



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



**Alüminyum üretim teknolojilerindeki gelişmeler, çevreye etkisi ve uygulama alanları**

*Developments in aluminum production technologies, environmental impact and application areas*

*Yazar(lar) (Author(s)): Çetin ÇAKANYILDIRIM<sup>1</sup>, Metin GÜRÜ<sup>2</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-7040-1369*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-7335-7583*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Çakanyıldırım Ç. ve Gürü M., "Alüminyum üretim teknolojilerindeki gelişmeler, çevreye etkisi ve uygulama alanları", *Politeknik Dergisi*, 24(2): 585-592, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.707885

# Alüminyum Üretim Teknolojilerindeki Gelişmeler, Çevreye Etkisi ve Uygulama Alanları

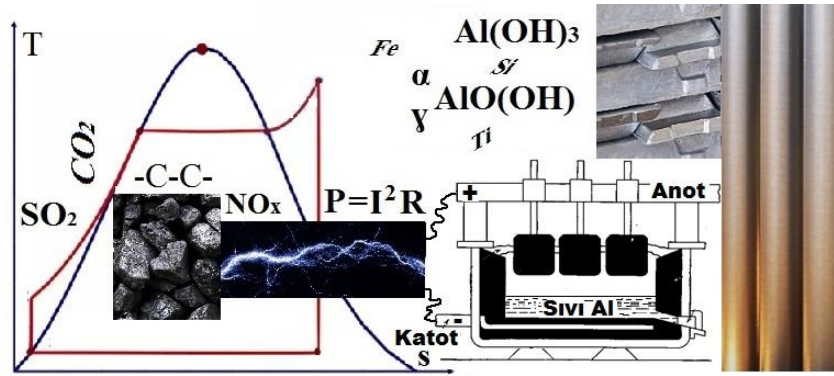
## Developments in Aluminum Production Technologies, Environmental Impact and Application Areas

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Güncel üretim metodları incelenmiştir. / Current production methods are examined.
- ❖ Üretimindeki enerji ihtiyacı açıklanmıştır. / The energy need in production are explained.
- ❖ Üretimimin çevre üzerine etkileri tartışılmıştır. / The effects of production on the environment are discussed.
- ❖ Alüminyum kullanım alanları özetlenmiştir. / Aluminum usage areas are summarized.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Yerkabuğunda bolca bulunan ve hayatımızın her alanında kullanılan alüminyum üretim teknolojisi sürekli gelişmekte ve ürün çeşitliliği artmaktadır / Aluminum production technology, which is abundant in the earth's crust and used in all areas of our lives, is constantly developing and its product range is increasing.



Şekil. Alüminyum üretim süreci / Figure. Aluminum production process

### Amaç (Aim)

Alüminyumun üretim teknolojisi, üretimin çevre üzerine etkileri ve alüminyumun yeni kullanım alanlarının güncel bir şekilde sunulması amaçlanmıştır. / It is aimed to present the production technology, the effects of production on the environment and the new usage areas of aluminum in an up-to-date manner.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışmanın hazırlanmasında güncel bilgiler ve raporlar taranmıştır. / Up-to-date information and reports have been compiled in the preparation of the study.

### Özgünlük (Originality)

Çalışma alüminyum üretimini teknoloji, çevre, enerji ve son ürün bakımından incelemektedir. / The study examines aluminum production in terms of technology, environment, energy and end product.

### Bulgular (Findings)

Enerji ve çevreci dostu yöntemler açıklanmıştır. / Energy and environmentally friendly methods are described.

### Sonuç (Conclusion)

Talebin kaynakların minimum sarfı ile karşılanması, ürün nitelik ve çeşitliliğinin sağlanması mümkündür. / It is possible to meet the demand with the minimum consumption of resources and to ensure product quality and diversity.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Alüminyum Üretim Teknolojilerindeki Gelişmeler, Çevreye Etkisi ve Uygulama Alanları

*Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.*

*Derleme Makalesi / Review Article*

**Çetin ÇAKANYILDIRIM<sup>1\*</sup>, Metin GÜRÜ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, Kimya Müh. Bölümü, Hitit Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Kimya Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 24.03.2020 ; Kabul/Accepted : 12.05.2020)

## ÖZ

Alüminyum yaşantımızın pek çok alanında kullandığımız cazip özellikleri sebebi ile vazgeçilmez bir malzemedir. Bu çalışmada alüminyumun özellikleri, sektördeki yeri, üretim teknolojisi, üretimdeki enerji ihtiyacı, çevreye etkisi ve tarihsel serüveni ana hatları ile incelenmektedir. Alüminyumun dünya kabuğunun %8'ini oluşturan boksit minerali halinde doğadan alınmaktadır. Kullanılmakta olan ve geliştirilen yeni yöntemler ile tüketiciye hem ekonomik fırsatlar hem de geniş bir ürün yelpazesi sunulmaktadır. Bu özelliklerine ek olarak düşük yoğunluk, iletkenlik, işlenebilirlik gibi konularda sunduğu avantajlarda bu mineralin önemini artırmaktadır. Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) ülkelerindeki 33 kg/kişi.yıl tüketim miktarına oranla düşük olan Türkiye alüminyum üretimi son yıllardaki farkındalık ile yıllık kişi başına 10 kg sınırını zorlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum, çevresel etki, enerji tüketimi, kristal kafes.

# Developments in Aluminum Production Technologies, Environmental Impact and Application Areas

## ABSTRACT

Aluminum is an indispensable material due to its attractive properties that we use in many areas of our life. In this study, the properties of aluminum, its place in the industry, production technology, energy need in production, its impact on the environment and its historical adventure are discussed. Aluminum is taken from nature as a bauxite mineral, which accounts for 8% of the world's crust. It offers the consumer both economic opportunities and a wide range of products with new methods that are being used and developed. In addition to these features, it has advantages such as low density, conductivity and processability, which increase the importance of this mineral. In the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) countries aluminum consumption is 33 kg/person.year compared to that of Turkey (approximately 10 kg/person.year) consumption of aluminum with low awareness in Turkey.

**Keywords:** Aluminum, environmental impact, energy consumption, crystal structure.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyumun, demir ve bakır gibi madenlerin aksine yoğun kullanım şansını yakalayabilmek için teknolojinin gelişmesini beklemek zorunda kalmıştır. Yeni ve yakın çağda dünya üzerindeki boksit kaynakları tam manası ile keşfedilmemişti ve mevcut kaynakları elinde bulundurmamak önemli bir ayrıcalıktı. İtalya'daki boksit yataklarının bulunuşuna kadar Avrupa kıtasının ihtiyacı Anadolu'daki yataklardan karşılanmıştır. Alüminyum yataklarının keşfini üretim yöntemindeki ekonomik iyileşme takip etmiştir. Alüminyum maliyetinin bir miktar iyileşmesi ile ticari olarak alüminyum üretimi 1889 yılında başlamıştır. Geniş kitlelere alüminyum ürünlerinin erişmesi maliyeti sebebi ile mümkün olmamıştır. 1914 yılında kullanılmaya başlanan elektroliz yönteminin maliyeti makul seviyeye indirmesi ile tüketim kapasitesinde artış yaşanmıştır. Farklı

alüminyum türevlerinin piyasaya arzı ile tüketim sürekli artış göstermiştir ve günümüzde, çelikten sonra en çok kullanılan metalik malzeme olarak alüminyum sektördeki yerini almıştır.

Alüminyum elementi dünyada bol miktarda bulunmaktadır. Toprağın içinde bulunan kil tabakaları alüminyum silikat bileşiklerinden oluşmaktadır. Yer kabuğunda demir yaklaşık % 5 oranında bulunduğu halde gümüş renginde olan alüminyum % 8 oranında bulunur. Alüminyumun sünekliği ve dövülebilirliği yüzey merkezli yapıdaki kristal kafes özellikleri sebebiyle iyidir. Yüzey merkezli kristal yapının sebep olduğu (111) düzlem ve [110] doğrultu aileleri yüksek atom yoğunluklarına sahiptirler. Ayrıca bu düzlem (4 adet) ve doğrultu (3 adet) toplamda 12 adet kayma ihtimaline neden olabilecek düzeydedir. Atomların yüksek yer değiştirme ihtimaline sahip olması malzemenin şekil değiştirebilme özelliğini artırmaktadır. Bu sayede alüminyum ile 0,008 mm kalınlığına kadar ince plaka

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : cetincakanyildirim@hitit.edu.tr

yapılabilir. Yine alüminyumun kristal yapısının ve düşük moleküler ağırlığının katkısı ile alüminyum yoğunluğu çeliğin yoğunluğunun yaklaşık üçte biri kadardır (Çizelge 1). Alüminyum ve alaşımlarının, sanayide fazlaca tercih edilmesinin temel nedeni alüminyum ve alaşımlarında dayanım/yoğunluk oranının, elektrik iletkenliği/yoğunluk oranının ve korozyon dayanımının oldukça yüksek olmasından dolayıdır [1]. Bu avantajlar alüminyum alaşımlarının uzay teknolojisinde ve ileri alüminyum uç ürünleri olarak kullanılmasına yol açmaktadır.

**Çizelge 1.** Alüminyumun bazı fiziksel özellikleri (Some physical properties of aluminum)

Özellik	Değeri
Yoğunluk	2,70 g/cm <sup>3</sup>
Erime sıcaklığı	660 °C
Ergime ısı	386 kJ/kg
Isıl genleşme katsayısı	24.10 <sup>-6</sup> 1/K
Özgül ısı	0,90 kJ/kg.K
Isı iletme katsayısı	229 W/m.K
Elektriksel direnç	2,67.10 <sup>-8</sup> Ohm.m
Çekme gerilmesi	62 MPa
Elastiklik Modülü	65 GPa
Sertlik	15 Brinel (500 kg, 10 mm bilya)
Kristal kafes yapısı	Yüzey Merkezli
Kafes parametresi	4,045 Å

Alüminyum; metal, toz, hadde, folyo, alaşım ve bileşikleri halinde piyasaya arz edilir. Düşük sıcaklıklarda dahi kolaylıkla işlenebilen alüminyum ve alaşımlarının folyo gibi çok ince levha haline getirilebilmesi, elektrik ve ısı iletme kabiliyetinin yüksek oluşu da büyük avantaj sağlar. Bu avantajlarının aksine, saf halde çekme dayanımı ve akma sınırı değerlerinin düşük ve hatta geniş bir aralıkta (belirsiz) olması, oksijene olan yüksek ilgisinden dolayı döküm kabiliyetinin kötülüğü, kaynak ve lehimle birleştirilmesinin zorluğu, talaşlı şekillenebilirliğinin zayıf olması, bazlara ve hidroksitlere karşı dayanıksızlığı gibi olumsuz özellikleri vardır [1,2].

Metal ve ürünlerinin imalatının farklı dallarında alüminyumun tercih edilmesi bu metalin sahip olduğu üstün özellikler sebebiyledir. Hafif bir element olan alüminyum havacılık sektörü başta olmak üzere diğer ulaşım araçlarında da kullanılır. Özellikle çelik ve bakır yerine alüminyum ve alaşımlarının kullanılmasıyla makine üretim endüstrisinde, çeşitli konstrüksiyonlarda, ağırlıkların önemli ölçüde azaltılması sağlanmıştır. Bu yüzden alüminyum ve alaşımları, havacılık ve ulaşım sektörünün yanı sıra inşaat sektöründe de çeşitli alanlarda uygulanma şansı bulmuş ve bu endüstrilerin vazgeçilmez bir temel malzemesi durumuna gelmiştir. Tüketim alanının başında inşaat % 27, otomotiv sektörü % 25, ambalaj sanayii % 15 ve elektrik % 10 ile ilk dört sırayı almaktadır. Eloksal kaplama olarak adlandırılan anodik oksidasyon ile çeşitli renklerde üretilebilen alüminyumun, inşaat sektöründe değişik uygulama alanları

bulunmaktadır. Pencere ve kapı yapımı ile dış cephe kaplamaları buna en güzel örnekleri oluşturur [1]. Alüminyumun önemli bir kullanım alanı da, toz halinde boya içine katılarak metal yüzeylerin korozyondan korunması için kaplama malzemesi olmasıdır [3-5].

Bu çalışmada alüminyumun genel özellikleri, üretimi esnasında ihtiyaç duyulan enerjinin azaltılması ve üretim yöntemleri ile bu yöntemlerin çevreye etkileri özetlenmiştir. Ayrıca yoğun kullanımına sebep olan üstün özellikleri ve kullanımını kısıtlayan olumsuzluklarına değinilmiştir. Böylece alüminyum hakkındaki bilgiler derlenmiş ve her geçen gün kullanımını artan alüminyum ve avantajları konusuna tekrar dikkat çekilmiştir.

## 2. ALÜMİNYUM (ALUMINUM)

Alüminyum binlerce yıldır farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Bu kıymetli metalin kullanımına dair ilk belgeler Roma döneminin milattan öncesindeki dönemine denk düşmektedir. Genellikle boya üretimi amacıyla ile hammadde olan bu kullanışlı metal ile Roma döneminde mutfak gereçleri de yapıldığını bilmekteyiz. Osmanlı coğrafyasında bol miktarda bulunan alüminyum sayesinde Avrupa ile iktisadi bir süreç başlamıştır. İtalya'da 15. yüzyılda yeni yatakların bulunması ile bu ticaret sekteye uğramıştır. Anadolu'dan Avrupa'ya yapıla alüminyum ihracatının durmasında, dönemin siyaseten de etkili ismi olan Papa 2. Pius'un yasaklama kararı etkili olmuştur. 19. yüzyılda metal olarak tarif edilen alüminyum 1856 yılına kadar oldukça pahalı idi. Makul üretim teknolojilerinin geliştirilmesi sonucu karşılanabilir hale gelen fiyatlar ile kullanımı yaygınlaşmıştır. Günümüzde paketleme sektöründen havacılık araçlarına kadar pek çok alanda alüminyum bol miktarda kullanılmaktadır.

### 2.1. Mikroyapı (Microstructure)

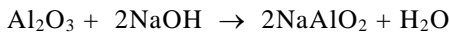
Alüminyum periyodik tabloda 13. sıradadır. Gümüş beyazı renge sahip metal yumuşak yapıdadır ve valans elektronlarının kendi etrafında aynı yönde dönmemesinden dolayı manyetik özellik taşımaz. Diğer taraftan, valans elektron sayısının 3 olması sebebi ile oldukça iyi elektriksel ve ısı iletim değerlerine sahiptir. Metal yığını etrafında meydana gelen elektron bulutu sayesinde iletkenliği kuvvetli olan alüminyum yine bu elektron bulutu sayesinde ışığın yüzeyine ulaşmasını engeller. Elektronlar ile çarpışan ışık fotonları çevreye saçılarak metalin parlak görülmesine sebebiyet verirler.

Alüminyum yüzey merkezli kristal kafes yapısına sahiptir. Atomik ve Van Der Walls yarıçapları sırası ile 143 ve 184 pm'dir [6]. Kafes özellikleri nedeni ile (birbirine yakın duran) düzlemsel ve çizgisel atom yoğunluğuna sahip alüminyum 12 adet kayma sistemine (dört adet üçgen şeklindeki (111) düzlem ailesinin her elemanı, üçgenin kenarlarını oluşturan üç farklı [110] doğrultu ailesi yönünde kayabilir) sahiptir ve kristal yapı içinde çapraz kaymaların olması da mümkündür. Aralarındaki mesafe az ve kütlece hafif olan alüminyum

atomlarının kaymalar neticesinde yer değiştirmesi fazla enerji gerektirmemektedir. Bu sebeple alüminyumun işlenmesi oldukça kolay olmaktadır. Bir ürünün ticari değerini bol miktarda temin edilebilmesi kadar işlenirken az enerji gerektirmesi de etkilemektedir. Alüminyum bu konularda oldukça avantajlı durumdadır [2,3].

## 2.2. Üretimi (Production)

Dünya'nın üst kabuğunda bulunan boksit mineralinin işlenmesi ile alüminyum üretimi başlar. Bu mineral uygun yöntemler ile öncelikli olarak alüminaya dönüştürülmelidir. Boksit, başta demir ve silika olmak üzere çeşitli safsızlıklar içeren bir mineraldir. Sodyum hidroksit ile işlem sırasında boksit içinde bulunan alüminyum oksit, sodyum alüminat haline dönüşerek çözünür [1].

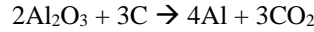


Sodyum hidroksit boksit içerisinde buluna demir oksit ve titanyum dioksit gibi safsızlıkları çözme yetisine sahip değildir. Silikatlar ise az miktarda da olsa çözelti fazına geçebilirler. Çözünen silikatları çözeltiden uzaklaştırmak için kireç kullanılır ve kalsiyum silikat çökeltisi halinde ortamdan uzaklaştırılırlar. Elde edilen sodyum alüminat çözeltisi süzülür ve hidroliz edilerek alüminyum hidroksit halinde çökeltirilir. Oluşan alüminyum hidroksit çökeltisi filtre preslerden süzülür. Daha sonra ısı ile işleme tabi tutularak alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) haline getirilir. Süreçten alınan sodyum hidroksit ise suyundan uzaklaştırılarak daha yoğunlaştırılmış hale getirilir ve tekrar kullanılmak üzere saklanır.

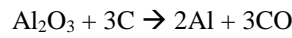
Alümina yüksek sıcaklıkta kriyolit ( $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$ ) ile erimiş halde elektroliz edilir [1]. Elektroliz hücresinin içi karbon ile kaplanmış haldedir. Bu karbon yüzey katot vazifesini yerine getirmektedir. Anot olarak yine karbon elektrotlar kullanılır. Sürecin enerji ekonomisini artırmak için alüminaya kriyolit ( $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$ ) veya kalsiyum florür katılır ve ergime sıcaklığı düşürülür. Elektroliz işlemi sonucunda oluşan sıvı alüminyum katot tarafından alınır. İşlem sırasında anot tarafında ise oksijen çıkışı olur. Elektroliz yöntemi ile üretilen alüminyum saflığının üst limiti %99,5'dir. Bu yöntemde 1 kg alüminyum elde etmek için yaklaşık 14,2 kWh (~10 TL) elektrik enerjisi gereklidir. İşlemdeki elektrik sarfıyatı elektroliz maliyetinin yarısını oluşturur [7]. Hurda alüminyum kullanılması haline ise 0,56-2,5 kWh aralığında elektrik enerjisi harcanır. Harcanan elektrik miktarındaki 5 kata yaklaşan fark, hurda alüminyum tür ve saflığına göre kullanılan fırın tiplerinin farklılık göstermesinden dolayıdır [8].

Alüminyum üretimin sırasında oluşan emisyonların 2050 yılına kadar yarıya düşürülmesi istenmektedir. Bu yıla kadar alüminyum üretiminin 2-3 kat artacak olması bu çevresel endişenin haklılığını artırmaktadır. Boksit mineralinden son ürüne kadar olan süreçte en çok enerji elektrolitik alüminyum üretiminde harcanmaktadır [7]. Bayer ve Hall-Héroult süreçleri yaygın olarak alüminyum üretiminde kullanılmaktadır. Bu süreçlerde alümina yapısındaki oksijen karbon vasıtası ile aşağıda

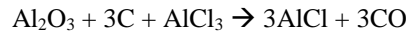
tepkimede örneklendiği gibi gaz fazında uzaklaştırılmaktadır. Bu tepkime için gerekli ortam sıcaklığı 1223-1263 K aralığındadır [9,10].



Yüksek fırında demir üretiminden esinlenerek tasarlanan Karbo Termal İndirgeme (CTR) yöntemi 2320 K sıcaklık ve üzerinde elverişli sonuçlar vermektedir. Yöntem elektrolitik alüminyum üretimine göre daha az enerji sarf etmekte ve daha az sera gazı oluşturmaktadır. Diğer taraftan yöntemin yüksek sıcaklıkta çalışması ve bu sıcaklığa ancak ark fırınları ile erişilebilmesi ve  $\text{Al}_4\text{C}_3$  ve  $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$  gibi yan ürünlere sebep olması yöntemin kullanımının şansını azaltmaktadır [11]. Zira bu yan ürünlerin ana üründen ayrılması zor bir işlemdir. CTR tepkimesi aşağıda verilmektedir.



CTR yöntemi ile alüminyum üretimi için iki basamaklı bir model geliştirilmiştir. Modelin ilk tepkimesi 1520 K, ikinci tepkimesi ise 398-798 K sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Bu modelin tepkime basamakları aşağıdaki gibidir.



Termodinamik özelliklerinden ötürü yukarıdaki tepkimelerden ilki yüksek sıcaklıkta ve düşük basınçta yüksek verim sağlarken, ikinci tepkime 298 K'de %85, 798 K'de %99 verim sağlamaktadır [11,12]. Tepkimelerin ekzerji analizleri gerçekleştirildiğinde ise sıcaklık artışı ilk tepkime için olumlu, ikincisi için tersi sonuçlar doğurmaktadır.

### 2.2.1 Alüminyum üretiminin enerji ihtiyacı (Energy requirement of aluminum production)

Alüminyum üretimi enerji ihtiyacı açısından yoğun bir süreçtir ve enerji kullanımını azaltacak veya atıl enerjinin kullanımına olanak sağlayacak yeniliklere açıktır. Enerjinin etkili sarf edilmesi ile alakalı olarak: i. (Birincil üretim için) elektroliz hücreleri, ii. (ikincil-hurda üretim için) ergitme fırınları, tekrar eritme ve döküm, iii. Sıvı alüminyumun muhafazası, iv. Isıl işlem ve homojenasyon fırınları, v. Haddeme ve ekstrüzyon öncesi ön ısıtma süreçlerinde geliştirmeler yapılabilir. Ayrıca ergimiş alüminyumun karıştırılması, fırın ve potalara gazların pompalanması aşamalarında da en uygun koşullar araştırılabilir [7].

Tüm proseslerde olduğu gibi alüminyum üretimi esnasında da gaz fazında oluşan artıklar bacalar vasıtası ile üretim ortamından uzaklaştırılmaktadır. Bacalardan atılan ısı; gazın sıcaklığı, ısı kapasitesi ve kütlesi ile doğrudan ilintilidir. Bu parametrelerden sadece sıcaklık üzerinde farklılık yapılabilir. Bacadan gaz çıkış sıcaklığı düşürülerek baca ısısının bir kısmı alınabilir. Bu işlemi yaparken baca gazındaki bileşenlerin yoğunlaşmadan atılması önemlidir. Başka bir anlatımla baca gazının düşürülebileceği sıcaklığın alt limitini, atılan gaz içeriğinin en yüksek yoğunlaşma sıcaklığına sahip elemanı

belirler. Aksi durumda baca aşırı korozyona uğrayabilir. Bu istenmeyen durum özellikle kömür kullanılan süreçlerde daha baskındır.

Bacadan ısı değiştiriciler vasıtasıyla alınan ısı ihtiyaca ve kalitesine (sıcaklığına) göre iç ortam ısıtması, ham maddelerin ön ısıtılması-kurutulması veya Rankine çevrimi için kullanılabilir. Sıcaklığın düşük olması durumunda Organik-Rankine çevrimleri uygulanabilir [7]. Ayrıca termal sifon kullanılarak ısı, faz değişimi ile yerçekiminin aksi istikametine aktarılabilir [13].

İç sıcaklığı yüksek olan ekipmanların dış ortama ısı aktarımını engellemek için yalıtım malzemelerinin kullanılması gerekmektedir. Alüminyum üretiminde fırınlar ile dış ortam arasında yüksek sıcaklık farkları ve dolayısıyla çok miktarda ısı kaybı meydana gelmektedir. Kayıp ısıнын telafi edilmesi ile enerji maliyetleri artmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan ekipmanların uygun malzemeler ile gereği kadar yalıtılması bu kayıpların önüne geçecektir [14]. Seçilecek yalıtım malzemesinin maliyeti, kullanım ömrü ve kayıp ısı maliyeti dikkate alındığında optimizasyon gerekliliği görülmektedir. Optimizasyon hesaplarında değişken enerji fiyatları ve kayıp ısıнын telafisi sırasında çevreye verilen zarar ve zaman içinde bu zarar nedeni ile karşılaşılabilecek olası vergi ve cezalar da düşünülmelidir.

Ayrıca bazı yeni teknik uygulamaların kullanıma alınması da enerji verimliliği konusunda katkı sağlayabilir. Örneğin: i) Fırın içeriğinin farklı noktalarına ihtiyaç duyulan ısıyı aktarabilecek sistemler, ii) Hızlı ergitme gereksiniminde hava kullanılarak yanma işlemi yapılmaktansa saf oksijen kullanmak ve bu yolla gereksiz yere hava içindeki azot sebebi ile enerji kaybetmemek, iii) Ergitme olan fırın içeriğinin karışımının sağlanması ile yakıttan gelen ısıнын daha kolay katı faza ulaşmasının sağlanması, iv) Süreçler arasındaki bekleme süre ve sayılarının azaltılması [7] gibi iyileştirmeler uygulanabilir.

Yukarıda bahsi geçen önlemlerin çoğu üretim kapasitesi dikkate alınarak uygulanmalıdır. Düşük kapasite ile çalışan tesislerde bazı tedbirler beklenen faydayı sağlamaz iken, bazı uygulamalar da büyük kapasitedeki çalışmalar için uygun olmayabilir. Dolayısıyla enerji tasarrufu için yapılacak yatırımlar öncesinde mutlaka tüm parametreler dikkate alınmalı ve tesise özgün hesaplamalar yapılmalıdır.

### 2.2.2. Alüminyum üretiminin çevreye etkisi (The effect of aluminum production on the environment)

Tüm üretim süreçlerinde olduğu gibi alüminyum üretimi için gerekli olan basamaklarda da çevresel kaynaklardan faydalanılmakta ve üretim artıkları çevreye verilmektedir. Sadece havayı kirleten atıklar içerisinde florit bileşikler, kükürt dioksit, hidrojen sülfür ve çok halkalı aromatikler sayılabilir [15]. Dolayısıyla alüminyumun topraktan çıkartılıp son kullanıcıya kadar olan serüvenindeki karbon ayak izinin takibi önemlidir. Çin'deki üretimi konu alan bir çalışma; boksit, korundum (alümina) ve elektrolitik alüminyum üretimlerinin

toplam kirlilik içindeki payları sırasıyla %1,4, %8, %90,6 olarak bulunmuştur. Alüminyum uç ürününe doğru ilerledikçe çevreye verilen etkinin katlanarak arttığı anlaşılmaktadır. Ayrıca 2012 yılı verilerine göre toplam CO<sub>2</sub>, havadaki parçacık, NO<sub>x</sub> ve SO<sub>2</sub> kirliliğinde alüminyum endüstrisi payları yine sırasıyla %3,53, %1,99, %3,47 ve %5,34 olarak tespit edilmiştir [16]. Kullanım ömrünü tamamlayan alüminyum ürünlerinin tekrar kazanılması ile küresel ısınma ve fosil yakıt kullanımının %94 civarında azaltılması mümkündür. Birincil ve ikincil alüminyum üretiminde en başta gelen tüketim kalemleri elektrik ve doğalgaz, nakliye ve katı atıkların bertarafı şeklinde sıralanabilir. Alüminyum üretiminde enerji temini için kömür yerine alternatif kaynakların kullanılmasının ise üretimdeki pek çok olumsuzluğa ve maliyete son vererek üretimin çevre üzerindeki yükünü azaltacak ve atıkların tekrar kullanım imkânını artıracak belirtilmiştir [16].

Alüminyum üretiminin çevreye olan etkilerini konu alan çalışmalar en büyük üretimi sağlayan Çin üzerine yoğunlaşmaktadır. 2015 yılı rakamlarına göre Çin 31,52 milyon ton birincil ve 5,78 milyon ton ikincil alüminyum üretmektedir. Bu üretim yıllık yaklaşık olarak %14 artmaktadır ve dünya üretiminin üçte birine denk gelmektedir [17]. Alüminyum üretiminde ikinci sırada ise Brezilya bulunmaktadır [18]. Alüminyum üretimi yoğun enerji kullanımı gerektirdiğinden, üretimin çevre üzerindeki etkileri gerekli olan enerjinin üretim yöntemi ile doğrudan ilgilidir. Enerji üretiminde yoğun olarak kömür kullanan Çin'de bir ton birincil alüminyum üretimi için gerekli olan enerji miktarı ve oluşan sera gazı miktarı 144.612 MJ ve 14.772,72 kg CO<sub>2</sub>'dir. Aynı üretim için farklı enerji kaynakları tercih eden ABD'de bu değerler yarıya inmektedir. Hurda alüminyum kullanılması durumunda ise harcanan enerji ve sera gazı miktarları, birincil alüminyum üretimine oranla %6,37 ve %4,45 düzeyine inmektedir [19].

Alüminyum üretimi dört ana başlık altında toplanabilir, bunlar i) boksit madenciliği, ii) alümina üretimi, iii) ısıtma-ergitme ve iv) döküm süreçleridir. Bu başlıklardaki işlerin başarılabilmesi için organik ve inorganik kimyasallar, su, enerji, nakliye ve diğer kaynaklar sisteme beslenmelidir. Sayılan bu kaynaklar sistemin çekirdeğinde bulunan alüminyum üretimini desteklemektedir ve sistem analizlerinde dikkate alınmalıdır. Bu süreçlerden ısıtma-ergitme aşaması en fazla enerji tüketiminin yapıldığı kısımdır [18]. Alüminyum üretim süreçlerinin çevresel etkilerini ölçmek için kapsamlı bir değerlendirme gerekmektedir. Bir üretim sürecinden veya bir süreç sisteminden kaynaklanan çevresel etkileri analiz etmek için, yaşam döngüsü değerlendirmesi uzun yıllardır etkili bir araç olarak kullanılmıştır [20]. Bir yaşam döngüsü çalışması yapılırken dört zorunlu aşama uygulanır: i. Amaç ve kapsam tanımı, ii. Yaşam döngüsü envanteri adlı veri toplama aşaması, iii. Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi adlı analiz aşaması iv. Belirlenen sonuçların yorumlanması, bu aşamaları oluşturur [21]. Bu metodolojideki analiz, ana girdi ve çıktı ürünleri,

süreçleri, hammaddeleri ve emisyonları tanımlayarak gerçekleştirilir. Bir metalin üretim analizi temin metodu ile incelenir. Bir metalin veya girdinin üretim süreci için temini o metal veya girdinin piyasadaki ağırlığı veya piyasa değerine göre farklılık göstermektedir [20]. Yaşam döngüsü analizinin alüminyum üretimine uygulanması ile üretimin küresel ısınma, ozon oluşumu, asitlenme, ötrofikasyon, ekotoksisite ve insan toksisitesi gibi altı alanda çevreyi etkilediği görülmüştür. Bu etkilerin temel sebebi ise ergitmede kullanılan elektrik tüketimidir. Elektrik üretim teknolojisinin gelişmiş olmaması ve elektrik ihtiyacının büyüklüğü çevre üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Ayrıca üretim için gerekli ısının üretilmesi ihtiyacı sera gazı salınımı üzerinde dominant etkiye sahiptir. Enerji üretimde alternatif kaynakların kullanılması veya var olanların geliştirilmesi insan sağlığı, ekosistem ve yaşam çeşitliliğine olan tesirleri azaltacaktır [18].

Araçların yakıt tüketimlerinin azalmasında araç ağırlığının düşürülmesi önem taşır. Alüminyum, magnezyum ve karbon fiber gibi hafif malzemelerin üretimleri ise fazla enerji kullanımı gerektirmektedir. Dolayısı ile bu noktada bir tercih yapılması gerekmektedir. Hafif ve kullanımda az fakat üretiminde çok sera gazına sebep olan taşıtlar mı kullanılmalı yoksa tam tersi mi? He ve ekibi gerçekleştirdikleri bir çalışmada ileri yüksek dayanımlı çelik ve işlenmiş alüminyumun sera gazı salınımlarının 3,9 ve 17,5 eşdeğer kg CO<sub>2</sub>/kg olduğundan bahsetmişlerdir. Üretim aşamasında fazladan sera gazı üretimine neden olmamanın yanı sıra ileri yüksek dayanımlı çeliğin kullanımda daha az miktarının yeterli olması sebebi ile hesaplanan her sürüş senaryosunda daha çevreci olduğu görülmüştür. İşlenmiş alüminyumun ise aşırı sera gazı salınımından dolayı ancak yakıt tüketimini etkili bir şekilde azaltacağı durumda çevre dostu olabileceği savunulmuştur. Özellikle uzun yol trenlerinde veya sıkışık trafikteki araçlarda kullanıldığında işlenmiş alüminyumun çevreci bir karakter kazandığı vurgulanmıştır [22]. Hafifleştirilen araçların elektrik motorları ile hareket ettirilmesi durumunda ise sera gazı salınımının %94 oranında azaltılabileceği belirtilmiştir [23]. 2017 yılında Amerika Birleşik Devletleri, İngiltere, Çin ve Hindistan'da satılan sıfır arabaların 100 km'yi kat etmeleri için gerekli olan yakıt tüketimleri sırasıyla 8,6, 5,8, 7,6 ve 5,6 litredir [24]. Yakıt tüketimi fazla olan ülkelerde, alüminyum ile hafifletilmiş araçların kullanılması sera gazı etkilerini azaltacaktır. Özellikle sıkışık trafiğin görüldüğü şehirlerde bu hafif araçların kullanımı daha yararlı olacaktır [25-27].

### 2.3. Kullanım Alanları (Application Areas)

Alüminyum farklı fiziksel formlarda imal edilebilmektedir. Ürünlerin çeşitlilik arz etmesi kullanıcılara geniş bir seçim imkânı sunmaktadır. Ekstrüzyon, haddeleme gibi üretim süreçlerine uygun olması sebebi ile alüminyum parçalar sürekli sistemlerde imal edilebilmektedir. Alüminyum metalinin işlenmesinin az zahmet ve mekanik uğraş gerektirmesi maliyetlerin belli sınırlar dâhilinde kalmasını

sağlamaktadır. Alüminyum kullanılarak tel ve örgü halinde mamullerin üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Alüminyum üretimini kolaylaştıran bir diğer avantaj ise ergime sıcaklığının düşük olması sebebi ile kullanılabilir kalıp malzemelerinin çeşitliliğe sahip olmasıdır [4].

Alüminyum demir-çeliğe nazaran 3 kat daha hafif olduğu için taşıtlarda kullanılması büyük avantaj sağlar zira Newton yasasına uygun olarak taşıtın kütesinin azalması oranında ivmelenme artmaktadır. Normal bir otomobilde yaklaşık 80 kg alüminyum kullanılmaktadır. Alüminyumdan mamul ekipmanların demir-çelik kullanılarak üretilmesi durumunda araç ağırlığına 160 kg eklenecektir. Bu fazladan ağırlık daha güçlü motor ihtiyacı ve yakıt sarfiyatının artması anlamındadır. Özellikle havacılık sektöründe bu durum daha dikkat çekicidir ve uçakların yaklaşık %70'i alüminyum ve türevlerinden imal edilir. Bu sayede uçaklarda menzilin artışı ve yakıt tasarrufu sağlanmaktadır.

Alüminyumun ince hale getirilebilmesi bu malzemeyi ambalaj sektörü için vaz geçilmez kılmıştır. Ambalaj sektörü alüminyum ve alaşımlarının en fazla tüketildiği sektörlerdendir. Alüminyumun özellikle ince folyo haline getirilmesi ve bu folyolar ile saklanan ürünlerin hava ile olan olası temasına mani olması, alüminyumun ambalaj sektöründeki önemini artırmaktadır. Bunun yanında, alüminyumun mor ötesi ışınları geçirmeyip gıda maddelerine ulaşımını engellemesi sayesinde, yiyeceklerin raf ömürlerinin uzamasına imkân tanımaktadır. Diğer yandan, ilaç kutuları, içecek kutuları, diş macunu kapları sıralanabilecek diğer kullanım alanlarıdır. Halk arasında teneke kutu olarak adlandırılan içecek ambalajında kullanılan alüminyum, 0,27 mm kalınlığındadır ve 6 bar iç basınca kadar mukavemet gösterebilmektedir. 13-15 g ağırlığında olan bu alüminyum kutuların geri kazanılması da mümkün olmaktadır [1].

Alüminyumun 2-1000 kg ağırlığındaki külçeler (döküm ingotu) halinde piyasaya arz edilir. Bunu yanında levha, tel, toz, yuvarlak veya yassı şekillerde de üretilmektedir. Alüminyum; i) Sıcak (6 mm) veya soğuk (0,2 mm) haddeleme ürünleri veya 7-200 µm kalınlığında folyo şeklinde, ii) Plastik şekil değiştirme özelliği sebebi ile sabit veya hareketli kalıp içeren ekstrüzyon işlemi ile profiller halinde, iii) Bakırın %65'i kadar elektrik iletme kabiliyeti sebebi ile çelik özlü veya sade halde iletim hatlarında tel halinde, iv) Kum, kokil ve basınçlı döküm uygulamalarında kolaylıkla kullanım şansı bulmaktadır [1].

Alüminyuma periyodik tablodaki alaşım (katı eriyik) yapabileceği bazı metaller vasıtası ile üstün özellikler kazandırılabilir. Bir metalin diğeri ile katı eriyik oluşturabilmesi için Hume-Rothery şartlarının en az üçünü sağlaması gerekmektedir. Bu şartlar i) Benzer kristal yapısına sahip olmak, ii) Atom yarıçapları arasındaki farkın en fazla %15 olması, iii) Yakın elektronegatiflik değerine ve iv) Aynı valans elektron sayısına sahip olmak şeklinde özetlenebilir.

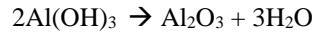
Alüminyumun bakır ile oluşturduğu duralüminyum alaşımı özellikle sertliği ile dikkat çekmektedir. Alaşımlama için kullanılabilecek diğer elementlerin arasında silisyum ve magnezyumdan da söz edilebilir [1]. Bu alaşımlara, az miktarda bakır, krom ya da kurşun eklenmesi halinde korozyon direnci ve dayanımı artmaktadır. Bu alaşımlar vida, makine parçaları, mobilya ve köprü taşıma elemanları üretiminde kullanılır. Alaşımlama işlemi için ayrıca çinko ve bakır da kullanılabilir [4]. Krom ve bakır dayanımı artırmak amacıyla katı eriyiğe eklenebilir. Krom ve bakır eklenmesinin kaynak kabiliyetini olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Yüksek mukavemete sahip alaşımlar bu gruba dâhildirler. Mukavim olan bu alaşımlar uçak imalatında rol alırlar. Bunların dışında döküm alaşımı olarak bilinen Al-Mg alaşımlarının korozyon dirençlerinin yüksek olması otomotiv ve uçak üretiminde kullanılmalarına imkân sağlar. Tuzlu sularda kullanılan deniz taşıtlarının üretilmesinde, bu ortamlara dayanıklılığı ile bilinen Al-Si karışımları yaygın olarak kullanılan döküm alaşımlarıdır. Diğer bir alüminyum alaşımı olarak Al-Sn çiftinden söz edilebilir. Bu alaşımın yük taşıma kapasitesi tatmin edici düzeydedir. Kolay şekillendirilebilen Al-Sn alaşımı otomotiv sektöründe, bağlantı elemanı ve ambalaj sektöründe konsere kutusu olarak kullanılmaktadır. Al-B alaşımlarının ortak özelliği süper sert olmalarıdır. Süper sertlik Vickers Sertlik ölçeğinde malzemelerin 40 GPa ve üzerinde değerlere sahip olmasıdır. Al-B alaşım atomları hegzagonal kafes sistemine uygun olarak dizilmiştir. Bu kafes sisteminde (0001) düzleminin kayabileceği üç doğrultu bulunmaktadır. Dolayısı ile sadece üç kayma sisteminin olması malzemenin her kuvvet doğrultusunda şekil değiştirebilmesine mani olmaktadır. Malzeme rijit yani sert özellik sergilemektedir. Yapının sert olmasının bir diğer sebebi olarak yüksek atom ve elektron yoğunluğundan da söz edilebilir. Bazı Al-B alaşımlarına ait sertlik değerleri Çizelge 2’de sunulmuştur [6].

**Çizelge 2.** Bazı Al-B alaşımları ve sertlik değerleri (Some Al-B alloys and hardness values)

Alaşım	Sertlik, GPa
Alüminyum pentacosaborür, AlB <sub>25</sub>	51
Alüminyum hegzadecaborür, AlB <sub>16</sub>	50
Alüminyum dodekaborür, AlB <sub>12</sub>	49
Alüminyum dekaborür, AlB <sub>10</sub>	41
Alüminyum tetraborür, AlB <sub>4</sub>	29
Alüminyum diborür, AlB <sub>2</sub>	25

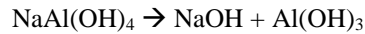
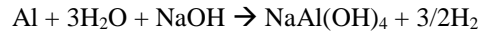
Alüminyumun hidroksit halinin yanmaz özellik sağlaması sebebi ile yangına ve alev dirençli malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Al(OH)<sub>3</sub> bulunduğu ortamlara alev direnci kazandırır. Sıcaklığın yükselmesi ile Al(OH)<sub>3</sub>'ün yapısında bulunan su molekülleri aşağıdaki tepkime denkleminde verildiği üzere açığa çıkmakta ve alevi baskılamaktadır. Bu sayede malzemenin yanmaması, duman oluşmaması ve/veya alevin ilerlememesi sağlanır. Al(OH)<sub>3</sub>'ün kullanımı halojenli alev geciktiricilerin sebep olduğu zehirli

gazların oluşmasına neden olmaz ve ekonomiktir. Al(OH)<sub>3</sub>'ün 70µm'nin altında imal edilmesi ile kullanım alanındaki yüzey pürüzlülüğü azalacak ve kullanıcı memnuniyeti de sağlanmış olacaktır.

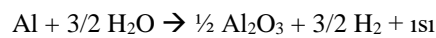
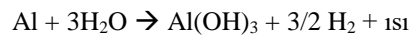


Gaz beton (Ytong) üretiminde de alüminyumdan faydalanılmaktadır. Gaz beton yüksek ısı direnci, mekanik dayanımı ve düşük yoğunluğu sebebi ile avantajlar sağlamaktadır. Gaz beton imalatında dolgu maddesi olarak silis kumu ve kireç kullanılmaktadır. Bağlayıcı görevini ise alçı ve beyaz çimento görmektedir. Gaz betonunun gözenekli yapısının sağlanması yani kabartılması maksadı ile alüminyum tozuna ihtiyaç duyulmaktadır.

Alüminyum tozu ayrıca su ile alkali ortamda tepkime vererek hidrojen üretiminde kullanılmaktadır. Aşağıda NaOH kullanılması halinde böyle bir sürecin vereceği tepkimeler genel hatları ile verilmektedir. Hidrojen gazının sürekli ve güvenilir bir şekilde üretilmesi karbon kullanmayan çevreci enerji üretim sistemlerinin geliştirilebilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu maksatla kullanılacak alüminyumun saflığının yüksek tutulması önemlidir. Alkali ortamda bulunan alüminyum parçacıklarının yüzeyi su varlığında oksitlenmektedir. Oksit tabakası ve tepkime hızı ortamın pH değerine müdahale edilerek kontrol edilebilmektedir. Süreç 30-60 °C sıcaklıklarda yürütülmektedir ve bu sıcaklığın sağlanması için güneş enerjisinden faydalanmak mümkündür. Artan alkalinite ile tepkime de hızlanmakta ve 420 mL H<sub>2</sub>/min.g.Al hızında hidrojen üretimi sağlanabilmektedir [28].

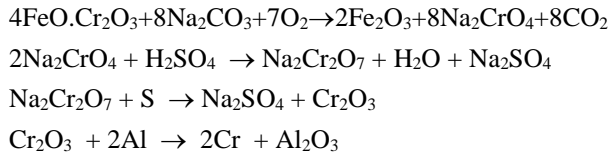


Alüminyum ile hidrojen üretilmesinde son ürünün gipsit (Al(OH)<sub>3</sub>), bohemit (NaOOH) veya korundum (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yönünden zenginliğinin tespitine dair denemeler 0,1-10 MPa basınç ve 273-600 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu farklı ürünlerin oluşması ayrıca süreçten alınan ısı miktarını da etkilemektedir. Ürünleri tahmin etmeye yönelik kullanılan model tepkimenin sıcaklık ve basınç aralıklarında korundum bileşiminin oluşmasının güç olduğunu göstermiştir. Bohemit bileşiminin özellikle 294 K üzerinde baskın ürün olduğu, sıcaklığın düşürülmesi ve basıncın artırılması ile gipsit miktarında artış olacağı bulunmuştur [29]. Bu üç bileşimin oluşmasını sağlayacak denklemler aşağıda verilmektedir.



Alüminyum kromat yapısındaki oksijeni tutarak (indirgeyerek) krom, bor oksit vb. kimyasalların üretiminde aşağıdaki tepkimelerde verildiği şekilde kullanılmaktadır.





Yüksek saflıkta ve ticari değeri yüksek kromun üretilmesi için ise ısı yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu maksatla parçacık boyutu küçültülerek yüzey alanı artırılmış krom (III) oksit, alüminyum tozu ile etkileştirilir. Yüksek ısıda geniş bir temas alanı bulan alüminyum yanar (oksijeni kendisine bağlar). Bu süreçte bol miktarda ısı açığa çıkar. Yüksek saflıkta metal gerekli olduğunda ise kromik asit çözeltisi elektroliz edilir. Bu yöntem, elektrolizle kaplama işlemlerinde geniş ölçüde kullanım alanı bulmuştur [1].

Alüminyumun düşük parçacık boyutunda üretimi için metal tozu üretim tekniklerinden bir tanesi olan atomizasyon yöntemi uygulanabilir. Atomizasyon işleminde ergimiş haldeki metal, sıvı veya gaz jeti ile atomize edilmektedir. Metalin sıcaklığı ile ergime sıcaklığı arasındaki fark, gaz veya sıvının türü, jet hızı, debiler, katılma ortamı koşulları gibi parametreler üretilen alüminyum tozunun boyutuna ve şekline etki etmektedir. Üretilen metal tozlarından soğuk veya sıcak kalıplama ve takip eden sintirleme işlemleri ile tam yoğunlukta metal parçalar oluşturulabileceği gibi metalik boya üretimi de mümkün olmaktadır. Metalik boyalar çok katmanlı olup, boyanın ilk katmanını renk pigmentli cila oluşturur. Metal parçacıkları renk tabakasının içindedir ve boyaya parlaklık ve dekoratif özellik kazandırır. Bazı metal tozlarının özellikleri Çizelge 3'de verilmektedir.

**Çizelge 3.** Bazı metallerin tozları ile imal edilmiş boyalar ve özellikleri (Paints made with powders of some metals and their properties)

Parlak olanlar	Al	Ucuz
	Cr	Zehirli, ışığa hassas (renk kaybı olabilir)
	Sn	Havadan oksitlenir
Mat olanlar	Cu	Farklı görünüm sağlar, ağır metal
	Fe	Ucuz

### 3. SONUÇ (CONCLUSION)

Alüminyum yer kabuğunda bolca bulunan ve pek çok sektör tarafından kullanılan bir metaldir. Hafif olması ve farklı özellikler sergileyen alaşımlar oluşturabilmesi sebebi ile hayatın pek çok aşamasında insanlığa hizmet etmektedir. Topraktaki boksit mineralinden alüminyuma uzanan yolculukta çevreyi en fazla kirleten ve enerji gerektiren aşama elektroliz yöntemi ile elementel alüminyumun üretimidir. Karbo Termal İndirgeme (CTR) gibi yeni yöntemler bu konuda alternatif sunmaktadır. Gerek çevre üzerindeki olumsuz etkilerin

gerekse sürecin enerji bağımlılığının azaltılması için üretim koşullarında iyileştirmeler ve hurda alüminyum süreçte tekrar kullanımını gereklidir. Bu sayede kirlilik ve enerji tüketim değerleri %95,55 ve %93,63 kadar azaltılabilmektedir. Pek çok alanda fayda sağlayan alüminyumun geri kazanımının teşvik edilmesi ve üretim teknolojilerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Bu manada alüminyumun çok daha cazip bir üretim kalemi haline geleceği gerçeği son çalışmalar ile daha net ortaya koyulmuştur. Gelecek planlamaları yaparken alüminyum gerçeğinin gözden kaçırılmaması gerekmektedir. Gerek havacılık ve savunma sanayiindeki hızlı gelişmeler ve gerekse alüminyum uç ürünlerindeki yaygın etki, kurulacak Alüminyum Araştırma Enstitüsünün kurumsal önemini ortaya koymaktadır.

### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Çetin Çakanyıldırım:** Literatür araştırması ve derlemesini yapmış, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. / Reviewed and compiled the literature, wrote the manuscript.

**Metin Gürü:** Literatür araştırması yapmış ve makalenin kontrol işlemini gerçekleştirmiştir. / Reviewed the literature and controlled the manuscript.

### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yalçın H. ve Gürü M., "Malzeme Bilgisi", *Palme Yay.*, 3. Baskı, Ankara, (2012).
- [2] Kaw A.K., "Kompoze Malzeme Mekanığı", *Efil Yay.*, Ankara, (2014).
- [3] Uzun H., "Malzeme Biliminin Temel İlkeleri", *Değişim Yay.*, İstanbul, (2012).
- [4] Demiral F., "İkiz Merdane Sürekli Döküm Yöntemiyle Üretilen AA 1050 Alüminyum Alaşımına Anodik Oksidasyon (Eloksal) İşleminin Uygulanabilme Kabiliyetinin İncelenmesi", *YL Tezi*, Gebze Tek. Ün., Fen Bil. Ens., (2015).
- [5] Krüger J., Meja P., Autric M. and Kautek W., "Femtosecond pulse laser ablation of anodic oxide coatings on aluminium alloys with on-line acoustic observation", *Appl. Surf. Sci.*, 186: 374-380, (2002).
- [6] Bykova E., Parakhonskiy G., Dubrovinskaia N., Chernyshov D. and Dubrovinsky L., "The crystal structure of aluminum doped  $\beta$ -rhombohedral boron", *J. Solid State Chem.*, 194: 188-193, (2012).
- [7] Haraldsson J. and Johansson M.T., "Review of measures for improved energy efficiency in production-related

- processes in the aluminium industry - From electrolysis to recycling”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 93: 525-548, (2018).
- [8] European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau, “Best available technique (BAT) reference document for the non-ferrous metals industries”, *Seville: European Commission's Joint Research Centre*, (2014).
- [9] Balomenos E., Panias D. and Paspaliaris I., “Energy and exergy analysis of the primary aluminum production processes: a review on current and future sustainability”, *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, 3(2): 69-89, (2011).
- [10] Poulimenou N.I., Giannopoulou I. and Panias D., “Use of ionic liquids as innovative solvents in primary aluminum production”, *Mater. Manuf. Processes*, 30(12): 1403-1407, (2014).
- [11] Halmann M., Frei A. and Steinfeld A., “Carbothermal reduction of alumina: thermochemical equilibrium calculations and experimental investigation”, *Energy*, 32(12): 2420-2427, (2007).
- [12] Yang W., Liu X., Liu J., Wang Z., Zhou J. and Cen K., “Thermodynamics analysis of carbothermal-chlorination reduction in aluminum production”, *Appl. Therm. Eng.*, 111: 876-883, (2017).
- [13] Barzi Y.M. and Assadi M., “Evaluation of a thermosyphon heat pipe operation and application in a waste heat recovery system”, *Exp. Heat Transfer*, 28: 493-510 (2015).
- [14] White D.W., “Furnaces designed for fuel efficiency”. In: Lindsay SJ, editor. Light metals, *Springer Int. Pub.*, 1165-1172, Switzerland, (2011).
- [15] Li X., Yang Y., Xu X., Xu C. and Hong J., “Air pollution from polycyclic aromatic hydrocarbons generated by human activities and their health effects in China”, *J. Clean. Prod.*, 112: 1360-1367, (2016).
- [16] Zhang Y., Sun M., Hong J., Han X., He J., Shi W. and Li X., “Environmental footprint of aluminum production in China”, *J. Clean. Prod.*, 133: 1242-1251, (2016).
- [17] Editorial Board of the Yearbook of Nonferrous Metals Industry of China, “The yearbook of nonferrous metals industry of China”, *China Nonferrous Metals Industry Association*, Beijing, (2016).
- [18] Farjana S.H., Huda N. and Mahmud M.A.P., “Impacts of aluminum production: A cradle to gate investigation using life-cycle assessment”, *Sci. Total Environ.*, 663: 958-970, (2019).
- [19] Peng T., Ou X., Yan X. and Wang G., “Life-cycle analysis of energy consumption and GHG emissions of aluminium production in China”, *Energy Proced.*, 158: 3937-3943, (2019).
- [20] Norgate T. and Haque N., “Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations”, *J. Clean. Prod.*, 18: 266-274, (2010).
- [21] Farjana S.H., Huda N. and Mahmud M.A.P., “Life cycle analysis of copper-gold-lead-silver-zinc beneficiation process”. *Sci. Total Environ.*, 659: 41-52, (2019).
- [22] He X., Kim H.C., Wallington T.J., Zhang S., Shen W., Kleine R., Keoleian G.A., Ma R., Zheng Y., Zhou B. And Wu Y., “Cradle-to-gate greenhouse gas (GHG) burdens for aluminum and steel production and cradle-to-grave GHG benefits of vehicle lightweighting in China”, *Resour. Conserv. Recy.*, 152: 104497, (2020).
- [23] Palencia J.C.G., Sakamaki T., Araki M. and Shiga S., “Impact of powertrain electrification, vehicle size reduction and lightweight materials substitution on energy use, CO<sub>2</sub> emissions and cost of a passenger light-duty vehicle fleet”, *Energy*, 93(2):1489-1504, (2015).
- [24] Yang Z. and Bandivadekar A., “Global Update: Light-duty Vehicle Greenhouse Gas and Fuel Economy Standards”, International Council on Clean Transportation(ICCT).[https://theicct.org/sites/default/files/publications/2017-Global-LDV-StandardsUpdate\\_ICCT-Report\\_23062017\\_vF.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/2017-Global-LDV-StandardsUpdate_ICCT-Report_23062017_vF.pdf). (2017).
- [25] Kim H.C. and Wallington T.J., “Life cycle assessment of vehicle lightweighting: a physics-based model of mass-induced fuel consumption”, *Environ. Sci. Technol.*, 47(24): 14358-14366, (2013).
- [26] Luk J.M., Kim H.C., De Kleine R., Wallington T.J. and MacLean H.L., “Review of the fuel saving, life cycle GHG emission, and ownership cost impacts of lightweighting vehicles with different powertrains”, *Environ. Sci. Technol.*, 51(15): 8215-8228, (2017).
- [27] Kim H.C., Wallington T.J., Sullivan J.L. and Keoleian G.A., “Life Cycle assessment of vehicle lightweighting: novel mathematical methods to estimate use-phase fuel consumption”. *Environ. Sci. Technol.*, 49(16): 10209-10216, (2015).
- [28] Sheikhabahaei V., Baniyadi E. and Naterer G.F., “Experimental investigation of solar assisted hydrogen production from water and aluminum”, *Int. J. Hydrogen Energ.*, 43: 9181-9191, (2018).
- [29] Godart P., Fischman J., Seto K. and Hart D., “Hydrogen production from aluminum-water reaction subject to varied pressures and temperatures”, *Int. J. Hydrogen Energ.*, 44: 11448-11458, (2019)