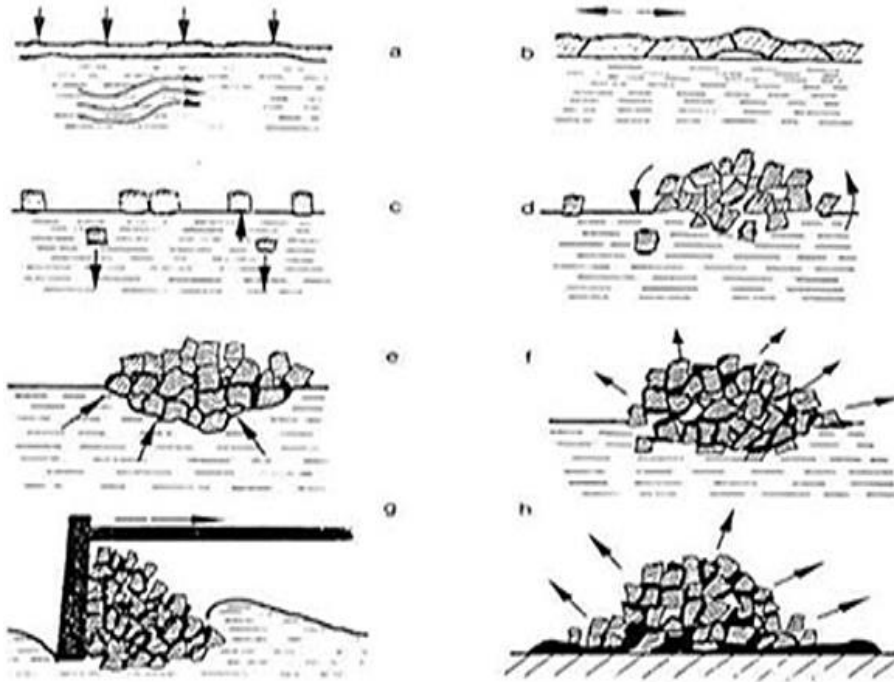


Üretilen drosta metal dolu boşluklar ve gaz kabarcıkları oluşur. Alüminyum oksit 700°C'de 3,98 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahiptir, bu da sıvı alüminyumun yoğunluğundan (700°C'de 2,36 g/cm<sup>3</sup>) daha yüksektir. Ancak dros, gözenekliliği nedeniyle ergimiş banyonun üstünde yüzer. Teorik olarak yeni hurda olarak sınıflandırılabilen alüminyum drosu metalik alüminyum, farklı alüminyum oksit türleri ( $\alpha$  ve  $\gamma$ ) ve AlN'den (alüminyum nitrür) oluşur. Ek olarak, düşük miktarlarda silisyum, demir,

kalsiyum ve magnezyum oksitlerin yanı sıra karbürler, klorürler ve florürler dahil olmak üzere diğer Al bileşikleri de mevcuttur. Ekzotermik oksidasyon süreçlerinden kaynaklanan (en azından lokal olarak) yüksek sıcaklıklar nedeniyle spineller oluşur. Dros önce magnezyum oksitleri üretir, bunlar daha sonra alüminyum oksit ile birleşerek spinelleri ( $MgAl_2O_4$ ) oluşturur [24].

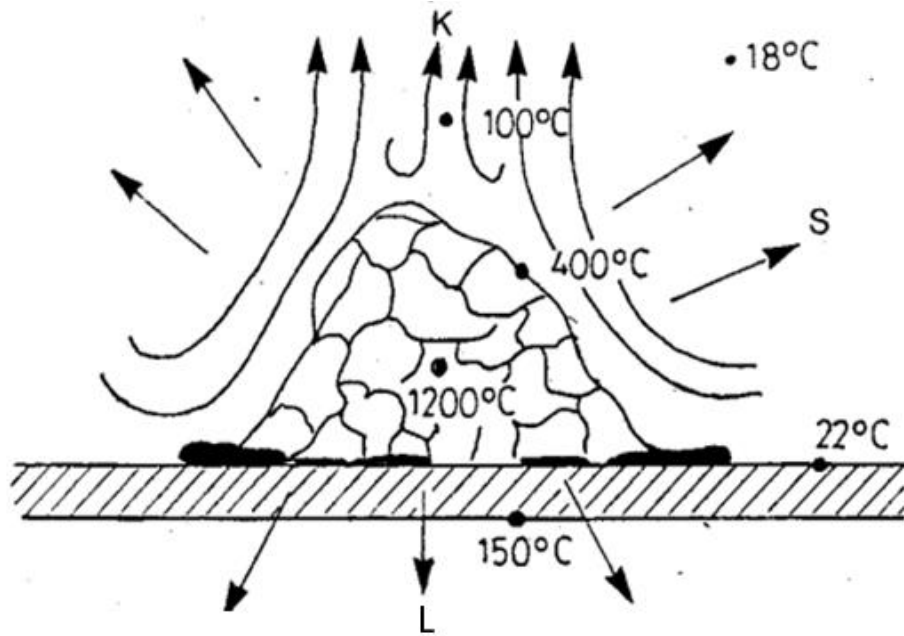
#### 4.1 Dros Oluşum Adımları

Alüminyumun yüksek oksijen afinitesi nedeniyle ergimiş alüminyum yüzeyinde oluşmaktadır. Özellikle beyaz dros, içinde hapsolmuş metalin ekonomik değer kazanması için geri dönüştürülmektedir. Yüksek miktarda alüminyum oksit ve %15-80 aralığında geri kazanılabilir metalik değere sahiptir. Üretilen her 1000 kg ergimiş alüminyum için ortalama 30-40 kg beyaz dros ortaya çıkmaktadır. Ergitme sırasında kriyolit kullanımında dahi metalin oksidasyon değeri beyaz dros oluşumuna neden olmakta ve ton başına 40 kg dros ortaya çıkartmaktadır. Döküm sırasında oluşan beyaz dros miktarı bazı faktörlere bağlı olmakla birlikte bu faktörler: çıkış metal tipi, fırın tipi ve boyutları, alaşımlama, saflaştırma işlemleri başta gelmektedir. Üretim parametreleri ile kompozisyon değişebilmektedir [12]. Alfaro, alüminyum drosunun üretim sırasında oluşması için 8 ana adım olduğunu belirtmektedir [26]:



Şekil 4.1 : Dros oluşum aşamalarının gösterimi [26].

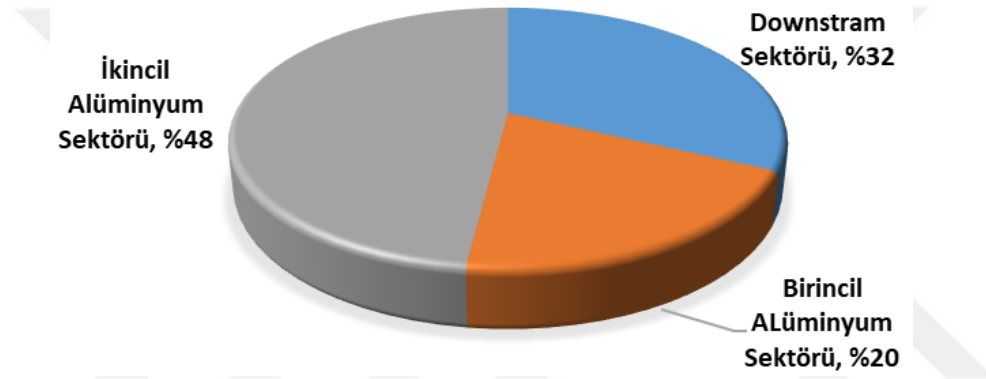
- a) Ergimiş alüminyum yüzeyinde oksit tabakası oluşumu.
- b) Banyo hareketi nedeniyle oksit kabuğunun kırılması.
- c) Oksit parçacıklarının batması ve yüzmesi.
- d) Oksit parçacıklarının birbirlerine yapışması.
- e) Alüminyumun oksit parçacıklarının boşluklarını doldurması (kapiler hareket).
- f) Dros içinde ince dağılmış metalik alüminyum oksidasyonu.
- g) Dros sıyırma.
- h) Drosun fırın dışına çıkarılması.



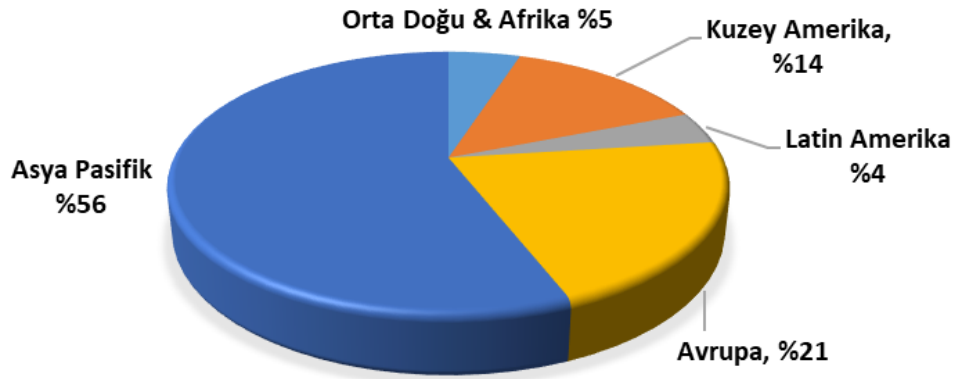
**Şekil 4.2 :** Dros soğutmanın şematik gösterimi [26].

Sıyırma ve drosun fırından çıkarılması gibi son adımlar geçildikten sonra, dros konglomerası soğumaya bırakılır. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi "K" ile gösterilen konveksiyon, "S" ile gösterilen radyasyon ve "L" ile gösterilen kondüksiyon yoluyla soğur. Dros konglomerasının ortası, konglomeranın diğer taraflarına kıyasla en yüksek sıcaklığa sahiptir. En yüksek sıcaklığın drosun ortasında olmasının iki temel nedeni vardır. Drosu kapatan dış yüzey içerideki havayı hapsederek drosun içinde izole bir ortam oluşturur ve drosun dış yüzeyi bir refrakter gibi davranarak ısının soğuması için iletilmesini zorlaştırır. Ayrıca, alüminyumun oksijen gazıyla reaksiyona girmesi gibi ekzotermik reaksiyonlar içeride gerçekleşir ve reaksiyondan çıkan ısı sayesinde alüminyumun erime noktasını aşarak sıcaklığı yükseltir.

Dros üretim verilerini dünyada net olarak tanımlamak zordur. Dros üretim verileri 2017 yılında tahmin edilmiştir. Asya-Pasifik bölgesinde dros üretiminin diğer bölgelere göre daha baskın olduğu ve yüzde 56 ile yaklaşık 1,7 milyon ton üretilbildiği tahmin edilmektedir. Dros üretimi sektörel dağılıma göre incelendiğinde ise en yüksek orana yüzde 48 ile geri dönüşüm sektöründe ulaşılabilir. Yaklaşık 1,45 milyon ton alüminyumun geri dönüşümünden dros üretilmektedir. Dros türlerine göre dağılım incelendiğinde şekilden de görüleceği üzere beyaz dros daha fazla olmakla birlikte oransal olarak birbirlerine yakındırlar. Beyaz drosun siyah drostan daha fazla olmasının nedeni çoğunlukla birincil üretim ve sonraki külçe ergitme işleminden kaynaklanmaktadır [27].



Şekil 4.3 : Drosun üretim sektörüne göre yüzdesi [27].



Şekil 4.4 : Drosun bölgelere göre yüzdesi [27].

Çizelge 4.1 : Dros üretimi ve geri kazanım sayıları tahmini (metrik ton) [27].

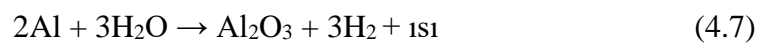
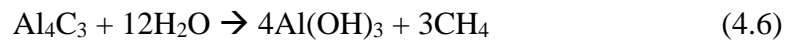
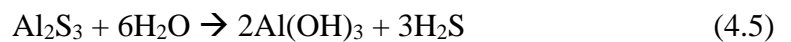
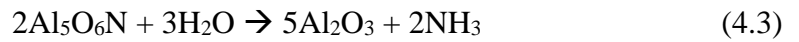
Malzeme/Yıllık	2017	2022
Dros Üretimi	3005	3200
Geri Kazanılan Dros	1450	1600
Geri Kazanılan Alüminyum	464	480

Tahmini dros üretimi yılda yaklaşık 3 milyon tondur. Üretilen bu drosun yaklaşık yarısı geri dönüştürülebilmekte ve geri dönüştürülen drosun sadece üçte biri daha sonra alüminyuma dönüştürülebilmektedir. Geri dönüştürülemeyen dros, düzenli depolama sahası oluşumuna neden olmakta ve bu da çevreye zarar vermektedir [27].



**Şekil 4.5 :** Alüminyum üretiminden kaynaklanan atık ürünler şunları içerir: (a) beyaz dros; (b) siyah dros; (c) tuz keki; ve (d) torba tozu [28].

Alüminyum üretim atıklarının depolama alanları toprağa ve yeraltı sularına zarar verebilir. Fosfin, amonyak, hidrojen sülfür, metan gibi gazlar yeraltı suları ve toprak için tehlike oluşturmaktadır. Eser miktarda bile olsa, bu tür alüminyum bileşikleri sızıntı durumunda çevreye ciddi zararlar verebilir. Bu tür reaksiyonlara örnek olarak şunlar verilebilir:



Ekonomik döngüye katkı sağlayabilecek bileşiklerin çeşitli tesislerde depolanması maddi kazanç sağlamamasının yanında gaz sıkışmaları, yeraltı sularının pH seviyelerini bozması, toprağı zehirlenme gibi yan etkileri ile bulunduğu bölgedeki canlı yaşamına önemli seviyede tehlike oluşturmaktadır [29].

#### 4.2 Beyaz ve Siyah Dros

Beyaz dros ve siyah dros olmak üzere iki çeşit dros vardır. Beyaz dros önemli miktarda  $Al_2O_3$  gibi bir alüminyum bileşiğı bulunur. Beyaz dros %15 ila %75 arasında daha fazla metalik alüminyum bulunabilir. Ayrıca beyaz dros yüksek oranda  $Al_2O_3$  içerir. Sıvı alüminyumun ayrıştırılmasıyla oluşturulan ince tozdan oluşur. Alüminyum yapım sürecinde beyaz dros da oluşur. Ancak siyah dros, alüminyumun ikincil rafine işlemleri sırasında oluşur ve yalnızca az miktarda metal içeriğı içerir. Alüminyum oksitlerin ve dros bir karışımı, beyaz drostan %40 daha yüksek tuz konsantrasyonuna ve %12 ila 18 arasında geri kazanılabilir alüminyum içeriğine sahip olan siyah drosu oluşturur [30].

#### Beyaz Dros

Beyaz dros (veya ıslak dros) birincil alüminyum izabe tesislerinde ortaya çıkar. Beyaz dros yüksek metal konsantrasyonuna ve daha az miktarda tuz ve oksitlere sahiptir. Metalik alüminyum içeriğı %20 ila %80 arasında değişebilir. Büyük parçalar veya bloklar halinde kompakt malzeme olarak ortaya çıkarlar. Beyaz dros öğütülür ve metalik alüminyum oksitlerden ve demir safsızlıklarından ayırmak için elenir. Metalik alüminyum geri kazanılabildiğı ve oksitler diğer refrakter malzemelerin yapımında kullanılabildiğı için beyaz dros değerli bir malzeme olarak kabul edilir. Günümüzde mevcut teknolojileri kullanarak alüminyumun %100'ünü geri kazanmak mümkün değildir, çünkü ince toz, oksidasyon ve tuz kekiyle bütünleşme şeklindeki kayıplar nedeniyle metal içeriğinin %5 ila %25'i kaybolabilir [31].

**Çizelge 4.2 : Beyaz dros: Alüminyum metal içeriğı [31].**

Boyut	% İşlenmiş	% Al içeriğı	Market
Kaba konsantre	35-45%	>85-90%	Alaşımli Külçe / Yeniden Eritilmiş Hurda Külçe
İnce konsantre	5-20%	>90-95%	Alaşımli Külçe / Yeniden Eritilmiş Hurda Külçe
Kaba tozlar	10-20%	50-60%	Çelik/kimya endüstrileri için ekzotermik
İnce tozlar	20-30%	20-30%	Çimento endüstrisi / Kimya Endüstrisi
Torba tozu	5-10%	<15%	Çimento endüstrisi / Kimya Endüstrisi
Toplam	100%	50-70%	



**Şekil 4.6 :** Beyaz dros [32].

### **Siyah dros**

Siyah dros (veya kuru dros) adını koyu karakteristik renginden alır. Düşük metal içeriği ve yüksek tuz ve oksit konsantrasyonu ile tanecikli bir yapıya sahiptir. Siyah dros, alüminyum geri dönüşümü sırasında ortaya çıkar ve geri dönüştürülen hurdaya ve işleme koşullarına bağlı olarak geri kazanılabilir alüminyum içeriği tipik olarak %5 ila %25 arasındadır. Siyah dros çoğunlukla metalik alüminyum, alüminyum nitrür, alümina, sodyum klorür, potasyum klorür ve silika içerir. Az miktarda içerdiği diğer bileşenler ve oksitler arasında Ti, Cu, Fe, Ca, Zn, S, K ve Na bulunmaktadır. Siyah dros kalıntısı, su ile yıkandıktan sonra alümina ile zenginleştirilir. Yıkılmış siyah dros, alüminyum hidroksit, alümina, alüminyum klorür, alüminyum nitrat, alüminyum sülfat ve alüminyum karboksilatlar gibi katma değerli kimyasalların hazırlanmasında kullanılabilir [31].

**Çizelge 4.3 :** Siyah dros: Alüminyum metal içeriği [31].

Boyut	% işlenmiş	% Al içeriği	Market
Kaba konsantre	2-6%	>90%	Alaşımli Külçe / Yeniden Eritilmiş Hurda Külçe
İnce konsantre	2-10%	+85-90%	Alaşımli Külçe / Yeniden Eritilmiş Hurda Külçe
Kaba tozlar	25-35%	15-40%	Ekzotermik/flaks/arazi dolgusu
İnce tozlar	40-50%	10-25%	Ekzotermik/flaks/arazi dolgusu
Torba tozu	5-10%	<15%	İkincil flaks geri dönüşümü / arazi dolgusu
Toplam	100%	15-25%	



**Şekil 4.7 :** Siyah dros [30].

Kalsinasyon işlemi, alüminyum beyaz drosun metalik olmayan kısmındaki tuzların uzaklaştırılması, diğer safsızlıkların giderilmesi ve döner fırında alüminanın ( $Al_2O_3$ ) saflaştırılması için gerçekleştirilir. Atmosferik basınç altında NaCl ve KCl tuzlarının buharlaşma sıcaklıkları yaklaşık 1400 °C olarak hesaplanmıştır [33].

## 5. ALÜMİNA

$Al_2O_3$ , alüminyum ve oksijen atomlarından oluşan inorganik bir madde olan alüminanın kimyasal formülüdür. Doğal olarak oluşan en yaygın alüminyum türlerinden biridir. Alfa ( $\alpha$ ), gama ( $\gamma$ ) ve teta ( $\theta$ ) alümina, alüminanın en yaygın kristalografik formlarıdır. Bu birçok fazın her biri, onları belirli amaçlar için uygun kılan benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir [34]. Alümina ( $Al_2O_3$ ) alüminyum ve oksijen içerir ve amfoterik bir oksittir. Alümina beyaz ve katı bir görünüme sahiptir. Alüminanın erime noktası  $2050\text{ }^\circ C$ 'dir. Molar kütlesi  $101,96\text{ g/mol}$ 'dür [34]. Alüminanın mekanik özellikleri aşağıda gösterildiği gibidir;

**Çizelge 5.1** : Alüminanın mekanik özellikleri @ $20^\circ C$  [35].

Özellikler	Değer	Birim
Yığın Yoğunluğu	3.96	$g/cm^3$
Çekme Dayanımı	220	MPa
Eğilme (Bükülme) Dayanımı	410	MPa
Elastik Modül	375	GPa
Sertlik	14	$Kg/mm^2$
Kırılma Tokluğu	4-5	$MPa*m^{1/2}$

### 5.1 Ergimiş Alümina

Ergimiş alüminyum oksit üretim tekniği on dokuzuncu yüzyılın sonlarına doğru oluşturulmuştur ve  $2000^\circ C$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda elektrik ark fırınlarında kalsine boksit ve alüminanın elektrotermal eritilmesini içerir. Elde edilen ergimiş alüminyum oksitler -alüminyum oksit bazlı sentetik sert minerallerdir. Ergimiş alüminyum oksitler Mohs ölçeğinde 9 sertlik derecesine sahiptir ve bu da kaydedilmiş en sert malzeme olan elmas (Mohs 10) ile karşılaştırılabilir. Olağanüstü sertliğin yanı sıra, ergimiş alüminyum oksitler keskin kenarlı tanelere, yüksek yapısal kapasiteye, güçlü şok direncine ve termal ve kimyasal stabiliteye sahiptir. Sonuç olarak, ergimiş alüminalar aşındırıcılar, refrakterler, kumlama ve benzeri gibi çeşitli endüstrilerde kullanım için son derece uygundur. Ergimiş alümina sadece yüksek saflık gerektirmez,

aynı zamanda gerekli özelliklere de sahiptir. Ergitilmiş ürünlerin ergitilmemiş ürünlere kıyasla yüksek saflıkta ve düşük gözenekli olması, kimyasal saldırılara karşı dirençlerini destekler [36].

Aynı zamanda, ergimiş alüminanın toz formu, elektrik yalıtım ürünlerinde kullanım için uygun bir malzemedir. Alüminadaki istenmeyen safsızlıklardan biri sodadır ( $Na_2O$ ). Soda, alümina ile reaksiyona girerek beta alümina oluşturur ve bu da refrakterin daha yumuşak olmasına, kimyasal saldırılara karşı daha az dirençli olmasına ve yalıtım özelliğinin azalmasına neden olur. Bu durumun sonucu olarak ergimiş alüminada açıklıklar ve çatlaklar görülebilir. Bu nedenle alümina içerisindeki soda miktarı azaltılmaya çalışılır. Bunun gerçekleşmesi için gerekli olan reaksiyon [36]:



Bu reaksiyonda ağırlık oranları 1 birim sodada 0,194 birim karbon kullanılarak elde edilmelidir. Stokiyometrik hesaplamalar yardımıyla alüminanın ağırlıkça %1,7 karbon içeriği kullanılarak soda içeriği %0,45'ten %0,05'e düşürülür. Eklenen karbon içeriğinin miktarının önemli olmasının nedeni, büyük miktarlarda eklenmesi durumunda alüminyum oksikarbid oluşmasıdır. Bu proses en yaygın kullanılan soda indirgeme prosesidir. Alüminanın soda içeriği bu işleme benzer birçok yöntemle azaltılır.

Keşfinden bu yana piyasada farklı tipte ergimiş alüminalar görülmüştür. Bunlar arasındaki ayırt edici faktörler; bileşim (esas olarak alümina içeriğinden kaynaklanır) ve malzemede bulunan diğer alaşım oksitleri ve kristal boyutu olarak sıralanabilir. Söz konusu parametreler göz önünde bulundurulduğunda ergimiş alümina türleri aşağıdaki gibi sıralanabilir: Kahverengi, Beyaz, Pembe ve Yakut [36].

Beyaz ve kahverengi ergimiş alümina üretimi için kullanılan fırının gücüne bağlı olarak farklı enerji tüketim değerleri mevcuttur. Kahverengi ergimiş alümina üretiminde ton başına kullanılan fırın gücüne göre 2650 ila 1930 kWh enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Beyaz ergimiş alümina ise yine fırın gücüne bağlı olarak 1500 ila 1280 kWh arası ton başına bir tüketim gerçekleştirilmektedir. Kahverengi ergimiş alümina üretiminde daha fazla enerji tüketiminin temel sebebi ise kullanılan hammadde farkıdır. Beyaz ergimiş alüminada saf alümina hammadde olarak kullanılırken, kahverengi ergimiş alümina üretiminde ise boksit hammadde olarak

tercih edilmektedir. Boksitin içerisinde bulunan alümina harici bileşiklerin de gerekli ergime sıcaklığına ulaşması için tüketilen enerji nedeniyle kahverengi ergimiş alüminanın ton başına tüketilen enerji miktarı, beyaz ergimiş alüminaya göre daha yüksek olmaktadır.

**Çizelge 5.2 :** Farklı ergimiş alümina türlerinin enerji gereksinimleri ve fırın verimleri [36].

Ürün	Fırın Gücü (kW)	Birim Başına Enerji (kW.h per Mt)	Verim
Kahverengi Ergimiş Alümina	2000-12000	2650-1930	
Beyaz Ergimiş Alümina	1600	1500	70
(Pembe ve Yakut için de geçerlidir.)	3000	1350	78
	5000	1280	82

## 5.2 Kahverengi Ergimiş Alümina

Kahverengi ergimiş alümina, düşük titanya (normal olarak adlandırılır) veya yüksek titanya (semifriable olarak adlandırılır) olmak üzere iki farklı tipte üretilir. Aralarındaki temel fark, adından da anlaşılacağı gibi, titanya miktarlarıdır. Yüksek titanyalı kahverengi ergimiş alümina %3 ila %3,5 arasında  $TiO_2$  içerirken, düşük titanyalı ergimiş kahverengi alümina %2 ila %2,7  $TiO_2$  içerir. Silika içerikleri de aralarında farklılık gösterirken, normal tip yarı gevrek ergimiş kahverengi alüminadan daha fazla silika içerir. Normal tipin genellikle daha sert olduğu kabul edilir. Geçmişte normal tip baskın olmasına rağmen, son yıllarda semifriable tip kahverengi ergimiş alümina endüstride daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Kahverengi ergimiş alümina, boksitin elektrik ark fırınına beslenmesiyle üretilir. Farklı boksit bileşimleri, mükemmel bir karbon oranı elde etmek için şarj miktarının hesaplanması açısından en uygun proses koşullarının oluşturulmasını özellikle zorlaştırmaktadır. Önceleri  $TiO_2$ , bir demir çubuk numunesi kullanılarak ve rengine bakılarak değerlendirilirken, spektroskopi teknolojilerindeki son gelişmelerle birlikte üretim sırasında söz konusu özelliğin belirlenmesi için genellikle bir X-Işını Floresans analizi yapılmaktadır [36].

Boksitten farklı derecelerde ergimiş alümina üretilebilir. Kahverengi Ergimiş Alüminanın (KEA) %97'si  $Al_2O_3$ , diğer %2'si ise  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ , vb.dir. Ergitme sırasında kimyasal yapıyı değiştirerek, KEA tane özellikleri değiştirilebilir. Artan  $TiO_2$  içeriği ile tokluk artar ve bunun tersi de geçerlidir.  $TiO_2$  içeriği, partikül

boyutu ve şekli kontrol edilerek daha gevrek, daha soğuk bir kesme aşındırıcısı üretilebilir [37].

Az miktarda cam fazı ve  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kristal fazı kahverengi ergimiş alüminanın çoğunluğunu oluşturur. Kahverengi ergimiş alümina, yüksek sıcaklık kararlılığı, ultra yüksek sertliği ve iyi korozyon direnci nedeniyle taşlama malzemeleri ve taşlama aletleri, refrakter malzeme ve filtre ortamı gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel hazırlama yönteminde kahverengi ergimiş alümina, boksit, kok kömürü ve demir talaşı karışımının bir ark fırınında (> 2000°C) birkaç saat boyunca elektrikle ergitilmesiyle oluşturulur.

Bununla birlikte, hammadde olarak boksit kullanan geleneksel kahverengi ergimiş alümina işleme yöntemi, son yıllarda boksit mineral kaynaklarındaki artan kıtlık nedeniyle hızla daha az rekabetçi bir geleceğe işaret etmektedir. Boksitin yerine geçecek bir ürün bulmak çok önemli ve büyük bir öneme sahiptir.

Alüminyum dros, alüminyum üretiminin elektrolitik veya döküm işlemleri sırasında üretilen ergimiş drostur. Çoğunlukla Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO ve Al ile az miktarda nitrür ve klorürden oluşur. Bu arada, alüminyum drosundan üretilen kahverengi ergimiş alümina yüksek termal genleşme katsayısına, düşük sertliğe ve düşük mukavemete sahiptir. Üretim yöntemi, yüksek miktarda karbon, silisyum ve demir bileşenleri nedeniyle daha fazla enerji tüketimi gerektirmekte ve bu da kaçınılmaz olarak üretim maliyetini artırmaktadır. Hassas taşlama sırasında, sert bir tane (yani gevrek olmayan bir tane) donuklaşır ve sadece bir parçanın yüzeyine sürtünür [38].

Tipik bir kahverengi alümina üretim tesisi kurulumunu 3500kW'lık fırınlardan oluşan bir batarya oluşturur. Kalsine boksit, demiryolu vagonları veya damperli kamyonlarla kapalı ray bunkerlerine teslim edilir. Boksit, bantlı konveyörler ve kovalı elevatörler kullanılarak 1000 tonluk beton siloların tepesine taşınır. Boksit, silolardan karışımın hazırlandığı tesisteki depolama kutularına aktarılır. Ayrıca, reverts, kok ve demir borları gibi ürünlerin depolanması için konteynerler bulunmaktadır. Toplu ağırlık kantarlarında tüm malzemeler tartılır. Kantarlardan alınan malzeme, bir toplama bandı konveyörü ile dönen bir parti mikserine boşaltılır. Partiler, bir kovalı elevatör ve bantlı konveyörler kullanılarak mikserden fırın besleme tanklarına taşınır [36]. Tipik bir şarj

1000 kilogram boksit, 146 kg demir, 40 kg kok kömürü ve 100 ila 600 kg revertingden (proses içerisindeki döngü) oluşur [39].

**Çizelge 5.3 :** Kahverengi ergimiş alümina kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri [40].

Kahverengi Ergimiş Alümina			
Kimyasal Analiz		Fiziksel Özellikler	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	94.5%	Hammadde	High Quality Bauxite
TiO <sub>2</sub>	2.7%	Yığın Yoğunluğu	1.4-1.8 g/cm <sup>3</sup>
SiO <sub>2</sub>	0.9%	Mohs Sertliği	8-9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0%	Parçacık Şekli	Kenarlı
CaO	0.1%	Özgül Ağırlık	4.0 g/cm <sup>3</sup>
MgO	0.3%		



**Şekil 5.1 :** Kahverengi ergimiş alümina

### 5.3 Beyaz Ergimiş Alümina

$\alpha$ -alümina, kalsine bayer alüminanın %99'undan fazlasını oluşturur ve safsızlıkların çoğunu soda (Na<sub>2</sub>O) oluşturur. Beyaz ergimiş alümina, bayer alüminanın ark füzyonu ile üretilir. TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ve diğer oksitlerden neredeyse yoksun olan beyaz ergimiş alümina aşındırıcı, tipik olarak takım odası taşlama uygulamaları için vitrifiye bağlama ile kullanılır. Beyaz ergimiş alümina, gevrekliği nedeniyle soğuk kesime izin verir, bu da onu takım oluşturmak için sıklıkla kullanılan alaşımlı, yüksek hızlı ve ısı işlem görmüş çeliğin hassas taşlanması için mükemmel kılar [41].

Hammaddenin saflığına ve bir ergimiş alümina bloğu içindeki çeşitli ergimiş alümina derecelerinin seçimine bağlı olarak farklı ergimiş alümina dereceleri mevcuttur. Beyaz ergimiş alüminanın özellikleri üzerinde en büyük etkiye sahip olan safsızlık Na<sub>2</sub>O'dur.

Sırasıyla çok düşük ve çok yüksek Na<sub>2</sub>O içeriğine sahip bölgeler vardır. Beyaz ergimiş alümina bloklarında Na<sub>2</sub>O konsantrasyonu %0,07 ile %4,0 arasında değişmektedir. Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile reaksiyona girdiğinde β-Alumina (Na<sub>2</sub>O.11Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) oluşur. β-alüminanın Mohs sertliği (6,5-7 vs. 9) korunduma göre oldukça düşüktür. Düşük sertlikteki β-alümina tozları daha sonra korundumdan daha küçük boyutlarda ezilmiş ve elenmiş, bu da beyaz ergimiş alümina ince tanelerinde Na<sub>2</sub>O birikmesine (segregasyon) yol açmıştır. Dökülebilir davranışı ve refrakter özelliği, beyaz ergimiş alümina ince tanelerinde bulunan çözünebilir Na<sub>2</sub>O miktarından önemli ölçüde etkilenmektedir. Çoğunlukla en az 1 mm boyutunda büyük, birbirine bağlı, açık makro gözeneklerden oluşur. Çin ve Japonya’da yoğun ergimiş alümina geliştirmiş ve kullanmaktadır. Bunu üretmek için bayer alümina hammaddesiyle birlikte küçük miktarlarda indirgeyici katkı maddeleri kullanılır. Kapalı gözenekliliğin olmaması nedeniyle yoğunluk 3,90 g/cm<sup>3</sup> 'e ulaşabilir, ancak çok düşük bir termal şok direncine sahiptir [42].

Beyaz ergimiş alümina üretimindeki temel sorun, güvenilir bir şekilde beyaz bloklar veya parçalar elde etmektir. Çok sayıda araştırmacı bu konuyu incelemiş ve aynı bulgulara ulaşmıştır: karbon, metalik alüminyum, kükürt ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiO<sub>2</sub> gibi oksitlerin varlığı ve bunların etkileşimi kirli beyaz veya gri ergimiş alümina oluşumuna neden olmaktadır. 1100°C ve üzerinde kavurma ile gri renk bir şekilde ortadan kaldırılabilir. Ancak bu her zaman işe yaramamaktadır [40]. Wozniak, gri taneleri seyreltilmiş kostik ve sülfürik asit çözeltilerinde bekleterek beyaz rengi geri kazandırmaktadır [43].

Ergimiş alüminanın beyazlığının iyileştirilmesi iki patentin konusudur. İlk yöntem, %2,5'e kadar kristal H<sub>2</sub>O içeren kalsine edilmemiş alümina ilavelerini içermektedir [44]. İkincisi ise hidrokarbon ve termoplastik reçinelerin miktarını çok az arttırmaktadır [45]. Alüminaları akışkan yataklarda kalsine etmeye yönelik mevcut bir eğilim vardır, bu da giderek daha fazla higroskopik γ-alümina içerecekleri anlamına gelir. Sonuç olarak, kalsine edilmemiş alümina ilavelerine artık gerek kalmayacaktır [46,47].

**Çizelge 5.4 :** Beyaz ergimiş alümina kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri [36].

Beyaz Ergimiş Alümina			
Kimyasal Analiz		Fiziksel Özellikler	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,53%	Hammadde	Kalsine Alümina
Na <sub>2</sub> O	0,33%	Yığın Yoğunluğu	1,62-1,83 g/cm <sup>3</sup>
SiO <sub>2</sub>	0,04%	Mohs Sertliği	9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10%	Parçacık Şekli	Keskin kenarlı Bloksu
C	0,03%	Özgül Ağırlık	3,90-4,10 g/cm <sup>3</sup>



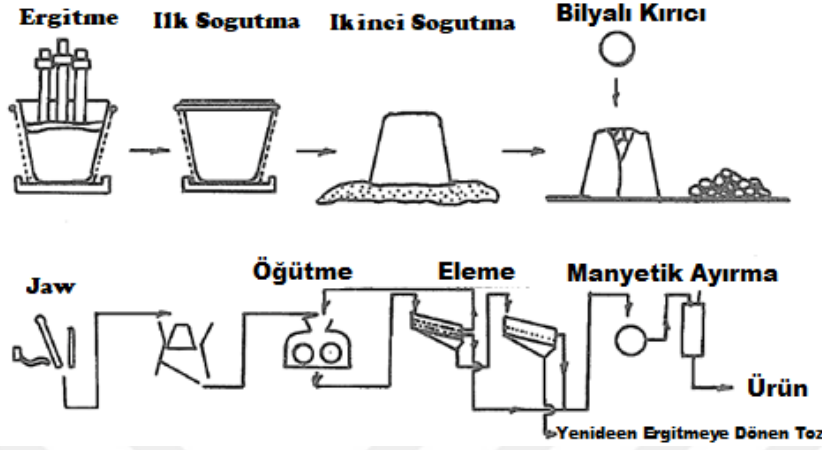
**Şekil 5.2 :** Beyaz ergimiş alümina.

Şekil 5.3'de beyaz ergimiş alümina üretimi için bir akış şeması gösterilmektedir. Tipik bir blok tipi fırın, su soğutmalı ve ortalama çapı ve yüksekliği yaklaşık 1830 mm olan Hutchins tipi bir çelik potadan oluşur. Duvarın dışından damlayan su, 20 ila 25 mm kalınlığındaki çeliğin aşırı ısınmasını önler.

Banyo kirlenmesini azaltmak için grafit elektrotlar (200-250 mm çapında) kullanılır. Bir transfer tabanı tarafından desteklenen pota, yaklaşık 150 mm yüksekliğe kadar eriyikle dolana kadar iki elektrotun altında tutulur. Daha sonra pota, 12 ila 16 saat süren birincil soğutma işlemi için raylar üzerinde bir soğutma istasyonuna taşınır. Bu süre zarfında, çeliğin aşırı ısınmasını önlemek için soğutma suyu akışı potanın dışında tutulur. Pig, 2 ila 3 gün süren ikincil soğutma işlemine başlamak için alümina ince tanelerinden oluşan bir yatağın üzerine yatırılır.

Düşen bir bilye, yaklaşık 10 ton ağırlığındaki pig'i 400 mm'den daha küçük parçalara ayırır ve bunlar daha sonra bir çeneli kırıcıya beslenir. Çeneli kırıcının tahliye malzemesi bir döner ve/veya merdaneli kırıcıya beslenir. Merdaneli kırıcının çıktısı, düşük ve yüksek yoğunluklu manyetik ayırıcılardan geçmeden önce bir dizi elek üzerinde boyutlandırılır. İşleme sırasında alınan tüm demirin tamamen ortadan

kaldırılması için manyetik işlemin son derece kapsamlı olması gerekir. Bitmiş ürün daha sonra kaplamalı aşındırıcılar ve taşlama taşları üreten fabrikalara teslim edilir [36].



Şekil 5.3 : Beyaz ergimiş alümina basitleştirilmiş akış şeması [36].

#### 5.4 Pembe ve Yakut Ergimiş Alümina

Kalsine alüminaya eklenen krom oksit miktarı, bu ergimiş alüminaların ne kadar renkli olduğunu belirler. Ergimiş alümina ile aynı şekilde üretilirler ve ne kadar krom oksit içerdiklerine bağlı olarak aralarında ayırım yapabiliriz:

0,07 ila %0,20  $Cr_2O_3$  içeren pembe ergimiş alümina

0,20 ila %0,70  $Cr_2O_3$  içeren kırmızı ergimiş alümina

1,50 ila %2,50  $Cr_2O_3$  içeren yakut ergimiş alümina

Mikrosertlik %1,25'te zirve yapar ve artan  $Cr_2O_3$  içeriği ile yükselir [36].



Şekil 5.4 : Pembe ergimiş alümina.

## Pembe ergimiş alümina

Performans açısından pembe ergimiş alümina, beyaz kadar iyi performans göstermektedir [36].

Pembe ergimiş alümina adı verilen katı aşındırıcı,  $\alpha$ -alümina içinde çözünmüş eser miktarda krom (%0,5  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) içerir. Beyaz ergimiş alüminadan daha sert olan bu aşındırıcı, farklı form tutma yeteneklerine ve dayanıklılığa sahiptir. Sertliği artırmak için az miktarda  $\text{TiO}_2$  eklenir. Sert alaşımlı çelikler genellikle hassasiyet, geniş yüzeyler ve takım odaları için pembe alümina ile taşlanır. Taneler bloklu veya kıymıklı şekillerde gelir ve ortalama kristal boyutu orta düzeydedir [41].

**Çizelge 5.5 :** Pembe ergimiş alümina kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri [36].

Pembe Ergimiş Alümina			
Kimyasal Analiz		Fiziksel Özellikler	
$\text{Al}_2\text{O}_3$	98,79%	Hammadde	Kalsine Alümina-Krom Cevheri
$\text{TiO}_2$	0,28%	Yığın Yoğunluğu	1,75-1,95 g/cm <sup>3</sup>
$\text{SiO}_2$	0,18%	Mohs Sertliği	9
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,33%	Parçacık Şekli	Bloklu-Keskin Kenarlı
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,07%	Özgül Ağırlık	3,9-4,1 g/cm <sup>3</sup>
CaO	0,12%		
C	0,02%		

## Yakut ergimiş alümina

Pembe ergimiş alüminanın aksine, yakut ergimiş alümina yüksek krom içeriğine sahip koyu kırmızı, ergimiş bir aşındırıcıdır. Yakut ergimiş alümina, pembe aşındırıcıdan biraz daha dayanıklıdır çünkü gevrek ve krom ilavesiyle sertleştirilmiştir. Kimyasal olarak aşındırıcı %97  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve %3  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 'ten oluşur. Az miktarda  $\text{SiO}_2$ , CaO, MgO ve  $\text{Na}_2\text{O}$  karışımı tamamlar. Soğuk kesim gerekli olduğunda, bu tane taşlama işlemlerinde kullanılır. Bu taşlar makine atölyelerinde yüksek hız ve yüksek alaşımlı çelikleri taşlamak için kullanılır [41].

**Çizelge 5.6 :** Yakut ergimiş alümina kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri [36].

Yakut Ergimiş Alümina			
Kimyasal Analiz		Fiziksel Özellikler	
$\text{Al}_2\text{O}_3$	96,77%	Hammadde	Kalsine Alümina-Krom Oksit
$\text{TiO}_2$	0,25%	Yığın Yoğunluğu	1,92 g/cm <sup>3</sup>
$\text{SiO}_2$	0,11%	Mohs Sertliği	9
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,18%	Parçacık Şekli	Açısız veya Bloklu
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	2,03%	Özgül Ağırlık	3,90-4,1 g/cm <sup>3</sup>
CaO	0,10%		
MgO	0,04%		
$\text{Na}_2\text{O}$	0,61%		

## 5.5 Elektrik Ark Fırınında Ergimiş Alümina Üretimi

### Fizikokimyasal prensipler

Ergimiş alümina üreten bir fırında gerçekleşen reaksiyonlar oldukça karmaşıktır. Hammadde olarak beslenen boksit, içerisinde alümina hariç bir çok empüriteyi de beraberinde fırın içerisine taşımaktadır. Örneğin %85 alümina içeriğine sahip bir boksit fırına beslendiğinde, ergitme sonrasında curuf olarak %94 alümina ve üzeri içeriğe sahip ürün elde edilirken gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir [36];



Yukarıdaki reaksiyonların indirgenme kolaylığı, serbest enerjideki değişimleri ile gösterilmektedir. Fırın içerisindeki indirgenmesi en zor olan ise  $\text{TiO}_2$ 'dir.  $\text{TiO}_2$ 'nin %1'in altına indirgenmesi için ferrosilisyum-titanyum alaşımına giren alüminyum metalinin de artması gerekmektedir. Alüminanın redüklenmesi ile artan metalik alüminyum sayesinde curufta bulunan  $\text{TiO}_2$  safsızlığı da indirgenerek metale geçmektedir. Bu sayede daha saf bileşiğe sahip bir curuf elde edilirken daha yüksek Ti ve Al içeriğine sahip ferrosilisyum elde edilebilmektedir. Bu nedenle alaşımın bileşimi Çizelge 5.7'de belirtildiği gibi ergimiş alümina saflığı ile anlaşılabilir [36].

**Çizelge 5.7 :** Ferro-Silisyum içeriğine göre curuftaki alümina içeriği (ağırlıkça %) [36].

Curuftaki Alümina	Si	Fe	Ti	Al	C
94-95	12-16	73-80	1,5-3,5	1,5-3	0,2-0,7
95-97	14-18	74-77	3,0-4,5	2,5-5,0	0,5-1,0
>99	8-10	68-72	5-8	8-11	1-2

Alümina, boksit ve ergimiş alüminanın ergime sıcaklıkları uygun ekipman kullanımı ve gerekli güvenlik önlemlerinin alınabilmesi için büyük önem arz etmektedir. Saf alüminanın ergime noktası ise  $2054 + 6^\circ\text{C}$ 'dir. Ayrıca, fırın içerisinde bulunan ergimiş alüminanın yoğunluğu proses için önemli bir parametredir [36].

Füzyon fırınlarında, uygun çalışma sıcaklığını elde etmek için ise faz diyagramlarındaki ergime noktalarından 50° ila 100°C yüksek sıcaklık noktalarında çalışmak daha elverişlidir[36].

### **Fırın kullanımı**

Ergimiş alümina üretiminde kullanılan fırınlar skull prensibine dayanan ark dirençli tip fırınlardır. Skull prensibi, fırınların iç duvarlarında koruyucu bir katman oluşturularak astarın ömrünü uzatır ve termal aşınmayı azaltır. Bu katman, fırın astarını yüksek sıcaklık ve kimyasal saldırılardan koruyarak fırının verimliliğini artırır. Elektrik ark fırınları ve cam eritme fırınları gibi yüksek sıcaklıklı endüstriyel fırınlarda yaygın olarak kullanılır [36].

Katılaşmış ergiyik veya skull ergimiş ürünü hapseder ve bu sayede ergiyikte herhangi bir kontaminasyonun önüne geçilebilmektedir. Skull astarlanabilen bir kabuk içinde bulunmaktadır. Beyaz ergimiş alümina üretimi sırasında, saf alümina kullanıldığı için metalik ergiyik oluşma tehlikesi olmadığından dolayı astar kullanımı gerekmemektedir. Ancak kahverengi ergimiş alümina üretiminde olduğu gibi metal oluşumunun kaçınılmadığı durumlarda, kabuk grafit veya karbon astar ile korunmaktadır [36].

Skull kalınlığının çelik kabukta bir kırılmayı önlemek için sabit kalması son derece önemli arz etmektedir. Bu nedenle ergitme, ısı kayıplarının skull-ergime arayüzündeki ısı girişine eşit olması gereken sabit durum koşullarında gerçekleştirilmelidir. Nispeten ince bir skull yapısını korumak için, çelik kabuk dış yüzeyinden akan bir su filmi ve altta çarpan spreyle soğutulur. Bazen, örneğin magnezya gibi bir refrakterle desteklenen kalın duvarlı skulllar kullanılır ve bu da kabuktaki su soğutmasını gereksiz hale getirmektedir [36].

### **Ergimiş Alümina Üretimi**

Ergimiş alümina üretiminde kullanılan fırın tipi Elektrik Ark Fırını (EAF) olup, üretimde fırının avantajları göz önünde bulundurulmalıdır. EAF demir veya demir dışı malzemelerin ergitilmesi için kullanılır ve çalışma prensibi yüksek fırından farklıdır. Bu nedenle EAF'nin avantajlarına ve çalışma prensiplerine bakmakta fayda vardır. Elektrik ark fırını metali ergitmek için kullanılır ve proses için ikincil bir ısıtma kaynağı sağlar. Elektrik ark fırınının üstünde ve altında iki elektrot vardır. Ergitme işlemi bu elektrotlar arasında gerçekleşir. Elektrik ark fırınlarında kullanılan elektrot

malzemesi önemlidir. Kullanılan malzemeler yüksek sıcaklığa dayanıklı karbon veya grafitir.

EAF elektrotları arasında bir boşluk vardır ve ergitilecek hammadde buraya konur. Her iki tarafa uygulanan elektrik akımının geçebilmesi için hava iletken görevi görür. Normal şartlar altında havanın elektrik iletkenliği düşüktür. Ancak EAF'nin çalışma prensibine bağlı olarak uygulanan yüksek gerilim sayesinde elektrotlar arasındaki hava iletken görevi görür. Yüksek akım ile gerçekleşen elektriksel iletkenliğe ark, bu prensibi kullanarak metal eriten fırınlara da elektrik ark fırını denir. Metalin erimesi, oluşturulan arkin elektrotların ısınmasına neden olmasından kaynaklanmaktadır. Oluşan ısı nedeniyle sıcaklık 3000°C'ye kadar ulaşabilir ve metal eritme işlemi gerçekleştirilir. Ergitme potasının içi yüksek sıcaklık uygulamalarına göre refrakter malzeme ile kaplanır ve ergitilecek malzeme ile herhangi bir kimyasal reaksiyona neden olmaması önemlidir. Alümina ergitme işlemi sırasında sıcaklıklar 2000°C'ye kadar yükseltilir ve ergitme sağlanır [48].

Beyaz ergimiş alüminanın genel üretim aşamasına adım adım:

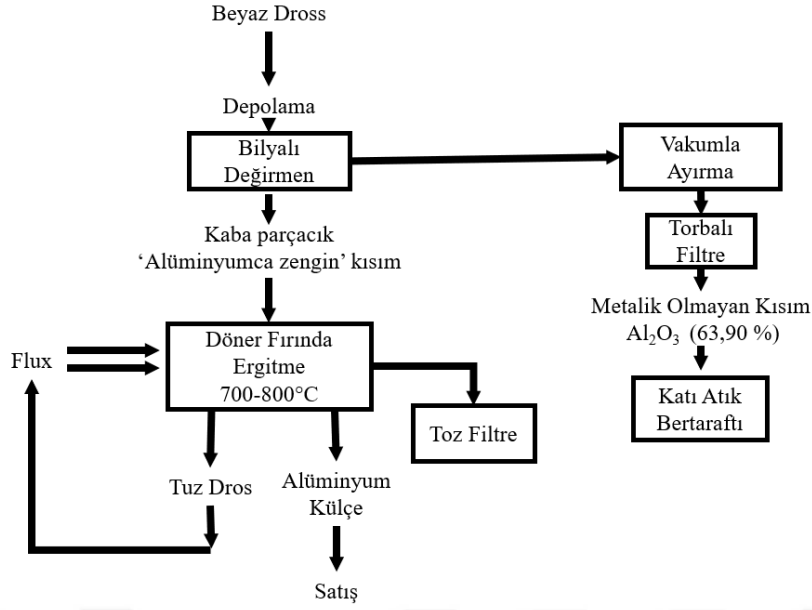
- Üretim aşamasında, kullanılacak hammaddeler (boksit veya alümina) 2000°C'nin üzerine çıkarmak için elektrik ark fırınına şarj edilir.
- Üretilen ergimiş alümina külçeleri daha sonra soğutma işlemine alınır.
- Sırasıyla gerçekleşen füzyon ve soğutma işlemlerinden sonra öğütme işlemi gerçekleştirilir.
- Daha sonra oluşan bileşenler eleme işlemine alınır. Eleme işleminde sınıflandırma gerçekleşir.
- Daha sonra çökeltme tanklarında işlem devam eder.
- Sonrasında saflaştırma için belirli ara işlemler gerçekleştirilebilir.
- Ve son eleme işlemi gerçekleştirilir.

Tüm bu işlemler sonucunda hammaddenin cinsine göre farklı ürünler olan kahverengi ve beyaz ergimiş alümina üretilir.

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada alüminyum ergitme endüstrisindeki atık olarak ortaya çıkan beyaz drosların ekonomik olarak geri kazanılması hedeflenmiştir. Beyaz droslar geri dönüşüm tesislerinde; kırma, öğütme, ayırma gibi geleneksel mekanik yöntemler yardımıyla iki farklı kısma ayrılmaktadır. Droslar içerdiği yüksek miktarda metalik alüminyumun sünek ve alüminyum oksitinin gevrek davranışı sayesinde iki farklı malzeme olarak ayırmak mümkün hale gelmektedir. Bu tez çalışmasında metalik kısım ve metalik olmayan kalıntı olarak isimlendirilen iki malzeme için farklı geri dönüşüm ve kazanım deneyleri tasarlanmıştır. Metalik kısım için hazırlanan deney setinde flaks ilavesi ile indüksiyon fırın yardımıyla metalik alüminyum külçe üretimi hedeflenmiştir. Metalik olmayan kalıntı ise normal şartlarda endüstriyel uygulamalarda kullanılmamakta ve atık depolama sahalarında bertaraf edilmektedir. Ancak bu çalışmada metalik olmayan kalıntı bir hammadde olarak kullanılarak, tekno-ekonomik değere sahip ergimiş alümina üretimi hedeflenmiştir. Dros ayrıştırma prosesinin kütle dengesi yaklaşık olarak %60 metalik olmayan kalıntı, %40'ı ise metalik kısımdır. Geri dönüşüm tesislerinde alüminyum ergitme drosunun değerlendirilmesindeki adımların detaylarını gösteren akış şeması Şekil 6.1'de verilmiştir. Endüstriyel akış şemasındaki çıktılardan biri olan metalik olmayan kalıntı adlı ürün, içerdiği karmaşık ve doğrudan kullanımı teknik olarak engelleyen içerikleri nedeniyle piyasada kullanım alanı bulmakta zorlanmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada metalik olmayan kalıntı kullanılarak doğrudan endüstriyel olarak kullanılacak ürünlerin elde edilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

ETİ Alüminyum tarafından temin edilen birincil dros hammaddeleri öğütme sistemi ile metalik ve metalik olmayan kalıntı olarak ayrıştırılmıştır. Bilyalı değirmen yardımıyla öğütülen drosun içindeki metalik olmayan kalıntı toz haline getirilmiş ve bu ince kısım torba filtre emiş sistemi yardımıyla toplanmıştır. Değirmende kalan kısım ise metalik alüminyum açısından zengin olan drosun kaba kısmıdır. Sistem durdurulduktan sonra öğütücü içerisinde kalan kaba partiküller öğütücünün kapağı açılarak boşaltılmıştır. Öğütücünün resmi Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.1 : Dross işleminin endüstriyel akış şeması.



Şekil 6.2 : Bilyalı öğütücü.

Öğütücü içerisinde kullanılan demir bilya topları işlem esnasında aşınmakta ve demir tozları öğütülen ürüne karışmaktadır. Bu yüzden öğütücüden alınan alüminyumca zengin metalik kısım manyetik ayırıcıdan geçirilerek kirlilik oluşturan demir tozundan temizlenmiştir. Manyetik ayırıcının çalışma esnasındaki görüntüsü Şekil 6.3'de verilmiştir. Beyaz dross öğütülmesi ile oluşan metalik olmayan kalıntı kısmı fan yardımı ile emilerek torbalı filtrede toplanmıştır. Torbalı filtrenin resmi 6.4'de verilmiştir. Toplanan metalik olmayan tozun görseli Şekil 6.5'de, metalik kısmın görseli ise Şekil 6.6'da verilmiştir.



**Şekil 6.3 : Manyetik ayırıcı.**



**Şekil 6.4 : Torbalı filtre.**

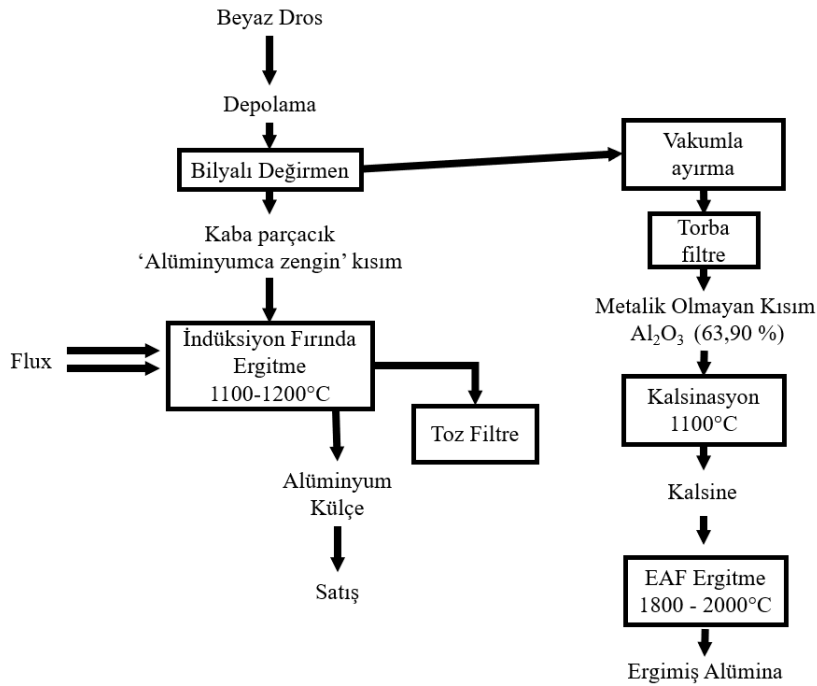


**Şekil 6.5 : Metalik olmayan kalıntı.**



Şekil 6.6 : Metalik kısım.

Öğütme, manyetik ayırma ve toz toplama işlemleri Topaloğlu Metal'de gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında yapılan uygulanan akış şeması Şekil 6.7'de detaylı olarak verilmiştir. Bu akış şemasından da görüleceği üzere drostan ayrılan metalik kısım (Al'ca zengin kısım) flaks ilavesi ile doğrudan ergitme işlemine tabi tutulurken, metalik olmayan kalıntı kısmı doğrudan veya kalsinasyon sonrası elektrik ark fırınında ergitme deneylerine tabi tutulmuştur.



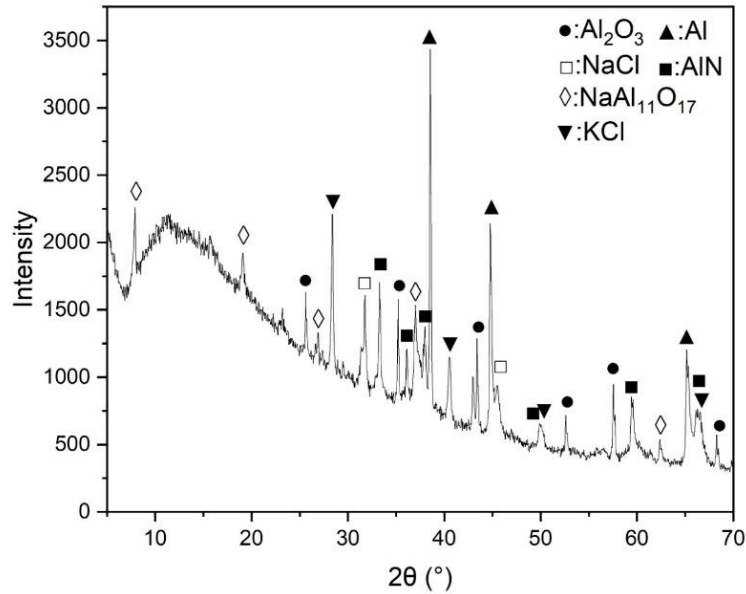
Şekil 6.7 : Bu projenin akış şeması.

## 6.1 Deneylerde Kullanılan Hammaddeler

Beyaz drosun içeriği homojen dağılmadığı için karakterizasyon genellikle metalik kısım ve metalik olmayan kalıntı birbirinden ayrıldıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Ayrıştırma oranları ile iki farklı kısmın kimyasal analizi ile yapılan hesaplama sonucunda beyaz drosun yaklaşık olarak bir hesaplanmış kimyasal analizi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bununla birlikte beyaz dros geldiği şekliyle analiz edilmeye çalışılmıştır. Beyaz dros ve drosdan elde edilen malzemelerin (metalik ve metalik olmayan) karakterizasyonları aşağıda verilmiştir. Bu yöntem uygulanarak elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2, Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4’de verilmiştir. İlk olarak Şekil 6.8’de verilen XRD ve Rietveld yöntemi ile numune analiz edilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere metalik alüminyum içeriği ağırlıkça %25,4’tür.  $Al_2O_3$ ’ün çok farklı bileşiklerde/yapılarda olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 6.1’de verilen hesaplanmış bileşimlerle benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, beyaz drosun metalik Al ve toplam  $Al_2O_3$  içerikleri kimyasal yöntemlerle analiz edilmiş ve sonuçlar aynı tabloda verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Beyaz drosun kimyasal analizi (ağırlıkça %).

	$Al_{Me}$	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Na_2O$	CaO	MgO	Cl	F	Diğer
Hesaplanan	26.80	38.34	4.90	8.60	3.82	6.38	6.33	1.77	3.04
Kimyasal Analiz	27.70	38.55	4.46	3.60	2.86	5.81	5.33	1.51	-



Şekil 6.8 : Beyaz drosun XRD analizi.

**Çizelge 6.2 :** Metalik olmayan kalıntının kimyasal analizi (ağırlıkça %).

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
63,90	0,18	2,43	11,10	1,49	0,09	0,06	0,01	-----	0,12
Cl	MgO	F	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO
4,81	3,99	1,86	1,53	0,68	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

**Çizelge 6.3 :** Kalsine edilmiş metalik olmayan kalıntının kimyasal analizi (1100 °C – 4 saat) (ağırlıkça %).

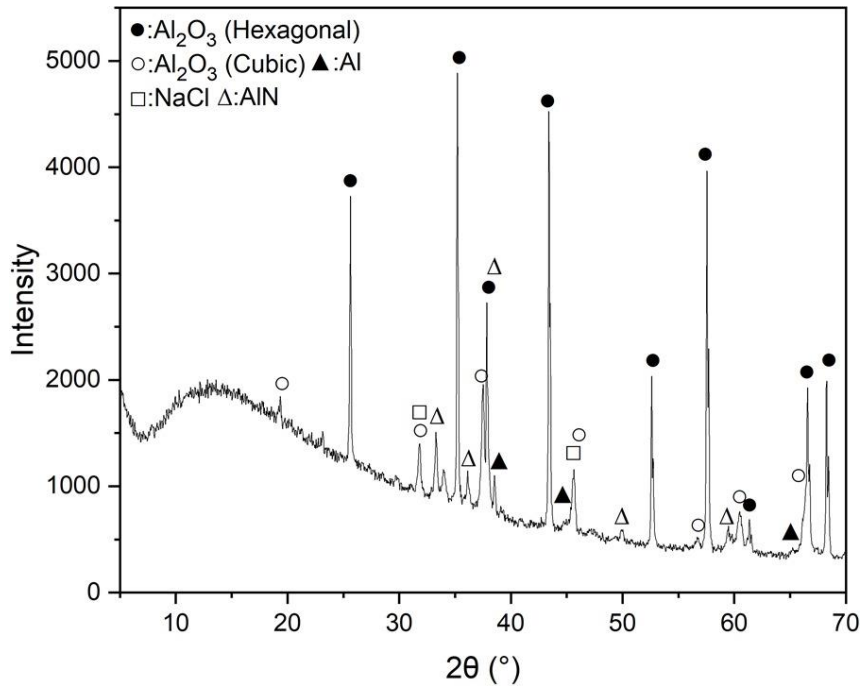
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	MgO	F	K <sub>2</sub> O
90,31	1,09	2,53	0,41	1,37	0,17	0,04	0,16	-	1,03	-	0,35

**Çizelge 6.4 :** Metalik kısım kimyasal analizi (ağırlıkça %).

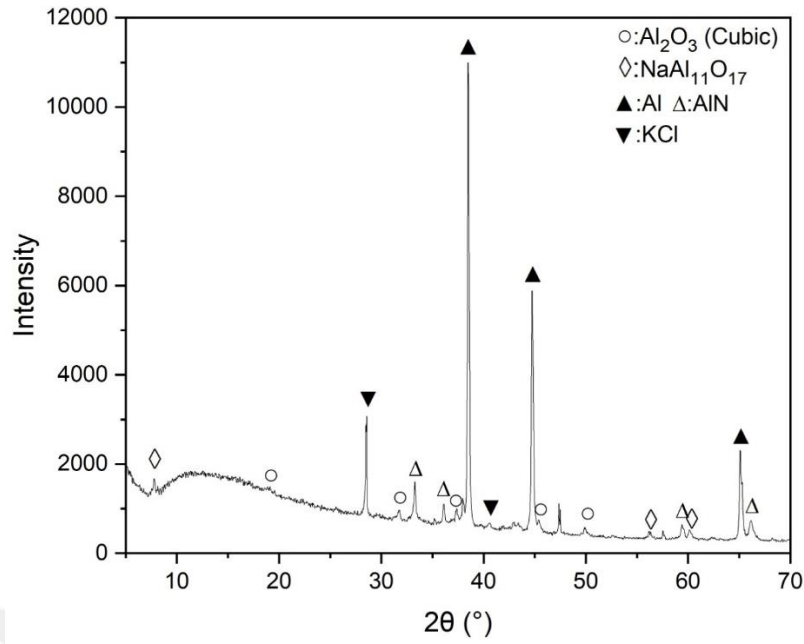
*Al <sub>Me</sub>	*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	Si	Na	Ca	Ti
58,80	21,71	1,68	4,01	1,80	5,23	0,22
Cl	Mg	F	S	K	Mn	Ba
8,62	6,01	1,64	0,08	3,17	0,12	0,02

\* Bu analizler AAS kullanılarak yapılmıştır. Kalan analizler XRF ile yapılmıştır.

Metalik kısım ve metalik olmayan kalıntının XRD analizleri sırasıyla Şekil 6.9, 6.10 ve Çizelge 6.5’de verilmiştir. Faz analizleri ETI Alüminyum’da Rietveld yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kalsine edilmiş metalik olmayan kalıntının XRD analiz sonuçları Şekil 6.11’de verilmiştir.



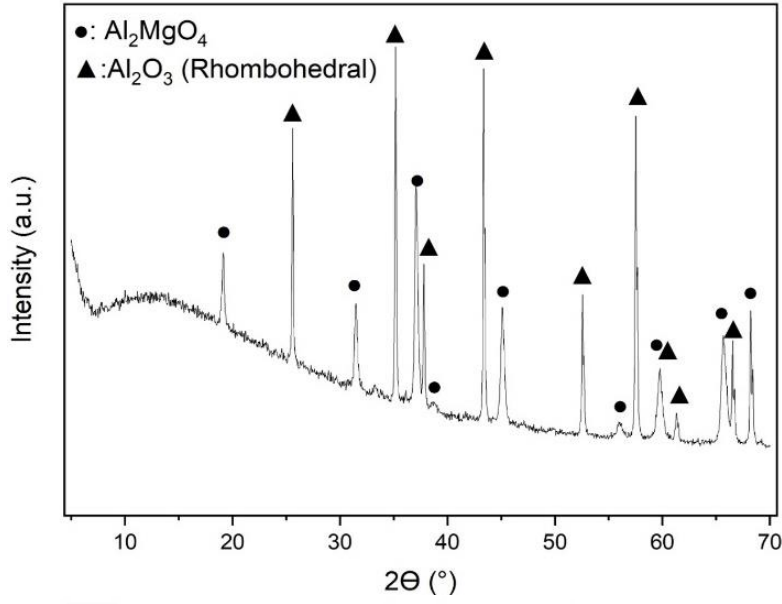
**Şekil 6.9 :** Metalik olmayan kalıntı XRD analizi.



Şekil 6.10 : Metalik kısım XRD analizi.

Çizelge 6.5 : Metalik olmayan kalıntı ve metalik kısım XRD analiz ve Rietvelt hesaplama sonuçları.

Metalik Olmayan Kalıntı		Metalik Kısım	
Faz	Ağırlıkça%	Faz	Ağırlıkça%
Aluminum: Al,	18,3%	1-) Aluminum: Al	67,9%
Corundum: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,	28,4%	2-) Aluminum Oxide: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,5%
Halite: NaCl,	23,3%	3-) Aluminum Titanium: Al <sub>1.1</sub> Ti <sub>0.9</sub>	6,1%
Aluminum Oxide: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,	7,9%	4-) Aluminum Phosphide: AlP	3,3%
Potassium Chlorate: K(ClO <sub>4</sub> ),	5,3%	5-) Villiaumite: NaF	3,2%
Magnesium Aluminum Oxide: (Mg <sub>0.374</sub> Al <sub>10.626</sub> )(Al <sub>1.782</sub> MgO <sub>0.012</sub> )O <sub>4</sub> ,	4,0%	6-) Corundum: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,1%
Ringwoodite: (Mg <sub>1.848</sub> Si <sub>0.05</sub> ),	3,8%	7-) Diaoyudaoite: NaAl <sub>11</sub> O <sub>17</sub>	2%
Sodium Aluminum Oxide: NaAlO <sub>2</sub> ,	3,4%	8-) Calcium Aluminum Silicide: CaAlSi	1,9%
Sodium Thiocarbonate Hydrate: Na <sub>2</sub> CS <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O,	2,9%	9-) Pyrolusite: MnO	17,4%
Sylvite: KCl,	1,5%	10-) Sylvite: KCl	0,6%
Titanium Oxide: TiO <sub>1.116</sub> ) <sub>3.26</sub>	1,2%		



Şekil 6.11 : Kalsine edilmiş metalik olmayan kalıntının XRD analiz sonuçları. (1100° - 4 saat).

## 6.2 Deneylerin Yapılışı

Beyaz drosun ayrıştırma işlemi tamamlandıktan sonra deneysel çalışmalara geçilmiştir. Deneysel çalışmalar iki farklı süreç ile yapılmıştır. Bunlar; indüksiyon fırında beyaz drosun metalik kısmından alüminyum alaşım elde edilmesi ve elektrik ark fırınında beyaz drosun metalik olmayan kısmından ergimiş alümina üretilmesi olarak planlanmıştır.

### 6.2.1 Metalik kısımdan alüminyum eldesi

Bu deneysel süreçte hammadde olarak kullanılması planlanan alüminyum ergitme beyaz drosun ayrıştırılması ile elde edilen metalik kısım, endüstriyel tesiste hazırlanarak İTÜ Pirometalurji Laboratuvarlarına getirilmiştir. Geri dönüşüm prosesleri genellikle küçük işletmelerde mühendislik bilgi ve becerisi yeterince dikkate alınmadan yapılmakta, üretilen metallerin içeriği ve geri kazanım verimi derinlemesine izlenmediğinden, bu konuda bilgi ve tecrübe birikimi sağlanamamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada bu malzemeler hammadde olarak kullanılmış ve bilimsel yöntemler izlenerek hammadde, ürün bileşimi ve metal geri kazanım verimliliği sistematik olarak ortaya konulmuştur.

Bu bölümde, bilyalı değirmenden geçen ve haznede kalan beyaz drosun metalik kısmının pirometalurjik olarak işlenmesi incelenmiştir. Öğütücü ortamdan kaynaklanan demir tozları manyetik ayırıcı yardımı ile uzaklaştırılmıştır.

Hali hazırda endüstride kullanılan iki farklı ergitme yöntemi, şarj bileşimine bağlı olarak laboratuvar koşullarında test edilmiştir. Bu amaçla sanayide kullanılan ticari flaks (KGD Aluflux 35) temin edilmiş ve kullanılmıştır. Deneysel çalışma iki deney seti olarak tasarlanmıştır. İlk deney setinin amacı, beyaz drosun metalik kısmını ergimiş flaks ile kaplayarak ergitmektir. İkinci deney setinde ise hammaddenin sadece yüzeyinin flaks ile kaplanması koşulları araştırılmıştır. İlk sette hammaddenin belirli bir yüzdesi kadar flaksın eritilmesi ile viskoz bir cüruf (tam erimemiş) yapısı elde edilmiştir. Daha sonra flaks içerisine hammadde ilave edilerek karıştırılmış ve ardından ergitilmiştir. Flaksın istenilen yapıya ulaşması için sıcaklık 750 - 800°C'ye çıkarılmıştır. Hammadde eklendikten sonra sıcaklık birkaç dakika 1100-1200°C'ye çıkarılmıştır. İkinci deney setinde ise flaksın belirli bir yüzdesi doğrudan şarj yüzeyine eklenmiştir. Her iki deney seti için de çeşitli parametreler araştırılmıştır. Parametreler Çizelge 6.25'de verilmiştir. Toplamda gerçekleştirilen 14 deneyin 9'u birinci deney setine göre, kalan 5'i ise ikinci deney setine göre gerçekleştirilmiştir. 1. ve 2. deneylerde toplam hammadde miktarının geri kazanım verimine etkisi araştırılmıştır

**Çizelge 6.6 :** Metalik kısmı ergitme için kullanılan flaksın kimyasal analizi.(ağırlıkça, %).

Flaks	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	LOI
	19,98	7,16	2,59	12,97	5,67	58,90



**Şekil 6.12 :** İndüksiyon fırını ve içerisinde ergitmenin yapıldığı F9 potası.



**Şekil 6.13** : Deney sonucunda elde edilen ergiyik fazın dökümü.

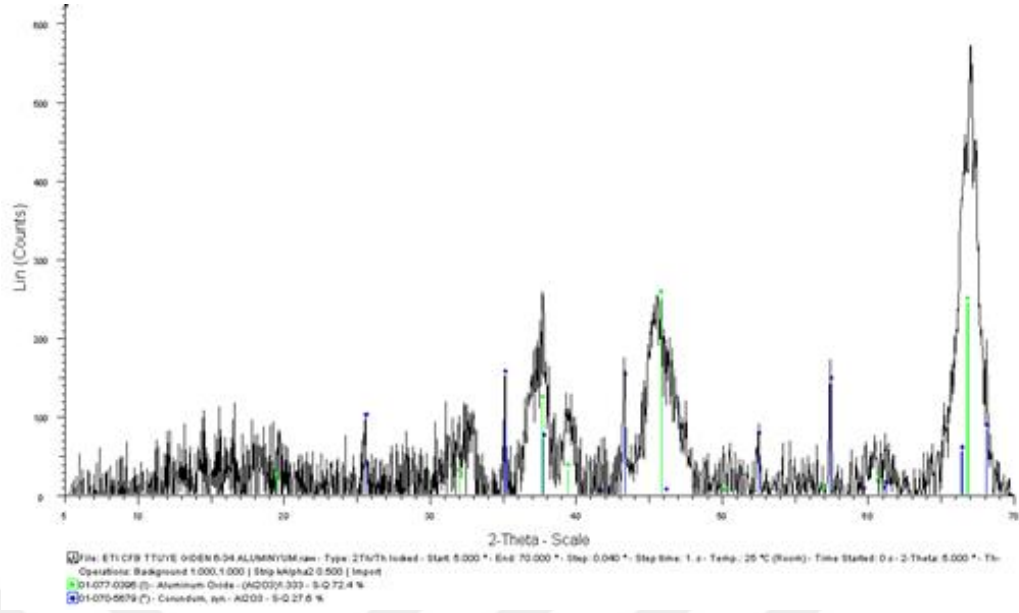
### **6.2.2 Metalik olmayan kalıttan (MOK) ergimiş alümina üretimi**

Ergimiş alümina üretim deneyleri için iki grup ergitme deneyleri planlanmıştır. Bu kapsamda mümkün olduğunca temiz olması ve diğer çalışmalara referans olması amacıyla ETİ Alüminyum'dan elektroliz kalite alümina ve yine, ETİ Alüminyum tesisinde ergitme sırasında açığa çıkan dros hammaddesi temin edilmiştir.

Birinci grup ergitme deneylerinde hammadde olarak yüksek saflığı nedeniyle ETİ Alüminyum ürünü elektroliz alümina seçilmiştir. Bu ön çalışmada, malzemenin ergitilmesiyle elde edilecek bilgi ve deneyim daha sonra farklı hammaddelerin ergitilmesinde ve fırın konfigürasyonlarının ayarlanması için kullanılmıştır. Elektroliz kalite alüminanın kimyasal analiz ve XRD sonuçları sırasıyla Çizelge 6.7, 6.8 ve Şekil 6.14'de verilmiştir.

**Çizelge 6.7** : Elektroliz kalite alüminanın kimyasal analizi (ağırlıkça,%).

$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$SiO_2$	$Na_2O$	$CaO$
99,74	0,01	0,01	0,22	0,01

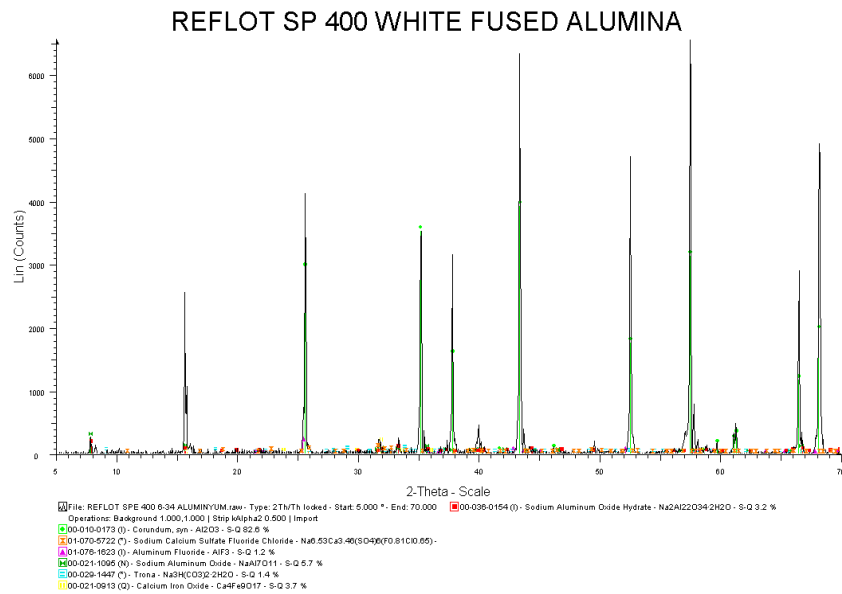


Şekil 6.14 : Elektroliz kalite alüminanın XRD analizi.

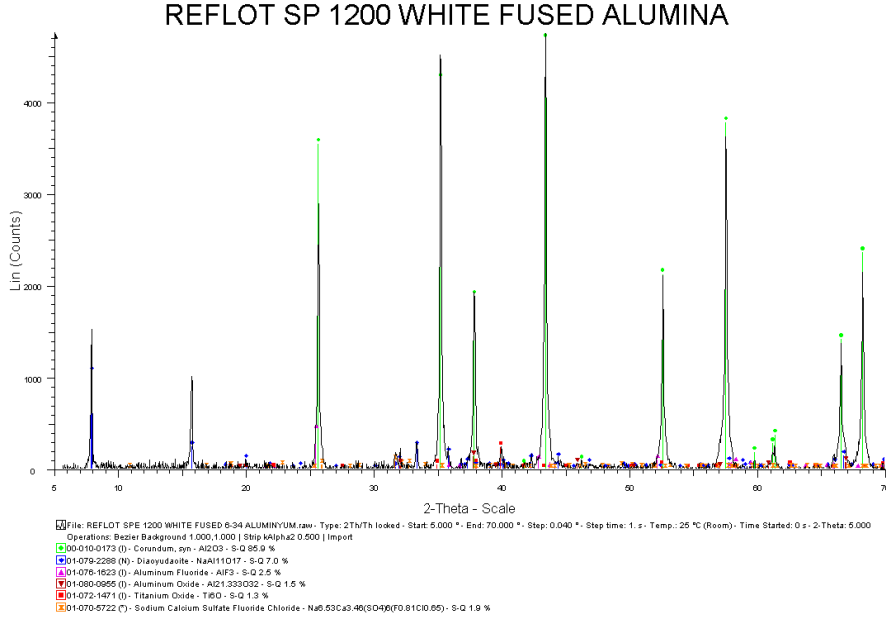
Çizelge 6.8 : Elektroliz kalite alümina numunelerinin XRD Rietveld analizi

Fazlar	ağırlıkça%
Alüminyum Oksit: $(Al_2O_3)_{1.333}$	72,4
Korundum: $Al_2O_3$	27,6

Deneysel çalışmalarda üretilecek numunelere referans olması amacıyla ticari kalitede beyaz ergimiş alümina numuneleri yurtdışından (Reflot, Çin) temin edilmiş ve üzerinde karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Karakterizasyon sonuçları sırasıyla Çizelge 6.9, 6.10, 6.11 ve Şekil 6.15, 6.16’da verilmiştir.



Şekil 6.15 : Reflot SP 400 beyaz ergimiş alümina XRD analizi.



**Şekil 6.16 :** Reflot SP 1200 beyaz ergimiş alümina XRD analizi.

**Çizelge 6.9 :** Reflot örneklerinin XRD analizi ile Ritvelt belirlenen fazları.

Fazlar	Ağırlıkça%	Fazlar	Ağırlıkça%
Corundum: Al2O3	82,6	Corundum: Al2O3	85,9
Sodium Calcium Sulfate Fluoride Chloride: Na6.53Ca3.46(SO4)6(F0.81Cl0.65)	2,2	Sodium Calcium Sulfate Fluoride Chloride: Na6.53Ca3.46(SO4)6(F0.81Cl0.65)	1,9
Aluminum Fluoride: AlF3	1,2	Aluminum Fluoride: AlF3	2,5
Sodium Aluminum Oxide: NaAl7O11	5,7	Aluminum Oxide: Al21.333O32	1,5
Trona: Na3H(CO3)2.2H2O	1,4	Titanium Oxide: Ti6O	1,3
Calcium Iron Oxide: Ca4Fe9O17	3,7	Diaoyudaosite: NaAl11O17	7,0
Sodium Aluminum Oxide Hydrate: Na2Al22O34.2H2O	3,2		

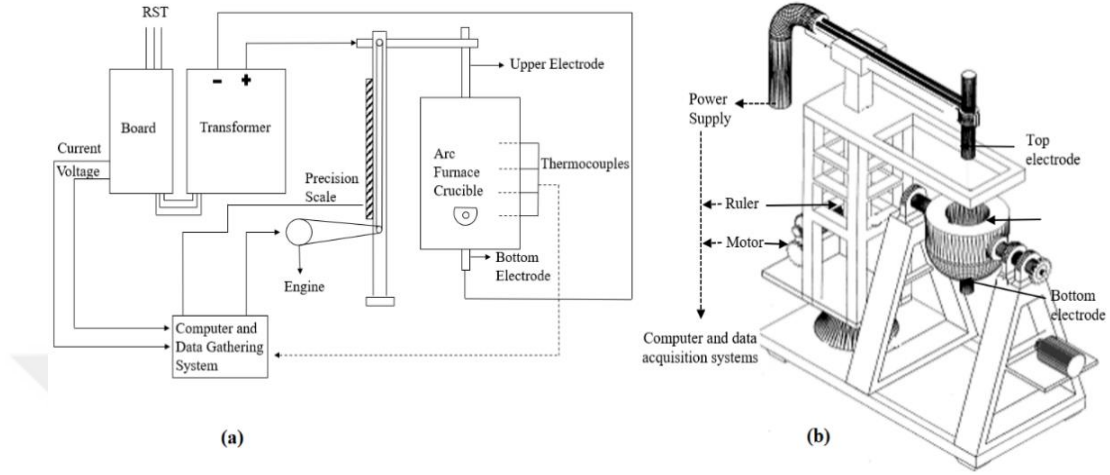
**Çizelge 6.10 :** Reflot SP 400 beyaz ergimiş alümina kimyasal analizi (ağırlıkça%).

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
99,29	0,02	0,01	0,55	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cl	MgO	F	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO
--	0,01	--	0,01	--	--	--	--	0,01	--

**Çizelge 6.11 :** Reflot SP 1200 beyaz ergimiş alümina kimyasal analizi (ağırlıkça%).

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
98,86	0,20	0,11	0,67	0,13	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cl	MgO	F	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO
--	--	--	--	--	--	--	--	0,01	--

Deneyleerde kullanılan mevcut elektrik ark fırını düzeni ile pota detayı aşağıda verilmiştir. Ergimiş alümina elde etme deneyleri için fırın astarı onarılmış ve yenilenmiştir. Bu işlem için tedarik edilen elektrotlar fırın sistemine uygun olarak boyutlandırılmıştır.

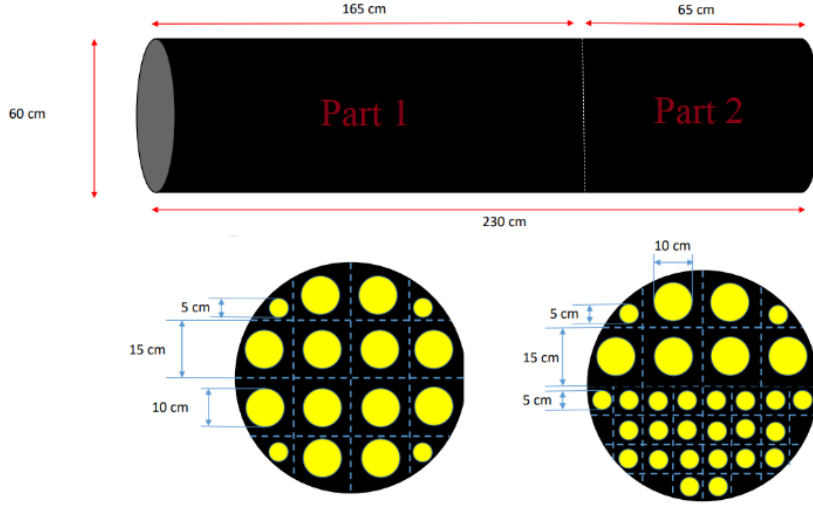


**Şekil 6.17 :** (a) Laboratuvar boyutunda 270 kVA DA EAF'nin yerleşim planı ve (b) şematik görünümü.

Laboratuvar tipi elektrik ark fırınında sabit alt ve hareketli üst elektrotlar yaklaşık 8-10 cm çapında elektrografit malzemeden imal edilmiştir. Bu sistem için elektrot malzemesi EAF prosesini kullanan bir çelik üretim tesisinden temin edilmiştir. Başlangıçta 60 cm çapında ve 230 cm uzunluğundaki elektrot kesme, dilimleme ve tornalama işlemleri ile laboratuvar tipi EAF için uygun hale getirilmiştir (Şekil 6.18 ve Şekil 6.19).



**Şekil 6.18 :** UHP Grafit (a) alındığı haliyle elektrot, (b) kesme ve dilimleme işlemlerinden sonra, (c) tornalama işlemlerinden sonra ve (d) son işlemden sonra.



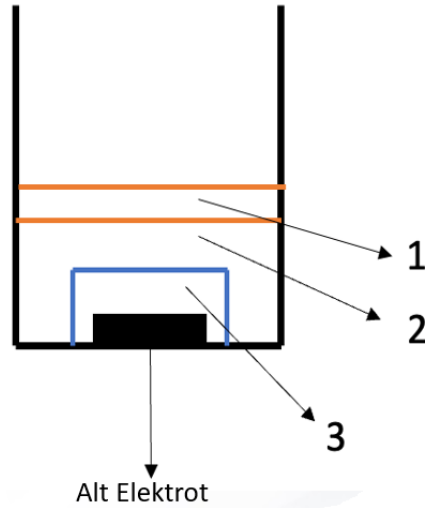
**Şekil 6.19 :** Çelik fabrikasından temin edilen elektrot bloğunun yeniden şekillendirilmesi için hazırlanan teknik resim.

Elektroliz kalite alümina kullanılarak EAF'de üç ergitme deneyi gerçekleştirilmiştir. İlk iki deneyde kullanılan pota astarından ürüne MgO geçtiği tespit edilince buna uygun malzeme kullanılarak fırın astarı döşenmiştir. Fırın akımını, voltajını, gücünü daha kontrollü bir şekilde uygulayabilmek için elektrot çapı 10cm'den 8,5cm'e kadar küçültülmüştür. Bu geliştirme çalışmaları sonucunda Şekil 6.20'de verilen ürün elde edilmiştir.



**Şekil 6.20 :** Elektroliz kalite alüminadan elde edilen ergimiş alümina üstten ve yandan görselleri (Deney 3).

Soğutma koşullarına bağlı olarak fırın içerisinde ergitilmiş numunelerde farklı bölgeler oluşmaktadır. Bu çalışmalarda üretilen numunelerde oluşan farklı görünüşteki fazların daha detaylı incelenebilmesi için Şekil 6.21'de şematik olarak verilen 3 farklı bölgeden 3 farklı numune alınmıştır. Birinci numune bölgesi ürünün yüzeyinde olup kapak görevi görmektedir. İkinci numune bölgesi fırın refrakterine yakındır. Son numune bölgesi ise alt elektrot çevresindedir.



**Şekil 6.21** : Numune alma noktalarının şematik görünümü.

Ergitme işleminden önce elektrotların ağırlığı ve uzunluğu ölçülmüştür. Elektrotun hareketi ve uzunluğundaki değişim kaydedilmiştir. Ergitme işlemi, iç astarı alümina bazlı döküm refrakter olan çelik zarflı potada gerçekleştirilmiştir. Prosese başlamadan önce hareketli üst elektrot ark oluşumu için uygun bir mesafeye kadar indirilmiştir. Daha sonra parametre ayarlamaları yapılarak elektrotlar arasında ark oluşumu sağlanmıştır. Ark oluşuktan sonra elektroliz kalite alümina potaya kademeli olarak beslenmiştir. Ark oluşumundan deney sonuna kadar her 5 dakikada bir akım, voltaj, güç gibi parametre ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçülen parametreler enerji, zaman, akım, voltaj, güç ve sıcaklık olarak belirlenmiş ve izlenerek kayıt altına alınmıştır. Yaklaşık yarım saat süren deneylerin ardından fırına beslenen enerji kesilmiş ve fırın içerisindeki ergimiş alümina ile soğumaya bırakılmıştır. Elektrik ark fırınında gerçekleştirilen bir ergitme işlemi Şekil 6.22’de görülebilir.



**Şekil 6.22** : Elektroliz kalite alüminanın elektrik ark fırınında ergitme işlemi.

Soğumaya bırakılan ergimiş alümina kırma işlemine tabi tutulmuştur. Pota içerisinde çekiç yardımı ile kırılan parçalar tartımdan sonra, fiziksel görünüşlerine göre üç ana gruba ayrılmıştır. Ayrılan numuneler halkalı öğütücü yardımı ile öğütülmüş ve analize gönderilmiştir. Çekiç yardımı ile daha küçük hale getirilen ergimiş alümina parçaları öğütücüde 10-15 saniyede öğütülmüştür ve XRD analizleri için toz numune hazırlanmıştır.

### MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 1

İlk ergitme deneyinde hammadde olarak elektroliz kalite alümina kullanılmıştır. Ergitme öncesinde kullanılacak elektrodun ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

**Çizelge 6.12 :** Deney 1'de kullanılan elektrotun boyutları.

Çap (cm)	10
Uzunluk (cm)	162
Ağırlık (g)	22620

İşlem sırasında toplam 15 kg alümina beslenmiştir. Ergitme sırasında ölçülen parametreler aşağıdaki tabloda verilmiştir. Tablodaki parametrelerin ölçümü her 5 dakikada bir elektrik ark ocağı panelinden kaydedilmiştir.

**Çizelge 6.13 :** Deney 1 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ve sıcaklık ölçümü.

Zaman (m)	Akım (A)	Volt (V)	Güç (kw)	Enerji (kWh)	Sıcaklık (°C)	Durum
0	2000	30	85	0		
5	1800	40	100	10	780	Sıcaklık Ölçümü
10	1800	40	115	25		
13	1000	70	40	30	1700	Sıcaklık Ölçümü
15	1800	55	100	30		
17	1800	60	110	35		Beslemenin bitmesi
20	1800	65	130	45	2000	Sıcaklık Ölçümü
25	1000	70	80	55		
28				60		Deney sonu

Ergitme deneyi toplam 28 dakika sürmüştür. Sıcaklık ölçümleri 5., 13. ve 20. dakikalarda optik pirometre (CEM DT-8869H) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Arkın başlamasıyla başlayan şarjın beslenmesi 17. dakikada sona ermiştir.

## MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 2

İkinci ergitme deneyinde hammadde olarak izabe sınıfı alümina kullanılmıştır. Kullanılan elektrodun ölçümleri ergitme işlemi gerçekleştirilmeden önce yapılmıştır. Deneysel prosedürden önce gerçekleştirilen elektrot ölçümlerinin sonuçları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

**Çizelge 6.14 :** Deney 2'de kullanılan elektrotun boyutları.

Çap (cm)	10
Uzunluk (cm)	160
Ağırlık (g)	22364

İşlem sırasında toplam 15 kg alümina beslenmiştir. Ergitme sırasında ölçülen parametreler aşağıdaki tabloda verilmiştir. Tablodaki parametrelerin ölçümü her 5 dakikada bir elektrik ark ocağı panelinden kaydedilmiştir.

**Çizelge 6.15 :** Deney 2 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ve sıcaklık ölçümü.

Zaman (m)	Akım (A)	Volt (V)	Güç (kW)	Enerji (kWh)	Sıcaklık (°C)	Durum
0	1400	65	80	0		Besleme Başlangıcı
5	1600	40	70	10		Beslemenin bitmesi
10	1600	35	70	15	980	Sıcaklık Ölçümü
15	1400	40	75	20		
20	1400	40	75	25		
25	1400	40	75	35		
30	1400	50	90	40	2000	Deney sonu

İkinci ergitme deneyinde ergitme işlemi toplam 30 dakikada tamamlanmıştır. Sıcaklık ölçümleri 10. ve 30. dakikalarda lazer termometre ile yapılmıştır. Ark oluştuğunda şarjın beslenmesine başlanmıştır ve 5. dakikada besleme sonlandırılmıştır.

## MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 3

Üçüncü ergitme deneyinden önce, kullanılacak elektrodun ölçümleri karşılaştırma için alınmıştır. Üçüncü ergitme işleminde hammadde olarak izabe sınıfı alümina kullanılmıştır. Kullanılan elektrot ölçümleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

**Çizelge 6.16 :** Deney 3'de kullanılan elektrotun boyutları.

Çap (cm)	8,5
Uzunluk (cm)	166
Ağırlık (g)	15760

Bu şarj işleminde farklı bir yol izlenmiştir. Elektrot pozisyonu diğer ergitme işlemlerine göre farklı ayarlanmıştır. Bu proseste alt ve üst elektrotlar birbirine yapışık haldeyken alümina şarjına başlanmış, daha sonra üst elektrot yavaşça yukarıya doğru çekilirken şarj devam etmiştir. Ergitme sırasında elektrik ark ocağı panelinden alınan veriler tablolastırılmıştır. Ölçümler her 5 dakikada bir yapılmıştır.

**Çizelge 6.17 :** Deney 3 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ve sıcaklık ölçümü.

Zaman (m)	Akım (A)	Volt (V)	Güç (kW)	Enerji (kWh)	Sıcaklık (°C)	Durum
0	1200	25	45	0		
5	1000	50	50	5		
7						Birinci besleme sonu
10	900	50	55	10		İkinci besleme sonu
15	900	55	55	15		
17					950	Sıcaklık ölçümü
20	800	55	52	20		Deney sonu

#### **MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 4**

İlk üç deneyde ergitme rejiminin stabil hale getirilme şartları belirlendiğinden sonraki deneylerde endüstriyel atık olan metalik olmayan kalıntının ergitilme koşulları araştırılmaya ve gömülerek bertaraf edilen drosaların metalik olmayan kalıntı kısmı, katma değerli ve teknoekonomik bir ürün olan ergimiş alüminaya dönüştürülmesi için ergitme denemelerine başlanmıştır.

Dördüncü deneyde, beyaz drosun metalik olmayan kalıntısı doğrudan (kalsine edilmeden) kullanılmıştır. 20 kg şarj EAF'ye beslenmiştir. EAF'de eritme prosesi sonucunda 20 kg şarj sonrası 18450 gram ürün elde edilmiştir. Deney süresince ortalama 46,66 kWh enerji tüketimi gerçekleştiği tespit edilmiştir.



**Şekil 6.23 :** Deney 4'ten elektrik ark fırını görüntüleri.

**Çizelge 6.18 :** Deney 4 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ölçümü.

Süre(dk)	Durum	Volt(V)	Akım(A)	kW
0	Başlangıç	30 V	0 A	0
5	10 kg şarj	30 V	1000 A	5
10	15 kg şarj	49 V	1000 A	7.5
13	20 kg şarj	40 V	1000 A	10
15	20 kg şarj	30 V	1200 A	12.5
20	20 kg şarj	40 V	1000 A	15
25	20 kg şarj	30 V	1100 A	20
30	20 kg şarj	45 V	1000 A	25
35	20 kg şarj	50 V	1000 A	30
40	20 kg şarj	50 V	1000 A	32.5
45	Deney sonu	50 V	1000 A	35

### **MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 5**

Beşinci deneyde, beyaz drosun kalıntı metalik olmayan kalıntı kısmı kül fırınında 850°C'de 5 saat boyunca kalsine edilmiştir. Kalsinasyondan sonra, kalsine numune 1 gün boyunca soğutulmuştur. Bu işlemlerden sonra 15 kg kalsine edilmiş metalik olmayan kalıntı toz haline getirilmiştir. Daha sonra 15 kg kalsine metalik olmayan kalıntı EAF fırınında ergitilmek üzere hazırlanmıştır. EAF fırınına beslenen numunenin test verileri Çizelge 6.20'de verilmiştir. EAF prosesi sonucunda 15 kg şarj sonrasında 11737 gram ergimiş ürün elde edilmiştir. Deney süresince ortalama 68,57 kWh enerji tüketimi gerçekleştiği tespit edilmiştir.



**Şekil 6.24 :** Deney 5'ten elektrik ark fırını görüntüsü.

Yaklaşık dörder kilogramlık şarj miktarlarında metalik olmayan kalıntı 5 saatlik süreler boyunca kül fırınında kavrulmuştur. Toplam 7 seferde gerçekleştirilen kavurma işleminde besleme ve elde edilen kalsine ağırlıkları Çizelge 6.19’da verilmiştir.

**Çizelge 6.19 : Kalsinasyon değerleri (850°C, 5 sa).**

Giren (Gram)	Çıkan (Gram)
27426	29250

**Çizelge 6.20 : Deney 5 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ve sıcaklık ölçümü.**

Süre(dk)	Durum	Volt(V)	Akım(A)	kW	Elektrot Sıcaklığı (°C)	Sıcaklık (°C)
0	Deney Başlangıcı	0 V	0	0	-	-
1	Introduce	25 V	600 A	0	-	-
5	10 kg şarj	46 V	1200 A	5	-	-
10	10 kg şarj	46 V	1200 A	10	-	-
12	15 kg şarj	48 V	1100 A	12.5	-	-
15	15 kg şarj	43 V	1210 A	17.5	-	-
20	15 kg şarj	50 V	1150 A	22.5	-	-
25	15 kg şarj	48V	1200 A	27.5	-	-
30	15 kg şarj	50 V	1200 A	35	-	-
35	Deney Sonu	60 V	1200 A	40	1100°C	1543°C

### **MOK’dan ergimiş alümina üretimi deney 6**

Altıncı deneyde, daha önceki ergitme deneylerinde, ergiyen kısmın etrafında tamamen ergimeden sinterlenmiş halde kalan kısımlar, hammadde olarak kullanılmıştır. Bu amaçla, Deney 5-Sinter (10 kg) ve kalsine metalik olmayan kalıntı (6 kg) öğütülerek homojen hale getirilmiş ve EAF’ye beslenmiştir. 16 kg metalik olmayan kalıntı öğütülerek daha uygun bir ergitme işlemi için toz elde edilmiştir. Daha sonra, daha önce sinterlenen numunenin ilk kısmı 10 kg olarak EAF'ye şarj edildi. Fırın içerisindeki numune 15. dakikada ergimeye başlamıştır. Numunenin erimesi görüldükten sonra numunenin geri kalan 6 kg'lık kısmı şarj edildi. Toplamda 16 kg metalik olmayan kalıntı elektrik ark ocağına beslendi. EAF işlemi sonucunda 16 kg şarjdan sonra 13731 gram numune toplanmıştır. Bu deneyde ölçülen en yüksek sıcaklık, toplam 50 dakikanın 45. dakikasında 1964°C'dir. Deney yapılırken ortalama

48 kWh enerji tüketilmiştir. Test verileri ve diğer parametreler aşağıda Çizelge 6.21’da belirtilmiştir.



Şekil 6.25 : Deney 6'dan elektrik ark ocağı görüntüleri.

Çizelge 6.21 : Deney 6 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ölçümü.

Süre(dk)	Durum	Volt(V)	Akım(A)	Güç (kW)	Elektrot Sıcaklığı (°C)	Sıcaklık (°C)
0	Deney Başlangıcı	0 V	0	0	-	-
5	-	52 V	780 A	2.5	-	-
8	10 kg şarj (EAF-4 sinter)	55 V	800 A	5	-	-
10	10 kg şarj	30 V	820 A	7.5	-	-
15	10 kg şarj	36 V	1100 A	10	-	-
18	15 kg şarj	45 V	1000 A	12.5	-	-
20	16 kg şarj	35 V	1100 A	15	-	-
25	16 kg şarj	50 V	1000 A	17.5	-	-
30	16 kg şarj	50 V	1000 A	20	-	-
35	16 kg şarj	60 V	800 A	25	-	1835 °C
40	16 kg şarj	45 V	1000 A	30	-	-
45	16 kg şarj	50 V	1000 A	35	-	1964 °C
50	Deney Sonu	60 V	1000 A	40	1100 °C	-

Kalsinasyon işleminin ergitme işleminde daha stabil şartların sağlanmasını kolaylaştırdığının belirlenmesinden sonra daha hızlı ve daha yüksek sıcaklıklarda kavurma işlemi yapılmasını sağlayan döner fırında kalsinasyon işlemi yapılmasına karar verilmiştir.

### MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 7

Yedinci deneyde, yaklaşık 16 kg metalik olmayan kalıntı kısmı döner fırında 1100°C'de 4 saat boyunca kalsine edilmiştir. Kalsinasyondan sonra, kalsine numune 1 gün boyunca soğutulmuştur. Bu işlemlerden sonra 17,758 kg kalsine metalik olmayan kalıntı öğütülerek toz haline getirilmiştir. Daha sonra 17,758 kg kalsine metalik olmayan kalıntı EAF fırınında ergitilmek üzere hazırlanmıştır. EAF fırınına beslenen numunenin test verileri ve sonraki test aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. EAF ergime işlemi sonucunda 15.480 kg ergimiş ürün elde edilmiştir. Deney süresince ortalama 62,79 kWh enerji tüketimi gerçekleştiği tespit edilmiştir.



Şekil 6.26 : Deney 7'den görüntüler.

Çizelge 6.22 : EAF 7 Deneyi için kalsine edilen metalik olmayan kalıntı kısmının kimyasal analizi (ağırlıkça, %).

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Cl
86.90	1.09	3.25	0.416	1.370	0.177	5.52	-

**Çizelge 6.23 : Deney 7 sırasında ölçülen elektriksel parametreler ve sıcaklık ölçümü.**

Süre(dk)	Durum	Volt(V)	Akım(A)	Güç (kW)	Elektrot Sıcaklığı (°C)	Sıcaklık (°C)
0	Deney Başlangıcı	0 V	0	0	-	-
5	-	40 V	1200 A	5	-	-
7	10 kg şarj	40 V	1200 A	7.5	-	-
10	10 kg şarj	40 V	1200 A	10	-	-
12	17,758 kg şarj	40 V	1400	12.5	-	-
15	-	60 V	0	15	-	-
20	-	35 V	1200 A	20	-	1630°C
25	-	50 V	1200 A	25	-	1880°C
30	-	40 V	1200 A	30	-	1900°C
35	-	60 V	800 A	37.5	-	1835°C
40	-	45 V	1000 A	40	-	-
43	Deney Sonu	50 V	1000 A	45	1485°C	-

#### **MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 8**

Sekizinci deneyde, beyaz drosun metalik olmayan kalıntı (MOK) kısmı EAF'de ergitilmiştir. Toplamda 14,7 kg'lık metalik olmayan kalıntı fırna beslenmiştir. Bunların 10 kg'ı kalsine edilmiş metalik olmayan kalıntı, 4,7 kg'ı ise Deney 7'de ergimeye maruz kalmamış Deney 7-Sinter olarak sınıflandırılan metalik olmayan kalıntıdır. Kalsinasyon sonucunda topaklanan 14,7 kg metalik olmayan kalıntı öğütülerek daha uygun bir ergitme işlemi için toz hali elde edilmiştir. İlk olarak 10 kg kalsine metalik olmayan kalıntı fırna beslenmiştir. Fırın içerisindeki numune 15. dakikada ergimeye başlamıştır. Numunenin ergimesi görüldükten sonra numunenin geri kalanı olan 4,7 kg Deney 7-Sinter şarj edilmiştir. Toplamda 14,7 kg beyaz dros tozu elektrik ark fırınına beslenmiştir. EAF işlemi sonucunda 14,7 kg şarjdan sonra 13731 gram numune toplanmıştır. Bu deneyde ölçülen en yüksek sıcaklık, toplam 50 dakikanın 45. dakikasında 1800°C'dir. Deney yürütülürken ortalama 54 kWh enerji tüketilmiştir. Test verileri ve diğer parametreler aşağıda Çizelge 6.24'de belirtilmiştir.

**Çizelge 6.24 :** Deneý 8 sırasında ölçölen elektriksel parametreler ve sıcaklık ölçümü.

Süre(dk)	Durum	Volt(V)	Akım(A)	Güç (kW)	Elektrot Sıcaklığı (°C)	Sıcaklık (°C)
0	Deneý Bařlangıcı	0 V	0	0	-	-
5	-	40 V	1000 A	5	-	-
7	10 kg şarj	50 V	1000 A	10	-	-
15	10 kg şarj	40 V	1000 A	15	-	-
21	14.7 kg şarj	60 V	800 A	20	-	-
25	14.7 kg şarj	45 V	1000 A	20	-	-
30	14.7 kg şarj	40 V	1000 A	25	1000°C	-
35	14.7 kg şarj	30 V	1000 A	30	-	1300°C
40	14.7 kg şarj	40 V	1000 A	35	-	1700°C
45	14.7 kg şarj	50 V	1000 A	40	-	-
50	Deneý Sonu	50 V	1000 A	45	1230°C	1800°C

### 6.3 Deneý Sonuçları

#### 6.3.1 Metalik Kısımdan Alüminyum Eldesi

Beyaz drostan mekank yollarla ayrıştırılan metalik kısımdan ( $Al_{Dros}$  olarak kısaltılmıştır) alüminyum metal ve alaşımlarının üretimine etki eden şartları belirlemek amacıyla yapılan ergitmelerin deneysel koşulları ve sonuçları Çizelge 6.25’de verilmiştir. Deneýlerde başlangıç sıcaklığı, toplam řarj kütlesi, flaks oranı ve uygulaması gibi parametrelerin alüminyum verimine eldesi irdelenmiştir. Ergitme deneýlerinin sonunda elde edilen numuneler OES (Optik Emisyon Spektroskopisi) ile karakterize edilmiştir. Görüldüğü üzere, sıcaklık, zaman ve flaks ilavesi  $Al_{Dros}$  ergitme üzerinde etkili olmuş ve flaks ilavesiyle (flaks/ $Al_{Dros}$  oranı 0.006) %85,81 geri kazanım verimiyle ağırlıkça %97,87 saf Al külçe elde edilebilmiştir.

**Çizelge 6.25 :** Beyaz drosdan mekanik yöntemler ile ayrılan alüminyumca zengin kısmın ( $Al_{Dros}$ ) alüminyum alaşım elde etmek amacıyla yapılan ergitme işlemi başlangıç ve ürün verileri.

Deney Numarası	Girdi, g		Flaks/ $Al_{Dros}$ Oranı	Çıktı, g		Metalde % Al, Ağırlıkça.	Al Verimi %
	$Al_{Dros}$	Flaks		Metal	Curuf		
1 <sup>1</sup>	300	60	0,2	162.6	110.6	98,01	79,00
2 <sup>1</sup>	500	100	0,2	289.4	147.8	96,75	83,50
3 <sup>2</sup>	500	100	0,2	275	163	97,43	79,90
4 <sup>2</sup>	500	100	0,2	288	262	97,18	83,47
5 <sup>3</sup>	500	100	0,2	243	188	93,82	67,99
6 <sup>3</sup>	500	75	0,15	253	205	97,70	73,72
7 <sup>3</sup>	500	50	0,10	264	188	96,91	76,30
8 <sup>3</sup>	500	25	0,05	237	208	92,69	65,51
9 <sup>3</sup>	500	-	-	189	222	97,05	54,70
10 <sup>4</sup>	500	1.5	0,003	271	232	96,89	78,31
11 <sup>4</sup>	500	1,5	0,003	277	330	97,01	80,14
12 <sup>5</sup>	500	3	0,006	294	196	97,87	85,81
13 <sup>5</sup>	500	4,5	0,009	280	181	98,36	82,13
14 <sup>5</sup>	500	6	0,012	265	234	93,29	73,73

1-Toplam girdi kütlesinin deneye etkisi incelenmiştir. Yüksek kütleli girdi tercih edilmiştir.

2-Pota başlangıç sıcaklığının deneye etkisi incelenmiştir. Ön ısıtmaya tabi tutulmuş fırın ve pota tercih edilmiştir.

3-İlk 2 koşul şartlarında farklı flaks oranlarının etkisi incelenmiştir.

4-Flaks ilavesinin şartlarının etkisi incelenmiştir. Ergime başladıktan sonra üzerine ilaveye karar verilmiştir.

5-Yüksek kütle, ön ısıtma, ergiyik üzerine flaks ilavesi parametreleri sabit tutularak flaks oranlarının etkisi incelenmiştir.

**Çizelge 6.26 :** Elde edilen metallerin kimyasal analiz sonuçları (ağırlıkça, %).

Deney No	Al	Si	Fe	Mg
3	97,43	1,51	0,56	0,15
4	97,18	1,74	0,38	0,14
5	93,82	1,03	1,25	1,69
6	97,70	1,37	0,48	0,10
7	96,91	1,91	0,66	0,13
8	92,69	2,49	0,54	0,11
9	97,05	1,54	0,88	0,08
10	96,89	1,87	0,32	0,11
11	97,01	1,97	0,41	0,14
12	97,87	1,06	0,58	0,16
13	98,36	0,95	0,23	0,16
14	93,29	5,74	0,44	0,19

Deney 1 ve 2 incelendiğinde şarj miktarı arttıkça metal kazanım verimi arttığı için deneyde kullanılan ekipmanın kapasitesi dahilinde en yüksek şarj miktarı kullanılmış ve kalan deneylerde bu şarj miktarı kullanılmıştır.

Deney 3 ve 4'te deney başlangıcındaki indüksiyon ocağı ve pota sıcaklıklarının geri kazanım verimine etkisi araştırılmıştır. Deney 3'te herhangi bir ön ısıtma yapılmadan ergitme doğrudan başlatılmıştır. Deney 4'te ise pota 1000°C'ye kadar ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Deney 3 ve 4'ün sonuçları incelendiğinde, ergitme süresindeki azalma nedeniyle ön ısıtmalı sistemin daha etkili olduğu kabul edilmiş ve kalan deneylerde ön ısıtmalı sistemin tercih edilmesine karar verilmiştir.

Deney 5-9 numaralı farklı flaks oranlarının geri kazanım verimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Deney 10'da flaks, hammaddenin ergitme işleminden önce eklenmiştir; Deney 11'de ise flaks, hammadde ergitildikten sonra yüzeye eklenmiştir. Deney 11'de daha iyi sonuçlar elde edildiğinden, kalan deneylerde bu yöntem izlenmiştir.

Deney 12-14'te flaks oranı arttırılmıştır ve Deney 12'de optimum flaks miktarı belirlenmiştir.

Ergitme sonucunda elde edilen numunelerin görüntüleri sırasıyla Şekil 6.28, 6.29, 6.30, 6.31 ve Şekil 6.32'de verilmiştir. Al kazanım verimleri numune ağırlıkları ve analizler kullanılarak hesaplanmıştır.



**Şekil 6.27** : Al<sub>Dros</sub> deney 1 ve 2 ürünleri.



Şekil 6.28 : Al<sub>Dros</sub> deney 3, 4 ve 5 ürünleri.



Şekil 6.29 : Al<sub>Dros</sub> deney 6, 7 ve 8 ürünleri.



Şekil 6.30 : Al<sub>Dros</sub> deney 9, 10 ve 11 ürünleri.



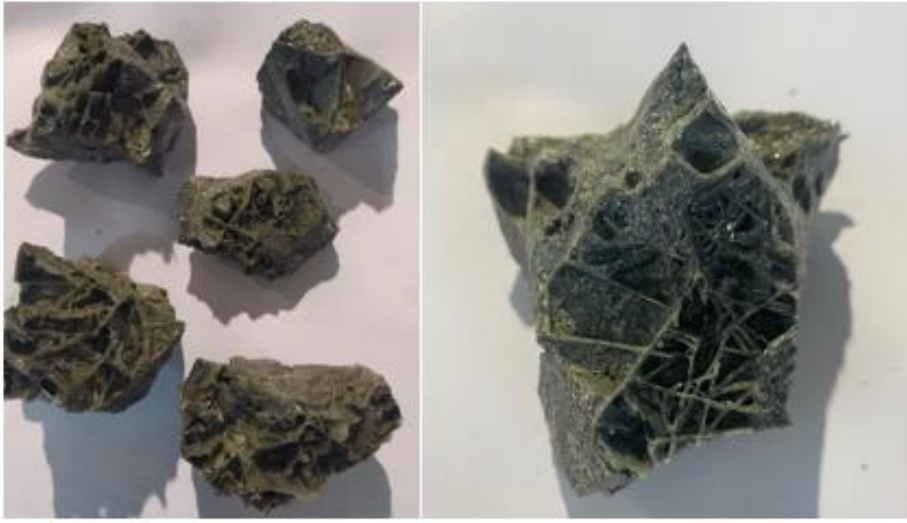
Şekil 6.31 : Al<sub>Dros</sub> deney 12, 13 ve 14 ürünleri.

### 6.3.2 Metalik olmayan kalıntıdan ergimiş alümina üretimi

Ergitme sonucu oluşan ergimiş faz blokun görünüşü farklı bölgelerden (Şekil 6.21’de verilen gösterim) alınan numuneler kimyasal ve XRD analizleri incelenmiştir.

## MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 1

Deney parametrelerini ve fırın şartlarının araştırılması için elektroliz kalite alümina ile gerçekleştirilen ilk deneyde, farklı görünüşe sahip ergimiş alümina bloğundan elde edilen 3 farklı bölge için XRD ve kimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir. MgO içeriğinin yüksek çıkması sonucunda fırın içerisinde bulunan manyezit esaslı refrakterden geldiği tespit edilmiş ve refrakter malzemesinin değiştirilmesine karar verilmiştir.



Şekil 6.32 : Deney 1'in ürünü.

Çizelge 6.27 : Deney 1'in kimyasal analizi. birinci bölge.

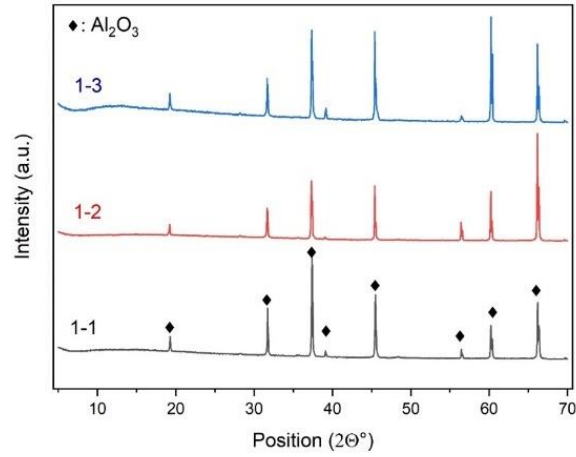
Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	MgO
	87,42	0,129	0,867	0,27	0,413	0,0340	0,0049	0,0027	0,000	0,0036	----	9,86
EAF1.1	F	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	HfO <sub>2</sub>
	----	----	0,051	0,014	----	0,902	0,017	0,0093	0,440	0,412	0,087	0,040

Çizelge 6.28 : Deney 1'in kimyasal analizi. ikinci bölge.

Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	MgO
	87,74	0,105	0,982	0,30	0,463	0,0354	0,0048	0,0017	0,000	0,0037	----	9,49
EAF1.2	F	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	HfO <sub>2</sub>
	----	----	0,027	0,011	----	0,828	0,013	----	0,226	0,467	0,031	0,039

Çizelge 6.29 : Deney 1'in kimyasal analizi. üçüncü bölge.

Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	MgO
	87,64	0,152	0,871	0,27	0,411	0,0348	0,0049	0,0035	0,000	0,0029	----	9,69
EAF1.3	F	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	HfO <sub>2</sub>
	----	0,046	0,020	0,014	----	0,828	0,0065	0,0099	0,149	0,318	0,035	0,028



Şekil 6.33 : Deney 1'in farklı bölgelerdeki XRD analizi.

### MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 2

Elektroliz kalite alümina kullanılarak yapılan ikinci deneyde, ilk deneyde karşılaşılan yüksek MgO içerik sorunu kimyasal analiz sonucundan da anlaşılacağı gibi refrakter değişimi ile çözülmüştür.



Şekil 6.34 : Deney 2'nin ürünü.

Çizelge 6.30 : Deney 2'nin kimyasal analizi. birinci bölge.

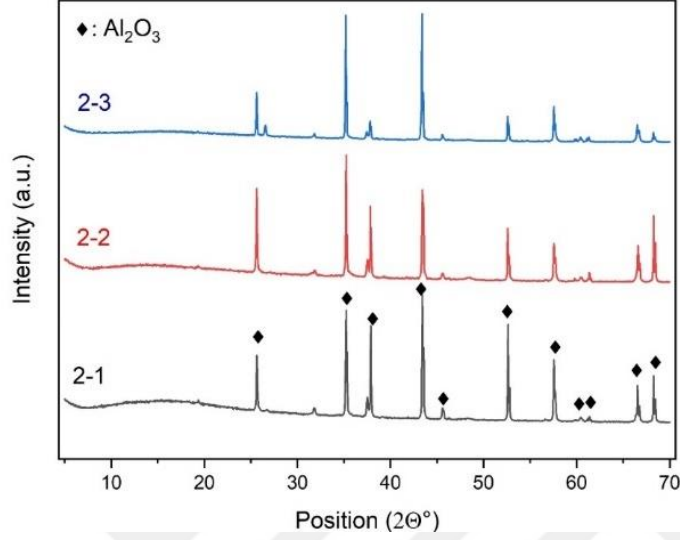
Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	MgO
	98,13	0,053	0,894	0,09	0,306	0,0432	0,0016	0,1295	0,000	0,0027	--	0,291
EAF2.1	F	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	HfO <sub>2</sub>
	--	--	0,033	--	--	0,019	0,0045	--	0,144	0,0035	0,025	--

Çizelge 6.31 : Deney 2'nin kimyasal analizi. ikinci bölge.

Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	MgO
	98,27	0,089	0,849	0,04	0,271	0,0409	0,0020	0,033	0,000	0,0026	----	0,361
EAF2.2	F	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	HfO <sub>2</sub>
	----	----	0,019	----	----	0,016	0,0073	----	0,297	0,0050	0,053	----

**Çizelge 6.32 : Deney 2'nin kimyasal analizi. üçüncü bölge.**

Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	MgO
	98,53	0,083	0,779	0,03	0,251	0,0376	0,0018	0,0071	0,000	0,0023	----	0,241
EAF2.3	F	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	HfO <sub>2</sub>
	--	0,029	--	--	--	0,0093	--	--	0,148	0,0031	0,032	--



**Şekil 6.35 : Deney 2'nin farklı bölgelerdeki XRD analizi.**

### **MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 3**

Elektroliz kalite alümina ile yapılan ilk iki deneydeki ürün kimyasal analizinin beyaz ergimiş alüminaya yakın olmasına rağmen görünüş açısından farklı olması sebebiyle, elektrik ark fırınında bulunan üst elektrot çapında küçültmeye gidilmiş ve ürüne karbon geçişi azaltılarak beyaz ergimiş alüminaya çok yakın bir görünüş elde edilmiştir.



**Şekil 6.36 : Deney 3'de elde edilen ergimiş alümina.**

**Çizelge 6.33 : Deneý 3'ün kimyasal analizi. birinci bölge.**

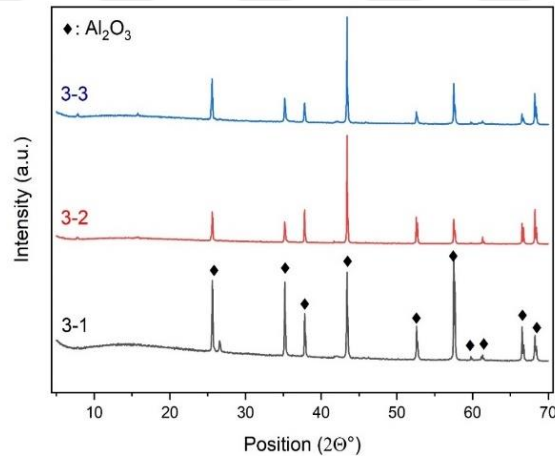
Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	MgO
	96,57	3,131	0,228	0,04	0,028	0,0012	0,0018	0	0,000	0,0012	--	--
EAF3.1	F	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	HfO <sub>2</sub>
	--	--	--	0,032	--	0,121	0,059	--	0,026	--	--	--

**Çizelge 6.34 : Deneý 3'ün kimyasal analizi. ikinci bölge.**

Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	MgO
	96,40	3,326	0,091	0,15	0,030	0,0011	0,0022	0	0,000	0,0012		
EAF3.2	F	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	HfO <sub>2</sub>
				0,028		0,160	0,070	0,0074				

**Çizelge 6.35 : Deneý 3'ün kimyasal analizi. üçüncü bölge.**

Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	MgO
	94,87	4,85	0,117	0,13	0,031	0,0018	0,0030	0	0,000	0,0015	----	----
EAF3.3	F	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	BaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	HfO <sub>2</sub>
	----	----	----	0,048	----	0,279	0,131	0,0089	----	----	----	----

**Şekil 6.37 : Deneý 3'ün farklı bölgelerdeki XRD analizi.**

Sonuçların analiz edilmesiyle, numunenin kimyasal analizindeki yüksek Fe içeriğinin nedeninin kullanılan öğütücüden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle numuneler çelik halkalı öğütücü yerine WC öğütücü kullanılarak öğütücüde toz haline getirilmiş ve daha sonra tekrar analize gönderilmiştir. WC öğütücü ile elde edilen numune kimyasal analizi Çizelge 6.36'da verilmiştir.

**Çizelge 6.36 : EAF 3 deneý ürünlerinin tekrar edilen kimyasal analizi.**

Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	ZnO (%)
EAF3.1 (Tekrar)	97.80	0.046	0.132	0.170	0.023	0.0059
EAF3.2 (Tekrar)	98.80	0.027	0.064	0.106	0.020	0.0036

## MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 4

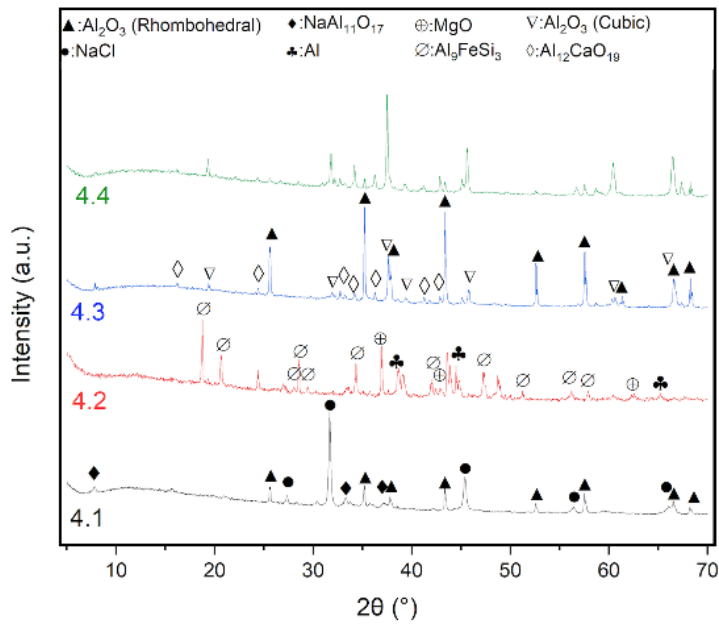
Metalik olmayan kalıntı ile gerçekleştirilen ilk deney olarak herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan toplamda 20 kg metalik olmayan kalıntı fırına şarj edilmiştir.



Şekil 6.38 : Deney 4 üretilmiş ergimiş alümina.

Çizelge 6.37 : Deney 4'ün farklı bölgelerdeki kimyasal analizi.

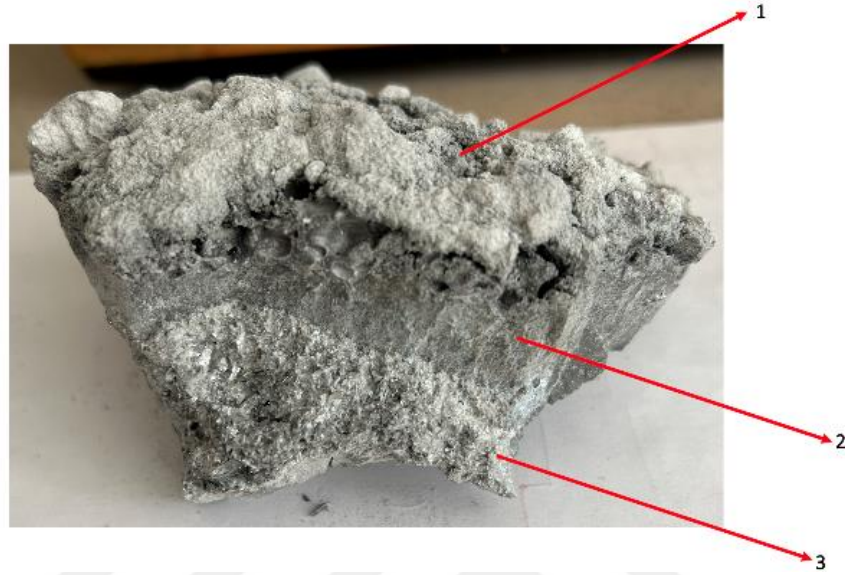
Sample	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Cl
EAF 4.1	76,62	0,21	1,59	15,60	1,55	0,13	2,10	0,78
EAF 4.2	95,71	0,12	1,24	0,40	1,37	0,08	-	-
EAF 4.3	93,00	0,26	1,71	0,47	2,92	0,20	0,86	-



Şekil 6.39 : Deney 4'ün farklı bölgelerdeki XRD analizi.

### MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 5

Deney 4'te çok yüksek gaz ve duman açığa çıkmasından dolayı Deney 5'te 850°C'de 5 saat boyunca kalsinasyona tabii tutulmuş metalik olmayan kalıntı kullanılmıştır. Toplamda 15 kg kalsine metalik olmayan kalıntı hazırlanmıştır ve fırına beslenmiştir.

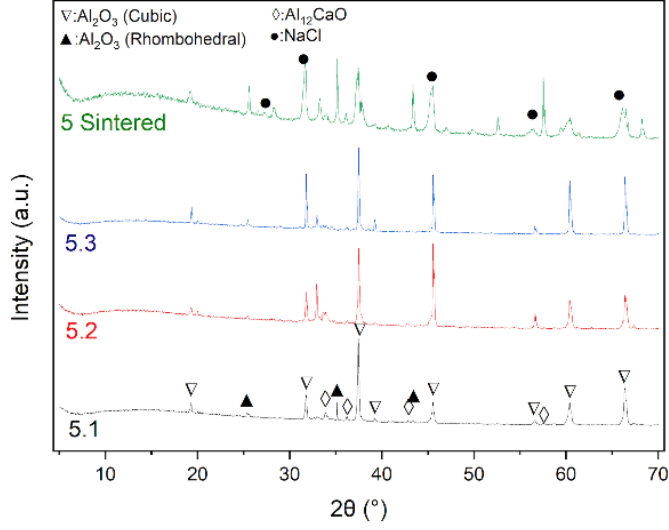


Şekil 6.40 : Deney 5 üretilen ergimiş alümina.

Deney numunelerinin fırın içerisinden toplanması sırasında fırına beslenen bir kısım numunenin ergimiş faz yapısına dahil olmadığı tespit edilmiştir. Ergime sırasında hava ile temastan kaynaklı ergiyik yapının üst kısmındaki katılaşma gerçekleşmiştir. Bu nedenle katılaşma sonrası beslenen numuneler ergiyik faza ulaşamamış, ancak fırın içerisinde yüksek sıcaklıklara maruz kalmıştır. Bu toz halinde kalmış numuneler sinter olarak isimlendirilmiş ve daha sonraki deneylerde de ön ısıtmaya tabii tutulmuş bir hammadde olarak kullanılmıştır.

Çizelge 6.38 : Deney 5'in farklı bölgelerdeki kimyasal analizi.

Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Cl
EAF 5.1	93,9	1,32	0,99	-	2,08	0,20	1,20	-
EAF 5.2	92,1	2,18	2,09	-	1,83	0,19	1,13	-
EAF 5.3	95,8	0,71	0,49	-	2,06	0,20	0,50	-
EAF 5-Sinter	77,1	0,52	3,75	6,42	1,38	0,13	3,90	3,96



Şekil 6.41 : Deney 5'in farklı bölgelerdeki XRD analizi.

### MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 6

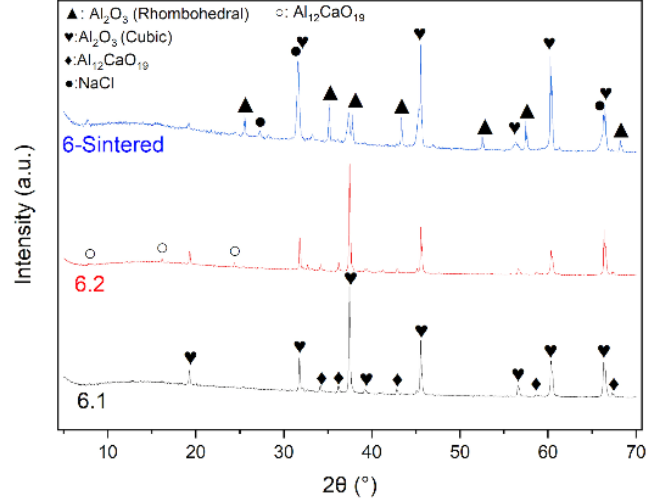
Deney 5-Sinter (10 kg) ve kalsine metalik olmayan kalıntı (6 kg) ile hammadde hazırlanmış ve fırına beslenmiştir.



Şekil 6.42 : Deney 6 üretilen ergimiş alümina.

Çizelge 6.39 : Deney 6'nın farklı bölgelerdeki kimyasal analizi.

Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Cl
EAF 6.1	92,2	1,63	0,80	-	2,55	0,15	1,41	-
EAF 6.2	92,8	1,17	0,61	-	2,63	0,13	1,08	0,01
EAF 6-Sinter	66,6	0,38	2,97	15	1,48	0,09	2,46	7,32



Şekil 6.43 : Deney 6'nın farklı bölgelerdeki XRD analizi.

### MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 7

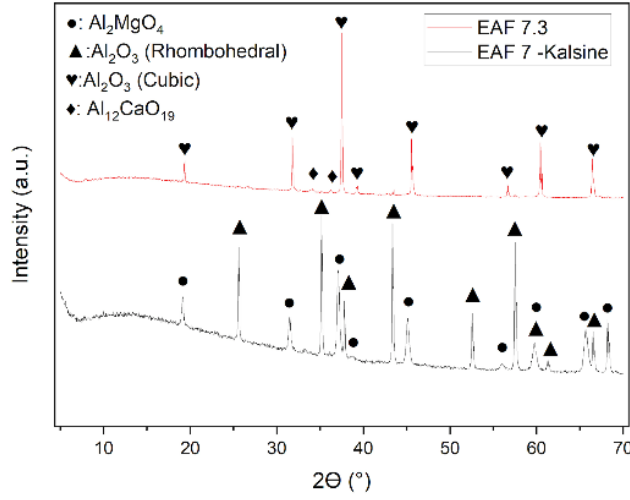
Deney 7 için hazırlanan hammadde için yeni kalsinasyon parametresi belirlenmiştir. Bunun için 4 saat boyunca 1100 °C'de 16 kg'lık metalik olmayan kalıntı döner fırında kalsinasyona tabii tutulmuş ve toplamda 17,758 kg'lık ürün elde edilmiştir. Kütle artışındaki sebep ise homojen olmayan numune içerisindeki geri kazanılamayan metalik alüminyumların oksitlenerek alüminaya dönüşmesinden kaynaklıdır. Elde edilen 17,758 kg'lık hammadde fırına beslenmiştir.



Şekil 6.44 : Deney 7'de üretilen ergimiş alümina.

Çizelge 6.40 : Deney 7'nin farklı bölgelerdeki kimyasal analizi

Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Cl
EAF 7.1	90,1	0,462	2,12	-	1,570	0,101	5,37	-
EAF 7.2	90,7	0,599	1,67	-	1,390	0,079	5,31	-
EAF 7.3	91,9	0,427	1,22	-	1,370	0,113	4,73	-



Şekil 6.45 : Deney 7'nin farklı bölgelerdeki XRD analizi.

### MOK'dan ergimiş alümina üretimi deney 8

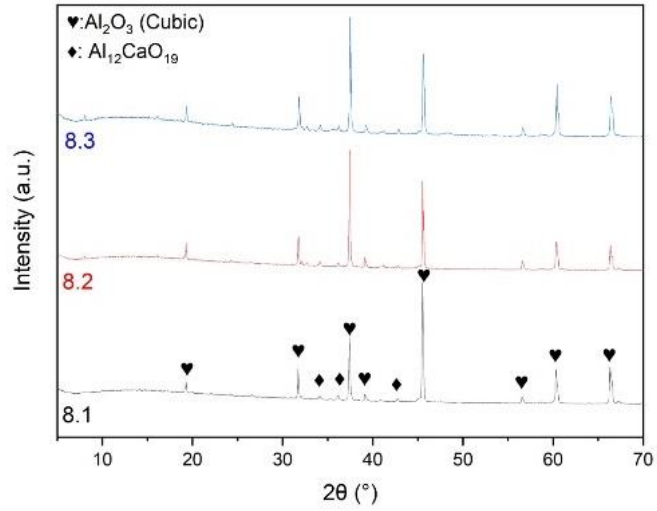
Deney 8'de ise 10 kg'lık 1100 °C'de kalsine edilmiş metalik olmayan kalıntı ve 4,7 kg'lık Deney 7'de ergimeyen ve yüksek sıcaklığa maruz kalan Deney 7-Sinter olarak isimlendirilen metalik olmayan kalıntı beslenmiştir. Toplam şarj kütlesi 14,7 kg'dır.



Şekil 6.46 : Deney 8 üretilen ergimiş alümina.

Çizelge 6.41 : Deney 8'in farklı bölgelerdeki kimyasal analizi.

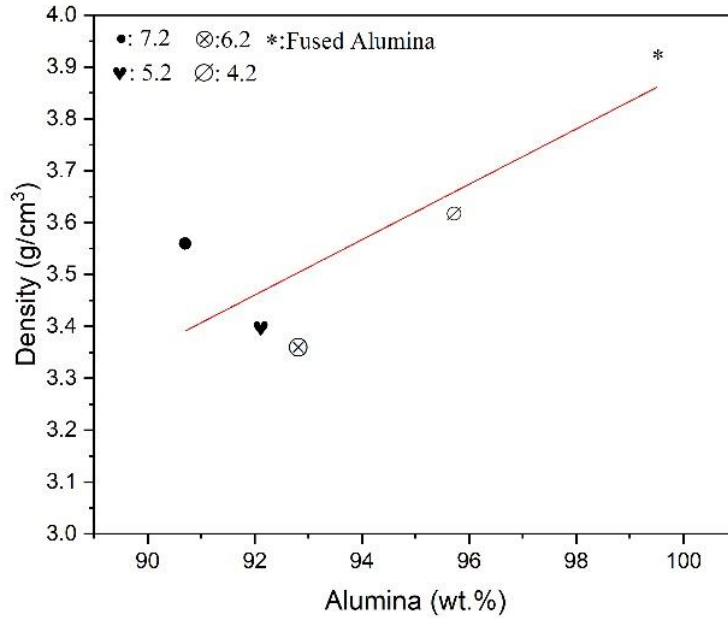
Numune	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Cl
EAF 8.1	91,2	0,29	0,90	0,01	2,28	0,12	4,93	0,005
EAF 8.2	91,1	0,24	0,71	0,01	2,10	0,11	5,5	0,007
EAF 8.3	90,8	0,15	1,03	0,01	1,91	0,12	5,6	0,004



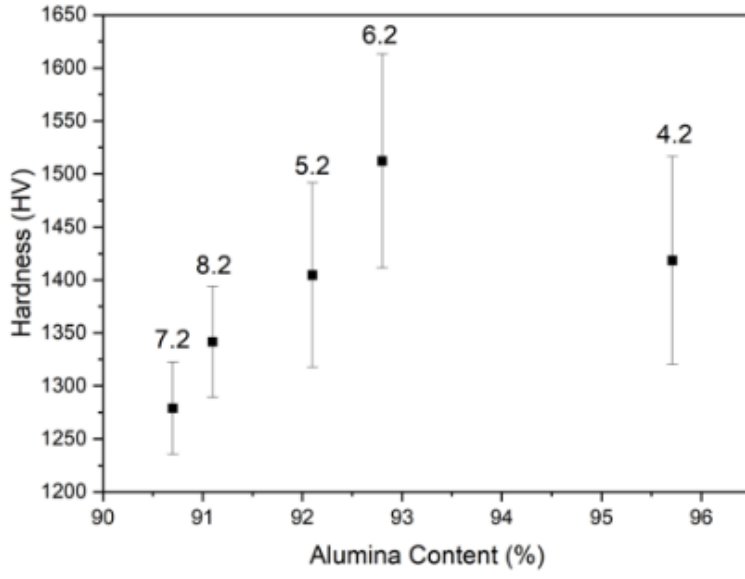
Şekil 6.47 : Deneysel ürünlerin farklı bölgelerdeki XRD analizi.

### Yoğunluk ve sertlik sonuçları

Deneysel ürünlerde elde edilen ürünlerin hem tam ergimiş bölgesi hem de kimyasal analiz sonuçlarında ergimiş alüminaya en yakın safiyette olan ikinci bölgelerinden alınan örnekler ile yoğunluk ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri Arşimet Yöntemi ile yapılmıştır. Sertlik ölçümü için ise Vickers yöntemi tercih edilmiştir. Elde edilen yoğunluk ve sertlik değerleri numunenin içerdiği alümina içeriğine göre grafik haline getirilmiştir. Elde edilen grafikler Şekil 6.48 ve 6.49’da verilmiştir.



Şekil 6.48 : Üretilen ürünlerin yoğunluk karşılaştırılması.



**Şekil 6.49** : Üretilen ürünlerin sertlik karşılaştırılması.

## 7. SONUÇLAR

Gün geçtikçe üretim miktarı artan alüminyumla beraber atık miktarları da artmaktadır. Alüminyumun başlıca atıklarından birisi olan dros, ergitme işlemi esnasında yüksek oksijen afinitesi sebebiyle yüzeyde oksijenle tepkimeye girerek oluşan homojen olmayan ergimemiş bir cüruf tipidir. Ergimiş alüminyumun ortamdaki oksijen ile teması ile oluşurken katılaştıran  $Al_2O_3$  bileşiği, içerisine de yüksek miktarda metalik alüminyum mekanik olarak hapsetmektedir. Bu sebeple alüminyum drosları yüksek miktarda metalik alüminyum içermektedir. İçerdiği alüminyum içeriğine göre siyah ve beyaz dros olarak ikiye tipte sınıflandırılmaktadır.

Bu çalışmada birincil alüminyum üretimi sırasında ortaya çıkan ve daha yüksek metalik alüminyum içeren beyaz droslar ele alınmıştır. Endüstriyel şartlarda da geri dönüşüm çalışmaları bulunan beyaz dros için alternatif bir yöntem geliştirilmiştir. Endüstride sadece beyaz drosun metalik alüminyumunu geri kazanılmaya çalışılmakta, geri kalan kısmı ise atık olarak nitelendirilmekte ve atık depolama sahalarında gömülerek bertaraf etme çalışmalarına tabi tutulmaktadır.

Mekanik öğütme yöntemiyle iki farklı kısma ayrılan beyaz dros, metalik alüminyumca zengin kısım ve metalik olmayan kalıntı kısmı olarak sınıflandırılmaktadır. Metalik alüminyumca zengin kısım geri dönüşümün parçası halinde tekrardan ergitme işlemlerine sokularak içerdiği metal geri kazanılabilmektedir. Ancak yüksek alüminyum oksit miktarına sahip olan metalik olmayan kalıntı kısmı için henüz bir değerlendirme prosesi bulunmamaktadır. Bunların içerdiği bileşiklerden dolayı gömme sahalarında yer altı suları ile teması sonucunda toksik ve patlayıcı gazlar açığa çıkartmakta ve canlı yaşamını tehlikeye sokmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında alüminyum ergitme işlemleri sonucu açığa çıkan beyaz dros, döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirilerek tekno-ekonomik değeri olan ürünlere dönüştürülmüştür. Hammadde olarak kullanılan beyaz dros, %27,7 metalik alüminyum, %38,55 alüminyum oksit içermektedir. Bunun dışında; azot ve klor gibi çeşitli elementleri içeren bileşiklere sahiptir.

İlk adımda mekanik öğütme işlemi ile metalik alüminyumca zengin ve alüminyum oksitçe zengin iki farklı fraksiyon elde edilmiştir. Bu iki fraksiyon metalik kısım ve metalik olmayan kalıntı olarak adlandırılmıştır.

Metalik ve metalik olmayan kısım olarak ayrıldıktan sonra elde edilen iki farklı ürün için iki deney grubu tasarlanmıştır. Metalik kısım için indüksiyon ocağında iki çeşit tuz kullanma yöntemi ile belirli parametreler çerçevesinde, alüminyum külçe üretimi amaçlanmıştır. Metalik olmayan kalıntı kısmı için ise atık olarak sınıflandırmak yerine yüksek alüminyum oksit içeriği sebebiyle bir hammadde olarak değerlendirilmiş ve elektrik ark fırınında tekno-ekonomik değere sahip bir ürün olan ergimiş alümina üretimi hedeflenmiştir.

Metalik kısım ( $Al_{Dros}$ ) ile indüksiyon ocağında yapılan deneyler çerçevesinde, iki farklı tuz kullanım yöntemi incelenmiş ve ergimiş metalik kısmın üzerine flaks ilavesinin daha yüksek alüminyum geri kazanımı sağladığı tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen ürünler ağırlık ve içerik açısından incelendiğinde,  $Al_{Dros}$  ergitme sırasında eklenen flaks miktarının optimizasyonunun ergitme verimi üzerinde son derece önemli olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde verimli bir ergitme elde edebilmek için eklenen flaks malzemesinin kullanılan  $Al_{Dross}$  miktarına oranının optimize edilmesi gerekmiştir. Aşırı miktarda flaks kullanımı hem ergitilmesi zor viskoz bir cüruf fazı nedeniyle döküm zorluklarına neden olmuş hem de elde edilen alüminyum alaşım miktarının beklenenden az olmasıyla sonuçlanmıştır. Eklenen flaks miktarının azaltılması, kabul edilebilir seviyelerde alüminyum alaşımları elde edilmesini sağlamıştır. Ancak optimum miktardan daha az flaks eklenmesi de üretilen alüminyum alaşım miktarının azalmasına neden olmuştur. Diğer parametreler de incelendiğinde başlangıç potasının ısıtılması, yüksek miktardaki şarj girdisinin metal geri kazanımına olumlu etkisi olduğuna karar verilmiştir. İdeal flaks kullanımı ile hammadde olarak kullanılan  $Al_{Dros}$  içinde bulunan demir oksit, silisyum oksit ve magnezyum oksitler gibi empüriteler metalik ürüne geçmeden direkt olarak curuf yapısı içerisine alınmıştır. Bu sayede daha yüksek saflığa sahip alüminyum külçeler elde edilebilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda %98,36 alüminyum içeriğine sahip külçe üretimi ve %85,81'e kadar alüminyum geri kazanım verimi sağlanmıştır.

Metalik olmayan kısım ise 270 kVA gücünde elektrik ark fırını kullanılarak ergitme işlemi ile değerlendirilerek ergimiş alümina üretilmiştir.

Metalik olmayan kalıntı kısmı ile yapılacak deneyler için ilk başta bilgi ve tecrübe elde edebilmek için elektroliz kalite alüminayla deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda ilk olarak fırın refrakterindeki ergime sonucunda ürüne yüksek miktarda MgO girdisi tespit edilmiştir. Bu sonuç doğrultusunda fırın refrakteri yenilenmiş ve yüksek alümina içerikli refrakter tercih edilmiştir. Daha sonra ise üst elektrot çapının 10 cm'den 8,5 cm'e düşürülmesine karar verilmiş ve görünüş olarak ergimiş alüminaya daha yakın bir ürünün oluştuğu belirlenmiştir. Elde edilen ürünlerin kimyasal analizi yapılması için gözenekli yapısı sebebiyle öğütme işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Kimyasal analiz sonuçlarındaki yüksek demir oranının sebebi olarak yüksek krom içerikli çelik öğütücü olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sertliğe sahip olan ürün, öğütücüde aşındırmaya sebep olmuş ve toz numunede kontaminasyona sebep olmuştur. Bu sebeple öğütücü olarak daha yüksek sertliğe sahip olan tungsten karbür öğütücü kullanılmaya başlanmıştır. Tekrardan yapılan analiz ile toz numunede demir içeriğinin standartlara uygun hale geldiği belirlenmiştir.

Kazanılan tecrübeler ve eğitim sisteminde yapılan değişiklikler sonucunda elektroliz kalite alümina kullanılarak %98,8 alümina içeriğine sahip bir ergimiş alümina üretimi Deneysel 3 ile sağlanmıştır. Elde edilen başarı sonucunda beyaz drosun metalik olmayan kalıntı kısmı ile ergimiş alümina üretim deneylerine geçilmiştir.

Metalik olmayan kalıntı ile toplamda 5 eğitim deneyi gerçekleştirilmiştir. Yapılan ilk deneyde ergimiş alümina üretimi denenmiştir ve yüksek alümina içeriğine sahip bir ürün elde edilmiştir. Ancak bu deneylerde ise metalik olmayan kalıntı içerisindeki tuz içeriği ve barındırdığı geri kazanılamayan metalik haldeki alüminyum fırın içerisinde sorunlara sebep olmuştur. Tuz içeriği sebebiyle yüksek miktarda duman ve gaz çıkışı nedeniyle ergiyiğin üst kısımda hava ile katılaşmaların oluşması fırın içerisinde sıkışmalara sebep olmaktadır. İçerdiği metalik alüminyum ise yüksek sıcaklık sonucunda oksitlenmiş ve fırın içerisinde anlık patlamalara sebep olmuştur. Bu iki durum sebebiyle numunelerin beslenmeden önce ön kalsinasyon işlemine alınmasına karar verilmiştir. Döner fırında 1100 °C'de ön kalsinasyon gerçekleştirilmiş ve içerdiği metalik alüminyum oksitlenmiş ve içerdiği tuzların büyük bir kısmının uçurulması ile saflaştırma işlemi yapılmıştır.

Ergimiş yapıdan analize gönderilen numuneler üç gruba ayrılmıştır. Fırın tabanındaki kısım elektrota yakınlığı sebebiyle karbon kontaminasyonuna daha yüksek seviyede maruz kalmıştır. Ürünün en üst kısmı ise hava ile soğumasından kaynaklı bir kapak

görevi görmüştür ve ısı kaybını önlemiştir. En verimli alan ise kapak ve fırın tabanı arasında kalmış kısım olduğu belirlenmiştir. Numara 2 olarak sınıflandırılan bu bölüm ergimiş alümina olarak değerlendirilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda ürünler XRD ve XRF yöntemleri ile karakterize edilmiştir, %95 safiyette ergimiş alümina üretilmiştir. XRD analizleri ile korundum olan yapının ergitme sonucunda rhombohedrale dönüştüğü tespit edilmiştir. Ürünlere arşimet yöntemiyle yoğunluk ölçümü, vickers yöntemiyle de sertlik testleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda artan alümina içeriğine bağlı olarak yoğunluk ve sertlikte artış olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen ürünler hammaddedeki safsızlıklardan kaynaklı, saf alümina tozundan üretilen beyaz ergimiş alüminadan ziyade boksit cevherinden üretilen kahverengi ergimiş alüminaya daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Boksit cevheri yerine atık ve çevreye zararlı bir ürünün hammadde olarak kullanılması, hem çevreci bir yaklaşım ortaya koymakta hem de döngüye dahil edilmesinden dolayı ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, yapılan deneysel çalışmalar, beyaz drosun hem metalik alüminyumca zengin kısmının hem de metalik olmayan kalıntısının geri dönüşüme kazandırılabilirliğini göstermektedir. Bu süreç, hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli kazanımlar sunmaktadır. Beyaz drosun geri dönüşümü, sadece değerli alüminyum metalinin geri kazanılmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çevreye zararlı atıkların bertaraf edilmesini de gereğince ortadan kaldırmaktadır. Bu, sürdürülebilir bir endüstriyel uygulama için kritik öneme sahiptir ve alüminyum üretim süreçlerinin daha çevreci ve verimli hale getirilmesine yardımcı olur.

Beyaz drosun geri dönüşümüyle ilgili çalışmalar, endüstriyel uygulamalara entegre edilebilir ve geniş çapta uygulanabilir niteliktedir. Bu uygulamalar, alüminyum üretim tesislerinde standart hale getirilerek, büyük ölçekli geri dönüşüm projeleri için model oluşturabilir. Ayrıca, bu tür geri dönüşüm projeleri, atık yönetimi stratejilerini geliştirerek, doğal kaynakların korunmasına ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına katkıda bulunacaktır.

Özetle, beyaz drosun geri dönüşümü, alüminyum endüstrisi için hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük bir fırsat sunmaktadır. Bu süreç, yalnızca doğal kaynakların korunmasını sağlamakla kalmayarak aynı zamanda endüstriyel atıkların çevresel

etkilerini azaltarak, daha sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir adım teşkil eder. Beyaz drosun etkin bir şekilde geri dönüşümü, alüminyum üretiminde yenilikçi ve çevreci uygulamaların yaygınlaşmasına katkı sağlayarak, endüstrinin genel performansını ve sürdürülebilirliğini arttıracaktır.





## KAYNAKLAR

- [1] **Handbook, M. S.** (1966). *Aluminum and Aluminum Alloys*. Washington, USA: Department of Defense.
- [2] **Davis, J. R.** (Ed.). (1999). *Corrosion of aluminum and aluminum alloys*. Asm International.
- [3] **Davis, J. R.** (Ed.). (2001). *Alloying: understanding the basics*. ASM international.
- [4] **Baboian, R.** (Ed.). (2005). *Corrosion tests and standards: application and interpretation* (Vol. 20). ASTM international.
- [5] **Güray Alüminyum.** (2020). *Alüminyum teknik özellikler*. Retrieved from: <https://gurayaluminum.com.tr/aluminyum-teknik-ozellikler/>
- [6] **Lumley, R.** (Ed.). (2010). *Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications*. Elsevier.
- [7] **Flagel, J.** *Top 10 Uses of Aluminium in the Industry Today*. Retrieved from <https://matmatch.com/resources/blog/top-10-uses-of-aluminium-in-the-industrytoday/>.
- [8] **Vargel, C.** (2020). *Corrosion of aluminium*. Elsevier.
- [9] **Aluart.** Retrieved Mayıs 19,2024, from <https://www.aluart.com.tr/icindekiler/sektorel/1876-dunya-da-ve-turkiye-de-aluminyum-2022-yili-raporu>
- [10] **International Aluminium.** Retrieved Mayıs 19,2024, from <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>
- [11] **TALSAD.** (2019). *Dünyada Alüminyum*. Retrieved Mayıs 19,2024, from [http://talsad.org.tr/wp-content/uploads/2020/11/TALSAD-D%C3%BCnyada-Al%C3%BCminyum\\_1.pdf](http://talsad.org.tr/wp-content/uploads/2020/11/TALSAD-D%C3%BCnyada-Al%C3%BCminyum_1.pdf)
- [12] **Mahinroosta, M., & Allahverdi, A.** (2018). Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review. *Journal of environmental management*, 223, 452-468.
- [13] **Tabereaux, A. T., & Peterson, R. D.** (2024). Aluminum production. In *Treatise on process metallurgy* (pp. 625-676). Elsevier.
- [14] **Manufacturing of alumina through Bayer process.** Retrieved from: <https://www.worldofchemicals.com/591/chemistry-articles/manufacturing-of-alumina-through-bayer-process.html>.
- [15] **Balomenos, E., Panias, D., & Paspaliaris, I.** (2011). Energy and exergy analysis of the primary aluminum production processes: a review on current and future sustainability. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, 32(2), 69-89.
- [16] **Celebi, S.** (2015). *Management of Aluminum Thermal Metallurgy Wastes*.

- [17] **Hind, A. R., Bhargava, S. K., & Grocott, S. C.** (1999). The surface chemistry of Bayer process solids: a review. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 146(1-3), 359-374.
- [18] **Greenwood, J. A.** (1999). *The effects of surface area and organic impurities on precipitation in the Bayer process* (Doctoral dissertation, UNSW Sydney).
- [19] **Prasad, S.** (2000). Studies on the Hall-Heroult aluminum electrowinning process. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 11, 245-251.
- [20] **TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası.** *Alüminyum raporu.* (2019). Retrieved from: [https://www.metalurji.org.tr/arsiv/05\\_sektorel\\_rapor/aluminyum\\_raporu.pdf](https://www.metalurji.org.tr/arsiv/05_sektorel_rapor/aluminyum_raporu.pdf)
- [21] **López-Delgado, A., & Tayibi, H.** (2012). Can hazardous waste become a raw material? The case study of an aluminium residue: a review. *Waste Management & Research*, 30(5), 474-484.
- [22] **AlSaffar, K. A., & Bdeir, L. M. H.** (2008). Recycling of aluminum beverage cans. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 12(3), 157-163.
- [23] **Dai, C.** (2012). *Development of aluminum dross-based material for engineering application* (Doctoral dissertation, Worcester Polytechnic Institute).
- [24] **Wibner, S., Antrekowitsch, H., & Meisel, T. C.** (2021). Studies on the Formation and Processing of Aluminium Dross with Particular Focus on Special Metals. *Metals*, 11(7), 1108.
- [25] **Krone, K.** (2000). Aluminium recycling. *VDS, Düsseldorf.*
- [26] **Alfaro, I.** (1986). Technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte bei der Entstehung und der Verarbeitung von Aluminiumkrätze. *Aluminium (Düsseldorf)*, 62(4), 259-267.
- [27] **Alcircle.** (2017). *Aluminium Dross Processing: A Global Review.* Retrieved May 15, 2024, from [https://www.alcircle.com/api/media/1583584344.57746\\_Sample\\_Copy\\_Aluminium\\_Dross\\_Processing.pdf](https://www.alcircle.com/api/media/1583584344.57746_Sample_Copy_Aluminium_Dross_Processing.pdf)
- [28] **Jafari, N. H., Stark, T. D., & Roper, R.** (2014). Classification and reactivity of secondary aluminum production waste. *Journal of hazardous, toxic, and radioactive waste*, 18(4), 04014018.
- [29] **Calder, G. V., & Stark, T. D.** (2010). Aluminum reactions and problems in municipal solid waste landfills. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 14(4), 258-265.
- [30] **Urbach, R.** (2010). Where are we now in the field of treatment of dross and salt cake from aluminum recycling. In *International Aluminum Recycling Workshop, Trondheim, Norway* (pp. 7-8).
- [31] **Roth, D. J.** (2013). The Latest Steps in Mechanical Processing and Recovery of Aluminum Dross. *Alusil-MVT, Moscow, Russia.*
- [32] **Tsakiridis, P. E.** (2012). Aluminium salt slag characterization and utilization—A review. *Journal of hazardous materials*, 217, 1-10.

- [33] **Peterson, R. D.** (2011, September). A historical perspective on dross processing. In *Materials Science Forum* (Vol. 693, pp. 13-23). Trans Tech Publications Ltd.
- [34] **Tabereaux, A. T., & Peterson, R. D.** (2014). Aluminum production. In *Treatise on process metallurgy* (pp. 839-917). Elsevier.
- [35] **Davis, K.** (2010). Material Review: Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). *School of Doctoral Studies European Union Journal*, (2).
- [36] **Hart, L. D., & Lense, E.** (Eds.). (1990). *Alumina chemicals: science and technology handbook*. John Wiley & Sons.
- [37] **Mohan, A. S.** (1995). Developments in Alumina Abrasives. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 54(5), 197-199.
- [38] **Zhang, J., Li, H. B., & Duan, Y. H.** (2016). A facile and reliable preparing route of brown fused alumina from aluminum dross. *Key Engineering Materials*, 680, 335-338.
- [39] **A. W. Wilkinson**, "Automatic Handling of Bauxite Ore," Chem. Proc., September 1954
- [40] **Ampeco Abrasives.** (n.d.). Brown fused alumina - AMPECO. [https://www.ampeco.de/downloads/produkt-daten/Datenblatt\\_Normalkorund\\_GB.pdf](https://www.ampeco.de/downloads/produkt-daten/Datenblatt_Normalkorund_GB.pdf)
- [41] **Mohan, A. S.** (1995). Developments in Alumina Abrasives. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 54(5), 197-199.
- [42] **Büchel, G., Liu, X., Buhr, A., & Dutton, J.** (2007). Review of tabular alumina as high performance refractory material. *Interceram Refractories Manual*, 6-12.
- [43] **Jacobs, E. W.** (1990). Fused Alumina-Pure and Alloyed--as an Abrasive and Refractory Material. *Alumina chemicals: science and technology handbook*, 393.
- [44] **George, M., & Gitzen, W. H.** (1968). *U.S. Patent No. 3,397,952*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [45] **Osment, H. E., Emerson, R. B., & Jones, R. L.** (1968). *U.S. Patent No. 3,409,396*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [46] **Lusky, E. W.** (1979, January). Experience with Operation of the Alcoa Fluid Flash Calciner. In *JOURNAL OF METALS* (Vol. 31, No. 12, pp. 49-49). 420 COMMONWEALTH DR, WARRENDALE, PA 15086: MINERALS METALS MATERIALS SOC.
- [47] **Nickelsen, J., & Raahauge, E.** (1980). Industrial prospects and operational experience with 32 mtpd stationary alumina calciner. *Light Metals 1980*, 81-102.
- [48] **Hay, T., Visuri, V. V., Aula, M., & Echterhof, T.** (2021). A review of mathematical process models for the electric arc furnace process. *steel research international*, 92(3), 2000395.



## ÖZGEÇMİŞ

**İsim Soyisim** : Hasan GÜNEY

**Eğitim** :

- **Lisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya ve Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

### **YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

#### **Bildiriler :**

- **Güney, H., Kan, S., Benzeşik, K., Turan, A., Yücel, O.** *Evaluation of Aluminum Wastes.* ALUS'11. Istanbul, Turkey.