

# İKİNCİL ALÜMİNYUM ÜRETİM SÜRECİNDE TESİS TASARIMI ve TEKNOLOJİ SEÇİMİ

## Akın Obalı / Erman Car – SİSTEM-TEKNİK Endüstriyel Fırınlar

Günümüzde çok geniş kullanım alanlarına sahip olan alüminyum metalinden üretilmiş ürünler, ömürleri dolduğunda kaybolmazlar, yani tüketilmezler, yeniden üretime girerler ve ikincil alüminyum endüstrisinin hammaddesi olurlar. Başka bir deyişle alüminyum ekonomisi bir döngü ekonomisidir. Bu nedenle yeniden değerlendirilmeyen her bir gram alüminyum “kayıp” ve buna izin vermek ise ” hatadır”. Ancak ikincil işlemlerin hem ekonomik, hem teknolojik hem de çevresel açıdan başarılı olabilmesi için, tesis tasarımı ve buna bağlı olarak teknoloji seçimi yaşamsal önem taşımaktadır. Bu çalışmada tesis ve teknoloji seçimine yönelik ip uçları verilmeye çalışılmıştır.

### Giriş

Birincil alüminyum üretim sürecinin en kritik ve maliyetli aşaması ergimiş tuz elektrolizi ile metalik alüminyum üretimi sürecidir.

### **Şekil 1 : 320 kA ön-piştirilmiş elektroliz hücresi (GAMİ-Aostar)**



Yaklaşık 100 yıldır uygulanan yöntemin yerine geçebilecek ekonomik bir teknoloji henüz geliştirilememiştir ve daha uzun süre kullanılacağı görülmektedir.

Günümüzde en yaygın kullanıma sahip ön-piştirilmiş anotlu hücrelerde ton alüminyum başına enerji tüketimi 13 400-15 500 kWh iken, Soderberg anotlu hücrelerde bu değer 16 500 kwh/ton alüminyuma kadar çıkabilmektedir.

Endüstriyel ortalama ise ton alüminyum başına 15 000 kWh olarak düşünülebilir. Ancak sistemin toplam enerji dengesine bakıldığında, yani boksit madenciliği, Bayer Prosesi, anot üretim prosesi ve elektrolit tuzları üretim proseslerinde harcanan toplam enerji dikkate alındığında, ton alüminyum başına 45 000-52 000 kWh arasında bir enerji tüketimi hesaplanabilir. Genellikle birincil alüminyum üretim maliyetlerinde enerjinin payı, tesisin coğrafi konumuna (enerji kaynaklarına uzaklığına) bağlı olarak % 25-40 arasındadır. Buna karşın ikincil alüminyum üretimi için harcanan enerji ise ton alüminyum başına sadece 2 800 kWh’dir. Bu nedenle toplam dünya alüminyum üretimi içinde ikincil üretimin payı 1950’li yıllarda % 15’lerde iken bugün % 30’lara ulaşmıştır. Özellikle sınırlı enerji kaynaklarında sahip Güney Amerika ve Avrupa ülkelerinde çok yüksek oranlarda hurda toplama yeteneğine sahip, toplama ağırları kurulmuş ve “yeniden değerlendirme” bilinci toplumun tüm katmanlarına yayılmıştır. Burada Japonya çok ilginç bir örnektir. 1970’li yıllarda yaşanan petrol krizi sonrası, enerji fiyatlarının artması ile birinci alüminyum üretimini durdurmuş ve ikincil üretime ağırlık vermiştir.

Öte yandan üretim yöntemlerinin getirdiği çevresel sorunlara bakıldığında, elektroliz için gerekli olan enerjinin üretim kaynaklarına bağlı olarak kg alüminyum başına 1.8 kg ile 17.2 kg arasında CO<sub>2</sub> ya da eşdeğeri salınım ortaya çıkar. Elektroliz işlemi sırasında karbon anodun yanması ve anot etkisi sırasında oluşan salınımlar dahil olmak üzere ortalama 1.8 kg CO<sub>2</sub>/kg Al oranında salınım söz konusudur. Ancak elektroliz için gerekli olan enerji, doğal gaz santrallerinde üretildiğinde (kWh başına 0,4kg CO<sub>2</sub> salınımı) ilave 6.2 kg CO<sub>2</sub>/kg Al ve elektrik kömür santrallerinde üretildiğinde ise (kWh başına 1 kg CO<sub>2</sub> salınımı) ilave 15.4 kg CO<sub>2</sub>/kg Al daha salınım gerçekleşecektir. Oysa ikincil alüminyum üretimi için bu değer, teknolojiye bağlı olarak kg alüminyum başına 0.6-1 kg CO<sub>2</sub> arasındadır.

Alüminyum tesislerini 4 ana grupta inceleyebiliriz:

- 1- Birincil alüminyum tesisleri, boksit cevherinden elde edilmiş alüminadan elektroliz yöntemi ile alüminyum üreten tesisler,
- 2- İkincil alüminyum tesisleri, %100 hurda, ikincil külçe ve curuf kullanarak alüminyum döküm alaşımları ve deoxidant üreten tesisler,
- 3- Haddehane ve billet dökümhaneleri, kısmen kendi proses hurdalarını ya da dışarıdan alınan hurdayı ya da ikincil külçeyi, birincil külçe ile birlikte kullanan tesisler,
- 4- Dökümhaneler, birincil ve ikincil tesislerden gelen alüminyum malzeme ile döküm son ürün ya da billet, slab, levha ya da filmaşın gibi işlem alaşımları ya da döküm alaşımları yarı-ürün üreten tesislerdir.

### **Hammaddeler**

*Birincil hammadde (primary raw materials):* Boksit cevherlerinden Bayer işlemi ile metalurjik kalite alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve alüminadan ergimiş tuz elektrolizi yöntemi ile metalik alüminyum üretim süreci sonunda elde edilen, metal saflığı % 99,0 ile % 99,8 arasında olan işlenmemiş, ham alüminyumdur.

*İkincil hammadde (secondary raw materials):* İkincil kaynaklardan elde edilen yani kullanım ömrünü doldurmuş alüminyum malzemeler (eski hurda) ve çeşitli alüminyum işleme süreçlerinde oluşan işlem artıkları ve ister birincil ister ikincil alüminyumun ergitilme sırasında oluşan curufun içerdiği metalik alüminyumdur. İkincil malzemeler genellikle tanımlanabilen malzemeler değildirler ve kendileri dışında bir çok diğer malzemelerle ve kirliliklerle beraber bulunurlar. Bu nedenle toplandıktan sonra proses edilmeleri gerekir. Yani toplanırlar, gruplanırlar, ayrılırlar, çeşitli hazırlama işlemlerine tutulurlar ve ergitilirler.

İkincil alüminyum hammaddeler ise kendi içerisinde 3 sınıfta incelenebilir :

1. Eski hurda, kullanım ömrünü doldurmuş alüminyum malzemelerdir,
2. Yeni hurda, alüminyum üretim süreçlerinde oluşan işlem artıklarıdır,

3. Curuf, alüminyum ergitme, rafinasyon ve aktarma süreçlerinde oluşan metalik alüminyum ve oksit karışımlarıdır.

### **İkincil Alüminyum Üretimi**

Yeniden değerlendirme (recycling), toplama, gerikazanım (recovery=upgrading) ve yeniden ergitme (remelting) işlemlerini kapsayan bir süreçtir. Recycling sözcüğü Türkçeye geridönüşüm olarak çevrilmiştir. Ancak geridönüşüm terimi recycling sürecindeki prosesleri içermediğinden ve süreci dikkate almadan yalnızca sonucu tanımladığından bu yazıda yeniden değerlendirme terimi kullanılacaktır.

Proses etme farkından ötürü zaman zaman recycling ‘yerüstü madenciliği’ olarak tanımlanır.

Malzeme akışı açısından bakıldığında yeniden değerlendirme kavramı iki grupta incelenebilir

- Kapalı döngü yeniden değerlendirme ile kullanım ömrünü tamamlamış olan alüminyum malzeme yeniden ergitilerek, orijinal amacına uygun hale getirilip, yeniden kullanılır. Örneğin alüminyum meşrubat kutularının yeniden ergitilerek tekrar meşrubat kutularına çevrilmesi.
- Açık döngü yeniden değerlendirme sürecinde ise, kullanım ömrünü doldurmuş farklı alışımlardaki alüminyum malzemeler, ergitilir ve alışımlandırılır. Böylece yeni alışım ve kullanım amacına sahip alüminyum malzemeler üretilir. Örneğin jant talaşlarından piston kapağı üretimi.

Yüksek kaliteli işlem alışımları çok büyük oranda kapalı döngüye dahil olurken, döküm alışımları genellikle açık döngü içinde üretilir. Kapalı döngünün uygulanabilirliği arttıkça, ideal kalite ve miktarda ve maliyet ile yeniden değerlendirme yapabilmek olanaklı olacaktır. Ancak alüminyum ürünlerin farklı kullanım ömürleri ve düzenli bulunabilirlik sorunu nedeni ile genellikle açık döngü çalışır.

Malzemelerin küresel olarak, yeniden değerlendirilebilme oranlarına bakıldığında, yaygın alüminyum kullanımına sahip taşımacılıkta kullanılan ürünlerin % 95’e kadar, inşaatta kullanılan ürünler % 98’e kadar ve içecek kutuları % 65-70 oranında üretime geri dönebilmektedir.

### **İkincil Alüminyum Üretim Süreci**

Birincil alüminyum üretiminde en kritik konu enerji iken, ikincil alüminyum üretiminde “hurda kalitesi ve bulunabilirliğidir”.

İkincil alüminyum üretim süreci 7 aşamalı bir prosestir:

- Hurda toplama,
- Hurda ayırma, hazırlama ve ön-işlemler
- Ergitme,
- Alışımlandırma,
- Metal rafinasyonu,

- Döküm,
- Curuf temizleme ve curuf değerlendirme.

İkincil alüminyum üretiminin “sürdürülebilir kalkınma” kavramına koşut olarak sağladığı ekonomik, çevresel ve sosyal yararlar dikkate alındığında, yasal düzenlemeler ve eğitim çalışmaları ile desteklenerek, tüketme yerine “hurda toplama ve değerlendirme” kavramının yaygınlaştırılması ile desteklenmesi gereklidir.

### **İkincil Alüminyum Tesisleri ve Tesis Tasarımı**

İkincil alüminyum endüstrisi içinde iki tesis grubu değerlendirilebilir:

**Şekil 2 : Tamamen hurda kullanarak alaşımlı külçe ve deoksidant üreten tesisler için üretim akışı,**



Hurda hazırlama bölümü, tesis içinde, işletme dökümhanesi ile ayrı düşünülmeli ancak malzeme transferine de olanak tanımalıdır. Ancak dökümhane içine günlük ve hazırlanmış hurda, porsiyonlar halinde aktarılmalıdır ki alaşım sapması minimum olsun. Fırınlara hurdaların şarj arabaları ya da konveyörlerle beslenmesi ergitme hızını ve toplam proses verimliliğini artırır.

### **Hurda Hazırlama**

Burada ikincil alüminyum endüstrisinin önündeki en önemli engel, her geçen gün farklı alaşım ve formda ve dolayısıyla farklı kimyasal kirliliklere sahip (lak, boya, plastik gibi) yeni ürünlerin kullanıma girmesidir. Ancak özellikle “küresel ısınma” gerçeği sayesinde artan duyarlılıklar hem alüminyum hem de diğer “yeniden değerlendirilebilir” malzemelerin kullanıldığı tasarımlarda, “daha kolay ikincil çevrime katılabilir malzeme kullanımı” temel kriterlerden birisi haline getirmiştir.

Toplama sürecinin ardından gerikazanım süreci başlar. Yeniden değerlendirme olgusuna "yerüstü madenciliği" anlamında bakıldığında gerikazanım süreci birincil üretimdeki cevher hazırlama ve zenginleştirme süreci ile koşut mantıkta çalışır.

**Şekil 3 : Kısmen hurda kullanabilen haddehane ve billet dökümhaneleri için üretim akışı,**



Her iki tesis grubu için de ilk aşama hurda hazırlama aşamasıdır.

**Tablo 1 : Hurda-ikincil tesis ilişkisi**

	İkincil tesisler	Haddehane ve billet dökümhaneleri
Eski hurda	X	
Hazırlanmış hurda	X	X
İşlem alaşımı hurdaları ya da iç hurda	X	X
İkincil külçe	X	X
Curuf	X	

**Şekil 4 : Parçalanmış ve Eddy-Current ile temizlenmiş döküm hurdası**



Gerek ikincil üreticiler, gerekse haddehane ve billet dökümhaneleri eğer dışarıdan “hazırlanmış” hurda satın alıyor ise, aşağıda sıralanmış tüm ergitme teknolojilerini kullanabilirler. Ancak, özellikle ülkemizde temel sorun “hurda hazırlama” sektörünün olmayışı nedeni ile, hurdanın doğrudan toplayıcılardan –belki kaba bie ayırma ve balyalanmış olarak- ergiticilere aktarılmasıdır. Bu durumda hurda hazırlama işlemi büyük ölçüde ergiticilerin bünyesinde yapılmak

zorunluluğundadır.

**Şekil 5 : Parçalanmış ve Eddy-Current ile temizlenmiş işlem hurdası**



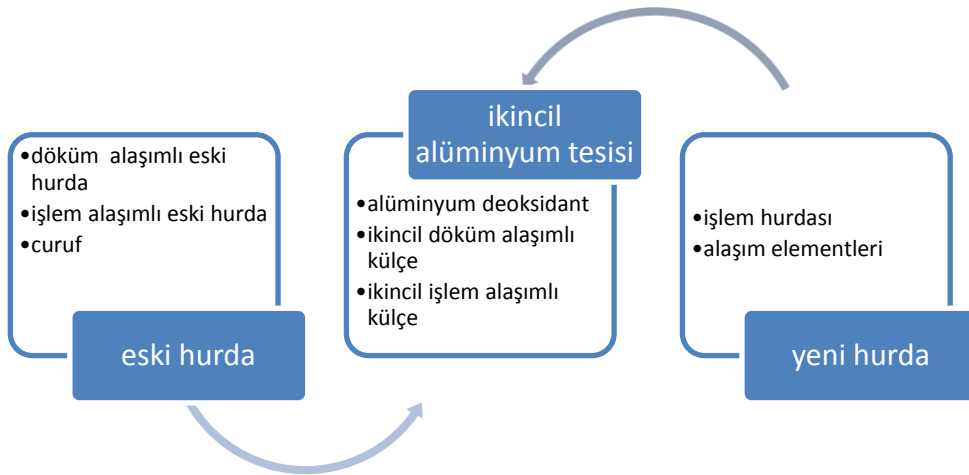
Tamamen ya da kısmen hurda kullanan tesislerde, optimum giydirilmiş metal maliyetine –yani hurda hazırlama ve ergitme kayıpları dahil, ergimiş metal maliyeti- ulaşmak için hem uygun hurda hazırlama işlemlerini hem de uygun ergitme teknolojisinin seçimini birlikte düşünmek gerekir. Verimli bir ergitme işlemi:

- hurdanın oksit içeriğine,
- hurdanın üzerindeki boya,lak,kaplama gibi

metal dışı kirliliklerin miktarına,

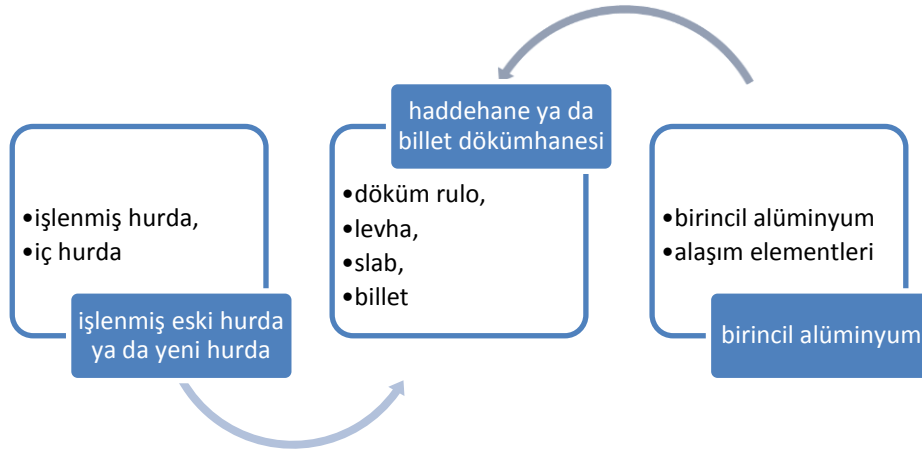
- hurdanın fiziksel şekline,
- hurdanın içerdiği alüminyum-dışı malzeme oranına,
- hurdanın geometrisine (yüzey/ağırlık oranı ve et kalınlığı),
- aynı anda farklı hurda tiplerinin tek bir fırında ergitilebilmesi ile optimum enerji tüketimine,
- şarj yapma sıklığına,
- üretilen malzemenin kimyasal kompozisyonuna ve
- işletme koşullarına bağlıdır.

**Şekil 6 : Tamamen hurda kullanılan bir ikincil alüminyum tesisi için tipik malzeme akışı**





**Şekil 7 : Kısmen hurda kullanan haddehane ve billet dökümhanelerinde malzeme akışı**



Haddehane ve billet dökümhanelerinde temel kaygı, üretilecek ürünün izin verdiği ölçüde, enerji yoğun ve pahalı olan birincil külçe yerine, olabildiğince hurda kullanmak olmalıdır. Bu büyük ölçüde teknolojik yapıları ile ilintilidir. Öreğin AA 3105 alaşımı üreten bir haddehane, bu üretimini % 100 birincil külçe yerine, her %10'luk içecek kutusu kullanımı metalik alüminyum maliyeti açısından bakıldığında % 2,1 tasarruf sağlar.

**Şekil 8 : Kısmen hurda işleyen haddehane ve billet dökümhaneleri için tipik hurdalar**



Bu tür işletmeler, kendi prosesleri sırasında ürettikleri ara işlere ek olarak dışarıdan, üretim özelliklerine uygun hurda satın alabilerek kullanabilirler. Dışarıdan satın alınan hurda içinde genellikle et kalınlığı yüksek ve temiz hurdalar tercih edilir. Ancak teknolojik olarak yetkinliğe erişmiş işletmeler, hurda ergitme prosesine karar vermiş işletmeler, içecek kutuları, talaş ve ambalaj hurdaları dahil, daha düşük kaliteli hurdaları da ergitebilirler. Bu tür işletmeler aynı zamanda, kimyasal kompozisyonu belli, ikincil külçeleri de ergitebilirler.

Buna karşın, ikincil tesisler hemen hemen her türlü hurdayı kullanmak isterler. Bu noktada da belirleyici olan yine teknolojidir.

Bu süreç aşağıda sıralanmış amaçlar için, ikincil üretimin toplam verimliliğini ve ürünlerin kalitesi ile proses maliyetlerini doğrudan etkileyen bir aşamadır.

Hurda hazırlama işlemlerinin amaçları:

- Standart olmayan ikincil hammaddeleri çeşitli ara prosesler ile uniform hale getirmek.
- Metaldışı kirlilikleri uzaklaştırarak, sonraki aşama olan yeniden ergitme aşamasının ve doğal olarak toplam prosesin verimliliğini yükseltmek,
- Düşük özgül ağırlığından ötürü, taşınması ve ergitme fırınlarına beslenmesi sorunlu olan hurda yığınlarını forma sokmak,
- Gruplama ve ayırma proseslerinin mekanizasyonunda, hurdaları proses edilebilir forma getirmek,
- Yeniden ergitme aşamasında metal kayıplarını azaltmak için gerekli fiziksel formu sağlamak olarak sıralanır.

#### Şekil 9 : Tamamen hurda işleyen ikincil tesisler için tipik hurdalar



Hurda hazırlama ve hurda ön-işlemlerini üç grupta incelemek olanaklıdır:

- Mekanik ön-işlemler, alüminyumun diğer metaller ve fiziksel kirliliklerden temizlenmesi için farklı tiplerdeki kırıcı ve parçalayıcı (shredder) yardımı ile boyutlarının küçültülmesi işlemlerini kapsar. Bu sistemler aynı zamanda eddy-current ve magnetik separatörler, havalı ayırıcı ve vibrasyonlu elekler ile de desteklenir. İnce kesitli ve temiz hurdaların greslenerek balya ya da briket formuna getirilmesi de bu başlık altında görülmelidir. Ek olarak soğuk curufun kırma-öğütme ve eleme ile zenginleştirilmesi işlemleri de mekanik ön-işlemlerdir.

Mekanik temizleme işlemleri hem pirometalurjik hem de hidrometalurjik temizleme işlemlerinin de aynı zamanda ilk kademesidir.

- Pirometalurjik ön-işlemler, eritme sırasında metal kaybını ve fiziksel kirlilikler ve flux kullanımından kaynaklanan kirli gaz salınımını azaltmak için uygulanan lak, boya ve yağ giderme ve kurutma işlemlerini kapsar. Bu işlemler öncesi hurdalara mekanik temizleme işlemleri uygulanır ve ardından pirometalurjik işlemin verimini arttırmak için boyut küçültülür. İşlem kamara, döner ya da akışkan yatak tipli fırınlarda gerçekleşir.



- Hidrometalurjik ön-işlemler, su kullanılarak curuflar için liç ve özgül ağırlık farkına göre alüminyumdan daha yoğun bakır ve demir gibi metallerin ayrıştırılmasında uygulanır.

Bütün bunların ışığında sağlanabilecek hurda çeşitliliği ve bulunabilirliği dikkate alınarak, gerek haddehane ve billet dökümhaneleri gerek ise ikincil tesislerde ergitme teknolojilerinin seçimi, toplam proses verimliliği ve işletmenin karlılığı anlamda hayati önem taşımaktadır.

### **Ergitme Teknolojilerinin Seçimi**

**Haddehane ve billet dökümhaneleri;** genellikle 1XXX, 3XXX, 5XXX ve 6XXX serisi, yatay ya da dikey döküm yöntemleri ile slab, billet ve dökme levha üreten tesislerdir. Bu alaşımlar, kimyasal kompozisyonlarındaki hassaslık nedeni ile ağırlıklı olarak birincil külçeden üretilir. Ancak aynı alaşıma sahip hurda ve talaşların zaman zaman % 100'e varan oranlarda-örneğin içecek kutuları, profil hurdaları ve talaşlar, eski levhalar- hammadde olarak kullanılabilir. Hurda kullanmayı tercih eden tesislerde ergitme sisteminin seçimi ve metal rafinasyonu, istenilen kalitede malzeme üretimi için oldukça önemlidir.

Bu alaşımlardan üretilen alüminyum son ürünler genellikle korozyon dayanımını arttırmak ve dekoratif-estetik nedenler ile boya ve lak ile kaplanırlar ve plastik, kauçuk, poliüretan gibi alüminyum-dışı mazlemelerle birlikte çalışırlar. Ayrıca billet ve slablar ekstrüzyon ve sıcak haddeleme öncesi yüzey temizliği ve prosese uygun uzunluk için kesme işlemi sırasında ve, billetten üretilen profillere ise yine uygulama öncesi gerekli uzunluğa getirmek için kyine kesme işlemi uygulanır ve bu süreçte kesme yağı ile karışmış talaş üretilir. Bu malzemeler kullanım ömürlerini doldurarak, hurdaya çıktıklarında ise bu lak, boya ve yağ ikincil ergitme sürecinde sorun yaratır. Bu hem haddehane ve billet tesisleri hem de ikincil alüminyum tesisleri için, ikincil endüstrinin en zayıf noktalarından birisidir. Bunun yanında, bu tip hurdalar genellikle ince kesitli malzemelerdir ve ince kesitli malzemeler doğrudan alev teması altında ergitildiklerinde önemli oranlarda metal kaybına neden olurlar. Bu tip hurdalara ergitme işlemi öncesi lak/boya yakma ve kurutma işlemi uygulanır. Bu işlem sayesinde:

- Ergitme metal verimi artar,
- Hurda içinde kalan olası su nedeni ile metal patlaması riski azalır,
- Daha az kirli gaz üretilir,
- Daha az flux kullanımına ihtiyaç duyulur,
- Metal veriminin artışına koşut olarak, daha az curuf oluşur.

Lak/boya yakma ya da kurutma fırınları silindirik kesitli ve indirekt ısıtım fırınlarıdır.

Genellikle ergitme fırınından toplanan atık sıcak gazların ve lak yakma fırınının ürettiği ve afterburner da temizlenen sıcak gazlardan enerji kaynağı olarak yararlanılır. Bununla birlikte boya, lak, yağ ya da plastik gibi hidrokarbon kaynaklı kirlilikler, tutuşma sıcaklığına ulaştıktan sonra, kendileri enerji üretirler ve ototermik reaksiyon çalışmaya başlar. Örneğin 3 ton/saat kapasiteli bir lak/boya yakma hattında yaklaşık enerji ihtiyacı kg alüminyum başına 400 kcal iken, eğer şarj malzemesi yaklaşık olarak % 5 oranında organik madde içeriyorsa, ototermik reaksiyon sonucu, bu miktar kg alüminyum başına 190 kcal'ye düşer. Ancak fırını

alüminyumun oksitlenmeyeceği sıcaklıklarda tutmak için, sürekli olarak fırın içindeki oksijen kontrol edilir. Lak yakma hatları balkonlu reverber fırınlar ile entegre çalışır.

#### **Şekil 10: Hurdadan dökülmüş ikincil büyük külçe (sow)**



Reverber fırınlar alüminyum metalurjisinde sık kullanılan klasik fırın tiplerindendir. Farklı uygulamalar için, farklı tip Reverber fırınlar geliştirilmiştir. Özellikle hurda ergitme işleminde, klasik Reverber fırınların performansı tatmin edici değildir ve fırın tasarımı gelişimi için verimli metal ve enerji değerleri ile çalışabilme zorunluluğu, spesifik bir alan olmuştur. Reverber fırınlar yığın tipi ergitmeye uygun fırınlardır. İlk yatırım maliyeti düşük olmasına karşın, düşük

metal verimi ve yüksek enerji tüketimi (ısı kayıplarından dolayı) verimli ergitme fırınları değildir. Ergitme sonrası oluşan kirli gazlar, toz tutma sistemlerinde işlendikten sonra, atmosfere verilmelidir.

Geleneksel Reverber fırınların en yaygın ve uygun kullanım alanları tutma ve döküm fırını olarak kullanımıdır. Geleneksel Reverber tipli fırınlarda ısı verimlilik % 40 civarındadır. Bu nedenle farklı amaçlar için farklı tasarımlar geliştirilmiştir.

#### **Şekil 11 : Balkonlu ergitme fırını (Hi-tech)**



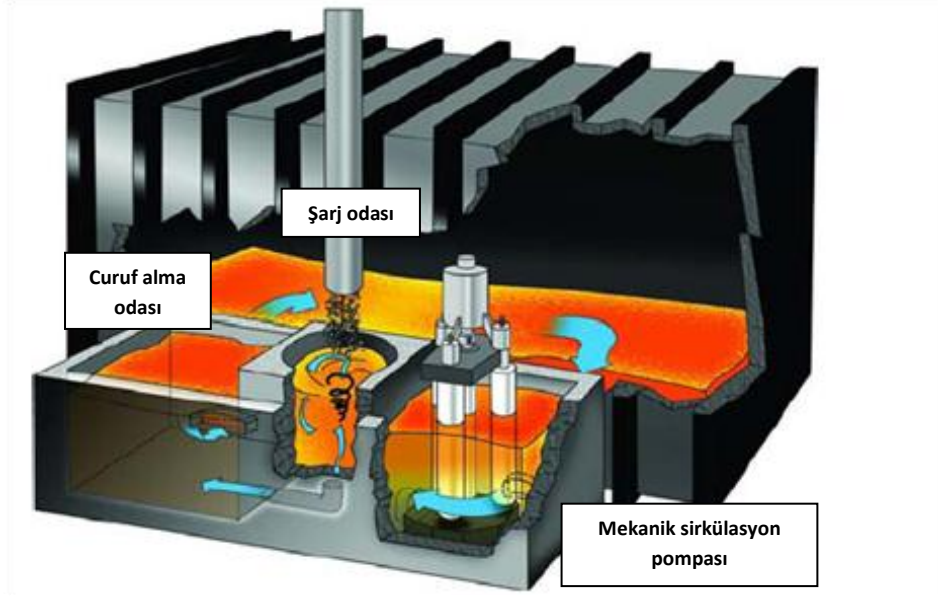
**Balkonlu (side well) reverber fırınlar,** görünüş olarak klasik bir reverber fırınına balkon eklenmiş halidir. Balkon hem şarj odası hem de curuf alma odasından oluşur. Bu tip fırınlar mekanik ya da elektromanyetik sirkülasyon pompaları ile birlikte çalışırlar. Özellikle yüksek yüzey ağırlık/oranına sahip, yani ince kesitli hurdaların sürekli besleme tekniği ile şarj edilerek, ergitilmesine olanak veren, ana gövdeye ek olarak açık bir

kamaranın (balkon-side well) yer aldığı reverber tipli fırınlardır. Açık kamarada şarj odası (genellikle girdap yaratarak, ince kesitli hurdaların ergiyiğe batmasına olanak veren sistem), sirkülasyon pompası ve curuf alma odasından oluşur. Elektromanyetik pompanın kullanıldığı sistemlerde ise pompanın kendisi şarj odası fonksiyonunu görür.

Özellikle hurda ergitilen fırınlarda hem metal kayıplarını hem de enerji tüketimini azaltmak için yeni tasarımlar yapılmıştır. Fırın içindeki sıcaklık kontrolü ve yanma havası ile yakıt oranlarının ayarlanması enerji tüketiminin düşmesine neden olmaktadır. Ergitme sürecinde ergiyik üzerinde oluşan curuf tabakasının minimizasyonu, daha iyi operasyon ile bir yere kadar düşürülebilir. Ancak doğrudan alev teması ile çalışan reverber fırınlarda, curuf oluşumunun azaltılması, fırın içinde başta oksijen ve diğer oksitleyici yanma

gazlarının varlığından ötürü sınırlıdır. Özellikle CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ve O<sub>2</sub> gazları fırın içerisinde sürekli olarak alüminyum şarj ile sürekli temas halindedir. Özellikle yanma için hava kullanılan fırınlarda bu üç gazın kombinasyonlarının oranı , toplam yanma gazlarının yaklaşık % 30 kadarını oluşturur. Ergitme işlemlerinde oluşan curufun önemli bir bölümü bu gazlarla ergimiş alüminyumun teması nedeni ile oluşur. Bu sorundan kaçınmanın ilk denemesi balkonlu fırın tasarımı ile aşılmaya çalışılmıştır.

**Şekil 12 : Balkonlu ergitme fırını (Metaullics)**



**Şekil 13 : Mekanik sirkülasyon pompası (Metaullics)**



Elektro-manyetik ya da mekanik sirkülasyon pompası kullanımı ile, ana gövde ve balkon arasında sürekli ergimiş metal sirkülasyonu yapılır ve böylece ergitme hızı ve buna bağlı olarak enerji verimliliği artar.

Balkona şarj yapmak ve curuf çekimi, geleneksel fırınlara göre çok daha kolaydır. Şarj odasına sürekli olarak beslenen hurda, ergiyik içine hemen alınır ve pompanın ergimiş metali sirküle ettirmesi nedeni ile, curuf balkonun hemen yanından sürekli olarak çekilebilir.

Özellikle lak/boya yakma fırınları ile entegre olarak çalışmaya uygun fırınlardır. Lakı/boyası giderilmiş hurda, flux ile birlikte sürekli olarak, şarj odasına beslenir. Aynı anda hem lak;/boya yakma hattından şarj odasına ince kesitli temizlenmiş hurda ve fırın kapağından aynı gövde üzerinde tasarlanmış platform üzerine temiz, kalın hurda ya da külçe şarjı yapılabilir. Lakı/boyası giderilmiş hurda ergitildiğinde nisbeten temiz baca gazı üretirler.

Balkonlu fırınlar hem haddehane ve billet dökümhaneleri, hem de ikincil tesisler için uygun fırınlardır. Özellikle kırılmış ve serbest demir, çinko ve magnezyum gibi alüminyum-dışı

metallerden arındırılmış hurdalar, mekanik ya da elektromanyetik pompa ile birlikte çalışan şarj odasında başarı ile ergitilir.

Balkonlu Reverber fırınları mekanik ya da elektromanyetik sirkülasyon pompası ve karıştırıcılarla desteklenebilir.

**Üstten beslemeli fırınlar**, özellikle boyasız ve temiz kendi ya da dışarıdan alınabilecek temiz işlem hurdalarını ergitmek isteyen tesisler için uygun fırınlardır. Fırının sahip olduğu geniş larj ağzı nedeni ile hurdaların preslenmesine gerek yoktur. Özellikle Avrupa’da oldukça popüler bir fırın tipidir.

Tutma ve döküm fırınlarının tasarımı, çok fazla çeşitliliğe izin vermez. Ancak ergitme fırınlarında, ergitilecek malzemeye bağlı olarak, çeşitlilik olanaklıdır. Geleneksel Reverber tipi fırınlarda külçe, ingot ya da temiz ve yüzey/ağırlık oranı küçük hurdaların ergitilmesi mümkündür. Temiz ancak yüzey/ağırlık oranı yüksek olan, dağınık formdaki haddehane ya da ekstrüzyon proses hurdaları için üstten beslemeli fırınlar (top-loading furnace), şarj kapısının büyüklüğü ve besleme kolaylığı açısından tercih edilebilir. Üstten beslemeli fırınlar özel şarj sepetleri ve bu sepetlere uygun vinçlerle desteklenmiştir. Bir defada 20 tona kadar şarj yapılabilir. Şarj kapağının çevresi, ergitme ve yükleme sırasında minimum distorsiyon için su ya da hava ile soğutulur. Bir defada yüksek miktarlarda şarj yapılabilmesinden ötürü, geleneksel fırınlarda olduğu gibi, şarj kapısının sık açılıp kapanması söz konusu değildir. Bu da ergitme süresinin kısalmasına neden olur. Geleneksel yüksek hızlı yakıcı sistemleri kullanılabilirse de, rejeneratif yanma sistemleri, yüksek enerji verimi nedeni ile tavsiye edilir.

Üstten beslemeli fırınlar, yüksek ergitme hızına ulaşmak ve ısı transferini iyileştirmek için, sirkülasyon pompası ile desteklenebilir.

Bu tip fırınlar genellikle haddehane ve billet dökümhaneleri için uygun fırınlardır.

**Şekil 14 : Üstten beslemeli fırınlar**



**İkiz Kamaralı Fırınlar**, balkonlu fırınlarında şarj malzemelerinin sınırlı oluşu, ergitme kapasitesinin düşük oluşu ve açık balkon nedeni ile enerji kayıpları, iki kapalı kamaradan



oluşan ikiz kamaralı fırınların tasarımı ihtiyacını düşürmüştür. Başka bir deyişle, ikiz kamaralı fırınlar, balkonlu fırınların bir üst modelidir.

**Şekil 15 : Üstten beslemeli fırınlarda mekanik sirkülasyon pompası uygulaması (Metaullics)**



İkiz kamaralı fırınlar, ergitme kamarası ve ısıtma kamarası olmak üzere iki kamaradan oluşur. Fırının enerji ihtiyacı ısıtma kamarasına yerleştirilmiş yakıcılardan sağlanır. Ergitme kamarasında ise, ısıtma kamarasından gelen sıcak yanma gazlarının sirkülasyonu sağlamak için fanlar yerleştirilmiştir. Katı metal şarjı alev temasının olmadığı ergitme kamarasına yapılır. Kısmi ön ısıtma ya da lak-boya yakma amaçlı olarak, ergitme ünitesi aynı zamanda bir rampa ile de donatılmıştır.

Şarj üzerindeki organiklerin uzaklaştırılması için, yanma gazları ısıtma kamarasından, banyo seviyesinin üzerindeki açılık aracılığı ile ergitme kamarasına ulaşır. Böylece oksijensiz bir ortam olan ergitme kamarasında, yanma gazlarının taşıdığı ısı ile lak-boya yakma prosesi gerçekleşir. Bir anlamda ergitme kamarasından gelen yanma gazlarının içerdiği nisbeten çok az oksijen, hurdanın içerdiği organikleri yakar.

**Şekil 16 : İkiz kamaralı fırınlar (Sistem-Teknik)**



Katı alüminyum mükemmel bir ısı iletkeni iken, ergime sonrasında yani sıvı forma dönüştüğünde bu yeteneği yarı yarıya düşer. Bu nedenle ergitme işleminin tüm aşamaları dikkate alındığında, optimum ısı iletimi ancak fırının iki kamaraya bölünmesi ile olanaklıdır.

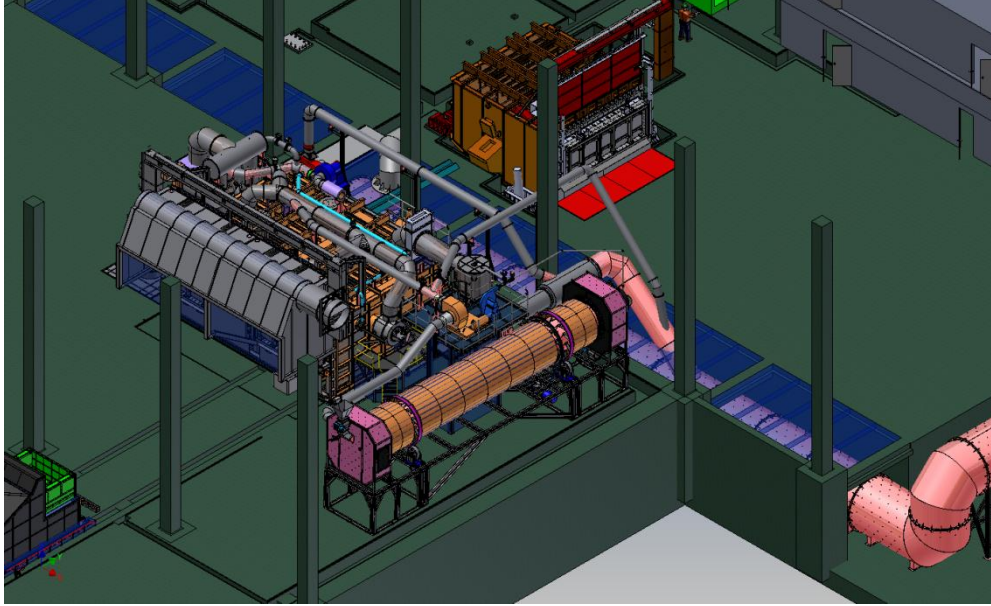
İki kamara arasındaki ergimiş metal bağlantısı ise genellikle elektromanyetik, sirkülasyon pompaları ile sağlanmaktadır.

Kalın ve boyalı malzemeler, ısıtma kamarasında piroliz edilirken, ergitme kamarasına kalın, temiz hurda ya da külçe, elektromanyetik pompanın şarj odasına ise lak/boya yakma ya da kurutma fırınından gelen ince kesitli malzemeler aynı anda şarj edilebilir. Yani bu tip fırınlar çok amaçlı fırınlardır. Hem yığın tipi hem de sürekli hurda ergitmeye uygun sistemlerdir.

Fırından çıkan kirli gazlar afterburner da işlendikten sonra, lak/boya yakma ya da kurutma hattına verilerek, ısı kaynağı olarak kullanılabilir.

İkiz kamaralı fırınlar için bir yeni uygulamadan da söz etmekte yarar var. Her iki kamaradan toplanarak afterburner'a beslenen proses gazları, afterburner çıkışından sonra bir talaş kurutma fırınına beslenerek, enerji kaynağı olarak kullanılabilir.

**Şekil 17 : Entegre çalışan ikiz kamaralı fırın ve talaş kurutma fırını (Sistem-Teknik tasarımı)**



İkiz kamaralı fırınlar genellikle haddehane ve billet dökümhaneleri tarafından tercih edilir.

**Şekil 18 : Devirmeli döner fırında curuf alma (Dross Engineering)**



**Devirmeli Döner Fırınlar**, çok geniş çeşitlilikte hurda ergitebilme yeteneklerinden dolayı, ikincil tesisler tarafından en çok tercih edilen fırın tiplerindendir. Ergitme işleminin temeli , hurdanın ergimiş tuz banyosu altında ergitilerek hem kimyasal metal-dışı kirliliklerin ayrılması hem de kapalı bir konvertor olarak ve dönme hareketinin neden olduğu yüksek ısı iletim oranıdır. Ancak yüksek enerji maliyetleri ve çevresel baskılar nedeni ile ikincil

alüminyum endüstrisinin gelişimine paralel olarak, döner fırın teknolojilerinde de ciddi değişimler yaşanmıştır. Özellikle alüminyumdan üretilen ürünlerde artan çeşitlilik, yani hurda tiplerinin çeşitlenmesi ve ekonomik gerekçeler ve teknolojik gelişime bağlı olarak, tıpkı birincil metalurjik ekstraksiyon işlemlerinde düşük tenörlü cevherlerin işlenebilmesinin günden güne ekonomik olmaya başlaması gibi, düşük kaliteli hurdaların da işlenme zorunluluğu doğmuştur.

Bu değişimler üç temel gerekçeye dayanır :



- 1- Yüksek performanslı (yüksek ergitme yeteneği, düşük enerji tüketimi ve metal kaybı) ergitme ünitesi gereksinimi,
- 2- İkincil alüminyum endüstrisinin gelişimine ve hurda bulunabilirliği ve klasifikasyon tekniklerine bağlı olarak alüminyum curuf dahil olmak üzere geniş hammadde kullanım yelpazesine sahip ve hiç ya da minimum tuz kullanımı ile ergitmenin olanaklı kılınması,
- 3- Düşük kaliteli hurda ergitebilme yetenekleri,

Yeni kuşak döner fırınlar, geleneksel Reverber fırınlar, terletme fırını ve sabit döner fırınların bir kombinasyonu gibi çalışır. Ergimiş tuz banyosu sayesinde hem kirli ve ince hurda kimyasal olarak, düşük kayıpla ergitilebilir hem de serbest demir, terletme fırınında olduğu gibi ergimiş alüminyum içinde çözünmedem tutulabilir. Bu nednele hurda hazırlama işlemlerine büyük ölçüde gerek duyulmaz ve doğru kullanım ile bu ön-işlemlere gerek kalmaksızın düşük kaliteli hurda, doğrudan ve yüksek verim değerleri ile ergitilebilir. Bu döner fırınları ya da döner tipli konvertörleri, diğer fırınlardan ayıran en önemli özelliktir.

#### **Şekil 20 : Devirmeli döner fırında metal alma (Meltech)**



Bu değişimler sonucu, daha etkin ve yüksek verimliliğe sahip ve Reverber fırınlar ile karşılaştırıldığında yönetimi çok daha kolay ve kontrol edilebilir olan bir tür konverter tasarımına ulaşılmıştır. Bu tasarımın temel avantajları ve geleneksel sabit döner fırınlara üstünlükleri aşağıda sıralanmıştır :

- Ergitme sırasında kullanılan tuz ya da flux gereksiniminin minimize edilmesi,
- İşletme koşullarının iyileştirilmesi,
- Şarj içindeki başta serbest demir olmak üzere istenmeyen kirliliklerin uzaklaştırılması,
- Hurda şarjının kolaylaştırılması,
- Fırın duvar astarının katı şarj ile kendiliğinden temizlenmesinin sağlanması,
- Düşük enerji tüketimi ve yüksek ısı verim,
- Geleneksel fırınlara göre 2 ya da 3 kat daha fazla ergitme hızı ve dolayısıyla çevrim sayısı.

Döner fırınlar yığın tipi ergitme işlemine uygun fırınlardır. Ancak alaşımlama ve metal rafinasyonu için kesinlikle bir tutma fırını ile birlikte çalışmalıdır. En büyük dezavantajı tuz kullanımının neden olduğu tuz keki üretimi ve bunların depolanmasıdır. Tuzun ergimesi sırasında oluşan gazlar mutlaka filtre edilmelidir.

**İndüksiyon fırınları**, çekirdeksiz indüksiyon fırınları üç parçadan oluşur :

- Pota çevresine sarılmış, su soğutmalı bakır bobin,
- Metal haznesi ya da pota,
- Çelik dış gövde.

Potanın çevresinde su soğutmalı bakır bobin yerleştirilmiştir. Bobine gelen alternatif akım ile şarj malzemesinin içinde indüklenmiş akım oluşturulur. Manyetik alanın etkisi ile ergimiş metal üzerindeki akım etkileşimleri karıştırma etkisi doğurur. Karıştırmanın hızı güç arttıkça ve frekans düştükçe artar.

### Şekil 21 : İndüktif ertitme (Inductotherm)



Temel çalışma ilkesi, ertitilecek malzeme sekonder sarım olarak davranır. Yani düşük voltajlı, yüksek amperli akım malzemeyi indükler. Sekonder sarım malzemenin kendisidir ve ısı transferi kondüksiyonla gerçekleşir.

Isınma ya da ertitme malzemenin elektriksel direnci sayesinde oluşur.

İndüksiyon ile ertitme basit olarak bir enerji transferi yöntemidir.

Pota ve sabit bir haznenin çevresinde bulunan bakır indüksiyon bobini ve ocağın içindeki metal, indüksiyon ocağının ertitme için en gerekli en temel donanımını oluşturmaktadır.

Pota dışındaki indüksiyon bobininden geçirilen alternatif akımın sürekli yön değıştirmesi nedeni ile pota içindeki metal sürekli yön değıştiren elektro-manyetik değışken alanlar oluşturmaktadır. Malzemenin içinde oluşan bu indüktif elektrik alanları ise öz direnci aracılığı ile ısı enerjisine dönüşür.

İndüksiyon bobinindeki elektriksel akım akışlarının etkileşimi sonucu, fırın içindeki manyetik kuvvetler sabit değıldir. Bu kuvvetlerin değeri bobinin merkezinde en büyük değerdendir. Bu özellik indüksiyon bobini boyunca eşit olmayan bir manyetik kuvvet dağılımına yolaçar. Sonuçta bobin sabit olduğundan metal hareket eder.

Karıştırma hareketi uygulanan güç ve frekansa bağlıdır.

- Güç arttıkça karıştırma hareketinin ölçüsü artar,
- Frekans arttıkça karıştırma hareketinin ölçüsü azalır,
- Fırın boyutu arttıkça karıştırma hareketinin ölçüsü artar.

Ocak içinde oluşan karıştırma hareketi ile oksitlenme kayıpları minimize olur, fırın içinde sıcaklık ve bileşim dağılımı homojen olur ve seri ertitme gerçekleşir.

Ancak karıştırma hareketinin ölçüsü çok önemlidir.

İndüksiyon fırınları yığın tipi ertitme işlemine uygun fırınlardır. Ancak aynı güç unitesine bağlı iki fırın tasarımı ile, ertitmeyi tamamlamış olan fırındaki metal tutma fırınına

aktarılrken ya da döküm yapılır iken, diğr pota ergitmeye başlar ve böylece yarı-sürekli döküm yapmak mümkün olur.

**Tablo 2 : İndüktif ergitmede karıştırmanın ölçüsü**

Yetersiz karıştırma:	Aşırı karıştırma:
<ul style="list-style-type: none"><li>• Metal homojenliğini azaltır,</li><li>• Banyodaki sıcaklık farklılıklarını artırır</li><li>• Talaş ve hafif hurdaların ergimesini zorlaştırır,</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Astar aşınmasına neden olur,</li><li>• Oksitlenme kayıplarını artırır,</li><li>• Metal içinde curuf ve refrakter kalıntılarına neden olur,</li><li>• Metalin gaz kapma olanağını artırır.</li></ul>

Kendi üretim hurdasını ergitmek isteyen haddehane ve biller dökümhaneleri için, malzeme miktarı uygun olduğu ölçüde ideal fırınlardır. Özellikle alaşımlandırma işlemlerinde, karıştırma hareketi ndeni ile başarı ile kullanılabilir. Ancak boyalı/laklı ya da serbest demir gibi alüminyum-dışı kirlilikler içeren hurda ergitmeye uygun değildirler.

### **Sonuç**

Dünya alüminyum tüketiminin yaklaşık %30'u ikincil kaynaklardan sağlanmaktadır. Genel tüketim içinde ikincil alüminyumum bu denli yüksek payı olmasına karşın, ikincil alüminyum üretim hızı ve dolayısıyla ikincil malzemelerin tüketim hızı oldukça düşüktür.

İkincil üretimin, enerji yoğun birincil üretimden daha fazla pay alması için teknik olarak ikincil alüminyum mühendislerinin önünde 6 temel ve potansiyel çalışma alanı bulunmaktadır:

- a) Hurda hazırlama ve hurda ayırma teknolojilerinin geliştirilmesi (temassız ve ana alaşım elementi bazında ayırım yapabilen LIBS: laser induced breakdown spectroscopy, XRF: X-ray fluorescence ve PGNA: prompt gamma neutron activation analysis teknolojilerin geliştirilip yaygınlaştırılması),
- b) Alüminyum hurda üzerindeki alüminyum dışı metallerin ve metal dışı kirliliklerin (lak, boya, yağ vs) temizlenme teknolojilerinin geliştirilmesi,
- c) Hurda hazırlama-ayırma ve hurda temizlemedeki gelişmelere bağlı olarak ve düşük kaliteli hurdaların verimli olarak kullanılabilmesine olanak yaratılması,
- d) Ergitme sırasında enerji tüketiminin en aza indirilmesi atık ısının yeniden kullanılması,
- e) Curuf ve tuz keki üretimini azaltacak ve bu atıkların yeniden farklı sektörlerde değerlendirilmesine olanak verecek teknolojilerin üretilmesi,

- f) Ergimiş alüminyumu birincil alüminyum kalitesine yaklaştıracak ve böylece kullanım alanlarını arttıracak ergimiş metal rafinasyonu işlemlerinin geliştirilmesi.

Böylece haddehane ve billet dökümhaneleri, pahalı işlem alışımlarını daha az birincil külçe kullanarak üretebilecek ve ikincil tesisler ise daha güvenli ve daha optimum toplam proses verimi ile çalışabilecektir. Ancak bu çalışmalar, yasal düzenlemeler ve eğitim ve gönüllü çalışmalar ile desteklenmelidir.

### **Kaynakça**

1. Aluminium Recycling : A Key Sustainability Element for the Primary Produces and The Alcoa Commitment / Greg Wittbecker – Alcoa / Metal Bulletin 23<sup>rd</sup> International Aluminium Conference/ Montreal / September 2008
2. Aluminium Recyycling Report / DOE / 1998
3. Aluminium & Recycling – An Economic & Ecofriendly Concept / N.K. Choudhay / Indal / 1999
4. Recycling Metals for the Environment / I. Werrick – N.J. Themelis / Annual Reviews Energy and Environment Vol: 23 / 1998
5. Non-ferrous Metals Recycling: Economic, Technical and Environmental Aspects of Aluminium and Lead Market in Brazil / Heloisa V. Medina / CETEM – Centro de Tecnologia Mineral / Recycling Workshop / St. Petersburg / 2003
6. Aluminium Recycling: The Commercial Benefits, the Technical Issues and the Sustainability Imperative / Pal Vigeland – HYDRO / Metal Bulletin 9<sup>th</sup> International Secondary Aluminium Conference / Prag / 2001
7. Aluminium Recycling / Logan Waste Services / [www.visy.com.au](http://www.visy.com.au)
8. Recycling Works! / State and Local Solutions to Solid Waste Management / U.S.
9. Birincil ve İkincil Alüminyum Üretim süreçleri / Erman Car / TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Alüminyum Komisyonu / Yayın No:2 / 1998
10. Aluminium Melting and Metal Quality Processing Technology For Continuous High Quality Castings / Scott Kennedy / Inductotherm / American Foundry Society / 2001
11. Guide to Energy Efficiency in Aluminum Smelters / Pierre Baillargeon – Dominique Leclerc - Hakim Zahar / A Joint Project by The Aluminum Association of Canada – Natural Resources of Canada – Office of Energy – Canadian Industry Program for Energy Conservation (CIPEC) / April 1988
12. Energy Efficiency and Environmental Impact of Melting Secondary Aluminium in Tilting Rotary Furnaces / John Simpson / Dross Engineering / Alusil Aluminium Recycling Conference / St Petersburg /April 2008
13. Modelling and Optimisation of a Pyrometallurgical Batch Reactor, Rotary Melting Furnace in Secondary Aluminium Industry / Bo Zhou – Yongxiang Yang – Markus A. Reuter / Department of Applied Earth Sciences – Delft University of Technology
14. Latest Developments in Recycling Aluminium Dross and Scrap Using Tilting Rotary Furnaces / John Simpson / Dross Engineering / Alusil Aluminium Recycling Conference / St Petersburg /April 2008

15. New Tools for Melting of Secondary Aluminium / H. Gripenberg – Lidingo – J. Ladin – Sunbyberg – O. Falk – Almhult – Niedermeier – Braunau – Inn / Aluminium / Volume 78 / September 2002
16. Handbook of Aluminium Recycling / Fundamentals, Mechanical Preparation, Metallurgical Processing, Plant Design / Christoph Schmidz / Vulkan - Verlag / 2006
17. 13. Improved Aluminium Melting Using Pumping / B. Golchert – H. Metwally – P. King – C. Vild / Light Metal 2006
18. New Developments in the Design of Twin Chamber Aluminium Melting Furnaces H.Walter Grab – Jan M. Migchielsen / Erzmetall 61 / 2008
19. Aluminium Recycling / Mark E. Schlesinger / University of Missouri / CRC Press / 2007
20. Energy Savings Technology to Aluminium Melting / Cynthia K. Belt – Brian M. Golchart – Paul E. King – Roy D. Peterson – Joseph L. Tassandori / Light Metals 2006
21. Engineered Scrap Melting Syetem / METAULLICS / [www.metaullics.com](http://www.metaullics.com)
22. Direct Charged Melters / Don Whipple / Bloom Engineering / 2004
23. Furnace Design for Minimizing and Energy Losses Taking into Consideration Environmental Protection Requirements / Christoph Schmitz / ALUSIL / February 2008 / St. Petersburg
24. Options for Optimizing Recoveries and Energy Consumption in Light Gauge Scrap Recycling / Richard C. Chandler / METAULLICS
25. Available Heat and Heat Transfer / Basic of Combustion / Don Whipple / Bloom Engineering / Furnace Technology Workshop / Practical Knowledge for Improved Process Performance / TMS / February-March 2007 / Orkando
26. Ekstraktif Metalurji Prensipieri / Fuat Yavuz Bor / İ.T.Ü. Kimya-Metalurji FakÜltesi / YayIn No:1 / 1985
27. Impact of Good Metal Circulation and Furnace Operation for Increased Performances for Sidewell Furnaces / G. Riverin – W. Stevens – D. Bristol – Y. Kocaeffe / Light Metal 2007