# YÜKSEK SICAKLIK FIRINLARINDA ENERJİ TASARRUFU - I KLASİK YÖNTEMLER

Orhan BÜYÜKALACA*

ÖZET

*Bu makalede toplam enerji tüketiminde önemli bir paya sahip olan yüksek sıcaklık fırınlarında daha verimli çalışmayı sağlayabilecek enerji tasarrufu yöntemleri incelenmiştir. Fırınlarda ısı kayıplarının oluşma şekilleri ve yerleri belirlendikten sonra bu kayıp şekillerine göre fırın ısıl verimini artırmak için alınabilecek önlemler ve kullanılabilecek sistemler tartışılmıştır.*

*In this paper, energy saving methods in high-temperature furnaces with a large share in the total energy consumption have been outlined. After having considered sources of heat losses and their locations, the precautions that can be taken and the systems that can be used are discussed.*

## Giriş

Ülkemizde 1995 yılında tüketilen enerji miktarı yaklaşık 67 milyon ton petrol eşdeğeridir ve bu miktarın yaklaşık %33'ü sanayi sektörü tarafından tüketilmiştir. Kalkınmakta olduğu için enerji gereksinimi sürekli artan ancak enerji kaynakları sınırlı olan ülkemizde "en ucuz enerji tasarruf edilen enerjidir" prensibinden hareketle, enerji tüketiminde büyük bir paya sahip olan sanayi sektöründe ve özellikle de bu sektörde kullanılan fırınlarda alınacak bazı önlem ve yapılacak bazı değişikliklerle büyük miktarlarda enerji tasarrufu sağlanabilir. Bu, enerji için harcanan paranın daha az olması anlamına geldiği gibi atmosfere bırakılan $CO_2$ ve $NO_x$ miktarında da belirli bir azalmayı beraberinde getirecektir.

Günümüzde kullanılan bir çok ürünün elde edilmesinde herhangi bir şekilde ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Bu ısıtma işleminin yapıldığı ortam en genel anlamda fırın olarak adlandırılabilir. Fırın, içerisinde ısı üretimi olan ve bu ısının katı veya akışkan bir kütlenin sıcaklığını artırmak üzere o kütleye doğrudan veya dolaylı olarak aktarıldığı bir ortamdır. Klasik fırınların bir çoğunda ısı fosil kökenli yakıtların (gaz, sıvı veya katı) yakılmasıyla açığa çıkar. Ancak bazı fırınlarda ısıtılacak kütleyi çevreleyen yarı iletkenler veya doğrudan ısıtılacak kütle üzerinden elektrik akımı geçirilerek ısıtma gerçekleştirilir. Son yıllarda yaygın olarak kullanılan bu iki tür kaynağa ilave olarak, güneş enerjisi ve nükleer enerjinin kullanımı da gündeme gelmiştir [1].

Bu makalede, içerisinde herhangi bir yakıtın yakılmasıyla ısı açığa çıkan fırınlar ele alınmıştır. Bu tür fırınlarda yakıtın yakılmasıyla ortaya çıkan ısı enerjisi değişik şekillerde ısıtılacak kütleye aktarılabilir. Bu açıdan fırınları doğrudan ısıtmalı veya dolaylı ısıtmalı olmak üzere iki genel gruba ayırmak mümkündür. Birinci grup fırınlarda yanma sonucu oluşan gazlar doğrudan ısıtılacak kütlenin üzerinde gönderilir. İkinci grup fırınlarda ise ısıtılacak kütle ile yanma sonucu oluşan gazlar birbirlerinden katı bir cidar ile ayrılmışlardır. Böylelikle ısıtılacak kütlenin bulunduğu ortamın atmosferi kontrol altında tutulabilir. Doğrudan ısıtma ısı transferi açısından, dolaylı ısıtma ise ısıtma işlemi açısından daha uygundur [2].

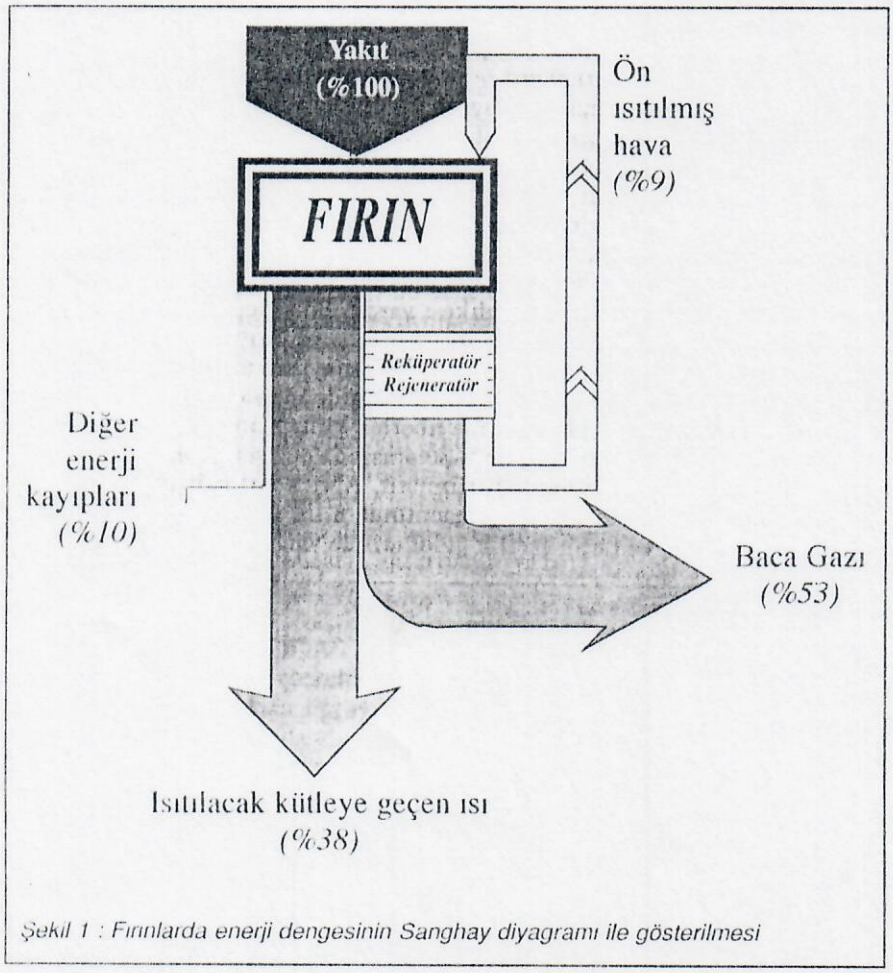
Fırınları işletme şekillerine göre de iki genel grup altında toplamak mümkündür : Periyodik çalışan fırınlar ve sürekli çalışan fırınlar. Birinci grup fırınlarda, ısıtılacak kütle ortam sıcaklığında (veya ortam sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta) fırına alınır ve ısıtma işlemi gerçekleştirildikten sonra tekrar oda sıcaklığına soğutulur. Bu tür fırınların avantajları basit olmaları ve esnek olarak işletilebilmeleridir. Ancak büyük boyutlarda imal edilmeleri durumunda yüzey alanı/hacim oranı azalacağından, fırın merkezinde kalan parçaların yüzeydeki parçalarla eşit sıcaklıkta olmaları için gerekli önlemler alınmalıdır [2].

Bir sürekli fırında, fırın içerisindeki herhangi bir noktada sıcaklık sabit olup zaman ile değişmez. Isıtılacak kütle, işlemin gerektir-

* *Y. Doç. Dr., Çukurova Üniv. Müh. Mimarlık Fak. Mak. Müh. Bölümü*

diği bir hızla fırın içerisinden geçirilir. Bu tür fırınlar, özellikle büyük miktarlarda üretim için çok elverişlidirler. En büyük dezavantajları ise, yüksek enerji tüketimleri (ısıtma işlemi boyunca sabit sıcaklıkta kalmaları gerektiğinden) ve işletme esnekliklerinin olmamasıdır (kontrol edilebilen tek ana parametre malzeme ilerleme hızı olduğundan). Isıtılacak kütleyi fırın boyunca ilerletecek özel taşıma sistemleri geliştirilmiştir. Ancak çok yüksek sıcaklıklarda (>1200°C) yükleme sistemlerinin imal edileceği malzeme çeşidi sınırlı olup, bir çok ekonomik ve teknik problemler içerir.

Endüstride kullanılan klasik fırınların ısıl verimi oldukça düşüktür. Örneğin 1990 yılında yapılan bir araştırma İngiltere'de çeliğin yeniden ısıtılması amacıyla kullanılan fırınların ısıl veriminin %23 ile %50 arasında olduğunu ortaya koymuştur [3]. Genel olarak kayıplardan dolayı fırına verilen her 100 birim enerjinin ancak 5 ile 50 birimi arasındaki bir bölümü faydalı ısı olarak değerlendirilebilir [4]. Bu durum Şekil 1'de bir Sanghay diyagramı şeklinde gösterilmiştir.




*Şekil 1 : Fırınlarda enerji dengesinin Sanghay diyagramı ile gösterilmesi*

Kullanılan fırının cinsine ve işletme parametrelerine bağlı olarak değişmekle birlikte fırınlardaki kayıpları, atmosfere atılan gazların içerdiği ısı kayıpları (duyulur ve potansiyel), fırında mevcut açıklıklardan kaynaklanan ışınımla ısı kayıpları, fırın gövdesinden meydana gelen ısı kayıpları ve diğer kayıplar olmak üzere dört ana başlık altında toplamak mümkündür.

Bu kayıplar göz önünde bulundurularak yüksek sıcaklıklarda çalışan fırınların ısıl verimliliği ele alındığında, enerji tasarrufu için takip edilebilecek genel olarak üç yol vardır : Isı kayıpları azaltılarak verim artışı sağlanabilir, atmosfere atılan egsoz gazlarının duyulur ısısından faydalanmak için bir çeşit atık ısı geri kazanım sistemi uygulanabilir veya mevcut fırında bazı değişiklikler yapılabilir. Aşağıda fırınlarda meydana gelen ısı kayıpları ve fırınlarda daha verimli çalışmayı sağlayabilecek yöntemler ele alınmıştır.

## Fırınlarda Isı Kayıpları

Şekil 1'den de görüleceği gibi, fırınlarda en büyük kayıp egsoz gazlarıyla olmaktadır. Egsoz gazlarıyla dışarıya iki türlü kayıp söz konusudur. Bunlardan birincisi dışarıya atılan egsoz gazı sıcaklığının ortam sıcaklığından daha yüksek olmasından kaynaklanan duyulur ısı kayıpları, diğeri ise egsoz gazı içerisinde mevcut yanmamış yakıtlardan kaynaklanan potansiyel ısı kayıplarıdır. Bu tür kayıpları en aza indirmek için hava yakıt oranının çok iyi bir şekilde ayarlanması gerekir. Brülöre yeterince hava gönderilmemesi durumunda iyi bir yanma sağlanamadığından bacadan atılan yanmamış yakıt miktarı artmakta (potansiyel ısı kaybı), gereğinden fazla hava gönderilmesi durumunda ise artan egsoz gazı debisinden dolayı duyulur ısı kayıplarında artış olmaktadır.

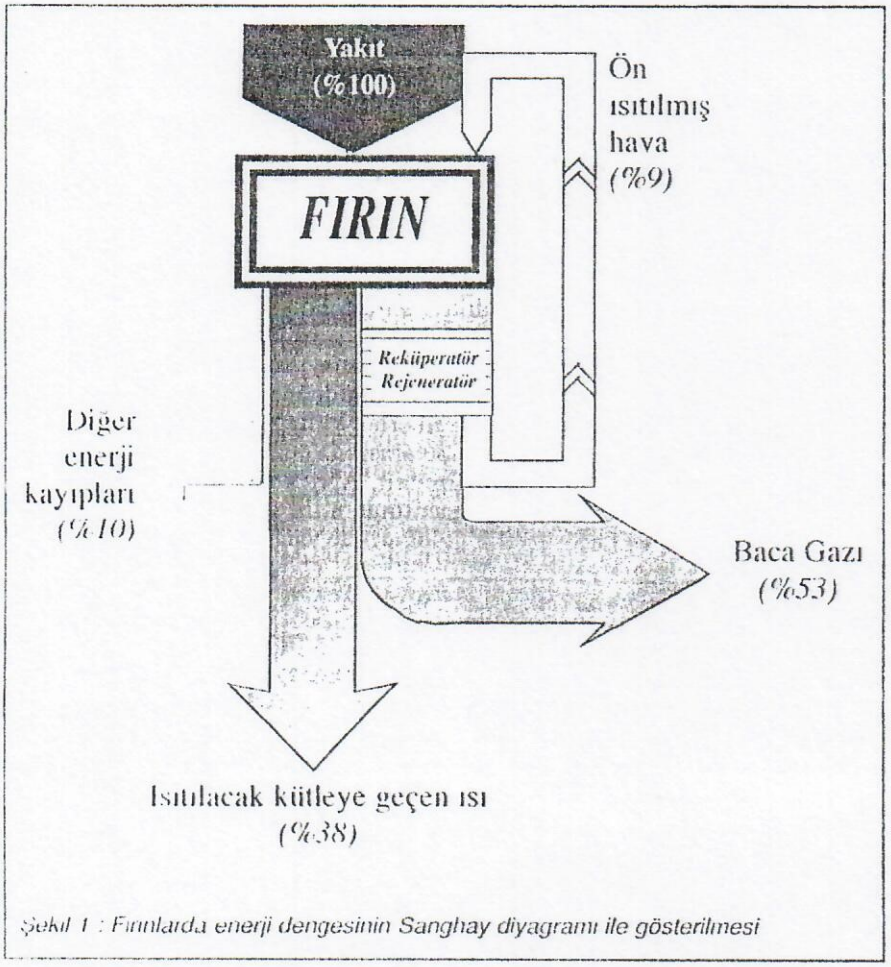
Fırınlarda ışınımla ve gövdeden meydana gelen ısı kayıplarının en fazla olduğu bölgeler infrared kameralar kullanılarak kolaylıkla belirlenebilir. Eğer bu bölgelerdeki kayıplar yalıtımdan kaynaklanıyorsa, yalıtım iyileştirilmeli veya tamir edilmelidir. Eğer bu kayıplar açıklıklardan kaynaklanıyorsa açıklıkların kapatılması yoluna gidilerek kayıplar önlenmelidir.

### Fırınlarda Işınımla Isı Kayıpları

Fırınlarda ışınım kayıpları esas olarak fırında mevcut açıklıklardan olur. Bir çok parametreye bağlı olmakla birlikte, 1000°C'de çalışan bir fırında, her 1 $m^2$ açıklıktan yaklaşık 120 kW ısı ışınımla dışarıya geçer. Isıl ışınım sıcaklığın dördüncü kuvveti ile değiştiğinden, bu değer fırın sıcaklığının artmasıyla hızlı bir şekilde artar. Isıtılacak kütleyi arzu edilen sıcaklığa eriştirebilmek için, ışınımla olan kayıpları karşılamak üzere fırına daha

diği bir hızla fırın içerisinden geçirilir. Bu tür fırınlar, özellikle büyük miktarlarda üretim için çok elverişlidirler. En büyük dezavantajları ise, yüksek enerji tüketimleri (ısıtma işlemi boyunca sabit sıcaklıkta kalmaları gerektiğinden) ve işletme esnekliklerinin olmamasıdır (kontrol edilebilen tek ana parametre malzeme ilerleme hızı olduğundan). Isıtılacak kütleyi fırın boyunca ilerletecek özel taşıma sistemleri geliştirilmiştir. Ancak çok yüksek sıcaklıklarda (>1200°C) yükleme sistemlerinin imal edileceği malzeme çeşidi sınırlı olup, bir çok ekonomik ve teknik problemler içerir.

Endüstride kullanılan klasik fırınların ısıl verimi oldukça düşüktür. Örneğin 1990 yılında yapılan bir araştırma İngiltere'de çeliğin yeniden ısıtılması amacıyla kullanılan fırınların ısıl veriminin %23 ile %50 arasında olduğunu ortaya koymuştur [3]. Genel olarak kayıplardan dolayı fırına verilen her 100 birim enerjinin ancak 5 ile 50 birimi arasındaki bir bölümü faydalı ısı olarak değerlendirilebilir [4]. Bu durum Şekil 1'de bir Sanghay diyagramı şeklinde gösterilmiştir.




*Şekil 1 : Fırınlarda enerji dengesinin Sanghay diyagramı ile gösterilmesi*

Kullanılan fırının cinsine ve işletme parametrelerine bağlı olarak değişmekle birlikte fırınlardaki kayıpları, atmosfere atılan gazların içerdiği ısı kayıpları (duyulur ve potansiyel), fırında mevcut açıklıklardan kaynaklanan ışınımla ısı kayıpları, fırın gövdesinden meydana gelen ısı kayıpları ve diğer kayıplar olmak üzere dört ana başlık altında toplamak mümkündür.

Bu kayıplar göz önünde bulundurularak yüksek sıcaklıklarda çalışan fırınların ısıl verimliliği ele alındığında, enerji tasarrufu için takip edilebilecek genel olarak üç yol vardır : Isı kayıpları azaltılarak verim artışı sağlanabilir, atmosfere atılan egsoz gazlarının duyulur ısısından faydalanmak için bir çeşit atık ısı geri kazanım sistemi uygulanabilir veya mevcut fırında bazı değişiklikler yapılabilir. Aşağıda fırınlarda meydana gelen ısı kayıpları ve fırınlarda daha verimli çalışmayı sağlayabilecek yöntemler ele alınmıştır.

## Fırınlarda Isı Kayıpları

Şekil 1'den de görüleceği gibi, fırınlarda en büyük kayıp egsoz gazlarıyla olmaktadır. Egsoz gazlarıyla dışarıya iki türlü kayıp söz konusudur. Bunlardan birincisi dışarıya atılan egsoz gazı sıcaklığının ortam sıcaklığından daha yüksek olmasından kaynaklanan duyulur ısı kayıpları, diğeri ise egsoz gazı içerisinde mevcut yanmamış yakıtlardan kaynaklanan potansiyel ısı kayıplarıdır. Bu tür kayıpları en aza indirmek için hava yakıt oranının çok iyi bir şekilde ayarlanması gerekir. Brülöre yeterince hava gönderilmemesi durumunda iyi bir yanma sağlanamadığından bacadan atılan yanmamış yakıt miktarı artmakta (potansiyel ısı kaybı), gereğinden fazla hava gönderilmesi durumunda ise artan egsoz gazı debisinden dolayı duyulur ısı kayıplarında artış olmaktadır.

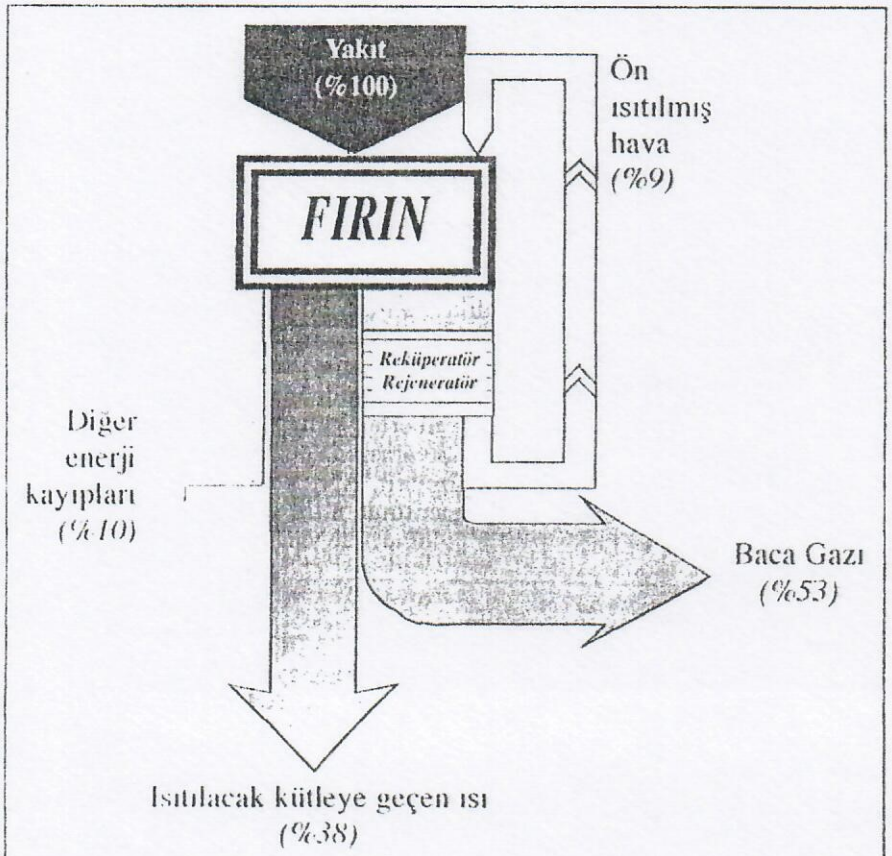
Fırınlarda ışınımla ve gövdeden meydana gelen ısı kayıplarının en fazla olduğu bölgeler infrared kameralar kullanılarak kolaylıkla belirlenebilir. Eğer bu bölgelerdeki kayıplar yalıtımdan kaynaklanıyorsa, yalıtım iyileştirilmeli veya tamir edilmelidir. Eğer bu kayıplar açıklıklardan kaynaklanıyorsa açıklıkların kapatılması yoluna gidilerek kayıplar önlenmelidir.

### Fırınlarda Işınımla Isı Kayıpları

Fırınlarda ışınım kayıpları esas olarak fırında mevcut açıklıklardan olur. Bir çok parametreye bağlı olmakla birlikte, 1000°C'de çalışan bir fırında, her 1 m² açıklıktan yaklaşık 120 kW ısı ışınımla dışarıya geçer. Isıl ışınım sıcaklığın dördüncü kuvveti ile değiştiğinden, bu değer fırın sıcaklığının artmasıyla hızlı bir şekilde artar. Isıtılacak kütleyi arzu edilen sıcaklığa eriştirebilmek için, ışınımla olan kayıpları karşılamak üzere fırına daha

diği bir hızla fırın içerisinden geçirilir. Bu tür fırınlar, özellikle büyük miktarlarda üretim için çok elverişlidirler. En büyük dezavantajları ise, yüksek enerji tüketimleri (ısıtma işlemi boyunca sabit sıcaklıkta kalmaları gerektiğinden) ve işletme esnekliklerinin olmamasıdır (kontrol edilebilen tek ana parametre malzeme ilerleme hızı olduğundan). Isıtılacak kütleyi fırın boyunca ilerletecek özel taşıma sistemleri geliştirilmiştir. Ancak çok yüksek sıcaklıklarda (>1200°C) yükleme sistemlerinin imal edileceği malzeme çeşidi sınırlı olup, bir çok ekonomik ve teknik problemler içerir.

Endüstride kullanılan klasik fırınların ısıl verimi oldukça düşüktür. Örneğin 1990 yılında yapılan bir araştırma İngiltere'de çeliğin yeniden ısıtılması amacıyla kullanılan fırınların ısıl veriminin %23 ile %50 arasında olduğunu ortaya koymuştur [3]. Genel olarak kayıplardan dolayı fırına verilen her 100 birim enerjinin ancak 5 ile 50 birimi arasındaki bir bölümü faydalı ısı olarak değerlendirilebilir [4]. Bu durum Şekil 1'de bir Sanghay diyagramı şeklinde gösterilmiştir.




*Şekil 1 : Fırınlarda enerji dengesinin Sanghay diyagramı ile gösterilmesi*

Kullanılan fırının cinsine ve işletme parametrelerine bağlı olarak değişmekle birlikte fırınlardaki kayıpları, atmosfere atılan gazların içerdiği ısı kayıpları (duyulur ve potansiyel), fırında mevcut açıklıklardan kaynaklanan ışınımla ısı kayıpları, fırın gövdesinden meydana gelen ısı kayıpları ve diğer kayıplar olmak üzere dört ana başlık altında toplamak mümkündür.

Bu kayıplar göz önünde bulundurularak yüksek sıcaklıklarda çalışan fırınların ısıl verimliliği ele alındığında, enerji tasarrufu için takip edilebilecek genel olarak üç yol vardır : Isı kayıpları azaltılarak verim artışı sağlanabilir, atmosfere atılan egsoz gazlarının duyulur ısısından faydalanmak için bir çeşit atık ısı geri kazanım sistemi uygulanabilir veya mevcut fırında bazı değişiklikler yapılabilir. Aşağıda fırınlarda meydana gelen ısı kayıpları ve fırınlarda daha verimli çalışmayı sağlayabilecek yöntemler ele alınmıştır.

## Fırınlarda Isı Kayıpları

Şekil 1'den de görüleceği gibi, fırınlarda en büyük kayıp egsoz gazlarıyla olmaktadır. Egsoz gazlarıyla dışarıya iki türlü kayıp söz konusudur. Bunlardan birincisi dışarıya atılan egsoz gazı sıcaklığının ortam sıcaklığından daha yüksek olmasından kaynaklanan duyulur ısı kayıpları, diğeri ise egsoz gazı içerisinde mevcut yanmamış yakıtlardan kaynaklanan potansiyel ısı kayıplarıdır. Bu tür kayıpları en aza indirmek için hava yakıt oranının çok iyi bir şekilde ayarlanması gerekir. Brülöre yeterince hava gönderilmemesi durumunda iyi bir yanma sağlanamadığından bacadan atılan yanmamış yakıt miktarı artmakta (potansiyel ısı kaybı), gereğinden fazla hava gönderilmesi durumunda ise artan egsoz gazı debisinden dolayı duyulur ısı kayıplarında artış olmaktadır.

Fırınlarda ışınımla ve gövdeden meydana gelen ısı kayıplarının en fazla olduğu bölgeler infrared kameralar kullanılarak kolaylıkla belirlenebilir. Eğer bu bölgelerdeki kayıplar yalıtımdan kaynaklanıyorsa, yalıtım iyileştirilmeli veya tamir edilmelidir. Eğer bu kayıplar açıklıklardan kaynaklanıyorsa açıklıkların kapatılması yoluna gidilerek kayıplar önlenmelidir.

### Fırınlarda Işınımla Isı Kayıpları

Fırınlarda ışınım kayıpları esas olarak fırında mevcut açıklıklardan olur. Bir çok parametreye bağlı olmakla birlikte, 1000°C'de çalışan bir fırında, her 1 m² açıklıktan yaklaşık 120 kW ısı ışınımla dışarıya geçer. Isıl ışınım sıcaklığın dördüncü kuvveti ile değiştiğinden, bu değer fırın sıcaklığının artmasıyla hızlı bir şekilde artar. Isıtılacak kütleyi arzu edilen sıcaklığa eriştirebilmek için, ışınımla olan kayıpları karşılamak üzere fırına daha

fazla ısı enerjisi (yakıt) girdisi yapılmalıdır. Bu ise egsoz gazı miktarının artmasına ve dolayısıyla kayıplarda ilave bir artışa sebep olacaktır. Bundan dolayı fırınlarda yükleme yapıldıktan sonra kapılar veya kapaklar iyice kapatılmalı, ve eğer var ise aralıklar bir dolgu maddesi ile doldurulmalıdır.

**Fırın Gövdesinden Meydana Gelen Isı Kayıpları**

Fırın gövdesinden meydana gelen ısı kayıpları, fırının büyüklüğü, cinsi, fırın yalıtım malzemesinin türü ve kalınlığı ve işletme parametreleri gibi bir çok parametreye bağlı olarak değişecektir. Bu parametrelerin en önemlisi şüphesiz fırının ısıl yalıtımıdır.

Sürekli çalışan fırınlarda, fırın yalıtımının çok iyi olması arzu edilen bir durum olmasına karşın, periyodik olarak çalışan fırınlarda ise yalıtımın hafif olmasına dikkat edilmelidir. Son grup fırınlar aralıklı olarak ısıtılıp soğutulduklarından dolayı, fırın gövdesindeki ısı depolama etkileri en aza indirilmelidir.

*Seramik Fiber Yalıtım :* Yukarıda da bahsedildiği gibi fırınların ısıl verimliliğini etkileyen parametrelerden birisi de fırın cidarında (yalıtım ve gövde) ısı depolanmasıdır. Bu özellikle sıcaklığın zamanla periyodik olarak değiştiği veya aralıklarla çalıştırılan fırınlarda önemlidir.

Fırınların bir çoğunda ısıl yalıtım maddesi olarak yüksek sıcaklıklara dayanabilen klasik ateş tuğlası türü malzemeler kullanılır. Son yıllarda bu tür "ağır" yalıtım malzemelerine alternatif olarak seramik fiberlerin kullanımı gündeme gelmiştir. Seramik fiberler, alumina ve silika fiberler ve küçük miktarlarda indirgenebilir metal oksitlerden oluşurlar. Genellikle, yüksek sıcaklığa dayanıklılığı arttırmak için alumina bileşeninin artırılması gerekir. Bu da maliyetin artması demektir. Günümüzde 1600°C sıcaklığa kadar dayanabilen seramik fiberler ticari olarak satılmaktadır.

Tablo 1'de seramik fiberlerin ve klasik yalıtım malzemelerinin bazı özellikleri karşılaştırma amacıyla verilmiştir [4].

Tablodan da görülebileceği gibi daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olmalarından dolayı daha ince bir seramik fiber kullanılarak aynı miktarda yalıtımı sağlamak mümkündür. Seramik fiberlerin ve klasik yalıtım malzemelerinin özgül ısı kapasiteleri arasında büyük bir fark yoktur. Ancak seramik fiberlerin yoğunluğu klasik malzemelerden çok daha küçük olduğundan ısıl kapasiteleri bu malzemelere göre çok daha düşüktür. Bu da sıcaklığın periyodik olarak değiştiği veya aralıklı çalışan fırınlarda hem fırın duvarlarında ısı depolanmasından dolayı doğan kayıpların azalmasını hem de fırının istenen sıcaklığa ulaşması için bekleme süresinin azalmasını sağlar. Seramik fiberler yeni fırınların yalıtımında kullanılabileceği gibi, mevcut fırınlarda fırın iç (sıcak) yüzeyine kaplama şeklinde de uygulanabilir. Günümüzde değişik türlerde (gevşek yün, battaniye, katı levha ve vakum altında şekillendirilmiş) ve değişik şekiller verilmiş seramik fiberler üretilmektedir. Fırının özelliklerine (sıcaklık, gaz hızları vb.) bağlı olarak en uygun olan seramik fiber seçilmelidir.

Maliyet açısından bir karşılaştırma yapıldığında seramik fiberlerin klasik yalıtım briketlerine göre çok daha pahalı olduğu görülür. Ancak, fırının tamamı (kasası, çatısı) göz önüne alındığında seramik fiber kullanılmasından dolayı maliyette bir artış olmamaktadır. Ayrıca seramik fiber kullanılması durumunda genelde fırının bakımı ve tamiri çok daha kolay olmaktadır.

Isıl yalıtım malzemesi olarak tamamen seramik fiberlerin kullanıldığı fırınlarda, yanma sonucu açığa çıkan su buharı ve asitik gazların seramik fiber içerisinden geçerek en dış metalik çerçeveye ulaşması ve korozyona yol açması tehlikesi vardır. Bu sebeple bu gazların geçişini engelleyici ince bir folyeye ihtiyaç vardır [5].

Son yıllarda, değişik sanayi sektörlerinde kullanılan bazı fırınların yalıtımı tümden veya kısmi olarak değiştirilerek seramik fiberler kullanılmış ve yakıt tüketiminde %15 ile %30 arasında değişen oranlarda tasarruf sağlandığı belirtilmiştir. Ayrıca ısıl yalıtım için kullanılan malzeme hacminde 8 ile 10 kat arasında, bakım ve tamir işçilik giderlerinde yarı yarıya ve istenilen bir

*Tablo 1 : Seramik fiber ve klasik yalıtım malzemelerinin bazı özellikleri*

| | Alumina içeriği [%] | En yüksek sıcaklık [°C] | Özgül ısı [J/kg °C] | Yoğunluk [kg/m3] | Isıl iletkenlik [W/m °C] |
|---|---|---|---|---|---|
| *Seramik fiber* | 45 | 1260 | 1000 | 100 | 0.16 |
| | 60 | 1400 | 1000 | 100 | 0.16 |
| | 90 | 1600 | 1000 | 96 | 0.2 |
| *Klasik yalıtım tuğlası* | 10 | 800 | 1100 | 540 | 0.16 |
| | 36 | 1260 | 1100 | 960 | 0.36 |
| | 68 | 1650 | 1100 | 1240 | 0.59 |

sıcaklığa ulaşmak için gerekli zamanda ise %10 ile %15 arasında bir düşüş sağlanabilmiştir [6].

### Fırınlarda Diğer Isı Kayıpları

Fırınlarda daha verimli bir çalışma için yukarıda ele alınan kayıpların yanında, kullanılan fırının tipine göre mevcut olabilecek diğer bazı ısı kayıplarının da en aza indirilmesi için gerekli önlemler alınmalıdır. Bu tür kayıplara fırına malzeme yüklemek için kullanılan taşıma sistemlerinde meydana gelen ısı kayıpları veya ısıtılacak kütlenin bir bölümünün fırın dışına taşması gibi sebeplerle meydana gelebilecek ısı kayıpları örnek verilebilir.

## Fırınlarda Atık Isı Geri Kazanımı

Bir fırında atık ısı geri kazanımından önce ilk ele alınması gereken fırının verimininin artırılarak takip eden ısı geri kazanım sistemine gönderilen ısının en aza indirilmesidir. Atmosfere atılan egsoz gazlarının enerjisinden faydalanırken belirli noktalar göz önünde bulundurulmalıdır (5):

Fırından çıkan gazların sıcaklığının çiy nokta sıcaklığına yakın olması durumunda, bu gazların bir miktar daha soğutulması kullanılacak ısı geri kazanım sisteminin (ısı değiştiricisi) ve bacanın korozyonuna sebep olacağından öncelikle fırından çıkan egsoz gazlarının bileşimi ve sıcaklığı analiz edilmelidir. Özellikle çevre kirliliğine yol açması muhtemel olan bazı sanayi tesislerinde bacadan atılan egsoz gazı hızının belirli bir değerin üzerinde olması gereklidir. Bu sebeple baca gazının ısısından faydalanmak üzere kurulacak olan bir sistem bacadan atılan gaz hızını bu kritik değerin altına düşürmemelidir.

Yukarıda ele alınan ısı kayıpları en aza indirilse bile yüksek sıcaklık fırınlarında mevcut ısı enerjisinin %50 ile %80 i arasında değişen bir miktarı bacadan dışarıya atılmaktadır. Eğer bu ısı enerjisinin bir bölümü değişik bir amaçla kullanılacak olan diğer bir akışkana, yanma havasına veya ısıtılacak kütleye aktarılabilirse fırın veriminde bir artış sağlanacaktır.

Atık ısı doğrudan fırın çevrimi içerisinde veya dışında geri kazanılabilir. Buhar kazanları, su veya hava ısıtma sistemleri ve gaz türbinleri son gruba örnek olarak verilebilir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan sistemler ise egsoz gazından buhar üreten sistemlerdir. Egsoz gazı sıcaklığının 400 C den ve debisinin 5000 m3/h den büyük olduğu durumlarda buhar kazanları ekonomik olmaktadır. Ancak bu tür fırın çevrimi dışında ısı geri kazanımında birbirinden bağımsız iki sistem söz konusu olduğundan arz ve talep zaman ve miktar açısından dengelenmeyebilir. Enerji arz ve talebi arasında bir denge sağlayabilmek için bazı durumlarda ısıl enerji depolanması yoluna gidilmelidir ki bu da ilave bir yatırımı gerektirmektedir. Bundan dolayı ısı geri kazanımı mümkün olduğunca fırın çevrimi içerisinde düşünülmelidir. Aşağıda bu tür sistemler ele alınmıştır.

### Yükün Ön Isıtılması

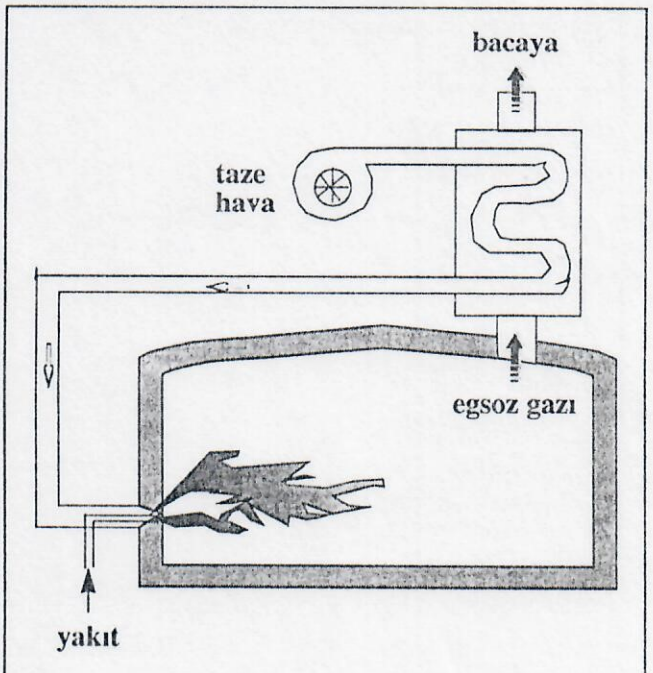
Egsoz gazları fırında ısıtılacak kütleyi belirli bir miktar ısıtmak için kullanılabilir. Bu genellikle uzatılmış bir fırında, egsoz gazlarını kütle üzerinden kütlenin ilerleme yönüne ters olarak geçirerek gerçekleştirilir. Bu tür sistemlerin pratikte yaygınlaşmasını önleyici faktörlerin başında egsoz gazı ile ısıtılacak kütlenin ısı alış verişinde bulunabiliceği belirli bir alana ihtiyaç duyulması ve ön ısıtılmış kütleyi esas fırına taşıyacak mekanik sistemlerin gerekliliğidir. Bu tür bir ısı geri kazanım sisteminde, sıcak egsoz gazından taze yanma havasına ısı transferi sağlayan ısı eşanjörlerinde görülen problemlerin hiçbirisi görülmez.

Yük ön ısıtma sistemleri, sürekli çalışan ve yükün özelliklerinin çok fazla değişmediği büyük işletmeler için uygundur. Örnek olarak iticili veya yürüyen çelik ısıtma fırınları, döner çimento veya kireç fırınları, sürekli çalışan briket veya seramik fırınları verilebilir.

### Taze Yanma Havasının Ön Isıtılması

Egsoz gazından faydalanmak üzere taze yanma havası ısıtılarak enerji tasarrufu sağlandığı gibi yüksek sıcaklık gerektiren durumlarda yeterli yüksek alev sıcaklığı da elde edilmiş olur. Yanma havasını ısıtmak için yaygın olarak kullanılan iki tür sistem mevcuttur. Bunlar reküperatörler ve rejeneratörler olarak adlandırılırlar.

*Reküperatörler :* Bu sistemlerde egsoz gazının sahip olduğu duyulur ısının bir miktarı katı bir cidar üzerinden taze yanma havasına sürekli olarak aktarılır (Şekil 2). Reküperatörleri klasik taşınım veya ışınım esaslı metalik reküperatörler, seramik reküperatörler, hibrid reküperatörler ve reküperatif brülörler olarak dört ana grup altında toplamak mümkündür.

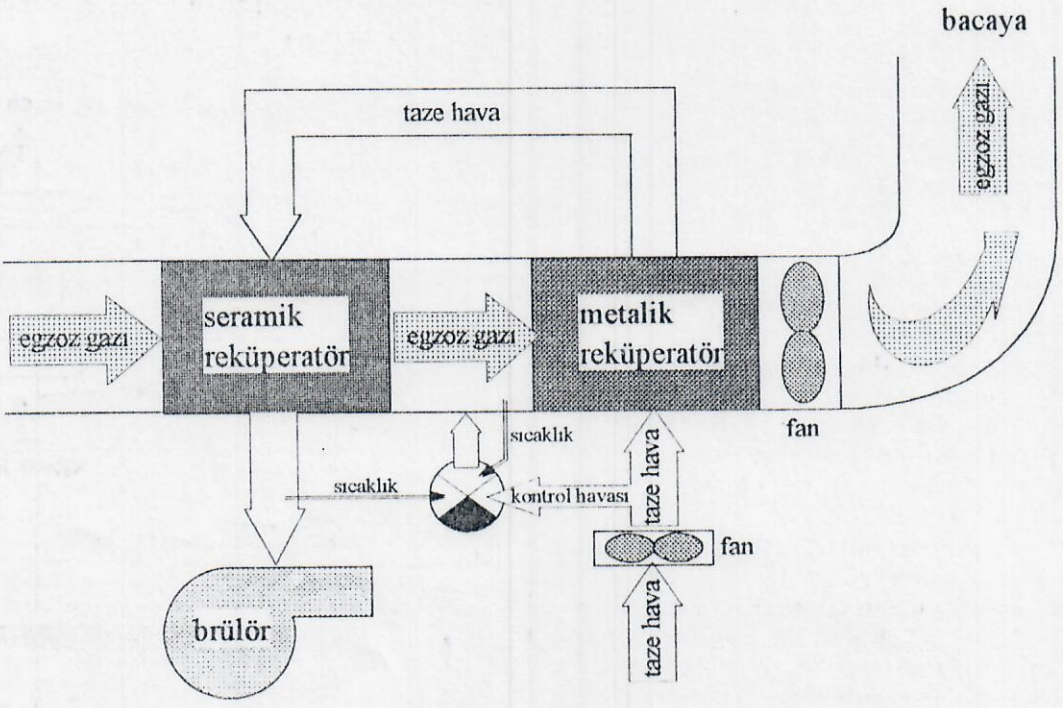



*Şekil 2 : Klasik bir reküperatif atık ısı geri kazanım sistemi*

Klasik taşınım esaslı reküperatörler egsoz gazı sıcaklığının 900-1000°C'nin altında olduğu koşullarda kullanılırlar. Bu tür reküperatörlerde taze hava, egsoz gazı içerisine yerleştirilmiş kanalların içerisinden geçirilerek ısınması sağlanır ve daha sonra brülöre gönderilir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise taze havayı taşıyan küçük çaplı kanallar egsoz gazının geçtiği kanalın çevresine yerleştirilirler. Bu durumda ısı transferi esas olarak ışınımla gerçekleşir. İçiçe geçmiş iki tüp şeklinde imal edilmiş reküperatörler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde genellikle egsoz gazı iç tüpten, taze hava ise eş yönlü veya zıt yönlü olarak iki tüp arasındaki boşluktan geçirilir. Ayrıca hem ışınım esaslı hem de taşınım esaslı reküperatörlerin avantajlarından birlikte faydalanabilmek için, bu iki türün birleştirilmesi yoluna da gidilmektedir. Bu durumda egsoz gazları önce ışınım esaslı bir reküperatörlerden geçirilip sıcaklığı 750-850°C'ye kadar ve daha sonra da taşınım esaslı bir reküperatörde 350-450°C'ye kadar düşürülür. Hacminin büyük olması ve egsoz gazını ve yanma havasını reküperatöre taşımak için büyük miktarlarda boruya ve bunların yalıtımına ihtiyaç duyulmasından dolayı klasik reküperatörlerin ilk yatırım maliyeti oldukça yüksektir. Bu sebeple ancak büyük fırınlarda kullanılması ekonomik olmaktadır.

Egsoz gazı sıcaklığının 1000°C'nin üzerinde olduğu uygulamalarda klasik metalik reküperatörleri kullanmak mümkün olmamaktadır. Bu durumlarda "silicon carbide" ve "silicon nitride" gibi malzemelerden imal edilmiş seramik reküperatörler kullanılabilir. Bu reküperatörler klasik metalik reküperatörlerin kısa ömür, sızdırmazlık problemleri ve düşük güvenilirlilik gibi bazı dezavantajlarını da ortadan kaldırılmaktadırlar. Son yıllarda seramik kullanılarak imal edilmiş kompakt ısı eşanjörleri geliştirilmiş ve özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılmaya başlanmıştır [7]. Seramik reküperatörlerin ısıl şoka ve yorulmaya karşı dirençlerinin düşük olması ve imalatlarının zor olması gibi bazı dezavantajları mevcuttur.

Son yıllarda ayrıca metalik ve seramik reküperatörleri seri halinde birleştirilerek, yüksek sıcaklıklarda ısı geri kazanımı sağlayabilen hibrid sistemler üzerinde de çalışılmaktadır. Şekil 3'de böyle bir sistem şematik olarak gösterilmiştir. Bu tür sistemlerde gerek metalik reküperatörün gerekse brülörün yüksek sıcaklıktan etkilenmemesi için metalik reküperatöre giren egsoz gazı sıcaklığının ve brülöre giren ön ısıtılmış hava sıcaklığının belirli değerleri aşmaması gerekir. Bunu sağlayabilmek için de gerektiği durumlarda metalik reküperatöre gönderilen taze havanın bir bölümü metalik reküperatöre giren egsoz gazı ile karıştırılarak metalik reküperatöre giren gaz sıcaklığı kontrol edilir. Bu kontrol mekanizması ısı geri kazanımının etkinliğini değiştirmez. Denemeler böyle bir hibrid sistemde 1370°C'de egsoz gazı sıcaklığında yanma havasının 1120°C'ye kadar ısıtılabildiğini ortaya koymuştur [8]. Hibrid sistemlerin en büyük avantajı, yüksek sıcaklıklarda ısı geri kazanımı sağlarken seramik reküperatörün boyutlarının küçük tutu-



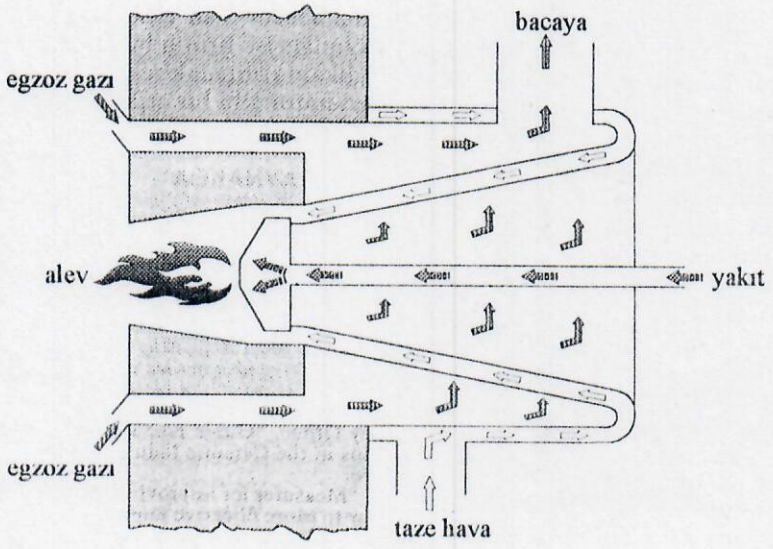

*Şekil 3 : Seramik ve metalik reküperatörlerin birleştirilmesiyle elde edilen hibrid reküperatörler*

labilmesidir. Bu sistemlerin kullanılmasıyla yanma havası çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılabileceğinden fırında kullanılan brülörün bu yüksek sıcaklığa dayanabilecek özelliklere sahip olması gereklidir. Bu da hibrid reküperatörlerin bir dezavantajıdır.

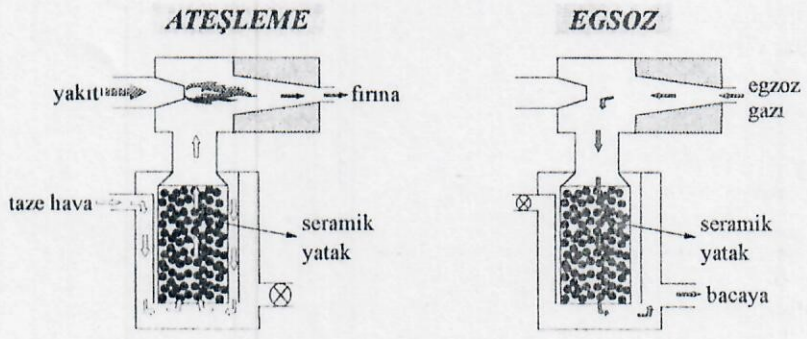
Yukarıda da bahsedildiği gibi klasik reküperatörlerin en büyük dezavantajı büyük hacim işgal etmeleri ve gazların reküperatöre taşınımını gerektirmeleridir. Bu olumsuz noktaları ortadan kaldırmak üzere brülör ve reküperatörün birleştirilmesi yoluna gidilmiş ve reküperatörlü brülörler ortaya çıkmıştır [9]. Bu tür sistemlerde fırından alınan egsoz gazları reküperatörlü brülerlerden geçirilerek, taze havanın yakıt yanma işleminden önce ön ısıtılması gerçekleştirilmiş olur [Şekil 4). Kompakt olan bu sistemlerin fırınlara yerleştirilmesi daha kolaydır ve maliyeti klasik reküperatörlerden daha düşüktür. Önceleri sadece büyük fırınlarda kullanılan reküperatif brülörler, günümüzde orta ve küçük ölçcekli bir çok sanayi tesisinde yaygın olarak kullanılabilecek büyüklüklerde (60-90 kW mertebesinde) imal edilektedirler. Fırınlarda reküperatif brülörler kullanılmasıyla %30'lara varan enerji tasarrufu elde edilebileceği görülmüştür. Günümüzde 1400°C ateşleme sıcaklığına kadar dayanabilen reküperatif brülörler imal edilmektedir. Reküperatif brülörlerin en büyük dezavantajı, yanma sonucu açığa çıkan, $NO_x$ emisyon seviyesinin kabul edilebilir sınırları zorlamasıdır [3]. Bundan dolayı ve ayrıca reküperatif brülör kullanılması durumunda, taze yanma havasının sıcaklığında ve dolayısıyla yoğunluğunda meydana gelebilecek dalgalanmaların fırının verimini etkilememesi için hava-yakıt oranını kontrol eden bir sistemin brülörle birlikte kullanılması gereklidir [5].

*Rejeneratörler :* Rejeneratörlerde ise reküperatörlerden farklı olarak önce egsoz gazının duyulur ısısı bir matris tarafından depo edilir ve daha sonra bu ısı yanma havasına aktarılır. Genel olarak iki tür rejeneratör mevcuttur. Sabit rejeneratörlerde matris üzerinden sırasıyla yanma havası ve egsoz gazı geçirilirken (Şekil 5), döner rejeneratörlerde (Şekil 6) matris dönerek sırasıyla egsoz gazı ve yanma havası ile temasa geçer [10].

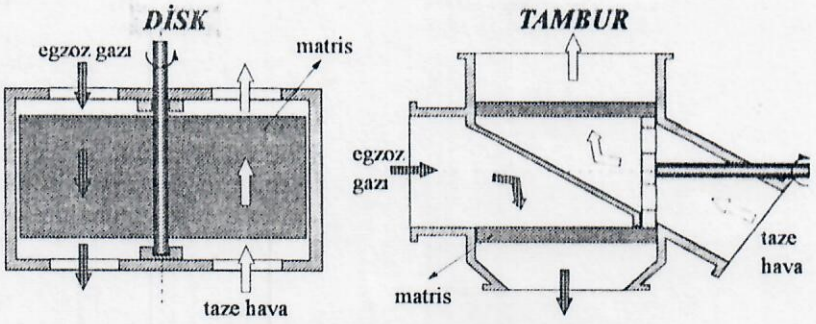
Yüksek verim, düşük basınç kayıpları, geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmeleri gibi avantajları olan bu sistemlerin en büyük dezavantajları ise hareketli parça içermeleri, atık gaz ile taze havanın birbirine karışma problemi ve atık gaz ile taze hava akımı arasındaki yüksek basınç farkında çalışamamaları sayılabilir [11]. Ayrıca egsoz gazı sıcaklığının yüksek olduğu (>700°C) du-




*Şekil 4 : Reküperatif brülörün şematik resmi*




*Şekil 5 : Sabit matris rejeneratörün şematik resmi*




*Şekil 6 : Disk ve tambur matrisli döner rejeneratörler*

rumlarda uygun malzeme seçimine, mil ve yatak yağı seçimine ve ayrıca ısıl genleşmelerden doğabilecek problemlere de dikkat edilmelidir. Rejeneratörler ancak cam eritme fırınları, maden eritme fırınları ve açık ocaklı fırınlar gibi büyük ölçekli fırınlarda kullanılmaları durumunda bir kazanç sağlamaktadırlar.

İlk olarak 1980'li yılların ortalarında, 1000 ile 3000 kW güç mertebesinde kullanılabilecek rejeneratif brülörler piyasaya sunulmakla birlikte günümüzde 65 kW mertebesinde düşük kapasiteli rejeneratif brülörler ticari olarak satılmaktadır [12]. Şekil 5 de böyle bir sistem şematik olarak gösterilmiştir. Bu sistemlerde fırına iki adet brülör yerleştirilmektedir. Dönüşümlü olarak, brülörlerden birisi yanmayı gerçekleştirirken diğeri egsoz gazlarının atılması için kullanılır [13]. Belirli aralıklarla (tipik olarak 2 dakika) brülörlerin işlevleri değiştirilir. Egsoz gazları egsoz modunda çalışan brülörden geçerken seramikten imal edilmiş bir yatağı ısıtırlar. Daha sonra bu brülör yanma işlemi için kullanılırken yanma havası ısıtılmış seramik yatak üzerinden geçirilerek ön ısıtmaya tabii tutulur. İlk olarak büyük fırınlarda uygulanan rejeneratif brülörler %40 mertebesinde yakıt tasarrufu sağlayarak 1 yıl içerisinde yatırımları için harcanan parayı geri ödemişlerdir. Daha sonraları büyük çelik ısıtma fırınları ve alüminyum eritme fırınları gibi kirli egsoz gazları içeren sistemlerde de başarıyla uygulanmışlardır. Yapılan çalışmalar, rejeneratif brölür kullanılması durumunda egsoz gazı sıcaklığının 200°C'nin altına düşürülebildiğini ve fırın ısıl veriminin %80 mertebesine kadar çıkabildiğini göstermiştir [14].

## Sonuç

Enerji tüketiminin gün geçtikçe arttığı ve buna paralel olarak kaynakların sınırlı olduğu göz önüne alınırsa enerjinin en verimli bir şekilde tüketilmesi gerekliliği açıkca ortaya çıkar. Enerji tüketiminde büyük sayılabilecek bir paya sahip olan yüksek sıcaklık fırınlarında, alınabilecek bazı önlemler ve ilave sistemlerle ısıtma işleminde enerjiden tasarruf sağlanabileceği gibi daha kaliteli ürün elde etmek de mümkün olacaktır. Fırın gövdesinden ve aralıklardan meydana gelen ısı kayıplarını fırının işletme parametrelerine bağlı olarak daha akıllıca bir yalıtım kullanılarak ve açıklıkları ve kapıları kapatarak en aza indirmek mümkündür. Fırınlarda ısı kayıplarının ana sebebi olan egsoz gazları yoluyla meydana gelen kayıpları ise fırının büyüklüğü ve işletme parametreleri dikkate alınarak reküperatör, reküperatif brülör ve rejeneratör gibi bir atık ısı geri kazanım sisteminin ilavesi ile azaltılabilir.

## Kaynakça


1. **Parker, S.P.,** "McGraw-Hill Encyclopedia of Energy, Second Edition", McGraw-Hill, 1981.
2. **Finn, C.W.P.,** "Furnaces and Related Equipment", Ceramics and Glasses (Vol.4-Engineered Materials and Handbook), ASM International, 1991.
3. **Energy Efficiency Office,** "Energy Consumption Guide, Guide No : 9, Continuous Steel Reheating Furnaces", 1991.
4. **Fricker, N.,** "The Effective Use of Gas on High Temperature Furnaces", Industrial Utilisation of Natural Gas (Ed : Davies, C.), Graham and Trotman, 1987.
5. Energy Efficiency Office, "Guide No. 164 : Energy Efficient Operation of Kilns in the Ceramic Industries", Energy Efficiency Office, 1996.
6. United Nations, "Measures for Improving Engineering Equipment with a View to More Effective Energy Use", United Nations Publications, 1987.
7. **Kleiner, R.N.** and **Coubrough, L.E.,** "Advanced High Performance Ceramic Heat Exchanger Designs for Industrial Applications", Industrial Heat Exchangers (Ed : A.J. Hayes, W.W., Liang, S.L. Richlen, E.S. Tabb), ASM Publications, 1985.
8. **Coombs, M., Richlen, S. ve Liang, W.,** "Development of a Ceramic Recuperator for Industrial Applications", High temperature Heat Exchangers (Ed : Y. Mori, A.E. Sheindlin, N. Afgan), Hemisphere Pub. Co., 1986.
9. **Fassbender, A.G., McGee, M.J.** and **Yanase, Y.,** "Energy Efficient Industrial Technology in Europe and Japan", Noyes Data Co., 1983.
10. **Zukauskas, A.,** "Regenerative and Direct Contact High Temperature Heat Exchangers", High Temperature Heat Exchangers (Ed: Y. Mori, A.E. Sheindlin, N. Afgan), Hemisphere Pub. Co., 1986.
11. **Newby, J.N.,** "The REGEN Regenerative Burner-Principles, Properties and Practice", Industrial Heat Exchangers (Ed:A.J. Hayes, W.W., Liang, S.L. Richlen, E.S. Tabb), ASM Publications, 1985.
12. Energy Efficiency Office, "Integral Bed Burners on a Continuous Heat Treatment Furnace, New Practice Report No. 64", Energy Efficiency Office, 1992.
13. **Lukasewicz, M.A.,** "An Integrated High Temperature Regenerative Burner Radiant Tube Applications", Indurtrial Heat Exchangers (Ed:A.J. Hayes, W.W., Liang, S.L. Richlen, E.S. Tabb), ASM Publications, 1985.
14. **Beckervordersandforth, C.,** "Research and Development Work in Europe on the Application of Natural Gas in Industry", Industrial Utilisation of Natural Gas (Ed:Davies, C.), Graham and Trotman, 1987.