

# ALÜMİNYUM REVERBER FIRINLARI İÇİN REFRAKTER SEÇİMİ

**Selim Argun- Erman Car**

METKİM& NRL Sirma Refractories

[selim@metkim.com](mailto:selim@metkim.com), [erman@metkim.com](mailto:erman@metkim.com)

## ÖZET

Refrakter malzeme seçimi ve örüm kalitesi gerek fırın kullanım ömrü, gerek enerji verimliliği gerekse de metal verimi açısından oldukça önemli parametrelerdir. Bu çalışma da fırın ve yardımcı ekipmanların farklı bölgelerinde farklı ve optimum gereksinimlere cevap verebilecek refrakter malzeme seçimi konusunda genel bir bilgi verilmeye çalışılmıştır.

*Anahtar kelimeler : Reverber fırın, refrakter.*

## REFRACTORY SELECTION for ALUMINIUM REVERBERATORY FURNACES

## ABSTRACT

Refractory materials selection and lining is very important parameter for furnace life time, energy efficiency and metal yield. We try to explain some critical issues for refractory selection depending on application area in aluminium reverb furnace.

*Key words : Reverberatory furnace, refractory.*

## 1. GİRİŞ

Refrakter Malzemeler, genel olarak 600°C'den yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan, içinde bir miktar metalik malzeme içerse de genel olarak metal-dışı, seramik esaslı malzemelerdir. DIN 51060 / ISO/R 836 standartlarına göre 3 sınıfa ayrılırlar:

1. Ateşe dayanıklı malzemeler (Fire-proof) < 1 500 °C
2. Refrakter malzemeler > 1 500 °C
3. Yüksek refrakterlik özelliğine sahip malzemeler > 1 800 °C

## 2. REFRAKTER MALZEMELER

Refrakter malzemeler, yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel uygulamalarda fırınlar ya da prosesinde yer alan diğer ünitelerin yalnızca ısı etkilere karşı değil, aynı zamanda mekanik ve kimyasal etkilere karşı da korunmasını sağlar. Yani refrakter malzemeleri, yüksek sıcaklık ve ortam korozyonuna dayanıklı malzemeler olarak tanımlamak olanaklıdır. Daha detaylı bir tanımlama gerektiğinde ise, yüksek sıcaklık dayanımına ek olarak, işlem sıcaklıklarda mekanik yük ve ısı iletiminin neden olduğu aşınmalara da dayanımı gerekmektedir.

Refrakter malzemeleri iki grupta incelemek olanaklıdır :

1. Şekillendirilmiş refrakterler, yani tuğla ve dökülmüş parçalar,
2. Şekillendirilmemiş refrakterler yani Monolitik refrakterler, plastik malzemeler, dövme ve püskürtme harçları, mortarlar ve döküm ya da pompalama ile uygulanan malzemeler bu gruba girer.

Refrakter malzemeler 6 temel oksit ve bunların birbiri ile ya da karbon ile kombinasyonları ile üretilir. Bu oksitler:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ve  $\text{ZrO}_2$ 'dir.

**Tablo 1:** Temel refrakter malzemelerin özellikleri

Formül	İsim	Ergime noktası (°C)	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Isıl genleşme (1000°C'ye kadar %)	Isıl iletkenlik (20°C'de) (W/mK)	Isıl iletkenlik (1000°C'de) (W/mK)	Özgül ısı (kJ/kgK)
$\text{SiO}_2$	B-quartz Cristoballite Fused silica	1725	2.65 2.29-2.32 2.20	1.00-1.40 0.06	8.0 1.40	4.50	1.15
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Corundum	2050	3.99	0.80	53.0	9.0	1.10
$\text{MgO}$	Periclase	2840	3.58	1.40	61.0	10.0	1.20
$\text{CaO}$		2580	3.32	1.30	25.0	9.0	0.95
$\text{ZrO}_2$	Baddeleyite	2680	5.56	0.80	19.0	21.0	0.70
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	Eskolaite	2275	5.22	0.75			0.75
					9.0		
$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ( $\text{Al}_6\text{Si}_4\text{O}_{13}$ )	Mullite	1840	3.16	0.45	9.0	5.0	1.10
$2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ )	Forsterite	1890	3.21	1.10	6.0	3.0	1.05
$\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ ( $\text{ZrSiO}_4$ )	Zircon	1775	4.60	0.45	21.0	4.0	0.75
$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ )	Spinel	2135	3.58	0.85		7.0	1.10
$\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ( $\text{MgCr}_2\text{O}_4$ )	Picro-chromite	2350	4.42	0.70			0.90
$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ )		1600	2.98	0.76			1.00

CaO.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (CaAl <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )		1750	2.91	0.62	> 400		1.05
C	Graphite Carbon Black	3600 3600	2.26 1.7-1.8	0.30/0.50 0.40	130		1.50 2.00
SiC		2300	3.21	0.50	35.0	26.0	1.10
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		1900	3.18	0.27	35.0	20.0	0.70
B <sub>4</sub> C		2450	2.51	0.44	50.0	16.0	0.94
BN		3000	2.25	0.37		20.0	0.80

Doğru refrakter seçimi için refrakter malzemelerin kimyasal tepkime davranışlarını bilmek çok önemlidir. Özellikle ergitme ve tutma işlemlerinde metal ve metalin ürettiği cüruf ile uyumlu refrakter seçimi, refrakter ömrünün uzatılmasında önem taşır.

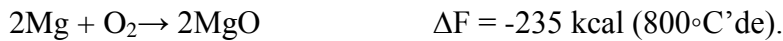
**Tablo 2 : Refrakter malzemelerin kimyasal davranışı**

	Tepkime	Refrakter malzeme
Asidik	oksit + H <sub>2</sub> O → asit	Silika, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> ürünler, zirkon silikat
Bazik	oksit + H <sub>2</sub> O → baz	Magnezyum oksit ve dolomit ile beraber oluşan ürünler
Nötr	Asidik ya da bazik tepkime yok	Lüminai kromit, pikro-kromit, spinel ve forsterit

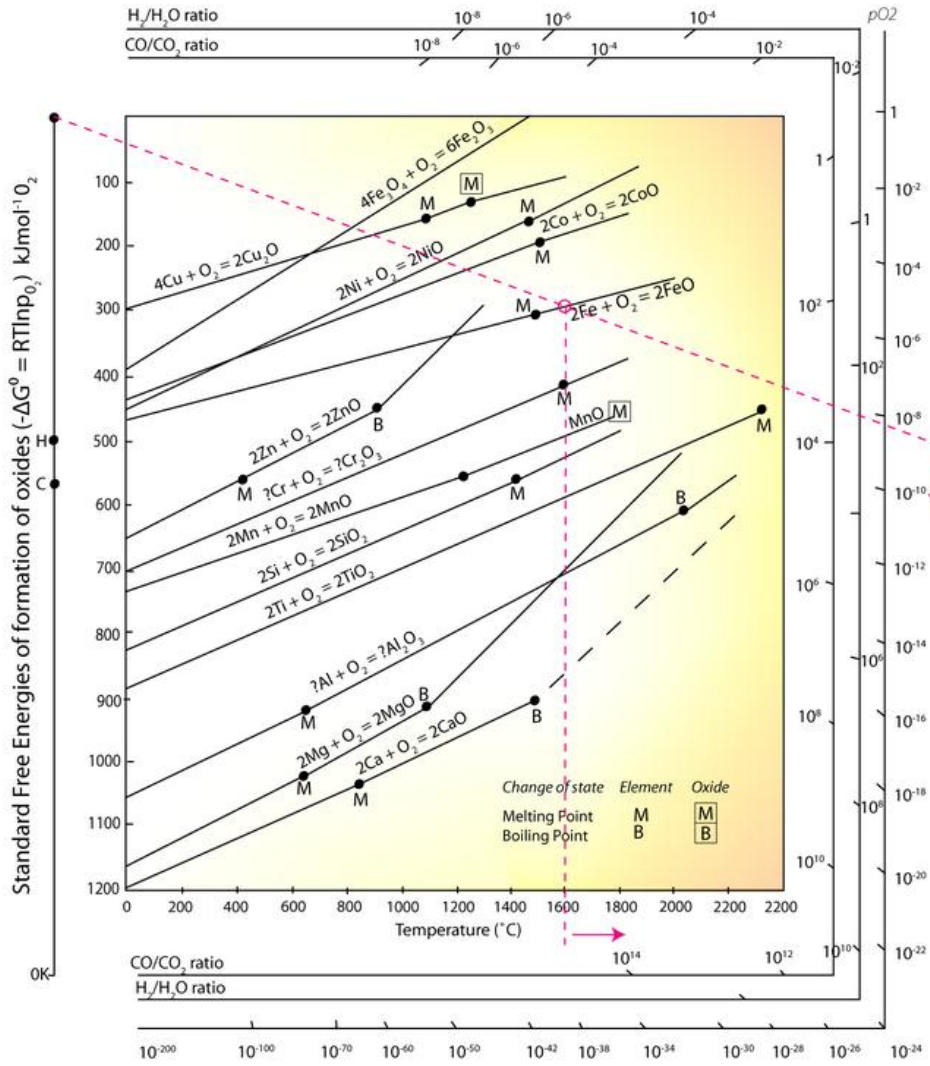
## 1. ALÜMİNYUM ERGİTME VE TUTMA FIRINLARINDA KULLANILAN REFRAKTERLER

Alüminyum ergitme ve tutma fırınlarında yaygın kullanılan refrakter malzemeler silika ve alümina bazlı refrakterlerdir.

Alüminyum, ancak serbest enerjisi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'dan daha az negatif olacak şekilde bir oksitle redüklenebilir. Bu gerekçe, refrakter malzeme üretiminde kullanılacak hammadde çeşitliliğinin sınırlandırılması anlamına gelir. Bu nedenle alüminyum fırınlarında kullanılan refrakter hammaddeleri Kaolinit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O), Kyanit-Silimanit-Andalüsit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>), Müllit (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>), Boksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>) ve Korund (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)'unda içinde yer aldığı alümina-silikat grubu malzemelerle, magnezya-alümina spinel (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) malzemedir. Serbest enerji diyagramımdan da görüldüğü üzere, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e göre daha kararlı bir malzemedir, yani serbest enerjisi daha negatiftir:



Alüminyum ergitme teknolojisindeki metal üretimini ve metal verimini arttırmaya ve enerji tüketimini azaltmaya yönelik tüm iyileşmeler, fırın refrakter malzemelerinin de, bu gelişime koşut olarak sürekli yenilenmesi ve gelişmesi gerekliliğini doğurmuştur.



Şekil 1 : Oksitlerin serbest enerji diyagramı

Ucuz olmasına karşın yüksek ısı ve mekanik direncinden ötürü alüminyum silikat dökülebilir malzemeler, alüminyum fırınlarında yaygın kullanıma sahiptir. Malzemenin içerdiği silika ve alkaliler gibi diğer katışkılar, ergimiş alüminyuma karşı korozyon direncini düşürür.

## 1.1.Refrakter Malzemelerde Aranan Özellikler

### 1.1.1. Sıcaklık Direnci

Refrakter malzemelerin ergime sıcaklığı her zaman, işlem görecekt metalin ergime sıcaklığından daha yüksek olmak zorundadır.

Reverber fırınlarda ergitmenin ilk aşamasında baskın olan konveksiyonla ısı iletimidir. Yanma gazları fırın içinde çok iyi yayılarak, şarj üzerinde maksimum konvektif ısı iletimini sağlamalıdır. Yani geniş yüzey alanına sahip hurda ilk ergitilirken, fırın duvar ve tavanı henüz soğuktur ve yanma gazları ile konvektif ısı iletimi baskındır.

Katı şarj tamamen ergiyerek, sıvı hale dönüştükten sonra, yakıcı otomatik olarak gücünü düşürür ve bu aşamada ısı iletimi zorlaşır. Bunun sonucunda yanma gazlarının

miktarı ve fırın atmosferi içindeki hareketleri de yavaşlar. Tersî durumunda, daha önce de belirtildiği gibi, sıcak yanma gazları ve alev ile ergimiş metalin doğrudan teması metal oksidasyonunu arttıracaktır. Bu aşamadan sonra baskın ısı iletim mekanizması radyasyon olacaktır.

Radyasyon ile ısı iletimi 2 şekilde gerçekleşir: fırın duvarlarından ve tavanından indirekt olarak ve yakıcı alevinden direkt olarak.

Ancak yakıcı alevinin toplam alanı, fırın refrakterinin toplam alanı ile karşılaştırıldığında oldukça küçüktür. Bu nedenle radyasyonun etkin olabilmesi için, fırın refrakterinin iyice ısıtılmış olması gereklidir.

Bütün bu süreçlerde hem ergimiş metal-katı şarj hem de ergimiş metal-fırın atmosferi farklı sıcaklık dalgalanmaları altında kalacaktır. Bu nedenle seçilen refrakter malzemelerin bu dalgalanmaları absorbe edebilecek direnç de olması gereklidir.



**Şekil 2 : Isıl şok ile refrakterde oluşan hasarlar**

### **1.1.2. Kimyasal Etkilere Karşı Direnç**

Ergimiş alüminyum-refrakter arasında iki tip korozyon mekanizması işler:

- Oksi-redüksiyon ve
- Doğrudan oksidasyon.

Oksi-redüksiyon ile, refrakter içindeki, alüminyumdan daha az karalı Si, Fe, Ti ve diğer metallerin oksitleri, alüminyum oksidin oksijeni ile yer değiştirirler. Eğer ergimiş alüminyum içinde %Mg, 0.3'den daha fazla ise Spinel oluşumu gözlenir. Bu süreç, büzülmeye doğru hacimsel değişim ile sonuçlanır. Sonuç olarak, özellikle ısı şoklara karşı mazleme hassaslaşır. hacimsel küçülme ve ısı şok hassasiyeti, malzemenin kırılarak alüminyum banyosuna karışmasına neden olur. Bu durum hem refrakter hasarı hem de alüminyum banyosunun kirlenmesi anlamına gelir.

Doğrudan oksidasyon ile ise, ergimiş alüminyum refrakter yüzeyindeki gözeneklere girer ve ortam havasındaki oksijen ile tepkimeye girerek, oksitlenir. Bu süreç korundum oluşumunu iki kat daha hızlandırır ve duvar refrakterlerini, ısı iletkenliğinin arttırarak, enerji kaybına neden olur.

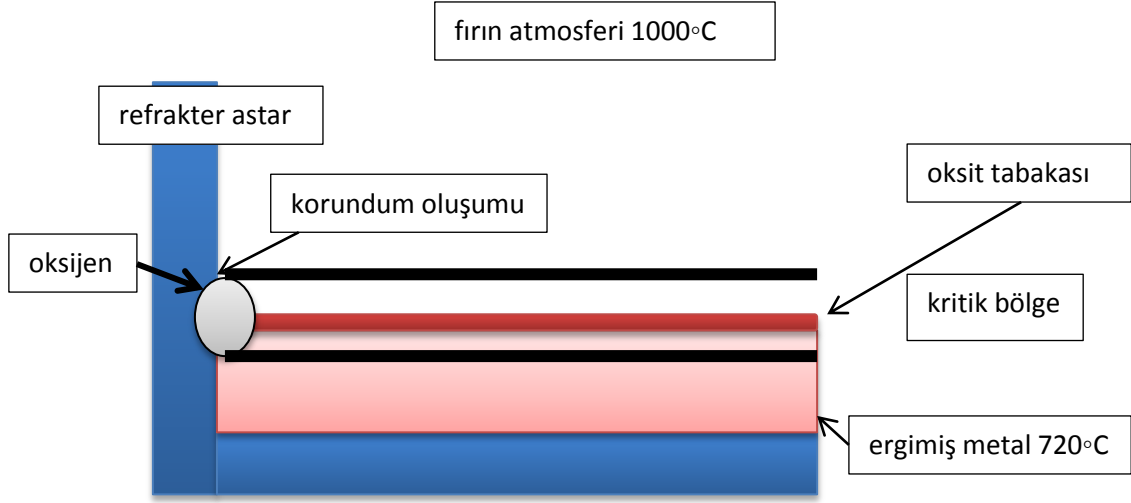
Fırın içinde metalik alüminyum sürekli olarak seramik refrakter mazleme içine nüfuz etme eğilimindedir. Bu eğilimin kaynağı yalnızca metalik alüminyum değil, alaşım elementleri ve flakslardan kaynaklanan metal-tuz bileşenleri ve aynı zamanda alüminyum curufu da olacaktır. Bu etki yalnızca kimyasal değil aynı zamanda fiziksel bir korozyon etkisi yaratır. Ancak gerek ertitme gerekse tutma fırınlarının farklı bölümlerinde, farklı büyüklüklerde korozyon tehlikesi vardır. Bu nedenle genellikle farklı tip refrakter kombinasyonları tercih edilir.



**Şekil 3 :** Kimyasal korozyon sonucu oluşan hasarlar

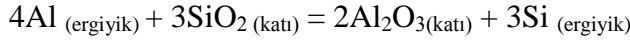
Fırın içindeki en kritik bölge, metal seviyesi ile fırın atmosferi arasındaki tabakadır. Bu tabaka minimum metal seviyesi ile maksimum metal seviyesi arasında kalan bölgedir. Bu bölgede hemen metalin üstünde, fırın atmosferindeki oksijen nedeni ile korundum oluşabilme ihtimali yüksek olan bir bölge yer alır. Korundum bölgesi genişleyerek, metal seviyesi çevresinde çok yüksek sıcaklığa sahip, lokal bölgelerin oluşumuna neden olur. Ergimiş alüminyum ve alaşım elementlerinin refrakter ile kimyasal ilişkisinin minimizasyonu, refrakter bileşimi ile doğrudan ilgilidir.

Sıvı alüminyum içindeki katışkılar ve curuf bileşenleri, sıvı alüminyumdan daha hafif oldukları için, metal yüzeyinde kalırlar. Bu nedenle metal yüzeyi en fazla korozi ortam temasına açık bölgedir. Aynı zamanda bu bölge, şarj ve curuf alma işlemleri nedeni ile mekanik hasar görme riski de taşır.



**Şekil 4 : Korundum oluşum riski**

Alüminyum'un, Silisyum'a göre daha yüksek olan Oksijen ilgisi korundum oluşumunun temel nedenidir. Alüminyum, refrakterin içerdiği oksijenli bir bileşik olan  $\text{SiO}_2$ 'nin oksijeni ile tepkimeye girer. Korundum oluşumu, yüksek sıcaklıklarda, çok sert alüminyum oksit oluşumu ile ilgilidir:



tepkimesi uyarınca gelişir. Başlangıçta mantar şeklinde oluşur ve giderek tüm astara yayılır. Korundum oluşumu ile refrakter astar üzerinde yüksek gerginlikler oluşur ve bu gerginlikler fırın çelik yapısına taşınır. Korundum oluşumunun beş temel nedeni vardır:

- Metal ve fırın sıcaklığı,
- Üretilen alaşımın tipi,
- Fırın atmosferi (oksidan/redüktan),
- Fırın temizliği ve
- Refrakter seçimi.

Bu süre, refrakter tahribatına yol açan bir çok sorunun başlangıç aşaması olarak düşünülebilir.

#### **1.1.1. Mekanik Etkilere Karşı Direnç**

Üretim miktarını arttırmak için, çoğu zaman fırın şarjı ve curuf alma işlemleri hızlı yapılmak istenir. Eğer şarj ve curuf alma mekanize olarak yapılmıyor ise, kapı rampa ve fırın gövdesi mekanik olarak hasara açık konumda kalır.





**Şekil 5 : Korundum oluşumu**

Mekanik hasarlar 3 başlık altında incelenebilir :

- Darbe : Fırına metal aşırjı sırasında oluşan darbeler, özellikle üstten beslemeli Reverber fırınlarda sık yaşanır,



**Şekil 6 : Üstten beslemeli Reverber fırın**

- Aşınma : Özellikle cüruf alma sırasında kapı, kapı eşiği ve rampa mekanik aşınma riskine maruz kalır,
- Erozyon : Metal sirkülasyon sistemleri ile donatılmış fırınlarda, şarj odası ve bağlantı kanalları metal ve flaks sirkülasyonu nedeni ile aşınma sorunu yaşar.

#### **1.1.2. Isı Yalıtımı**

Doğal olarak duvar ve taban ile ısı kayıplarını minimize ederek, fırının toplam enerji verimini artırmak için, refrakter malzeme yüksek yalıtım yeteneğine sahip olmalıdır.

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 kısılmasına ve onarım ya da değiştirme nedeni ile duruşlara ve üretim kayıplarına yol açar



**Şekil 7 : Fırında oluşan mekanik hasarlar**

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 sonuçları 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 kg 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 3:** 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 yapılına 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 4 :** Alev ve baca sıcaklığına bağlı olarak tavan ve duvar ısı kayıpları

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 5:** 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 ısının ergitme için kullanılması yani enerji tasarrufu,

- Fırın duvar ve tavanından kaybolan ısıнын azalması da benzer şekilde yararlı ısıнын 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.

### 1.2. Refrakter Kalitesi ve Uygulaması

Fırınlar 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.

#### 1.2.1. Tuğla Refrakterler



Şekil 8 : Tuğla ile örüm

Çalışma koşullarına, maliyete ve işçiliğe bağlı olarak çok çeşitli tuğla örüm yöntem ve standartları vardır. % 40  $Al_2O_3$ 'den SiC içeren tuğlalara kadar geniş bir kompozisyon çeşitliliğine sahiptir.

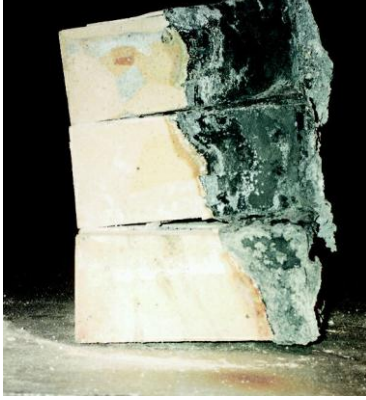
En yaygın tuğla astar malzemeleri:

- Sıvı metal ile temas halinde olan yüzeylerde fosfat bağlı ve yüksek alüminalı tuğlalar,
- Sıvı metal temasının olmadığı, üst duvarlarda %45 alüminalı tuğlalar,
- Tavanda 45-60% alüminalı tavan tuğlaları,

Tuğla kompozisyonundaki alümina içeriğinin artışı ve silisyum oksit içeriğinin düşüşü, refrakter malzemenin metalik sıvı alüminyuma karşı olan direncini artırır.

Tuğla kullanımının avantajları :

- Astarlama için pahalı araç ve ekipmanlara ihtiyaç duyulmaz,
- Çok uzun raf ömrüne sahiptir,
- Geleneksel yöntem olduğu için geniş kullanımı ve kullanım bilgisi mevcuttur.



Dezavantajları ise:

- Soğukta kırılma direnci sadece  $70 \text{ N/mm}^2$ 'ye kadar ulaşabilir,
- Her bir tuğla birleşme yüzeyine sahiptir ve doğal olarak çok fazla birleşme yüzeyi söz konusudur,
- Her bir birleşme yüzeyi metal kaynaklı tahribata açıktır ve tuğla kopma riski yüksektir,
- Örüm süresi daha uzundur,
- Dikkatli örüm işçiliği gerektirir,
- Lokal tamirler oldukça güçtür,
- Teknolojik olarak gelişimi sınırlı bir refrakter malzeme türüdür.



Şekil 9 : Metal seviyesi üstü ve tavanda monolitik kullanımı

### 1.2.2. Monolitik Refrakterler

Performans ve çalışma güvenliği konularında getirdiği yararlar nedeni ile alüminyum ergitme ve tutma fırınlarında geniş kullanıma sahip malzemelerdir. Buna karşın uzun ısıtma/sinterleme süresi en önemli dezavantajıdır. Geleneksel kalsiyum alüminat çimentosu bazlı monolitik refrakterlerde yaşanan teknik sorunlar, düşük, çok-düşük ya da hiç çimento içeren yeni monolitik bileşimlerin üretilmesine neden olmuştur.

Özellikle son yıllarda ve refrakter içine ergimiş alüminyum nüfuzunu engelleyen ıslanmayan (non-wetting) refrakterler geliştirilmiştir. Refrakter astar içine alüminyum nüfuzunun etkileyen faktörler:

- Refrakter malzemenin gözenek yapısı ve dağılımı,
- Kimyasal ve mekanik hasarlara karşı yüksek sıcaklık direnci,
- Kimyasal yapı ve buna ilave edilen

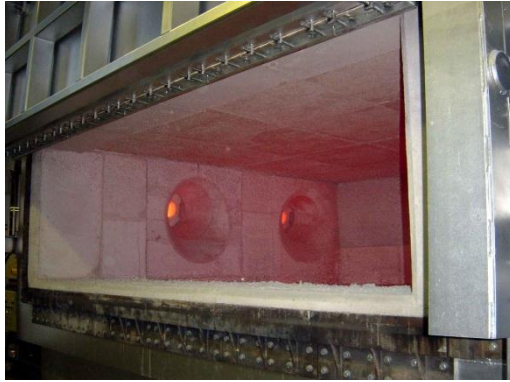
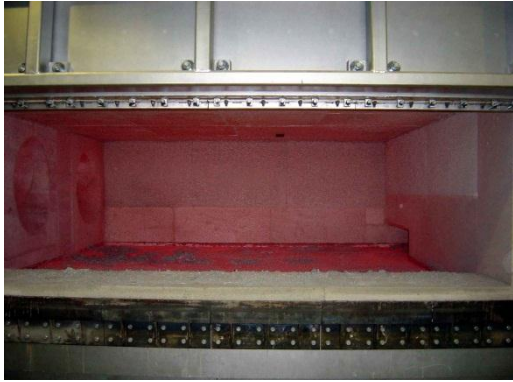
ıslatmayan maddeler ile kimyasal ergimiş metal-refrakter astar arasındaki tepkimelerin minimizasyonudur.

Monolitik refrakterler başlangıçta özellikle tavan ve sıvı metal temasının olmadığı üst duvarlarda tercih edilirken, malzeme bileşiminde yaşanan gelişimler sonucu, metalik ergimiş alüminyuma karşı kimyasal dirençlerinin arttırılması sayesinde artık fırınların tüm alanlarında kullanılabilir ve tuğla kullanımının büyük ölçüde yerini almıştır. Monolitik malzemelerin tuğla kullanımına göre en önemli avantajları :

- Soğukta kırılma dayanımı  $200 \text{ N/mm}^2$ 'ye kadar çıkabilir,
- Minimum birleşme noktası sayesinde sıvı alüminyuma karşı yüksek dayanıma sahiptir ve tuğlalı fırınlarda yaşanan tuğla kopması riski yoktur,
- Ergimiş metalik alüminyuma karşı yüksek direnç,
- Daha kolay uygulama ve örüm,
- Özel şekilli bölgelerin kolaylıkla astarlanması,
- Tuğla kopması ya da kırılması riski yoktur,
- Yüksek sıcaklık ve yüksek kapasiteli fırınlara uygun malzemelerdir.

Monolitik malzemelerin en önemli dezavantajlar ise :

- Malzeme karışımlarının hazırlanması ilave dikkat ve özen gerektirir,
- Karıştırıcı ve vibrasyon ekipmanları ilave yatırım maliyeti gerektirir,
- Sınırlı raf ömrüne sahip malzemelerdir,
- Kullanım öncesi stoklama koşullarına dikkat edilmesi gerekir.



**Şekil 10 : Hazır refrakter blokla ile örüm**

### **1.2.3. Hazır Refrakter Bloklar**

Ergitme ve tutma fırınlarında monolitik malzemelerin kullanımından sonra, yavaş yavaş yaygınlaşan diğer önemli gelişme ise hazır refrakter blokların kullanımınıdır.

- Hazır refrakter bloklar kontrollü koşullarda dökülerek hazırlanırlar,
- $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$  'de ön ısıtma uygulanır,
- Fırın içine montajları çok hızlı yapılabilir, bu süre monolitik montaja göre % 25-40 daha kısadır.
- Bakım amaçlı olarak, özellikle aşınma riski yüksek olan bölgelerde uygun ve hızlı monte edilebilen malzemelerdir.



- Önısıtma nedeni ile, içerdği su uzaklaştırıldığı için devre alma (sinter) süresi çok hızlıdır,
- Önısıtma sonucu oluşan güçlü seramik bağlar nedeni ile montaj ve ısıtma sırasında, genleşme kaynaklı çatlak riski minimumdur,
- Astarlama sürecinde ortam sıcaklığı ve nemden etkilenmez.
- Hemen hemen sınırsız raf ömrüne sahiptir ve bu nedenle depolanma sıkıntıları yaşanmaz,
- Diğer malzemelerle kombine edilerek, birlikte kullanılabilir,

Buna karşın önemli dezavantajları:

- Üretim ve montaj süreci yüksek mühendislik bilgisi ister,
- Dökülebilir malzemelere göre üretim süresi daha uzundur,
- Başlangıç yatırım maliyeti, dökülebilir malzemelere göre daha yüksektir,
- Fırın çelik konstrüksiyonu, blok malzeme montajına uygun şekilde modifiye edilmelidir,
- Monolitik refrakterlere göre daha geniş birleşme noktalarına sahiptir.

Yüksek erozyon ve mekanik aşınma riskinin olduğu bölgelerde, karıştırıcı çevresinde, kapı çevresinde, tabanda, metal giriş ve çıkışlarında ve elektrikli fırınlarda rezistans koruyucusu olarak kullanılabilir.

#### 1.2.4. Çok Bileşenli Refrakter Astarlama



**Şekil 11 : Çok bileşenli astarlama**

Fırın tipi ve kullanım alanına bağlı olarak, aynı fırın içinde hazır blok, monolitik malzeme ve tuğla kombinasyonları kullanılabilir. Özellikle aşınma riskinin fazla olduğu bölgelerde refrakter bloklar kolay tamir nedeni ile tercih edilir.

## 2. REFRAKTER MALİYETİ

Ergitme ve tutma fırınlarının temel bileşenlerinden olan refrakter malzemelerin, ergitme ya da tutma yatırımı ve işletilmesi sürecinde neden olduğu toplam maliyetin bileşenleri:

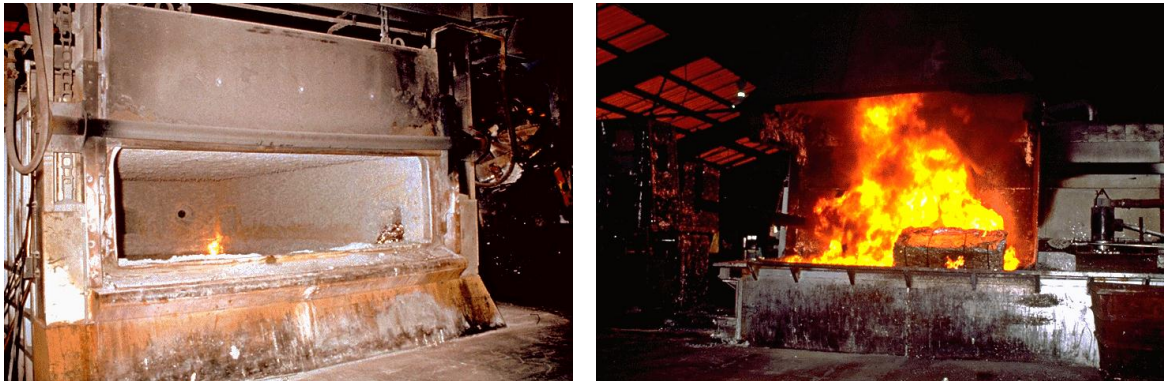
- Malzeme maliyeti, bu kalemin içine izolasyon malzemeleri, refrakter malzeme ve paslanmaz çelik saplamların tümü dahil edilmelidir. Burada uygulama



sırasında büzülme sonucu olan kayıplar, raf ömrü, dökülebilir malzemelerin hazırlanması ve uygulanması sırasında oluşan kayıplar ve püskürtme işlemi sırasında oluşan kayıplar da dikkate alınmalıdır.

- İş ili kayıpları, yeni fırın astarlanması ya da tamir süreçlerinde kullanılan tüm işgücü ve makine/ekipman bu kapsamda değerlendirilmelidir. İşçilik maliyetlerini    bölümde incelemek olanaklıdır:
  -   Eski fırınların refrakter astarının söküm işlemlerinin maliyeti,
  -   Yeni malzemenin astarlanması sırasında oluşan maliyet,
  -    nısıtma/sinterleme maliyeti
- Eski fırınların yeniden astarlanması sürecinde fırın  elik konstrüksiyonunda oluşabilecek onarım ihtiya ının maliyeti,
- Refrakter astarlama ve ön-ısıtma süreçlerinin alacağı zamana bana olarak fırının üretim kaybı,
- Yeni refrakter malzemelerin depolanması ve depolanma koşullarının yaratacağı maliyet,
- Sökülen eski malzemelerin stoklanması ya da depolanması sürecinde oluşan maliyetler,
- İşletmenin kendi bünyesinde oluşan planlama, satınalma ve depolama işlemlerinin getireceği maliyet,
- Enerji maliyeti, malzeme maliyetinden sonra en önemli kalem enerji maliyetidir ve bu da 3 bölümde d ş n lmelidir :
  -   ön-ısıtma sırasında harcanan ve üretim amacı olmayan enerji,
  -   Tamire gidecek fırınların depoladığı enerjinin soğutma sırasında, kullanılmadan boşa harcanmasının maliyeti ve
  -   Ergitme ya da tutma işlemleri sürecinde oluşan kayıp enerji. Bu kayıp enerji gerçekte metal üretim maliyetinin bir bileşenidir. Ancak bu kaybın büyüklüğü refrakter seçimi ve uygulama kalitesi ile doğrudan ilişkilidir.

### 3. SONUÇ



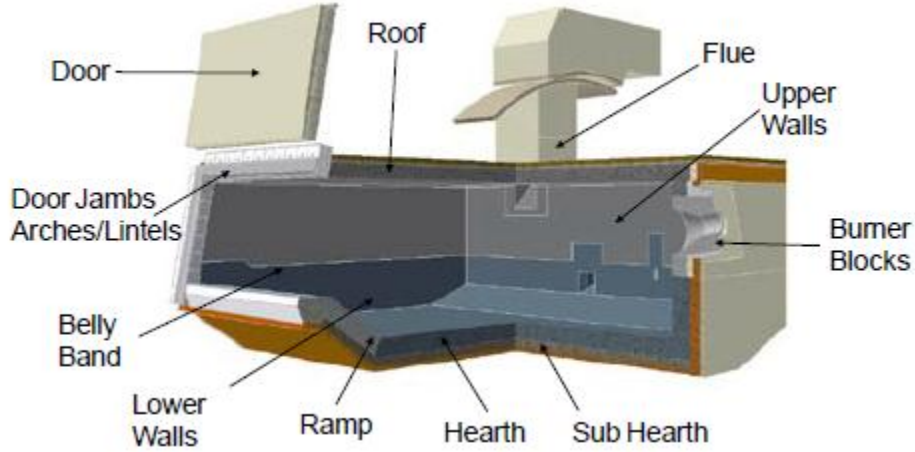
**şekil 12 : Fırın kullanımı ve ergitme sorunları**

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

- Yakıcı tipi,
- şarj malzemesinin fiziksel ve kimyasal  zellikleri,
- Fırının  alışma koşulları çok iyi bilinmelidir.

Refrakter astarda yaşanan temel sorunlar :

- Korundum oluşumu,
- Alüminyum metalinin refrakter astar içine girmesi ve yarattığı tahribat,
- Şarj ve cüruf alma operasyonları sırasında oluşabilecek mekanik hasarlar,
- Erozyon ve aşınma,
- Isıl şoklar ve
- Şarj ve flaks kullanımı kaynaklı kimyasal korozyon sayılabilir.



**Şekil 13 :** Tipik Reverber fırın ve farklı refrakter uygulama bölgeleri

**Tablo 6 :** Tipik refrakter hasar oluşum riskleri

	Mekanik hasarlar	Metal erozyonu	Metal nüfuzu	Aşınma	Isıl şok	Korundum oluşumu	Kimyasal korozyon
Ana gövde	XX	X	X	XX		X	
Metal teması olan alt duvar	X	X	XXX	X		XX	XX
Metal seviyesi ile üst duvar arası (belly band)	X	XXX	XXX	X	X	XXX	XXX
Rampa	XXX		X	XXX	X	X	
Taban	XXX			XX	XX		
Kapı çerçevesi ve lentleri	XX			X	XXX		
Üst duvar	X				X	X	X
Tavan	X				X		
Yakıcı çevresi					XXX		X
Kapı	X				XX		X
Baca					X		X

İster ergitme fırını olsun, ister tutma fırını olsun fırının her bir bölgesi farklı fiziksel ve kimyasal etkilerle karşı karşıya kalmaktadır. bu durum her bir bölgenin farklı özellik ve dirençteki refrakter malzemelerle örülmesi ihtiyacı ile yatırım maliyeti arasındaki ilişkiyi dikkate alarak, optimum malzeme ve örüm yöntemi seçimini zorunlu kılmaktadır.

## Kaynakça

1. Andris Innus, Paul Rivard, *Refractory Requirements for Aluminum Casthouses More Informative Product Datasheets for Material Selections*, LM 2003, TMS
2. Charles A. Schacht, *Refractories Handbook*, CRC Press, 2004
3. Ralph Raju, *Refractory Selection, Use and Performance*, Aluminum Casthouse Technology-Eight Australasian Conference, TMS 2003
4. Selhaddin Şanbaşoğlu, *Ateşe Dayanıklı Malzeme Terimleri Sözlüğü*, KÜMAŞ, 2005
5. Gerald Routschka, Hartmut Wuthnow, *Pocket Manual / Refractory Materials*, Vulkan-Verlag, 2008
6. James g. Henrick, H. Wayne Hayde, Peter Angelini, Robert E. Moore, William L. Headrick, *Refractories for Industrial Processing: Opportunities for Improved Energy Efficiency*, OAK Ridge National Laboratory, Ocak 2005
7. Zena Carden, Andrew Brewster, *Monolithic Refractory Furnace Linings Designed for Rapid Commissioning*, LM 2008, TMS
8. Axel Von Starck, Alfred Mühlbauer, Carl Kramer, *Handbook of Thermoprocessing Technologies*, Vulkan-Verlag 2005
9. Simon Taberham, *Advantages and Saving Utilising Big-block Refractory Linings in Aluminum Smelting Furnace*, 5<sup>th</sup> International Metal Quality Workshop , Dubai, 2012
10. Jingguo Gao, Saied Afshar, Claude Allaire, *Corrosion Kinetics of Refractory by Molten Aluminum*, LM 2004, TMS
11. Saied Afshar, Claude Allaire, *Furnaces: Improving Low Cement Castables by Non-wetting Additives*, JOM, August 2001
12. Vincent Ebacher, Roger Pelletier, Claude Allaire, *Experimental Investigation on Stress-Corrosion of Refractories Exposed to Liquid Aluminum*, LM 2005, TMS
13. Robert M. Cullen, Kenneth A. McGowan, *Energy and Maintenance Cost Savings Review at Several US Aluminum Die Cast Manufacturers Using Unique, Non-Wetting, Micro-porous Refractory Products*, LM 2012, TMS
14. Andy Wynn, John Coppack, Tom Steele, Ken Moody, *Improved Monolithic Materials for Aluminum Holding & Melting Furnaces*, LM 2011, TMS
15. Saied Afshar, Claude Allaire, *He Corrosion of Refractory Aggregates by Molten Aluminum*, JOM, May 2000
16. John M. McCollum, John N. Snyder, *Aluminum Reverberatory Furnace Lining*, US Patent, Patent Number 4,900,249, Date of Patent 13 Şubat 1990