

ALÜMİNYUM ERGİTME VE TUTMA SÜREÇLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Erman CAR

Özet

Modern yaşamın vazgeçilmez bir parçası olan alüminyum metali, gelişen teknolojiye koşut olarak her geçen gün önemini arttırmaktadır. Alüminyumdan üretilen malzemelerin çeşitliliği ve mükemmel özellikleri bu sürecin temel nedenidir. Alüminyum üretim süreçlerinin çok önemli bir parçası olan ergitme ve tutma fırınlarının tasarım ve uygulamaları da benzer gelişme-iyileşme eğilimindedir. Özellikle “sürdürülebilir kalkınma” kavramının ortaya çıkışı ile, fırınlarda enerji verimliliği ve buna bağlı olarak daha az atık gaz salınımı, alüminyum ile çalışan mühendislerin en önemli gündem maddelerinden birisi olmuştur. Bu çalışmada üretimin çeşitli kademelerinde kullanılan ve yanma (combustion) prensibine göre çalışan Reverberer tipli ergitme ve tutma fırınlarında yüksek enerji verimliliğine ulaşabilmenin yolları, genel olarak irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler : yanma, ergitme-tutma fırını, curuf, atık ısı, enerji verimliliği.

The aluminium industry is constantly looking for methods to reduce energy consumption, process cost, emissions and improve product quality. In this respects, with regard to processes melting and holding furnaces, it is often through reduced energy consumption that better production performance and emission is achieved.

Key words: combustion, melting-holding furnace, dross, waste heat, energy efficiency.

1. Giriş

Birincil alüminyum üretimi bir kenara bırakıldığında, alüminyum üretim proseslerinde en yoğun enerji kullanımı, ergitme ve tutma operasyonlarının gerçekleştirildiği fırınlarda sözkonusudur. Fırınlarda enerji tüketiminin optimizasyonu ve bununla eşanlamlı olarak üretim verimliliğinin artırılması ve daha kaliteli ürün üretimi, son yıllarda bu alanda çalışan mühendislerin ana gündem maddelerinden birisi olmuştur.

Bir çok endüstriyel uygulamada temel amaç verimliliği arttırarak, birim üretim maliyetini düşürmektir. Bu genel prensibi ergitme işlemine yansımaları ise birbiri ile doğrudan ilişkili :

- Ergitme zamanının kısaltmak için şarj üzerine transfer edilen enerjinin maksimizasyonu ve böylece,
- Fırının yüksek enerji verimliliğine ulaştırılması ve birim zamanda ergitilecek malzeme miktarının teorik değerlere yaklaşması,
- Oksidasyonunun engellenerek minimum metal kaybının sağlanması,
- Verimli bir ergitme işleminin doğal sonucu olarak minimum kirli gaz emisyonu olarak ortaya koyulabilir.

2. Yanma

Yanma, yakıt ile oksijenin, ısı oluşturmak için birleşmesi ile gerçekleşen kimyasal bir tepkimedir. Bu tepkime sonucu oluşan “yanma ya da baca gazı”, serbest hale geçen ısıyı taşır. Bu ısıнын miktarı, yanma gazlarının sıcaklığına bağlıdır.

Temel yanma tepkimeleri :

Karbon + Oksijen = Karbondioksit + Isı

Hidrojen + Oksijen = Su buharı + Isı

Yanma tepkimesi sırasında yeterli miktarda oksijen bulunduğunda “tam yanma” oluşur. Fırınlarda oksijen ihtiyacı ya havadan ya da kısmen ya da tamamen teknik saflıktaki oksijenden sağlanır. Eğer gerekenden fazla oksijen (ya da fazla hava) kullanılırsa, yakıcı alevi zayıf ve oksitleyici olacaktır. Bu hem yakıt kaybına hem de fırın atmosferinin oksidan olmasına neden olacaktır. Ters olarak gerekenden fazla yakıt kullanılırsa (düşük oksijen ya da yetersiz hava), yakıcı alevi zengin ancak redükleyici olacaktır. Yani yanma tepkimesi tamamlanamayacaktır.

Şekil 1: Reverber fırınlar (Sistem-Teknik)



Yanma verimi fırına giren ısı miktarının, fırında yararlı olarak kullanılan ısı miktarına oranıdır. Isı kayıpları fırın tasarımı ve özellikle yakıcı sisteminin seçimine bağlıdır (baca, duvar, kapı, balkon kayıpları). Farklı ergitme ya da tutma sistemleri için, kaçak ısıнын tanımı ve ölçümü zor olduğundan “yararlı ısı (available heat)” terimi kullanılır. Yararlı ısı, fırına giren ısıdan baca gazları ile kaçan ısı düşüldükten sonra elde edilen değerin bir yüzdesidir.

Tablo 1 : Farklı fırın sıcaklıklarında yararlı ısı oranı

	650 °C	980 °C	1315 °C
Yararlı ısı	% 66	% 52	% 35
Su buharı kaybı (latent heat) + baca gazı kaybı (sensible heat)	% 36	% 48	% 65

Bütün yanma bazlı ısı sistemlerinde işlem verimliliği ve dolayısı ile enerji verimliliği doğrudan aşağıdaki parametrelere bağlıdır :

- Doğru fırın tasarımı ve yakıt seçimi,
- Maksimum ısı transferi,

- Yakıcı sistemlerin uygun ısı akışı ve doğru hava/yakıt oranı ile çalışabilmesi,
- Fırın iç basıncının kontrolü
- Doğru refrakter seçimi, zamanında tamir ve malzeme taşıma-şarj ,kapı açma-kapama ve curuf alma işlemlerinin optimizasyonu ile ısı kaybının azaltılması,
- Yakıcı tipinin ve fırın içindeki konumunun, işleme uygun şekilde modifikasyonu,
- Proses kontrol aygıtları ile işlem parametrelerinin takibi,
- Şarjın fırına yüklenme zamanı ve pozisyonunun fırın tasarımının izin verdiği ölçüde iyileştirilmesi,
- Atık ısı geri kazanım aygıtları ile şarjın ve/veya yanma havasının ön-ısıtılması,

3. Isı Transferi

Yakıt ile çalışan fırınlarda, yanma tepkimesi sonucu kimyasal enerji ısı enerjisine dönüşür, sıcak gazlar tarafından yüklenir ve doğrudan ya da dolaylı olarak şarj üzerine “yararlı ısı” olarak taşınır. Isının bir bölümünden yararlı ısı olarak faydalanılırken, bir bölümü de faydalanılmaksızın dışarı gider. Yanma gazlarının sıcaklığı fırın içindeki şarjın sıcaklığından daha yüksektir. Bu yanma gazları baca gazı olarak fırını terkederken önemli miktarda enerjiyi de kayıp olarak beraberinde götürür.

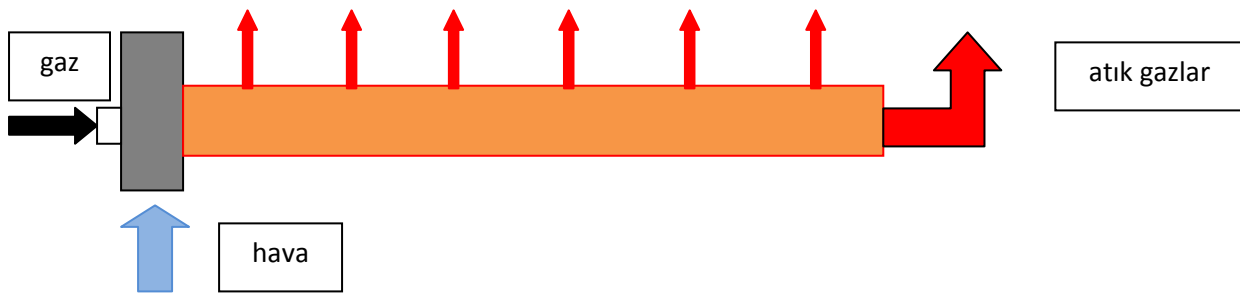
Isı kaynağından şarj üzerine ısı transferi 3 mekanizma ile çalışır:

- Yanma gazlarından şarj üzerine KONVEKSİYON ile,
- Alev, yanma ürünleri ve fırın duvarlarından RADYASYON ile,
- Alüminyum şarjın yüzeyinden iç kısımlarına (ermiş metal yüzeyinden curuf tabakası üzerinden ergiyiğin içine) KONDÜKSİYON ile.

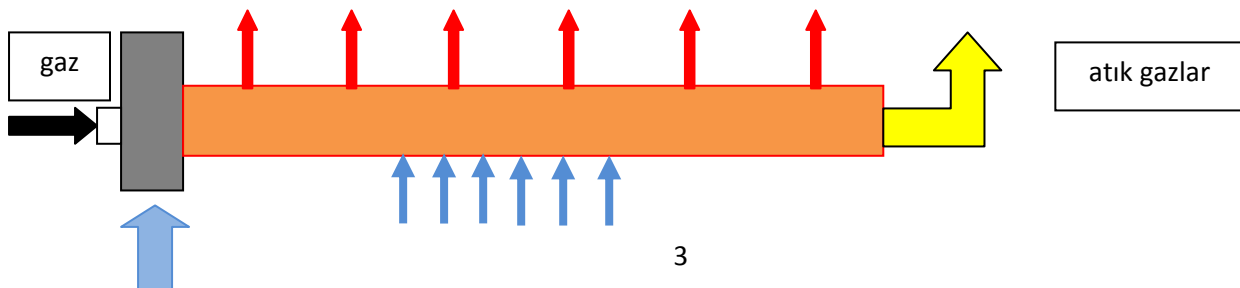
760 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda baskın ısı transfer mekanizması radyasyondur.

Şekil 2 : Isı transfer mekanizmaları

Radyasyon ile ısının iletildiği geleneksel yöntem:



Radyasyon ve konveksiyonun beraber çalıştığı geliştirilmiş ısı iletim yöntemi :



hava

gaz akışı

Reverber tipi alüminyum ergitme ve tutma fırınlarında ısı transferinin temel ilkeleri:

- Refrakter duvar ve tavandan radyasyon ile,
- Yanma gazlarının fırın içinde oluşturduğu örtüden radyasyon ile,
- Yakıcı alevinden doprudan radyasyon ile ve
- Ergiyik yüzeyi boyunca yer alan sıcak gazlardan konveksiyon ile ergiyik üzerine ısı transfer edilir.

Ergitme işlemi sırasındaki enerji verimliliği, iki ısı transferi mekanizmasına bağlıdır. İlk kademede yakıcıdan ergiyik üzerine, ikinci kademede ise ergiyikten katı şarj üzerine ısı transfer iletilir. Bu mekanizma aşağıdaki gibi formülize edilebilir:

1. $q_1 = s \cdot A_{\text{ergiyik}} \cdot (T_{\text{yakıcı}}^4 - T_{\text{ergiyik}}^4)$
s: Boltzman sabiti
 A_{ergiyik} : ergiyik yüzey alanı,
2. $q_2 = h \cdot A_{\text{katı şarj}} \cdot (T_{\text{ergiyik}} - T_{\text{katı şarj}})$
h: ısı transfer katsayısı
 $A_{\text{katı şarj}}$: katı şarjın yüzey alanı

Katı alüminyum mükemmel bir ısı iletkenidir. Bu nedenle ergitme işleminin ilk aşamasında yakıcıdan sağlanan ısı hızlı bir şekilde katı şarj tarafından absorbe edilir. Böylece düşük baca gazı sıcaklıkları ve yüksek ısı verim ortaya çıkar.

Ergimiş alüminyumun iletkenliği ise katı alüminyumun iletkenliğinin yarısı kadardır. Bunun anlamı aynı sıcaklıkta, ergimiş alüminyuma transfer edilecek olan ısının, katı alüminyuma göre çok büyük ölçüde azaldığıdır.

Fırın içinde ergiyik oluştuktan sonra katı şarj eriyik içine eninde sonunda batır. Bu durumda ısı transferi ergiyiğin düşük iletim yeteneğinden ötürü sınırlı oranda gerçekleşir. Çünkü hem ergiyik ile katı şarjın temas yüzeyi azalmıştır, hem de ısı kaynağı ile şarj arasındaki sıcaklık farkı düşüktür. Normal koşullarda yakıcı alevi ya da refrakter arasındaki sıcaklık farkı yaklaşık 550-600 °C iken, katı şarj ile ergiyik arasındaki sıcaklık farkı 90-100 °C'ye düşmüştür.

Şarj fırın içine yüklendikten sonra asal ısı transfer mekanizması radyasyondur. Tavan ve yan duvarlardan şarj üzerine radyasyon en önemli ısı transfer yöntemi iken, yanma gazlarından şarj üzerine radyasyon ikincil önemdedir. Ancak şarj sırasında kapının sık açılıp kapanması fırın refrakterlerinin soğumasına ve dolayısı ile ısı transfer oranının düşmesine neden olur. Bu nedenle şarj arabaları kullanımı önem taşır.

Isı transferinin maksimize edilmesi ile ergitme süresi % 25'e kadar kısaltılabilir ve böylece fırın verimliliği artırılabilir. Fırın içinde ve şarj boyunca uniform ısı dağılımı, ısı transferinin iyi olduğuna işaretler. Fırın içindeki ısı transferini iyileştirmenin en kolay yolları aşağıda sıralanmıştır:

- Yüksek hız yakıcıları ve/ve ya resirkülasyon fanı kullanımı ile fırın içinde sıcak yanma gazlarının uniform olarak dağılımı ve dolayısıyla konveksiyon ile ısı transferi iyileştirilebilir. İyileştirilmiş konveksiyon mekanizması ile ısı transfer oranı artarken, buna bağlı olarak ergitme süresi kısılır, verimlilik artar, ürün kalitesi artar ve birim enerji tüketimi azalır.
- Isı transferinin artırılmasının en kolay yolu transfer yüzeyinin temizliğidir. Ergitme fırınlarında ergiyik yüzeyini kağılayan curuf tabakasının temizlenmesi ısı transferini artırır. Bununla birlikte indirekt ısıtım fırınlarında örneğin radyan tüplerin ya da elektriksel eleman yüzeylerinin temiz tutulması da benzer olumlu etkiyi yapar.
- Değişken kapasiteli (yüksek turn-down oranına sahip) ve değişken alev boylu yakıcı kullanımı ile ısı transferi yükseltilebilir. Böylece ilk ergitme, katı-sıvı faz dönüşümü ve tutma aşamalarındaki değişik miktarlardaki ısı gereksinimi ekonomik olarak karşılanabilir.

Tablo 2 : Isı transfer mekanizmalarının farklı uygulamalardaki payı:

Isı transfer mekanizması	Ergitme	Isıtma	Tutma
Gaz konveksiyonu	% 60	% 5	% 5
Refrakter duvarlardan gaz radyasyonu	% 38	% 15	% 5
Refrakter tavandan gaz radyasyonu	% 12	% 80	% 90

Bütün ergitme süreçlerinde temel amaç, istenilen birim zamandaki eritme miktarına, yüksek enerji verimliliği ile ulaşmaktır. Fırına giren enerji aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

Fırına giren enerji oranı = yakıcının ürettiği enerji / ergiyik yüzey alanı (kW/m²)

Fırın işletme verimliliği, yakıcı kapasitesi ve fırın tasarımına bağlı olarak, büyük ölçüde birim zamanda yapılan şarj miktarı ve şarjın fiziksel olarak fırın hacmi içindeki konumuna bağlıdır. Bunun yanında işletme pratiği, curuf alma pratiği ve proses kontrol ile parametrelerin izlenmesi de diğer önemli noktalardır.

Yakıcıdan metal üzerine transfer edilebilecek ısı miktarı:

- ergiyik yüzey alanı,
- refrakter sıcaklığı,
- metal sıcaklığı ve
- ergiyik üzerindeki curuf tabakasının kalınlığına bağlıdır.

4. Isı Kayıpları

Faydalı ısı fırına giren net ısıdan baca gazı kayıplarının düşümü ilse hesaplanır. Şarja ulaşan net ısı miktarı ise faydalı ısı ile diğer kayıpların (duvar ve radyasyon kayıpları) arasındaki farktır.

Yüksek baca gazı sıcaklığı, verimsiz ısı transferinin göstergesidir. Eğer yanma gazları taşıdıkları enerjiyi şarj üzerine iletemezler ise, yüksek sıcaklıkta fırını terkederler.

Baca kayıpları aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$\text{Baca gazı kayıpları} = W \cdot C_p \cdot (T_{\text{baca gazı}} - T_{\text{çevre}})$$

W : baca gazlarının kütlesi,

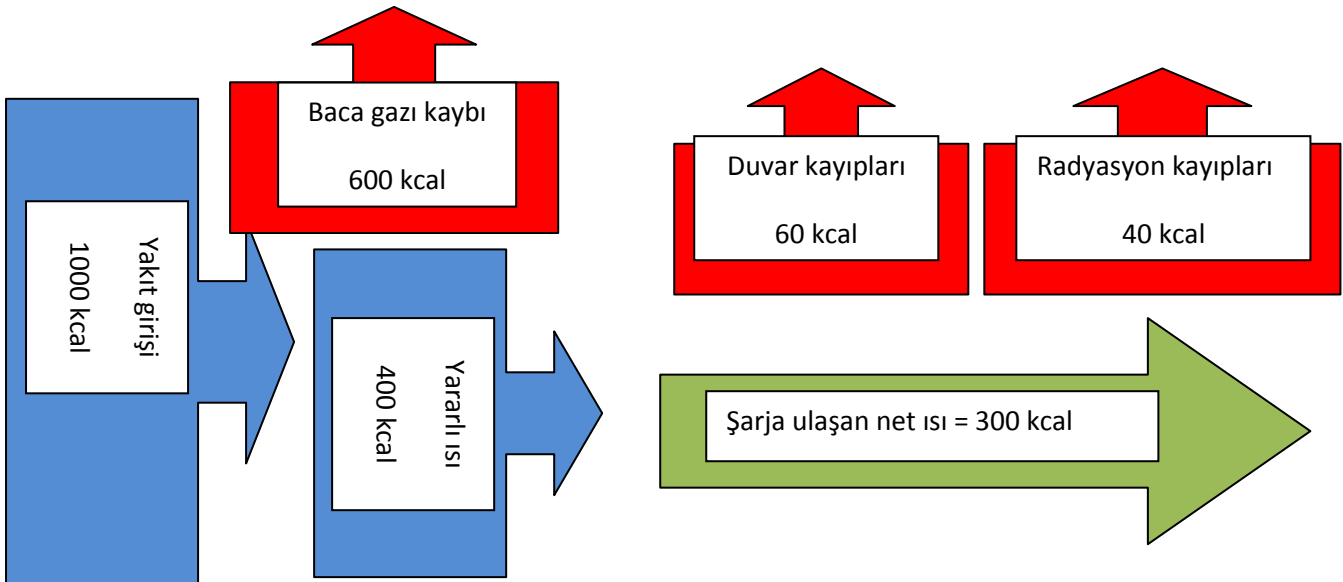
C_p : baca gazlarının özgül ısısı (0.25 btu/lb=0.14 cal/gr),

$T_{\text{baca gazı}}$: atık gazların bacaya giriş sıcaklığı,

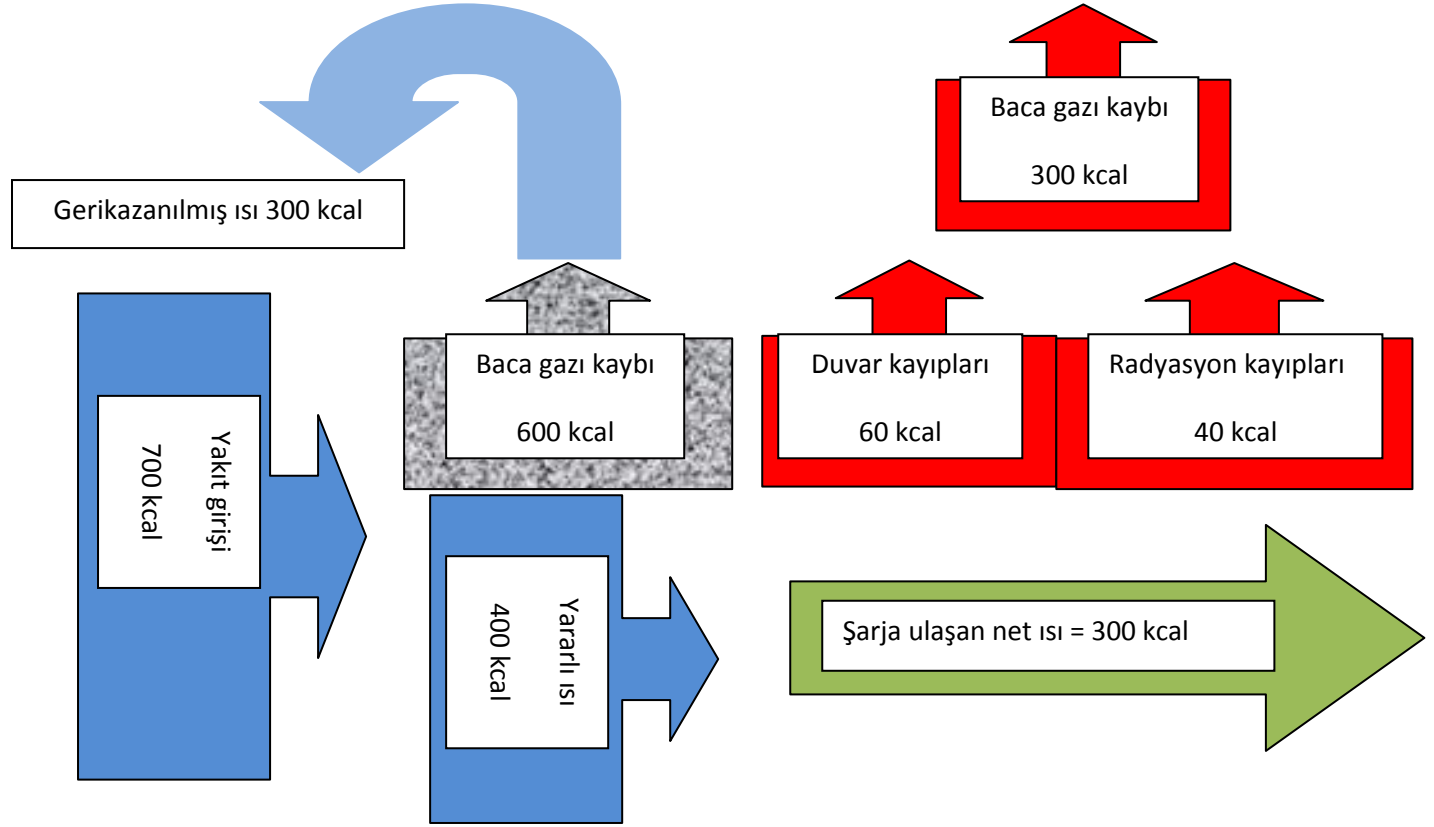
$T_{\text{çevre}}$: ortam sıcaklığı (genellikle 15°C).

Şekil 3 : Fırın enerji dengesi

980 °C'de tipik fırın enerji balansı (ısı gerikazanımı olmadan):



980 °C’de tipik fırın enerji balansı (600 °C’de ön-ısıtılmış hava ile):



Baca gazı hacmini azaltmak için fırını aşırı yüklemekten kaçınmak ve ısı transferinin iyileştirilmesi ile birlikte aşağıda sıralanmış noktalara da dikkat etmek gerekir:

- Hava-yakıt oranının optimizasyonu, aynı zamanda yakıt tüketiminin kontrolü anlamına gelir.
- Operasyonel kayıpların (kapı kayıpları, duvar kayıpları vs) diğer önemli parametrelerdir.
- Minimum miktarda hava ile gerçekleşen tamamlanmış yanma, en verimli ısı üretim şeklidir. Verimli bir yanma ile optimum yakıt tüketimi ve kirli gaz salınımı anlamına gelir.
- Fırınlar için hem refrakter seçimi, uygulanması hem de refrakter bakımı fırın tasarımını olduğu kadar, ısı ve enerji verimliliği içinde önem taşır. Dışarıdan soğuk hava girişine izin veren refrakter uygulaması sonucu hem yakıt tüketimi artar, hem de fırın içindeki sıcaklık dağılımı uniformluğunu kaybeder.

- Fırın tasarımı ve ertitlecek şarja uygun yakıcı sistemi seçimi de oldukça önem taşır. Isıtma ya da ertitme işlemlerinin farklı aşamalarında gerekli olan farklı miktarlardaki enerji ihtiyacını karşılayabilmek için esnek üretkenliğe sahip (yüksek turn-down oranı) ve uygun alev boyu ve şekline sahip yakıcı sistemi seçilmelidir.
- Reverber tipli fırınlarda kesintili çalışma, her bir devreye alma sürecinde öncelikle refrakter yüzeylerin ısıtılması ihtiyacı nedeni ile tavsiye edilmez.

Fırının enerji verimliliğinin ölçümünde temel parametre baca gazlarının sıcaklığıdır. Yüksek baca gazı sıcaklıkları, düşük enerji verimliliği anlamına gelir.

Her bir yakıt türü için, yanma tepkimesinin tamamlanması kimyasal ya da stkiometrik olarak ideal bir yakıt-hava oranına bağlıdır (tam yanma). Örneğın 1 m³ doğal gazın yanması için 10 m³ yanma havası gerekir. Tam yanma ile yüksek alev sıcaklığı ve ısı verimliliği elde edilir. İdeal orandan her sapma enerji veriminin düşmesine neden olur. Eger gerekenden daha az hava ile çalışılır ise, yanma tamamlanamaz ve yakıtın bir bölümü içerdığı enerjiden yararlanılmadan atık olarak sistemi terkeder.

Düşük hava ile çalışmak yanma reaksiyonunun tamamlanammasına ve bu nednle aşırı yakıt tüketimi, ve aşırı CO ve yanmamış hidrokarbon salınımına neden olur. Fazla hava kullanımı ise baca gazları ile atık ısı kaybının çok büyük oranda artmasına yol açer ve her iki durumda fırının ısı verimliliğini ve buna bağlı olarak üretkenliğini azaltır.

Fazla hava, baca gazlarında serbest oksijen bulunmasına neden olur. Bu nedenle fazla hava miktarı, baca gazlarında bulunan oksijen miktarı ile hesaplanabilir. Bir çok yakıt türü için baca gazlarındaki % 2 oksijen konsantrasyonu, optimum yanma reaksiyonunun göstergesidir.

Eşdeğer oran = $\phi = (A/F)_{\text{stkiometrik}} / (A/F)_{\text{pratik}}$

(A/F) : hava yakıt oranı (kg/kg)

$\phi > 1$ ise yakıtca zengin karışım,

$\phi < 1$ ise yakıtca fakir karışım.

Fırın içine dışarıdan soğuk hava sızması (hava infiltrasyonu), soğuk hava fırın içine sadece yakıcıdan fazla hava olarak girmez. Eğer fırın içinde negative basınç var ise, fırın çevresinden de fırın içine girebilir. Çünkü fırın içindeki negatif basınç kapı ve ve diğer açıklıklardan fırın içine soğuk havayı çeker (draft etkisi). Bu soğuk hava yanma gazlarının taşıdığı enerjinin bir bölümünün kaybolmasına neden olarak, fırının enerji verimliliğini düşürür.

Duvar kayıpları, özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan fırınlarda, ısının bir bölümü, sürekli olarak fırın duvar, tavan ve tabanından kondüksiyon ile kaybolur.

Radyasyon kayıpları, 530 °C'nin üzerinde çalışan bütün fırınlarda radyasyon kayıpları büyük oranda ısı kaybına neden olur. Hasar görmüş refrakter, zayıf izolasyon ve kapı açma-kapanma frekansının büyük olması radyasyon kayıplarının temel nedenidir. Kapak açma-kapatma işlemleri ile kaybolan ısı, şarj, numune alma ve curuf alma sırasındaki kapak açma-kapama işlemleri de önemli bir miktarda ısı kaybına neden olmaktadır. Bu işlemlerin insane gücü

yerine mekanik aletlerle yapılması, işlem süresini kısaltarak aşırı ısı kaybını önler ve özellikle şarj sırasında fırın içinde dengeli bir yüklemeye yardımcı olarak ısı transferini de iyileştirir. Aynı zamanda refrakter astarın mekanik darbeler ile hasar görme riskini minimize eder.

Diğer bir önemli nokta da fırın tasarımı ve şarj malzemesine bağlı olarak fırının yüklenme süresi ve şeklidir. Fırının homojen bir şekilde yüklenmesi hem ısı transferini artırır hem de birim zamandaki üretimi artırır.

Şekil 4: Şarj arabası (Sistem-Teknik) ve mekanize curuf çekme (tomorrow-Technology)



Tablo 3: Fırın tiplerine göre ısı verimliliklerinin karşılaştırılması :

Ergitme fırın tipi	Isıl verimlilik (%)
Gaz ile çalışan pota fırını	7-19
İndüksiyon fırını	59-76
Elektrik ile çalışan Reverber	59-76
Gaz ile çalışan Reverber	30-45
Döner fırın	35
Kule tipi fırın (stack melter)	40-45

Bu ısı kayıplarının azaltılması sonucu:

- Enerji tüketimi düşer,
- Fırın toplam verimliliği artar,
- CO, NO_x ve yanmamış hidrokarbon salınımı azalır ve
- Ürün kalitesi ve fırın ömrü iyileşir.

5. Curuf Oluşumu

Fırın içindeki ergiyik metal sıcaklığı 770°C ve üzeri değerlere ulaştığında, oksidasyondaki artış nedeni ile curuf oluşumu hızlanır. Oksidasyon ile curuf oluşumu tersinir olmayan bir tepkimedir ve sivi metal kaybı ile birlikte curuf oluşumunun temel nedenidir. Curuf oluşumu

metal sıcaklığına fırın içindeki oksijenin varlığına bağlıdır. Yanlış yakıt-hava oranı ve dışarıdan görünen ya da görünmeyen açıklıklardan hava sızması ana oksijen kaynaklarıdır.

Ergiyik üzerinde oluşan curuf tabakası, yalıtkan özellikler göstermesi nedeni ile ısı transferini olumsuz yönde etkiler ve ergime işleminin gerçekleşmesi için fırın sıcaklığının aşırı yükselmesine ihtiyaç duyulur. Ancak sıcaklık artışı, aynı zamanda curuf oluşumunu da hızlandırır. Curuf tabakasının kalınlığı arttıkça ısı ihtiyacı da oldukça yüksek oranlarda artar. Prosesin doğası gereği sıcaklık yükseldikçe yakıt verimliliği düşer, oksidasyon nedeni ile metal kaybı artar ve ergimiş alüminyum hidrojen gazı kapması riski ortaya çıkarak metal kalitesi düşer.

Bu sorunları önlemek için,

- Çalışma sıcaklığı optimumda tutulmalı ve periyodik olarak ölçülmeli,
- Fırın içindeki serbest oksijen miktarı minimize edilmeli,
- Radyasyon ile ısı transferinin fırın boyunca eşit dağılımı sağlanarak, lokal sıcak noktaların oluşumu önlenmeli,
- Fırının aşırı ısıtılmasından kaçınılmalıdır. Tavsiye edilen sıcaklık, malzemenin döküm sıcaklığının 50-60°C üzerinde tutulmasıdır.

6. Isı Gerikazanımı

Yanma bazlı, fosil yakıt ile çalışan alüminyum fırınlarında, enerji kayıplarının azaltılması ve kaybolan enerjinin gerikazanımı, fırının enerji verimliliği için önem taşımaktadır. Reverber tipli fırınlarda ergitme sırasında baca gazları önemli miktarda enerjiyi kaçak olarak taşımaktadır. Buna ilaveten daha küçük kayıplar fırın duvarları ve kapı kayıpları ile de gerçekleşmektedir. Verimli bir ısı gerikazanımında ilk öncelik, baca gazı kayıplarının azaltılmasına dayanır. Baca gazı sıcaklığı arttıkça, gerikazanılabilir enerji miktarı da artar. Bununla birlikte yüksek baca gazı sıcaklıklarına, ergitme işleminin belirli aşamalarında ulaşılır. İlk şarj zamanı, baca gazı sıcaklığı düşüktür ve ergiyik ile şarj arasındaki sıcaklık farkı nisbeten yüksektir. Bu aşamada enerji, yanma gazlarından şarj üzerine transfer edilir ve sonuç olarak baca gazı sıcaklığı düşüktür. Şarj ergimeye başladıkça, şarj ile fırın atmosferi arasındaki sıcaklık farkı düşmeye başlar, enerji transferi azalır ve baca gazlarının sıcaklığı yükselmeye başlar. Şarj tamamen ergidiğinde, ısı transferi minimuma ulaşır ve bu arada baca gazı sıcaklığı maksimum olur. Prosesin bu aşamasında, ergimiş metalin döküm sıcaklığına ulaşması için fırın ısıtılır ve bu aşamada baca gazları maksimum sıcaklığa ulaştığı için, maksimum enerjinin geri kazanımı mümkün olacaktır.

Herhangi bir fırında ısı gerikazanımı teknik olarak tasarlanırken, ısı üretimi ve gerikazanımı dengesinin kurulabilmesi için aşağıdaki kriterler dikkate alınmalıdır:

- Üretimin devamı ve teknik emniyet açısından gerikazanım sisteminin otomatik ya da manuel olarak kumanda edilebilmesi (ana sistemden izole olarak ya da by-pass ile),
- Ölçüm ve teknik emniyet açısından basınç ve sıcaklığın sürekli kontrol edilmesi,
- Gerikazanım sistemi kontrol araçlarının, fırın kontrol araçları ile uyumlu ya da birlikte çalışabilmesi gerekmektedir.

a. Kazanılan Isının Şarjın Ön-ısıtılmasında Kullanılması

Şarj üzerine uygulanacak ikincil ön-yakma havasının sıcaklığı, hem metal verimi, hem olası kondensasyon reaksiyonları hem de ön-yakma odası refrakterlerin zarar görmemesi açısından önemlidir.

Özellikle hurda ergiten tesislerde ön-ısıtma yağ,nem,boya ve lak gibi fiziksel kirliliklerin uzaklaştırılması için de önemli bir işlemdir. Ergitme öncesi bu kirliliklerin uzaklaştırılması ile oksidasyon sonucu oluşan curuf miktarı azaltılarak, daha yüksek metal verimlerine ulaşılabilir.

Ön-ısıtma uygulanmış şarjın erigme sırasında getirdiği diğer önemli bir avantaj da daha düşük alev sıcaklığı ve fırın sıcaklığının yetreli olması ve böylece daha az NO_x salınımıdır.

Bununla beraber ön-ısıtma odasında uniform sıcaklık dağılımı hem ısının efektif kullanımı hem de istenmeyen oksidasyon yoluyla metal kaybının önlenmesi açısından önemlidir.

b. Kazanılan Isının Yanma Havasının Ön-ısıtılmasında Kullanılması

Alüminyum ergitme ya da tutma fırınlarında en yaygın kullanıma sahip enerji tasarrufu yöntemlerinin başında, yanma havasının gerikazanılmış ikincil enerji ile ısıtılması gelir. Çünkü bu tip fırınlarda ana enerji kaybı, yanma gazlarının taşıdığı ısının bacadan kaçmasıyla gerçekleşir. Bu ısının ikinci bir kaynak olarak, yanma havasının ısıtılmasında kullanılması ile sağlanab,ilecek enerji tasarrufu doğrudan yanma gazlarının sıcaklığına ve yakıcılarda kullanılan hava-yakıt oranına bağlı olarak, baca gazının O₂ içeriğine bağlıdır.

Yanma havasının ikincil enerji ile ısıtılmasının getireceği ana faydalar aşağıda sıralanmıştır:

- Ön-ısıtılmış hava kullanımı ile daha yüksek alev sıcaklıklarına ve dolayısıyla daha yüksek radyasyon ile ısıtransferi oranlarına ulaşılabilir. Örneğin 15°C'den 540 °C'ye ısıtılmış yanma havası kullanıldığında, doğal gaz için teorik alev sıcaklığı yaklaşık olarak 1950 °C – 2715 °C aralığında olacaktır. Böylece alev radyasyonu ile ısı iletimi artacaktır.
- Fırına giren faydalı ısının miktarı artacak ve baca kayıpları azalmış olacaktır. Fırın içindeki alüminyum şarj ister sıvı, ister katı halde olsun, ihtiyacı olan ısının büyük bölümümünü doğrudan alevden güçlü radyasyon ile alacaktır. Alev radyasyonu oranının artırılması ile fırın duvar ve tavanının aşırı ısıtılması ve buna bağlı oluşabilecek hasarlar minimize olacaktır.
- Yüksek alev sıcaklığı ve buna bağlı olarak yüksek alev radyasyonu, fırının birim zamanda erteceği alüminyum miktarının artmasına neden olacaktır, yani fırının üretim verimliliği artacaktır. Ancak burada önemli olan nokta “aşırı ısınma”nın engellenmesidir. Çünkü aşırı ısınma ile hem yakıt tüketimi artar, hem oksidasyon nedeni ile metal kaybı artar, hem de sıvı metali hidrojen gazı kapma riski nedeni ile metal kalitesi düşer.
- Diğer bir önemli noktada, yanma havasının ısıtılması sonucunda yakıcılarda oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle “gaz kusma” probleminin oluşması ve böylece hava-yakıt

oranının bozulmasıdır. Bu nedenle hava-yakıt oranı periyodik olarak ya da otomatik olarak kontrol edilmelidir.

Ön-ısıtılmış hava kullanımının yol açabileceği en önemli sorun ise, yanma reaksiyonunun çok hızlı ve yüksek sıcaklıklar doğurması nedeni ile NO_x salınımındaki artıştır.

Yanma havasının gerçek sıcaklığı ile ikincil enerji ile ısıtma sonucundaki sıcaklığının oranı ile işlem verimi hesaplanabilir. Ancak termodinamik yasaları uyarınca hiçbir zaman % 100 yanma verimine ulaşamaz.

Rekuperatörler

Sistemin esasısı sıcak yanma gazlarının taşıdıkları ısıyı bir temas yüzeyi aracılığı ile yanma havasına transfer etmeleridir. Yanma havası ısınırken doğal olarak yanma gazlarının sıcaklığı düşer ve sonuç olarak baca gazları daha düşük sıcaklıkta fırını terkederler. Farklı tasarımlarda rekuperatörler vardır. En basit olanı tüp ya da radyan tipli olanlarıdır. Tüp yüzeyi ısı transfer yüzeyi olarak davranır.

Rejeneratif Sistemler

Şekil 5: Rejeneratif yanma sistemi (Sistem-Teknik)

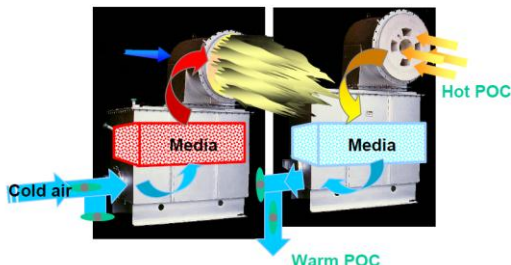


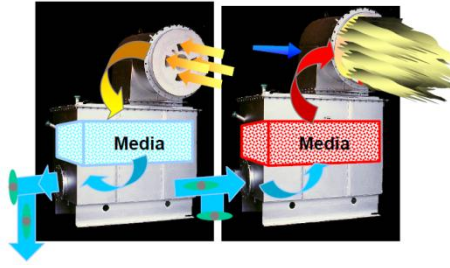
Son 15-20 yıldır alüminyum endüstrisinde geniş kullanım alanı bulan bir teknolojidir. Yüksek yakıt verimliliği ve üretim ytenegi sağlaması nedeni ile bir çok işletme ergitme ve tutma fırınlarını rejeneratif yakma sistemleri ile donatmıştır. % 50-60'a kadar yakıt tasarrufuna olanak vermesine karşın, geleneksel yakıcılara göre yüksek yatırım ve bakım maliyeti ve NO_x salınımı dezavantajlarıdır.

Özellikle büyük kapasiteli Reverber fırınlarda kullanılan rejeneratif sistemlerde, baca gazları ile taşınan ısının bir bölümü depolanarak, yanma havasının ısıtılmasında kullanılır. Sistem de genellikle iki yakıcı vardır ve bunlar nöbetleşe çalışırlar. Rejeneratif sistemlerin kullanımı ile hem alev sıcaklığı yükseltilebilir hem de fırına giren faydalı ısı miktarı artar. Böylece yakıt tüketimi düşerken, kirli gaz salınımı da azaltılmış olur.

Yakıcının bir tanesi normal olarak çalışırken, diğer yakıcı yanma havasının yaklaşık % 80-90'nunu çekerek, seramik toplardan oluşan yatakta toplar ve ikinci yakıcı devreye girdiğinde yanma havası olarak, toplandığı sıcak gazları verir.

Şekil 6: Rejeneratif yanma sistemi





Tablo 4 : 1175 °C’de çalışan bir fırın için ön-ısıtılmış hava kullanımı ile yakıt tasarrufu oranı

	Ön-ısıtılmış hava sıcaklığı (°C)	Faydalı ısı (%)	Yakıt tasarrufu (%)
Radyasyon reküperatörü	370	52	25
Radyasyon-konveksiyon reküperatörü	540	60	33
Rejeneratif sistem	980	78	48

Tablo 5 : Ön-ısıtılmış yanma havası kullanımının ergitme oranı ve enerji tüketimine etkisi

	Isı gerikazanımı olmadan	Rekuperator + yüksek hızlı yakıcı sistemi	Rejeneratif yakıcı sistemi
Ergitme oranı (kg/m ² /saat)	250	400	350
Enerji tüketimi (kcal/ton)	850 000	650 000	550 000

7. Oksijence Zenginleştirilmiş Yanma Havası Kullanımı

Yanma , yakıt ile oksidan arasında ısıyı oluşturan bir kimyasal reaksiyondur. Oksidan olarak genellikle hava kullanılır (havanın % 21’i oksijendir). Yanma havası içindeki oksijen konsantrasyonunun % 21’i geçtiği zaman “oksijence zenginleştirilmiş hava” tanımı kullanılır. Yanma havası içinde oksijen konsantrasyonunun artması, yanma ürünü gazlarda azotlu bileşiklerin azalması ve aynı zamanda azotlu bileşiklerle kaçan ısıнын azalması, yani sistemin ısı veriminin artması anlamına gelir.

Yanma havası olarak standart havanın kullanıldığı fırınlarda 1100 °C’de baca gazlarının O₂ içeriği % 2 ve faydalı ısı oranı % 46 oranındadır. Yanı fırına giren 100 birim brüt ısıнын sadece 46 birimi ergitme işlemi için kullanılabilir. Ancak standart hava yerine O₂ kullanıldığında faydalı ısı oranı % 75’e kadar çıkabilir.

Yanma havası olarak standart hava kullanıldığında ortaya çıkan azot , sadece çevresel sorun yaratmakta kalmaz, aynı zamanda üretilen ısıнын bir bölümünü taşıyarak, kaybolmasına da neden olur. 1100 °C’de çalışan bir ergitme fırınında yanma havası olarak oksijen kullanıldığında yakıt tüketimi yaklaşık olarak % 38 düşer. Düşük yakıt tüketimi aynı zamanda düşük gaz salınımı anlamına da gelir.

Şekil 7: Yanma havası olarak oksijenin kullanıldığı yakıcı



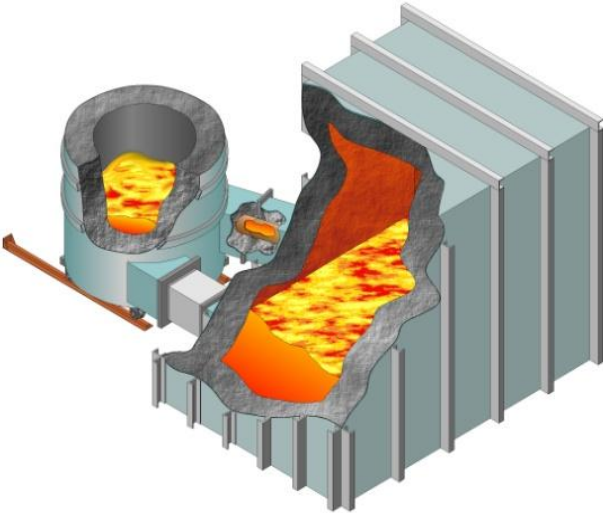
Oksijen ile zenginleştirilmiş yanma havası kullanıldığında, alev sıcaklığı yükselecek, bu da ısı iletimini arttıracaktır. Doğal gaz ile çalışan sistemlerde, geleneksel yakıcılarda maksimum alev sıcaklığı 1850°C iken, yanma havası olarak oksijen kullanım ile alev sıcaklığı 2700°C'ye kadar yükseltilebilir. Bu radyasyon ile ısı

iletiminin artması anlamına gelir. Yakıcı alevinden şarj üzerine radyasyon ile ısı iletimi, oksijen kullanılan yakıcılarda, hava kullanılan geleneksel yakıcılara göre 4 kez daha yüksektir. Artan ısı iletimi hem fırının ısıtma hızını arttıracak hem de enerji tüketimini azaltacaktır.

Yanma işleminin verimliliğinden dolayı atık gaz ve atık gazların kaçıracağı enerjinin oluşumu, geleneksel sistemlere göre daha düşük olacaktır. Havada 3 adet inert azot molekülüne karşın, 1 adet oksijen molekülü vardır. Yanma sırasında azotun hiç bir katkısı yoktur, ancak yanma olarak hava kullanıldığında, azotunda ısıtılması gerekecektir ve böylece bir miktar enerji azotun ısıtılması nedeni ile kaybolacaktır. Ancak yanma havası yerine oksijen kullanıldığında, bu sorun ortadan kalkacaktır. Oksijenli yanma sistemleri, geleneksel sistemlere göre yaklaşık %70 daha az atık gaz üretir.

8. Ergiyik Metali Karıştırılması

Şekil 8 : Elektro-manyetik pompa ile desteklenmiş Reverber Fırını (EMP)

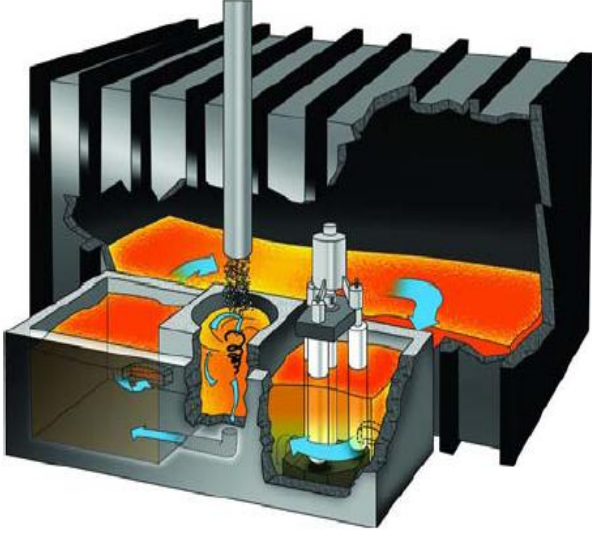


Ergiyik metal sirkülasyonu elektromanyetik ve mekanik pompalarla aracılığı ile, fırın içinde metali sirküle edilmesi prensibine göre çalışır.

Operasyonel anlamda, sirkülasyon pompası olarak ister elektro-manyetik, ister mekanik olsun, ısıtma sistemlerine temel katkı sağlar:

- Fırın içinde metal sirkülasyonu ile üretim ve enerji verimliliği ve daha yüksek kaliteli ürün üretebilme yeteneği,
- Elektro-manyetik pompanın kendisi, mekanik pompaya ise entegre edilen sistemler yardımı ile, özellikle ince kesitli hurdaların ısıtılmasına uygun şarj odası özelliği,
- Geleneksel Reverber tipli fırınlara göre daha az metal kaybı ile çalışmaya olanak veren ve daha ergonomik farklı fırın tasarımları (ikiz kamaralı ve balkonlu fırınlar).

Şekil 9 : Mekanik sirkülasyon pompası ile desteklenmiş, balkonlu Reverber fırını (Metallics)



Ergimiş metali sirkülasyonu ile metal banyosu içindeki sıcaklık farklarını ortadan kaldırarak, uniform bir sıcaklık dağılımı sağlar. Örneğin 900 mm derinliğe sahip geleneksel bir Reverber fırınında ergiyiğin tabanı ile yüzeyi arasında yaklaşık 50-85°C sıcaklık farkı vardır. Ancak sirkülasyon ile bu fark 10-15°C'ye kadar düşerek, uniform bir sıcaklık dağılımı sağlanarak, ısı transfer oranı arttırılabilir. Ergiyik yüzeyindeki yüksek sıcaklık nedeni ile artan curuf oluşturma ve hidrojen gazı kapma riski azaltılabilir.

Metal sirkülasyonu aynı zamanda katı şarj ile ergiyik arasındaki temas yüzeyini sürekli olarak büyüttüğü için ergime hızını ve dolayısıyla fırın üretkenliğini artırır.

Özellikle alaşımlı alüminyum üreten tesislerde, alaşım elementlerinin alüminyum içinde homojen dağılımı oldukça önemlidir. Metalin sirkülasyonu bu süreci hızlandırır ve alaşım elementlerinin homojen dağılımını sağlar.

Sirkülasyonun ergiyik içindeki ısı dağılımını düzenlediğinden yukarıda söz etmiştik. Düzenli karıştırma hareketi ile ergiyik yüzeyinde absorblanan ısı konveksiyon ile ergiyik derinliğine ulaştırılır. Böylece ısı transfer oranı artar ve fırının toplam enerji veriminde iyileşme görülür. Aynı zamanda ergiyik yüzeyinin absorbladığı ısıyı derinlere göndermesi yüzey sıcaklığını da düşürür. Böylece yakıcı ile ergiyik yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı büyür ve radyasyon mekanizmasının etkinliği artar.

Karıştırma hareketi ile ergiyik yüzey sıcaklığının düşmesi yanı ısı transfer oranının büyümesi refrakter astarın daha az ısı absorblamasını da beraberinde getirir. Böylece refrakter sıcaklığı ve dolayısıyla yanma gazı sıcaklıklarında 80-115°C'lik bir azalma gerçekleşir. Bu durum refrakter ömrünün uzamasını sağlar.

Bilindiği gibi curuf oluşumu sıcaklığa duyarlıdır. Düzenli karıştırma ile ergiyik yüzey sıcaklığının düşmesi oksidasyon riskini azaltır.

Sonuç olarak düzenli metal sirkülasyonu ile enerji tüketimi % 15-25 oranında düşer, refrakter ömrü uzar, minimum % 0.25 metal verimi artar ve ergitme süresi dolayısıyla fırının üretim hızı % 10-50 iyileşir.

9. Kirli Gaz Salınımının Kontrolü

Karbon monoksit, tamamlanmamış yanma reaksiyonu sonucunda yan ürün olarak oluşur. Oluşum nedenleri:

- Zayıf hava-yakıt oranı, yakıcıda yanma için gerekenden daha az oksijen var ise, yanma tamamlanamaz ve O₂ yerine CO oluşur,
- Hava-yakıt oranındaki dengesizlik sebebi ile yanma reaksiyonunun tamamlanabilmesi için gerekli zamanın olmaması,
- Yakıcı alevinin soğuması, özellikle ergitmenin başlangıcında alev soğuk şarja temas ederek, soğur,

Unutulmaması gereken önemli bir nokta da, yanma reaksiyonunun bir kimyasal reaksiyon olduğu ve bu reaksiyonun başlayabilmesi için bir miktar enerjiye gereksinim duyulduğudur. Aynı zamanda reaksiyonun devamı içinde yine üretilen ısı enerjisinin bir bölümü tüketilir. Eğer oluşan ısı, yakıcıdan çok hızlı bir şekilde uzaklaşırsa, kimyasal reaksiyon durur ve CO oluşmaya başlar.

Azot oksit, alev sıcaklığı 1480 °C'nin üzerine çıktığında oluşmaya başlar. Oluşum nedenleri:

- Ön-ısıtılmış hava ve oksijence zenginleştirilmiş hava kullanımı alev sıcaklığını artırır. Artan alev sıcaklığına bağlı olarak NO_x salınımı artar.
- Fırın içindeki fazla hava (yakıcıdan ya da fırın dışından içeri sızan hava) miktarına bağlı olarak fırın içinde NO_x konsantrasyonunun yüksek olması,

Tablo 6: Fazla hava oranına bağlı olarak NO_x konsantrasyonunun değişimi ppm (mg/Nm³) :

Fazla hava %’si	Yanma sıcaklığı (°C)	
	16 °C	230 °C
0	40 (80)	75 (150)
10	55 (110)	100 (200)
25	65 (130)	125 (250)
50	85 (170)	265 (530)

Tablo 5’den de görüleceği gibi fazla havanın (burada kastedilen fazla hava yakıcıdan gelen fazla hava ve fırın dışından içine sızan havanın toplamı) % 0’dan % 25’e çıktığında NO_x oluşma eğilimi % 53 oranında artmaktadır.

Sonuç olarak, yüksek alev sıcaklığı, doğru yakıt/hava oranı ve sıcak yanma gazlarının fırın içinde yeterince kalmasının sağlanması ergitme fırın tasarımında ana prensiplerdir.

10. Sonuç

Çalışan fırınlarda alınabilecek önlemler ve ilave yatırımlar sonucu, enerji verimliliğini iyileştirmeye yönelik iyileşmeler, aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Isı kayıplarının azaltılması, yüksek enerji verimliliği ile aynı zamanda düşük metal kaybı ve üretim artışı anlamına gelmektedir.

Tablo 7 : Enerji verimini arttırıcı önlemler

Önlem	Isı transferinin iyileştirilmesi	Baca gazı kayıplarının azaltılması	Eş sıcaklık dağılımı	Oksidasyon nedeniyle metal kaybı	Verimlilik
Fırın performansının iyileştirilmesiyle;					
Fırında depolanan ısı miktarının azaltılması		❖		❖	❖
Duvar kayıplarının azaltılması		❖			❖
Kapı açma-kapama ve yükleme kayıplarının azaltılması		❖		❖	❖
Hava-yakıt oranının iyileştirilmesi	❖	❖		❖	❖
Dışarıdan hava sızmasının önlenmesi	❖	❖	❖	❖	❖
İlave ekipman ve sistemler ile;					
Atık gaz gerikazanımı ile:					
Yanma havasının ısıtılması	❖	❖			❖
Şarjın ön-ısıtılması		❖	❖	❖	❖
Oksijen ile zenginleştirilmiş hava kullanımı	❖	❖		❖	❖
Proses kontrolün otomasyonu	❖	❖	❖		❖
Sirkülasyon pompaları kullanımı	❖		❖	❖	❖
Fırın yükleme ve curuf almanın mekanize edilmesi	❖	❖		❖	❖

Kaynakça

1. Energy Efficient Operation of Secondary Aluminum Melting Furnaces / P.E. King – J.J. Hatem – B.M. Golchert / Furnace Systems Technology Workshop: Emerging Technologies and Energy Efficiency / TMS 2006
2. Recent Technological Developments / Peter Whiteley / Aluminum Cast House Technology – Eight Australasian Conference / TMS 2003
3. A Database of Energy Reduction Options for the Netherlands 1995-2020 / E.A. Alsema / Sector Study for Non-Ferrous Metals Industry / October 2000
4. The Next Generation of Combustion Technology for Aluminum Melting / David G. Schalles / www.bloomeng.com
5. Industrial Application of DOE Energy Savings Technologies to Aluminum Melting / Cynthia K. Belt – Brian M. Golchert – Paul E. King – Roy D. Peterson – Joseph L. Tessandori / LM 2006
6. Guide to Energy Efficiency in aluminum Smelters / Pierre Boullargeon – Dominique Lecterc – Hakim Zahar / Aluminum Association of Canada / 1998
7. Analysis of Combustion Characteristics in a Aluminium Melting Furnace / L. Lazic – A. Varga – J. Kizek / Metalurgiya / Issue:44 / 2005
8. Oxygen Enhanced Combustion Provides Advanages in Aluminum Melting Furnaces / Stewart Jepson – Peter Van Kompen / Industrial Heating / June 2005
9. Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opprtunities for the Metal Casting Industry / BCs Inc. / November 2005
10. Molten Metal Pumps Improve Performance of Aluminum Reverberatory Furnaces / Foundry Insight / Volume:3 Issue:2 / May 2009
11. Advanced Scalable Clean Aluminum Melting Systems / U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy / November 2004 / www.eere.energy.gov/industrial.html
12. Reducing the Environmental Impacts of Melting Process for aluminum Casting Production / Phil Ramsell / www.ramsell-naber.co.uk
13. Improving Aluminium Melting Using Pumping / Brian Golchert – Hossam Metwally – Paul King – Chris Vild / Furnace Sytems Technology Workshop : emerging Technologies and energy Efficiency / TMS 2006
14. Advances in Molten Metal Pump Technology Expand the Capability of Aluminum Reverberatory Furnace Production Rates / Mark A. Bright – Richard C. Chandler – Richard S. Henderson / Light Metals 2007
15. Efficient Process Heating in the Aluminum Industry / U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy / www.oit.doe.gov
16. Energy Efficiency Planning and Management Guide / Canadian Industry Program for Energy Conservation
17. Industrial Combustion Vision / U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy / May 1998 / www.oit.doe.gov
18. Improving Industrial Burner Design with Computational Fluid Dynamics Tools / Workshop Report / U.S. Department of Energy Office of Industrial Technologies and Sandia Laboratory / September 2002
19. A Control Strategy for high Production Aluminum Furnaces / Don Whipple / 2004 / www.bloomeng.com
20. Improving Process Heating System Performance – A Sourcebook for Industry / U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy – Industrial Heating Equipment Association / www.eere.energy.gov
21. Theoretical Best Practice Energy Use in Metalcasting Operations / J.F. Schifo – J.T. Radia / Keramida Environmental Inc. / May 2004
22. Direct Charged Melters / Don Whipple / 2004 / www.bloomeng.com
23. Improved Control for Aluminum Holding Furnaces / Don Whipple / 2004 / www.bloomeng.com

24. Energy Saving in Furnaces / V. Parkash&Associates / New Delhi
25. Mathematical Modelling for Recycling Furnace Optimisation / vincent Goutiere – Gaston Riverin – Bruno Gariepy – Wasley Stevens / Light Metals 2004
26. Furnace Design for Minimizing Metal and Energy Losses Takşng into Consideration Environmental Protection Requirements / Christoph Schmitz / Alusil / February 2008
27. Endüstri Fırınları Cilt:1 / Prof. M.Ali Topbaş / 1991
28. Alüminyum Üretimi / Erman Car / Metalurji Mühendisleri Odası Yayım No:2
29. Alüminyum Üretim Süreçlerinde Kullanılan Ergitme ve Tutma Fırınlarına Genel Bir Bakış / Erman Car / 4. Alüminyum Sempozyumu / Ekim 2009 / İstanbul
30. Recent Advancements in Gas Injection Technology Using Molten Metal Pumps / R. Henderson – D. Neff – C. Vild / Metaullics