

ALÜMİNYUM REVERBER ERGİTME ve TUTMA FIRINLARINDA ENERJİ YÖNETİMİ ve REFRAKTER SEÇİMİNİN ÖNEMİ

Erman Car

METKİM & NRL Sirma Refractories

erman@metkim.com

ÖZET

Alüminyum metalurjisinde Hall-Herault ergimiş tuz elektrolizi ile birincil alüminyum üretiminden sonra en çok enerjinin tüketildiği işlemler alüminyum ergitme ve tutma işlemleridir. Yaygın kullanılan reverber fırınlarında enerji verimi fırın tasarımı ve kapasitesine bağlı olarak % 25 ile 65 arasında değişir. İşlem veriminin artması için fırın özel yakıcı sistemler, refrakter malzeme ve örüm tekniklerinde gelişmeler ve ergimiş metalin sirküle ettirilmesi gibi bir çok yöntem mevcuttur. Bu çalışmada, işlem verimini artırıcı yöntemler üzerinde genel bir bilgi verilmeye çalışılmış, hem de refrakter seçimi ve uygulamalarının enerji verimine etkisi incelenmiştir.

Anahtar kelimeler : Enerji yönetimi, enerji verimliliği, Reverber fırınlar, refrakter

ENERGY MANAGEMENT in ALUMINIUM REVERB TYPE MELTING AND HOLDING FURNACES and IMPORTANCE OF REFRACTORY SELECTION

ABSTRACT

Aluminium melting and holding operations is the second most energy consumed operations in aluminium metallurgy after Hall-Herault electrolysis process. Energy efficiency is almost 25-65% in Reverberatory furnace depending on furnace design and capacity. There are many ways to improve energy efficiency such as special burner system, new refractories and lining methods and metal circulation.

Key words : Energy management, energy efficiency, Reverberatory furnaces, refractory

1. GİRİŞ

Alüminyum üretim süreçlerinde kullanılan fırınların enerji verimliliği, birbirinden ayrı etmenlere değil, tam tersine birbiri ile içiçe geçmiş ve aynı anda birçoğunun beraber davrandığı bir etmenler kombinasyonuna bağlıdır. Temel amaç, daha az enerji ile, daha az metal kaybederek ve çevreyi daha az kirleterek ergitme ya da tutma/döküm işlevlerini yerine getirmektir. Özellikle işletmeler için ana kriter, yatırım bedelinin azlığı

ya da çokluğu değil, fırının sürekli performansı olmalıdır. Sonuçta boşa harcanan her metreküp gaz ve kaybedilen her gram alüminyum maliyet ve salınan her kg CO₂ daha fazla küresel ısınma riski demektir.

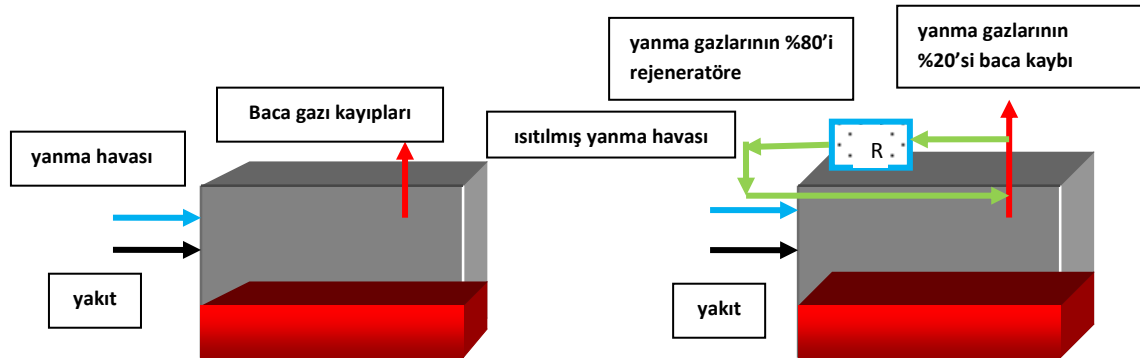
2. ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Fırın sistemlerinde enerji verimliliği toplam yararlı enerjinin, yani üretime harcanan enerjinin, giren enerjiye oranı olarak tanımlanabilir.

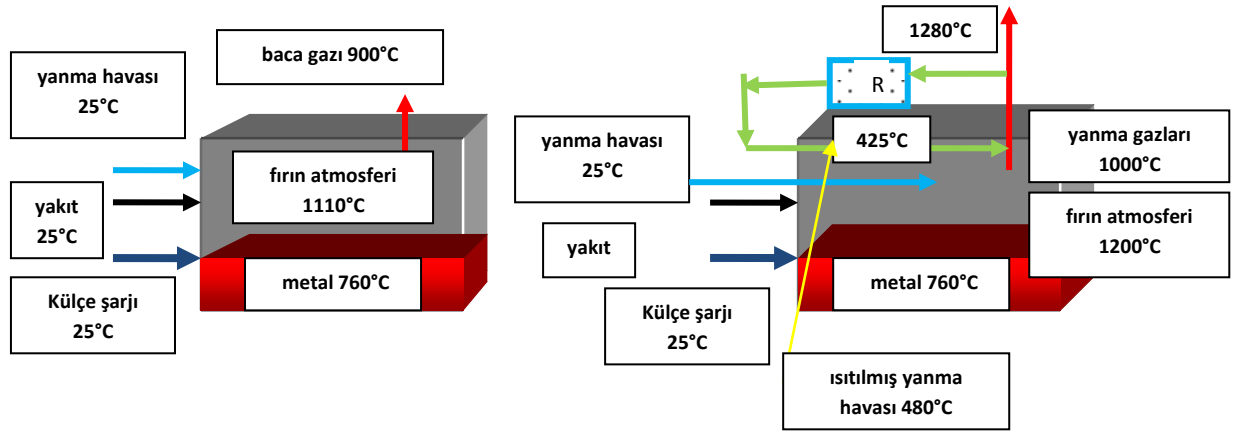
$$\text{Enerji verimliliği } \eta = E_{\text{üretim}} / E_{\text{giren enerji}} = 1 - (E_{\text{kayıp}} / E_{\text{giren enerji}})$$

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

- Yakıcı seçimi ve fırın içinde konumlandırılması
- Baca kayıpları,
- Hava/yakıt oranının kontrolü,
- Fırın iç basıncının kontrolü ve hava kaçaklarının önlenmesi
- Atık ısının yanma havasının ya da şarjın ön-ısıtılmasında kullanılması
- Yanma havası olarak oksijence zenginleştirilmiş hava ya da oksijen kullanımı
- Metal sirkülasyon pompalarının kullanımı
- Refrakter kalitesi ve uygulaması
- İşletme koşulları
 - Ergiyik yüzeyinin temizliği
 - Fırın yükleme ve işletme pratiği (şarj ve curuf alma mekanizasyonu, radyasyon kayıplarının önlenmesi)
- Proses kontrol sistemleri



Şekil 1: Külçe ergiten geleneksel ve rejeneratif yakıclı Reverber fırınında baca kaybı



Şekil 2: Külçe ergiten geleneksel ve rejeneratif yakıclı Reverber fırınında sıcaklık dağılımı

2.1. Yakıcı Seçimi ve Konumlandırılması

Alüminyum fırınlarında enerji verimliliği, teknik olarak, büyük ölçüde yanma verimi ile doğrudan ilgilidir. Yanma verimi etkileyen ana parametrelerin başında yakıcı seçimi ve konumlandırılması gelir.

Genellikle işletmelerde, ergitme süresini kısaltmak amacı ile, yakıcılar tam güç çalıştırılır. Ancak hızlı ergitmeye ulaşabilmek için aynı zamanda yanma sonucu oluşan ısıyan yanma havasından katı şarj üzerine iletilmesi gerekmektedir. Yani ısı iletim oranı, yakıcının çalışmasıyla doğru orantılı olarak artmaz. Yakıcının fazla çalışması aynı zamanda, baca gazı sıcaklığının yükselmesi, daha fazla metalin okside olarak yanması, daha fazla metal parçacıklarının baca gazı tarafından taşınması ve daha fazla toz oluşumu anlamına gelir. Bu nedenle maksimum ısı iletimine olanak veren tasarım ve yakıcı konumlandırılması, ergitme fırınları için yaşamsal önem taşır. Yakıcıların optimum koşullarda çalıştırılması, yeterli operasyon bilgisi ve uygun şarj karışımı hazırlanması ile ısı kayıpları azaltılarak, fırının ısı verimliliği artırılabilir ve dolayısıyla gaz ve oksijen tüketimi azaltılabilir.

Katı alüminyum şarjı, yanma gazlarının doğrudan teması ile, yanma gazlarının taşıdığı ısıyı absorbe eder. Özellikle yüksek hızlı yakıcıları ürettiği şiddetli alev yanma gazları şarj üzerinde hem ısı olarak hem de-eğer hurda ergitiliyorsa- mekanik olarak dağıtıcı bir etki yapar. Sonuç olarak bu aşamada baca gazı sıcaklığı nisbeten daha düşüktür. Yanma gazlarının ve alevin şiddetinden dolayı konvektif ısı iletimi sayesinde katı şarj tamamen ısı etkisine maruz kalırken, radyasyon yalnızca ulaşabildiği yüzeyleri etkiler.

Ancak katı şarj ergitmeye başlayıp, metal banyosuna karıştıktan sonra konvektif ısı iletiminin oranı da azalır. Ancak ergiyik yüzeyinin üzerindeki sıcak yanma gazları ergiğin yüzey gerilimini düşürerek, radyasyona göre daha iyi sıcaklık dağılımı sağlar.



Şekil 3: Ergitme verimliliğini arttırıcı uygulamalar

2.2. Baca Kayıpları

Yukarıda da belirtildiği gibi yararlı ısı fırına giren net ısıdan baca gazı kayıplarının düşümü ile hesaplanır. Şarja ulaşan net ısı miktarı ise yararlı ısı ile diğer kayıpların (duvar ve radyasyon kayıpları) arasındaki farktır.

Fırının enerji verimliliğinin ölçümünde temel parametre baca gazlarının sıcaklığıdır. Yüksek baca gazı sıcaklıkları, düşük enerji verimliliği anlamına gelir. Eğer yanma gazları taşıdıkları enerjiyi şarj üzerine iletmezler 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 (0.14 cal/gr),

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

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

Baca kayıpları diğer ısı kayıplarına ve operasyon kalitesine doğrudan bağlıdır. Baca kayıplarının miktarı ise, yanma havası ve yakıtın akış hızına ve fırın içine dışarıdan kaçak hava girişi ile ilgilidir. Daha önce de belirtildiği gibi, baca gazının O_2 ya da CO_2 içeriği ölçülerek hesaplanabilir.

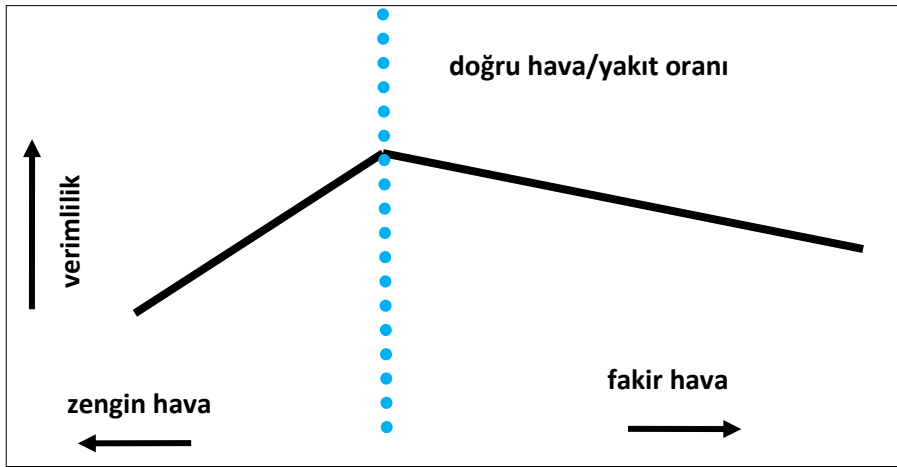
2.3. Hava/yakıt Oranının Kontrolü

Yanma tepkimesinin tamamlanması için gerekli olan minimum ısıнын kullanımı en verimli ısı üretim şeklidir. Verimli bir yanma, optimum yakıt tüketimi ve minimum kirli gaz salınımı anlamına gelir.

Her bir yakıt türü için, yanma tepkimesinin tamamlanması kimyasal ya da stokiometrik olarak ideal bir yakıt-hava oranına bağlıdır (tam yanma). Örneğin 1 m³ doğal gazın yanması için 9.52m³ 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 içerdiği enerjiden yararlanılmadan atık olarak sistemi terkeder.

Düşük hava ile çalışmak yanma reaksiyonunun tamamlanamamasına ve bu nedenle 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 açar 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.



Şekil 4: Hava/yakıt oranı

$$\text{Eşdeğer oran} = \phi = (H/Y)_{\text{stokiometrik}} / (H/Y)_{\text{pratik}}$$

(H/Y) : hava yakıt oranı (kg/kg)

$\phi > 1$ ise yakıtca zengin karışım,

$\phi < 1$ ise yakıtca fakir karışım.

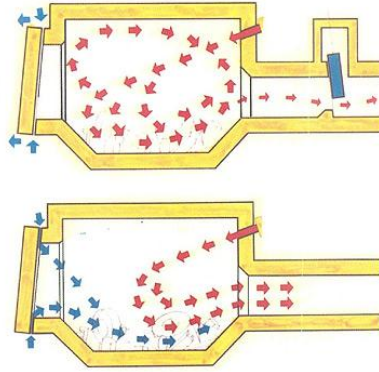
Hava/yakıt oranının ayarı fırının enerji verimliliği açısından hayati önem taşır. Örneğin 1100 °C’de çalışan bir fırın için, stokiometrik olarak yararlı ısı oranı % 45’dir. Yani kalan % 55’lik ısı baca kaybı olarak fırını terkeder. Buna karşın % 20 fazla hava ile

çalışıldığında (yani hava/yakıt oranı 12:1), yararlı ısı oranı % 38'e düşer. Sonuçta fırın aynı sıcaklığa ulaşmak ya da aynı sıcaklığı korumak için % 18 daha fazla yakıt kullanmak zorundadır.

2.4. Fırın İç Basıncının Kontrolü ve Hava Kaçaklarının Önlenmesi

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

Fırın içine kaçak hava girişi, yakıt tüketimini olumsuz yönde etkiler ve fırının yüksek hava/yakıt oranı ile çalışmasına yol açar. Bunun yanında hava kaçakları, fırın içindeki oksijen konsantrasyonunun artmasına ve dolayısıyla ergimiş metalin oksidasyonuna da neden olur.



Şekil 5: Fırın içinde negatif ve pozitif basınç

Teorik olarak, hava kaçağı ile kaybolan ısıнын karşılanması için, yakıcıların ürettiği ısıнын miktarı, kaçak ısıнын miktarından daha fazladır. Çünkü yakıcıların ürettiği ısıнын tamamı “yararlı ısı “ değildir.

Reverber tipli bir ergitme fırınına, dışarıdan kaçak olarak giren her m³ hava, yaklaşık olarak 250 Watt/saat enerji kaybına neden olur.bu rakam ortalama olarak % 10 daha fazla yakıt tüketimi anlamına gelir.

2.5. Atık Isının Yanma Havasının ya da Şarjın Ön-ısıtılmasında Kullanılması

Atık ısıнын yeniden değerlendirilmesi ile aşağıda sıralanmış doğrudan ve dolaylı yararlar elde edilebilir :

Doğrudan yararlar:

- Enerji verimliliğinin yükselmesi,
- Enerji tüketiminin azalması,
- Proses maliyetlerinin azalması.

Dolaylı yararlar

- Kirli gaz salınımının azalması,
- Sera gazı salınımının azalması,
- Kullanılan ana ekipman yüklerinin azalması,
- Yardımcı ekipmanların enerji tüketiminde azalma.

Verimli bir atık ısı değerlendirme işlemi için ilk öncelik, baca gazı kayıplarının azaltılmasıdır. 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.

Atık Isının Şarjın Ön-ısıtılmasında Kullanılması

Şarj üzerine uygulanacak ikincil ön-yakma havasının sıcaklığı, metal verimi, olası kondensasyon reaksiyonları, ıslak şarjın fırın içinde patlama riski ve refrakter ömrü açısından önemlidir.

Özellikle hurda ergiten tesislerde ön-ısıtma yağ, nem, boya ve lak gibi fiziksel kirliliklerin uzaklaştırılması toplam proses verimliliği açısından önem taşır. Ergitme öncesi bu kirliliklerin uzaklaştırılması ile oksidasyon sonucu oluşan curuf miktarı azaltılarak, daha yüksek metal verimlerine ulaşılabilir.

Ön-ısıtma, şarjın enerji tasarrufu amacı ile ön-ısıtılması, ıslak şarjın neden olabileceği patlama riskini azaltmak için kurutma amacı ile ya da ergitme fırınına entegre bir lak/boya giderme hattına enerji sağlanması amacı ile yapılabilir.

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

Atık Isının Yakma Havasının Ön-ısıtılmasında Kullanılması

Alüminyum ergitme ya da tutma fırınlarında en yaygın kullanıma sahip enerji tasarrufu yöntemlerinin başında, yakma havasının gerikazanılmış ikincil enerji ile ısıtılması gelir. Çünkü bu tip fırınlarda ana enerji kaybı, yanma gazlarının taşıdığı ısıнын bacadan kaçmasıyla gerçekleşir. Bu ısıнын ikinci bir kaynak olarak, yakma havasının ısıtılmasında kullanılması ile sağlanabilecek enerji tasarrufu doğrudan yanma gazlarının sıcaklığına ve yakıcılarda kullanılan hava-yakıt oranına ve 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 ısı iletimi oranlarına ulaşılabilir. Örneğin 15°C'den 540 °C'ye ısıtılmış yakma 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 ergidikten sonra, ihtiyacı olan ısının büyük bölümünü 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 ergiteceği alüminyum miktarının artmasına neden olacaktır, yani fırının üretim verimliliği artacaktır. Ancak burada önemli olan nokta “aşırı ısınmanın” 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.

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

Yakma 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 esas sıcak yanma gazlarının taşıdıkları ısıyı bir temas yüzeyi aracılığı ile yakma havasına transfer etmeleridir. Yakma 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 olanlardır. Tüp yüzeyi ısı transfer yüzeyi olarak davranır.

Rejeneratörler

Rejeneratif yakıcı sistemleri hem ön-ısıtılmış hava kullanımı hem de proses kontrolüne uygunluğu nedeni ile hassas kontrol edilebilen yakıcı sistemleridir. Hava/yakıt oranındaki sapmaların yakıcı verimliliği üzerindeki negatif etkisi, rejeneratif sistemlerde minimumdur.

Tablo 1: Yakma havasının ön-ısıtılması ile elde edilebilecek yakıt tasarrufu oranları (doğal gaz ve % 10 fazla hava kullanıldığında)

| Yanma gazları sıcaklığı (°C) | Yakma havası sıcaklığı (°C) | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
| 600 | % 14 | % 19 | | | | | |
| 700 | % 15 | % 20 | % 24 | | | | |
| 800 | % 16 | % 21 | % 25 | % 28 | | | |
| 900 | % 17 | % 22 | % 27 | % 30 | % 33 | | |
| 1000 | % 18 | % 24 | % 29 | % 33 | % 36 | % 38 | % 40 |
| 1100 | % 20 | % 26 | % 31 | % 35 | % 38 | % 40 | % 43 |
| 1200 | % 23 | % 29 | % 34 | % 39 | % 41 | % 44 | % 47 |
| 1300 | % 26 | % 32 | % 38 | % 43 | % 46 | % 49 | % 51 |

Tablo 2: Atık ısının geri kazanımı yapılabilecek enerji tasarruf oranları

| Yöntem | Enerji tasarrufu (%) |
|--------------|----------------------|
| Soğuk hava | 100 |
| Rekuperasyon | 72 |
| Rejenerasyon | 51 |

Tablo 3.: 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 rekuperatörü | 370 | 52 | 25 |
| Radyasyon-konveksiyon rekuperatörü | 540 | 60 | 33 |
| Rejeneratif sistem | 980 | 78 | 48 |

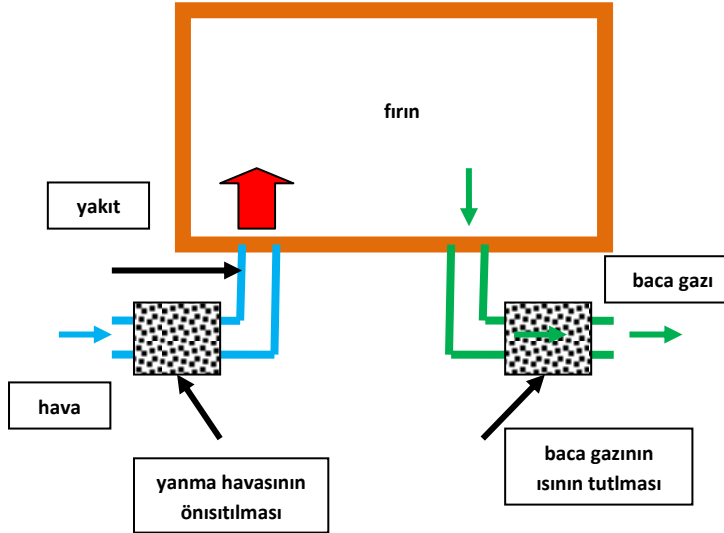
Rejeneratif yakma sistemlerinin çalışma şekli, baca gazının taşıdığı atık ısının, yanma havası yerine kullanılması ilkesine dayanır. Sistemin başarılı çalışabilmesi için otomasyon sistemleri ile desteklenerek sürekli kontrolü gerekir. Sistemin en önemli parçası olan rejeneratörler, bir ısı değiştirici (eşanjör) gibi çalışarak, baca gazlarının ısınıp üzerinde toplayarak, yanma havasının ısıtılmasını sağlarlar. Alüminyum endüstrisinde rejeneratör malzemesi olarak genellikle alümina topraklar kullanılır. İlk çevrimde yanma gazlarının taşıdığı yüksek sıcaklıktaki ısı, atmosfere verilmeden önce rejeneratörlerden geçirilerek, taşıdığı ısı alınarak, ikinci çevrimde kullanılacak olan yanma havasının ısıtılmasında ve böylece daha az enerji ile yanma olayının gerçekleştirilmesinde kullanılır.

Tablo 4: 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 |

Rejeneratif yakıcılar doğal gaz ya da fuel-oil ile çalışan fırınlarda kullanılır. Sistem eğer düşük sıcaklıklarda yanmayı başlatırsa ve dolayısı ile alev sıcaklığı düşük olursa üretilen NO_x miktarı da az olur. Bunun yanında yakma havasının oksijen konsantrasyonu da NO_x üretimi için diğer bir belirleyici etmendir.

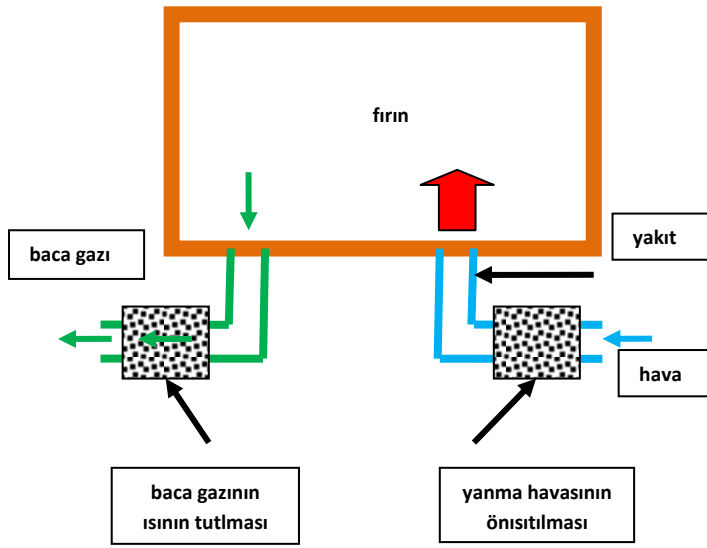
Rejeneratörler 1150°C'ye kadar, yanma gazlarının ısını tutarabilirler.



Şekil 6: Rejeneratif yakıcılar ilk çevrim

İlk çevrimde, yakıcının bir tanesi normal konumda çalışır iken, diğer yakıcı yanma gazlarını toplayarak, bunların taşıdığı ısıyı rejeneratörde depolanmasını sağlar. İkinci çevrimde ise bu ısı, yanma havasının ısıtılması için kullanılır ve bu kez diğer yakıcı yanma gazlarını toplayarak ısını depolar. Sonuç olarak iki yakıcı nöbetleşe olarak yanma ve ısı toplama konumlarında çalışırlar. Her bir çevrim yakıcı teknolojisine bağlı olarak 40 ile 80 saniye arasında sürer.

Rejeneratif yakıcılar,ergitme sürecinde oluşan kirli gaz salınımını doğrudan azaltmazlar, ancak yanma performansını iyileştirerek, dolaylı olarak azaltırlar.



Şekil 7: Regeneratif yakıcılar ikinci çevrim

Doğal gaz ile çalışan ve regeneratif yakıclı sistemlerde, basınç ve yakıt akış kontrolü ile, enerji verimi % 55-60'lara kadar çıkartılabilir. Bu rakam geleneksel fırınların enerji veriminin 2-3 katına karşı gelir.

2.6. Yanma Havası Olarak Oksijence Zenginleştirilmiş Hava ya da Oksijen Kullanımı

Endüstriyel yanma sistemlerinin verimliliğinin artırılması için iki yöntem uygulanabilir:

1. Yakma havasının ısıtılması,
2. Yakma havası yerine kısmen ya da tamamen oksijen kullanımı.

Yakma havası olarak oksijen kullanımının en önemli sonucu, baca gazı ve ısı kayıplarının azalarak, fırının ısı veriminin yükselmesidir.

Yanma, yakıt ile oksidan arasında ısı oluşturan bir kimyasal reaksiyondur. Oksidan olarak genellikle hava kullanılır (havanın % 21'i oksijendir). Yanma havası içindeki oksijen konsantrasyonu %21'i geçtiği zaman "oksijence zenginleştirilmiş hava" tanımı kullanılır.

İkinci önemli sonuç ise, fırın atmosferinde yüksek radyasyon yeteneğine sahip, yanma ürünleri olan CO₂ ve H₂O konsantrasyonlarının artmasıdır.

Üçüncü önemli sonuç ise, alev sıcaklığının artması ve dolayısıyla ısı iletiminin iyileşmesidir.

Yanma havası olarak oksijen kullanıldığında daha uniform ısıtma ve ergitme ve buna bağı olarak ergiyik üzerinde daha az lokal aşırı ısınma riski ve dolayısıyla curuf oluşumu riski görülür.

Yanma havası içinde oksijen konsantrasyonun artması, yanma ürünü gazlarda azotlu bileşiklerin azalması ve aynı zamanda azotlu bileşiklerle kaçan ısının azalması, yani sistemin ısı veriminin artması anlamına gelir.

Yanma havası olarak hava kullanılan yakıcılar için aşağıda sıralanmış avantaj ve dezavantajlardan sözedilebilir .

Avantajlar:

- Düşük alev sıcaklığı,
- Düşük maliyet (hava bedava iken, oksijen ilave maliyet getirir),
- İyi konvektif ısı iletimi,
- Reaksiyonların daha yavaş ve dolayısıyla kontrollü gelişmesi,

Dezavantajlar:

- Yüksek gaz hacmi,
- Yüksek enerji ihtiyacı,
- Düşük ısı verim,
- Ses kirliliği,
- Partikül ve toz salınımları.

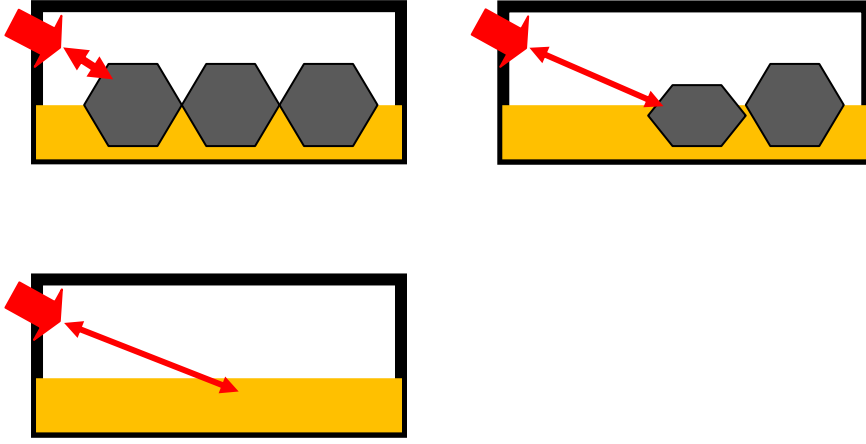
Yakıcı havası olarak oksijen kullanımının bir diğer avantajı da, hava kullanılan sistemlere göre daha az NO_x salınımdır. Oksijenin neden olduğu yüksek alev sıcaklığından dolayı, eğer fırına dışarıdan kaçak hava girişi var ise, bir miktar NO_x oluşumu kaçınılmazdır. Ancak bu yakma havası olarak hava kullanılan sistemlere göre çok daha az miktarda olacaktır.

Endüstriyel deneyimler yakma havası olarak % 100 O₂ ya da % 50'ye kadar O₂ ile zenginleştirilmiş hava kullanıldığında, baca gazında O₂ konsantrasyonunun % 3 civarında olduğunu ve NO_xsalınımının 100 ppm'den daha düşük olduğunu göstermiştir.

Özellikle hurda ergiten Reverber fırınlarda, temel nokta yakıcının kontrol edilebilirliği ve esnek çalışmasıdır. Çünkü ergime sırasında yakıcı ile katı şarj arasındaki uzaklık artarken, ergime süresinin uzamaması için, yakıcı gücünün değişmemesi gerekir. Aynı zamanda fırının uzak köşelerindeki ergimiş metalin sıcaklığının korunması gerekir.

2.7. Metal Sirkülasyon Pompaları

Enerji verimliliği açısından bakıldığında, sirkülasyon pompalarının en önemli işlevi, radyasyon ile ısı iletim oranlarını arttırmaları ve daha derin ergiyik banyosuna olanak tanımlarıdır.



Şekil 8: Ergime sürecinde katı şarj ile yakıcı etki alanının değişimi:

Metal sirkülasyonunun olmadığı, sakin banyoya sahip fırınlarda ergimiş metal banyosunun yüzeyi ile tabanı arasında sıcaklık farkı vardır. Yanma gazları ve alev temasına açık banyo yüzeyi daha sıcak iken, taban daha soğuktur. Fırın tabanına göre yaklaşık olarak her santimetre için 1°C soğuma sözkonusudur.



Şekil 9: Üssten beslemeli fırında mekanik sirkülasyon pompası uygulaması (Metaullics)

Karıştırma hareketi sayesinde banyo yüzey sıcaklığı düşerken, toplamda sıcaklık dağılımı homojen olur ve aynı zamanda alaşım elementlerinin ergimiş alüminyum içinde dağılımı kolaylaşır. Aynı zamanda banyo yüzey sıcaklığının düşmesi ile ısı iletimi artar, baca gazı sıcaklığı düşer ve yakıt verimliliği artar. Bu iyileşmeler ilave olarak curuf oluşumunun azalmasına ve refrakter aşınmalarının engellenmesine de katkı yapar.

Metal sirkülasyon sistemleri ile ergitme hızı % 20 artarken, curuf oluşumu % 40-50 oranında düşer.

2.8. Refrakter Kalitesi ve Uygulaması

Fırınlr için hem refrakter seçimi, uygulanması hem de refrakter bakımı fırın tasarımını hem kısa refrakter değişim süresi ve dolayısı ile fırının duruş zamanının kısa olması ve aynı zamanda 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.

Reverber tipli alüminyum fırınlarında refrakter ömrü, refrakter değişim süresi, fırının metal tutma kapasitesi ve üretilen metal kalitesi refrakter seçimi ile doğrudan ilgilidir.

Reverber tipli fırınlarda kesintili çalışma, her bir devreye alma sürecinde öncelikle refrakter yüzeylerin ısıtılması ihtiyacı nedeni ile tavsiye edilmez.

Kapı tasarımı ve kapı izolasyonu da enerji verimliliği açısından önemlidir. Etkin iç basınç kontrolü ile fırın içine kaçak havanın girmesi engellenir.

Bunlara ek olarak Reverber tipli alüminyum fırınlarında diğer önemli bir nokta da, korozyon sonucu refrakter malzemelerin refrakterlik özelliklerini kaybetmesi ve böylece fırında ısı yalıtımının düşmesi ve sonuç olarak enerji veriminin azalmasıdır. Bu süreç aynı zamanda, refrakter ömrünün kısalmasına ve onarım ya da değiştirme nedeni ile duruşlara ve üretim kayıplarına yol açar

Reverber fırınlarda enerji verimliliği analizi yapılırken dikkate alınan başlıca parametreler :

- alev sıcaklığı,
- baca gazı sıcaklığı ve
- duvar ve tavan kayıplarıdır.

Örneğin yanma havası olarak havanın kullanıldığı ve alüminyum külçe ergitilen bir Reverber fırınında yanma sonucu oluşan 100 birimlik enerjinin sadece 10 birimi ergitme işlemine harcanırken, yaklaşık 53 birimi baca gazları ile ve 37 birimi ise duvar ve kapı kayıpları nedeni ile, yararlanılmaksızın dışarı atılır.

Saate 10 ton ergiten bir Reverber fırında yapılan analizlerin sonucu aşağıdadır : teorik olarak ergitme işlemi için kg başına 250 kcal enerji gerekir. Ancak duvar ve tavan kayıplarının 0 olması teknik olarak olanaksızdır ve bu kayıplar lb başına 0 ile 125 kcal arasında değişir. Doğal gaz ile çalışılan ve hava ile yakılan bir yakıcı sisteminin ürettiği adyabatik alev sıcaklığı yaklaşık 1980 °C 'dir. Alev sıcaklığını yükseltmek yani fırının toplam enerji verimini arttırmak için rejeneratif ve reküperatif yanma sistemleri ve yakıcı olarak oksijen kullanımı gibi teknolojik gelişimler yaşanmıştır.

Baca gazı sıcaklığı 760 ile 1100°C arasında değişir. Baca gazı sıcaklığının artması ergitme için daha fazla ısı enerjisi gereksinimine ve dolayısı ile fırının enerji veriminin düşmesine neden olur. Baca gazı sıcaklığı 760°C olduğunda ergitme için gerekli olan ısı enerjisi 390 kcal/kg ve fırının enerji verimi %61 iken, baca gazı sıcaklığı 1100°C'ye çıktığında ise ergitme için gerekli olan ısı enerjisi 1140 kcal/kg ve fırının enerji verimi % 22'ye düşecektir.

Tablo 5 : Alüminyum endüstrisinde kullanılan fırınlar için ısı verimlilik:

| Fırın | Isıl enerji (kcal/kg) |
|---|-----------------------|
| Standart Reverber (zayıftan iyi operasyon pratiğine) | 1250-650 |
| Modern Reverber fırınlar | 650-600 |
| Fırın imalatçıların iddia ettiği düşük sınır değerler | 600-500 |
| Yeni teknolojik fırınlar | 500-250 |

Amerikan OAK Ridge National Laboratory gözetiminde yapılma bir dizi ölçümün sonuçları aşağıda tablolanmıştır. Gözlemler soğuk hava yakıcılı ve 10 ton/saat ergitme yeteneğine sahip, klasik bir Reverber tipili fırında yapılan 8 adet ölçümün sonuçlarına dayanır.

Tablo 6 : OAK Laboratuvarı ölçüm sonuçları

| Ölçüm no | Alev sıcaklığı (°C) | Baca gazı sıcaklığı (°C) | Tava ve duvar refrakter kayıpları (kcal/h) |
|----------|---------------------|--------------------------|--|
| 1 | 1980 | 870 | 1 260 000 |
| 2 | 2100 | 870 | 1 260 000 |
| 3 | 1980 | 870 | 1 890 000 |
| 4 | 2100 | 870 | 1 890 000 |
| 5 | 1980 | 980 | 1 260 000 |
| 6 | 2100 | 980 | 1 260 000 |
| 7 | 2100 | 870 | 1 890 000 |
| 8 | 2100 | 980 | 1 890 000 |

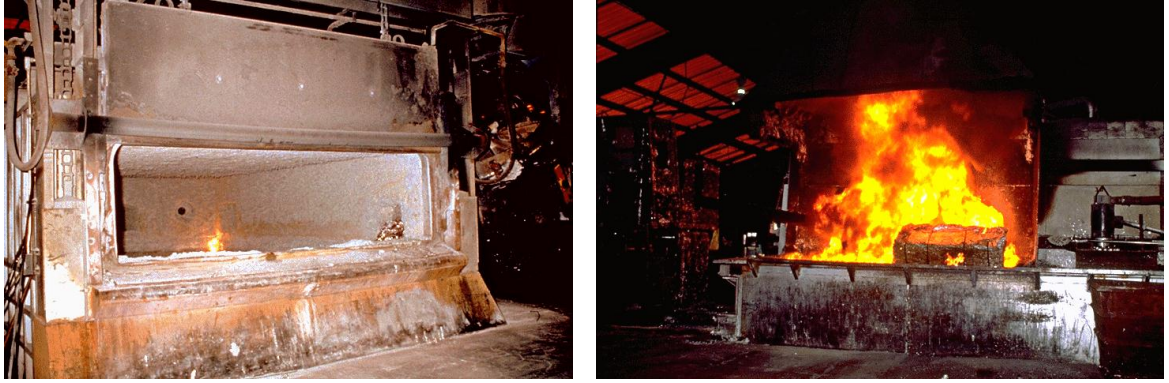
Tablo 7 : Alüminyum Reverber fırınlarında uygun refrakter seçimi ile ulaşılabilecek tasarruf değerleri

| Değişiklikler | Tasarruf miktarı Kcal/saat | Tasarruf miktarı Kcal/kg Al |
|---|----------------------------|-----------------------------|
| Alev sıcaklığının 90°C artışı | 356 000 | 35,4 |
| Baca gazı sıcaklığının 90°C düşüşü | 878 000 | 88 |
| Tavan ve duvar refrakter kayıplarının 1 890 000 kcal/saaten 1 260 000 kcal/saate düşüşü | 1 170 000 | 117 |

Enerji verimliliğindeki artış, refrakter performansı ve ömründeki artışın yanında, aşağıda sıralanmış iyileşmelere yol açar:

- Adiyabatik alev sıcaklığındaki artış (yakma havası olarak oksijen kullanımı ile) yakıt tüketiminde azalma ve enerji veriminde artış,
- Baca gazı sıcaklığındaki azalma, daha fazla ısınn ergitme için kullanılması yani enerji tasarrufu,
- Fırın duvar ve tavanından kaybolan ısınn azalması da benzer şekilde yararlı ısınn artışı ve dolayısıyla enerji verimliliği anlamına gelir.

Alüminyum Reverber fırınlarında refrakter tuğlalar yerini monolitik refrakterlere bırakmıştır. Yeni uygulama ise daha uzun ömürlü hazır blok döküm refrakterlerdir.



Şekil 10 : Fırın çalışma koşulları

Alüminyum tutma ve ergitme fırınlarında, optimum refrakter seçimi için fırının:

- Yakıcı tipi,
- Şarj malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri,
- Fırının çalışma koşulları çok iyi bilinmelidir.

2.9. İşletme koşulları

Ergiyik yüzeyinin temizliği

Isı transferinin artırılmasının en kolay yolu transfer yüzeyinin temizliğidir. Ergitme fırınlarında ergiyik yüzeyini sağlayan curuf tabakasının temizlenmesi ısı transferini artırır. Bununla birlikte indirekt ısıtmalı fırınlarda örneğin radyan tüplerin ya da elektriksel eleman yüzeylerinin temiz tutulması da benzer olumlu etkiyi yapar.

Fırın yükleme ve işletme pratiği (şarj ve curuf alma mekanizasyonu, radyasyon kayıplarının önlenmesi)

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.

Şarj sırası ve miktarı ve yakıcı kontrolü enerji tasarrufu için önemlidir. Fırın işletmeciliği otomatik kontrol sistemleri ile desteklenirse, yani hava/yakıt oranı dinamik olarak kontrol edilebilirse, yakıcı optimum koşullarda çalışabilir ve fırın üretkenliği artarken, enerji tüketimi düşer.

Şarjın ön-ısıtılması da hem işletme güvenliği hem de enerji tüketimi açısından önemlidir.

Parti ergitmelerde şarj sayısı ile şarj miktarı arasında, şarj ve ergitme tipine bağlı olarak optimum ilişki kurulmalıdır. Şarj arabaları ile hem şarj süresi kısaltılabilir, hem de güvenli şarj yapılabilir.

Benzer şekilde curuf alma işlemi de mekanize edilerek, fırın işletmeciliğinde ölü zamanlar minimize edilebilir. Aynı zamanda forklift ile yapılan curuf alma işlemlerinde sık rastlanan refrakter hasarlarının da önüne geçilmiş olur.

Şarjın ve curuf alma işlemlerinin mekanize edilmesi ile, toplam ergitme süresi kısılır ve böylece birim zamandaki ergitme oranı artar. Bu aynı zamanda daha az yakıt tüketimi ve daha az curuf oluşumu anlamına gelir. Aynı zamanda fırın bakım ve onarım masrafları da düşer.

Duvar kayıpları, özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan fırınlarda, ısıнын 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 olarak 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.

Yetersiz izolasyon, ve fırın kapısının fazla açılıp kapanması, radyasyon kayıplarının iki temel nedenidir. Bu kayıplar 3 faktöre bağlıdır:

1. Fırın iç sıcak yüzeyleri açık ve oda sıcaklığındaki havaya açık kalır,
2. Açıklıklardan radyasyon mekanizması ile ısı dışarı iletilir. Bu faktör hem kapı açılıp kapanmasına hem de refrakter uygulamasına nedeniyle fırın duvarlarına bağlıdır.
3. Radyasyon ile ısı kaçışına izin veren fırın kapısının açık kalma zamanı da diğer faktördür.

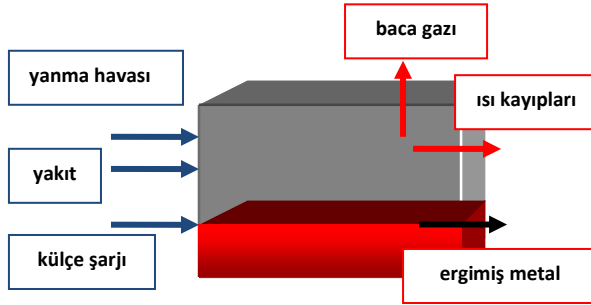


Şekil 11: Şarj arabası ve mekanize curuf çekme (Tomorrow-Technology)

2.10. Proses kontrol sistemleri

Fırın içinde metal ve tavan sıcaklıklar ile fırın iç basıncının kontrolü, verimli bir ergitme işlemi için çok önemlidir. Böylece yanma parametreleri kontrol altına alınarak, enerji kaybı önlenir. Buna ek olarak belirli periyotlarda yapılacak olan baca gazı ölçümleri (baca gazındaki CO_2 ve O_2 ve baca gazı sıcaklığı) yanma tepkimelerinin kalitesi hakkında bilgi verecektir.

2.11. Enerji Dengesi



Şekil 12: Külçe ergiten geleneksel Reverber fırında enerji dengesi

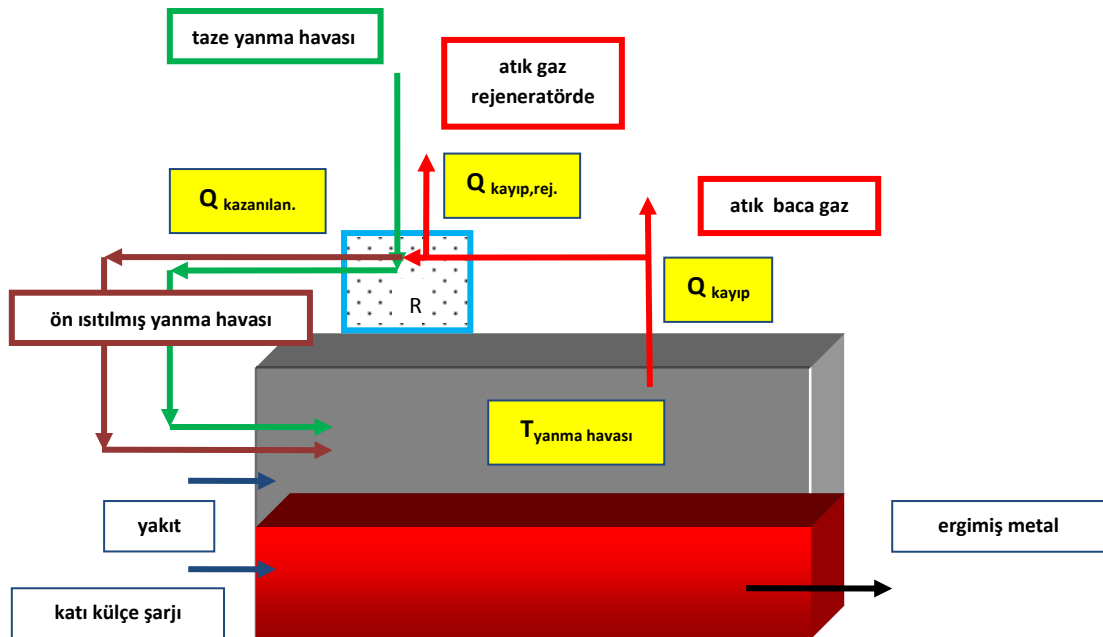
$$E_{giren} = E_{çıkan}$$

$$E_{giren} = E_{yakıcı} + E_{katı \text{ şarj}} + E_{yanma \text{ havası}}$$

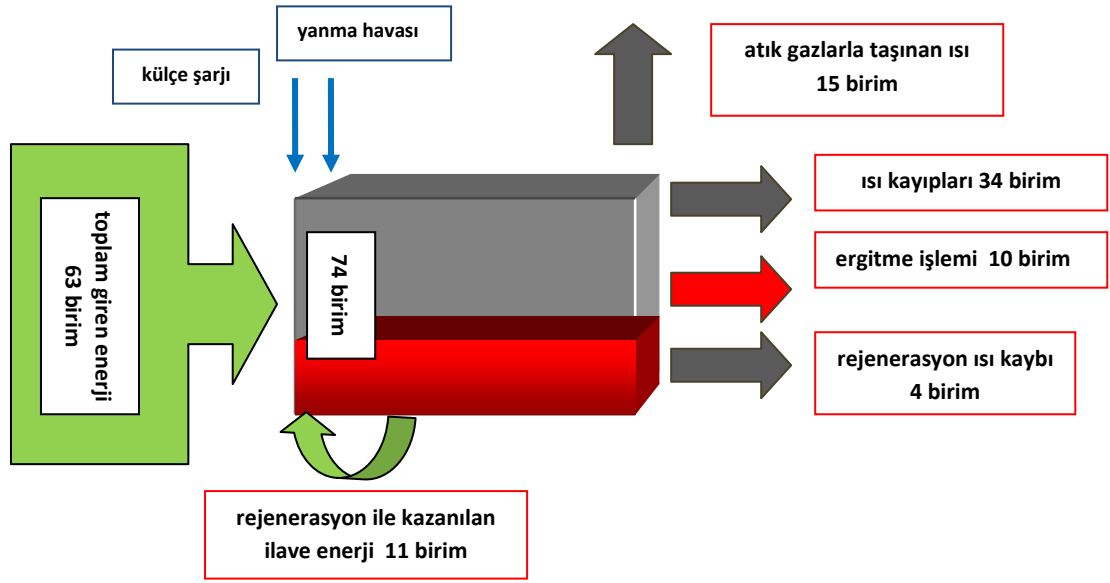
$$E_{çıkan} = E_{ergimiş \text{ metal}} + E_{atık \text{ gaz}} + Q_{kayıp} + Q_{kayıp, rej} = (E_{katı \text{ şarj}} + \Delta E_{ergimiş \text{ metal}}) + E_{atık \text{ gaz}} + Q_{kayıp} + Q_{kayıp, rej}$$

Geleneksel Reverber fırında; $E_{yanma \text{ havası}} = 0$, $E_{katı \text{ şarj}} = 0$, $Q_{kayıp, rej} = 0$

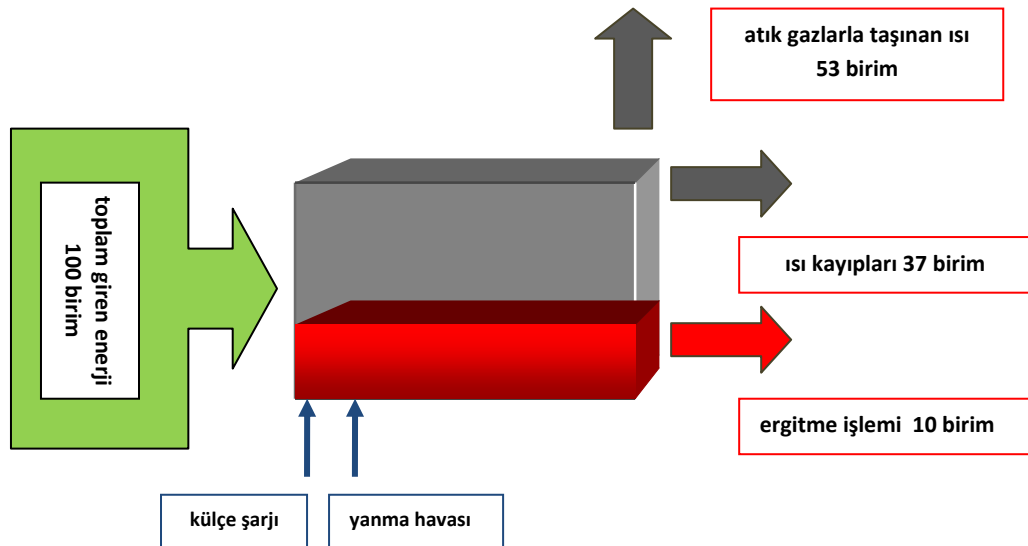
Şekil 10.25: Külçe ergiten, rejeneratif yakıclı Reverber fırında enerji dengesi



Şekil 22: Külçe eriten rejeneratif yakıclı Reverber fırında enerji akışı



Baca gazları ile taşınan ısı yalnızca, yanma havasının ısıtılmasında kullanılmaz. Rejeneratif yakıcılarla çalıştırılan bir Reverber fırınında dahi yaklaşık % 15’lik bir ısı kaybı sözkonusudur. Bu ısı ilave çözümlerle değerlendirilebilir. Bu ısı şarjın ön ısıtılmasında ve fırına entegre edilen lak-boya-yağ giderme hatlarında da ana enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Böylece % 5-6 aralığında bir ilave enerji tasarrufu daha sözkonusu olacaktır. Yani atık ısı hem yakma havasının ön-ısıtılmasında hem de şarjın ön-ısıtılmasında birlikte kullanılabilir.



Şekil 13: Geleneksel külçe eriten Reverber fırında enerji akışı

Tablo 8 : 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 |

3. SONUÇ

Tablo 9: 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 ve tavan kayıplarının azaltılması | | ❖ | | | ❖ |
| Kapı açma-kapama ve yükleme kayıplarının azaltılması | | ❖ | | ❖ | ❖ |
| Hava-yakıt oranının iyileştirilmesi | ❖ | ❖ | | ❖ | ❖ |
| Dışarıdan hava sızmasının önlenmesi | ❖ | ❖ | ❖ | ❖ | ❖ |
| Uygun refrakter seçimi ve uygulaması | ❖ | ❖ | ❖ | ❖ | ❖ |
| İlave ekipman ve sistemler ile; | | | | | |
| Atık gaz gerikazanımı ile: | | | | | |
| Yanma havasının ısıtılması | ❖ | ❖ | | | ❖ |
| Şarjın ön-ısıtması | | ❖ | ❖ | ❖ | ❖ |
| Oksijen ile zenginleştirilmiş hava kullanımı | ❖ | ❖ | | ❖ | ❖ |
| Proses kontrolün otomasyonu | ❖ | ❖ | ❖ | | ❖ |

| | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|
| Sirkülasyon pompaları kullanımı | ❖ | | ❖ | ❖ | ❖ |
| Fırın yükleme ve curuf almanın mekanize edilmesi | ❖ | ❖ | | ❖ | ❖ |

Kaynakça

1. Scott Kennedy, *Aluminium Melting and Metal Quality Processing Technology For Continuous High Quality Castings*, INDUCTOTHERM, American Foundry Society, 2001
2. Christoph Schmidz, *Handbook of Aluminium Recycling / Fundamentals, Mechanical Preparation, Metallurgical Processing, Plant Design*, Vulkan – Verlag, 2006
3. Mark E. Schlesinger, *Aluminium Recycling*, University of Missouri, CRC Press, 2007
4. Cynthia K. Belt, Brian M. Golchart, Paul E. King, Roy D. Peterson, Joseph L. Tassandori, *Energy Savings Technology to Aluminium Melting*, Light Metals 2006
5. Fuat Yavuz Bor, *Ekstraktif Metalurji Prensipleri*, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, Yayın No:1, 1985
6. Dietrich G. Altenpohl, *Aluminium Technology, Applications and Environment / A Profile of a Modern Metal*, 6th Edition, TMS 1999
7. P.E. King, J.J. Hatem, B.M. Golchert, *Energy Efficient Operation of Secondary Aluminum Melting Furnaces*, Furnace Systems Technology Workshop: Emerging Technologies and Energy Efficiency, TMS 2006
8. Cynthia K. Belt, Brian M. Golchert, Paul E. King, Roy D. Peterson, Joseph L. Tassandori, *Industrial Application of DOE Energy Savings Technologies to Aluminum Melting*, LM 2006
9. Pierre Boullargeon, Dominique Lecterc, Hakim Zahar, *Guide to Energy Efficiency in Aluminum Smelters*, Aluminum Association of Canada, 1998
10. L. Lazic, A. Varga, J. Kizek, *Analysis of Combustion Characteristics in a Aluminium Melting Furnace*, Metalurgiya, Issue:44, 2005
11. Stewart Jepson, Peter Van Kampen, *Oxygen Enhanced Combustion Provides Advantages in Aluminum Melting Furnaces*, Industrial Heating, June 2005
12. *Advanced Scalable Clean Aluminum Melting Systems*, U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy, November 2004, www.eere.energy.gov/industrial.html
13. *Production*, www.ramsell-naber.co.uk
14. Brian Golchert, Hossam Metwally, Paul King, Chris Vild, *Improving Aluminium Melting Using Pumping*, Furnace Systems Technology Workshop : Emerging Technologies and Energy Efficiency, TMS 2006
15. Mark A. Bright, Richard C. Chandler, Richard S. Henderson, *Advances in Molten Metal Pump Technology Expand the Capability of Aluminum Reverberatory Furnace Production Rates*, Light Metals 2007
16. *Efficient Process Heating in the Aluminum Industry*, U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy, www.oit.doe.gov
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. Don Whipple, *A Control Strategy for high Production Aluminum Furnaces*, BLOOM ENGINEERING, 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. *Recycling Furnace Optimisation*, Light Metals 2004
22. Prof. M.Ali Topbaş, *Endüstri Fırınları Cilt:1*, 1991
23. R. Henderson, D. Neff, C. Vild, *Recent Advancements in Gas Injection Technology Using Molten Metal Pumps*, METAULLICS
24. William T. Choate, John A.S. Green, *U.S. Energy Requirements for Aluminium: Historical Perspective, Theoretical Limits and New Opportunities*, Prepared for: U.S. Department of

- Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy Industrial Program, Prepared by : BCS Incorporated, February 2003
25. C.Vild, A. Peel, *Large Capacity Melting System*, Light Metal 2003
 26. M. Bright, R. Chandler, R. Henderson, *Advances in Molten Metal Pump Technology Expand the Capability of Aluminium Reverberatory Furnace Production*, Light Metal 2007
 27. H.Walter Grab, Jan M. Migchielsen, *New Developments in the Design of Twin Chamber Aluminium Melting Furnaces*, Erzmetall 61, 2008
 28. P. Biedenkopf, V. Hackh, A. Kulkics, *Metaullics / Advanced Gas Technologies for Recycling and Remelting of Aluminium*, Linde A.G., Metal Bulletin International Secondary Aluminium Conference, Milan-Italy, 2004
 29. *Combustion Handbook*, North American, Volume 1
 30. W.J. Morner, J.W. Suiter, *A Survey of Gas Side Fouling Heat Transfer Equipment*, Prepared by: Jet Propulsion Laboratory, Prepare for: U.S. Department of Energy
 31. Dennis Lee, *Exercy Analysis and Efficiency Evaluation for an Alumininum Melting Furnace in Die Casting Plant*, Ryerson University, Canada, 2003
 32. R.F. Jenkins, *Aluminum Sidewell Melting furnace Heat Transfer Analysis*, Fourth International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials, TMS, 2000
 33. Paul E. King, Brian M. Golchert, Tianxiang Li, Mohammed Hassan, Qingyou Han, *Energy Efficient Operation of Aluminium Furnaces*, Ninth Australasian Conference and Exhibition Aluminium Cast House Technology 2005,
 34. Bengt Rydholm, Olof Sjöden, *Optimized Furnace Design with Electromagnetic Stirring*, Fourth International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials, TMS, 2000