



SÜREKSİZ ÇALIŞAN ENDÜSTRİYEL FIRININ ISIL ANALİZİ

Transient Thermal Analysis of an Industrial Furnace

Barbaros Batur
M. Cem Çelik
Muammer Akgün

ÖZET

Endüstriyel tesislerde, oransal kontrollü brülör kullanan sıcak su ve buhar kazanları, endüstriyel fırınlar gibi birçok süreksiz çalışan sistem yaygın olarak kullanılmaktadır. Süreksiz çalışan sistemlerde sistem veriminin bulunması için gereken enerji dengesi, sürekli çalışan sistemlere göre daha karışıktır. Enerji analizi çalışmalarında; ölçüm metodolojisi, cihazları ve ölçüm noktaları büyük önem taşımaktadır. Süreksiz sistemler ve sürekli sistemlere ait çalışmalarda en önemli farklardan biri de veri toplarken ölçüm yapma sıklığıdır. Süreksiz sistemlerde ölçüm zamanı ve sıklığı sistemin ısı hesaplarını doğru yapmak için kritik konulardan biridir.

Bu çalışmada, bir endüstriyel fırının süreksiz ısı analizi ele alınmıştır. Buna ek olarak, bu tür sistemlerde kullanılan ölçüm yöntemleri, elde edilen verilerin kullanımı ve süreksiz ısı hesapları hakkında bilgi verilmiştir. Genellikle süreksiz sistemlerde çalışma; ısıtma, sabit sıcaklık platosu ve soğuma süreçlerinden oluşmaktadır ve bu zaman dilimlerinin hassasiyetle belirlenmesi gerekmektedir. Bu zaman dilimlerinin geçiş noktalarında alınması gereken ölçümler dikkatle planlanmalıdır. Ayrıca, ölçüm planlamasında prosese özel değişimler olacağı unutulmamalıdır. Süreksiz sistemlerin analizinde, ölçüm ve hesaplamalar, prosese ait farklı zaman dilimlerine göre ayrı ayrı ele alınmalıdır. Her bir zaman dilimindeki hesaplama, sürekli sistemlerdeki tek bir hesaplama karşılık gelmektedir. Bu da, süreksiz sistem hesaplarının, sürekli sistemlere göre ne kadar karmaşık olduğunu göstermektedir. Ölçümlerin ve hesaplamaların tutarlığı sonucu enerji tasarrufu önlemlerine karar verilmesi gerekir. Aksi durumda, planlanan enerji tasarrufu değerinden sapmalar görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Endüstriyel tesisler, Süreksiz çalışan sistemler, Ölçüm metodolojisi, Enerji dengesi

ABSTRACT

In industrial facilities, many transiently operating systems such as hot water and steam boilers using proportionally controlled burners and industrial furnaces are widely used. The energy balance required to find system efficiency in transient systems is more complex than systems operating continuously. In energy analysis studies; measurement methodology, devices and measurement points are of great importance. One of the most important differences in studies of transient systems and continuous systems is the frequency of measurements while collecting data. In transient systems, measurement times and frequencies are of the most critical issues to conduct accurate thermal calculations of the system.

In this study, transient thermal analysis of an industrial furnace is discussed. Additionally, for such systems; information was given about measurement methods, use of the obtained data and discontinuous thermal calculations. Generally, transient systems consist of heating, constant temperature plateau and cooling periods, and these time intervals must be determined precisely. Detailed measurements that should be taken at the transition points of these time frames should be carefully planned. Furthermore, it should not be forgotten that there will be process-specific changes in measurement planning. In the analysis of transient systems, measurements and calculations should

be handled separately according to different time periods of the process. The calculation in each time period corresponds to a single calculation in a continuous system. This demonstrates the complexity of discontinuous system calculations compared to continuous systems. Energy saving measures need to be decided as a result of the consistency of measurements and calculations. Otherwise, there will be deviations from the planned energy savings. The subject is explained with examples

Key Words: Industrial plants, Transient systems, Measurement methodology, Energy balance

1. GİRİŞ

Sürekli fırınlar, ilk yandığı andan itibaren geçici rejimini bitirerek sürekli rejime geçer. Sürekli rejimde brülör ya da bekler devreye girip çıksalar bile fırın sıcaklıkları ayarlanan alt ve üst sınırlar içinde sabit kalır. Bu periyot, günlük buhar kazanları ya da endüstriyel fırınlarda bir günü içerirken cam fırınları gibi hiç durmayan fırınlarda on yılın üzerine dahi çıkabilir.

Sürekli sistemlerde bazı kritik ölçümler devamlılık göstermeli, sürekli alınma olanağı olmayan sıcaklık ya da yakıt tüketimi gibi kritik ölçümler de değişim gösterdikleri noktalar ve düzgün değıştikleri noktalarda mutlaka ölçülmelidir.

Sürekli çalışan ısı sistemlerinde enerji dengesinin çıkartılmasının devamı olarak, sürekli ısı sistemlerinde enerji tasarrufu önlemlerinin geri ödeme sürelerinin hesaplanması, sürekli sistemlere göre daha karışiktır. Geri ödeme süresi hesabında, zaman içinde sürekli dalgalanan sıcaklığa bağlı olarak, sürekli dalgalanan bir enerji tasarruf miktarı olmalıdır. Eğer tasarruf edilen ısı enerjisi, fabrikada başka bir proste kullanılmak isteniyorsa sistemde oluşacak dalgalanmadan daha az etkilenmesi için ısı enerjisinin depolanması gerekebilir. Isı enerjisinin depolanma miktarının artması, depolama yatırımının maliyetini de artırır. Bu iki veri arasında optimum değer hesaplanmalıdır. Isı enerjisinin çekildiği sistem ve bu çekilen ısı enerjisini kullanan sistemin sürekli olması, aynı zamanda bir mühendislik problemi oluşturur. Örneğin, sürekli çalışan bir endüstriyel fırın bacasından çekilen ısı enerjisi, fabrika ofislerinin ısıtılmasında kullanılacak ise, fırının hangi saatlerde kullanılacağı, fırın ile ofis ısıtması arasında ne kadar ısı enerjisinin depolanması gerektiği, hangi depolama büyüklüğü ve çeşidinin ekonomik olacağı hem bir enerji problemi hem de bir mühendislik problemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Artan enerji maliyetlerinin getirdiği yükü birlikte, karşı karşıya kalınacak olan karbon salımı kısıtlamaları için öncelikle aydınlatma sistemlerinde ve yüksek verimli elektrik motorlarında geçiş sürecini tamamladıktan sonra bir fabrikanın enerji tasarrufu için projelendirmesi bir bütün olarak ele alınmalıdır. Üretim prosesi, mahal ısıtması, güneş tüpleriyle aydınlatma gibi önlemler bir bütün halinde ele alınmalıdır. Enerji ve tasarruf önlemlerinin fiyat değışimlerine de takip etmek için belirli periyotlarla tekrar hesaplanma yapılmalıdır. Bu çalışmada bu hesaplamalar örnekle anlatılmıştır.

2. ENDÜSTRİYEL FIRINLAR

Doğrudan ısıtıcı veya doğrudan ateşlemeli ısıtıcı olarak da bilinen endüstriyel bir fırın, tipik olarak 400°C yüksek bir endüstriyel işlem için ısı enerjisi sağlamak amaçlı kullanılan bir cihazdır. Bir proses için ısı enerjisi ya da reaksiyon ihtiyacı ısı enerjisini sağlamakta kullanılır. Endüstriyel fırına gerekli ısı enerjisi, yakıtı hava veya oksijenle karıştırıp yakarak veya elektrik enerjisinden üretilir [1]. EN ISO 13705 (Petrol ve doğalgaz endüstrileri – Genel rafineri hizmeti için ateşlemeli ısıtıcıları) ya da Amerikan Petrol Enstitüsü (API) Standart 560 (Genel rafineri hizmeti için ateşlemeli ısıtıcı) endüstriyel fırınlar için en çok kullanılan standartlardır.

İki standart arasında kesin bir ayırım çizgisi olmamasına rağmen, fırın iç duvar sıcaklıklarının 400–500°C de ise genellikle düşük sıcaklıkta olarak kabul edilirken, 500–800°C'nin üzeri ise yüksek sıcaklık

olarak kabul edilmektedir. Yüksek sıcaklık süreçleri arasında çimento ve kireç üretimi, tuğla ve seramik üretimi, çoğu metal işleme, cam yapım vb. düşük sıcaklık işlemleri kurutma işlemlerini, yiyecekler işleme ve sterilizasyon, buhar basınçlandırma, yağ arıtma proseslerini içerir.

Yüksek sıcaklıkta çalışan fırınlar, demir-çelik ve diğer metaller, çimento, cam ve seramik endüstrilerinde kullanılırlar ve yüksek sıcaklıkla birlikte enerji tüketimleri yüksek olur. Bu nedenle enerji tasarruf potansiyelleri de yüksektir. Örneğin demir-çelik üretiminde, cam ve seramik endüstrisi 1200°C ve üzerine çıkan fırın içi sıcaklıkları, yüksek enerji tasarruf potansiyeli ile birlikte, yüksek sıcaklıklarla çalışmayı da gerektirmektedir. Bununla birlikte, çok daha düşük sıcaklıklarda çalışan, daha küçük boyutlu endüstriyel fırınlara da rastlamak olasıdır. Yüksek sıcaklıkta çalışan fırınlar, düşük sıcaklıktaki karşılıklarına göre tüketilen yakıtın ısı enerjisini verimli kullanılmak çok daha zordur. Buhar üretimi gibi düşük sıcaklık prosesleri için, genel olarak %80'in üzerinde verim sağlanabilirken, yüksek sıcaklık süreçlerinde %50'yi aşan verim değerlerine ulaşan tesis sayısı nadirdir. Fırınlarda azaltılan fosil yakıt miktarı, proses maliyetini azaltır. Özellikle petrol ve petrol türevi birinci sınıf yakıt gerektiren süreçler için kullanılan doğalgaz, karbon üretimi kısıtlanmış gelecekteki dünyada, tasarım mühendislerince fırınların süreç verimliliğinin maksimize edilmesini gerektirecektir. Eski zamanlarda fırın verimlerinde iyileştirme kavramı yoktu, örneğin kireç endüstrisi, selüloz ve kağıt endüstrisinde neredeyse hiç bilinmiyordu. 1980'lerin başlarında, kireç fırınları yaklaşık % 30-50 daha fazla yakıt kullanılırdı [1].

3. SÜREKLİ VE SÜREKSİZ FIRINLAR

Süreksiz çalışan endüstriyel fırınlar (discontinuous furnaces), bir periyod içinde, ısınıp, yüksek sıcaklıkta kalarak ve soğuyarak ürünlere ısı işlem yapan endüstriyel fırınlardır (Şekil 1). Ürün ve fırın ısı işlemi benzer sıcaklık değişimi ile yapar. Sürekli çalışan endüstriyel fırınlar (continuous furnaces), ise genellikle birden çok bölgeye bölünerek, ısınma, yüksek sıcaklıkta kalma ve soğuma işlemini fırın sıcaklığı hiç değişime uğramadan, sadece içindeki ürünün sıcaklığı değişerek ısı işlem uygularlar.



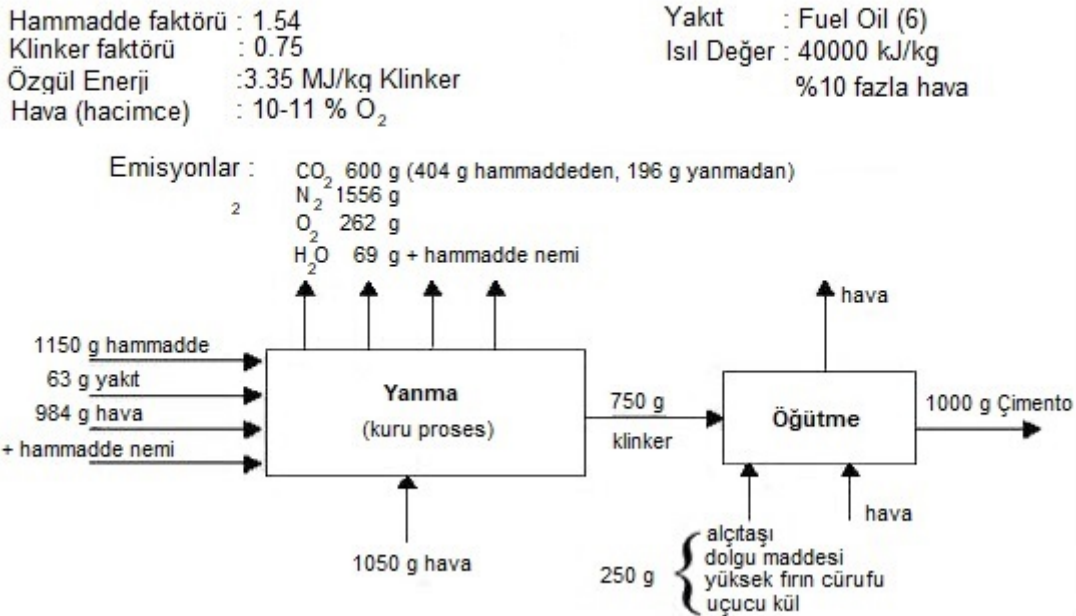
Şekil 1. Süreksiz Çalışan Endüstriyel Fırın Örneği



Şekil 2. Süreksiz Çalışan Endüstriyel Fırın örneği

Enerji tüketen sistemlerde tasarruf sağlanması için önce sistemin enerji dengesi çıkartılması, bunun içinde ilk yapılacak işlemin sistemin kütle ve enerji dengesinin kurulması gerekmektedir. Kütle dengesinin çıkartılması, enerji dengesinin çıkartılmasına kıyasla daha kolaydır ve enerji dengesinin çıkartılması için ön şarttır. Kütle dengesini sağlamak için sadece fırına giren ürün değil, ürünle birlikte fırına giren her türlü ürün tutucu/taşıyıcı ve yalıtım benzeri malzemeyle, yakıt ve yakıcılar da göz önüne alınmalıdır. Eğer önemli bir sonucu var ise, yakıcı olarak kullanılan hava içindeki nem dahi hesaba katılmalıdır. Kütle dengesi hesabında önemli olan hesaba katılan kütlelerin hesabı ne kadar etkilediğidir. Hesabı etkilemeyecek kadar küçük kütlelerin, fırına giriş çıkışları hesaba katılmayabilir. Şekil 3'de kütle dengesi için bir örnek gösterilmiştir.

1 kg Çimento için Kütle Dengesi

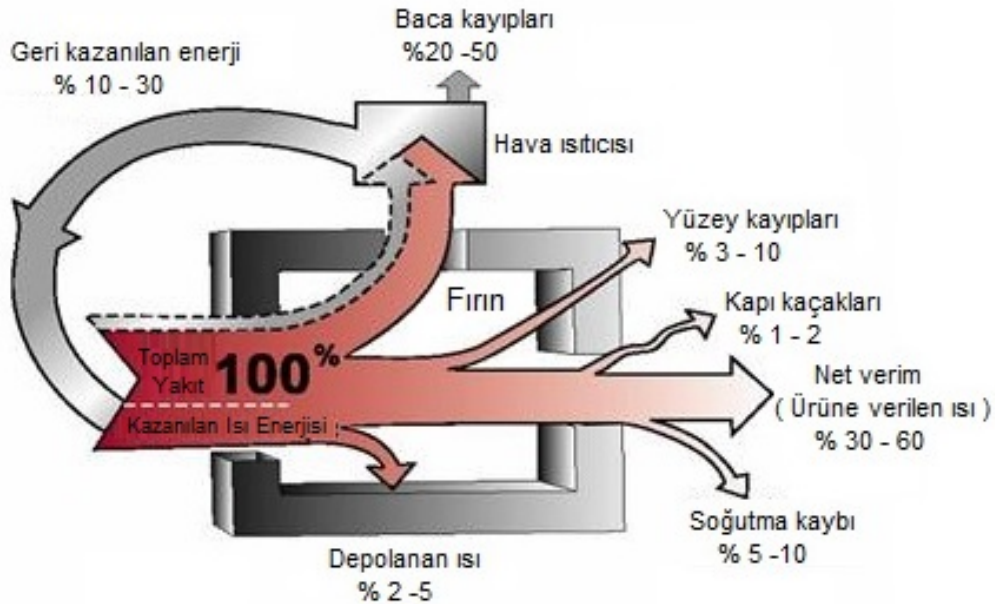


Şekil 3. Kütle Dengesi Bir Örnek [2]

Kütle dengesinin kurulmasında, buharlaşma, kimyasal reaksiyon nedeniyle gazlaşan bazı bileşikler gibi konulara dikkat edilmesi gerekmektedir. İşlem gören ürün, ürün içindeki nem, ürünün yerleştirildiği yürüyen taban, araba gibi taşıyıcılar, yakma için kullanılan havadaki nem gibi malzemeler de kütle dengesinde göz önüne alınmalıdır.

Endüstriyel fırınlarda da enerji dengesi hesabında, buhar kazanlarında kullanılan EN 12953-11 standardında bulunan ve daha iyi sonuç veren indirekt metoda benzer bir enerji dengesi metodu kullanılması önerilir. Direkt metot; faydalı enerjinin, yakıtın verdiği enerjiye bölünmesi ile bulunurken EN 12953-11 standardındaki indirekt metot ile sisteme giren enerjiden, kayıpların çıkartılması mantığına dayanır. Direkt metotta faydalı enerjinin ölçümünün çok olması nedeniyle, standartta belirtildiği gibi indirekt metodun doğruluğu, direkt metoda göre daha iyi sonuç verir. Fırınlarda da, EN 12953-11 standardına benzer olarak yakıttan gelen enerjiden, enerji kayıpları çıkartılarak üründe kullanılan proses enerjisi bulunabilir. Ürüne giden proses enerjisi biliniyorsa enerji dengesindeki giren enerjinin çıkan enerjiye eşitlenmesi ile sağlanabilir. Sapma değeri, hesap yapmadan kabul edilen farktan fazla ise ölçüm ve hesaplar kısmi olarak tekrarlanır, kabul edilen sapmanın altına indirilir.

Fırına giren enerji ile oluşan fırın içindeki endotermik ya da ekzotermik reaksiyonlar sonucu malzemede değişen nem miktarı, yakma havasından gelen nem, fırına giren ürün ile fırından çıkan ürün arasındaki ağırlık değişimi, fırına giren ve fırından çıkan ürün ya da taşıyıcının sıcaklıkları, ürün taşıyıcı ve fırın duvar izolasyon malzemesinin özgül ısısı, baca gazı kombinasyonu, yakıtın özgül enerjisi, gaz yakıtların basıncı, fırın basıncı, fırın kapaklarından kaçan ya da fırın kapaklarından giren hava, fırın kapak ya da bacasından kaçan radyasyon enerjisi, fırın duvarlarından kaybolan iletim, taşınım ve ışınım kayıpları gibi parametreler önem kazanmaktadır. Şekil 4' de Süreksiz çalışan bir fırının enerji dengesi Sankey diyagramı ile gösterilmiştir.



Şekil 4. Süreksiz Çalışan Fırınlarda Enerji Dengesi Örneği [2]

Süreksiz (kesikli) çalışan fırınlarda enerji dengesinin belirlenmesi, sürekli çalışan fırınlara göre daha karmaşık bir süreç içerir. Sürekli fırınlarda zamandan bağımsız olarak tüketilen enerji, kayıp enerjiler zamanda bir düzgünlük gösterirken, süreksiz fırınlarda genellikle değişik zaman dilimlerinde farklı bir ısınma eğrisi, maksimum sıcaklıkta kalma ve değişik zaman dilimlerinde farklı bir eğimle soğuma süreci gözlemlenir.

Süreksiz çalışan fırınlardaki ısınma yüksek sıcaklıkta durma ve soğuma eğrisini ne kadar çok parçaya ayırırsak, ayrılan parçalar kendi içinde enerji dengesi hesaplanırsa, toplam enerji dengesindeki doğruluk o kadar hassas olur. Isınma ve soğuma bölümlerinin ayrıca ikiye farklı bölüme ayrılmasının nedeni, farklı fırın sıcaklıklarında fırın beklerinin farklı güçlerde çalışması, baca gazı sıcaklıklarının farklı olması nedeniyle baca kaybının değişmesi ve yüzey sıcaklıklarının değişmesi ile yüzey (cidar) kayıplarının değişmesidir.

Fırınlr, prosesin özelliklerine göre, ısınma periyotunun genelinde tam ya da yüksek kapasite ile çalışır. Yine en yüksek sıcaklıkta sabit kaldığı periyotta yüksek kapasitede çalışır. Ancak soğuma periyotunda ise çalışma düşük kapasite ile olur ya da hiç çalışmaz. Hatta bek fanları ile fırın içine ortam sıcaklığında hava verilerek fırının daha çabuk soğuması sağlanabilir.

Bütün bu verilere dayanarak sürekli fırınlarda, sürekli rejime girmiş fırın bir kez enerji dengesi sağlanırken, süreksiz fırınlarda bu işlem en az üç, mümkünse üç seferden fazla ısınma, yüksek sıcaklıkta kalma ve soğuma süreçlerinde iş-enerji dengesi işlemi yapılması gerekmektedir.

4. KÜTLE VE ENERJİ DENGESİ

Enerji dengesini hesaplayabilmek için öncelikle, süreksiz fırınlarda kütle dengesinin hesaplanması gerekmektedir. Süreksiz fırınlarda, belirlenen periyotlar içinde, fırına giren kütle ile fırından çıkan kütlelerin eşitliğinin gösterilmesi gerekir. Kütle ve enerji dengesi için yapılacak işlemleri madde madde yazılırsa;

Süreksiz fırınlarda kütle dengesi eşitliği çıkarılırken gözden kaçırılmaması gereken konular arasında, fırına ısı işlem için konulan malzemelerin yanında,

1. Konulan malzemelerin başta olmak üzere fırın içindeki malzemelerde faz değişikliği olup olmadığı, en belirgin örneği malzemelerdeki suyun buharlaşması ve baca gazı ile atılması,
2. Isıl işlem sırasında malzemelerde reaksiyon olup olmadığı, eğer oluşan reaksiyon varsa, reaksiyonunun ekzotermik ya da endotermik olduğunun belirlenmesi,
3. Malzemelerin absorbe ettiği gaz ya da sıvı varsa, belirlenmesi

önemlidir.

Fırının enerji dengesi hesabı için fırın kütle dengesinde kütleleri belirlenen malzemelerin ısınma ısıları, hangi sıcaklık dereceleri arasında değiştiği varsa buharlaşan su, solvent, absorbe edilen maddelerle oluşan reaksiyonların ne olduğunun bilinmesinin yanı sıra;

1. Fırın içinde oluşan endotermik ya da ekzotermik reaksiyonlar, faz değişimi, özellikle suyun buharlaşması, yakma havası ve yakıtla giren nem,
2. Malzemelerin yüklendiği araba yürüyen taban gibi taşıyıcıların kütlesi, arabanın yapıldığı malzeme, ısınma ısısının belirlenmesi,
3. Fırın yalıtım malzemesinin belirlenmesi, ısı işlem başlangıç ve sonunda ortalama sıcaklığının bilinmesi gerekir. Genellikle yalıtım malzemesinin fırın içi yüzeyinin sıcaklığı ile fırının dışına bakan yüzeyinin sıcaklığının ortalamasını yaklaşık olarak yalıtım malzemesinin ortalama sıcaklığını vermektedir.
4. Yüzey kayıpları için fırının zemine sabitlendiği ayaklardaki iletimle ısı taşınımını belirlemek için ayak malzemesi ve sıcaklığını ölçmek gereklidir. Eğer ayaklarda kauçuk malzeme gibi bir yalıtım malzemesi varsa taşınım ile ısı transferi ihmal edilebilir.
5. Çevre şartlarına da bağlı olarak, fırın yüzey sıcaklığı arttıkça ısı ile olan ısı kaybının toplam ısı kaybında oranı artar. Hem ısı yalıtım hem de taşınım ile ısı kaybı artar, bununla birlikte ısı yalıtım ile olan ısı kaybı fırın Kelvin cinsinden fırın yüzey sıcaklığının dördüncü kuvveti ile arttığından, ısı yalıtım ile olan enerji kaybı belirginleşir. Artan yüzey sıcaklığıyla, yüzeye yakın havanın hızı artar ve akışın şekli değişmeye başlar, bu durum da ısı taşınım kat sayısını artırır. Fırının bulunduğu ortamdaki hava akış hızını da göz önüne almak gerekmektedir. ısı yalıtım ile yüzeyden ısı kaybı hesabını yaparken, fırın yüzey sıcaklığı ile fırının bulunduğu ortamı kapsayan duvar yüzey sıcaklıkları da önemlidir.
6. Baca kaybını ölçerken, baca gazı sıcaklığı, kompozisyonu ve debisi çok önemlidir. Baca gazı kompozisyonundan, fırın yakıcılarının hava fazlalık katsayısı belirlenir. Fırın içi sıcaklık değişkenlik gösterdiği için, buna bağlı olarak baca gazı sıcaklığı da aynı yönde değişiklik gösterir. Genellikle ısı işleminin kontrolü için fırın içi sıcaklığı sürekli kontrol edilir. Eğer baca gazı sıcaklığı sürekli ölçülemiyorsa fırının sıcaklık diyagramı içinde bazı noktalarda baca gazı sıcaklığı ölçülür ve fırın içi sıcaklık farkı hesaplanarak bir periyottaki baca gazı sıcaklık diyagramı oluşturulabilir. Yüksek sıcaklıklardaki baca gazlarının bacaya zarar vermesini önlemek için hava ile karıştırılarak bacaya verilebilir. Bu durumda bacaya giden karışım

gazında; fırından çıkan yanmış gazla, hava karışımı bir çevrim boyunca değişecektir. Fırınının soğuma anlarında kontrollü bir soğuma isteniyorsa fırın içine verilen hava miktarı sıcaklık kontrollü olacağından, bu süreçte bacadan sadece hava da atılsa, atılan hava miktarı değişken olacaktır ve bu durumda hesapları zorlaştıracaktır.

7. Gaz yakıt yakılan fırınlarda yakılan gazın basıncı ve sıcaklığı gerçek yakıt miktarını bulmak için çok önemlidir. Özellikle beklerin tam güçte ya da düşük güçte çalıştığı zamanlarda gaz basıncı değişebilir. Bu durumda sayaçta okunan değer ile düzeltilerek bulunan değer kısa süre içinde değişebilir. Gaz yakıtındaki bu basınç değişimi özellikle yüksek sayılabilecek basınçlarda, örneğin bir ve üstü cihaz basınç sınıflarında daha belirgin olarak gözlemlenir.
8. Sürekli fırınlarda kapak açılma esnasında, negatif basınçta çalışan fırınlara ortamdaki hava girerken pozitif basınçta çalışan fırınlar da ise fırın içinden ortama hava kaçar. Her iki durumda büyük enerji kaybına neden olur ve bu durumda kaybın ölçülmesi gerekir. Aynı durum iyi yalıtılmayan süreksiz fırınlarda ve her iki fırının bacalarında da oluşabilir.
9. Özellikle sürekli fırın kapakları açıldığı anda kapaklarından sadece taşınım, basınçla oluşan gaz giriş-çıkışının yanı sıra yüksek fırın içi sıcaklıklarından dolayı kapak ışıınım kaybı diyebileceğimiz bir kayıp oluşur. Bu kayıp hesaplanması kolay bir kayıptır ve fırın cidarı ışıınım kaybından farklı kayıptır.

Hesap kolaylığı için tavsiye edilen üretim sürecini, ısınma, yüksek sıcaklıkta tutma ve soğuma olarak en az üçe bölmektir.



Şekil 5. Süreksiz Çalışan Fırınlarda Sıcaklık-Zaman İlişkisi [2]

5. SÜREKSİZ FIRINLARDA DEĞİŞEN DEĞERLERİN ÖLÇÜMÜ

Bir fırın sisteminde ölçüm değerlerinin alınması için, sistemin nasıl çalıştığını anlaşılması, ölçüm cihazlarının belirlenmesi sonucunda kütle dengesi ve ısı dengesi oluşturulması için ölçüm noktaları, ölçüm için hangi yöntemin uygulanacağı ve hangi ölçümlerin aynı anda yapılacağı gibi konulara karar verilmesi gerekir. Örneğin her bir çevriminde aynı miktarda ürün yüklenmeyen, çevrimden çevrime aldığı ürünü değişen fırın çevrimlerinde hemen hemen her değer aynı ölçümde alınma zorunluluğu oluşur.

Öncelikle prosesin ve fırının nasıl çalıştığını anlayarak oluşturulan kütle ve ısı dengesi için değerlerin nereden ve nasıl ölçüleceğine karar verilmesi gerekmektedir. Daha sonra hangi ölçümlerin hangi sıklıkta alınacağına karar verilir. Ölçüm yerleri ve ölçüm değerlerinin birbirini kontrol edecek şekilde, aynı değerleri birden çok kez ölçülmesi tercih edilebilir. Ölçüm cihazlarına karar verildikten sonra, aynı anda alınacak ölçümler ve bu ölçümler için gerekli olan minimum personel sayısı bulunur. Bir ölçüm sorumlusu ölçüm anında ölçüm yerinde bulunmalıdır.

Ölçüm yapan personel için oluşturulan veri giriş sayfalarına ölçüm değerlerini zamanında girmelidir. Bazı durumlarda her saat başı ölçüm alınması ve değerlerin girilmesi yeterli olmayabilir. Bununla birlikte ölçüm zamanından daha önce ve geç alınan ölçümler sorun yaratabilir. Bunun yerine ölçümlerin hangi saatte yapıldığı, ölçüm yapan personel tarafından veri girişinde yazdırılmalıdır. Bu şekilde yapılan ölçümler, enterpolasyon ya da ekstrapolasyon yöntemleri ile eşit aralıklı sonuçlar duruma getirilebilir.

Sürekli çalışan fırınlarda ölçüm değerleri, fırın sürekli rejime girdikten sonra kısa bir zaman diliminde alınması tavsiye edilir. Kontrol için ölçüm sayısı artırılabilir ama sürekli rejimdeki bir fırındaki değerler pek değişmez. Ancak fırını bu değerlerde tutan beklerin, yanma süresince baca gazı kompozisyonu ölçmek dikkat edilmesi gereken konulardan biridir.

Süresiz çalışan fırınlarda ise ölçüm belirli bir sıklıkta yapılmalıdır. Özellikle fırın sıcaklığının ısınma, yüksek sıcaklıkta kalma ve soğuma periyodlarının belirlenmesi gerekir. Bazı durumlarda ise bu üç periyodun da kendi içinde alt bölümleri olabilir. Her bir fırın için bu periyot ve alt periyotlarının süreleri ve karakterleri belirlendikten sonra, her bir periyot ve gerekiyorsa alt periyot için ısı dengesi ayrı ayrı oluşturulmalıdır. Örnek olarak alınan süresiz bir fırındaki kümülatif süre dakika olarak, doğalgaz sayacından okunan değerlerin değişimi, saatlik olarak sayacın ölçtüğü doğalgaz değeri ve doğalgazın manometreden okunan basınç değerleri Tablo 1’ de gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak fırında bir saatte kullanılan doğalgaz değeri hesaplanabilir.

Tablo 1 Örnek Endüstriyel Fırında Tüketilen Doğalgaz İle İlgili Değerler

Çevrimin Başlangıcından Sonra Geçen Süre (dakika)	2	52	97	212	297	407	447	477	523	528	618	653	671	701	720	774	796	856	946
Doğalgaz Sayacı Göstergesi (m ³)	167488	167488	167489	167505	167535	167605	167632	167652	167685		167734	167749	167749	167749	167749	167749	167749	167749	167749
Sayaç Göstergesindeki Fark (m ³)		0	1	16	30	70	27	20	33		49	15	0	0	0	0	0	0	0
Manometrede Okunan Basınç (bar)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,633	0,558	0,672	0,643	0,78		0,858	0,873	0,91	0,919	0,931	0,955	0,967	0,962	0,975

Tablodaki kırmızı bölge fırının ısındığı, beklerin çalıştığı, mavi bölge ise fırının soğuma bölgesini gösteren beklerin çalışmadığı zaman dilimini göstermektedir. Tabloda bu iki bölümü ayıran fark, doğalgaz sayacının çalışması ve durmasıdır. Fırının çalıştığı süreden sonraki dakikaları gösteren ikinci satırda, 618. dakika ile 653. dakika arasında bir yerde beklerin durduğu görülmektedir. Böylece bu iki farklı bölgeyi belirlemek kolay olmaktadır. 618. dakika sütunu ile 653. dakika sütunu oranlandığında, 653. dakika sütununun ısıtma bölgesinde olduğu hesaplanmıştır. Daha sonra bu iki bölgeye bölünen bir çevrim, kendi içinde daha çok benzer parçaya bölünerek çevrim karakteristiği daha belirgin yapılmalıdır. Çevrimin üçe bölünmüş hali Tablo 2’ de görülmektedir. Çalışmalarda, fırın içi sıcaklığını da hesaba kattığımız beş parçaya bölünmesini daha uygun hale geldiği görülmüştür.

Tablo 2 Fırın Çevriminin Benzer Şartlarda Bölünmesi

Çevrimin Başlangıcından Sonra Geçen Süre (dakika)	2	52	97	212	297	407	447	477	523	528	618	653	671	701	720	774	796	856	946	
Doğalgaz Sayacı Göstergesi (m ³)	167488	167488	167489	167505	167535	167605	167632	167652	167685		167734	167749	167749	167749	167749	167749	167749	167749	167749	
Sayaç Göstergesindeki Fark (m ³)		0	1	16	30	70	27	20	33		49	15	0	0	0	0	0	0	0	
Manometrede Okunan Basınç (bar)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,633	0,558	0,672	0,643	0,78		0,858	0,873	0,91	0,919	0,931	0,955	0,967	0,962	0,975	
Yakıt Tüketimi (Nm ³ /dakika)		0	0,043711	0,273671	0,848359	1,655517	1,56483	1,5872	1,52537		1,098518	0,856726	0	0	0	0	0	0	0	
	Ön Isıtma Bölgesi					Kuvvetli Isıtma Bölgesi						Soğuma Bölgesi								

Başlangıçtan itibaren sonra doğalgaz ve manometre değerlerinin düzenli olmayan aralıklarla okunduğu görülmektedir. Hesapları yapabilmek için yaklaşık 16 saat süren çevrimde okunan değerlerin eşit aralıklı zaman dilimlerine ayrılması gerekmektedir. Bu durumda oluşan Tablo 3 aşağıda görülmektedir.

Tablo 3. Ölçülen Yakıt Değerlerinin Eşit Aralıklı Saat Dilimlerine Göre Hesaplanması

Ölçüm Yapılan Saat Dilimini Temsil Eden Saat	7,30	8,30	9,30	10,30	11,30	12,30	13,30	14,30	15,30	16,30	17,30	18,30	19,30	20,30	21,30	22,30
Ölçüm Yapılan Saat - Başlangıçtan İtibaren (Isınma Dilimi - Isınma/Soğuma)	1. h ls	2. h ls	3. h ls	4. h ls	5. h ls	6. h ls	7. h ls	8. h ls	9. h ls	10. h ls	11. h ls	12. h s	13. h s	14. h s	15. h s	16. h s
Sayaç Göstergesindeki Fark (m ³)	5,00	6,50	15,30	16,20	20,60	30,20	37,70	35,60	56,00	90,90	23,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fatura ile karşılaştırma sonucu düzeltme (0,942 ile düzeltildi)	4,71	6,123	14,413	15,26	19,405	28,448	35,51	33,54	52,75	29,108	21,949					
Manometrede Okunan Basınç-Cihaz Basıncı (bar)	0,90	0,90	0,90	0,82	0,59	0,60	0,55	0,78	0,82	0,87	0,90					
Mutlak Basınç (bar)	1,90	1,90	1,90	1,82	1,59	1,60	1,55	1,78	1,82	1,87	1,90					
Tüketilen Gerçek Doğalgaz miktarı (Nm ³)	8,34	10,84	25,51	25,88	28,75	42,41	51,29	55,62	89,46	50,58	38,86					

Tablo 3'te ölçüm yapılan saat dilimini temsil eden zaman aralığı, örneğin saat 7.00-8.00 saat dilimini, saat 7.30 ifade etmektedir. Hesaplama yapılan zaman aralıkları ne kadar küçültülürse, yapılan hata o kadar az olacaktır. Örnek hesapta bir saatlik zaman dilimi hesapların doğruluğu için yeterli olduğu görülmüştür. Bir alt sırada ise, fırının çalışma periyodunda kaçınıcı saatte olduğu ve ısınma ya da soğuma durumunda olduğu belirtilmektedir. Düzensiz zaman aralıklarında alınan ölçüm değerleri, interpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemleri kullanılarak, saatlik dilimler haline tek tek getirilmiştir[3].

Ölçülen değerler, uzun süreli çevrim sayısı ve fatura değerleri ile karşılaştırılmış ve arada yaklaşık %6 kadar fark olduğu görülmüştür. Doğalgaz sayacı, manometre ve ölçüm saatlerinin tam tabloda yazılan zamanlarda olmaması, doğalgaz sıcaklığının ölçüm sıcaklığından farklı olması, fatura hesabındaki hatalardan olduğunu düşündüğümüzden nedenlerden oluşan bu fark, fatura değeri temel alınarak düzeltilmiştir.

5.a. Ölçüm Değerleri İle Hesaplanması

Ölçüm aralıkları eşit değilse, ölçümler eşit aralıklara getirilecek şekilde enterpolasyon ya da ekstrapolasyon yapılmalıdır. Çizilen basit grafiklerle belirgin ölçüm ya da hesap hatalarının olup olmadığı kontrol edilmelidir. Ölçüm değerleri arasında mantık dışı farklı bir ölçüm hatalarının diyagram değerlerine çekilmesi tavsiye edilir.

5.b. Enerji Dengesi Hesabındaki Enerji Kayıpları

5.b.1. Baca Gazı Kayıpları Hariç Diğer Enerji Kayıpları

Fırında kullanılan enerji miktarlarının hesaplanması, doğalgazın yanması ile üretilen ısı enerjisini hesaplamaktan çok daha karışıktır. Bu tür fırın ve kazanlardan iki temel kayıp olmaktadır. Bunlar baca kaybı ve cihaz yüzey (kabuk - cidar) kaybını oluşturan taşınım ve ışınlama kaybıdır. Fırının zemine bağlantı özelliğinden dolayı fırından yere iletim kaybı ihmal edilebilir. Ayrıca çevrimleri hızlandırmak için fırınların kapakları fırın sıcaklığı 150-250°C'de açılır. Fırın kapaklarının fırın tam soğumadan açılması sonucunda sıcak ürünlerden, ürünlerin yerleştirildiği arabadan, yalıtım malzemesinden ve fırın tuğlalarından ortama ısı yayılır.

Fırın kapakları açıldığında, fırın sıcaklığının ortalama 200°C civarında olduğu gözlemlenmiştir. Bu sıcaklıkta fırından işlem gören ürün, ürünü fırında taşıyan araba, arabanın yalıtım malzemesi ve fırını yalıtım için kullanılan özel tuğlalar ortam sıcaklığına kadar soğumaktadır. Fırın dışına alınan ürün, araba ve arabanın yalıtım malzeme sıcaklığı 200°C, fırın duvar yalıtım malzemesi için fırın içi sıcaklığı ile ortam sıcaklığının ortalama sıcaklığı olarak 115°C olduğu kabul edilerek hesap yapılabilir.

Fırına giren ürün ile çıkan ürün ağırlıkları uzun bir süre ölçülmüş, aralarında ağırlık farkı ortalama %7 olarak bulunmuştur. Bu fark, ürün bünyesindeki suyun buharlaşmasından kaynaklandığı kabul edilmiştir[4].

Fırın yüzey kayıpları (zarf kaybı) için fırının dört yan yüzeyi ve üst yüzeyinden yapılan sıcaklık ölçümleri, kanallarda ortalama hız ölçümünde de yapıldığı gibi dörtgenlere ayrılarak ölçüm noktaları belirlenmiştir. Bir yüzey termometre ile düzenli aralıkla ölçülen sıcaklıklar için Nusselt Sayısı 'dan ısı

taşıyım katsayısı bulunmuştur. Her saat dilimi içinde değişen sıcaklıkla, fırın yüzeyindeki hava akımının laminer ya da türbülanslı olması durumuna göre değişen ısı taşıyım katsayısı ile hesap yapılmıştır. Fırınların alt yüzeyinin sıcaklıkları ölçülemediği için sadece tahmin edilmiştir. Hesaplanan örneğe benzetilerek diğer fırınlar için hesap yapılmıştır. Sadece bir fırının yan yüzeyi ile ortam sıcaklık farkı Tablo 4 de gösterilmiştir. Seçilen örnek fırında ölçülen en yüksek ortalama sıcaklık farkı 36°C olmuştur.

Tablo 4. Fırın Yüzey Sıcaklıkları ve Ortam Sıcaklıkları Farkının Çevrim Süresince Değişimi

Ölçüm Yapılan Saat Dilimini Temsil Eden Saat	7,30	8,30	9,30	10,30	11,30	12,30	13,30	14,30	15,30	16,30	17,30	18,30	19,30	20,30	21,30	22,30
Ölçüm Yapılan Saat – Başlangıçtan İtibaren (Isınma Dilimi -Isınma/Soğuma)	1. h ls	2. h ls	3. h ls	4. h ls	5. h ls	6. h ls	7. h ls	8. h ls	9. h ls	10. h ls	11. h ls	12. h s	13. h s	14. h s	15. h s	16. h s
Fırın Yan Yüzey Sıcaklığı – Ortam Sıcaklığı (°C)	0	0	0	0	2	5	10	17	29	36	34	32	30	26	22	18

Fırın iç basıncı, başlangıçta atmosfer basıncına çok yakındır. Sürekli fırınlarda fırın içi basınç, süresiz fırınlara göre daha önemlidir. Sürekli fırınlarda fırın içi basınç pozitif olduğunda malzeme giriş ve çıkışında kapaklar açıldığı için kapaklardan sıcak duman gazları kaçar. Bunun tersi durumda, fırın içi basınç negatif olduğunda bu sefer ortam sıcaklığındaki hava, fırın içine girer ve fırını soğutur. Ayrıca fırın kapaklarından ışıyım kaybı da hesaba katılması önemlidir. Özel durumlar dışında süresiz fırınlarda bu tip kapaklardan ışıyım kayıpları ya yoktur ya da son derece küçüktür. Örneğin süresiz cam ergitme fırınlarında küçük karıştırma boşlukları olabilir.

5.b.2.Duman Gazı Kayıpları

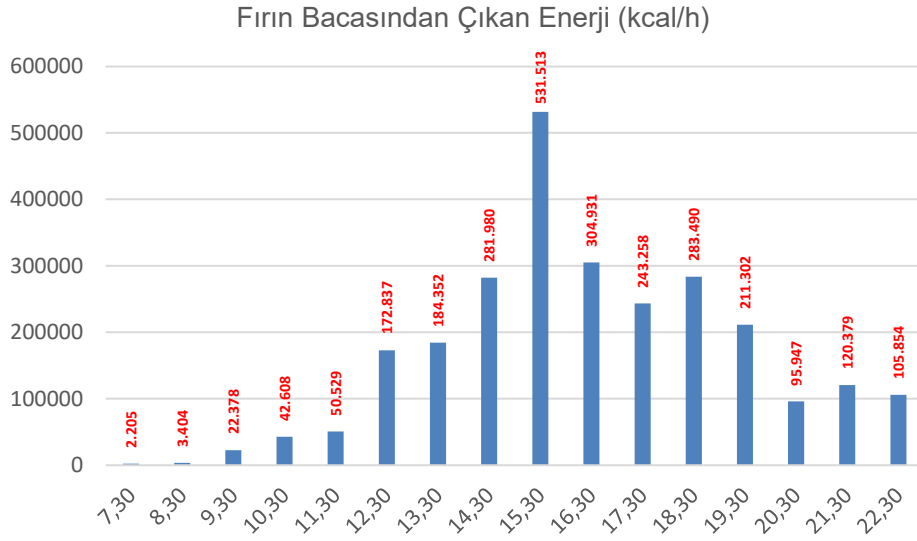
Fırın kaybı hesabında önemli olan baca sisteminin kayıplarını hesaplanmasıdır. Baca sisteminin korunması amacıyla duman gazı, hava ile karıştırılarak sıcaklığı düşürüldükten sonra bacadan atmosfere atılır. Ayrıca baca sisteminden atmosfere atılan ısı enerjisi, sağlanabilecek tek kayıp enerjidir. Bu nedenle baca sistemindeki kayıpların hesaplaması konusunda dikkat edilmelidir. Duman gazı ile hesap yaparken önemli olan sadece duman gazı sıcaklığının yanında duman gazının kompozisyonu daha da önemlidir[5]. Zaten yakıt tüketimi olmadığı zaman duman gazı kompozisyonun atmosferik hava kompozisyonu ile aynı olduğu açıktır. Yanma bölümünde ise fırından çıkan duman gazı aynı olmasına rağmen, duman gazının fırın çıkışında farklı oranlarda hava ile karışması, duman gazı ölçümlerindeki kompozisyonunu tamamen değiştirir. Bu durum baca gazı hesabını zorlaştırmaktadır. Fakat bu durum bir kez fırın yakma sistemindeki hava fazlalık katsayısı (λ) hesaplandıktan sonra fırın bacasını soğutmak için baca gazına karıştırılan hava miktarını hesaplamakta kolaylık sağlar[7]. Tablo 5' de Fırın içi sıcaklıkları ve baca sıcaklıklarının çevrim süresince değişimi gösterilmiştir.

Tablo 5. Çevrim Süresince Fırın İçi Sıcaklığı ve Baca Sıcaklığının Değişimi

Ölçüm Yapılan Saat Dilimini Temsil Eden Saat	7,30	8,30	9,30	10,30	11,30	12,30	13,30	14,30	15,30	16,30	17,30	18,30	19,30	20,30	21,30	22,30
Ölçüm Yapılan Saat – Başlangıçtan İtibaren (Isınma Dilimi -Isınma/Soğuma)	1. h ls	2. h ls	3. h ls	4. h ls	5. h ls	6. h ls	7. h ls	8. h ls	9. h ls	10. h ls	11. h ls	12. h s	13. h s	14. h s	15. h s	16. h s
Fırın İçi Sıcaklığı (°C)*	81	142	293	427	572	695	864	966	1047	1067	1069	752	555	448	322	213
Baca Sıcaklığı (°C)	45	63	98	137	195	262	338	457	416	335	347	366	271	189	25	25

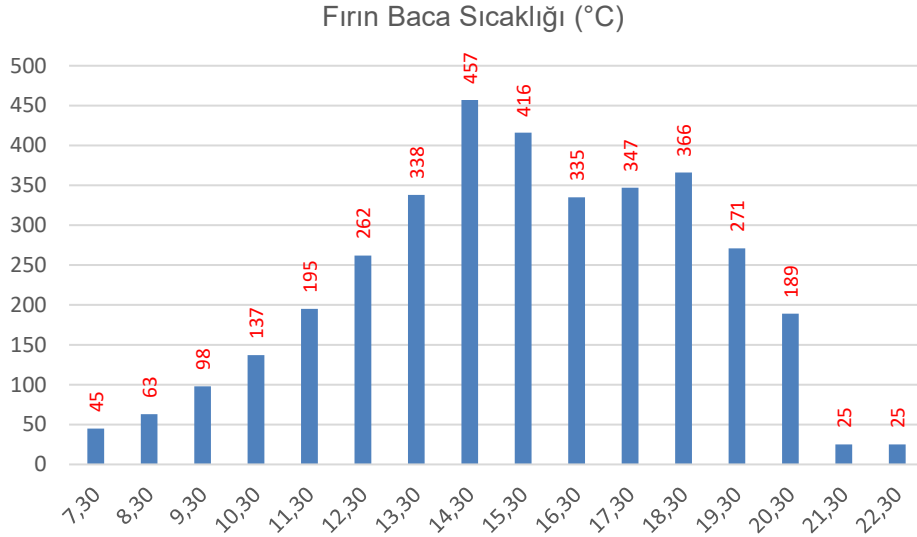
*Üretici gizliliğini korumak için normal bir çevrimdeki fırın içi sıcaklığı değil, bir deneme üretimi fırın içi sıcaklığı verilmiştir.

Baca sistemindeki kayıp, üç yöntem ile hesaplanabilir. Birinci yöntemde, yakılan yakıt debisi ve hava fazlalık katsayısı ile duman gazı kompozisyonunu temel alarak duman gazı debisi bulunur ve buna bağlı olarak duman gazı kaybını hesaplanabilir. İkinci yöntem fırın içi sıcaklığını temel alarak baca sistemi ve ortam sıcaklık hesaplarından, baca sistemindeki boşluklardan giren havayı hesaplayarak baca kaybını bulunabilir. Üçüncü yöntem ise EN 12953-11 standardında da belirtilen yöntemle benzeterek, ısı enerjisi kazanım ve kayıplarının bilançosundan duman gazı kaybını hesaplanmaktadır. Üçüncü yöntem daha az hatalı sonuç verir. Örnek fırın, üçüncü yöntemle hesap edilmiş, birinci ve ikinci yöntemle de kontrol edilmiştir. Baca gazı hesabı konusunda gösterilen bu hassasiyetin nedeni, ısı sağlanacak ana kayıbın baca sisteminde olmasıdır. Şekil 6'de gösterilen duman gazındaki ısı enerjisi kullanılabilen enerji değil, sadece fırın bacasından çıkan enerjidir. İlk dört saat ürün, araba ve yalıtım malzemesinin ısıtılması ve ürün içindeki suyun buharlaşması nedeniyle neredeyse sağlanabilecek çok az enerji vardır. Bu ilk dört saat yüzey kaybı da yoktur.



*Üretici gizliliğini korumak için normal bir çevrimdeki fırın bacasından çıkan enerji değil, bir deneme üretimi bacadan çıkan enerji verilmiştir.

Şekil 6. Fırın Bacasından Kaybolan Isı Enerjisinin Çevrim Süresince Değişimi



Şekil 7. Fırın Baca Sıcaklığının Çevrim Süresince Değişimi

Fırın bacasından atılan ısıdan ziyade baca gazının sıcaklığına bağlı olarak başka bir proseste kullanılabilir ısı enerjisi miktarı dikkate alınmalıdır. Fırın bacası sıcaklıklarının çevrim içindeki değişimi Şekil 7'de görülmektedir.

5.c. Ölçüm Hesaplarının Kontrolü

Ölçüm değerleri ile gerçek durumları karşılaştırmak için en önemli konu, pek yapılmayan ama mutlaka yapılması gereken, hesaplanan değerlerle başka bir yerden alınan örneğin fatura değerlerinin birbirini tutup tutmadıkları çapraz olarak kontrol etmektir. Bu şekilde yapılan hatalar bulunabilir. Gerekirse bazı şüphelenilen ölçümler tekrar alınmalıdır. Ölçüm sonucu hesaplanan değerler ile kontrol değeri arasındaki fark deneyimlerden yararlanılarak bir hata aralığına indirildiğinde hesap bölümü tamamlanmış olur.

SONUÇ

Endüstriyel özellikle sürekli fırınlarda kullanılabilir ısı analiz yöntemleri üzerine yazılmış literatür vardır. Buhar kazanları gibi ısı sistemlerin verimlerini bulmak için basit bilgisayar programları mevcuttur ve bazı kitaplarda hesaplama yöntemleri bulunmaktadır. Bununla birlikte sanayi tesislerinde çok bulunan sürekli ve süreksiz endüstriyel fırınlar gibi ısı sistemlerde enerji tasarrufu için gerekli enerji dengesini çıkarmak için yazılı çalışma azdır. Bu çalışmada, teorik bilgilerimiz ışığında yıllar içinde edindiğimiz deneyimlerle endüstriyel fırın sistemlerinde enerji tasarrufu sağlamak için gerekli ısı dengesinin oluşturulması konusunda kullanışlı kılavuz oluşturmaya çalışılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] JENKINS, B.; MULLINGER, P., (2011). "Industrial and Process Furnaces: Principles, Design and Operation". Butterworth-Heinemann. ISBN 9780080558066.
- [2] http://www.opexworks.com/KBase/Energy_Management/Energy_and_Environment/Material_and_Energy_Balance.htm (14.12.2020)
- [3] SHEPPARD, W. F., (1911). "Interpolation". Pada Chisholm, Hugh (ed.). Encyclopædia Britannica. 14 (11th ed.). Cambridge University Press. pp. 706–710.
- [4]STOECKER W., (2017). "Design Of Thermal Systems 3rd edition", pp304.

ÖZGEÇMİŞ

Barbaros BATUR

1966 İstanbul doğumludur. 1990 yılında İTÜ Makine Fakültesini Makine Mühendisi olarak bitirmiştir. 1995 yılında Marmara Üniversitesinden Endüstri Yüksek Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2002 yılında YTÜ' de Makine Mühendisliği, Isı Proses Dalında doktorasını tamamlamıştır. 2005 yılından beri YTÜ, Makine Bölümünde Öğretim Görevlisi Dr. olarak ders vermektedir. Proses, enerji, ısıtma-havalandırma tesisat konularında çalışmaktadır.

Mustafa Cem Çelik

1973 yılı Edirne doğumludur. 1995 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. 1999 yılında Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Yüksek Lisans derecesi olarak yüksek mühendis olmuştur. 2014 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Doktor unvanını almıştır. 1999 yılından bu güne Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi / Öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Yenilenebilir enerji, hidroelektrik santraller, iç hava kalitesi, karbon ayak izi hesaplamaları konularında çalışmaktadır.

Muammer AKGÜN

1990 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesinden, 1995 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine-Enerji Anabilim Dalından mezun olmuştur. 1992-1998 yılları arasında Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Araştırma Görevlisi olarak, 1998-2013 yılları arasında kazan ve basınçlı kap sektöründe Ar&Ge, Tasarım, Üretim ve Şantiye montaj alanlarında çeşitli projelerde çalışmıştır. 2013-2022 yılları arasında, Bacader Genel Koordinatörü olarak görev yapmıştır. Halen MMO İstanbul Şubesinde Kazan ve Basınçlı Kaplar komisyon başkanlığı yapmaktadır. MMO İstanbul Şubesi bünyesinde yayınlanan "Kızgın Sulu, Kızgın Yağlı, Buharlı Isıtma Sistemleri" kitabının altı bölümünün yazarı ve son üç baskısının da editörü, ISKAV bünyesinde yayınlanan "Endüstri Kazanları" kitabının bir bölümünün yazarı ve "Sıcak Su Kazanları" kitabının üç bölümün yazarı ve kitabın son baskısının editörüdür. İMSAD Yapı Malzemeleri Komisyonu ile birlikte "Yapı Malzemeleri Yönetmeliği Rehber Kitap" ve Çevre Dostu Malzemeler Komisyonu ile "Sürdürülebilir İnşaat



Malzemeleri Sözlüğü" çalışmalarına katkı sağlamıştır. Yayınlanmış pek çok makalesi, teknik yazıları bulunmaktadır.