

SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA ve ALÜMİNYUM

Erman CAR

ÖZET

İnsanlığın ulaştığı yüksek teknolojik düzey ve bunun yarattığı çevresel sorunlar, hammadde kaynaklarının sınırlı olması gerçeği ve enerji üretimi ve ekonomisinin getirdiği baskılar sonucu “sürdürülebilir kalkınma” kavramı, günümüz dünyasında hem mühendislerin hem ekonomistlerin hemde sosyologların gündemine girmiştir. Sürdürülebilir kalkınma “insanlara iyi bir yaşam kalitesi sağlamak ve bunu sağlarken de gelecek kuşakların ihtiyaçlarını giderecek kaynakları tehlikeye atmadan, bugünün ihtiyaçlarını karşılamak” olarak tanımlanabilir. Alüminyum metalinin “yeniden üretilebilirlik (recycling)” özelliği ve ilk üretim sürecinde harcanan enerjiyi sanki bir banka gibi depolayarak, daha sonraki yeniden ergitme süreçlerinde çok daha düşük enerji harcanarak ve hiç bir özelliğini kaybetmeden yeniden ekonomik döngüye katılabilmesi, “sürdürülebilir kalkınma” kavramı içinde önemli bir yer tutmasına neden olmuştur. Sürdürülebilir kalkınma, ekonomik, çevresel ve sosyal olmak üzere üç bileşeni olan bir sacayağı olarak düşünülebilir. Bu çalışma da alüminyum-enerji ve yeniden üretilebilirlik-sürdürülebilir kalkınma ilişkisi irdelenmektedir.

Anahtar kelimeler : Sürdürülebilir kalkınma, alüminyumun yeniden üretilmesi (recycling), enerji

GİRİŞ

“Yeryüzü denilen gemide hiç yolcu yok, hepimiz mürettebatız”. Marchall Mc Luhan.

Yaşadığımız yüzyılda, binlerce yıllık uygarlığımızın geldiği nokta hiç de iç açıcı bir manzara göstermemektedir. Özellikle kuzey-güney dengesizliği yaşamın her alanında kendini göstermektedir.

Ortalama olarak dünya nüfusu yılda % 1.4 oranında artmaktadır. Dünya nüfusunun 2040 yılında 9 milyarın üzerinde olması beklenmektedir. Bu sürecin getirdiği toplumsal sorunlar aşağıda ana başlıkları ile özetlenmiştir :

- 1 milyardan fazla insan temiz su bulamamaktadır,
- Gelişmekte olan ülkelerde yaşayan nüfusun yaklaşık % 70’inin evlerinde, okullarında ya da hastanelerinde elektrik yoktur,
- Dünya nüfusunun yarısı günlük 2\$’in altında kazanarak, yaşamaya çalışmaktadır. Daha da acısı her 6 kişiden biri, yani yaklaşık 1.1 milyar insan günlük 1\$’in altında kazanç ile yaşamak zorundadır.
- Yaklaşık 885 milyon insan okuma-yazma bilmemektedir. Bunun üçte ikisi kadındır.



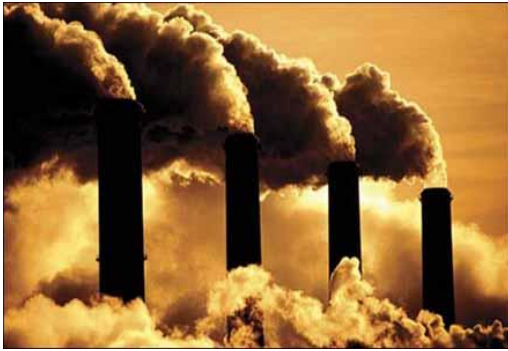
Buna ek olarak, dünya enerji tüketimi her yıl ortalama %1.7 oranında artmaktadır (nüfus artışından daha fazla). Bugün dünya enerji tüketimi yaklaşık 15 TeraWatts (1TW=10¹²Watt) civarındadır. Bu enerjinin yaklaşık % 80’i fosil yakıtlardan (% 34’ü petrol, % 25’i kömür, % 21’i doğal gaz), % 8’i bioenerji, % 6.5’u nükleer, % 2’si su kaynakları ve kalanı diğer kaynaklarda (jeotermal, güneş, rüzgar vs.’den sağlanmaktadır. Bu tüketimin 2050 yılında 30 TW civarında olacağı tahmin edilmektedir. Tüketilen bu enerjinin çok büyük bir bölümü ise fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Örneğin Amerika’da

yenilenebilir enerjinin, toplam enerji üretimi içindeki payı yalnızca % 7 dir. İnsanoğlu hem enerji üretebilmek için fosil yakıtları kullanarak doğrudan, hem de ölçsüz tüketim ile dolaylı olarak CO₂ üretimini körüklemektedir. Yani karbon ayak izleri ile her yeri kirletmektedir.

Tablo 1: 1973 ve 2006 yıllarında, kaynaklarına göre dünya enerji üretiminin dağılımı:

Enerji kaynağı	% (1973)	% (2006)
Yenilenebilir ya da atıklardan elde edilen enerji	10.6	10.1
Jeothermal, rüzgar, güneş vs.	0.1	0.6
Petrol	46.1	34.4
Kömür	24.5	26
Doğal gaz	16	20.5
Nükleer	0.9	6.2
Su kaynaklı	1.8	2.2

SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA



Hızla artan dünya nüfusu ve doğal dengenin bozulması, doğal kaynakların kendini yenileyebilme gücünün de ötesinde tüketilmesi, çevrenin kalıcı olarak kirletilmesi, daha dogrusu yok edilmesi, ülkeleri, uluslararası çözüm yolunda örgütlenme zorunluluğuna yöneltmiş ve 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren “sürdürülebilir kalkınma kavramı” gündeme gelmiştir. Ters durumda, gelişmenin durması ve giderek binlerce yılda yaratılan uygarlığın yok olması söz konusu olabilecektir.

Başka bir deyişle “sürdürülebilir kalkınma projesi”nin temelinde ekonomi ile çevre arasında bir dengenin kurulması gereksinimi yatmaktadır. Ortada bilimsel, teknolojik, endüstriyel ve ekonomik gelişimin bir bedeli olarak doğanın zarar gördüğü gerçeği vardır. Sürdürülebilir kalkınma projesi, bugünkü kuşakların gereksinimlerini, gelecek kuşakların kendi gereksinimlerini karşılayabilmelerini tehlikeye sokmadan karşılayabilen bir kalkınma modelidir. Sürdürülebilir kalkınmanın birbirine bağlı 3 boyutu vardır:

- Sosyal boyut; sürekli eğitim ile insanlara “yaşam kalitesinin arttırılmasının” kendileri ve sonraki kuşaklara sağlayacağı yararlar ve kalkınırken çevresel değerlere de sahip çıkmanın bir külfet değil zorunluluk olduğu anlaşılmıştır,
- Ekonomik boyut; yeryüzündeki her kaynak sınırlıdır ve dolayısı ile elimizdeki her kaynağı yaşam kalitemizi arttıracak şekilde ve bütün insanlık için en adil olarak nasıl dağıtılabileceğinin yolu bulunmalıdır.
- Çevresel boyut; yeniden üretme-değerlendirme (recycling) süreci geliştirilerek işletilmeli ve ek olarak malzeme üretim ve tasarım süreçlerinde yeniden üretme- değerlendirme kriteri olarak alınmalıdır. Tüketim çılgınlığı dizginlenmeli ve enerji ve hammadde kaynaklarının ölçülü kullanımı, buna bağlı olarak daha az atık üretme teşvik edilmelidir.

ALÜMİNYUM METALİNE GENEL BİR BAKIŞ

Alüminyum Metalinin Özellikleri

Mükemmel özellikleri nedeni ile alüminyum metali, çok genç bir metal olmasına karşın, günlük hayatımızın her yanına girmiştir. *Hafiftir*, demirin özgül ağırlığı 7.87 gr./cm³, bakırın özgül ağırlığı 8.93 gr./cm³ ve çinkonun özgül ağırlığı 7.14 gr./cm³ iken alüminyumun özgül ağırlığı 2.69 gr./cm³’dür. Alaşımlandırılarak ve ısı ile *yüksek mekanik dayanım* değerlerine ulaşmak olanaklıdır. Yüksek mekanik dayanımına karşın hafif olması, motorlu taşıt, uzay, uçak,

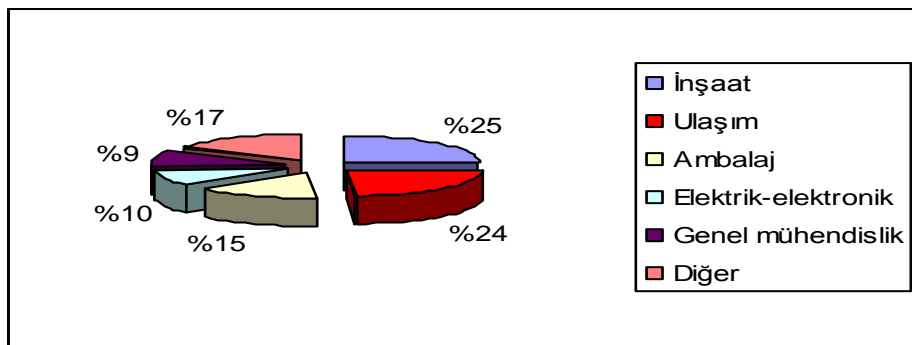
gemicilik ve inşaat endüstrilerinde yaygın kullanılabilmesini sağlar. Yüzeyinde oluşan doğal oksit filmi nedeni ile *yüksek korozyon dayanımına* sahiptir. Maliyet ve ağırlık değerleri ile birlikte ele alındığında diğer metallerden daha *yüksek ısıl iletkenlik* değerine sahiptir. *Yüksek yansıtıcılık*, özelliği sayesinde ışık, radyo dalgaları ve kızılötesi ışıma karşın koruyucu olarak kullanılabilir. Elektriksel iletkenlik değeri aynı miktardaki bakırın % 63'ü kadardır. *Yüksek elektrik iletim* yeteneği nedeni ile elektrik mühendisliği uygulamalarında alüminyum malzemeler geniş yer tutar. *Kıvılcım oluşturmadağı için* yakıcı atmosfer ve patlayıcı maddelerle güven içinde kullanılabilir. *Estetik ve dekoratif* bir malzemedir. Doğal rengi ve parlaklığının yanısıra çeşitli yüzey işlemleri uygulanarak değişik renk ve görünümde malzemeler elde edilebilir. *Kolay şekil alabilen* bir metaldir. Çeşitli döküm ve plastik şekil verme yöntemleri ile karmaşık parçalar bile kolaylıkla üretebilir. Bu özelliği tasarımcılara sonsuz sayıda ve farklı şekillerde parça tasarlama avantajını verir. Bütün kaynak ve birleştirme teknikleri, alüminyumdan üretilmiş ürünlere uygulanabilir. Isı ve ışık dahil olmak üzere *elektro-manyetik ışınlar* karşı *yansıtıcılığı* sayesinde bu ışınları düşük oranlarda absorbe eder. Alüminyumdan üretilmiş parçaların kesilmesi ve çok kısa süreli proseslerle işlenebilmesi olanaklıdır. Alüminyum *paramanyetik* bir malzemedir ve *yarılanma ömrü* çok düşük bir malzemedir. *Antitoksik olması* nedeni ile, gıda sektöründen ilaç sektörüne kadar bir çok sektörde ambalaj malzemesi olarak kullanılabilir.



Birincil üretimdeki yüksek enerji girdisinden ötürü pahalı bir metaldir. *Fiyatı*, LME (Londra Metal Borsası) tarafından saptanır. Belki de en önemli özelliklerinden birisi de *Yeniden üretilebilir (recyclable)* oluşudur. Ekonomik ömrünü doldurmuş ve proses sürecinde hurdaya çıkmış malzemeler başlangıçtaki metalurjik özelliklerini büyük ölçüde

ytirmeden, birincil üretimin % 5'i kadar bir maliyetle yeniden üretilerek kullanılabilir.

Şekil 1: Alüminyum kullanımının sektör bazında dağılımı:



Tablo 2: Alüminyumun özelliklerine ve malzeme şekline bağlı olarak ana sektörlerde kullanımı:

Ana Sektörler	İlgili Temel Özellikler					Malzeme şekli					
	Özgül ağırlık	Elektriksel ve ısı iletkenlik	Korozyon dayanımı	Görünüm	Mekanik dayanım	Döküm	Levha	İnce folyo	Ekstrüzyon	Tel	Dövme
Ulaşım	** *		**	**	**	• •	••			••	••
İnşaat	**		***	** *	*		•		•• •		
Ambalaj	**	*	***	** *			••	•• •	••		
Elektrik mühendisliği	*	***	**		*	•		•	•	•• •	•
Mekanik mühendisliği	**		**		**	• •	••		••	•	•
Tüketim malzemeleri	**	**	**	**	*	•	•• •	•	•	•	•
Kimyasallar	*	*	***		*		•• •		••		

*** Zorunlu

** Önemli

* Yararlı

••• Yaygın

•• Genel

• Kullanılabilir

Tablo 3: Yıllara göre dünya birincil alüminyum üretim ve tüketimleri:

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Üretim, milyon ton	28.0	30.0	31.9	33.4	35.1	37.7	39.6	41.2
Tüketim, milyon ton	27.9	30.2	31.8	33.8	35.2	37.6	39.4	41.3
Büyüme, %	7.8	7.0	6.2	4.7	5.1	7.4	5.2	4.0
Fark, milyon ton	0.2	-0.2	0.1	-0.4	-0.1	0.1	0.2	-0.1

Birincil Alüminyum Üretimi

Birincil alüminyum üretimi, birbirinden bağımsız 4 süreçten oluşur : **Şekil 2 : Alcoa Fjardaal**

1. Boksit madenciliği
2. Boksit cevherlerinden Bayer Prosesi ile alümina üretimi,
3. Alümina'dan Ergimiş Tuz Elektrolizi (Hall-Herault Prosesi) ile metalik alüminyum üretimi,
4. Enerji üretimi ya da temini.



Çok kabaca;



4 kg. boksitten,



2 kg. alümina ve 2 kg. alüminadan.



1 kg. metalik alüminyum elde edilebilir.

Günümüz dünyasında, ticari boyutta birincil alüminyum üretiminin tamamı alüminyum elektroliz hücrelerinde gerçekleştirilmektedir. Hall-Heroult yöntemi olarak bilinen elektroliz yoluyla alüminyum üretim prosesi yerine, alternatif yöntemler üzerinde uzun süreden beri çalışılıyorsa da ve hatta bazı pilot tesisler kurulmuş olsa da, bu yöntemlerin endüstriyel uyulama alanı bulacaklarına dair tüm ümitler kaybolmuş gibidir. 100 yılı aşkın geçerli olan klasik yöntemin daha uzun yıllar bizimle birlikte olacağı artık kesinleşmiş ve araştırmalar bu yöntemin performansını artırma yönünde yoğunlaştırılmıştır. Dünyada yapım halinde olan ve planlanan tüm birincil alüminyum tesisleri Hall- Heroult yöntemine dayalıdır.

Yaklaşık 150 yıl önce ticari anlamda üretimine başlanan alüminyum hala çok genç bir metal olmasına karşın, insanoğlunun binlerce yıl boyunca kullandığı bakır, kalay ve kurşunun bugünkü toplam üretimlerinden çok daha fazla bir miktarda üretilmektedir.

Günümüzde yeniden değerlendirilmiş (ikincil) alüminyumla birlikte toplam yıllık alüminyum arzı 44-45 milyon tona ulaşmıştır. Demir-çelik üretiminin yanında bu miktar küçük görülebilir. Ancak, ürettiği katma değer açısından bakıldığında yıllık 45 milyon ton alüminyumun katma değer karşılığı 2 milyar 500 milyon ton demir-çeliğe eşdeğerdir.



Birincil alüminyum üretim sürecinde, 3 temel maliyet faktörü endüstri için yaşamsal önem taşır ve bütün araştırmalar, elektroliz aşamasında bu 3 noktaya odaklanmıştır:

1. Elektrik enerjisi maliyetleri ve enerji tüketiminin düşürülmesi,
2. Üretilen ton alüminyum başına yatırım maliyetlerinin düşürülmesi (bu hem yatırım süreci için hem de proses sürecinde büyük onarım için önemlidir),
3. Çevresel kaygıların karşılanması (hem enerji üretimi hem de alüminyum üretimi sürecinde başta CO₂ ve PFC olmak üzere salınımların azaltılması).

Bütün bu çalışmalar sonucunda, bugün % 96 ve üzeri akım verimi ve % 50 ve üzeri enerji verimine erişildi. Anot tüketim değerleri düşürüldü. Dip ve yan katot blok malzemelerinde iyileştirmeler yapıldı.

1940'lı yıllarda uygulanan amperaj sadece 50 kA iken bugün 320-350 kA'lık hücreler endüstride başarı ile uygulanmakta ve 400 kA ve 500 kA'lık hücreler sırasını beklemektedir. Önpişirilmiş (Prebaked) anotlarda toplam anot yüzey alanı 5 m² den 38 m²'ye ulaşmıştır. Bu tip hücrelerde akım verimi % 93-95 değerlerine ulaşırken, ton alüminyum başına elektrik tüketimi 13 000 kWh değerinin altına düşmüştür.

SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA ve ALÜMİNYUM

Yukarıda sıralanmış özellikleri ve buna bağlı yaygın kullanımı ile alüminyum endüstrisi, sürdürülebilir kalkınma kavramı içinde önemli bir yere sahiptir. Alüminyum endüstrisi açısından, sürdürülebilir kalkınma kavramı içinde 4 temel nokta üzerinde çalışmalar odaklanmıştır :

- 1- Birincil alüminyum üretimi sürecinde oluşan sera gazı salınımlarının azaltılması,
- 2- Enerji yoğun bir üretim olan birincil alüminyum üretiminde enerji verimliliğinin artırılması,
- 3- Enerji tüketimi ve salınım açısından birincil üretime göre çok ciddi avantajlar sağlayan “yeniden üretim = ikincil üretim (recycling)” in toplam alüminyum üretimi içindeki payının artırılması,
- 4- Taşıma araçlarında çok önemli yakıt tasarrufu sağlayan ve sera gazı salınımını azaltan alüminyum kullanımının artırılması.

1- Birincil Üretim Süreçlerinde Oluşan Sera Gazı Salınımlarının Azaltılması

Öncelikle bilinmesi gereken en önemli nokta şudur ki: dünyada üretilen toplam sera gazlarının yalnızca % 1'i birincil alüminyum endüstrisi kaynaklıdır. Bu salınımın % 40'ı doğrudan elektroliz sırasındaki salınım, % 60'i ise elektroliz için gerekli elektrik enerjisinin üretilirken ortaya çıkan salınımdır.

Alüminyum elektrolizi sırasında oluşan CO₂ salınımlarını doğrudan ve dolaylı olarak iki kategoride inceleyebiliriz: Doğrudan salınım, elektroliz işlemi sırasında oluşan salınımdır ve hücre tipine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Dolaylı salınım ise, elektroliz için gerekli olan enerjinin üretilmesi sırasında ortaya çıkan CO₂ salınımdır:

Tablo 4-5: Doğrudan ve dolaylı CO₂ salınım miktarları:

Hücre tipi	CO ₂ salınımı (ton/ton Al)	Enerji kaynağı	CO ₂ salınımı (ton/ton Al)
SWPB	9.2	Kömür	11.9
HSS	7.2	Petrol	10.5
VSS	4.4	Doğal gaz	6.3
CWPB	2.4	Nükleer	0.0
PFPB	2.2	Su kaynaklı	0.0

Birincil alüminyum üretimi sırasında oluşan temel gazlar CO₂, CO, gaz ya da partikül floridler: Perflorokarbon (PFC) gazları (CF₄, C₂F₆) ve HF ve SiF₄'dür.

Elektroliz işlemi, hücrenin normal çalışması sırasında oluşan anot gazlarının % 80-90'ı CO₂, % 10-20'si CO ve çok küçük bir bölümü anot karbonunun içerdiği silisyuma bağlı olarak SiF₄ olmaktadır. Üretilen CO₂ ve CO miktarları arasındaki oran, hücrenin akım verimi ile doğrudan ilişkilidir.

Ancak anot etkisi sırasında oluşan anot gazının bileşimi % 10-15 CO₂, % 60-70 CO, % 15-20 CF₄ (tetrafloretan) ve çok az miktarda (% 0.5-1) C₂F₆ (hekzafloretan) olmaktadır.

Anot etkisi, elektroliz prosesi sürecinde, hücre voltajının ani artışı ile (4,2-4,5 V'dan 30-60 V'a) kendini gösterir. Elektrolit içindeki alümina konsantrasyonu % 2'nin altına düştüğünde, CF₄ gazının anot tabanına bir film şeklinde yapışması ile rezistansın yükselmesi sonucu meydana gelir ve elektrik akımı anot tabanında büyük ölçüde düşerken, anot kenarlarında artar.

Birincil alüminyum üretiminde PFC gazları sadece anot etkisi sırasında oluşur. Pratik olarak alümina nokta beslemeli ve bilgisayar kontrollü, modern hücrelerde düşük sayıda anot etkisine rastlanırken, yandan çalışılan prebaked ve yatay ya da düşey pimli eski Soderberg hücrelerde bu sayı dolayısı ile PFC salınımı daha fazladır.

Alüminyum üreticileri üzerinde bu gazların yayılımını önlemeleri konusunda büyük baskı vardır. Elektroliz prosesinde salınan ana gaz CO₂ gazıdır. PFC gazlarının oranı yaklaşık %

20'dir. Ancak PFC gazlarının CO₂ eşdeğerlik katsayıları ve küresel ısınma potansiyelleri oldukça yüksektir. 1 kg CF₄, 100 yıllık bir periyot içinde 1 kg CO₂ gazından 6900 kat daha fazla kızılötesi enerji tutar. CF₄'ün atmosferde kalma süresi ise 50.000 yıldır. Benzer şekilde C₂F₆ gazının da Küresel Isınma Potansiyeli CO₂ gazının 9200 katıdır. Yüksek anodik potansiyel etkisi altında anod yüzeyinde oluşan perflorokarbon (PFC) gazlarının tümü CO₂'den çok daha tehlikeli sera gazlarıdır ve bunların atmosferde barınma ömürleri 10⁴-10⁶ yıl arasında değişir.

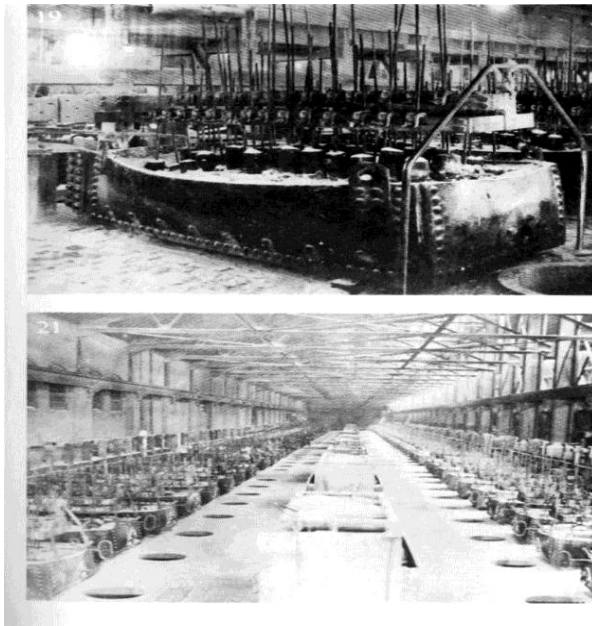
Şekil 3 : Nokta besleyici



Birincil alüminyum teknolojisinde yaşanan teknolojik gelişmeler ile, özellikle Soderberg teknolojinin hızla terk edilmesi, bilgisayar kontrollu prebaked hücrelere geçiş ve alumina nokta besleme teknolojileri, daha yüksek amperajlı yani daha yüksek akım verimine sahip hücre tasarımları, elektrolit bileşiminin değiştirilmesi ile elektrolit sıcaklığına düşürmeye yönelik çalışmalar ve anot etkisinin önceden tahmin edilebilirliğinde yaşanan büyük gelişmeler ile anot etkisinden tamamen

kurtulmanın yolları aranmaktadır.

Şekil 4: 1901 yılında Alcan Shawinigan'da çalışan orjinal hücre ve elektrolizhane ve günümüzden modern Alcoa Prebaked hücresi ve özel amaçlı vinci.

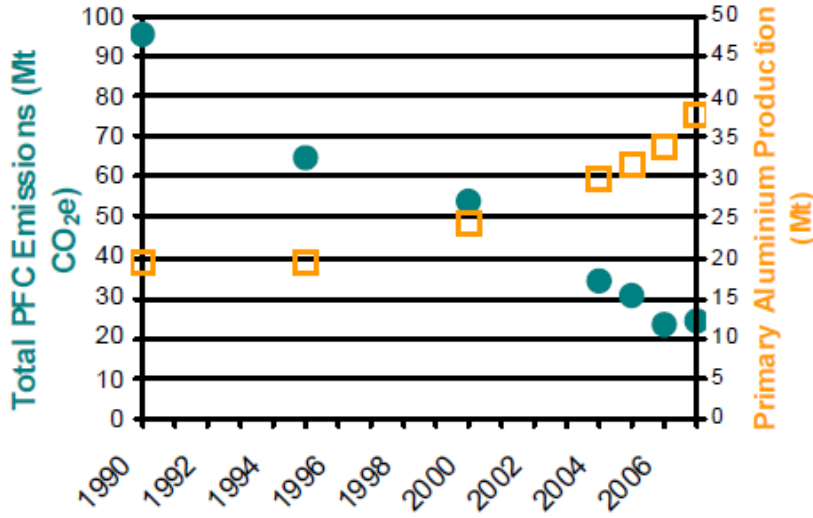


Uluslararası Alüminyum Enstitüsü (IAI) 2007 verilerine göre, ton alüminyum başına PFC salınımı 1990-2006 yılları arasında % 86 oranında azalmıştır. 2020 yılına kadar ise ilave % 50'lik azalma daha beklenmektedir. Böylece 2020 yılında, 1990 yılına göre ton alüminyum başına PFC salınımindaki azalma % 93'ü bulmuş olacaktır.

2. Birincil Alüminyum Üretim Sürecinde Enerji Tüketiminin Azaltılması

Teorik olarak, elektroliz reaksiyonunun başlayabilmesi, sistemi sabit basınç ve sıcaklık altında tutabilmek ve reaktanların sıcaklıklarını proses sıcaklığına ulaştırabilmek için gerekli enerji ton alüminyum başına 9300 kWh'dir. Ancak Prebaked teknolojiye görülen en yüksek akım verimi % 95 ve ton alüminyum başına elektrik tüketimi 13 000 kWh iken, bu rakam Söderberg teknolojiye %90,5 ve 13 400 kWh/ton Al, ortalama olarak ise %90 ve 15 000 kWh/ton Al'dur.

Şekil 5 : Yıllara göre PFC salınımları



Birincil alüminyum üretim metalurjisinde, alüminyum elektrolizi sırasında en çok önemsenen parametreler akım verimi ve enerji verimidir.

Akım verimi, hücreye uygulanan akımın, Faraday Yasası'na göre ne kadarının, elektroliz için kullanıldığının ölçüsüdür ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:.

$$\% \text{ akım verimi} = \frac{\text{gerçek üretilen metal miktarı}}{\text{Faraday Yasası'na göre üretilmesi gereken metal miktarı}} \times 100$$

Faraday Yasası'na göre üretilmesi gereken metal miktarı kg Al = akım şiddeti X saat X 0.0003353862 olarak verilir.

Tipik akım verimi değerleri teknolojiye bağlı olarak % 85-96 arasındadır.

Enerji verimi ise, hücreye verilen enerjinin ne kadarının elektroliz için kullanıldığının ölçüsüdür.

Tipik olarak % 45-%50 arasındadır. Kalan enerji çevreye yayılarak, kaybolmaktadır.

Elektroliz prosesi, bugün için bile tam olarak çözülememiş, karmaşık bir prosesdir. Bu nedenle elektrik tüketiminin azaltılması bir çok etmene ve hatta bir çok etmenin kombinasyonuna bağlıdır. Ancak en temel ayırım anot tipine göre yapılabilir. Prebaked hücrelerin performans, her zaman için Söderberg hücrelerden çok daha yüksektir.

Tablo 6: Prebaked-Söderberg performansların karşılaştırılması:

Parametre	Prebaked	Söderberg
Amperaj (kA)	350	160
Hücre ömrü (gün)	>2 000	1 500
Enerji tüketimi (kWh/ton Al)	13 500	16 000
Akım verimi (%)	95	88
Alümina tüketimi (ton/ton Al)	1.92	1.97
Anot tüketimi (ton/ton Al)	420	550
Alüminyum florür tüketimi (kg/ton Al)	20	35

Söderberg hücrelerde elektrik tüketiminin % 20 daha fazla olduğu görülmektedir.

Öncelikle hücre üretimi ve verimliliği uygulanan akım şiddeti ile doğrudan ilişkilidir. Eski Söderberg ve düşü akım yoğunluğu ile çalışan Prebaked hücrelerin verimsizliklerinin temel nedenlerinden birisi de, düşük akım yoğunluğu ile çalışmalarıdır. İkinci temel etmen ise hücrenin stabil koşullarda çalıştırılabilmesidir.

Elektrik enerjisi tüketimini doğrudan etkileyen asal parametrelerden önemli iki tanesi ise elektrolit sıcaklığı ve elektrolit bileşimidir. Düşük sıcaklık, düşük enerji tüketimi anlamına gelmektedir. Akım veriminin optimum olduğu elektrolit sıcaklığı 950°C'dir.

- Elektrolit sıcaklığı 960 °C'ye doğru arttığında her 1 °C artış akım veriminin % 0.02,
- 960-980 °C arasında her 1°C artış ise, akım veriminin % 0.17,
- 980-1000 °C arasında her 1 °C artış, akım veriminin % 0.5 azalmasına, ve
- Elektrolit sıcaklığı 950 °C 'den 920°C'ye düşerken ise her 1°C'lik düşüş, akım veriminin % 0.01 azalmasına neden olur.

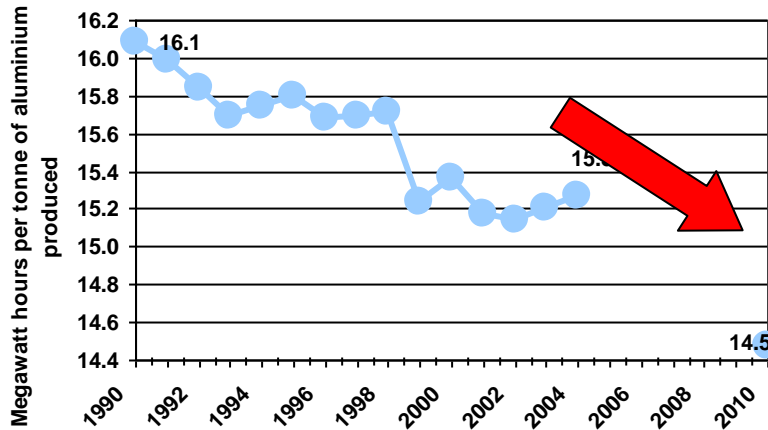
Benzer bir ilişki elektrolit oranı (elektrolitteki ağırlıkça NaF/AlF₃ oranı=bath ratio) içinde kurulabilir. Optimum elektrolit oranı 1.07'dir.

- Elektrolit oranı 1.25'den 1.10'a doğru azaldığında, her % 0.01'lik azalma akım veriminin % 0.55,
- Elektrolit oranı 1.10'dan 1.07'ye doğru azaldığında, her % 0.01'lik azalma akım veriminin % 0.13 artmasına neden olurken,
- Elektrolit oranı 1.07'den 0.95'e doğru azaldığında ise her % 0.01'lik azalma için akım veriminin de % 0.8 azaldığı görülür.

Ancak yeniden vurgulamakta yarar var ki, alüminyum elektrolizi çok karmaşık bir prosesdir ve bir çok parametreyi ve bunların kombinasyonlarını dikkate almak gerekir.

Uluslararası Alüminyum Enstitüsü'nün 2008 yılı verilerine göre, 1990 yılından bugüne kadar, ton alüminyum başına ortalama enerji tüketimi (büyük ölçüde Söderberg teknolojili tesislerin kapatılması ya da modernizasyonu nedeni ile) 16 100 kWh 'den 14 500 kWh ortalamasına kadar düşmüştür.

Şekil 6 : Yıllara göre ton alüminyum başına harcanan enerji



3. Alüminyum Yeniden Üretiminin (Recycling) Yaygınlaştırılması



Alüminyum, diğer metallerle karşılaştırıldığında en yüksek yeniden üretim oranına sahip metaldir. Alüminyumun bu özelliği "sürdürülebilir kalkınma" kavramının tüm gereklilikleri ile birebir örtüşmektedir.

Alüminyum metali ile ilk tanıştığımız 1888 yılından bugüne yaklaşık 800 milyon ton alüminyum üretilmiştir. Bunun yaklaşık % 73'ü, yani 580 milyon tonu halen kullanımdadır ve bu alüminyum malzemeler ömrünü doldurduğunda, yani hurdaya çıktığında, dünyanın gelecek 15 yıllık birincil alüminyum gereksinimi ile aynı miktara karşı gelmektedir.

Çok basit bir hesap ile 1 ton birincil alüminyum üretebilmek için yaklaşık 4.8 ton boksit cevherine, 450 kg. kostik sodaya, 90 kg. kireçtaşına, 20 kg. alüminyum florüre ve 430 kg. karbon anota ihtiyaç duyulur. Enerji yoğun bir proses olan elektroliz sürecinde ortalama 15 000 kWh elektrik enerjisi harcanır. Sürecin diğer aşamalarında ise (boksit madenciliği, alümina üretimi, anot ve elektrolit tuzlarının üretimi) yaklaşık 32 000 MJ ısı enerjisi tüketilir.

Alümina üretimi sırasında ise aşağı yukarı 3 000 kg. kırmızı çamur atık olarak üretilir. Elektroliz sırasında ise anot etkisi ve proses stabilitesinin bozulması nedeni ile CO₂ ve PFC gazları salınır. Sonuç olarak birincil üretim, yüksek enerji tüketimi ve yarattığı atıklar nedeni ile zorlu bir süreçtir. Ancak kullanım ömrünü dolduran ya da prosesler sırasında ıskartaya çıkan alüminyum hurdalar, birincil üretimin % 5'i kadar bir enerji tüketimi ile ve birincil üretimin sadece % 5'i kadar tehlikeli gaz salınımı ile, kalitelerinden ödün vermeden yeniden üretilirler.

Yeniden üretim olgusu ile:

- Rasyonel hammadde kullanımı ve buna bağlı olarak hammadde tasarrufu,
- Rasyonel enerji kullanımı ve buna bağlı olarak enerji tasarrufu ve enerji üretim süreçlerindeki kirli gaz salınımının azaltılması,
- Hem birincil üretim sürecindeki atıkların olmayışı hem de hurdaya çıkmış malzemelerin yeniden kullanımı ile çevre kirliliği ile mücadele,
- Ekonomik kazanç sağlama isteği, birlikte hareket ederler.

Alüminyum, enerji bankasıdır. Birincil üretim sürecinde harcanan enerji, sanki alüminyum içinde depolanır. Bu enerjinin % 5'i kadarı ile defalarca yeniden ergitilerek, son ürüne dönüştürülebilir.

1 ton birincil alüminyum üretimi için alümina rafinasyonundan, döküm aşamasına kadar yaklaşık 168 000 MJ enerji harcanırken (% 80 i elektrolizde), bu rakam, ikincil alüminyum üretimi için hurda hazırlama ve curuf işleme dahil, sadece 11 200 MJ'dur. Yani birincil üretimin % 5-6'sı kadardır.

Tablo 7: Birincil ve ikincil üretim endüstrilerinin karşılaştırılması

Birincil üretim	İkincil üretim
Yüksek yatırım maliyeti	Düşük yatırım maliyeti
Uzun yatırım süreci	Hızlı yatırım süreci
Enerji yoğun	Yüksek enerji verimliliği
Boksit cevherlerine muhtaç	Boksit cevherlerine ihtiyacı yok,
Salınım kontrolü ve prosesi gerekli	Çevreyi çok daha az kirlüten
Proses maliyeti yüksek	Proses maliyeti daha ucuz

Yeniden üretimi en yaygın olan alüminyum malzemelerin başında içecek kutuları gelir.



Alüminyum içecek kutularının yeniden üretimi ile sağlanan enerji tasarrufuna ilişkin bir kaç çarpıcı örnek aşağıda sıralanmıştır:

Haftada 1 kutu yani yılda 52 kutu alüminyum içecek tüketildiğinde, bu kutuların yeniden üretilmesi ile sağlanan enerji tasarrufu televizyonun 156 saat (6.5 gün), gece lambasının 298 saat (8.7 gün) ya da 100 km'de 9,5 litre benzin tüketen standart bir binek otomobilinin 130 km seyahatte tüketeceği enerjiye eşittir.

Günde 1 kutu yani yılda 364 kutu alüminyum içecek tüketildiğinde, bu kutuların

yeniden üretilmesi ile sağlanan enerji tasarrufu ise televizyonun 1092 saat (45.5 gün), gece lambasının 1456 saat (60,7 gün) ya da 100 km'de 9,5 litre benzin tüketen standart bir binek otomobilinin 915 km seyahatte tüketeceği enerjiye eşittir.



27 ton ağırlığındaki bu slab, 1.5 milyon adet alüminyum içecek kutusunun yeniden ergitilmesi ile elde edilmiştir.

Alüminyum hurdaların daha fazla toplanması ve döngüye dahil olarak daha fazla yeniden üretilmiş alüminyum ürün kullanılması, hem alüminyum endüstrisi hem de sürdürülebilir kalkınma kaygısı taşıyan herkes için oldukça önemlidir.

Alüminyum sürdürülebilir kalkınma projesi için çok önemli bir metaldir. Çünkü:

- Birincil üretim için zengin cevher kaynakları mevcuttur (yaklaşık yer kabuğunun % 8'i boksit ve alüminyum içeren diğer cevherlerden oluşur),
- Bugün alümina üretiminde kullanılan Bayer teknolojisi ile, bu cevher, 200 yıl daha yeterli olacaktır,
- Çok yüksek yeniden üretilebilme potansiyeline sahiptir, özelliklerini yitirmeden defalarca yeniden üretilebilir,
- Yeniden üretimi sürecindeki metal kayıpları düşüktür,
- Diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında uzun ömürlüdür ve sürekli yeni kullanım alanları bulmaktadır. Kullanım alanlarının dolayısı ile kullanım oranlarının artması, aynı oranda ikincil kaynakların da artması anlamına gelir.
- Daha az çevreyi kirletir. 1 ton alüminyumun, yeniden üretilmesi ile birincil üretim sürecine göre yaklaşık olarak 9100 kg daha az CO₂ eşdeğeri kirli gaz üretilir.

Yeniden üretim üç farklı döngü şeklinde karşımıza çıkar:

Açık döngü, kapalı döngü ve bunların kombinasyonu.

Kapalı döngü, aynı tip hurdanın yeniden üretilerek, aynı amaçla kullanımıdır. Örneğin kullanılmış alüminyum içecek kutusundan tekrar içecek kutusu üretmek ya da jant hurdalarından yeniden jant üretmek gibi. Ancak hurda bulunabilirliği ve hurda hazırlama prosesinin



kompleksliği nedeni ile tercih edilen bir yöntem olsa da pratikte, kutu, ambalaj, inşaat ve proses hurdaları dışında uygulanması zordur.

Açık döngüde ise, hurda karışımından, karışımın kompozisyonuna uygun (ya da tam tersi ürün kompozisyonuna uygun hurda kompozisyonu hazırlayarak) yeni ürün eldesidir. Örneğin kutu hurdalarından piston üretimi gibi. Hurda bulunabilirliği açısından daha esnek, ama hurda hazırlama süreci daha karmaşıktır.

Doğal olarak, her ikisinin kombinasyonu daha esnek.

Kapalı döngü ile genellikle hadde ve ekstrüzyon alaşımları üretilirken, açık ya da kombine döngü döküm alaşımlar üretiminde daha çok tercih edilir.

Çevre odaklı politikaların yürürlüğe girmesi ve ikincil üretim teknolojilerindeki gelişmeler sonucunda, ikincil üretimin toplam üretim içindeki payı 1990 yılında % 25 iken, bugün % 30'lara kadar çıkmış ve üretim miktarı kendi içinde iki kat artmıştır.

4. Taşıtlarda Alüminyum Kullanımının Yaygınlaştırılması

Gerek işlem gerek ise döküm alaşımları taşımacılık endüstrisinde geniş kullanım alanı bulan alüminyum malzemelerdir. Alüminyum özgül ağırlığı çeliğin yarısı kadardır. Alüminyum metali, çok kolay işlenebilen metallere bir tanesidir ve işlenebilirliği ya da alüminyumundan üretilebilecek parçaların şekil limiti yoktur. Korozyon direnci yüksektir ve diğer metaller ile alaşımlandıkça yüksek mekanik ve termomekanik özelliklere ulaşılabilir. Bütün bu olumlu özelliklerine karşın alüminyum pahalı bir metaldir ve taşı araçlarında kullanımı sınırlıdır (ortalama toplam kütlenin % 5'i). Bunlara ek olarak alüminyumun yüksek yeniden değerlendirilebilme özelliği, ikincil alüminyumun en büyük kullanıcılarından olan otomotiv üreticileri için önemli bir avantajdır. Bunlarla beraber alüminyumun teknik özelliklerini kaybetmeden yeniden üretilebilir olması, önemli üstünlüklerinden birisidir ve otomotiv



endüstrisi ikincil alüminyumun en önemli kullanıcılarındandır.

Alüminyumun taşıt endüstrisinde kullanılma ihtiyacı ve bu endüstriyi yeni teknoloji ve malzeme arayışlarına iten etmenler ise aşağıda sıralanmıştır :

- aşırı rekabetçi pazar koşulları,

- daha yüksek performansa sahip araç üretebilme kaygısı,
- daha güvenilir, daha güvenli ve daha kaliteli üretim,
- maliyetlerin azaltılması,
- çevresel zorunluluklar,
- daha az yakıt tüketimi ve dolayısı ile daha az sera gazı salınımı,
- ikincil alüminyumdan üretilmiş parçaların, üreticiler için cazip olması,
- alüminyumun elektrik ya da yenilenebilir enerji ile çalışacak yeni kuşak taşıt tasarımına uygun bir malzeme oluşu,
- kolay hammadde bulunabilirliği,

Öte yandan ticari araç üretiminde alüminyum kullanımının getireceği yararlar ise:

- daha fazla yük/yolcu taşıma yeteneği,
- düşük bakım maliyeti,
- daha az yakıt tüketimi,
- daha az sera gazı salınımı,
- daha yüksek dayanım,
- taşıt ikinci el değerinin daha yüksek oluşu,
- sınırsız defa ilk özelliklerini yitirmeden yeniden üretilebilir olmasıdır.,

Taşıtlarda alüminyum kullanımının getireceği yararları 4 ana başlık altında toplamak mümkündür:

1. Yakıt verimliliğinin yükseltilmesi ile daha az enerji tüketimi,
2. CO₂ salınımlarının azaltılması,
3. Performans avantajları,
4. Daha güvenilir taşıt üretimi.

1. Yakıt verimliliğinin yükseltilmesi,

Ticari taşıtlarda her yüzde 10'luk ağırlık azalması, %6-8 arasında yakıt tasarrufu sağlar.

Alüminyum içeriği yüksek olan taşıtlar daha az yakıt tüketir, daha uzun ömürlüdürler ve daha az bakım gerektirirler. Taşıt ağırlıklarının azalması, yakıt tüketimi ile beraber, CO₂ salınımını da azaltır.

Ağır yük taşıyan kara taşıtlarında, alüminyum kullanımı ile taşıtın kendi ağırlığı düşerken, taşıyabileceği yük miktarı artar. Taşıt ağırlığındaki 1 ton azalma taşıta 100 000 km'de, geleneksel taşıtlara göre 1500 litre az mazot tüketme şansını verir.

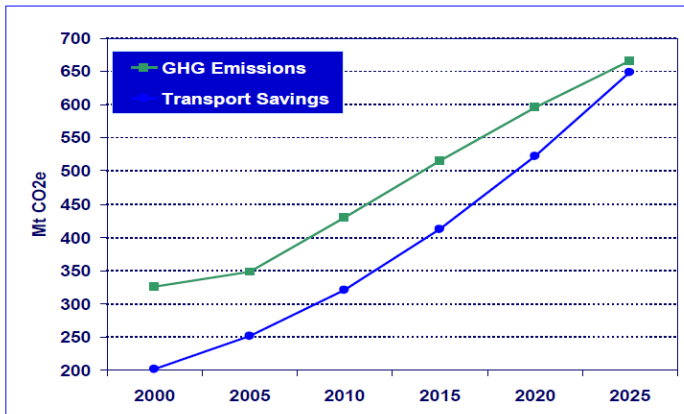
Hafif yük taşıyan kara taşıtlarında ise, taşıt ağırlığının azalması kilometre başına yakıt tüketimini azaltırken, taşıtlarda 1 tonluk bir azalma, 100 000 km'de, geleneksel taşıtlara göre 600 litre daha az mazot kullanması anlamına gelir.

2. CO₂ salınımının azaltılması

Dünya atmosferine sera gazı salınımının % 19'u taşımacılık endüstrisi kaynaklıdır.

Taşıtlara eklenen her bir ton alüminyum, taşıtın kullanım ömrü boyunca ortalama 18 ton daha az CO₂ salmasına neden olur.

Şekil 7 : Tahmin edilen sera gazı salınımı ve taşıtlardan yapılabilecek sera gazı salınım azalması:



Uluslararası Alüminyum Enstitüsü'nün verilerine göre, günümüzde taşıtlarda alüminyum kullanımı ile (birincil alüminyum üretimi dahil), yılda 300 milyon ton CO₂ salınımı azalmaktadır. Taşıtlarda alüminyum kullanımının artmasının teşviki ile hedef, 2025 yılında,

taşıt araçlarının yaydığı sera gazı miktarına eşdeğer miktarda, sera gazı salınımında azalma öngörülmektedir.

3. Performans avantajları

Alüminyumdan üretilen taşıtların “daha iyi” olduğu olgusu büyük üreticiler tarafından kabul görmüş bir gerçektir. Bu nedenle örneğin Ferrari, Jaguar ve Audi taşıtlarda alüminyum kullanımı konusunda başı çeken üreticilerdir. Alüminyum araçlar, geleneksel yani daha ağır olan araçlara göre daha çabuk hız arttırabilirler ve fren mesafeleri daha kısadır. Bunlarla birlikte alüminyum araçlar daha stabildir, daha yüksek manevra yeteneğine sahiptir ve daha az ses ve vibrasyon yayarlar, sürüşleri daha yumuşaktır, yolu daha iyi kavrarlar.

Alüminyum çelikten iki kez daha hafif olmasına karşın aynı mekanik dayanım değerlerine sahiptir ve mükemmel korozyon direncine sahiptir. Bu nedenle alüminyum araçlar daha uzun ömürlüdür ve daha az bakım gerektirirler..

4. Daha Güvenilir Tasit Uretimi

Alüminyum tasarımlar, kaza sırasında oluşan çarpma enerjisini, geleneksel taşıtlara göre çok daha büyük oranda absorbe edebilirler. Pratik olarak ağırlık azalmasının getireceği absorpsiyon potansiyeli % 40'dan fazladır. Bu nedenle ön, arka ve yan tamponlarda güvenlik açısından, alüminyum ideal bir malzemedir.

Alüminyum tasarımlar, taşımacılık endüstrisinde en büyük rakibi olan çelik malzemelerle aynı (hatta bazı alışımlar daha yüksek) mekanik dayanım, eşdeğer rijitlik ve daha uzun kullanım ömrüne sahip olmasına karşın % 40-60 daha hafiftir.

Yukarıda sıralanan benzer avantajlar, alüminyumun uzay, uçak ve gemicilik endüstrilerinde de geniş kullanım alanı bulmasına neden olmuştur. Ancak bu ayrı bir çalışma da ele alınmalıdır.

SONUÇ

Günlük hayatımızın her yerinde kullandığımız alüminyum metali, genç bir metal olmasına karşın, çağdaş bir metaldir. Taşıdığı mükemmel özellikler ile de “sürdürülebilir kalkınma” olgusu içinde çok önemli bir yere sahiptir. Yapılması gereken modern teknolojiler sayesinde, minimum hammadde ve enerji tüketimi ile üretimi sürdürmek/dönüştürmek, maksimum hurda toplama ve yeniden üretme ile ikincil üretimin payını arttırmak ve yaşamın her alanında daha makul tüketerek ve dolayısıyla daha az sera gazı üreterek çocuklarımıza yasanabilir bir dünya bırakmaktır.

Kaynaklar

1. Aluminium Recycling and Europe Status and Prospects / Gunter Kirchner / Organisation of Aluminium Refiners and Remelters / www.eaa.net
2. The Aluminium Industry Sustainable Program – Implementing the OECD Environmental Strategy Meeting / Robert Chase / International Aluminium Institute / March 2006
3. Recycling Works – State and Local Solutions to Solid Waste Management / U.S. Environmental Protection Agency / April 1999 / www.epa.org
4. Global Aluminum Recycling, the Global Energy Cycle and the Role of the Society Regarding Collection / IEA-IAI Workshop / Jurg Gerber / Alcan / May 2007
5. Recycling Aluminium and Effect on Sustainable Development / Hoberg H. – Wolf S. / Chair for Mineral Processing, Beneficiation and Waste Treatment / RWTH / Aachen

6. Aluminium Recycling : The Commercial Benefits, the Technical Issues and The Sustainability Imperative / Pal Vigeland / Hydro / Metal Bulletin 9th International Secondary Aluminium Conference / Prag / 2001
7. Creating Innovative and Sustainable Solutions for Today's Challenges and Tomorrow's Opportunities / Jon Herald Nielsen / Hydro / Metal Bulletin 19th International Aluminium Conference / Oslo / 2004
8. Aluminium in Automotive – an Ongoing Success? / Karl Leinz von Zengen / The Aluminium Automotive Manual / EAA / www.aluminium.org
9. Moving up to Aluminium – Light, Strong and Profitable / EAA / www.aluminium.org
10. U.S. Energy Requirements for Aluminium: Historical Perspective, Theoretical Limits and New Opportunities / William T.Choate – John A.S. Green / U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy Industrial Program / www.doe.gov
11. Hall Herault Centennial, First Century of Aluminum Process Technology (1886-1986) / The anniversary volume sponsored by the Light Metals Committee of The Metallurgical Society and presented at the 115th TMS Annual Meeting in New Orleans, Louisiana, March 1986 / Edited by Warren S. Peterson (Metallurgical Chemical Processes) and Ronald E. Miller (Alcoa Technical Center).
12. Industrial Hall-Herault Process / Halvor Kvande / TMS Dubai 2008 Electrolysis Short Course / 2008
13. The Aluminium Value Chain / Unlocking Aluminium's value and building a sustainable future / Bernt Reitan / ALCOA / CRU's World Aluminium Conference / Bahrain / May 2007
14. Birincil ve İkincil Alüminyum Üretim Süreçleri / Erman Car / TMMOB MMO Yayın No:2
15. Türkiye'de Çevre Politikaları ve Sürdürülebilir Kalkınma İlişkisi / Elif Haykır Habikoğlu / İ.Ü. Sosyal Bilimler Meslek Yüksek Okulu / Sosyal Bilimler Dergisi / Sayı:2 / 2007
16. Aluminium for FutureGenerations / Sustainability updated 2007 / IAI / www.world-aluminium.org
17. Aluminum Builds a Better Car / The Aluminum Association Auto&Light Truck Group Webinar / December 2008 / www.autoaluminum.org
18. www.alcoa.com
19. www.hydro.com
20. Going Green: The Aluminum Perspective / Michael Bull / American Metal Market 3rd Annual Automotive Metals Conference / www.autoaluminum.org / Davy Richman /
21. Aluminum: Part of the Solution: Meeting and Challenges of Today and Tomorrow / The Aluminum Association Auto&Light Truck Group / www.autoaluminum.org
22. Key World Energy Statistics / International Energy Agency / 2008 / www.iea.org
23. Current Efficiency Theory and Practices for Continuous Improvement / G.P. Tarcy / Dubai 2008 Electrolysis Short Course / 2008
24. Sustainable Development for the 21st Century MSE Opportunities / Diran Apelian / JOM / December 2008