

# Bir Isıl İşlem Fırınının Termodinamik Analizi

Gülay Ahu Turgutlu<sup>1\*</sup>, Ali Yurddas<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fak., Makine Müh. Bölümü, 45140 Muradiye, Manisa, TÜRKİYE, (0236)2012384, gahuturgutlu@gmail.com , ahu.turgutlu@cbu.edu.tr

<sup>2</sup>Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fak., Makine Müh. Bölümü, 45140 Muradiye, Manisa, TÜRKİYE, (0236)2012379, aliurddas@gmail.com , ali.yurddas@cbu.edu.tr

\*İletişimden sorumlu yazar / Corresponding author

Geliş / Received: 15 Ekim (October) 2015

Kabul / Accepted: 17 Aralık (December) 2015

DOI: <http://dx.doi.org/10.18466/cbujos.16659>

## Özet

Günümüzde küresel anlamda enerji ihtiyacı sürekli olarak artması ile birlikte verimsiz şekilde kullanılan yenilenemez enerji kaynakları da hızla tükenmektedir. Azalan enerji kaynakları ve artan talep dengesizliği nedeni ile de enerji maliyetleri artmaktadır. Yerel kaynaklarla karşılanamayan enerji talebi ülkemizde de önemli dar boğazlara sebep vermektedir. 2014 verilerine göre doğal gaz tüketiminin sadece %1,7'sinin yurt içinde üretilmesi enerjide dışa bağımlılığımızın önemli bir göstergesidir. Küresel ve yerel anlamdaki ekonomik ve çevresel sıkıntılar alternatif enerji arayışlarının yanı sıra özellikle enerji yoğun sektörlerde enerjinin verimli kullanılmasının ne derece önemli olduğuna işaret etmektedir. Bu sebeple bu çalışmada enerji yoğun sektörlerden biri olan bir ısıtma fırınında, enerji kaynağı olarak doğal gaz kullanan atmosfer kontrollü bir ısıtma fırınında termodinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Atmosfer kontrollü fırının kütle, enerji ve ekserji denklemleri tanımlanıp, enerji ve ekserji verimleri çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde geliştirme önerileri değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji, ekserji, atmosfer kontrollü fırın, fırın, ısıtma işlemi

## Thermodynamic Analysis of a Heat Treatment Furnace

### Abstract

With the increase of energy need on our globe, non-renewable energy resources are being rapidly consumed. On account of the reduction of energy sources and the increase of energy demand energy costs increase. Specifically on our country, energy demand that cannot be fulfilled by local resources has great effects for bottlenecks too. One of the important index of foreign source dependency of our country is the local production rate of natural gas which is only 1.7% of the consumption according to 2014 data. Economic and environmental effects refer to how utilization of energy efficiently is important, especially at energy intensive industries, besides investigation for alternative energy resources for both globally and locally. For this reason at this research, a sealed quench furnace which is operated by natural gas at a heat treatment company is thermodynamically analyzed. At this research, mass, energy and exergy equations of the sealed quench furnace are defined and efficiencies of energy and exergy are performed. According to the results improvement potentials are evaluated.

**Key Words:** Energy, exergy, sealed quench furnace, furnace, heat treatment

## 1 Giriş

Günümüzde küresel anlamda enerji ihtiyacı sürekli olarak artması ile birlikte verimsiz şekilde kullanılan yenilenemez enerji kaynakları da hızla tükenmektedir. Azalan enerji kaynakları ve artan talep dengesizliği nedeni ile de enerji maliyetleri artmaktadır. Bununla birlikte fosil yakıtların enerji kaynağı olarak kullanılması ile artan karbon salınımı, küresel ısınmanın etkilerini arttırmaktadır. Tüm bu ekonomik ve çevresel faktörlerden dolayı enerji yönetimi konusunun önemi hızla artmaktadır.

Gürtürk, M. ve arkadaşları (2014) yüksek kapasiteli perlit fırınının enerji ve ekserji verimini tespit etmek amaçlı fırının ısı kayıplarını, tersinmezliklerini ve tasarımını çalışmışlardır. Sırasıyla enerji ve ekserji verimlerini %69 ve %37 tespit etmişlerdir. Fırında gerçekleşen 1,23 denklik oranındaki, yakıtça zengin tepkime sonucu enerjinin %51,84'ü, ekserjinin %32,81'i baca gazı ile atıldığını tespit etmişlerdir [1].

Hosseini, S.E. ve Wahid, M.A. (2014) laboratuvar ölçekli bir fırında metan ile geleneksel yanma ve alevsiz yanmayı ekserji açısından incelemişlerdir. Ekserji yıkımlarını CFD kullanarak farklı denklik oranları, oksijen konsantrasyonları ve seyrelticilerin etkilerini incelemek amaçlı programlamışlardır. Sırasıyla geleneksel ve alevsiz yanma için ekserji verimlerini %75 ve %88 tespit etmişlerdir [2].

Gürtürk ve arkadaşları (2015) gerçek çalışma verilerine dayanarak kıyaslama amaçlı iki ayrı perlit genleşme fırınının ekserjoekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Kompleks termal sistemler için ekserjoekonomik analizin önemini vurgulayacak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu sayede enerji verimsizliklerine ayrılan maliyeti, ekserji kayıpları ve ekserji yıkımları ile tanımlamışlardır [3].

Takla, M. ve arkadaşları (2013) enerji ve ekserji analizini iki gerçek, bir de teorik silikon üretimi prosesi için gerçekleştirmişlerdir. Endüstriyel analizlerini baca gazının değerlendirilmesi ve değerlendirilmemesi durumlarında tekrar etmişlerdir. Her bir durum için ekserji verimini hesaplamışlardır. Baca gazının değerlendirilmemesi durumunda ekserji verimi %33, değerlendirilmesi durumunda ekserji verimi %41, ideal yani teorik durumda ise %51 olarak belirlenmiştir [4].

Seepana, S. ve Jayanthi, S. (2012) pulverize kömür yakıcı için yeni bir oksijen-kömür yanma çeşidini sunmuşlardır. Çalışmalarında karbondioksitçe zenginleştirilmiş baca gazının bir kısmını kazana ön ısıtma uygulayarak, yanma tepkimesi için yollamışlardır. Yeni tasarım ile geleneksel linyit yakıtlı bir güç çevrim tesisine göre %1,6 daha fazla termal verim elde etme ve geleneksel bir fırına göre %9 daha az CO<sub>2</sub> ayırma işlemi yapıldığını belirtmişlerdir [5].

Literatürde, yüksek sıcaklıklarda çalışan perlit geliştirme fırınları, alüminyum ergitme fırınları ve demir-çelik üretimi fırınları ile ilgili ekserji çalışmaları yapılmaktadır, ancak enerji yoğun proseslerden biri olan atmosfer kontrollü fırınlar ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada da bir ısı işlem firmasında enerji kaynağı olarak doğal gazı kullanan atmosfer kontrollü bir fırının gerçek verilerden oluşturulmuş kütle, enerji ve ekserji dengesi analiz edilmiştir. Enerji ve ekserji verimlilikleri çıkartılarak, iyileştirme önerileri sunulmuştur.

## 2 Sistemin Tanıtımı

### 2.1 Araştırmanın Yeri

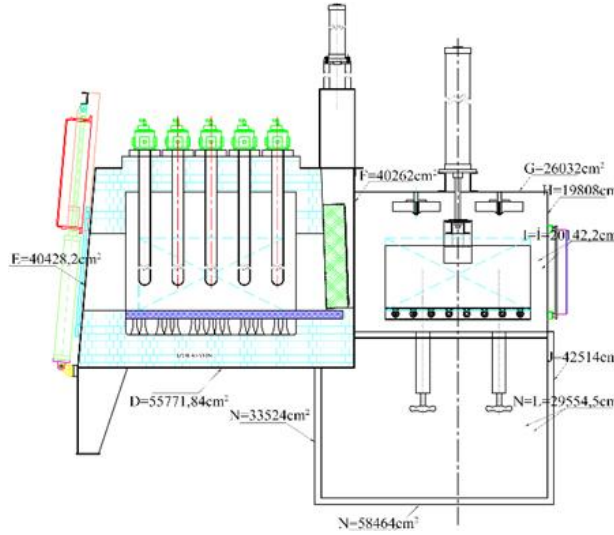
Araştırma Batı Isıl İşlem Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasının, atmosfer kontrollü fırınlar bölümünde gerçekleştirilmektedir. Bünyesindeki atmosfer kontrollü fırınlar, vakum fırını, nitrasyon fırını, alüminyum yaşlandırma fırını, indüksiyon ünitesi ile Türkiye'nin dört bir yanına hizmet vermektedir. Firmada yedi adet atmosfer kontrollü fırın bulunmaktadır ve toplam doğal gaz tüketiminin %83'ünü bu fırınlar gerçekleştirmektedir. Sementasyon, ıslah, karbonitrasyon, normalizasyon, karbon emdirme, ferritleme tavlama, gerilim giderme, yumuşatma, izotermik tavlama proseslerinin gerçekleştirildiği atmosfer kontrollü fırınların en büyük özelliği tam otomasyon sistemine sahip olmalarıdır [6].

### 2.2 Atmosfer Kontrollü Fırının Özellikleri

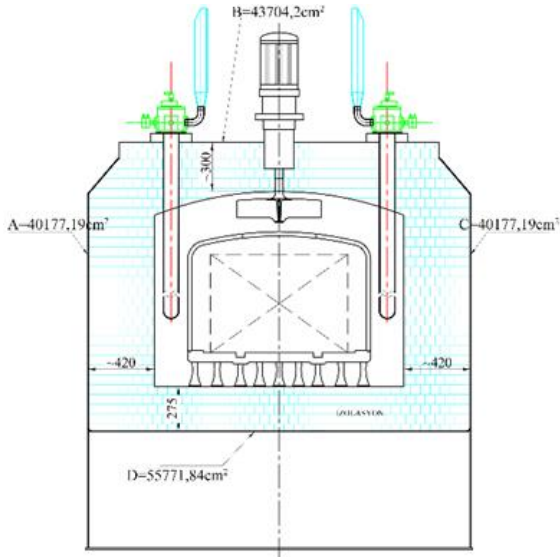
Atmosfer Kontrollü Fırın adını kontrollü atmosfer altında çalışması özelliğinden alır. Koruyucu atmosfer (endo gaz karışımı) sayesinde ısı işleme giren parçaların yüzeyinde oksidasyon engellenebilmektedir. Aynı zamanda karbon potansiyeli de koruyucu atmosfer (endo gaz karışımı) sayesinde ayarlanabilmektedir.

Çalışmanın devamında Atmosfer Kontrollü Fırın'dan 'AKF' olarak bahsedilecektir.

AKF Şekil 2.1'de görüldüğü gibi ana iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım ısıtma kısmı, ikinci kısım ise soğutma kısmı olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1 ve Şekil 2'de fırının dış yüzey alanları A'dan N'ye kadar kodlanmıştır ve yüzey alanı ölçüleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Atmosfer kontrollü fırın kesit-yan görünüş [7]



Şekil 2. Atmosfer kontrollü fırın kesit-ön görünüş [7]

Çizelge 1. AKF yüzey alanları

Kod	Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> )	Kod	Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> )
A	4,017	I	2,014
B	4,370	İ	2,014
C	4,017	J	4,251
D	5,577	K	2,955
E	4,042	L	2,955
F	4,026	M	5,846
G	2,632	N	3,352
H	1,980		

Isıtma kısmına Çizelge 2'de içeriği belirtilen endo gaz sabit debide verilmektedir. Endo gazın yanı sıra ısıl işlem göreceği parçaya ve istenilen mekanik özelliklere göre değişen oranlarda doğal gaz, hava, azot ve amonyak otomatik kontrol üniteleri ile fırın atmosferine verilmektedir.

Çizelge 2 Endo gaz içeriği [7]

Gazın Cinsi	Hacimsel Oran
CO	20
H <sub>2</sub>	40
N <sub>2</sub>	40

Fırın çalışırken iki kısım arasındaki sızdırmaz kapı, kapalı şekilde tutulmaktadır. Bu sayede ısıtma kısmına verilen yukarıda bahsi geçen gaz karışımının ve ısıtma kısmındaki yüksek ısının soğutma kısmına geçişi önlenmiş olur. Fırının ısıtma kısmında; bir adet gaz besleme sistemi, on adet yakıcı ve bir adet fan bulunmaktadır. Gaz besleme sistemi ile ortama sabit debide ve istenilen konsantrasyonda gaz karışımı verilmektedir ve böylelikle ortamın karbon konsantrasyonu istenilen değere getirilmektedir. Yakıcılar yardımı ile doğal gaz ve hava uygun miktarda karıştırılarak fırına ısı enerjisi sağlanmaktadır.

Fırında istenilen sıcaklığa ulaşmak için yakıcılar, istenilen karbon konsantrasyonuna ulaşmak için ise gaz besleme sistemi açık tutulur. Parçalar üzerindeki ışınlı kaynaklı heterojen ısı dağılımını engellemek için parçalar mufla (muffle) adı verilen alüminyum esaslı seramik malzemeden yapılan koruyucu bir kafes içerisinde muhafaza edilir. Bu kafes sayesinde ısıl işleme giren şarj ile ısı kaynağının arasına ince bir duvar girer ve şarjın radyasyon ile ısınması önlenir. Bunun yanı sıra sürekli olarak çalışan

fan da gaz karışımının ve ısının homojen olarak dağılmasına katkıda bulunur.

Şarjın istenilen sıcaklık aralıklarında ve gaz konsantrasyonunda yeterli süre bekletilmesinin ardından ısıtma kısmı ile soğutma kısmı arasındaki kapı açılır. Bu kapının açılması ile birlikte şarj çok hızlı bir şekilde soğutma kısmına taşınsa da ısının bir kısmı ve ısıtma kısmındaki gaz karışımının bir kısmı soğutma kısmına transfer olur. Taşınan gaz zehirli bir gaz olduğu için soğutma kısmındaki bacadan dışarı yakılarak atılır. Şarjın soğutma kısmına taşınması ile birlikte aradaki sızdırmaz kapı kapanır.

AKF'de soğutma, havada veya yağda gerçekleştirilmektedir. Fırının soğutma kısmında iki adet fan, iki adet karıştırıcı ve bir adet asansör mekanizması bulunmaktadır. Havada soğutma için zincir mekanizması ile mufla içerisinde taşınan şarj, fanlar yardımı ile soğutulurken, yağda soğutma için uygun sıcaklıkta bekleyen yağın içerisine daldırılmaktadır ve şarjın yağda daldırılması ile birden ısınan yağın karıştırıcılar yardımı ile soğuması sağlanmaktadır.

### 2.3 Atmosfer Kontrollü Fırın ile Sementasyon Süreci

Araştırmanın gerçekleştirildiği atmosfer kontrollü fırınlarda farklı ısıl işlem tipleri uygulanmaktadır. Bununla birlikte yaygın olarak sementasyon ve normalizasyon uygulamalarında fırının kullanımı tercih edilmektedir.

Sementasyon sürecinde amaç; yüzeye karbon emdirerek sertlik sağlarken, iç kısımlardaki sünekliği korumaktır. Bu amaçla ısıl işlem göreceğ parça firmaya girişinden itibaren iş akışı aşamaları sırasıyla; giriş kalite kontrol, aparatlama, ön yıkama, ön ısıtma fırını, atmosfer kontrollü fırın, yıkama, ara sertlik kontrolü, meneviş, sertlik kontrolü, mikro yapı kontrolü, final kalite kontrol ve sevkiyattır.

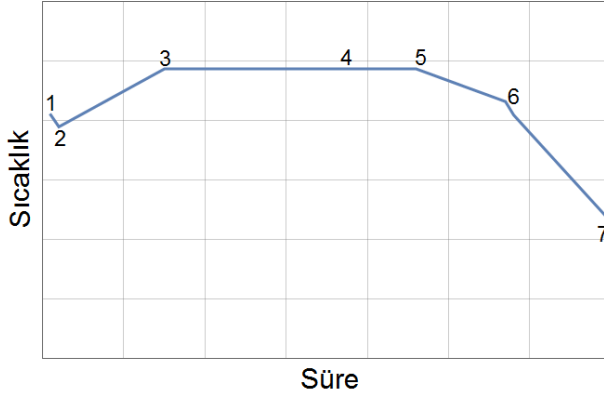
Sementasyon göreceğ parça, giriş kalite kontrol, aparatlama ve ön yıkama aşamalarından sonra ön ısıtma fırınına girmektedir. Ön ısıtma fırınında yaklaşık 500 °C sıcaklığa getirilen parça; parçanın et kalınlığına, istenilen sertliğe ve sertlik derinliğine göre farklı fırın sıcaklığı, ısıtma süresi ve karbon oranına ayarlı AKF'ye girmekte ve fırın içerisinde sırasıyla aşağıdaki adımlardan

geçmektedir. Bu adımlar grafiksel olarak Şekil 3'te tanımlanmıştır.

Sementasyon için AKF adımları;

1. Parçalar önceden en az 750°C'ye ısıtılmış fırının ısıtma kısmına alınır. Bu sırada parçalar ön ısıtma sıcaklığındadır.
2. Fırına giren parçalar fırın sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta çıktığı için fırının sıcaklığının bir miktar düşmesine sebep olur. Bu düşüş; parçanın ön ısıtma sıcaklığına ve parçanın kütlesine bağlı olarak değişir. Bu sırada fırına sürekli olarak sabit debide gaz karışımı sağlanır ve fan sürekli olarak çalıştırılır.
3. Düşen fırın sıcaklığı yakıcıların sürekli çalıştırılması ile proses dizaynına göre karar verilen 860°C ile 1000°C arasında değişen bir difüzyon sıcaklığına çıkarılır. Parçaların ve fırının denge sıcaklığına ulaşması sağlanır. Difüzyon sıcaklığında, hedef sertlik derinliğine göre değişen difüzyon süresi kadar beklenir. Isıtma sırasında işleme sınırının aşağısında kalmak koşulu ile karbon potansiyeli yükseltilir. Bu adıma Zengin Karışım Verme (BOOST) adımı denir.
4. Sıcaklık bir önceki aşamadakiyle aynı olacak şekilde sabit tutulur ve karbon oranı %0,65-%1,00 arasına düşürülür ve efektif sertlik derinliğine göre tasarlanmış difüzyon süresi kadar beklenir.
5. Birden soğuma ile parçanın deformasyonunun engellenmesi için soğuma iki aşamada gerçekleştirilir. Soğumanın birinci aşaması, ısıtma kısmında yakıcılar kapatılarak yakıcılara verilen hava ile sıcaklığın 780°C ile 900°C arasına düşmesi ile sağlanır.
6. Isıtma ve soğutma kısımları arasındaki kapı açılır ve ısı transferinin sıcak kısımdan soğuk kısma doğru gerçekleşmesinin engellenmesi için parça hızlı bir şekilde zincir mekanizması ile taşınır.
7. Parça, soğutma kısmındaki 60°C ile 150°C aralığında süreç tasarımına göre değişen sıcaklıktaki özel soğutma yağına daldırılır ve soğutmanın sağlanması için

400 dev/dk ile 1400 dev/dk aralığında yağ karıştırıcılarının çalışması sağlanır. Karıştırıcı hızı, ani soğuma ile deformasyon oluşturmayacak kadar yavaş olacak şekilde ayarlanır ve soğumanın ikinci ve son aşaması gerçekleşir.



Şekil 3. AKF ısıtma bölümü sementasyon süreci sıcaklık-süre grafiği

Sementasyon gören parça AKF'den çıktıktan sonra önce yıkamaya girerek üzerindeki ısıtma yağlarından arınır, daha sonra da AKF sürecini doğrulamak amaçlı ara sertlik kontrolü yapılır. Burada parça henüz istenilen sertlik ve mikro yapı özelliklerine sahip değildir. AKF aşamasından sonra parça istenilenden daha fazla sertliğe sahip olduğu gibi soğutma sonrasında parçada gerilim oluşmuştur. Üzerindeki gerilimi gidermek ve sertliği istenilen değere getirmek için "meneviş" işlemine tabii tutulur. Meneviş

işlemi parçada istenilen sertlik değeri ve parçanın et kalınlığına göre farklı sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilir. Bu sıcaklık aralığı yaklaşık 140 °C ile 650 °C arasındadır. Meneviş işleminden sonra parça sırasıyla sertlik, mikro yapı ve final kalite kontrol işlemlerinden geçirilerek istenilen fiziksel özelliklerde olduğu doğrulanır.

### 3 Materyal ve Yöntemler

Bu çalışmada, Batı Isıl İşlem A.Ş. firmasında yer alan 7 numaralı Atmosfer Kontrollü Fırının üç ayrı sementasyon işleminde gerçek üretim ortamında alınan ölçümlerinin termodinamik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Ölçümler termal kamera, kızılötesi termometre ve baca gazı analizörü ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ölçüm sonuçları Çizelge 3'ten Çizelge 7'ye kadar sırasıyla aparat ve malzeme özellikleri, doğal gaz tüketimi ve zamanı ile ölçüm yapılan günlere ait yüzey sıcaklıkları olarak aşağıdaki gibi verilmiştir. Yapılan tüm ölçümlerde sementasyon gören parça malzemesinin ve aparat malzemesinin cinsi aynıdır. Aparat malzemesi 310S, parça malzemesi ise 1.7131 çelik malzemedir. Sementasyon ön ısıtma sıcaklığı her ölçüm için 500°C ve son ısıtma sıcaklığı da her ölçüm için 925°C'dir. Tablolarda (Çizelge 4, 5, 6 ve 7) bahsi geçen "Adım No" kısım 2.3 ile açıklanan ve Şekil 3 ile grafiklenen sementasyon adımlarını ifade eder.

Çizelge 3. Isıl işlem gören aparat ve malzeme özellikleri

	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
Aparat Malzemesi/ Ağırlığı	310S/ 195 kg	310S/ 345 kg	310S/ 312 kg
Parça Malzemesi/ Ağırlığı	1.731/ 467kg	1.731/ 675 kg	1.731/ 753 kg

Çizelge 4. Doğal gaz tüketimi ve zaman

Adım No	1. Ölçüm		2. Ölçüm		3. Ölçüm	
	Doğal gaz Sayacı (m <sup>3</sup> )	Süre	Doğal gaz Sayacı (m <sup>3</sup> )	Süre	Doğal gaz Sayacı (m <sup>3</sup> )	Süre
1	829,4	10:30	902,4	10:06	076,9	10:14
3	844	11:15	924,5	11:00	100,1	11:12
6	858,5	13:47	937	13:16	13:30	113,5

Çizelge 5. Birinci ölçüm yüzey sıcaklıkları raporu

1. Adım Yüzey Sıcaklıkları (Isıl İşlem Öncesi Yüzey Sıcaklıkları) (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	58	61	66,5	63	62,125
B	Tavan	117	115	135	140	126,75
C	Yan Yüzey 2	65	72,5	76,5	74	72
D	Taban	94	83,5	96,5	80	88,5
E	Kapı	94	95,5	99	91	94,875
3. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	60,5	66	66	60,5	63,25
B	Tavan	160	130	90	120	125
C	Yan Yüzey 2	66	72	77	80	73,75
D	Taban	96,5	84	87,5	91	89,75
E	Kapı	95	94	93,5	92	93,625
4. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	65	68	67	62	65,5
B	Tavan	154	118	89	103	116
C	Yan Yüzey 2	80	78	76	77	77,75
D	Taban	94	85	98	98	93,75
E	Kapı	98	101	99	105	100,75
5. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	67	71,5	72,5	72	70,75
B	Tavan	143	116	85	102	111,5
C	Yan Yüzey 2	87	81	78,5	82	82,125
D	Taban	86,5	103	101	100	97,625
E	Kapı	104	106	105,5	104	104,875

Çizelge 6. İkinci ölçüm yüzey sıcaklıkları raporu

1. Adım Yüzey Sıcaklıkları (Isıl İşlem Öncesi Yüzey Sıcaklıkları) (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	41	41,5	43	42	41
B	Tavan	135	128	137	140	135
C	Yan Yüzey 2	48	55	56,5	58	56
D	Taban	78,5	55	82	64	69,87
E	Kapı	93	84	83	87	86,75

3. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	46	46,5	45	47	46,12
B	Tavan	131	133	130	134	132
C	Yan Yüzey 2	55	55	50	56,5	54,13
D	Taban	73,5	74,5	64,5	52,5	66,75
E	Kapı	92	93	89	90	91
4. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	48	52	50	47,5	49,37
B	Tavan	137	129	136	134	134
C	Yan Yüzey 2	62	71	58	60,5	62,75
D	Taban	89	75	82,5	76,5	80,75
E	Kapı	96	95,5	95	96	95,62
5. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	56	49,5	56	56,5	54,5
B	Tavan	136,5	130	129,5	132	132
C	Yan Yüzey 2	68	61,5	62	58	62,37
D	Taban	89,5	87,5	89	88	88,5
E	Kapı	101	99	96	97	98,25

Çizelge 7. Üçüncü ölçüm yüzey sıcaklıkları raporu

1. Adım Yüzey Sıcaklıkları (Isıl İşlem Öncesi Yüzey Sıcaklıkları) (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	60,5	61,5	69,5	70	65,37
B	Tavan	127,5	131,5	120,5	135,5	128,75
C	Yan Yüzey 2	78,5	80	100,5	93,5	88,12
D	Taban	105	92	73	72,5	85,62
E	Kapı	102	107	102,5	99,5	102,75
3. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	67,5	64	69	73	68,37
B	Tavan	130	128,5	112	136	126,63
C	Yan Yüzey 2	81,5	81,5	110	95	92
D	Taban	111,5	90,5	72,5	76	87,62
E	Kapı	104	106,5	98,5	102	102,75

4. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	72,5	70	74	67	70,87
B	Tavan	137	129,5	136	131,5	133,5
C	Yan Yüzey 2	84	85	77	79,5	81,37
D	Taban	108	101	85	102,5	99,12
E	Kapı	108	105	105,5	101,5	105
5. Adım Yüzey Sıcaklıkları (°C)						
Kod	Tanım	1. Noktadan Ölçüm	2. Noktadan Ölçüm	3. Noktadan Ölçüm	4. Noktadan Ölçüm	Ortalama
A	Yan Yüzey 1	76	69,5	74	76	72,4
B	Tavan	126	128	132,5	130,5	131,4
C	Yan Yüzey 2	86	90,5	80,5	76	82,3
D	Taban	113,5	90	114	113	103,4
E	Kapı	109	110,5	106,5	102,5	106,1

#### 4 Sistemin Termodinamik Analizi

Bu çalışmada, AKF'nin enerji kullanımını anlamak için fırının termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Analize kütlelin korunumu ilkesi ile başlanacaktır ve sırasıyla sistem termodinamiğin birinci ve ikinci yasası ile incelenmiştir. Bu bakış açıları ile incelenen sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri çıkarılacaktır.

Tüm hesaplamalar aksi belirtilmediği sürece Çengel ve Boles'da (2013) belirtilen teori ve denklemleri temel almaktadır. Benzer şekilde aksi belirtilmediği sürece tüm entalpi, entropi ve gazların diğer özellikleri Çengel ve Boles (2013) Termodinamik kitabından alınmıştır [8].

#### 4.1 Sistem Kabulleri

İkinci Bölüm'de de bahsedildiği gibi AKF içerisindeki süreç yedi adımda gerçekleşmektedir. Bu çalışmada termodinamik analizi gerçekleştirilen kısım, kontrol hacmi fırınının ısıtma bölümü olan Şekil 2.3'de gösterilen 1-3 ve 3-5 adımları arasını kapsayan ısıtma sürecidir.

Sistemin termodinamik analizini gerçekleştirmeden önce, analizi kolaylaştırmak amacı ile yapılan kabuller aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

1. AKF'ye girmeden önce yaklaşık 30 dakika 500 °C ön ısıtma fırınında

bekletilen parçanın, AKF giriş sıcaklığı yaklaşık olarak 300 °C kabul edilmiştir ( $T_{p,1}=T_{a,1}=300^{\circ}\text{C}$ ).

2. AKF içerisinde ısıl işlem gören parça, sementasyonun amacına uygun olarak süreç boyunca yüzeyindeki karbon kütlesini artırır. Ancak bu artış, karbon oranı %0,2'den az olan çeliklerin %0,8 ile %1,3 arasındaki bir artış ile sınırlıdır [7]. Bu artışın dışında parçanın ve aparatın kütlesinde bir değişiklik gerçekleşmemektedir. Malzeme kütlesindeki bu artışın küçüklüğünden dolayı parçanın ve aparatın kütlesi korunuyor kabul edilmiştir ( $\Sigma m=\text{sabit}$ ).
3. Şekil 2.5'de tanımlandığı gibi süreç 3. adıma ulaştığında parça ile AKF'nin iç sıcaklıkları birbirine eşitlendiği için sistem ısıl dengeye ulaşır. Süreç boyunca otomatik kontrol sistemi ile ölçülen sıcaklık farkları yakıcıların uygun miktarda çalıştırılması ile ısıl dengeye getirilir. Bu sebepten dolayı 3-5 arasındaki fırın iç sıcaklığı ve parça sıcaklığı sabit kabul edilmiştir ( $\Delta T_{p,3-5}=0$ ,  $\Delta T_{a,3-5}=0$ ).
4. Fırın içerisine sürekli olarak 10 m<sup>3</sup>/h sabit debide endo gaz verilmektedir. Endo gaz dışında değişen oranlarda doğal gaz, hava, azot ve amonyak endo gaz ile karışım haline getirilip, fırın içerisine verilmektedir. Ancak



endo gaz dışındaki bu gaz karışımının toplamı yaklaşık 0,5 m<sup>3</sup>/h kadar küçük ve karışımdaki konsantrasyon değişiminin verilerinin kaydı mümkün olmadığı için gaz karışımının sadece endo gazdan oluştuğu kabul edilmiştir.

5. Yukarıda da açıklandığı gibi parçanın yüzeyi ile tepkimeye giren karbon oranı çok düşük olduğu için kontrol hacmine giren endo gazın kütlesinin kayba uğramadan çıktığı kabul edilmiştir ( $\dot{m}_{eg,g} = \dot{m}_{eg,s}$ ).
6. AKF ısıtma bölmesi içinde ısının ve gaz karışımının homojen dağılımını sağlamak amacı ile çalışan fan elektrik enerjisi tüketmektedir. Tüm sistemin tükettiği elektrik enerjisi, sisteme doğal gaz ile giren enerjinin kalorifik olarak yaklaşık %7'si kadardır. Bu %7'nin de tamamı fan işine aktarılamamaktadır. Zincir mekanizması ve brülörlerin çalıştırılması için de elektrik enerjisi tüketilmektedir. Göreceli olarak tüketilen elektrik enerjisi çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir.
7. Doğal gazın sıcaklık ve basıncı; kaynak sıcaklık ve basıncı olan 15 °C ve 1,013 bar olarak sabit kaldığı ve yanma odasına aktarılırken değişmediği kabul edilmiştir. Bu sebeple doğal gaz kaynağından fırına aktarılırken sıcaklık ve basınç farklarından kaynaklanabilecek özgül kütle değişimlerinin oluşmadığı kabul edilmiştir ( $\rho_{dg}=\text{sabit}$ ).
8. Tablo 4.1'de, tedarik edilen doğal gazın kompozisyonu hacimsel olarak verilmektedir. Doğal gaz kompozisyonunun zaman içerisinde değişmediği kabul edilmiştir. Bu yüzden doğal gazın ısı değer, ısı kapasitesi, yoğunluk, basınç ve sıcaklık özellikleri de sabit kabul edilmiştir.

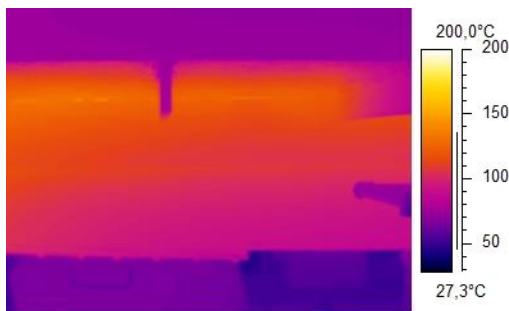
**Çizelge 8.** Doğal gaz kompozisyonu [9]

Bileşik	Formül	Hacimsel Oran (%)
Metan	CH <sub>4</sub>	92,72
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,96
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,01
Bütan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,42
Pentan	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,09
Hekzan	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,05
Azot	N <sub>2</sub>	2,2
Karbondioksit	CO <sub>2</sub>	0,5

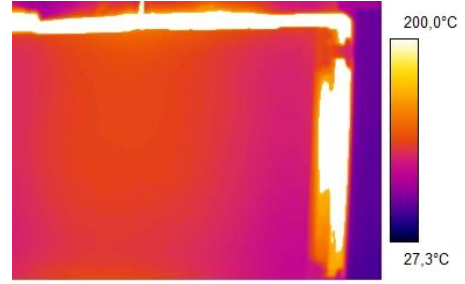
9. Doğal gaz karışımı Çizelge 8'de görüldüğü gibi %92,72 oranında metandan oluşurken az miktarda diğer bileşiklerden oluşmaktadır. Bu çalışmada yakıcı, yaygın olduğu gibi %100 metandan oluşuyor kabul edilmektedir ve yanma denklemi bu kabule uygun oluşturulmaktadır[1].
10. Havanın yalnızca azot ve oksijenden oluştuğu kabul edilmiştir. Hava karışımının 1 mol O<sub>2</sub>'ne 3,76 mol N<sub>2</sub> oranında olduğu kabul edilmiştir.
11. Yanma havasının miktarı otomasyon sistemi ile kontrol edilmediği için doğal gazın havaya molar oranı 0,05 kabul edilmiştir. Ölçüm boyunca brülör ayarları değiştirilmediği için sabit kabul edilmiştir [10].
12. Yanma tam yanma kabul edilmektedir. Bu sebeple fazla hava ile yanan metanın denklemi aşağıdaki gibi kabul edilmektedir.  

$$\text{CH}_4 + 4,2(\text{O}_2 + 3,76 \text{N}_2) \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 2,2\text{O}_2 + 15,8\text{N}_2$$
13. Hava ve yanma gazları analiz boyunca mükemmel gaz olarak kabul edilmiştir.
14. Yanmanın kararlı akım koşullarında gerçekleştiği kabul edilmiştir.
15. Sisteme, atmosferik havanın ölü halde giriş yaptığı kabul edilmiştir ve havadaki nem ihmal edilerek kuru hava olarak alınmıştır.
16. Sistemdeki kinetik ve potansiyel enerji değişimleri çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir ( $\Delta KE=0, \Delta PE=0$ ).
17. Sürtünme ve kimyasal tepkime esnasındaki kayıplar ihmal edilmiştir.

18. Fırının dış yüzeyleri Şekil 4-7'deki termal kamera görüntüleri sonucu dört ayrı bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler içinde sıcaklığın eşit dağıldığı kabulü yapılmıştır ve dört bölgenin sıcaklık ortalaması yüzey alanının sıcaklığı kabul edilmiştir. Ölçülemeyen ara kapının sıcaklığı dış kapının sıcaklığı ile ısı dengede kabul edilmiştir. Isı transferini büyük miktarda arttıracak şekilde girinti çıkıntılar olmadığı için tüm yüzeyler düzgün geometride kabul edilmiştir.
19. AKF'ye diğer fırınlardan ışınlam ile gerçekleşen ısı transferi ihmal edilmiştir.
20. Termodinamik hesaplamalarda kolaylık sağlamak için ölü hal olan çevre sıcaklığı ve çevre basıncı sabit ve sırasıyla 300K ve 1 atm kabul edilmiştir ( $T_0=300K$ ,  $P_0=1$  atm).
21. Doğal gaz ve endo gazın sisteme normal atmosfer koşullarında yani ölü halde girdiği kabul edilmiştir. Gerçekleşen küçük basınç ve sıcaklık değişimleri ihmal edilmiştir.
22. Çıkan endo gazın sıcaklığını bir otomasyon sistemi ile kontrol etmek mümkün değildir. AKF ise denge sıcaklığına ulaştıktan sonra sabit sıcaklıkta çalışmaktadır. Bu sebeplerden dolayı endo gazın giriş sıcaklığı atmosfer koşullarında, çıkış sıcaklığı ise sistem boyunca sabit ve fırın sıcaklığı ile ısı dengede kabul edilmiştir.
23. Baca gazı sıcaklığı, baca gazı analizörü ile üç ayrı ölçümün ortalaması  $477^\circ C$  olarak tespit edilmiştir. Süreç boyunca bu sıcaklık sabit kabul edilmiştir.



Şekil 4. AKF alt yüzey



Şekil 5. AKF dış kapak



Şekil 6. AKF sağ yüzey



Şekil 7. AKF sol yüzey

## 4.2 Kütle Analizi

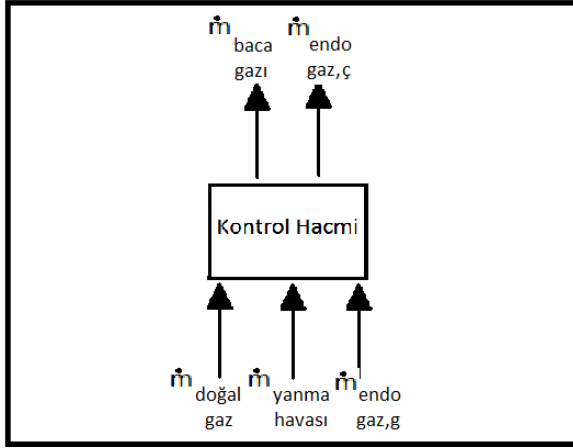
Doğanın en temel ilkelerinden biri olan kütle korunumu ilkesine göre kütle var veya yok edilemez ve denklem (1) ile tanımlanmaktadır. Kapalı sistemlerde sistemin kütlesi değişmezken, AKF'de olduğu gibi kontrol hacimlerinde ise kontrol hacmi sınırlarından kütle geçişi gerçekleşmektedir. Kütle, enerji ve ekserjinin büyüklüğünü doğru orantılı olarak etkileyen bir faktör olduğu için öncelikli olarak analiz edilmelidir.

$$\dot{m}_g - \dot{m}_ç = d\dot{m}_{KH}/dt \quad (\text{kg/s}) \quad (1)$$

AKF ısıtma bölümünün kontrol hacmi ve kütle akışı aşağıdaki gibi Şekil 8 ile gösterilmektedir. Burada da görüldüğü gibi doğal gaz, doğal gazın yanmasının sağlanması için yanma havası adı verdiğimiz atmosfer

koşullarındaki hava ve endo gaz girişi olmaktadır. Endo gaz yukarıdaki kabullere uygun olarak ısı alarak ve kütlesi sabit kalarak kontrol hacminden çıkmaktadır. Doğal gaz ve yanma havası ise kimyasal tepkimeye girerek baca gazını oluşturmaktadır.

Bunun dışında şematik olarak gösterilmeyen bir durum daha yer almaktadır. Sistem analiz edilen süreç içerisinde fırında ısıl işlem göreceği parça ve bu parçaları birbirinden belirli bir mesafede tutmak için kullanılan aparatları içermektedir. Yukarıdaki kabullerde belirtildiği gibi parça ve aparatın kütlesi sabit kabul edilmektedir.



Şekil 8. AKF kontrol hacminin kütle akışı şematik gösterimi

Doğal gaz ile ilgili hesaplamaları doğru yapabilmek için doğal gazın özellikleri aşağıdaki gibi Çizelge 9'da verilmiştir.  $\varphi$ , kimyasal ekserji katsayısı ise Kotas TJ [11]'nin kaynağında doğal gaz için belirttiği değer alınmıştır. Yapılan kabullere uygun olarak doğal gazın özgül kütlesi sabit kabul edilmiştir ve denklem (2) ile hacimsel debi, denklem (3)

ile doğal gazın özgül kütlesi ve denklem (4) ile doğal gazın kütleli debisi hesaplanmaktadır.

$$\dot{V}_{dg} = \frac{V_{dg}}{t} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2)$$

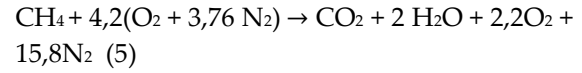
$$\rho_{dg} = \rho_h SG_{dg} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{dg} = \dot{V}_{dg} \rho_{dg} \quad (\text{kg}/\text{s}) \quad (4)$$

Çizelge 9. Doğalgazın özellikleri

Özellikler	Tanımı	Değeri
SG	Spesifik gravite	0,60274
$\rho$	Özgül kütle	0,738357 kg/m <sup>3</sup>
LHV	Alt ısı değeri	45.000 kJ/kg
c	Isı kapasitesi	2 kJ/kg K
$\varphi$	Kimyasal ekserji katsayısı	1,04

Yapılan kabullere uygun olarak yanma denklemi, denklem (5) ile tanımlanmıştır. Yanma havası ve baca gazının kütleli debileri doğal gazın kütleli debisi ile parametrik olarak yanma denkleminden çıkarılmıştır.



Yapılan ölçümler sonucunda ilgili denklemler aracılığıyla yapılan hesaplamalar ile Çizelge 10'daki değerler elde edilmiştir. Burada ve bundan sonraki tüm analizlerde, (1-3) ile başlangıç aşamasından 3. aşamaya kadar olan kısım ve (3-5) ile 3. aşamadan 5. aşamaya yani ısıtma bölümünün son aşamasına kadar olan kısım simgelenmektedir. Bu aşamalarda süreç farklı özellikler gösterdiği için belirtildiği gibi iki ayrı kısımda incelenmiştir. Endo gaz tüm süreç boyunca sabit debide verilmektedir. Çizelge 11'de ise hava yakıt oranı, ürün yakıt oranı ve hava fazlalık katsayısı görülmektedir.

Çizelge 10. Kütle değerleri tablosu

Kütle/ Kütleli Debi	Ölçüm Tarihi					
	1. Ölçüm		2. Ölçüm		3. Ölçüm	
	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)
$m_a$ (kg)	195	195	675	675	312	312
$m_p$ (kg)	467	467	345	345	753	753
$\dot{m}_h$ (kg/s)	0,14354155	0,04220478	0,18106553	0,04066384	0,17696903	0,04295987
$\dot{m}_{dg}$ (kg/s)	0,00399259	0,00117392	0,00503632	0,00113106	0,00492238	0,00119492
$\dot{n}_{dg}$ (kmol/s)	0,00022948	0,00002792	0,00028947	0,00006500	0,00028292	0,00006880
$\dot{m}_{pg}$ (kg/s)	0,14758966	0,18617189	0,18617189	0,04181063	0,18195986	0,04417141
$\dot{m}_{eg}$ (kg/s)	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021
$\dot{n}_{eg}$ (kmol/s)	0,000121	0,000121	0,000121	0,000121	0,000121	0,000121

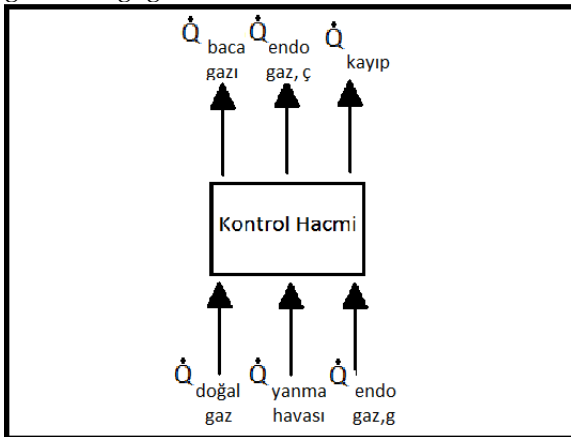
**Çizelge 11.** Yanma özellikleri tablosu

Tanım	Değer
Hava/Yakıt Kütleli Oran	35,95
Ürün/Yakıt Kütleli Oran	36,96
Yakıt/Hava Molar Oran	0,05

### 4.3 Enerji Analizi

Enerjinin var veya yok edilemeyeceğini ancak bir biçimden diğer bir biçime dönüşebileceğini açıklayan termodinamiğin birinci yasası veya diğer adıyla enerjinin korunumu ilkesi enerjinin değişik biçimleri arasındaki ilişkileri ve genel olarak enerji etkileşimlerini incelemek için sağlam bir temel oluşturur [8].

Enerji verimliliğini tespit etmek amacı ile termodinamiğin birinci yasasını temel alarak AKF kontrol hacmindeki tüm enerji etkileşimleri Şekil 9'daki gibi tanımlanmıştır. Şekil 9'da da belirtildiği gibi sisteme doğal gaz, yanma havası ve endo gaz ile enerji girişi olurken, doğal gaz ve yanma havasının yakılması sonucu oluşan baca gazı, fırından ısı olarak kontrol hacmini terk eden endo gaz ve fırından çevreye doğru sıcaklık farkından oluşan ısı kayıpları ile de enerji çıkışı olmaktadır. Bu enerji dönüşümlerinin dışında, fırına ön ısıtma sıcaklığında giren parça ve aparatların, fırın sıcaklığına ısıtılması ile kontrol hacminde oluşan bir enerji artışı da söz konusudur. Bu artış denklem (6) ile gösterildiği gibidir.



**Şekil 9.** AKF kontrol hacminin enerji akışı şematik gösterimi

$$\dot{E}_g - \dot{E}_ç = dE_{KH}/dt \text{ (kW)} \quad (6)$$

Doğal gaz ile giren enerji; sistem kabulleri alt başlığında yapılan kabullerle, alt ısı değeri ve sisteme giriş sıcaklığı sabit kabul edilerek, denklem (8) ile hesaplanmaktadır. Yanma havasının enerjisi ise denklem (9) ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_{dg} = \dot{m}_{dg} (LHV + C_{dg} x T_{dg}) \text{ (kW)} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h h_h \text{ (kW)} \quad (9)$$

Baca gazı ve endo gazın entalpileri, içerdikleri moleküllerin mol sayıları ile orantılı olarak denklem (10) ve denklem (11) ile hesaplanmaktadır. Bu entalpilerin sırasıyla doğal gazın molar debisi ve endo gazın kütleli debisi ile çarpılmaları sonucu denklem (12) ve denklem (13) ile baca gazı ve endo gazın enerjileri kW cinsinden hesaplanmaktadır.

$$\bar{h}_{bg} = 1\bar{h}_{CO_2} + 2\bar{h}_{H_2O} + 2,2\bar{h}_{O_2} + 15,8\bar{h}_{N_2} \text{ (kJ/kmolCH}_4\text{)} \quad (10)$$

$$h_{eg} = 0,32 \frac{\bar{h}_{CO}}{M_{CO}} + 0,05 \frac{\bar{h}_{H_2}}{M_{H_2}} + 0,63 \frac{\bar{h}_{N_2}}{M_{N_2}} \text{ (kJ/kg)} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{bg} = \dot{n}_{dg} \bar{h}_{bg} \text{ (kW)} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{eg} = \dot{m}_{eg} h_{eg} \text{ (kW)} \quad (13)$$

Parça veya aparatın ısı enerjisindeki değişim denklem (14) ile hesaplanmaktadır. Yüzeylerden olan ısı kayıpları ise sırasıyla taşınım ve ışınım ile denklem (15) ve denklem (16) ile hesaplanmaktadır [12].

$$\Delta \dot{Q} = \dot{m} c \Delta T \text{ (kW)} \quad (14)$$

$$\dot{Q}_t = HA(T_y - T_0) \text{ (kW)} \quad (15)$$

$$\dot{Q}_l = \varepsilon \sigma A(T_y^4 - T_0^4) \text{ (kW)} \quad (16)$$

Birinci yasa verimi olarak da adlandırılan enerji verimi aşağıdaki gibi denklem (17) ile parça ve aparatın aldığı ısı enerjisinin toplamının, toplam giren enerjiye bölümü olarak hesaplanmıştır.

$$\eta_I = \frac{\dot{Q}_p + \dot{Q}_a}{\dot{Q}_g} \quad (17)$$

Yapılan ölçümler sonucu ilgili denklemler kullanılarak, giren ve çıkan enerji ile kontrol hacmi içerisindeki enerji değişimleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar için gerekli sıcaklık ölçümü ortalamaları ile ısı kapasiteleri, sırasıyla Çizelge 12 ve 13'te yer almaktadır.

Baca gazı ve endo gaz için sırası ile Çizelge 14 ve 15'te molekül ağırlıkları, entalpileri ve entropileri verilmiştir. Bir otomasyon sistemi olmadığı için baca gazı ve endo gazın çıkış sıcaklıkları üç ölçümde de sabit kabul edilmiştir. İlgili entalpi değerleri ve ölçüm sonuçları ile Çizelge 16 enerji değerleri tablosu elde edilmiştir.

**Çizelge 12.** Sıcaklık ölçümü ortalamaları

K	Açıklama	Ölçüm Tarihi		
		1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
T <sub>a,p1</sub>	Aparat ve parçanın 1 anındaki sıcaklığı	573	573	573
T <sub>a,p3</sub>	Aparat ve parçanın 3 anındaki sıcaklığı	1198	1198	1198
T <sub>a,p5</sub>	Aparat ve parçanın 5 anındaki sıcaklığı	1198	1198	1198
T <sub>y1-3</sub>	Fırın yüzeyinin 1-3 arasındaki ortalama sıcaklığı	363	352	370
T <sub>y3-5</sub>	Fırın yüzeyinin 3-5 arasındaki ortalama sıcaklığı	367	361	374

**Çizelge 13.** Isıl işlem gören parça ve aparatların ısı kapasiteleri tablosu

	Açıklama	Değer (kJ/kg.K)
c <sub>a</sub>	Aparatın ısı kapasitesi	0,452
c <sub>p</sub>	Parçanın ısı kapasitesi	0,5

**Çizelge 14.** Baca gazı bileşenlerinin moleküler ağırlıkları, entalpileri ve entropileri

	Moleküler Kütle (kg/kmol)	$\bar{h}$ (kJ/kmol) (300K)	$\bar{h}$ (kJ/kmol) (750K)	$\bar{s}$ (kJ/kmol K) (300K)	$\bar{s}$ (kJ/kmol K) (750K)
CO <sub>2</sub>	44,01	9431	29629	213,915	254,117
H <sub>2</sub> O	18,015	9966	25977	188,928	221,215
O <sub>2</sub>	31,999	8736	22844	205,213	233,649
N <sub>2</sub>	28,013	8723	22149	191,682	218,889

**Çizelge 15.** Endo gaz bileşenlerinin moleküler ağırlıkları, entalpileri ve entropileri

	Moleküler Kütle (kg/kmol)	$\bar{h}$ (kJ/kmol) (300K)	$\bar{h}$ (kJ/kmol) (1198K)	$\bar{s}$ (kJ/kmol K) (300K)	$\bar{s}$ (kJ/kmol K) (1198K)
CO	28,011	8.723	37.026	197,723	240,595
H <sub>2</sub>	2,016	8.522	35.200,3	130,754	171,629
N <sub>2</sub>	28,013	8.723	36.709,7	191,682	234,058

**Çizelge 16.** Enerji değerleri tablosu

	Ölçüm Tarihi							
	1. Ölçüm		2. Ölçüm		3. Ölçüm		Ortalama	
Enerji (kW)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)
$\Delta\dot{Q}_a$	22,6	0	33,3	0	28,02	0	27,95	0
$\Delta\dot{Q}_p$	48,9	0	58,9	0	61,13	0	56,28	0
$\dot{Q}_h$	43,1	12,7	54,4	12,2	53,12	12,90	50,19	12,59
$\dot{Q}_{dg}$	182	53,5	229,6	51,6	224,43	54,48	212,03	53,19
$\dot{Q}_{bg}$	110,6	32,5	139,5	31,3	136,31	33,09	128,78	32,31
$\dot{Q}_{eg,g}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$\dot{Q}_{eg,c}$	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
$\dot{Q}_t$	8,01	8,45	7,29	7,71	9,05	9,38	8,11	8,51
$\dot{Q}_i$	13,36	14,29	12,10	12,45	15,21	16,35	13,55	14,36
$\dot{Q}_d$	18,4	7,6	29,7	9	24,52	5,23	24,21	7,27
$\dot{Q}_k$	39,8	30,4	49,1	29,1	48,77	30,96	45,88	30,15

#### 4.4 Ekserji Analizi

Ekserji özelliği, belirli bir çevrede bulunan bir sistemin iş potansiyelidir ve sistemin, çevre ile dengeye gelmesiyle elde edilebilen en fazla yararlı iş miktarını temsil eder [8]. Bir sistemde nükleer, manyetik, elektrik ve yüzey gerilimi etkilerinin yokluğunda kinetik, potansiyel, fiziksel ve kimyasal ekserji söz konusudur. Bu çalışmada potansiyel enerji ve kinetik enerjiden kaynaklanan ekserji ihmal edilmiştir ve ekserjinin, fiziksel ve kimyasal ekserjinin toplamına eşit olduğu denklem (18)'de gösterilmiştir. Kimyasal denge söz konusu ise kimyasal ekserji, fiziksel denge söz konusu ise fiziksel ekserji "0" dır. Enerjiden farklı olarak ekserji tersinmezlikler sebebi ile korunmaz ve denklem (19)'daki gibi açıklanır. Ekserji yok oluşu entropi ile doğru orantılı olarak denklem (20) ile ifade edilmektedir.

$$\dot{E}x = \dot{E}x^{fiz} + \dot{E}x^{kim} \quad (\text{kW}) \quad (18)$$

$$\dot{E}x_g - \dot{E}x_c - \dot{E}x_{yok\ olan} = \Delta\dot{E}x_{KH} \quad (\text{kW}) \quad (19)$$

$$\dot{E}x_{yok\ olan} = T_0 \dot{S}_{üretim} \quad (\text{kW}) \quad (20)$$

Doğal gazın ekserjisi Kotas TJ [11]'nin tanımladığı gibi denklem (21) ile verilmektedir. Doğal gaz için kimyasal ekserji katsayısı 1,04 seçilmektedir [11].

$$\dot{E}x_{dg}^{kim} = \dot{m}_{dg} \varphi LHV \quad (21)$$

Baca gazının fiziksel ekserjisi denklem (22) ve (23) ile, kimyasal ekserjisi ise denklem (24) ve (25) ile hesaplanmaktadır. Denklem (24)'de yer alan  $y_i$  ve  $y_{ie}$  sırasıyla;  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  ve  $CO_2$  bileşenlerinin baca gazı ve atmosfer bileşimine göre molar kesridir,  $n_i$  ise bileşenlerin mol sayılarıdır [13, 14]. Endo gazın fiziksel ekserjisi de baca gazına benzer olarak denklem (26) ve (27) ile hesaplanmaktadır.

$$\bar{e}x_{bg}^{fiz} = \sum n_i [(\bar{h} - \bar{h}_0) - T_0(\bar{s} - \bar{s}_0)]_i \quad (\text{kJ/kmol } CH_4) \quad (22)$$

$$\dot{E}x_{bg}^{fiz} = \dot{n}_{dg} \bar{e}x_{bg}^{fiz} \quad (\text{kW}) \quad (23)$$

$$\bar{e}x_{bg}^{kim} = \bar{R}T_0 \sum_i n_i \ln\left(\frac{y_i}{y_i^e}\right) \quad (\text{kJ/kmol } CH_4) \quad (24)$$

$$\dot{E}x_{bg}^{kim} = \dot{n}_{dg} \bar{e}x_{bg}^{kim} \quad (\text{kW}) \quad (25)$$

$$\bar{e}x_{eg}^{fiz} = \sum n_i [(\bar{h} - \bar{h}_0) - T_0(\bar{s} - \bar{s}_0)]_i \quad (\text{kJ/kmol}) \quad (26)$$

$$\dot{E}x_{eg}^{fiz} = \dot{n}_{eg} \bar{e}x_{eg}^{fiz} \quad (\text{kW}) \quad (27)$$

Parça ve aparatın fiziksel ekserjisi denklem (28) ile hesaplanmaktadır. Isı enerjisi ile sistemden atılan ekserji ise denklem (29) ile hesaplanmaktadır. Tüm ekserji denklemlerinin tanımlanması ardından ikinci yasa verimi olarak da adlandırılan ekserji verim denklem (30) ile yok olan ekserjinin oranı ise denklem (31) ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta\dot{E}x^{fiz} = \dot{m} c [(T_2 - T_1) - T_0 \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)] \quad (\text{kW}) \quad (28)$$

$$\dot{E}x_k = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_k \quad (\text{kW}) \quad (29)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{E}x_c}{\dot{E}x_g} \quad (30)$$

$$\eta_{yok olan} = \frac{\dot{E}x_{yok olan}}{\dot{E}x_g} \quad (31)$$

Enerji denkliklerinin elde edilmesinin ardından ekserji değerleri ilgili denklemler kullanılarak Çizelge 17'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 17. Ekserji değerleri tablosu

	Ölçüm Tarihi							
	1. Ölçüm		2. Ölçüm		3. Ölçüm		Ortalama	
Ekserji (kW)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)	(1-3)	(3-5)
$\Delta \dot{E}x_a$	14,58	0	21,50	0	18,10	0	18,06	0
$\Delta \dot{E}x_p$	31,56	0	38,02	0	39,49	0	36,36	0
$\dot{E}x_h$	0	0	0	0	0	0	0	0
$\dot{E}x_{dg}$	186,85	54,94	235,70	52,93	230,37	55,92	217,64	54,60
$\dot{E}x_{bg}$	55,97	16,46	70,61	15,86	69,01	16,75	65,20	16,36
$\dot{E}x_{eg}$	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81
$\dot{E}x_k$	6,91	5,54	7,25	4,92	9,23	6,13	7,79	5,53
$\dot{E}x_{yok olan}$	76,02	31,13	96,52	30,35	92,73	31,24	88,42	30,90

## 5 Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada AKF'nin enerji ve ekserji analizleri çıkarılmıştır. Süreç, ısıl olarak farklı iki karakteristik yapı gösterdiği için iki ayrı aşamada incelenmiştir. Bu aşamalar difüzyon gerçekleştirilirken ısıl dengeye ulaştığı (1-3) aşaması ve ısıl denge içerisindeki ortamda difüzyon süresinin tamamlandığı (3-5) aşamasıdır. Aşağıdaki gibi Çizelge 18'de ölçüm günlerine göre ve günlerin ortalamasına göre enerji verimi, ekserji verimi ve ekserji yıkımı oranları (1-3) ve (3-5) aşamaları için ayrı ayrı verilmiştir.

Çizelge 18. Ölçüm günlerine göre enerji verimi, ekserji verimi ve ekserji yıkımı oranları

%	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama
(1-3) Enerji Verimi	31,58	32,32	32	32,11
(3-5) Enerji Verimi	0	0	0	0
(1-3) Ekserji Verimi	24,70	25,25	25	25
(3-5) Ekserji Verimi	0	0	0	0
(1-3) Ekserji Yıkımı	40,68	40,95	40,26	40,63
(3-5) Ekserji Yıkımı	56,66	57,33	55,85	56,60

Enerji verimi (1-3) aşaması için parça ve parçaların bağlı olduğu aparatların istenen sıcaklığa getirilmesi için gerekli net enerjinin, toplam enerji girişine oranı olarak hesaplanmıştır ve ortalama enerji verimi %32,11 olarak tespit edilmiştir. Ekserji verimi de benzer şekilde parça ve aparatın ekserji değişiminin, toplam giren ekserjiye oranı olarak hesaplanmıştır ve ortalama % 25 olarak tespit edilmiştir.

Sürtünme, kimyasal tepkime ve ısı kayıpları gibi tersinmezlikler nedeni ile iş yapabilme potansiyelinin bir kısmı kaybedilmektedir. Ekserji yıkımı olarak da adlandırılan bu

kayıplar (1-3) aşaması için ortalama % 40,63 oranındadır.

Aparatlar, ısı transferinin düzgün şekilde gerçekleşmesi amacı ile kullanılmaktadır. Bu aparatlar ısı transferinin düzgün şekilde gerçekleşmesini sağlarken, önemli oranda kütleleri ve ısı kapasiteleri nedeni ile enerjinin bir bölümünü taşımaktadırlar. (1-3) aşamasında parça ve aparatın aldığı ısı enerjisi, toplam giren enerjinin ortalama %31,99'unu oluşturmaktadır. Bununla birlikte parça ve aparatın aldığı ısının %33,18'i aparattan kaynaklanmaktadır. Bu sebepten aparat tasarımı, kütlesi ve ısı kapasitesi düşürülecek şekilde gerçekleştirilmelidir.

Enerji verimi ve ekserji verimi (3-5) aşamalarında % 0 çıkmaktadır. Çünkü; artık parça ve aparat denge sıcaklığına gelmiştir ve ısı almamaktadır. Ancak buna rağmen sementasyon sürecinin bir gereği olan difüzyon süresi henüz tamamlanmamıştır. Endo gaz ve yüksek sıcaklığın korunması ile sürdürülen sementasyon süreci sırasında ısı kaybı devam etmektedir. Difüzyon süresi tamamlanırken, parçanın ısısı sabit kalmakta fakat ısı kayıplarını gidermek için enerji tüketimi sürmektedir. Bu durumda da ekserji yıkımı oranlarını kıyaslamak daha doğru olmaktadır. Bu oran (3-5) sürecinde ortalama %56,60'tır. Literatürde kıyaslanabilecek bir çalışma olmaması ile birlikte (3-5) sürecinde, (1-3) sürecine göre ekserji yıkımı %15,97 daha fazladır.

Bir diğer yaklaşım da, tüm sürecin (1-3) ve (3-5) toplam enerji tüketimi incelenmiştir. Buna göre enerji verimi, ekserji verimi ve ekserji yıkımı oranlarını tespit edilmiştir. Çizelge 19'da gösterildiği gibi toplam enerji verimi, toplam ekserji verimi ve toplam ekserji yıkımı sırasıyla %25,52, %19,99 ve %43,83'tür.

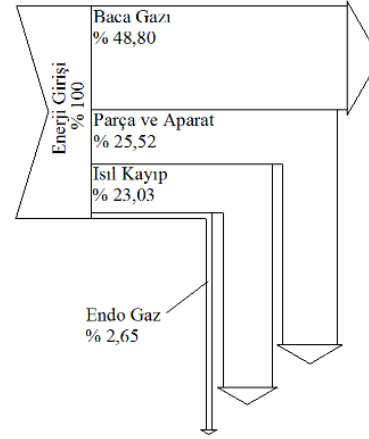
**Çizelge 19.** Toplam enerji verimi, ekserji verimi ve ekserji yıkımı oranı

	%
<b>Enerji Verimi</b>	25,52
<b>Ekserji Verimi</b>	19,99
<b>Ekserji Yıkım Oranı</b>	43,83

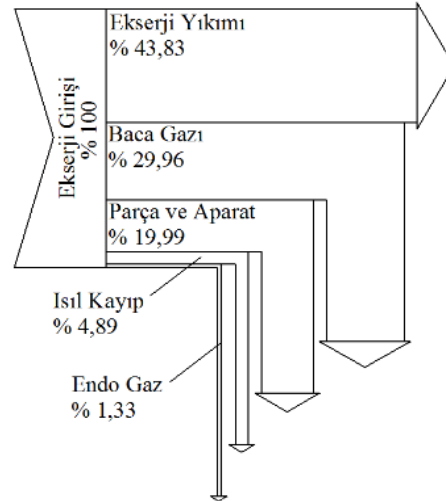
Toplam enerji dağılımı Şekil 10'daki gibi incelendiğinde, enerjinin %48,80'ninin baca gazı ile atıldığını, %25,52'sinin parça ve aparat üzerinde depolandığını, %23,03'nün ısı kaybı olarak çevreye atıldığını ve %2,65'inin ise endo gaz üzerinde depolanarak çevreye atıldığını göstermektedir. Ekserji yani kullanılabilirlik kavramının ise Şekil 5.2'deki gibi %43,83'ünün yok olduğu, %29,96'sının baca gazından kaynaklandığı, %19,99'unun parça ve aparat üzerinde depolandığı, %4,89'unun ısı kaybı üzerinden kaynaklandığı ve %1,33'ünün endo gazdan kaynaklandığı Sankey diyagramında görülmektedir.

Ekserji yıkımından sonra en yüksek oran %29,96 olan baca gazının ekserjisidir. Baca gazı enerjisi doğrudan çevreye atılmaktadır. Baca

gazı ile çevreye atılan ısı, ısı geri kazanım yöntemleri ile yeniden değerlendirilebilir. Bu enerji, parçaların ön ısıtma fırınlarında kullanılabilir ve enerji ile ekserji verimi önemli oranda artırılabilir. Bu sayede atığın çevreye zararlı etkileri de önemli ölçüde azalır.



**Şekil 10.** Enerji akış diyagramı



**Şekil 11.** Ekserji akış diyagramı

## 6 Referanslar

- [1]Gürtürk, M., Öztop, H.F. and Hepbaşlı, A. Energy and exergy assessments of a perlite expansion furnace in a plaster plant, Energy Conversion and Management. 2013; 75, 488-497.
- [2]Hosseini, S. E. and Wahid, M. A., Enhancement of exergy efficiency in combustion systems using flameless mode, Energy Conversion and Management. 2014; 86, 1154-1163.
- [3]Gürtürk, M., Öztop, H.F. and Hepbaşlı, A., Comparison of exergoeconomic analysis of two different perlite expansion furnaces, Energy. 2015; 80, 589-598.



[4] Takla, M., Kamfjord, N.E., Tveit, H. and Kjelstrup, S., Energy and exergy analysis of the silicon production process, *Energy*. 2013; 58, 138-146.

[5] Seepana, S. and Jayanti, S., Optimized enriched CO<sub>2</sub> recycle oxy-fuel combustion for high ash coals, *Fuel*. 2012; 102, 32-40.

[6] Anon., 2015, Batı Isıl İşlem Firma Tanıtımı, <http://www.batiisil.com/>

[7] Anon., 2016. Batı Isıl İşlem San. ve Tic. A.Ş. (son ulaşım 26 Mart 2016)

[8] Çengel, Y.A. ve Boles, M. A., Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik (A. Pınarbaşı, Çev.), Ankara, Palme Yayıncılık, 2013; 978 s.

[9] Manisa Organize Sanayi Bölgesi Müdürlüğü (BOTAS)

[10] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Sanayide enerji yönetim esasları, 2014, Cilt II.

[11] Kotas, T.J., The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA, 1995, 328 pages.

[12] Çengel, Y.A., Isı ve Kütle Transferi Pratik Bir Yaklaşım, (Tanyıldızı, V. ve Dağtekin, İ. Çev.) Güven Bilimsel, İzmir, Türkiye, 2011, 879 s.

[13] Özkan, M. , Özkan, D.B., Özener, O. and Yılmaz, H., Experimental study on energy and exergy analyses of a diesel engine performed with multiple injection strategies: Effect of pre-injection timing, *Applied Thermal Engineering*, 2013, 53, 21-30.

[14] Lee, D., Exergy analysis and efficiency evaluation for an aluminium melting furnace in a die casting plant, Ryerson University, Mechanical Engineering, Toronto, Ontario, Canada, 2003, 94 pages. (Doctorate Thesis)

### Simgeler Dizini

A	Yüzey Alanı, m <sup>2</sup>	Q	Isı Enerjisi, kJ	bg	Baca Gazı
C	Özgül Isı, kJ/kg K	Q̇	Isı Transferi, kW	dg	Doğal Gaz
Ex	Ekserji, kJ	Ra	Rayleigh Sayısı	ç	Çıkan
Ēx	Ekserji, kW	<b>Ra<sub>i</sub></b>	Karakteristik Uzunluğa Göre Rayleigh Sayısı	d	Diğer Kayıplar
$\bar{e}_x$	Molar Ekserji, kJ/kmol	Ṡ	Entropi, kW/ K	eg	Endogaz
E	Enerji, kJ	$\bar{s}$	Molar Entropi, kJ/kmol K	g	Giren
Ē	Enerji Transferi, kW	T	Sıcaklık, K	h	Hava
g	Yer Çekimi İvmesi, m/s <sup>2</sup>	t	Zaman, s	ı	Işınım
Gr	Grashof sayısı	ÜY	Yanma Ürünlerinin Yakıtta Kütleli Oranı	k	Kayıp
H	Taşınım İle Isı Transferi Katsayısı, W/m <sup>2</sup> K	V	Hacim, m <sup>3</sup>	KH	Kontrol Hacmi
h	Özgül Entalpi, kJ/kg	Ṡ	Hacimsel Debi, m <sup>3</sup> /s	p	Parça
$\bar{h}$	Molar Entalpi, kJ/kmol	y	Mol Kesri	t	Taşınım
HY	Yanma Havaasının Yakıtta Kütleli Oranı	β	Termal Genleşme Katsayısı, 1/K	ü	Yanma Ürünü
k	Isıl İletim Katsayısı, W/m <sup>2</sup> K	ε	Yayıcılık Katsayısı	y	Yüzey
L	Karakteristik uzunluk, m	v	Kinematik Viskozite, m <sup>2</sup> /s	0	Çevre Koşulları
M	Mol Kütleli, kg/kmol	q̇	Özgül Kütle, kg/m <sup>3</sup>	e	Çevre
ṁ	Kütleli Debi, kg/s	φ	Kimyasal Ekserji Katsayısı	fiz	Fiziksel

<b>Nu</b> Nusselt Sayısı	<b><math>\eta</math></b> Verimlilik	<b>kim</b> Kimyasal
<b>n</b> Mol sayısı	<b><math>\sigma</math></b> Stefan-Boltzmann Sabiti, W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	<b>AKF</b> Atmosfer Kontrollü Fırın
<b><math>\dot{n}</math></b> Molar Debi, kmol/s	<b><math>\lambda</math></b> Hava Yakıt Molar Oranı	<b>KE</b> Kinetik Enerji, kJ
<b>p</b> Çevre Uzunluğu, m	<b>I</b> 1. Yasa	<b>LHV</b> Yakıt Alt Isıl Değeri, kJ/kg
<b>P</b> Basınç, kPa	<b>II</b> 2. Yasa	<b>PE</b> Potansiyel Enerji, kJ
<b>Pr</b> Prandtl Sayısı	<b>a</b> Aparat	<b>SG</b> Spesifik Gravite
<b><math>\bar{R}</math></b> Üniwersal Gaz Sabiti kJ/kmol K		