

**BİR BUHAR KAZANININ ENERJİ VE EKSERJİ  
ANALİZİ YOLUYLA PERFORMANSININ  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**2012  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Çağdaş FİLİZ**

**BİR BUHAR KAZANININ ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ YOLUYLA  
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Çağdaş FİLİZ**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Ocak 2012**

Çağdaş FİLİZ tarafından hazırlanan "BİR BUHAR KAZANININ ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ YOLUYLA PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hüseyin KURT



Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 18/ 01/ 2012

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

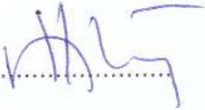
Başkan: Prof. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Hüseyin KURT (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)



28/03/2012

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN



Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Çağdaş FİLİZ

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **BİR BUHAR KAZANININ ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ YOLUYLA PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Çağdaş FİLİZ**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı**

**Doç. Dr. Hüseyin KURT**

**Ocak 2012, 103 sayfa**

Bu çalışmada, Kardemir A.Ş.'de bulunan, yakıt olarak demir çelik üretimi sırasında açığa çıkan atık gazlardan kok gazı, konverter gazı ve yüksek fırın gazının yakıldığı gaz yakıtlı bir buhar kazanında enerji ve ekserji analizi yapılarak kazanın performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca buhar kazanı, ekserji maliyet hesabı ve eksergoekonomik açıdan ekonomik olarak analiz edilmiştir. Kazan açık sistem olarak tek bir ünite halinde ele alınmış ve buna göre enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Kazanın enerji ve ekserji analizi sonucunda, enerji veriminin % 91, ekserji veriminin ise % 46 olduğu bulunmuştur. Enerji kaybının 6445.5 kW, ekserji yıkımının ise 21185.81 kW olduğu belirlenmiştir. Kazanın 11440.33 kW'lık iyileştirme potansiyeline sahip olduğu, kazandaki ekserji yıkımının kazanda kullanılan yakıt oranının ise 0.54 olduğu tespit edilmiştir. Kazanda üretilen buharın ekserji maliyeti 7.33 \$/h, eksergoekonomik faktörü ise 0.992 olarak bulunmuştur.

**Anahtar Sözcükler :** Buhar kazanı, enerji analizi, ekserji analizi, eksergoekonomik analiz

**Bilim Kodu** : 914.1.233

## **ABSTRACT**

**M. Sc Thesis**

### **EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF A STEAM BOILER BY USING ENERGY AND EXERGY ANALYSIS**

**Çağdaş FİLİZ**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor**

**Assoc. Prof. Hüseyin KURT**

**January 2012, 103 pages**

In this study, the performance of a gas-fired boiler existing in Kardemir A.Ş. using coke gas, converter gas and furnace gas from the waste gases released during the production of iron and steel as fuel was evaluated by performing energy and exergy analysis. Also, the boiler was economically analyzed from the point of exergy cost calculation and exergoeconomics. The boiler was approached as the open system and single unit and the energy and exergy analysis were performed considering this state. As a result of energy and exergy analysis of boiler, energy and exergy efficiencies were found to be %91 and %46, respectively. It was determined that the energy loss and exergy loss (destruction) are 6445.5 kW and 21185.81 kW, respectively. It was also determined that the boiler has improvement potential of 11440.33 kW and the rate of exergy destruction of boiler to fuel using in the boiler is 0.54. The exergy cost of steam produced in the boiler and exergoeconomic factor are found to be 7.33 \$/h and 0.992, respectively.

**Key Words** : Steam boiler, energy analysis, exergy analysis, energy  
exergoeconomic analysis

**Science Code** : 914.1.233



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasında bana yol gösteren hocam Sayın Doç. Dr. Hüseyin KURT'a sonsuz Őukranlarımı sunmak isterim. Bana çalıőmalarımnda yardımcı olan çok değerli hocalarımdan Doç. Dr. Refik POLAT'a ve ArŐ. Gör. Cüneyt UYSAL'a, ayrıca bana teknik olarak destek veren Makine Mühendisi Sayın Buğra DENİZ'e ve Kardemir A.Ő.'ye teŐekkürü bir borç bilirim. Bana veri almamda yardımcı olan Sayın Mehmet BİÇER'e ve Zafer ŞAHİN'e teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
BÖLÜM 1. ....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2. ....	7
BUHAR ÜRETİMİ VE BUHAR KAZANLARI .....	7
2.1. BUHAR ÜRETİMİ .....	7
2.2. BUHAR KAZANLARI.....	12
2.2.1. Alev - duman borulu kazanlar .....	14
2.2.2. Su borulu kazanlar .....	15
2.3. İNCELENEN BUHAR KAZANI VE EKİPMANLARI .....	17
2.4. BUHAR KAZANLARINDA YANMA.....	29
2.4.1. Kok gazının özellikleri .....	32
2.4.2. Yüksek fırın gazının özellikleri .....	32
2.4.3. Konverter gazının özellikleri .....	33
BÖLÜM 3. ....	35
MATERYAL VE METOT .....	35
3.1. ENERJİ ANALİZİ .....	35
3.1.1. Kütleinin Korunumu İlkesi .....	36

3.1.2. Enerjinin Korunumu İlkesi .....	37
3.2. EKSERJİ ANALİZİ .....	38
3.2.1. Termodinamiğin İkinci Yasası .....	38
3.2.2. Ekserjinin Önemli Boyutları .....	39
3.2.3. Ekserji Analizinin Önemi .....	41
3.2.4. Ekserji Bileşenleri .....	41
3.2.5. Ekserji Verimi .....	43
3.2.6. Ekserji Maliyeti .....	45
BÖLÜM 4. ....	48
BUHAR KAZANI ENERJİ ANALİZİ .....	48
4.1. YAKITLARIN YANMA ENTALPİLERİNİN BELİRLENMESİ .....	49
4.2. BACA GAZI BİLEŞENLERİNİN MOLAR DEBİLERİNİN BELİRLENMESİ .....	50
4.3. BACA GAZI ENTALPİSİNİN BELİRLENMESİ .....	58
4.4. YANMA HAVASI DEBİSİNİN VE ENTALPİSİNİN BELİRLENMESİ .....	59
4.5. BUHAR KAZANINDAN ÇEVREYE OLAN ISI KAYBI .....	61
4.6. BUHAR KAZANININ ISIL VERİMİ .....	62
BÖLÜM 5. ....	63
BUHAR KAZANI EKSERJİ ANALİZİ .....	63
5.1. BUHAR KAZANINA GİREN VE ÇIKAN ÜRÜNLERİN EKSERJİLERİNİN BELİRLENMESİ .....	63
5.1.1. Besleme Suyunun Ekserjisi .....	63
5.1.2. Buharın Ekserjisi .....	65
5.1.3. Yakıt Ekserjisinin Belirlenmesi .....	66
5.1.4. Kazana Giren Yakma Havası Ekserjisinin Belirlenmesi .....	72
5.1.5. Baca Gazı Bileşenlerinin Ekserjilerinin Belirlenmesi .....	77
5.2. BUHAR KAZANININ ENERJİ VE EKSERJİ VERİMLERİNİN BELİRLENMESİ .....	79
5.2.1. Kazan Ekserji Kaybının (Tersinmezlik) Belirlenmesi .....	79
5.2.2. Buhar Kazanının Ekserji Verimi .....	80
5.2.3. Buhar Kazanı İyileştirme Potansiyeli .....	81

BÖLÜM 6. ....	82
BUHAR KAZANININ EKONOMİK ANALİZİ .....	82
BÖLÜM 7. ....	90
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	90
KAYNAKLAR .....	92
ÖZGEÇMİŞ .....	95
EK AÇIKLAMALAR A. BAZI GAZLARIN ÖZELLİKLERİ .....	96

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 2.1. Su buharı için P-v ve T-s diyagramları .....	8
Şekil 2.2. Su buharı için h-s (Mollier) diyagramı .....	11
Şekil 2.3. Buhar kazanının genel yapısı ve ekipmanları .....	18
Şekil 2.4. Domun detay resmi .....	20
Şekil 2.5. Domun kazan üzerindeki genel görünüşü.....	20
Şekil 2.6. Aspiratörün fan kısmı (emiş yapan kısım).....	21
Şekil 2.7. Vantilatörün genel resmi ve emiş borusu.....	21
Şekil 2.8. Evaporatörün detay resmi .....	22
Şekil 2.9. Evaporatörün kazan üzerindeki genel görünüşü .....	23
Şekil 2.10. Kızdırıcıların detay resmi .....	23
Şekil 2.11. Kızdırıcıların kazan üzerindeki genel görünüşü .....	24
Şekil 2.12. Luvonun kazan üzerindeki genel görünüşü .....	25
Şekil 2.13. Ekonomizerin detay resmi .....	26
Şekil 2.14. Ekonomizerin kazan üzerindeki genel görünüşü .....	26
Şekil 2.15. Gaz yakıcıların genel görünüşü .....	27
Şekil 2.16. Re-sirkülasyon fanı .....	28
Şekil 2.17. Kazan kurum üfleme sisteminin genel görünüşü.....	29
Şekil 2.18. Yakıtların alt ısıl değerlerinin karşılaştırılması.....	33
Şekil 3.1. Sürekli akışlı açık bir sistem için kontrol hacmi ve kontrol yüzeyi.....	35
Şekil 3.2. Sistem sınırından girip çıkan akış halindeki bir maddenin ekserji bileşenleri .....	42
Şekil 4.1. Buhar kazanına giren ve çıkan ürünler .....	48
Şekil 4.2. Aspiratörün karakteristik çalışma eğrisi .....	51
Şekil 4.3. Vantilatörün karakteristik çalışma eğrisi .....	60
Şekil 5.1. Vantilatörün karakteristik çalışma eğrisi .....	72
Şekil 5.2. +265m için psikrometrik diyagram.....	73
Şekil 6.1. Buhar kazanı akım şeması .....	83

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Isıtma sistemlerinde su buharı, kaynar su ve ısıtıcı yağlar kullanılmasının avantaj ve dezavantajları .....	8
Çizelge 2.2. Yakma sistemleri ve özellikleri .....	13
Çizelge 2.3. Buhar kazanlarının iş akışına göre sınıflandırılması.....	14
Çizelge 2.4. Kok gazının hacimsel analiz değerleri.....	31
Çizelge 2.5. Yüksek fırın gazının hacimsel analiz değerleri.....	32
Çizelge 2.6. Konverter gazının hacimsel analiz değerleri.....	33
Çizelge 2.7. Gazların kazana girişteki debi, basınç, sıcaklık ve hacimsel oranları....	34
Çizelge 3.1. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması .....	39
Çizelge 4.1. Yakıtların termofiziksel özellikleri .....	49
Çizelge 4.2. Yakıtların bileşenleri, hacimsel oranları ve hacimsel debileri.....	52
Çizelge 4.3. Baca gazı bileşenlerinin molar debileri ve molar oranları .....	57
Çizelge 5.1. Yakıtların termofiziksel özellikleri .....	66
Çizelge 5.2. Bazı endüstriyel yakıtların $\phi$ değerleri.....	66
Çizelge 5.3. Nemli havanın bileşenlerinin molar debileri ve molar oranları .....	75
Çizelge 5.4. Baca gazı bileşenlerinin molar debileri ve kimyasal ekserjileri .....	77
Çizelge 6.1. Buhar kazanının maliyet analizi.....	83
Çizelge EK A.1. Bazı gazların entalpisi için ortalama izobarik özgül ısı kapasitesi .	97
Çizelge EK A.2. Bazı gazların entropisi için ortalama izobarik ısı kapasitesi .....	99
Çizelge EK A.3. Bazı gazların ortalama izobarik ekserji kapasitesi.....	101
Çizelge EK A.4. Özgül ısı eşitliği için katsayı değerleri .....	103

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$C_p$	: özgül ısı kapasitesi (kJ/kg K)
$\bar{C}_p$	: molar özgül ısı kapasitesi (kJ/kmol K)
$ex^{fiz}$	: özgül fiziksel ekserji (kJ/kg)
$ex^{kim}$	: özgül kimyasal ekserji (kJ/kg)
$ex^{top}$	: toplam özgül ekserji (kJ/kg)
$\bar{e}x$	: molar özgül ekserji (kJ/kmol)
$\bar{e}^{kim}$	: standart molar kimyasal ekserji (kJ/kmol)
$\dot{E}x^{top}$	: toplam ekserji (kW)
$\dot{E}x^{kayıp}$	: ekserji kaybı (kW)
$\dot{E}x_{\phi}$	: çıkan ekserji (kW)
$\dot{E}x_g$	: giren ekserji (kW)
$f$	: eksergoekonomik faktör
$h$	: entalpi (kJ/kg)
$h_o$	: ölü haldeki entalpi (kJ/kg)
$\dot{H}$	: birim zamandaki toplam entalpi (kW)
$H_u$	: yakıtın alt ısı değeri (kcal/Nm <sup>3</sup> )
$\dot{H}_u$	: yakıtın toplam yanma entalpisi (kW)
$\dot{I}$	: tersinmezlik (kW)
$\dot{I}P$	: iyileştirme potansiyeli (kW)
$M$	: moleküler ağırlık (kg/kmol)
$\dot{m}$	: kütleli debi (kg/s)
$\dot{n}$	: yanma sonu ürünlerinin molar debisi (kmol/s)
$n$	: mol sayısı (kmol)
$P_c$	: gazların giriş basıncı (kPa)
$P_{doyma}$	: suyun doyma basıncı (kPa)

$P_{oo}$	: atmosferdeki suyun standart kısmı basıncı (kPa)
$P_m$	: mutlak basınç (kPa)
$\dot{Q}$	: kontrol hacmine giren ısı eneji (W)
$\dot{Q}_{kayıp}$	: ısı ile olan enerji kaybı (kW)
$R$	: gaz sabiti (kJ/kgK)
$\bar{R}$	: universal gaz sabiti (8.314 kJ/kmol K)
$s$	: entropi ( kJ/kgK)
$s_o$	: ölü haldeki entropi (kJ/kgK)
$T_o$	: ölü haldeki çevre sıcaklığı (°C)
$T$	: sıcaklık (°C)
$\dot{V}_{baca}$	: baca gazının hacimsel debisi (m <sup>3</sup> /s)
$\dot{V}_i$	: hacimsel debi (Nm <sup>3</sup> /s)
$y_i$	: mol oranı
$\dot{W}$	: birim zamanda yapılan iş (W)
$\eta_{ısıl}$	: ısı verim (%)
$w$	: özgül nem (%)
$\Phi$	: bağıl nem (%)
$\Psi$	: ekserji verimi (%)
$\varphi$	: yakıtın kimyasal ekserjisinin yakıt entalpisine oranı
$\eta_{ısıl}$	: ısı verim (%)



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Günümüzde dünya nüfusundaki hızlı artış ve sanayileşmedeki gelişim sonucu enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün giderek artmaktadır. Gelişmiş ülkelerdeki enerji tüketimi daha yavaş bir artış gösterirken, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin enerji tüketimindeki artış daha hızlı olmaktadır. Enerji ihtiyacının büyük bir kısmının karşılandığı fosil kökenli enerji kaynaklarının sınırlı ve gelecek bir zamanda enerji gereksinimini karşılayamayacak olması, kaynak kısıtlılığı göstermeyen yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç olduğunu ve mevcut enerjinin verimli bir şekilde kullanılması gerektiğini açıkça göstermektedir. Sürekli artan enerji tüketiminin karşılanmasında, tüketilen enerjiyi verimli bir şekilde kullanarak enerji kaynaklarının ömrünü uzatmak en etkin yöntemlerden biridir. Bu nedenle, mevcut enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Enerji verimliliği, binalarda yaşam standardı ve hizmet kalitesinin, endüstriyel işletmelerde üretim kalitesi ve miktarının düşüşüne yol açmadan, birim hizmet veya ürün miktarı başına enerji tüketiminin azaltılması olarak ifade edilmektedir.

Dünyanın enerji kaynaklarının sınırlı olması ve sürdürülebilir bir gelecek için gerekli olan enerjinin verimli kullanılması gerçeğinin giderek daha geniş kesimlerce anlaşılması, hükümetleri enerji politikalarını yeniden gözden geçirmeye ve enerji savurganlığını önlemeye yöneltmiştir. Bu olgu, bilimsel çevreleri de enerji dönüşüm araçlarını yeniden değerlendirmeye ve var olan sınırlı enerji kaynaklarından daha çok yararlanabilmek için yeni yöntemler geliştirmeye itmiştir (Çengel ve Boles, 1996).

Bu nedenle 20. yüzyılın ikinci yarısında alternatif enerji kaynakları araştırılması ve mevcut enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması çalışmaları yoğun bir şekilde artmıştır (Ertesvag, 2005).

Mevcut enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması, herhangi bir prosesteki kayıpların ortadan kaldırılması veya minimuma indirilmesi ile sağlanır. Bir proseste kullanılan enerjinin verimli bir şekilde kullanılıp kullanılmadığı, Termodinamik kanunları ile belirlenir. Termodinamiğin birinci yasası enerjinin korunumundan yani niceliğinden, ikinci yasası ise enerjinin kalitesinden yani niteliğinden bahseder.

Enerji ve ekserji analizi, termodinamiğin birinci ve ikinci yasasını birlikte ele alan ve enerjinin maksimum kullanımı veya kullanılabilirliğini ifade eden bir analiz şeklidir. Birinci yasaya göre enerji analizi, ikinci yasa göre ise ekserji analizi yapılmaktadır (Wall G.,1986, Çamdalı, Ü., 2004).

Enerji ve ekserji analizleri, ısıl proseslerde kullanılan doğruluğu kanıtlanmış analizlerdir. Enerji analizi, ısı ve iş arasındaki farkı önemsemeden tüketilen enerji miktarını hesaplayan bir analiz olup mühendislik sistemlerinin dizayn ve analizlerinde yeterli değildir. Bu nedenle, ikinci yasa olarak bilinen ekserji analizi ile termodinamikte önemli bir yeri olan tersinmezliklerden kaynaklanan ekserji kayıpları hesaplanabilmektedir. Böylece bir sistem için enerji yerine ekserji hesapları da yapıldığında enerji kaliteleri arasındaki fark da dikkate alınmış olur. Bu nedenle ekserji analizine dayalı sistem değerlendirmeleri daha uygun bir yaklaşım olmaktadır. Enerji ve ekserji analizinden elde edilen sonuçlara göre, tersinmezliklere bağlı olarak meydana gelen kayıplar tespit edilerek sistemde yapılması gereken iyileştirmeler belirlenebilmektedir (Ünal, 2009).

Son yıllarda bilim adamları, mühendisler ve araştırmacılar tarafından mevcut enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması, kayıp enerjinin tekrar geri kazanılması amacıyla yapılan çalışmalar yoğun bir şekilde artmıştır. Bu kapsamda, endüstriyel tesislerdeki ısıl sistemlerin enerji ve ekserji analizi yoluyla performanslarının değerlendirilmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Bodvarsson ve Eggers (1972) yaptıkları çalışmada, ilk ekserji analizini tek ve çift buharlaştırıcı iki farklı sistemden oluşan bir jeotermal güç santralinde uygulamışlar ve santralin tamamı için ekserji verimliliğini hesaplamışlardır.

Rosen (1990) yaptığı çalışmada; enerji ve ekserji analizini, yakıt-hücre sistemleri ile fosil yakıt ve nükleer buhar güç tesislerine uygulamıştır. Sonuç olarak, bir tesis için enerji veriminin incelenmesinin yanında ekserji veriminin de incelenmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Gaggioli vd. (1991) yaptıkları çalışmada; içinde proses buharının tümünü ve ihtiyaç duyulan gücün üretildiği yeni bir nitrik asit tesisine, yakıt ve güç giderlerini minimum yapmak üzere ekserji analizini uygulamışlardır.

Bidini ve Stecco (1991) yaptıkları çalışmada; endüstriyel proseslerdeki ekserji kayıplarını belirlemek ve bu kayıpları azaltmak için TEXAS (Thermal ve Exergetic Analysis of Systems) ekserji yaklaşım metodunu kullanmışlardır. Bu metoda göre oluşturdukları performans grafiği ile tesisin belirli koşullar altındaki giderlerinin nasıl minimum yapılması gerektiğini göstermişlerdir.

Tsatsaronis (1993), bir enerji tesisine enerji sistemlerinin optimum tasarımını ve performansını hesaplamak için mühendislik ekonomisinin genel kavramları ile ekserjinin bir araya getirilmesinden oluşan termoekonomik analizi uygulamıştır.

Pak ve Suzuki (1997), bölgesel ısıtma ve soğutmada kullanılan gaz türbinli kojenerasyon sistemlerinin ekserji analizi yoluyla değerlendirmesini içeren bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, ikili akışkan çevrimi ve kombine çevrim olmak üzere iki farklı gaz türbini çevrimi ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; yüksek ısı sağlanması istenildiğinde ikili akışkan çevriminin ekserjetik veriminin yüksek olduğu, düşük ısı sağlanması istenildiğinde ise kombine çevrimin ekserjetik veriminin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, ısı ihtiyacının bilinmesi durumunda bölgesel ısıtma ne tip bir kojenerasyon sisteminin kullanılabileceğinin kriterleri ortaya konulmuştur.

Doldersum (1998) yaptığı çalışmada; rafineride meydana gelen ekserji kayıplarını inceleyerek elde ettiği sonuçlar doğrultusunda ne tür iyileştirmeler yapılabileceğini göstermiştir. Sistemde en çok ekserji kaybının ocaklarda ve damıtma ünitelerinde

olduğunu, yapılan iyileştirmeler sonucunda toplam ekserji kaybının %70'e varan oranlarda azaltılabileceğini tespit etmiştir.

Habib vd. (1999) yaptıkları çalışmada; bir enerji santraline enerji ve ekserji analizi uygulayarak, santraldeki her bir elemanda meydana gelen ekserji kayıplarını belirlemişler ve sistem veriminin artırılması için alternatif çözümler önermişlerdir.

Guarinello vd. (2000) yaptıkları çalışmada; endüstriyel bir bölgede hem elektrik hem de ısı ihtiyacını karşılayan gaz türbinli bir kojenerasyon sistemine ekserjetik maliyet teorisini uygulayarak sistemin termoekonomik analizini yapmışlardır.

Chejne ve Restrepo (2003) yaptıkları çalışmada; çoklu üretim sistemlerinin eksergoekonomik optimizasyon metodlarına yeni yaklaşımlar getirmişlerdir. Buradaki yeni yaklaşımda, sistemdeki tersinmezliklerin birim ekserji maliyeti kayıpları ele alınmıştır. Sistem için yapılan değerlendirmeler hem yeni yaklaşımla hem de diğer metodlarla kıyaslanmıştır.

Kopaç ve Zemher (2004), gaz türbinli bir kojenerasyon tesisinin ekserji analizini yaparak, buhar enjektörünün bir gaz türbininin ekserji verimine etkisini incelenmişlerdir. Enjektörde edilen buharın farklı kütleli debileri ve sıcaklığı için çevrim ekserji verimi, net güç çıkışı ve ekserji yıkımı hesaplanmıştır. Enjektörde edilen buharın kütleli debisinin artmasıyla net elektrik gücü çıkışının arttığı ve toplam ekserji yıkımının (veya tersinmezliğin) azaldığı tespit edilmiştir.

Aljundi (2008), Al-Hussein kuvvet santralinin performansını değerlendirmek için enerji ve ekserji analizi yapmıştır. Çalışmada, kuvvet santralinin bileşenleri ayrı ayrı analiz edilerek, en yüksek enerji ve ekserji kayıplarının hangi bileşende meydana geldiği belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca, referans evre koşulları değiştirilerek, evre koşullarının verimler üzerine etkisi incelenmiştir. Ekserji yıkımının toplam ekserji yıkımına oranı en yüksek %77 ile boylerde, daha sonra % 13 ile türbinde olduğu tespit edilmiştir. Sistemin enerji verimi % 26 bulunurken ekserji verimi % 25 olarak bulunmuştur.

Dragan vd. (2009), bir kazanın ekipmanlarında meydana gelen enerji ve ekserji kayıplarını, yaptıkları enerji ve ekserji analizine göre belirlemişlerdir. Enerji kaybı; kondenserde % 53, boylerde % 11, diğer bileşenlerde % 4 olarak bulunmuştur. Ekserji kaybı ise; boylerde % 55, turbo jeneratörde % 7, kondenserde % 2, diğer bileşenlerde % 4 olarak bulunmuştur.

Saidur vd. (2010) yaptıkları çalışmada, boylerin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Çalışmadan elde ettikleri sonuçlara göre, boylerin enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla % 72.46 ve % 24.89 olarak bulmuşlardır. Ayrıca en fazla ekserji yıkımının yanma odasında olduğunu tespit etmişlerdir.

Regulagadda vd. (2010), 32 MW'lık kömür yakıtlı kuvvet santrali için bir boiler ve türbin jeneratörünün termodinamik analizini yapmışlardır. Sistemin performansını arttıracak parametreleri belirlemek için sistemin enerji ve ekserji dengelerini yazarak, farklı çalışma basınçları, sıcaklıkları ve debileri için sistemin analizini yapmışlardır. Ayrıca, kuvvet santralinde boiler ve türbinde meydana gelen tersinmezliklerin en yüksek ekserji kayıplarına neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Jiang ve Zhou (2010), kazandaki yanma ve ısı transferinin karakterine göre kazanı 3 sıcaklık bölgesine ayırarak kazanın enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre sıcaklık arttığında adyabatik yanma sıcaklığının da arttığı ve birinci bölümün ekserji kaybında azalmaya sebep olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca adyabatik yanma sıcaklığının artmasıyla çalışma akışkanının ekserjisi değişmediği takdirde ikinci ve üçüncü bölümlerin ekserji kayıplarının artacağı tespit edilmiştir.

Ekserji analizinin sonuçları, çevreye daha az atık bırakan, doğal kaynakları daha az kullanarak üretimi sağlayan yeni teknolojilerin gelişmesine yön gösterdiğinden oldukça faydalı olmaktadır. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada, mevcut bir demir çelik fabrikasının enerji santrali üzerinde bulunan gaz yakıtlı bir buhar kazanının enerji ve ekserji analizi yapılarak, kazanın enerji ve ekserji verimleri, enerji ve ekserji kayıpları, iyileştirme potansiyeli gibi performans parametreleri belirlenmiştir.

Ayrıca buhar kazanı, ekserji maliyet hesabı ve eksergoekonomik açıdan ekonomik olarak analiz edilerek kazanda üretilen buharın ekserji maliyeti bulunmuştur.

## BÖLÜM 2

### BUHAR ÜRETİMİ VE BUHAR KAZANLARI

#### 2.1. BUHAR ÜRETİMİ

Sıvılaşıma bölgesine yakın gazlara buhar, sonsuz küçüklükteki bir sıcaklık düşmesinin sıvılaştırdığı buhara doymuş buhar, sıvılaşmak için belirli bir sıcaklık isteyen buhara ise kızgın buhar adı verilmektedir.

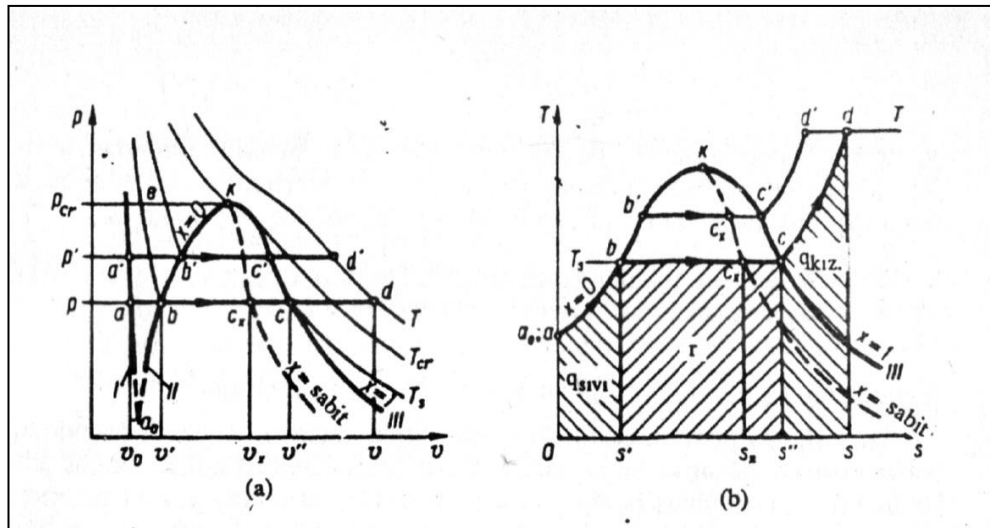
Buhar, sıvı ya da katı halden buharlaşma ya da sublimasyon yolu ile oluşur. Suyun buharlaşması esnasında eşit miktarda sıvı ya da katı parçacıkların gaz haline geçtiği ve aynı zamanda gaz halinden geri döndüğü bir dinamik denge kurulur.

Su buharı, ısı tekniğinde birçok alanda çalışma akışkanı olarak kullanılabilir. Bunun en büyük nedenleri; suyun doğada bol olarak bulunması, su ve su buharı işlemlerinin termodinamik özelliklerinin iyi olması, suyun ve su buharının canlılar üzerinde olumsuz etkilerinin bulunmaması şeklinde sıralanabilir. Günümüzde ısıtma akışkanı olarak, buhardan başka yüksek veya orta basınçlarda kaynar su ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı ısı transferi yağları da kullanılmaktadır. Su buharı ile bu akışkanların üstünlük ve sakıncalarının bir karşılaştırması Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Büyük işletmelerde ısıtma için su buharı kullanılması tek çözümdür. Özellikle buhar türbini ve elektrik jeneratörü kullanılarak elektrik üretimi ile birlikte türbin egzoz buharının ısıtmada kullanılması en ideal çözümdür. Birim ısı taşımada, diğer akışkanlara göre buhar boruları çaplarının daha küçük olması, çok fazla ısıtma cihazlarına gerek duyulan petro-kimya, tekstil ve kağıt endüstrileri için buhar en uygun ısıtıcı akışkandır.

Çizelge 2.1. Isıtma sistemlerinde su buharı, kaynar su ve ısıtıcı yağlar kullanılmasının avantaj ve dezavantajları.

Su Buharı	Kaynar Su	Isıtıcı Yağ
Isı kapasitesi yüksek, gizli buharlaşma ısısı yaklaşık 2500 kJ/kg	Isı kapasitesi orta, özgül ısısı 4.18 kJ/kg°C	Isı kapasitesi az, özgül ısısı 1.7-2.9 kJ/kg°C
Ucuz, fakat su hazırlama pahalı	Ucuz	Pahalı
Isı geçiş katsayısı iyi	Isı geçiş katsayısı orta	Isı geçiş katsayısı az
Yüksek sıcaklıklarda yüksek basınç gerekli	Yüksek sıcaklıklarda yüksek basınç gerekli	Düşük basınçlarda yüksek sıcaklık
Sirkülasyon pompasına gerek yok	Sirkülasyon pompası gerekli	Sirkülasyon pompası gerekli
Boru çapı küçük	Boru çapı büyük	Boru çapı büyük
Buhar kapanı gerekli	Buhar kapanı gereksiz	Buhar kapanı gereksiz
Flash problemi var	Flash problemi yok	Flash problemi yok
Blöf problemi var	Blöf problemi yok	Blöf problemi yok
Korozyon var	Korozyon az	Korozyon yok
Yangın tehlikesi yok	Yangın tehlikesi yok	Yangın tehlikesi var
Sistem esnek	Sistem az esnek	Sistem esnek değil
Isı geçiş katsayısı iyi	Isı geçiş katsayısı orta	Isı geçiş katsayısı az
Yüksek sıcaklıklarda yüksek basınç gerekli	Yüksek sıcaklıklarda yüksek basınç gerekli	Düşük basınçlarda yüksek sıcaklık
Sirkülasyon pompasına gerek yok	Sirkülasyon pompası gerekli	Sirkülasyon pompası gerekli



Şekil 2.1. Su buharı için P-v ve T-s diyagramları.

Su buharı suyun buharlaşması ve kaynaması ile elde edilir. Buharlaşma işlemi sadece sıvı yüzeyindeki doymuş hava filmindeki su buharının kısmi basıncı ile ilgilidir.



Kaynama işlemi ise bütün sıvı kütlesi içinde oluşabilen ve sıvı ile temastaki sıcak cidarlardan verilen ısı ile ortaya çıkan kuvvetli bir buharlaşma olayıdır. Bu olayda cidar sıcaklığı daima sıvının doyma sıcaklığından daha büyüktür. Sıcak cidarlarda oluşan buhar kabarcıkları sıvı içinde büyür ve sıvı yüzeyine doğru yükselir.

Kaynama veya buharlaşmanın tersi olan yoğuşma işlemi ise buhardan ısının alınması ile buhar fazından sıvı fazına dönüşümdür. Isı tekniğinin önemli olaylarından sayılabilen buharlaşma ve yoğuşma işlemlerinin her ikisi de sabit sıcaklıkta oluşur.

Su buharı, buhar kazanlarında sabit basınçta üretilir. Şekil 2.1'de P-v ve T-s diyagramlarında bu işlem görülmektedir. Başlangıçta 0 °C sıcaklıkta ve  $v_0$  hacminde 1 kg su göz önüne alınsın (a noktası). Sabit P basıncında 1 kg su ısıtılır ise sıcaklığı ve hacmi artar. Suyun sıcaklığı, P basıncına karşı gelen buharlaşma sıcaklığına kadar artar (b noktası). Bu esnada ısı verilmeye devam edilecek olursa, suda kaynama görülür ve sıcaklık artmadan, verilen ısı doğrudan suyun buharlaşmasına harcanır. Verilen ısı x kadar suyu buharlaştırmış ise (1-x) kg su, sıvı fazındadır ( $c_x$  noktası). Bu noktada,

$$x = \frac{\text{Buhar miktarı (kg)}}{(\text{Buhar} + \text{Su}) \text{ miktarı (kg)}} \quad (2.1)$$

şeklinde hesaplanan oran, kuruluk derecesi olarak tanımlanır.

Isı verilmeye devam edilirse c noktasında bütün su,  $v''$  özgül hacminde buhar fazına dönüşür ve bu noktadaki buhar kuru doymuş buhar olarak adlandırılır. Kuru doymuş buhar P=sabit basınçta ısıtılmaya devam edilirse, özgül hacmi ve sıcaklığı artar (c-d kısmı).  $v > v''$  ve  $T > T_s$  şartlarındaki buhar kızgın buhar olarak adlandırılır.

Buraya kadar ki açıklamalara göre, sabit basınçta su fazından kızgın buhar üretmek için üç kademeye gerek olduğu anlaşılmaktadır. Bunlar; (1) suyun kaynama sıcaklığına kadar ısıtıldığı kademe, a-b eğrisi; (2) sabit basınçta suyun buharlaştığı kademe, b-c doğrusu; (3) buharın sıcaklığının arttığı kademe, c-d eğrisi olarak ifade edilebilir.

Suyun başlangıç basıncı başka bir değer olarak seçilir (örnek olarak a' noktası) ve aynı ısıtma işleminin yapıldığı varsayılır ise buharlaşma ve kızma için başka b', c' ve d' noktaları elde edilir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi farklı basınçlar için bu şekilde elde edilen a, a' ; b, b' ve c, c' noktaları, I, II ve III karakteristik eğrilerini verir. I eğrisi 0 °C sıcaklıktaki suyun farklı basınçlardaki durumlarını gösterir. Pratik olarak su sıkıştırılmaz bir akışkan olduğundan, I eğrisi farklı basınçlardaki suyun buharlaşmasının başladığı noktaları belirlediğinden bu eğri doymuş sıvı eğrisi olarak tanımlanır. III eğrisi ise, buharın doymuş hale geldiği noktaların oluşturduğu eğri olduğundan bu eğride doymuş buhar eğrisi olarak adlandırılır.

II ve III eğrilerinin K kesim noktası kritik noktayı oluşturur. Bu noktada su ve buhar aynı fiziksel özelliklere sahiptir. Su için kritik noktada basınç, sıcaklık, özgül hacim, yoğunluk, entalpi ve entropi,

$$P_{cr} = 221.20 \text{ bar}$$

$$T_{cr} = 374.15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$v_{cr} = 0.00317 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\rho_{cr} = 315.5 \text{ kg/m}^3$$

$$h = 2107.4 \text{ kJ/kg}$$

$$s = 4.4429 \text{ kJ/kgK}$$

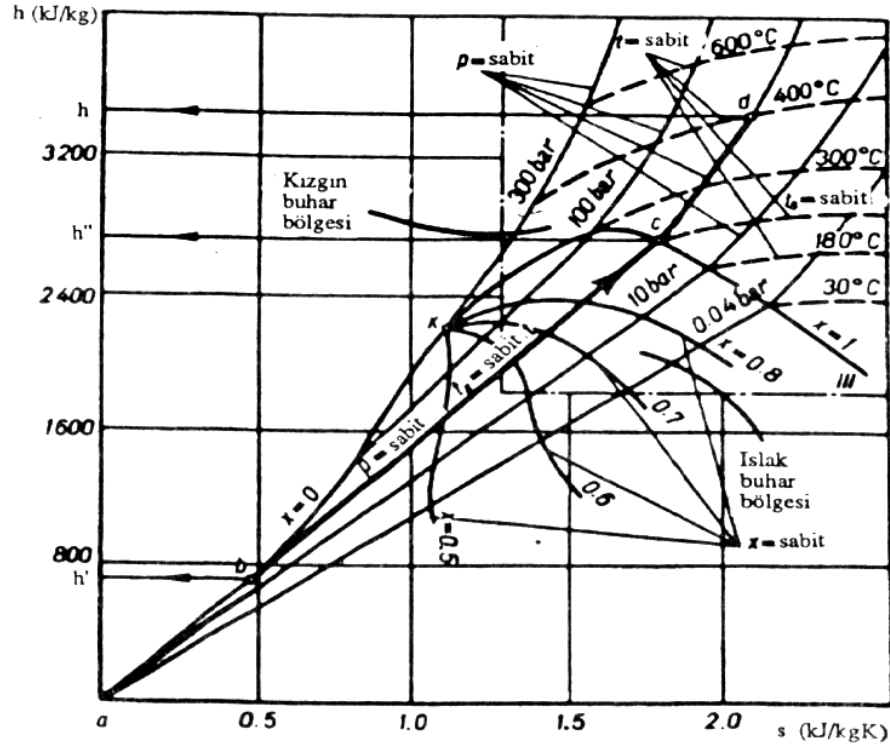
değerlerindedir.

Şekil 2.1'de aynı zamanda  $T_s$ ,  $T_{cr}$  ve  $T$  gibi sabit sıcaklık eğrileri de çizilmiştir.  $T < T_{cr}$  olması durumunda sabit sıcaklık eğrisi üç farklı kısım gösterir. c–d kısmı, kızgın buhar bölgesidir ki burada basınç arttıkça özgül hacim azalır. c–b kısmı ise su buharı ile sıvının dengede olduğu yeri belirler. Burada hem sıcaklık hem de basınç sabittir. Eğrinin b–a kısmı sıvı fazını gösterir ki burada basınç çok keskin olarak artar.

$T_{cr}$  eğrisinde yatay bir kısım olmamasına karşılık K noktasında bir bükülme vardır ve bu noktadaki teğet yataydır. (Şekil 2.1a). Bu kritik sıcaklıkta sıvıdan gaza geçiş esnasında özgül hacimde hiçbir değişiklik yoktur, bu nedenle sıvı ve buhar fazı aynı

şartlardadır.  $T > T_{cr}$  sabit sıcaklık eğrisi düzgün bir şekilde değişir ve yaklaşık olarak ideal gazlardaki sabit sıcaklık eğrilerine benzer. Bundan dolayı, sadece sıcaklığın  $T < T_{cr}$  olması durumunda su, hem sıvı hem de buhar gibi iki fazda bulunabilir.  $T > T_{cr}$  durumunda ise su, sadece kızgın buhar fazındadır.

Su buharı işlemlerindeki çalışmalarda büyük kolaylıklar sağlayan h-s (Mollier) diyagramı Şekil 2.2’de verilmiştir. Diyagramda K kritik noktayı, a-K doymuş sıvıyı, K-III ise doymuş kuru buharı, dolu çizgiler sabit basınç eğrilerini, kesikli çizgiler ise sabit sıcaklık eğrilerini göstermektedir. Islak buhar bölgesinde ( $0 < x < 1$ ) sabit basınç ile sabit sıcaklık eğrileri üst üste çakışır.



Şekil 2.2. Su buharı için h-s (Mollier) diyagramı.

Endüstriyel tesislerde ısı taşıyıcı akışkan olarak buhar kullanılmasının avantajları maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- İdeal bir ısı taşıyıcı akışkandır.
- Küçük çaplı borularla daha fazla ısı taşınabilir.
- Geri kazanımı ile enerji tasarrufu sağlanabilir.

- Akışkanın taşınması kendi basıncıyla gerçekleşir. Pompaya gerek yoktur. Dolayısıyla maliyeti düşüktür.
- Sıcaklık kontrolünü çok hassas bir biçimde gerçekleştirmek mümkündür.
- Buhar, tesisattaki korozyon riskini azaltır.
- Küçük çaplı borular ile iletilmesi nedeniyle ısı kayıpları diğer sistemlere göre daha azdır.
- Yatırım gideri azdır, küçük çaplı boru kullanılır, yalıtım az yapılır, dolayısıyla buharlı sistemin yatırım maliyeti düşüktür.
- Buhar emniyetlidir yani alevlenme özelliği yoktur. Steril bir akışkandır.
- Buhar çevre dostudur, Saf madde olduğundan dolayı çevreye zarar vermez.
- Dezavantajı ise; yüksek enerji ve basınç olduğundan korunması yapılmalıdır.

## **2.2. BUHAR KAZANLARI**

Yakıtın kimyasal enerjisini yanma yoluyla ısı enerjisine dönüştüren ve bu ısı enerjisini iş akışkanına aktaran sistemlere kazan denir. Kazanlar, sıcak su veya istenilen basınç, sıcaklık ve miktarda buhar elde etmek amacı ile kullanılan cihazlardır. Kazanların verimi, yanma sonucu oluşan ısı enerjisinin hangi oranda iş akışkanına veya kullanma mahalline taşınmasına bağlıdır.

Yakıtta depolu bulunan kimyasal enerji, kazan yanma odasında meydana gelen yanma süreci ile ısı enerjisine dönüşür. Yanma sonunda oluşan yanma sonu ürünleri (baca gazları) ısılarını konveksiyon ve radyasyon yoluyla kazan borularına vererek boruların içersinden geçmekte olan suyun sıcaklığının yükselmesini sağlarlar. Su sıcaklığı, kazan işletme basıncının karşılığı olan buharlaşma sıcaklığına eriştiğinde buharlaşma başlar. Bu biçimde meydana gelen su-buhar karışımı genellikle ayırım deposu (dom) denilen bir haznede doymuş buhar ve su olmak üzere ikiye ayrılır. Ayırıştırılan doymuş buhar, kızdırıcıya gönderilerek kızgın buhara dönüştürülür. Su ise soğuk düşme boruları üzerinden tekrar buharlaştırıcıya gönderilir. Kazanların yanma odası bölümünde alev ile kazan boruları arasındaki ısı transferinin tamamına yakını radyasyon yoluyla gerçekleşir. Bu tip kazanlara radyasyon kazanları denir. Yanma gazlarının sıcaklığı ne kadar yüksek ise, kazandaki ısı transferinin, radyasyon yolu ile meydana gelen bölümü o kadar büyük olur. Kazanların son kızdırıcı

bölümünde ve ön ısıtıcılarında ısı transferi özellikle konveksiyon yoluyla olmaktadır. Kazanların yanma odası sıcaklıkları, yanma odası tipleri ile yakından ilgilidir. Izgaralı ocaklarda bu değer 1200 °C, katı cürüflü tip ocaklarda 1400 °C, sıvı cürüflü pulverize tip ocaklarda ise 1600 °C dolaylarındadır (Heper, 2001).

Çizelge 2.2. Yakma sistemleri ve özellikleri.

Sistem Özellikleri	Yakma Sistemleri		
	Izgaralı	Akışkan Yataklı	Brülörlü
Yanma Biçimi	Yüzeyde yanmalı	Akışkanlaştırılmış ortamda yanmalı	Yanma odası hacminde askıda yanmalı
Yakıt Tane Büyüklüğü	150-5 mm	10-0.5 mm	200-0 µm
Yanma Isı Kapasitesi	Küçük	Orta	Büyük
Yanma Evrelerinde Yakıt Dinamiği	Yüzeyde hareketsiz	Akışkanlaştırılmış ortamda yoğun türbülanslı	Hacimde askıda
Kömür Gazlaşma ve Tutuşma Isı Deposu	Kor tabakası	Akışkan yatak	Alev
Yakıt	Kok, taş kömürü, briket, standart kömür	Her türlü kömür ve atıklar	Toz kömür, sıvı ve gaz yakıtlar
Yapısal Emisyon Filtreleme	Yok	Var	Çok sınırlı
Emisyon kontrolü	Baca gazı arıtma sistemleri gerekli	Baca gazı arıtma sistemleri gereksiz	Baca gazı arıtma sistemleri gerekli

Kazanların yakma sistemleri, yanma biçimlerine yüzeyde, akışkanlaştırılmış ortamda ve yanma odası hacminde askıda yanmalı olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Yanmanın yüzeyde gerçekleştiği sistemler izgaralı yakma sistemleri, akışkanlaştırılmış ortamda gerçekleştiği sistemler akışkan yataklı yakma sistemleri, yanma odası hacminde askıda gerçekleştiği sistemler ise brülörlü yakma sistemleri olarak adlandırılır. Yakma sistemleri ve bazı özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Buhar kazanı, istenilen basınç, sıcaklık ve miktarda buhar üreten cihazlardır. Buhar üretimi, herhangi bir yolla elde edilen ısı enerjisi kapalı bir kap içerisindeki suya verilerek suyun buharlaşmasıyla gerçekleştirilir. Buhar kazanlarında suyun buharlaştırılması,

- Suyun sabit basınçta buharlaşma sıcaklığına kadar ısıtılması,
- Doymuş sıvı fazından doymuş buhar fazına kadar buharlaştırılması,
- Sabit basınçta buharın istenilen sıcaklığa kadar kızdırılması,

şeklinde üç kademe gerçeleşir.

Buhar kazanları, konstrüksiyonuna, iş akışkanına, yakılan yakıtta, ısı aktarımına vb. özelliklerine göre farklı şekillerde sınıflandırılabilir. İş akışkanına göre yapılan en yaygın kazan sınıflandırılması Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Buhar kazanlarının iş akışkanına göre sınıflandırılması.

Buhar Kazanları		
Alev duman borulu kazanlar	Su borulu kazanlar	
1. Alev borulu	Dolaşımli kazanlar	Zorlanmış geçişli kazanlar
2. Duman borulu	1. Doğal dolaşımli	1. Benson kazanları
3. Alev-duman borulu	2. Zorlanmış dolaşımli	2. Sulzer kazanları
		3. Velox kazanları

### 2.2.1. Alev - Duman Borulu Kazanlar

Alev-duman borulu kazanlar, silindirik bir gövde ve bu gövdenin içersinde uzanan duman borularından meydana gelir. Kazanın yanma odası bölümü, duman borularının başlangıç kısmında veya kazanın ön veya altındaki bir bölmededir. Kömür ızgara üzerinde yakılmakta ve baca gazları boruların içersinden geçerek duman hücreğine gelmekte buradan da bacaya verilmektedir. Yanma sonu gazları boruların içinden geçerken çevresindeki suyu ısıtarak buharlaştırmaktadır. Buharlaşan su, borularla dışarıya alınmakta ve duman hücreğinde kızdırılarak kullanma yerlerine gönderilmektedir.

Duman borulu kazanların, çok yüksek kalitede besleme suyuna ihtiyaç göstermemeleri ve büyük su hacimlerine sahip olması nedeniyle ani yük değişimlerine uyum sağlama avantajları bulunmaktadır. Bununla birlikte kapasitelerinin çok küçük olması, işletmeye alma ve yük değiştirme sürelerinin çok uzun olması, çok yer kaplamaları ve en çok 20 bar basınç için dizayn edilebilmeleri gibi dezavantajları bulunmaktadır. Günümüzde bu kazanlar termik santrallerde ve büyük entegre tesislerin kuvvet santrallerinde kullanılmamaktadır.

### **2.2.2. Su Borulu Kazanlar**

Büyük sanayi ve termik santral kazanları su borulu kazanlardır. Bu kazanlar, duman borulu kazanlara oranla, aynı miktardaki kazan gücü için çok daha az yer kaplarlar, işletmeye alma ve yük değiştirme süreleri daha kısadır. Ancak, boruların temizlenebilme olanakları zayıf olduğundan, son derece temiz bir besleme suyuna ihtiyaç gösterirler. Diğer bir dezavantaj ise, su hacimlerinin az olması nedeniyle değişen yüklere ayak uydurabilmeleri için çok hassas otomatik kontrol sistemlerine ihtiyaç göstermeleridir. Termik santral kazanları ve kuvvet santral kazanları su borulu kazanlar sınıfına girmektedir.

#### **2.2.2.1. Dolaşımli Kazanlar**

Dolaşımli kazanlarda, iş akışkanının dolaşımı, dolaşım kuvveti vasıtasıyla sağlanmaktadır. Bu tip kazanlarda buhar debisini artırmak için dolaşım hızını artırmak gerekmektedir. Yanma odasında, yanan yakıt baca gazlarını meydana getirir. Sıcak baca gazları ısılarını kazan borularındaki suya vererek kazanı baştanbaşa kat ederler.

Dom (ayırım deposu), iş akışkanının üç fazını birleştiren düğüm noktasıdır. Bu özelliği, kazan tasarımını ve ısı transferi hesaplarını kolaylaştırırken diğer taraftan kazan otomatik kontrolünü kolaylaştırır. Bir şamandıra vasıtasıyla sistemde su seviyesi kontrol edilebilmekte ve kütle dengesi sağlanmaktadır. Ayrıca buhar basınç kontrolü yapılarak enerji dengesi de kontrol edilebilir.

Doğal dolaşimli kazanlarda besleme suyu, önce besleme suyu ön ısıtıcısına gelir. Burada bir ön ısıtmaya tabi tutulan su, yoluna devam ederek doma girer. Daha sonra domdan çıkarak, kazan örtüsünün dışında kalan iniş borularından aşağıya dökülür.

Burada kolektörlerde toplanan buharlaştırıcı borularda ısınarak yükselir ve tekrar doma döner. Domdan başlayıp domda son bulan bu dolaşım tamamen doğal bir dolaşımdır. Doma dönen su-buhar karışımı burada doymuş buhar ve su olmak üzere ikiye ayrılır. Su, iniş borularından aşağı inerek yeni bir dolaşıma başlarken, doymuş buhar kızdırıcılara gönderilerek kızdırılır ve daha sonrada türbine gönderilir.

Doğal dolaşimli kazanlarda basınç artırıldığında iniş borularındaki suyun özgül ağırlığı ile buharlaştırıcı borulardaki su-buhar karışımının özgül ağırlığı arasındaki fark gittikçe küçülür. Bu ise dolaşımın sağlanabilmesine engel olur. Zorlanmış dolaşimli kazanlar bu fiziksel sınırlamadan dolayı ortaya çıkmıştır. Besleme suyu bir pompa vasıtasıyla buharlaştırıcı borulara basılmaktadır. Doğal dolaşimli ve zorlanmış dolaşimli olmak üzere iki çeşit olan bu kazanlar, maksimum 180 bar basınçta ve 1000 ton/h debide buhar üretebilmektedir.

#### **2.2.2.2. Zorlanmış Geçişli (Benson ve Sulzer) Kazanlar**

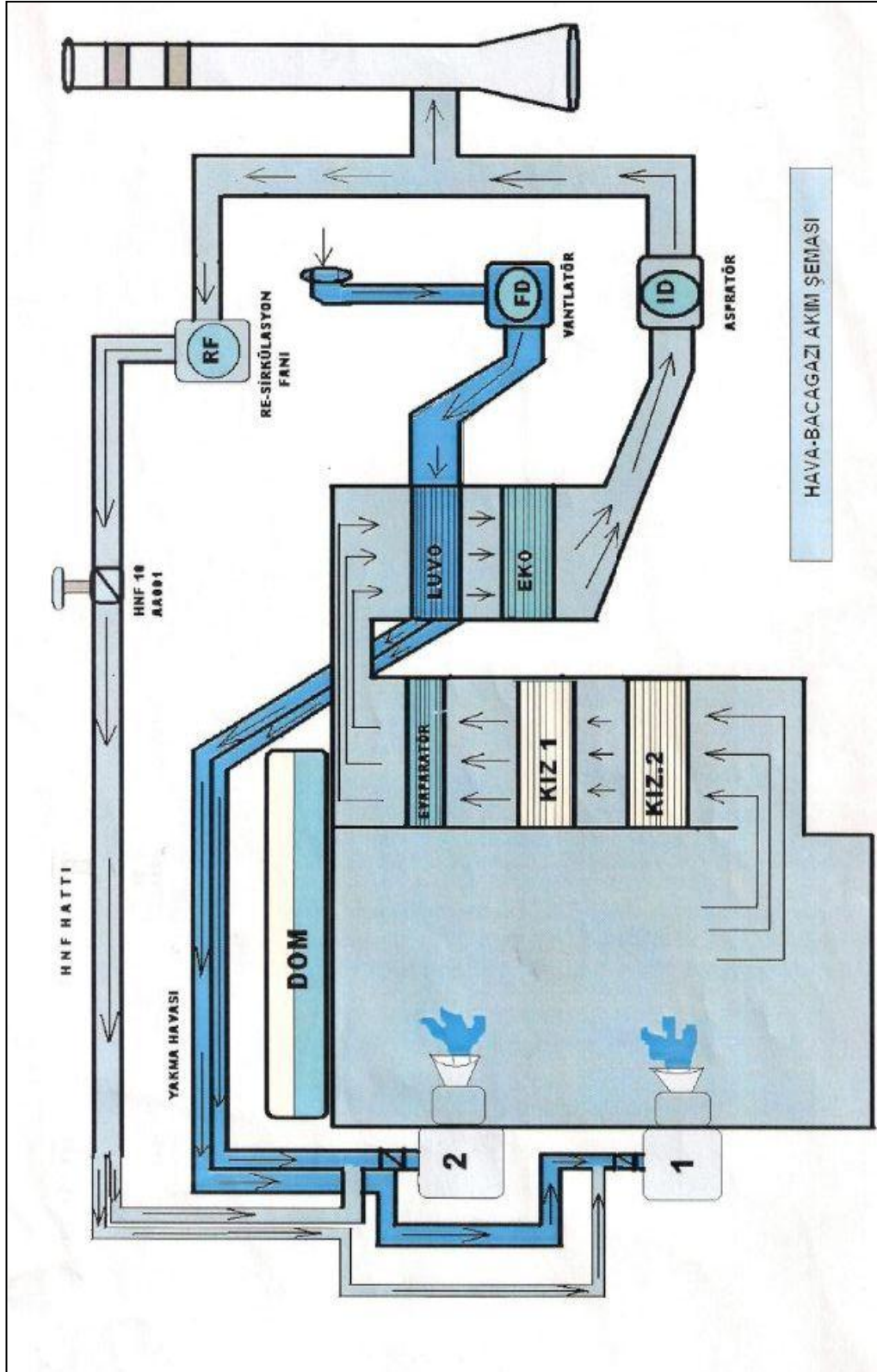
Dünya enerji gereksinimi hızla arttığından ve bu ihtiyaç genelde buhar kazanları ile karşılandığından, buhar kapasitesi önündeki sınırların kaldırılması gerekiyordu.

Dolaşimli kazanlardaki domdan kaynaklanan basınç ve buhar debisindeki sınırlamaların giderilmesi amacıyla zorlanmış geçişli kazanlar tasarlanmıştır. Devreye alma süresi daha kısa ve domsuz olan bu kazanlarda faz değişimi noktaları sabit değil yani ısıtma yüzeyleri alanları değişkendir. Dolayısıyla buhar eldesi için fiziksel sınırlar ( $P_B$ ,  $M_B$ ) ortadan kalkmış sadece ekonomik sınırlamalar ile bu kazanlar oluşturulmuştur. Bu kazanların dezavantajlarından biri dom olmamasıdır. Dom olmadığından dolayı besleme suyunun kalitesinin çok duyarlı yani arı su olması gerekir. Daha sonra bu kazanlara, separatör eklenmesiyle domun sağladığı avantajlar kazanılmıştır. Böylece kazan otomatik kontrolü kolaylaşmıştır.



### **2.3. İNCELENEN BUHAR KAZANI VE EKİPMANLARI**

Bu çalışmada incelenen buhar kazanı, su borulu ve gaz yakıtla çalışan bir kazan olup, saatte 385 °C sıcaklık ve 25 bar basınçta 50 ton buhar üretecek kapasiteye sahip bir kazandır. Buhar kazanı, kok gazı, yüksek fırın gazı ve konverter gazı yakan gaz yakıtlı bir kazan olup, iki geçişli ve tek domlu olarak dizayn edilmiştir. Yakma sistemi, kok gazı ve yüksek fırın gazı ile konverter gaz karışımını yakan yakıcı olmak üzere iki ayrı sistem olarak teçhiz edilmiştir. Yanma, lans tipi 4 adet gaz brülörü ile sağlanmaktadır. Gaz brülörlerinin işletmeye alınması, LPG gazı ile yapılmaktadır. Kazanın buharlaştırıcı boruları tabii sirkülasyon sistemi ile çalışmaktadır. Kazanda iki takım kızdırıcı bölgesi bulunmaktadır. Buhar kızdırıcısı, kazanın 1. ve 2. geçişine yerleştirilmiştir. Ekonomizerler baca gazının ters istikametine, gruplar halinde yanma odasının arka duvarına ve ikinci geçişe asılı olarak yerleştirilmiştir. Şekil 2.3'de kazanın genel yapısı ve ekipmanlarının yerleşim planı görülmektedir.



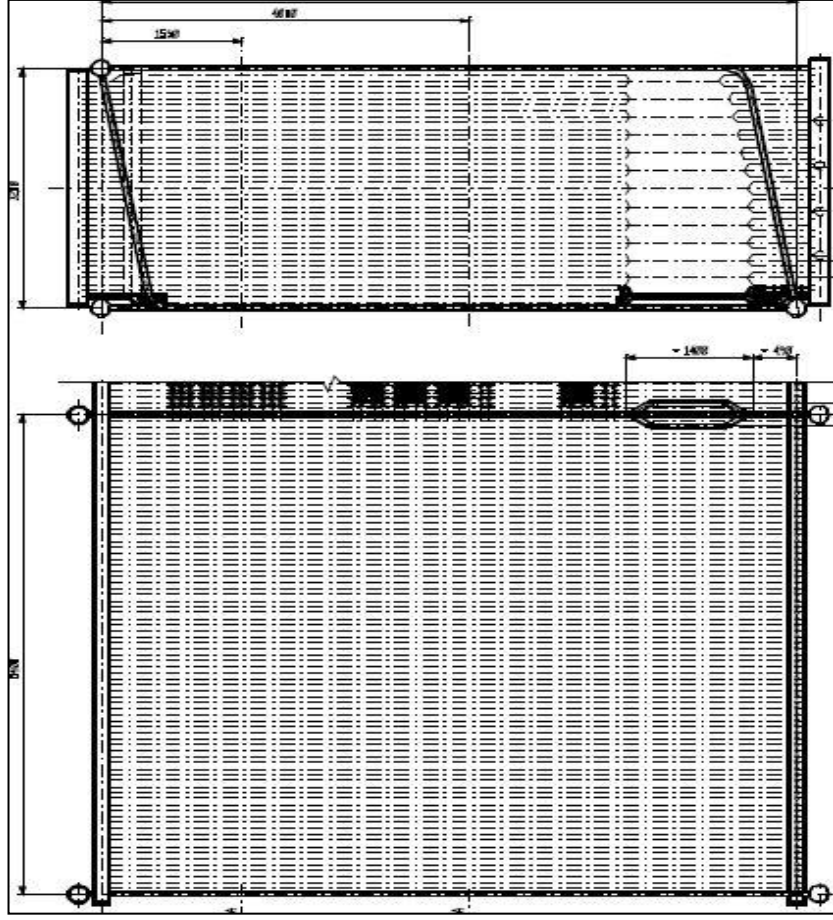
Şekil 2.3. Buhar kazanının genel yapısı ve ekipmanları.

### **2.3.1. Drum (Dom)**

Kazan domu, silindirik yapıda ve kazan destek yapısına rotları asılı vaziyettedir. Tek domlu olarak dizayn edilmiş ve siklonlar, perde ayırıcıları ile domun dahili aksesuarları, kızdırıcı çıkışında saf ve kuru buhar elde etmeyi sağlayacak kapasitede yapılmıştır. Gerektiğinde domun üzerinden su ve buhar numunesi alınabilmektedir. Kazan domunda, su-buhar fazının seviyesi, yakından ve uzaktan gözlemlenebilmektedir. Kazana, operatör kumanda odasından direkt olarak müdahale edebilmektedir. Domun asıl görevi kazana su sağlamaktır. İçerisinden ısıtma buharı geçer ve yaklaşık olarak 280 °C'ye kadar buharı ısıtır ve buharı 2.5 MPa'da kızdırıcı bölgesine sevk eder (Şekil 2.4, 2.5).

### **2.3.2. Aspiratör**

Kazandan baca gazlarını emme görevini yapan ekipmana denir. Aspiratör, kazan kapasitesine (50 t/h) ulaşacak şekilde ve 186°C sıcaklıktaki havayı emerek dışarıya atar. 4 kPa emiş basıncına sahiptir. Bu basınca ulaşmak içinse yaklaşık 160 kW enerji harcamaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.4. Domun detay resmi.



Şekil 2.5. Domun kazan üzerindeki genel görünüşü.



Şekil 2.6. Aspiratörün fan kısmı (emiş yapan kısım).



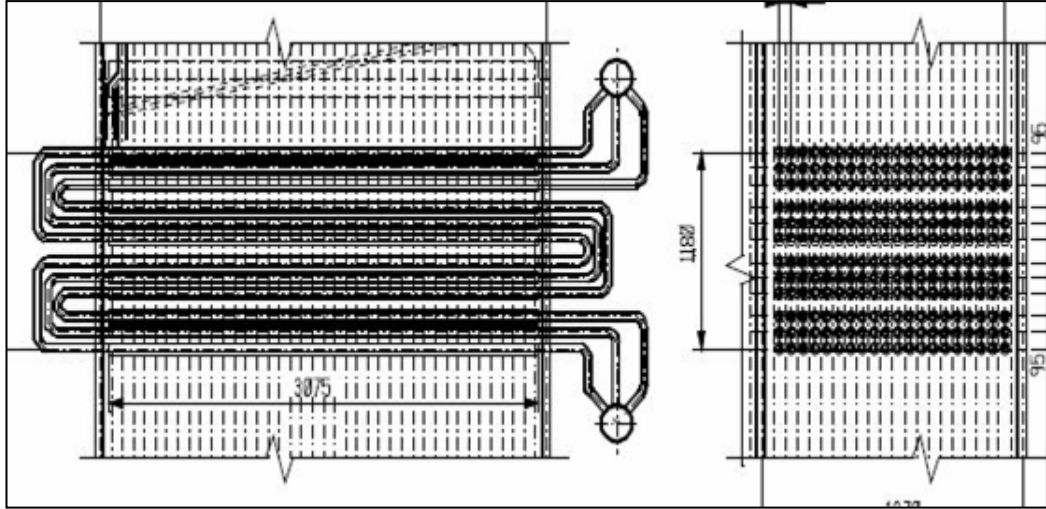
Şekil 2.7. Vantilatörün genel resmi ve emiş borusu.

### 2.3.3. Vantilatörler

Vantilatörler, kazana yakma havasını sağlayan ekipmanlardır. Dışarıdan temiz havayı emerek kazana sevk ederler. Buhar kazanı üzerindeki vantilatörler, toplamda 36000 Nm<sup>3</sup>/h hava emiş kapasitesine sahiptirler. Vantilatörlerin kazana gönderdiği hava, iki yakıcıya eşit olarak dağılmaktadır. Vantilatörler, bu işi yaparken 150 A akım çekmektedir (Şekil 2.7).

### 2.3.4. Evaporatör

Evaporatör, domdan aldığı suyu, baca gazı sıcaklığını kullanarak ısıtır ve tekrar domda geri verir. Baca gazı sayesinde domdan aldığı 170°C'deki suyu 250°C'ye kadar ısıtabilir. Kazan üzerinde baca gazı yolu üzerinde bulunur. Şekil 2.8 ve 2.9'de evaporatörün detay ve genel resmi görülmektedir.



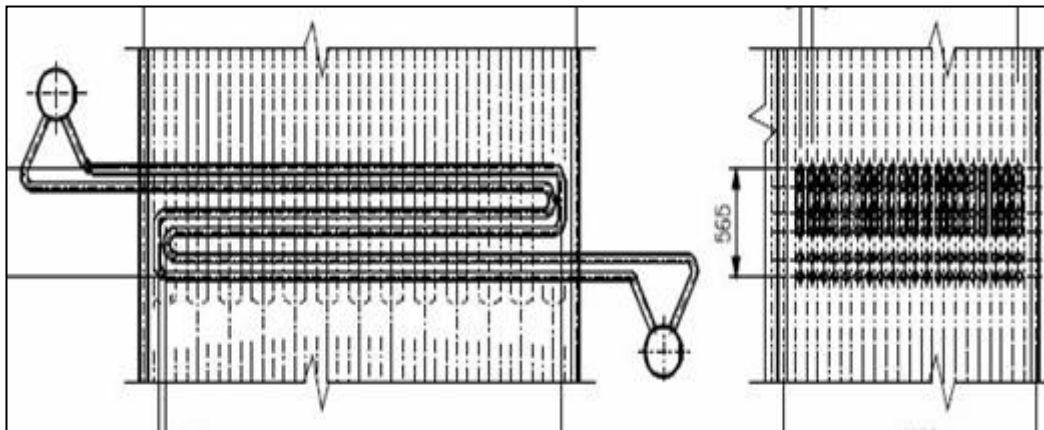
Şekil 2.8. Evaporatörün detay resmi.



Şekil 2.9. Evaporatörün kazan üzerindeki genel görünüşü.

### 2.3.5. Kızdırıcı 1

Domdan çıkan yaklaşık  $250^{\circ}\text{C}$ 'deki buhar ilk olarak kızdırıcı 1'e gelir ve kızdırıcı borularının etrafından geçerken sıcaklığı yaklaşık  $385^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar çıkartılır. Buhar, daha sonra kızdırıcı 2'ye gitmek üzere yoluna devam eder. Şekil 2.10'da kızdırıcıların detay resmi ve kazan üzerindeki genel görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.10. Kızdırıcıların detay resmi.

### 2.3.6. Püskürtme Suyu Ekipmanı

Püskürtme suyu ekipmanı, kızdırıcı 1 bölgesinden çıkarak kızdırıcı 2'ye gelecek olan buharın basıncını ve sıcaklığını ayarlamak için araya girerek buhara su püskürten bir ekipmandır. Yaklaşık olarak 9 bar basınçtaki suyu, buharın üstüne püskürterek, buharın sıcaklığını 300°C'ye düşürmektedir.

### 2.3.7. Kızdırıcı 2

Kızdırıcı 2, buharın su ile temas ettiği zaman üzerinde oluşan nemi almaya yarayan ve sisteme kuru buhar veren bir ekipmandır. Püskürme suyu ile basıncı ve sıcaklığı ayarlanmış buhar, kızdırıcı 2'ye gelir ve sıcaklığı 385°C'ye, basıncı ise 25 bar'a ulaşıncaya kadar kızdırılır. Kazanda, saatte 50 ton kuru buhar üretilmektedir. Kızdırıcıların kazan üzerindeki genel görünüşü, Şekil 2.11'de görülmektedir.



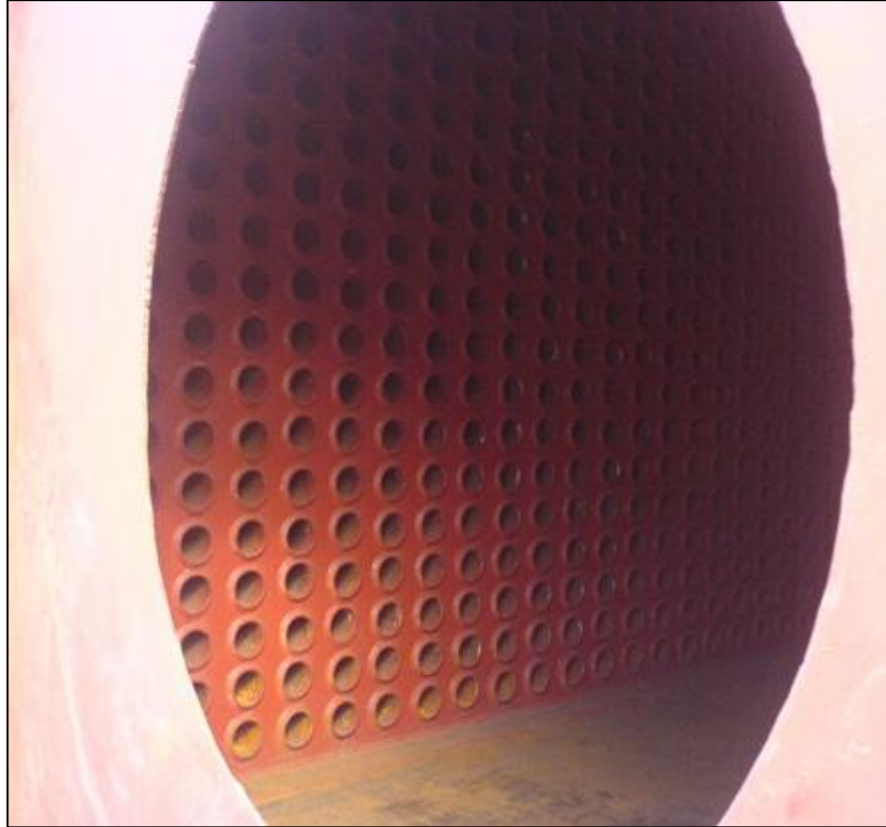
Şekil 2.11. Kızdırıcıların kazan üzerindeki genel görünüşü.

### 2.3.8. Luvo

Luvo, yakma havasının ön ısıtmaya tabii tutulduğu ekipmandır. Vantilatör ile beraber çalışarak, vantilatörün dışarıdan emdiği hava luvolardan geçerek baca gazı ısıyla ön ısıtma yapıldıktan sonra yakma havası olarak kullanılır. Luvo, baca gazı hattı üzerinde borulardan oluşan bir ekipmandır. Boruların içinden hava geçerken



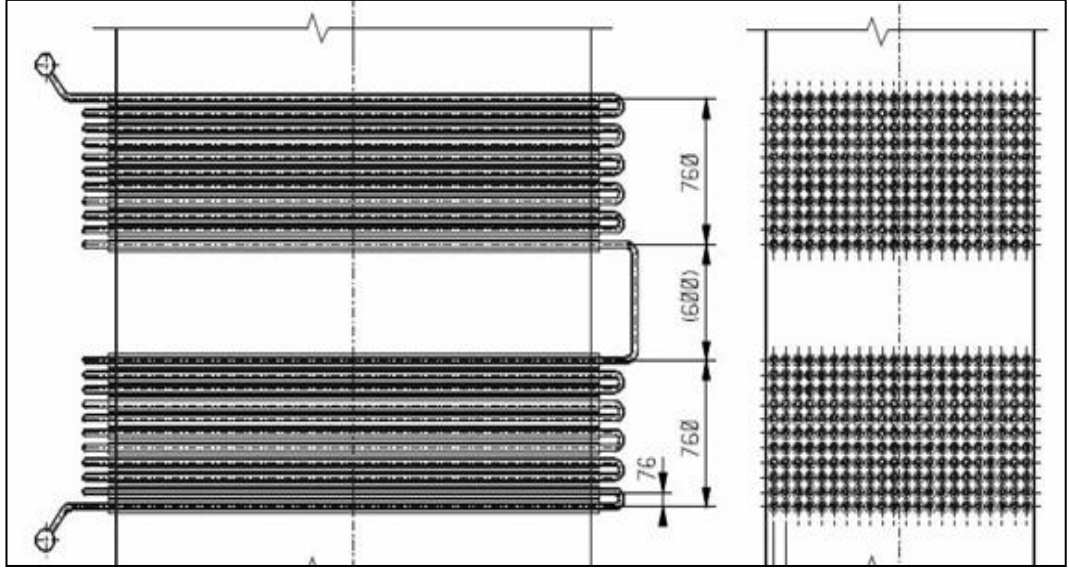
etrafından da baca gazı geçer. Boruları yalayarak geçen baca gazının sahip olduğu enerjinin bir kısmı borular aracılığıyla yakma havasına aktarılır. Yaklaşık olarak vantilatörün emdiği 36000 Nm<sup>3</sup>/h yakma havası 190-200°C'ye kadar ısıtılabilir. Luvonun kazan üzerindeki genel görünüşü Şekil 2.12'de görülmektedir.



Şekil 2.12. Luvonun kazan üzerindeki genel görünüşü.

### 2.3.9. Ekonomizer

Ekonomizer, besleme suyu depolarından aldığı 100°C ve 30 bar basınçtaki suyu baca gazı yardımı ile 180°C'ye ısıtarak domaya veren ekipmandır. Şekil 2.13 ve 2.14'te ekonomizerin detay resmi ve genel görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.13. Ekonomizerin detay resmi.



Şekil 2.14. Ekonomizerin kazan üzerindeki genel görünüşü.

### 2.3.10. Gaz Yakıcılar

Gaz yakıcılar, yakıtı kazanın içerisine püskürten ekipmanlardır. Kazanda 2 adet kok gazı yakıcısı, 1 adet ise yüksek fırın ve konverter gaz yakıcısı bulunmaktadır. Kok gazı nozulları, tek noktadan yanma olmaması için 8 adet ve simit şeklinde olup, yaklaşık 2 m uzunluğundadır (Şekil 2.15). Kok gazı nozullarının ortasında ateşlemeyi sağlayan gazın içeriye giriş yaptığı bir nozul daha bulunmaktadır. Kazana, maksimum 6000 Nm<sup>3</sup>/h kok gazı girişi yapılabilirken, 36000 Nm<sup>3</sup>/h yüksek fırın gazı ve 18000 Nm<sup>3</sup>/h konverter gazı alınabilmektedir. Yüksek fırın gazı ile konverter gazı aynı hattan mix gaz olarak kazana beslenir.



Şekil 2.15. Gaz yakıcıların genel görünüşü.

### 2.3.11. Resirkülasyon Fanı

Resirkülasyon fanı, yanma sonucu oluşan atık gazlardan zehirli olanlarını bacadan atmadan tekrar kazanın yanma olayının gerçekleştiği kısma yani ocak içine verme işlemini yapan bir ekipmandır (Şekil 2.16). Bir nevi filtre görevi yapmaktadır. Baca gazı ölçüm cihazı zehirli gaz oranını  $200 \text{ mg/Nm}^3$  ve üzerinde bir değer ölçtüğü zaman bu fan devreye girerek zehirli gazları tekrar yanması için ocağa gönderir. Fan devredeyken saatte  $2000 \text{ Nm}^3$  atık gazı sisteme geri gönderebilmektedir.



Şekil 2.16. Re-sirkülasyon fanı.

### 2.3.12. Kurum Üfleme

Kazanda belirli noktalarda oluşan kurum ve cürüfları basınçlı buhar üfleyerek yok eden bir ekipmandır. Buhar kazanında toplam 3 adet kurum üfleme ekipmanı bulunmakta olup, ortalama 7-9 bar arasında üfleme yapabilmektedir. Kazan üzerinde hareketli bir elemandır. Şekil 2.17’de kazan üzerinde montaj aşamasındaki kurum üfleme ekipmanının genel görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.17. Kazan kurum üfleme sisteminin genel görünüşü.

### **2.3.13. Dozajlama Ünitesi**

Dozajlama ünitesi, kazana giren suyun sertliğini ve Ph değerinin ayarlanmasını sağlayan ekipmandır. İki adet pompa yardımıyla helamin adı verilen kimyasalı belirli oranlarda kazanın içerisine püskürterek, kazan suyunun Ph seviyesinin 7-9 arasında kalmasını sağlar.

### **2.3.14. Baca**

Kazanda yanma sonucu oluşan atık gazların dışarıya atıldığı kısımdır. Bacadan gazlar, yaklaşık olarak 150°C sıcaklıkta atmosfere atılır. Çıkan gazların debilerini ve kirlilik oranlarını ölçen bir cihaz bulunmaktadır.

## **2.4. BUHAR KAZANLARINDA YANMA**

Yanma, yakıtın oksijenle beraber tepkimeye girmesi sonucunda büyük miktarda enerjinin açığa çıktığı kimyasal bir reaksiyondur. Yanma işlemi sırasında, kimyasal reaksiyonlardan önce var olan maddelere yanma işlemine girenler, reaksiyondan sonra oluşan maddelere de yanma işleminden çıkanlar veya yanma sonu ürünleri denir. Yakıtın havanın içerisindeki oksijenle temas etme durumuna göre yanma

işlemi teorik tam yanma, tam yanma ve eksik yanma olarak üç ayrı grupta incelenebilir.

Bir yakıtın tam olarak yanması için gerekli en az hava miktarına, stokiometrik veya teorik hava adı verilir. Yakıtın teorik havayla tam olarak yandığı ideal bir yanma işlemi, yakıtın stokiometrik veya teorik yanması olarak adlandırılır. Teorik hava aynı zamanda kimyasal olarak gerekli hava miktarı veya %100 teorik hava diye de adlandırılır. Bir yakıt teorik havayla tam olarak yandığı zaman yanma sonu ürünleri arasında serbest oksijen bulunmaz. Yanma işlemi sırasında, eğer yakıt içindeki karbonun tümü  $CO_2$ 'ye, hidrojenin tümü  $H_2O$ 'ya ve varsa kükürdün tümü  $SO_2$ 'ye dönüşüyorsa bu yanma işlemi teorik tam yanma şeklinde oluşur. Teorik havadan daha az havayla gerçekleşen bir yanma işleminin tam olması mümkün değildir (Çengel ve Boles, 1996).

Gerçek yanma işlemlerinde yanmanın tama yakın olmasını sağlamak veya çıkış sıcaklığını belirli bir düzeyde tutabilmek için genellikle stokiometrik miktardan daha fazla hava kullanılır. Stokiometrik hava miktarının üzerinde olan hava miktarına fazla hava adı verilir. Fazla hava genellikle stokiometrik hava esas alınarak, fazla hava yüzdesi veya teorik hava yüzdesi olarak ifade edilir. Yanma işlemi sırasında, eğer yakıt içindeki karbonun tümü  $CO_2$ 'ye, hidrojenin tümü  $H_2O$ 'ya ve varsa kükürdün tümü  $SO_2$ 'ye dönüşüyorsa ve fazla hava nedeniyle yanma sonu ürünleri arasında serbest oksijen bulunuyorsa bu yanma işlemi tam yanma şeklinde gerçekleşmiştir.

Yanma işleminin stokiometrik hava miktarından daha az hava ile gerçekleştiği durumlarda yanma işlemi tamamlanamaz ve bu tür yanma işlemine eksik yanma denir. Eksik yanma işleminde karbon atomlarının yeterli oksijenle temas edememesi veya yeterli oksijen olmaması durumunda bir miktar karbon, karbonmonoksit döndürür. Yanma sonu ürünleri arasında yanmamış yakıt veya C,  $H_2$ , CO ve OH gibi bileşenler varsa yanma işlemi eksik yanma şeklinde gerçekleşmiş demektir.

Gaz yakıtlar, özelliklerinin bilinmesi ve kullanılmasındaki kolaylıklardan dolayı sıvı ve katı yakıtlara daima tercih edilmişlerdir. Bu kolaylıklar, aşağıdaki şekilde sıralayabilir.

- Kül ve dumanının yok denecek kadar az olması nedeni ile ısıtılan maddeye daha az zarar verir.
- Direk yakılması nedeniyle yanmada büyük kolaylıklar sağlar.
- İyi bir yanma ortamının temin edilebilir olması ile ısının istenirse tamamına yakınından istifade edilebilme imkanı vardır.

Gaz yakıtların sıvı ve katı yakıtlara göre bu üstünlüklerine rağmen depolama problemleri en büyük dezavantajlarıdır.

Bu çalışmada incelenen buhar kazanı, gaz yakıtlı bir kazan olup, yakıt olarak demir çelik üretimi proseslerinden elde edilen kok gazı, yüksek fırın gazı ve konverter gazı olmak üzere üç farklı gaz yakıt birlikte yakılmaktadır.

Çizelge 2.4. Kok gazının hacimsel analiz değerleri.

Kok gazı bileşenleri	Kimyasal formülü	Hacimsel oranı (%)
Hidrojen	H <sub>2</sub>	57.58
Oksijen	O <sub>2</sub>	0.36
Azot	N <sub>2</sub>	7.14
Metan	CH <sub>4</sub>	22.18
Karbonmonoksit	CO	6.95
Karbondioksit	CO <sub>2</sub>	3.02
Etilen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.46
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.49
Asetilen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.82
Üst Isıl Değer (kcal/Nm <sup>3</sup> )		4469
Alt Isıl Değer (kcal/Nm <sup>3</sup> )		3954

#### 2.4.1. Kok Gazının Özellikleri

Kok gazı, kok kömürü üretmek amacıyla taşkömürünün kok bataryalarında havasız ortam ve yüksek sıcaklıkta taşkömürünün karbonizasyonu sonucunda elde edilen bir gazdır. Kok kömürü, demir çelik üretim tesislerinde önemli bir hammadde olup, yüksek fırınlarda demir cevherinin ergitilmesinde yakıt olarak kullanılmaktadır. Bundan dolayı, demir çelik üretim prosesleri sonucunda oluşan kok gazı, ek bir maliyet gerektirmeden buhar kazanlarında yakıt olarak kullanılmaktadır. Kok gazı iyi temizlendiğinde renksiz, kendine has kokusu olan, zehirleyici bir gazdır. İçerisinde bulunan hidrojen ve gaz halindeki hidrokarbonlar nedeni ile çabuk tutuşan ve parlayan bir gazdır. Çizelge 2.4'de Kardemir'de kok kömürü üretimi esnasında oluşan kok gazının hacimsel analiz değerleri ile ısı değerleri verilmiştir.

#### 2.4.2. Yüksek Fırın Gazının Özellikleri

Yüksek fırın gazı, yüksek fırınlarda demir cevherinin ergitilerek sıvı maden elde edilmesi esnasında yan ürün olarak elde edilen bir gazdır. Yüksek fırın gazı çok iyi temizlendiğinde renksiz, kokusuz ve çok zehirleyici bir gazdır. Yüksek fırın gazının ısı değeri çok düşüktür. Bu nedenle kendiliğinden yanması çok zor olduğundan, özel yakıcılarda ve ön bir ısıtıcı ile birlikte yakılırlar. Çizelge 2.5'te Kardemir'de demir çelik üretimi esnasında oluşan yüksek fırın gazının hacimsel analiz değerleri ile ısı değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.5. Yüksek fırın gazının hacimsel analiz değerleri.

Yüksek fırın gazı bileşenleri	Kimyasal formülü	Miktarı (%)
Hidrojen	H <sub>2</sub>	1.74
Azot	N <sub>2</sub>	57.06
Karbonmonoksit	CO	23.12
Karbondioksit	CO <sub>2</sub>	18.08
Üst Isıl Değer (kcal/Nm <sup>3</sup> )		751
Alt Isıl Değer (kcal/Nm <sup>3</sup> )		743

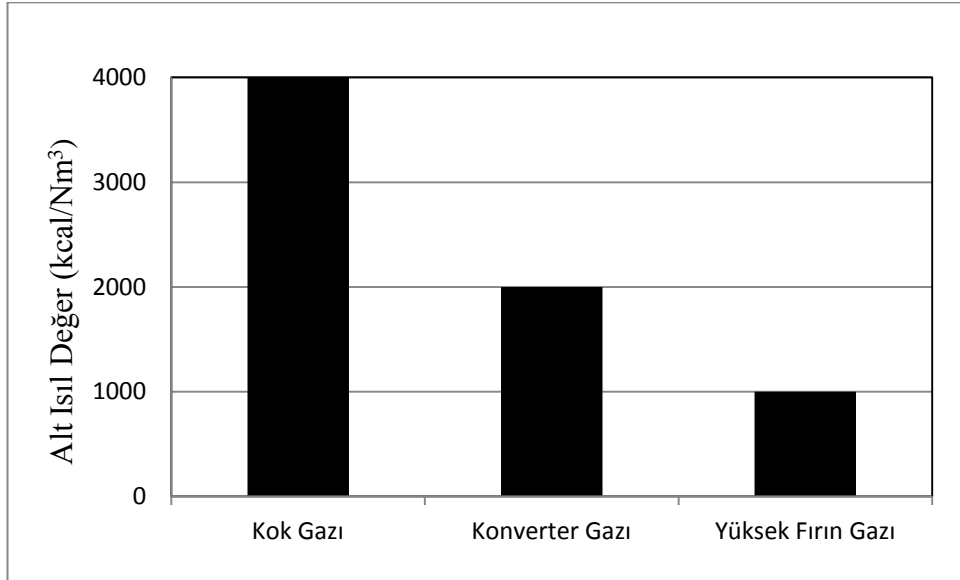


### 2.4.3. Konverter Gazının Özellikleri

Konverter gazı, demir çelik tesislerinin çelikhane olarak adlandırılan bölümünde, çelik üretim süreci sırasında üretilen bir gaz olup, renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Havadan ağır bir gaz ( $\rho = 1.03 \text{ gr/cm}^3$ ) olup, son derece zehirleyicidir. Alev sıcaklığı  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ , alt ısı değeri  $1500 \text{ kcal/Nm}^3$ 'tür. Çizelge 2.6'te Kardemir'de demir çelik üretimi esnasında oluşan konverter gazının hacimsel analiz değerleri ile ısı değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.6. Konverter gazının hacimsel analiz değerleri.

Konverter gazının bileşenleri	Kimyasal formülü	Miktarı (%)
Azot	$\text{N}_2$	18-40
Karbonmonoksit	$\text{CO}$	40-60
Karbondioksit	$\text{CO}_2$	20-22
Üst Isıl Değer ( $\text{kcal/Nm}^3$ )		1800
Alt Isıl Değer ( $\text{kcal/Nm}^3$ )		1500



Şekil 2.18. Yakıtların alt ısı değerlerinin karşılaştırılması.

Çizelge 2.7. Gazların kazana girişteki debi, basınç, sıcaklık ve hacimsel oranları.

	Kok gazı	Yüksek fırın gazı	Konverter gazı
Debi (Nm <sup>3</sup> /h)	3662	8440	8460
Basınç (kPa)	2.65	2.99	8.25
Sıcaklık (°C)	30	30	30
Hacimsel miktarları (%)	17	41	42

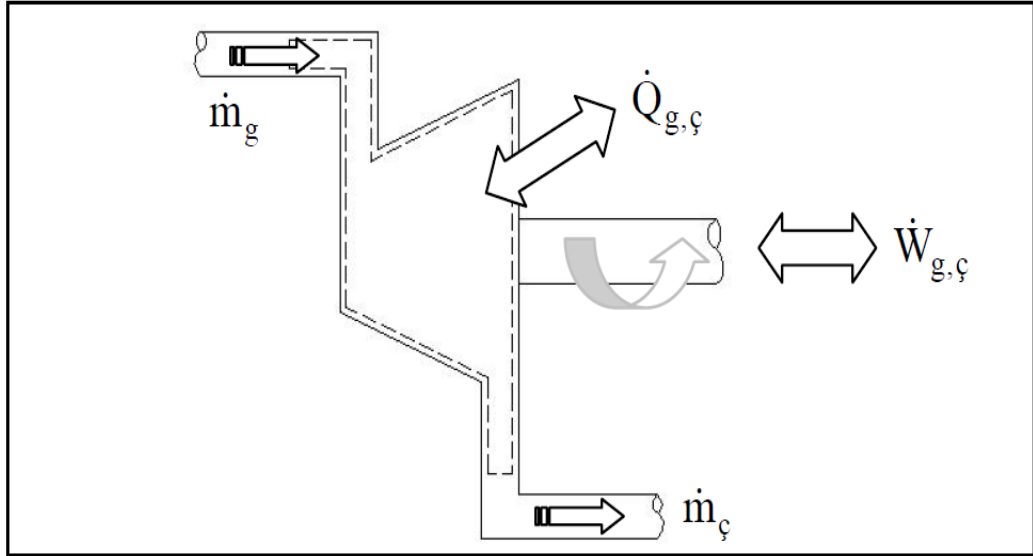
Buhar kazanında kullanılan yakıtların alt ısı değerlerinin karşılaştırılması Şekil 2.17’de verilmiştir. Yakıtların kazana girişteki debi, basınç, sıcaklık ve hacimsel oranları ise Çizelge 2.6’da verilmiştir. Yakıtların yakılabilmesi için kazana yakma havası olarak 36000 Nm<sup>3</sup>/h değerinde hava alınmakta ve yakıcılara eşit olarak dağıtılmaktadır.

## BÖLÜM 3

### MATERYAL VE METOT

#### 3.1. ENERJİ ANALİZİ

Enerji tesislerindeki ünitelerde proseslerin daha verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak için uzun süredir termodinamiğin birinci yasası olarak bilinen enerji analizi kullanılmıştır. Termodinamiğin birinci yasası veya diğer bir ifade ile enerjinin korunumu ilkesi enerjinin değişik biçimleri arasındaki ilişkileri ve genel olarak enerji etkileşimlerini incelemek için sağlam bir temel oluşturur. Termodinamiğin birinci yasası, deneysel gözlemlere dayanarak, enerjinin var veya yok edilemeyeceğini, ancak bir biçimden diğerine dönüşebileceğini ifade ettiğinden dolayı enerjinin niceliği ile ilgilidir (Çengel ve Boles, 1996).



Şekil 3.1. Sürekli akışlı açık bir sistem için kontrol hacmi ve kontrol yüzeyi (Şahin, 2006).

### 3.1.1. Kütlenin Korunumu İlkesi

Bir çok mühendislik uygulamalarında sistem sınırından kütle girişi ve çıkışı vardır. Bu nedenle kontrol hacmi tanımına gerek duyulur. Açık sistem yada çoğunlukla adlandırıldığı gibi kontrol hacmi, uzayda uygun bir biçimde seçilmiş bir bölgedir. Genellikle kütle akışının olduğu kompresör, türbin yada lüle gibi bir cihazı çevreler. Kontrol hacminin sınırları kontrol yüzeyi olarak adlandırılır. Hem kütle hem de enerji kontrol hacmi sınırından geçebilir.

Açık sistem, sürekli akışlı açık sistem ve düzgün akışlı dengeli açık sistem olmak üzere iki farklı yaklaşım ile incelenmektedir. Sürekli akışın olduğu kontrol hacimleri sürekli akışlı açık sistem modeli ile incelenir ve türbin, kompresör, ısı değiştiricisi gibi bir çok mühendislik uygulamasının çözümüne imkan sağlar. Sürekli akışlı açık sistemde, kontrol hacmi içindeki toplam kütle zamanla değişmez. Kontrol hacmine giren kütle kontrol hacminden çıkan kütleyle eşittir. Kontrol hacminin sınırlarındaki hiçbir termodinamik özellik zamanla değişmediği gibi kontrol hacmine giren ve çıkan akışkanın termodinamik özellikleri de zamanla değişmez. Giriş ve çıkıştaki kütleli debi sabittir. Sisteme bir giriş çıkış olabileceği gibi birden çok noktadan kütle girişi ve çıkışı olabilir. Şekil 3.1’de sürekli akışlı bir sistem için belirlenen kontrol hacmi görülmektedir.

Kütlenin korunumu ilkesi doğanın en temel ilkelerinden biridir. Termodinamiğin birinci yasası, kontrol hacmine giren ve çıkan kütleyle göre kontrol hacmi içerisindeki kütle dengesini aşağıdaki gibi tarif eder (Çengel ve Boles, 1996).

$$\left( \begin{array}{c} \text{Kontrol hacmine} \\ \text{giren toplam kütle} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Kontrol hacminden} \\ \text{çıkan toplam kütle} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Kontrol hacmi içindeki} \\ \text{toplam kütle değişimi} \end{array} \right)$$

$$\sum m_g - \sum m_c = \Delta m_{kh} \quad (3.1)$$

Bu bağıntı birim zamandaki giriş, çıkış ve değişim cinsinden ise,

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_c = \frac{d\dot{m}_{kh}}{dt} \quad (3.2)$$

şeklinde yazılır. Sürekli akışlı açık sistemde kontrol hacmi içerisindeki kütle zamanla değişmediğinden dolayı sürekli akışlı açık sistem için kütle korunumu ifadesi aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (3.3)$$

### 3.1.2. Enerjinin Korunumu İlkesi

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin var veya yok edilemeyeceği ancak bir biçimden diğerine dönüştürülebileceğini ifade eder. Sürekli akışlı açık sistemde kontrol hacminin toplam enerjisi sabittir. Bu durum, kontrol hacminin toplam enerjisinde değişim olmadığı anlamına gelir. Böylece sürekli akışlı açık sistemde, kontrol hacmine ısı, iş veya kütle akışı olarak giren enerjinin çıkan enerjiye eşit olması zorunludur. Bir sürekli akışlı açık sistem için termodinamiğin birinci yasası veya enerjinin korunumu ilkesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\left( \begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{ısı veya iş olarak} \\ \text{kontrol hacmine} \\ \text{geçen toplam enerji} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{kütle ile birlikte} \\ \text{kontrol hacminden} \\ \text{çıkan toplam enerji} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{kütle ile birlikte} \\ \text{kontrol hacmine} \\ \text{giren toplam enerji} \end{array} \right)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_ç e_ç - \sum \dot{m}_g e_g \quad (3.4)$$

Kontrol hacmine giren akış halindeki akışkanın birim kütlelerinin toplam enerjisi,

$$e_g = h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \quad (3.5)$$

Kontrol hacminden çıkan akış halindeki akışkanın birim kütlelerinin toplam enerjisi,

$$e_ç = h_ç + \frac{V_ç^2}{2} + gz_ç \quad (3.6)$$

Kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilirse, birinci yasa eşitliği aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c h_c - \sum \dot{m}_g h_g \quad (3.7)$$

### 3.2. EKSERJİ ANALİZİ

Ekserji analizi, ikinci yasaya dayanan bir termodinamik analiz olup, enerji sistemlerini ve hal değişimlerini gerçekçi ve anlamlı biçimde değerlendirmeye ve karşılaştırmaya yarayan bir analizdir. Ekserji analizi sonucu bulunan ekserji veya ikinci yasa verimi ile gerçek sistem performansı maksimum performansla kıyaslanabilir. Bu kıyaslamaya göre sistem meydana gelen termodinamik kayıpların yerleri, miktarları ve nedenleri belirlenebilir. Dolayısıyla, ekserji analizinden elde edilen sonuçlar, sistem performansının iyileştirilmesinde ve daha iyi tasarımların yapılmasında kullanılarak, sistemin en iyi performans değerinde çalışması sağlanabilir.

#### 3.2.1. Termodinamiğin İkinci Yasası

Birinci yasa enerjinin niceliği üzerinde durur ve enerjinin bir biçimden diğerine dönüşümü sırasındaki değişimleri sayısal değerlerle ifade eder. Termodinamiğin ikinci yasası, hal değişimlerinin hangi yönde gerçekleşebileceklerini belirler ve enerjinin niceliği yanında niteliği de olduğunu vurgular. İkinci yasa, temel mühendislik sistemlerinin verimlerinin üst sınırını ve kimyasal reaksiyonların hangi oranda tamamlanacaklarını belirler (Çengel ve Boles, 1996).

Termodinamiğin ikinci yasası, karmaşık mühendislik sistemlerin optimizasyonu için güçlü bir araçtır. Mühendislik sistemlerinde enerjinin niteliğini öne çıkaran yönde iyileştirmeler yapılması, mühendisin bilgi ve becerisinin sınırlarını zorlayan bir konudur. Enerjinin kalitesini veya iş yapma potansiyelini sayısal olarak ifade etme çabaları ekserji adı verilen bir özelliğin tanımlanmasını sağlamıştır. Ekserji, enerjinin işe çevrilebilme potansiyeli olarak tanımlanır ve bir kaynaktan elde edilebilecek

maksimum işi ifade eder. Bir hal değişimi sırasında kaybedilen iş potansiyeli tersinmezlik veya ekserji kaybı olarak tanımlanır. Bir hal değişimi sırasında ekserji kayıpları ne kadar az ise üretilen iş o kadar fazladır veya tüketilen iş o kadar azdır. Bir sistemin performansı ekserji kayıplarının en aza indirgenmesi yoluyla maksimize edilebilir. Çizelge 3.1’de enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3.1. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması (Wall ve Gong 2001, Çengel vd 2002).

ENERJİ	EKSERJİ
Termodinamiğin I. yasası ile ilgilidir.	Termodinamiğin II. yasası ile ilgilidir.
Daima korunur. Yoktan var edilemez veya yok edilemez.	Tersinir hal değişimlerinde korunur, tersinmez hal değişimlerinde daima kaybolur.
Enerji, hareket veya hareket üretebilme kabiliyetidir.	Ekserji, iş veya iş üretebilme kabiliyetidir.
Niceliğin bir ölçütüdür.	Niteliğin bir ölçütüdür.
Sadece madde ve enerji akış parametrelerine bağlı, çevre parametrelerinden bağımsızdır.	Madde ve enerji akış parametrelerinin yanı sıra çevre parametrelerine de bağlıdır.

Yukarıdaki temel tanımlar yanında, ekserji sadece faydalı enerji düşüncesinden oluşmayan, aynı zamanda çevreyi kirleten enerji kaynaklarının tüketiminin azaltılması ve yeni çevre dostu enerji kaynaklarının kullanıma sunulması gibi konuları da kapsayan çok önemli bir mühendislik yaklaşımıdır (Çengel ve Boles, 1996).

### 3.2.2. Ekserjinin Önemli Boyutları

Ekserji kavramının en önemli boyutlarını maddeler halinde ifade edecek olursak;

- Ekserji, sistem ve çevrenin bir arada oluşturduğu kombine çevrimden elde edilebilen maksimum teorik iştir. Buradaki sistem, verilen bir durumdan çevre ile denge durumu olan ölü duruma geçer. Ölü durumda kombine sistem enerjiye sahiptir, ancak ekserjiye sahip değildir.

- Sistemin tüm durumları için ekserji, sifıra eşit ya da sıfırdan büyüktür.
- Değeri sistem durumu ile belirli olduğundan ekserji, ekstensif özelliktir ve burada bahsi geçen çevre daha önceden belirlenmiş olmalıdır. Ekserji, birim kütle ya da birim mol başına göre yazıldığında intensif özellik olarak temsil edilebilir.
- Ekserji, sistem durumunun çevresel durumdan uzaklaşma ölçüsüdür. Verilen bir durumdaki T sıcaklığı ile çevrenin  $T_o$  sıcaklığı arasındaki fark büyüdükçe ekserji değeri de buna bağlı olarak büyür.
- Çevreye göre göreceli olarak belirlendiğinden, sistemin kinetik ve potansiyel enerji büyüklerinin tamamı ekserji büyüklüğüne katılır.
- Ekserji, sistemler arasında transfer edilebilir ve sistemler içindeki tersinmezlikler yüzünden tahrip edilebilir. Bununla beraber ekserji, bir ekserji dengesi ile açıklanabilir (Çengel ve Boles, 1996).

İki hal arasında sistem tarafından yapılan maksimum iş, hal değişiminin tersinir olması durumunda gerçekleşir. Sistemden maksimum iş elde edebilmek için, hal değişimi sonunda sistemin ölü halde olması gerekir. Bir sistemin ölü halde olması demek, çevresiyle termodinamik dengede bulunması anlamına gelir. Bir sistem ölü halde iken, çevre sıcaklığında ve basıncındadır. Başka bir ifadeyle, sistem çevresi ile ısı ve mekanik dengededir. Ayrıca sistemin çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır. Sistemin ölü haldeki özellikleri, ( $P_o$ ,  $T_o$ ,  $h_o$ ,  $u_o$  ve  $s_o$ ) sıfır indisiiyle gösterilir ve ölü hal sıcaklığı  $25^\circ\text{C}$  ve basıncı ise 1 atm olarak alınır.

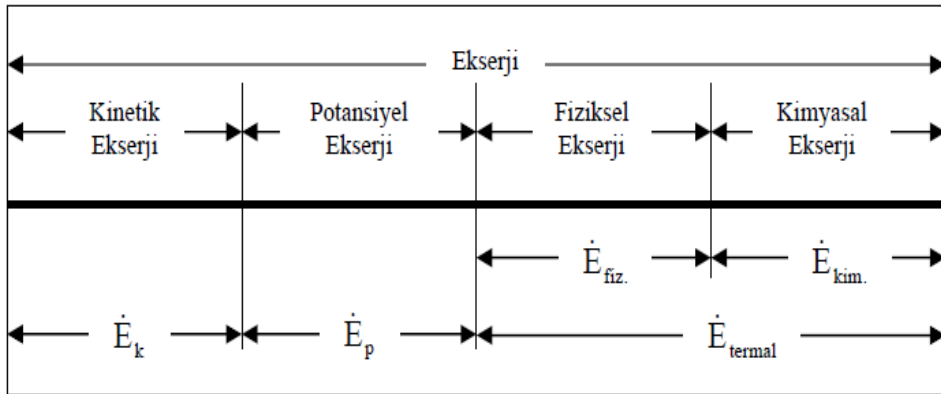
Bir sistemden maksimum işi elde edebilmek için sistemin son halinin ölü hal olma zorunluluğu şöyle açıklanabilir: Sistemin son haldeki sıcaklığı eğer çevre sıcaklığının üzerinde veya altında ise, çevre sıcaklığıyla bu sıcaklık arasında çalışan bir ısı makinesi aracılığıyla iş yapılabilir. Sistemin son haldeki basıncı eğer çevre basıncının üzerinde veya altında ise bu basınç farkından yararlanarak genişleme işi yapılabilir.



### 3.2.3. Ekserji Analizinin Önemi

Bu çalışmanın giriş kısmında da belirtildiği gibi günümüzde birincil enerji kaynaklarının sınırlı olup hızla azalıyor olması ve buna bağlı olarak da enerji maliyetlerinin hızla artmasından dolayı, ısıl sistemlerdeki enerji kayıplarının belirlenmesinde ekserji analizi büyük önem kazanmıştır. Ekserji analizinin önemi aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Enerji kaynaklarının kullanımında çevreye olan etkilerinin en iyi şekilde belirlenmesinde yol gösterici bir analizdir.
- Enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması amacını destekleyen önemli bir metottur.
- Sistemde meydana gelen atık ve kayıpların yerlerinin, tiplerinin ve gerçek büyüklüklerinin tespitinde etkin bir analizdir.
- Mevcut sistemlerdeki verimsizlikleri azaltarak, daha verimli enerji sistemlerini tasarlamının nasıl mümkün olabileceğini gösteren etkin bir metottur.



Şekil 3.2. Sistem sınırından girip çıkan akış halindeki bir maddenin ekserji bileşenleri (Szargut et. al., 1988).

### 3.2.4. Ekserji Bileşenleri

Akış halindeki bir maddenin, nükleer, manyetik, elektrik ve yüzey gerilimleri ihmal edildiği durumda, ekserji Şekil 3.2’de görüldüğü gibi potansiyel, kinetik, fiziksel ve

kimyasal ekserji olmak üzere dört bileşene ayrılabilir. Buna göre, toplam özgül ekserji ve toplam ekserji aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$ex^{top} = ex^k + ex^p + ex^{fiz} + ex^{kim}$$

$$\dot{E}x^{top} = \dot{E}x^k + \dot{E}x^p + \dot{E}x^{fiz} + \dot{E}x^{kim} \quad (3.8)$$

Bulunduğu çevresine göre hareketsiz bir sistemde, kinetik ve potansiyel ekserjiler,  $\dot{E}x^k = \dot{E}x^p = 0$  olarak düşünülebilir ve buna göre sistemin toplam ekserjisi fiziksel ve kimyasal ekserji bileşenlerinden oluşur. Toplam özgül ekserji ve toplam ekserji ifadeleri tekrar düzenlenecek olursa aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$ex^{top} = ex^{fiz} + ex^{kim}$$

$$\dot{E}x^{top} = \dot{E}x^{fiz} + \dot{E}x^{kim} \quad (3.9)$$

### 3.2.4.1. Fiziksel Ekserji

Fiziksel ekserji; akış halindeki bir maddenin çevresi ile sadece termal etkileşimi neticesinde tersinir hal değişimi ile mevcut sıcaklık ve basınç şartlarından (T, P), çevre şartları (P<sub>o</sub>, T<sub>o</sub>) ile termodinamik dengeye getirildiğinde sistemden elde edilebilecek maksimum iş olarak tanımlanır (Kotas, 1995).

Saf maddelerin fiziksel ekserjisi genel olarak aşağıdaki eşitliğe göre belirlenir.

$$ex^{fiz} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (3.10)$$

Herhangi bir durumda ideal gazdan oluşan sistemin fiziksel ekserjisi ise aşağıdaki eşitlikten belirlenir.

$$ex^{fiz} = C_p \left[ (T - T_o) - T_o \ln \left( \frac{T}{T_o} \right) \right] + RT_o \ln \left( \frac{P}{P_o} \right) \quad (3.11)$$

### 3.2.4.2. Kimyasal Ekserji

Kimyasal ekserji; Bir maddenin çevresiyle kimyasal denge haline geldiğinde ısı transferi ve madde alışverişi sonucu elde edilen maksimum iş olarak ifade edilebilir (Kotas, 1995).

Bu çalışmada, ideal gazların molar kimyasal ekserjisi;

$$\bar{e}x^{kim} = \bar{R}T_o \sum y_i \ln\left(\frac{y_i}{y}\right) = \sum_i y_i \bar{e}^{kim,i} + \bar{R}T_o \sum_i y_i \ln y_i \quad (3.12)$$

Suyun molar kimyasal ekserjisi;

$$(\bar{e}x^{kim})_{H_2O} = \bar{R}T_o \ln\left(\frac{P_{doyma}(T_o)}{P_{oo}}\right) \quad (3.13)$$

Gaz yakıtların kimyasal ekserjileri;

$$\varphi = \frac{ex^{kim}}{(\dot{H}_u)_{yakıt}} \quad (3.14)$$

eşitliklerinden hesaplanmıştır.

### 3.2.5. Ekserji Verimi

İkinci kanun veya ekserji verimi, kullanılabilir enerji kavramından yararlanarak işlemin ne derece iyi ve mükemmele yakın olduğu incelenebilir. Kayıp kullanılabilir ekserji, tersinmezliğin bir ölçüsüdür ve işlemlerdeki tersinmezlikler arttıkça artar. Bu durumda ekserji veriminin değeri, kullanılabilir ekserjinin tümüyle yok edilmesi durumunda sıfır, kullanılabilir ekserjinin tümüyle korunması durumunda bir olacaktır. Buna göre, ekserji verimi toplam çıkan ekserjinin toplam giren ekserjiye oranı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\psi = \frac{\text{Sistemden çıkan toplam ekserji}}{\text{Sisteme sağlanan toplam ekserji}}$$

$$\psi = \frac{\sum \dot{E}x_{\zeta}}{\sum \dot{E}x_g} \quad (3.15)$$

Kayıp kullanılabilir enerji, sistemdeki tersinmezliğin bir ölçüsü olduğundan dolayı, tersinmezliğe eşittir. Sisteme giren toplam ekserji, sistemden çıkan toplam ekserji ve ekserji kaybının (tersinmezliklerin) toplamına eşit olacaktır. Buna göre ekserji dengesi,

$$\sum \dot{E}x_g = \sum \dot{E}x_{\zeta} + \sum \dot{E}x^{kayıp}$$

$$\sum \dot{E}x_g = \sum \dot{E}x_{\zeta} + \sum \dot{I} \quad (3.16)$$

veya

$$\sum \dot{I} = \sum \dot{E}x_g - \sum \dot{E}x_{\zeta}$$

şeklinde yazılabilir. Ekserji kaybı, ekserji yıkımı, ekserji yok oluşu şeklinde de ifade edilebilmektedir. Bu konuda tam anlamıyla kavram birlikteliği oluşmamıştır. Bu çalışmada ekserji yıkımı, ekserji kaybıyla aynı terim olarak ele alınmıştır.

$$\psi = 1 - \frac{\text{kayıp kullanılabilir ekserji (tersinmezlik)}}{\text{sisteme sağlanan ekserji}}$$

$$\psi = 1 - \frac{\sum \dot{I}}{\sum \dot{E}x_g} \quad (3.17)$$

şeklinde tanımlanabilir.

### 3.2.5.1. İyileştirme Potansiyeli

Bir proses veya sistemin maksimum ekserji veriminin iyileştirilmesi için ekserji kaybının veya tersinmezliğin minimize edilmesi gerekir. Bu durumda ekserji veriminin iyileştirilmesini ifade eden ve iyileştirme potansiyeli olarak tanımlanan yeni bir kavram geliştirilmiştir. İyileştirme potansiyeli, bir sistemin sahip olduğu iş yapabilme potansiyelinin ne kadar iyileştirilebileceğini ifade eder ve aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$\dot{I}P = (1 - \Psi)(\dot{E}x_g - \dot{E}x_c) \quad (3.18)$$

Diğer bir ekserji performans parametresi ise ekipmanların ekserji yıkımlarının sisteme sağlanan yakıtın ekserjisine oranı olarak ifade edilen ve aşağıda  $y$  ile gösterilen performans parametresidir.

$$y = \frac{\dot{E}x_{yıkım1}}{(\dot{E}x)_{yakıt}} \quad (3.19)$$

### 3.2.6. Ekserji Maliyeti

Çevresiyle ısı, iş veya madde alışverişinde bulunan sistemlerde ekserji kaybı veya ekserji yıkımı, sistemin ekserji veriminin azalmasına neden olur. Kaybolan birim ekserji akısının maliyeti  $\dot{C}$ , birim ekserji maliyeti  $c$  ile ekserji akısının çarpımına eşittir.

$$\dot{C} = c \times \dot{E}x \quad (3.20)$$

Herhangi bir ekipman için maliyet denge denklemi;

$$\sum \dot{C}_e + \dot{C}_w = \dot{C}_q + \sum \dot{C}_i + \dot{Z}_i \quad (3.21)$$

şeklinde yazılabilir. Eşitlikte  $\dot{Z}$  bir ekipmanın yatırım, işletme, bakım bedellerini kapsayan, seviyelendirilmiş parasal gideri olup, yıllık çalışma süresi, sistem ömrü, faiz gibi ekonomik parametrelerin bir fonksiyonudur. Bu değer belirlenebilmesi için sistemin veya ekipmanın ilk yatırım ve işletme maliyetinin tespit edilmesi gerekir. İlk yatırım maliyeti, sistemin veya ekipmanın işletme ve bakım-onarım maliyetlerini kapsar.  $\dot{Z}$  değeri hesaplanırken, birim zamandaki ilk yatırım ve işletme maliyetleri toplamı, bir değere getirilme faktörü olarak tanımlanan A değeri ile çarpılır. Bir değere getirilme faktörü aşağıdaki denklemde ifade edilmektedir (Geredelioğlu, 2011).

$$A = \frac{CELF}{1 + r_i} \quad (3.22)$$

Eşitlikte, CELF; değeri Sabit Eskolasyon Düzeltme Faktörü,  $r_i$ ; değeri ise faiz oranını göstermektedir. CELF değeri,

$$CELF = \frac{k(1 - k^n)}{1 - k} CRF \quad (3.23)$$

eşitliğiyle ifade edilmektedir. Eşitlikte, CRF; Kapital Geri Kazanım Faktörü ve k; fiyat düzeltme faktörünü, n; sistem veya ekipman için öngörülen ömrü temsil etmektedir.

Kapital Geri Kazanım Faktörü (CRF) aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir (Geredelioğlu, 2011).

$$CRF = \frac{i_{eff}(1 + i_{eff})^n}{(1 + i_{eff})^n - 1} \quad (3.24)$$

eşitlikte,  $i_{eff}$  değeri geri ödeme oranını göstermektedir.

Fiyat düzeltme faktörü (k) ise;

$$k = \frac{1 + r_n}{1 + i_{eff}} \quad (3.25)$$

eşitliği ile ifade edilir (Geredelioğlu, 2011).

Birim ekserji akısının maliyeti  $c$ , bu akımı oluşturmak için harcanan parayı temsil etmektedir. Bir ekipmandan elde edilmek istenen ürün, o ekipmanın ürününü ve bu ürünü elde etmek için harcananlar da yakıt olarak tanımlanır. Bir ekipmanın yakıtı başka bir ekipmandan gelen bir akımsa, bunun parasal değeri her iki ekipman için de aynıdır. Bir ekipmanda iki veya daha fazla sayıda akım varsa bunların fiyatları akımların ekserjileri farklı olsa da eşit olur. Bir dış akımın taşıdığı ekserjinin tutarı bu çıktığı üniteye mal edilir. Parasal giderler iki grup altında toplanabilir. Biri ekserji harici, yatırım, işletme, bakım, onarım gibi masraflar, diğeri yok edilen ekserjinin parasal değeridir. Bir ekipmanı değerlendirirken bunlardan hangisinin ekserji akımı maliyetinin daha ağırlıklı olduğunu bilmek, o ünitenin iyileştirilebilmesi için nereye odaklanılması gerektiğini gösterir. Bu değerlendirme ölçütü termoeekonomik (eksergoekonomik) faktör  $f$  aşağıdaki gibi tanımlanır:

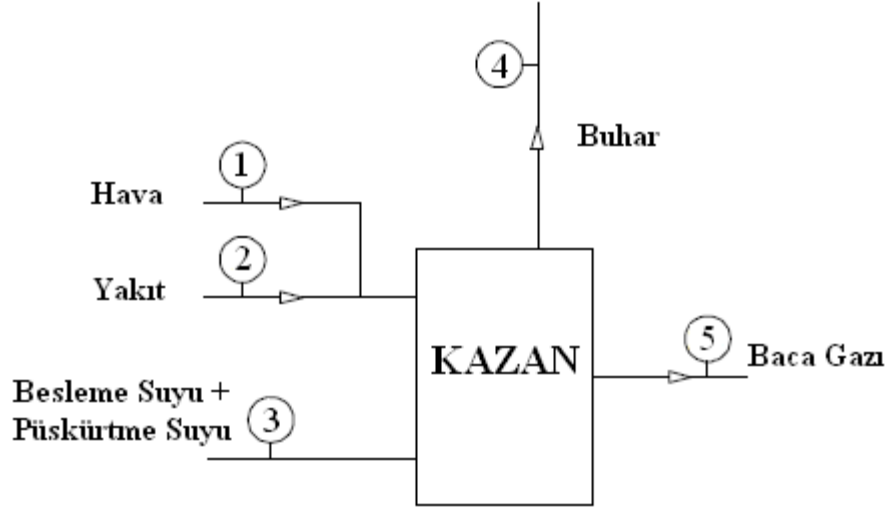
$$f = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + c_p \dot{E}_k} \quad (3.26)$$

$f$ 'nin nispeten büyük değeri, ele alınan ekipmanın parasal giderlerinin ağırlıklı olarak yatırım, işletme masraflarından kaynaklandığını gösterir. Ekipmanın veriminin yükseltilmeye çalışılması, örneğin ısı geçişinde sıcaklık farkını azaltmak amacıyla yüzeyini büyütme ya da verimi yüksek olan daha pahalı donanım kullanmak pek de gerçekçi olmayacaktır. Küçük  $f$  değerleri ise bunun tersini gösterir. Buna göre, yatırım ve işletme masraflarını artırmak pahasına da olsa yüksek verimli donanımlar kullanılmaktadır (Geredelioğlu, 2011).

## BÖLÜM 4

### BUHAR KAZANI ENERJİ ANALİZİ

Bu bölümde, bir buhar kazanı enerji analizinin örnek bir uygulaması ele alınacaktır. Enerji analizi yapılacak buhar kazanı, demir çelik endüstrisinde proses buhar ihtiyacını karşılayan, su borulu ve gaz yakıtla çalışan bir kazan olup, saatte 385 °C sıcaklık ve 25 bar basınçta 50 ton buhar üretecek kapasiteye sahip bir kazandır. Buhar kazanı, kok gazı, yüksek fırın gazı ve konverter gazı yakan gaz yakıtlı bir kazan olup, iki geçişli ve tek domlu olarak dizayn edilmiştir. Bölüm 2’de buhar kazanı ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.



Şekil 4.1. Buhar kazanına giren ve çıkan ürünler.

Buhar kazanının enerji analizinde öncelikle kazanda yakılan gaz yakıtların yanma entalpileri ve toplam yakıt entalpisi hesaplanmıştır. Daha sonra ideal gaz denkleminde baca gazının molar debisi belirlenmiştir. Baca gazı bileşenlerinin ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$  ve  $N_2$ ) molar debileri ise yanma denklemlerine göre bulunmuştur. Baca gazının entalpisi, baca gazının özgül ısısına göre belirlenmiştir. Kazana yakma havasını sağlayan vantilatör karakteristik çalışma eğrisinden yakma havasının debisi



bulunarak yanma odasına girişteki toplam entalpisi belirlenmiştir. birinci yasa genel enerji denkleminde buhar kazanından çevreye olan ısı kaybı hesaplanmıştır. Şekil 4.1’de sürekli akışlı sürekli açık bir sistem olarak ele alınan buhar kazanına giren ve çıkan ürünler görülmektedir.

#### 4.1. YAKITLARIN YANMA ENTALPİLERİNİN BELİRLENMESİ

Kazanda yakıt olarak kullanılan kok gazı, yüksek fırın gazı ve konverter gazının yanma entalpilerinin bulunabilmesi için, gerekli olan termodinamik özellikler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Hesaplamalarda, kazandaki nem oranları ölçülemediğinden dolayı nem oranları düzeltme faktörleri ihmal edilmiştir.

Çizelge 4.1. Yakıtların termodinamik özellikleri.

Parametreler	Kok Gazı	Yüksek Fırın Gazı	Konverter Gazı
Kazana Giriş Basıncı, $P_c$	2.84 kPa	2.93 kPa	8.00 kPa
Mutlak Basıncı, $P_m$	104.165 kPa	104.255 kPa	109.325 kPa
Kazan Girişindeki Hacimsel Debisi, $\dot{V}_t$	3000 Nm <sup>3</sup> /h 0.83 Nm <sup>3</sup> /s	7180 Nm <sup>3</sup> /h 2 Nm <sup>3</sup> /s	11000 Nm <sup>3</sup> /h 3.05 Nm <sup>3</sup> /s
Kok Gazının Alt Isıl Değeri, $H_u$	3954 kcal/Nm <sup>3</sup> 16545 kJ/Nm <sup>3</sup>	743 kcal/Nm <sup>3</sup> 3109 kJ/Nm <sup>3</sup>	1500 kcal/Nm <sup>3</sup> 6280 kJ/Nm <sup>3</sup>
Kazana Giriş Sıcaklıkları	30 °C	30 °C	30 °C

Kazana giren yakıtların hacimsel debileri ile alt ısıl değerleri çarpılarak her bir yakıtın yanma entalpisi hesaplanabilir. Kazanda yakılan yakıtın toplam entalpisi ise üç yakıtın yanma entalpileri toplamına eşit olur.

Kok gazının yanma entalpisi:

$$(\dot{H}_u)_{kokg} = 16545 \text{ kJ/Nm}^3 \times 0.83 \text{ Nm}^3/\text{s} = 13732.35 \text{ kW}$$

Yüksek fırın gazının yanma entalpisi:

$$(\dot{H}_u)_{yfg} = 3109 \text{ kJ/Nm}^3 \times 2 \text{ Nm}^3/\text{s} = 6218 \text{ kW}$$

Konverter gazının yanma entalpisini:

$$(\dot{H}_u)_{konq} = 6280 \text{ kJ/Nm}^3 \times 3.05 \text{ Nm}^3/\text{s} = 19154 \text{ kW}$$

Kazanda yakılan yakıtın toplam yanma entalpisini:

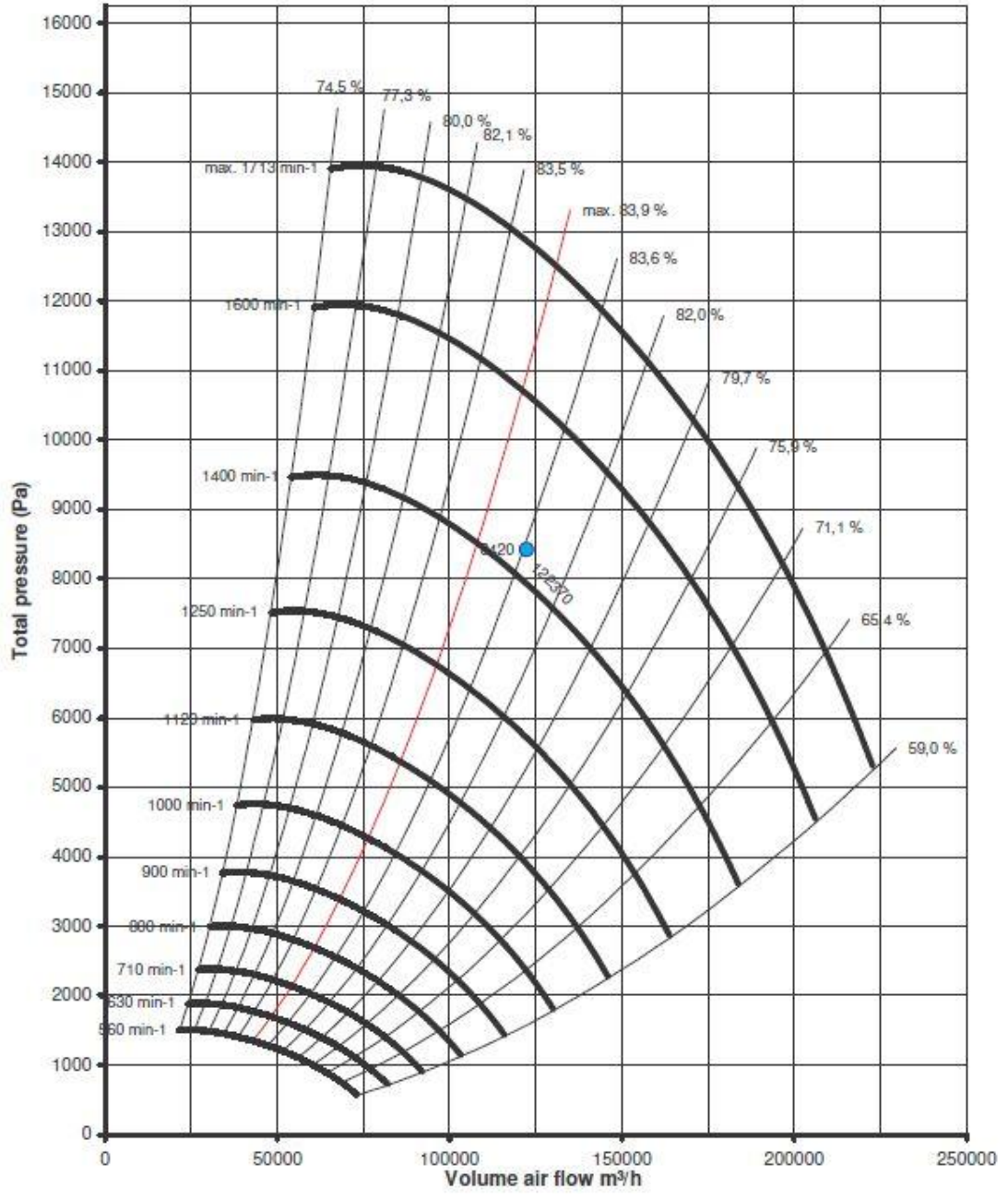
$$(\dot{H}_u)_{yakıt} = 13732.35 + 6218 + 19154$$

$$(\dot{H}_u)_{yakıt} = 39104.35 \text{ kW}$$

olarak hesaplanmıştır.

#### **4.2. BACA GAZI BİLEŞENLERİNİN MOLAR DEBİLERİNİN BELİRLENMESİ**

Baca gazı bileşenlerinin entalpilerini bulabilmek için öncelikle bileşenlerin molar debilerinin bulunması gerekmektedir. Baca gazı bileşenlerinin molar debileri; buhar kazanındaki yanmanın tam olarak gerçekleştiği, baca gazı bileşenlerinin CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> olduğu kabulüne göre belirlenmiştir. Baca gazının bacadan çıkış sıcaklığı 168°C'dir. Kazanın baca sisteminde, baca gazını dışarıya atmaya yarayan 1500 d/d devrinde, 24 m<sup>3</sup>/s debisinde, 350 kW gücünde, 7.63 kPa statik ve 108.955 kPa mutlak basınca sahip Siemens marka bir adet aspiratör bulunmaktadır. Aspiratör % 70 açıklıkla çalışmaktadır. Şekil 4.2'de görülen aspiratör karakteristik çalışma eğrisinden baca gazının hacimsel debisi,  $\dot{V}_{baca} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Aspiratörün karakteristik çalışma eğrisi.

İdeal gaz denkleminde baca gazının molar debisi aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$P_{baca\ gazı} \times \dot{V}_{baca\ gazı} = \dot{n}_{baca\ gazı} \times \bar{R} \times T_{baca\ gazı} \quad (4.1)$$

$$P_{baca\ gazı} = 108.955\text{ kPa}$$

$$\dot{V}_{\text{bacaa gazı}} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T_{\text{bacaa gazı}} = 168^\circ\text{C} = 441.15 \text{ K}$$

$$\bar{R} = 8.314 \text{ kJ/ kmol K}$$

Bu değerlere göre bacaa gazının molar debisi;

$$\dot{n}_{\text{bacaa gazı}} = \frac{108.955 \times 20}{8.314 \times 441.15}$$

$$\dot{n}_{\text{bacaa gazı}} = 0.594 \text{ kmol/s}$$

olarak bulunur.

Bacaa gazı bileşenlerinin molar debilerinin belirlenmesinde gerekli olan buhar kazanında kullanılan gaz yakıtların kimyasal bileşenleri, hacimsel oranları ve hacimsel debileri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Yakıtların bileşenleri, hacimsel oranları ve hacimsel debileri.

Gaz yakıtlar	Yakıtların bileşenleri		Hacimsel (molar) oranları (%)	Hacimsel debi (m <sup>3</sup> /s)
Kok Gazı P <sub>m</sub> =104.165 kPa V̇= 0.83 m <sup>3</sup> /s	Hidrojen	H <sub>2</sub>	57.58	0.5251
	Oksijen	O <sub>2</sub>	0.36	0.002
	Azot	N <sub>2</sub>	7.14	0.059
	Metan	CH <sub>4</sub>	22.9	0.1907
	Karbonmonoksit	CO	6.95	0.057
	Karbondioksit	CO <sub>2</sub>	3.02	0.025
	Etilen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.46	0.01218
	Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.49	0.004
Yüksek Fırın Gazı P <sub>m</sub> =104.255 kPa V̇ = 2 m <sup>3</sup> /s	Asetilen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.1	0.00083
	Hidrojen	H <sub>2</sub>	1.74	0.0348
	Azot	N <sub>2</sub>	57.06	1.1412
	Karbonmonoksit	CO	23.12	0.4624
Konverter Gazı P <sub>m</sub> =109.325 kPa V̇ = 3.05 m <sup>3</sup> /s	Karbondioksit	CO <sub>2</sub>	18.08	0.3616
	Azot	N <sub>2</sub>	29.0	0.8845
	Karbonmonoksit	CO	21.0	0.6405
			50.0	1.525

#### 4.2.1. Oksijenin (O<sub>2</sub>) Molar Debisinin Belirlenmesi

Baca gazının çıkışında bulunan analizör sayesinde çıkan tüm gazların miktarları operatörler tarafından sürekli kontrol edilmektedir. Oksijen değeri, baca gazı analizöründe % 3.2 olarak okunmuştur. Buna göre aşağıdaki hacimsel oranın molar orana eşitliğinden, baca gazı içerisindeki oksijenin molar debisi,

$$\frac{\dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_{baca\ gazı}} = 0.032$$

$$\frac{\dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_{baca\ gazı}} = \frac{\dot{n}_{O_2}}{\dot{n}_{baca\ gazı}}$$

$$\frac{\dot{n}_{O_2}}{\dot{n}_{baca\ gazı}} = 0.032$$

$$\frac{\dot{n}_{O_2}}{0.594} = 0.032$$

$$\dot{n}_{O_2} = 0.01906\ kmol/s$$

olarak bulunur.

#### 4.2.2. Karbondioksitin (CO<sub>2</sub>) Molar Debisinin Belirlenmesi

Baca gazı bileşimindeki CO<sub>2</sub> miktarı, yanma işlemine giren C miktarının yanma işlemi sonucunda oluşacak baca gazı bileşimindeki C miktarına eşit olması gerektiğinden yola çıkılarak belirlenmiştir. Kimyasal reaksiyonlarda, reaksiyona girenler ile çıkanlar arasında kütleli eşitlik olmak zorundadır.

Yanma işlemine giren kok, yüksek fırın ve konverter gazının bileşiminde bulunan C içeren gaz yakıtların hacimsel debileri (Çizelge 4.2):

Metan (CH<sub>4</sub>): 0.1907 m<sup>3</sup>/s

Etilen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) : 0.01218 m<sup>3</sup>/s

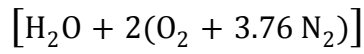
Etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>): 0.004 m<sup>3</sup>/s

Asetilen (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>): 0.00083 m<sup>3</sup>/s

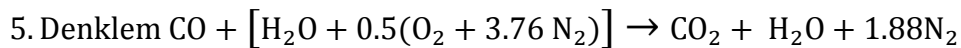
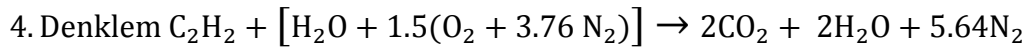
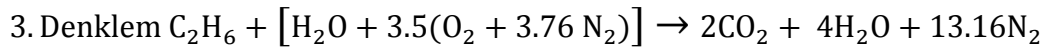
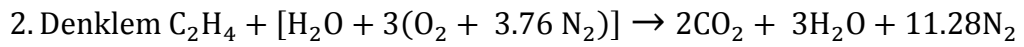
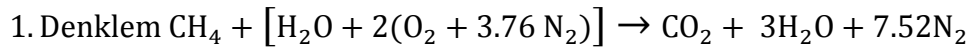
Karbonmonoksit (CO): 1.525+ 0.4624+ 0.057 = 2.0450 m<sup>3</sup>/s

Karbondioksit (CO<sub>2</sub>): 0.6405+ 0.3616+ 0.025 = 1.02716 m<sup>3</sup>/s

Yanma işleminin gerçekleştiği nemli havanın kimyasal denklemi:



Yukarıda hacimsel debileri verilen gaz yakıtların nemli hava ile yanma denklemleri:



1. denklemde 1 kmol (0.1907 m<sup>3</sup>/s) metan gazı nemli hava ile reaksiyona girerek 1 kmol (0.1907 m<sup>3</sup>/s) CO<sub>2</sub> oluşmuştur.

2. denklemde 1 kmol (0.0121 m<sup>3</sup>/s) etilen gazı nemli hava ile reaksiyona girerek 2 kmol (0.0242 m<sup>3</sup>/s) CO<sub>2</sub> oluşmuştur.

3. denklemde 1 kmol (0.0040 m<sup>3</sup>/s) etan gazı nemli hava ile reaksiyona girerek 2 kmol (0.0080 m<sup>3</sup>/s) CO<sub>2</sub> oluşmuştur.

4.denklemde 1 kmol (0.00083 m<sup>3</sup>/s) asetilen gazı nemli hava ile reaksiyona girerek 2 kmol (0.00166 m<sup>3</sup>/s) CO<sub>2</sub> oluşmuştur.

5.denklemde 1 kmol (2.0450 m<sup>3</sup>/s) karbonmonoksit gazı nemli hava ile reaksiyona girerek 1 kmol (2.0450 m<sup>3</sup>/s) CO<sub>2</sub> oluşmuştur.

6.denklemde ise 1 kmol (1.0272 m<sup>3</sup>/s) CO<sub>2</sub> girişi ve çıkışı olmuştur.

Yanma sonucu oluşan toplam CO<sub>2</sub> miktarı:

$$\dot{V}_{CO_2} = 0.1907 + 0.0242 + 0.0080 + 0.00166 + 2.0450 + 1.0272$$

$$\dot{V}_{CO_2} = 3.29676 \text{ m}^3/\text{s}$$

Aşağıdaki orantıdan hacimsel debisi 3.2963 m<sup>3</sup>/s olan CO<sub>2</sub>'nin molar debisi:

$$\begin{array}{r} 22.4 \text{ m}^3 \text{ NŞA} \quad 1 \text{ kmol} \\ 3.29676 \text{ m}^3/\text{s} \quad x \\ \hline \end{array}$$

$$\dot{n}_{CO_2} = 0.1472 \text{ kmol/s}$$

olarak bulunur.

#### 4.2.3. Suyun (H<sub>2</sub>O) Molar Debisinin Belirlenmesi

Baca gazı bileşimindeki H<sub>2</sub>O'nun molar debisi, CO<sub>2</sub>'nin molar debisinin belirlenmesine benzer şekilde bulunmuştur. Yanma işlemine giren kok, yüksek fırın ve konverter gazının bileşiminde bulunan H içeren gazların hacimsel debileri:

Metan (CH<sub>4</sub>): 0.1907 m<sup>3</sup>/s

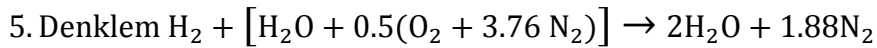
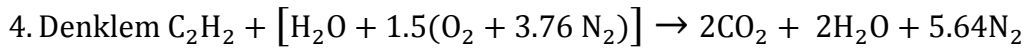
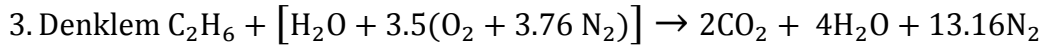
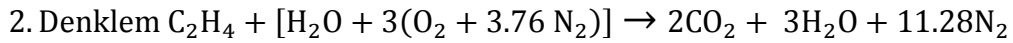
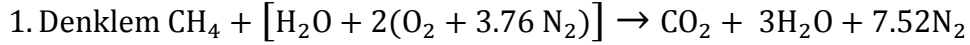
Etilen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>): 0.0121 m<sup>3</sup>/s

Etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>): 0.0040 m<sup>3</sup>/s

Asetilen (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>): 0.00083 m<sup>3</sup>/s

Hidrojen (H<sub>2</sub>): 0.5599 m<sup>3</sup>/s

Yukarıda hacimsel debileri verilen gaz yakıtların nemli hava ile yanma denklemleri:



1. denklemde 1 kmol (0.1907 m<sup>3</sup>/s) metan gazı nemli hava ile reaksiyona girerek 3 kmol (0.5721 m<sup>3</sup>/s) H<sub>2</sub>O oluşmuştur.

2. denklemde 1 kmol (0.0121 m<sup>3</sup>/s) etilen gazı nemli hava ile reaksiyona girerek 3 kmol (0.0363 m<sup>3</sup>/s) H<sub>2</sub>O oluşmuştur.

3. denklemde 1 kmol (0.0040 m<sup>3</sup>/s) etan gazı nemli hava ile reaksiyona girerek 4 kmol (0.0160 m<sup>3</sup>/s) H<sub>2</sub>O oluşmuştur.

4. denklemde 1 kmol (0.00083 m<sup>3</sup>/s) asetilen gazı nemli hava ile reaksiyona girerek 2 kmol (0.00166 m<sup>3</sup>/s) H<sub>2</sub>O oluşmuştur.

5. denklemde 1 kmol (0.5599 m<sup>3</sup>/s) hidrojen gazı nemli hava ile reaksiyona girerek 2 kmol (1.1198 m<sup>3</sup>/s) H<sub>2</sub>O oluşmuştur.

Yanma sonucu oluşan toplam H<sub>2</sub>O miktarı:



$$\dot{V}_{H_2O} = 0.5721 + 0.0363 + 0.0160 + 0.00166 + 1.1198$$

$$\dot{V}_{H_2O} = 1.7458 \text{ m}^3/\text{s}$$

Aşağıdaki orantıdan hacimsel debisi 1.7458m<sup>3</sup>/s olan H<sub>2</sub>O'nun molar debisi:

$$\frac{22.4 \text{ m}^3 \text{ N\AA}}{1.7458 \text{ m}^3/\text{s}} = \frac{1 \text{ kmol}}{x}$$

$$\dot{n}_{H_2O} = 0.0779 \text{ kmol/s}$$

olarak bulunur.

#### 4.2.4. Azotun (N<sub>2</sub>) Molar Debisinin Belirlenmesi

Yukarıda baca gazının molar debisi ve baca gazı bileşiminde bulunan CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ve O<sub>2</sub>'nin molar debileri belirlendi. Baca gazının toplam molar debisi 0.594 kmol/s olduğuna göre, yukarıda bulunan diğer baca gazı bileşenlerinin molar debileri çıkarıldığında, N<sub>2</sub>'nin molar debisi belirlenmiş olur. Buna göre N<sub>2</sub>'nin molar debisi:

$$\dot{n}_{baca \text{ gazı}} = \dot{n}_{CO_2} + \dot{n}_{H_2O} + \dot{n}_{O_2} + \dot{n}_{N_2}$$

$$0.594 = 0.1472 + 0.0779 + 0.01906 + \dot{n}_{N_2}$$

$$\dot{n}_{N_2} = 0.3498 \text{ kmol/s}$$

olarak bulunur.

Çizelge 4.3. Baca gazı bileşenlerinin molar debileri ve molar oranları.

Baca gazı bileşenleri	Molar debisi n <sub>i</sub> (kmol/s)	Molar oranı y <sub>i</sub> = (n <sub>i</sub> /n <sub>baca</sub> )
CO <sub>2</sub>	0.1472	0.248
H <sub>2</sub> O	0.0779	0.1312
O <sub>2</sub>	0.01906	0.032
N <sub>2</sub>	0.3498	0.589
Toplam	0.594	1

Yukarıda ayrı ayrı belirlenen baca gazı bileşenlerinin molar debileri ve molar oranları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

### 4.3. BACA GAZI ENTALPİSİNİN BELİRLENMESİ

Baca gazının entalpisi, baca gazının özgül ısısına göre belirlenmiştir. Bir maddenin özgül ısısı, entalpinin sıcaklıkla değişimini ifade eder. Buna göre, baca gazının bacadan çıkış sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki entalpi farkı, sıcaklık farkı ile özgül ısısının çarpımına eşittir. Buna göre Ek-1’deki termodinamik tablodan 168 °C sıcaklıktaki baca gazı bileşenlerinin entalpi hesabı için özgül ısı kapasitesi değerleri:

CO<sub>2</sub>: 40.84 kJ/kmol K

H<sub>2</sub>O: 33.75 kJ/kmol K

O<sub>2</sub>: 29.1 kJ/kmol K

N<sub>2</sub>: 29.51 kJ/kmol K

Olarak bulunur. Bu değerler, aşağıdaki eşitlikte yerine yazıldığında baca gazının molar özgül ısı kapasitesi bulunur.

$$\bar{C}_{p,baca\ gazı} = \sum_i y_i \bar{C}_{p,i} \quad (4.2)$$

$$\bar{C}_{p,baca\ gazı} = y_{CO_2} \times \bar{C}_{p,CO_2} + y_{H_2O} \times \bar{C}_{p,H_2O} + y_{O_2} \times \bar{C}_{p,O_2} + y_{N_2} \times \bar{C}_{p,N_2}$$

$$\bar{C}_{p,baca\ gazı} = 0.248 \times 40.84 + 0.1312 \times 33.75 + 0.032 \times 29.1 + 0.589 \times 29.51$$

$$\bar{C}_{p,baca\ gazı} = 32.86 \text{ kJ/kmolK}$$

Bulunan özgül ısı kapasitesi aşağıdaki eşitlikte yerine yazılarak baca gazı entalpi farkı bulunur.

$$\bar{C}_{p,baca\ gazı} = \frac{\bar{h} - \bar{h}_o}{T - T_o}$$

$$h - h_o = (441.15 - 298.15) \times 32.86$$

$$\bar{h} - \bar{h}_o = 4699 \text{ kJ/kmol}$$

Bulunan entalpi farkı, baca gazı molar debisi ile çarpılarak baca gazı entalpisi aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\dot{H}_{\text{baca gazı}} = \dot{n}_{\text{baca gazı}} \times (\bar{h} - \bar{h}_o) \quad (4.3)$$

$$\dot{H}_{\text{baca gazı}} = 0.594 \times 4699$$

$$\dot{H}_{\text{baca gazı}} = 2791.2 \text{ kW}$$

#### 4.4. YAKMA HAVASI DEBİSİNİN VE ENTALPİSİNİN BELİRLENMESİ

Sistemde, kazana yanma havasını sağlayan bir adet vantilatör bulunmaktadır. Emiş yapılan hava iki yakıcıdan 18000 m<sup>3</sup>/h olmak üzere toplamda 36000 m<sup>3</sup>/h'dir. Kazana bu yakma havasını sağlayan vantilatör 1500 d/d'da 41.333 m<sup>3</sup>/h maksimum emiş kapasitesine sahip, 4 kPa basınçta ve 72 kW gücündedir. Kazan 50 t/h kapasitede çalışırken vantilatör açıklığı % 85 - % 90 olarak ölçülmüştür. Buna göre Şekil 4.3'te görülen vantilatör karakteristik çalışma eğrisinden yakma havasının debisi:

$$\dot{V}_{\text{nemli hava}} = 36000/3600 = 10.1 \text{ m}^3/\text{s}$$

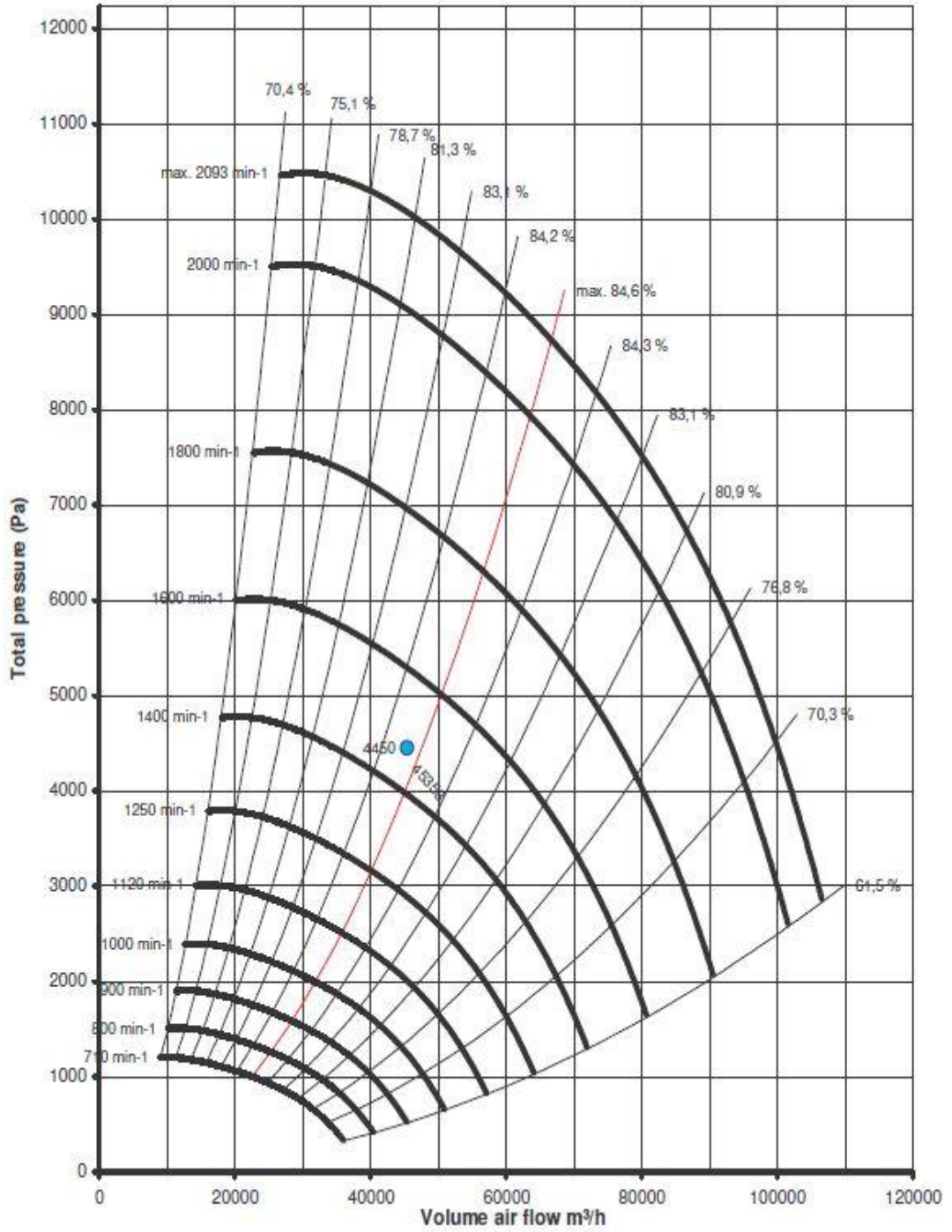
$$\dot{V}_{\text{nemli hava}} = 10.1 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m}_{\text{nemli hava}} = \dot{V}_{\text{nemli hava}} \times \rho_{\text{nemli hava}}$$

$$\dot{m}_{\text{nemli hava}} = 10.1 \times 1.2$$

$$\dot{m}_{\text{nemli hava}} = 12.12 \text{ kg/s}$$

olarak bulunur.



Şekil 4.3. Vantilatörün karakteristik çalışma eğrisi.

Yakma havası, kazana luvolarda ön ısıtma yapıldıktan sonra 200 °C sıcaklık ve 2.4 kPa basınçta girmektedir. Buna göre kazana giren yakma havasının özgül entalpisı, termodinamik tablolardan 475.47 kJ/kg olarak okunur ve aşağıda verildiği gibi kazana giriş debisi ile çarpılarak entalpisı bulunur.

$$\dot{H}_{hava} = \dot{m}_{hava} \times h_{hava}$$

$$\dot{H}_{hava} = 12.12 \times 475.47$$

$$\dot{H}_{hava} = 5762.7 \text{ kW}$$

#### 4.5. BUHAR KAZANINDAN ÇEVREYE OLAN ISI KAYBI

Yukarıda yapılan hesaplamalardan sonra kazandan çevreye olan ısı kaybı bulunabilir. Kazanda üretilen buharın sıcaklığı 385 °C ve basıncı 25 bar'dır. Kazana su sağlayan besleme pompasının çıkışındaki basınç 5 bar, sıcaklık ise 107 °C'dir. Bu sıcaklık ve basınç değerlerine göre steam TAB programından entalpi ve ekserji değerleri okunarak aşağıdaki enerji denge denkleminde yerine yazılmış, kazandan çevreye olan ısı kaybı bulunmuştur. Kazana girenler yakıt, yakma havası ve besleme suyu, kazandan çıkanlar ise buhar ve baca gazıdır. Buna göre, buhar kazanından meydana gelen ısı kaybı:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta - \sum \dot{m}_g h_g \quad (4.4)$$

$$\dot{W} = 0, \quad \dot{Q} = -\dot{Q}_{kayıp}$$

$$\dot{Q}_{kayıp} = \sum \dot{m}_g h_g - \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta$$

$$\dot{Q}_{kayıp} = (\dot{H}_u)_{yakıt} + \dot{H}_{hava} + \dot{H}_{besleme\ suyu} - \dot{H}_{buhar} - \dot{H}_{baca}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{kayıp} = (\dot{H}_u)_{yakıt} + \dot{H}_{hava} + (\dot{m}_{besleme\ suyu} \times h_{besleme\ suyu}) \\ - (\dot{m}_{buhar} \times h_{buhar}) - \dot{H}_{baca} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{kayıp} = 39104.35 + 5762.7 + (13.88 \times 640.23) - (13.88 \times 3207.26) \\ - 2791.2 \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{kayıp} = 6445.5 \text{ kW}$$

#### 4.6. BUHAR KAZANININ ISIL VERİMİ

Verim kavramı mühendislikte genel olarak bir sistemden elde edilen faydanın sisteme ödenen bedele oranı şeklinde tanımlanabilir. Buhar kazanının ısı verimi ise, kazandan buhar ile elde edilen faydalı ısı miktarının, kazanda tüketilen yakıtın yanma entalpisine oranından bulunur. Bu çalışmada incelenen buhar kazanının verimi:

$$\eta_{\text{Isıl}} = \frac{\dot{m}_{\text{buhar}} \times (h_{\text{buhar}} - h_{\text{besleme suyu}})}{(\dot{H}_u)_{\text{yakıt}}} \quad (4.5)$$

$$\eta_{\text{Isıl}} = \frac{13.88 \times (3207.26 - 640.23)}{39104.35}$$

$$\eta_{\text{Isıl}} = \% 91$$

olarak bulunmuştur.

## BÖLÜM 5

### BUHAR KAZANI EKSERJİ ANALİZİ

Bu bölümde, bir önceki bölümde enerji analizi yapılan buhar kazanının ekserji analizi yapılmıştır. Ekserji analizi, enerji analizinde basınç ve sıcaklık değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

#### 5.1. BUHAR KAZANINA GİREN VE ÇIKAN ÜRÜNLERİN EKSERJİLERİNİN BELİRLENMESİ

##### 5.1.1. Besleme Suyunun Ekserjisi

Kazana domdan giren besleme suyu sıcaklığı 107 °C, basıncı ise 5 bar'dır. Suyun kimyasal ekserjisinin hesaplanabilmesi için ölü haldeki ( $T_o$  ve  $P_o$ ) suyun doyma basıncının ve atmosferdeki suyun standart kısmı basıncının bilinmesi gerekmektedir. Termodinamik tablodan suyun doyma basıncı,  $P_{doyma}(25\text{ °C}) = 3.169\text{ kPa}$ , atmosferdeki suyun standart kısmı basıncı  $P_{oo} = 0.88\text{ kPa}$  (0.0088 bar) (Kotas, 1995). Bu değerler, aşağıdaki kimyasal ekserji eşitliğinde yerine yazılırsa, kazana giren besleme suyunun molar özgül kimyasal ekserjisi hesaplanır.

$$(\bar{e}x^{kim})_{besleme\ suyu} = \bar{R}T_o \ln\left(\frac{P_{doyma}(T_o)}{P_{oo}}\right) \quad (5.1)$$

$$(\bar{e}x^{kim})_{besleme\ suyu} = 8.314 \times 298.15 \times \ln\left(\frac{3.169}{0.88}\right)$$

$$(\bar{e}x^{kim})_{besleme\ suyu} = 3175.98\text{ kJ/kmol}$$

Molar özgül kimyasal ekserji değeri, suyun molar ağırlığına oranlanarak birim kütle için kimyasal ekserji değeri bulunur.

$$(ex^{kim})_{besleme\ suyu} = \frac{(\bar{e}x^{kim})_{besleme\ suyu}}{M_{su}}$$

$$(ex^{kim})_{besleme\ suyu} = \frac{3175.98\text{kJ/kmol}}{18\text{ kg/kmol}}$$

$$(ex^{kim})_{besleme\ suyu} = 176.44\text{ kJ/kg}$$

Besleme suyunun özgül fiziksel ekserji ise aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$ex^{fiz} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (5.2)$$

Kazana giren besleme suyunun 107 °C ve 5 bar değerlerindeki entalpi ve entropi değerleri steam TAB'dan okunarak, yukarıdaki eşitlikte yerine yazıldığında besleme suyunun özgül fiziksel ekserjisi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$(ex^{fiz})_{besleme\ suyu} = (h - h_o) - T_o(s - s_o)$$

$$(ex^{fiz})_{besleme\ suyu} = (448.61 - 104.93) - 298.15 (1.3812 - 0.3672)$$

$$(ex^{fiz})_{besleme\ suyu} = 45.19\text{ kJ/kg}$$

Besleme suyunun sahip olduğu toplam özgül ekserji, hesaplanan kimyasal ve fiziksel ekserjilerinin toplamına eşittir.

$$(ex^{top})_{besleme\ suyu} = (ex^{fiz})_{besleme} + (ex^{kim})_{besleme}$$

$$(ex^{top})_{besleme\ suyu} = 45.19 + 176.44$$

$$(ex^{top})_{besleme\ suyu} = 221.63\text{ kJ/kg}$$

Toplam özgül ekserji besleme suyu debisi ile çarpıldığında, besleme suyunun toplam ekserjisi,



$$(\dot{E}x^{top})_{besleme\ suyu} = \dot{m}_{besleme\ suyu} \times (ex^{top})_{besleme\ suyu}$$

$$(\dot{E}x^{top})_{besleme\ suyu} = 13.88 \times 221.63$$

$$(\dot{E}x^{top})_{besleme\ suyu} = 3076.22\ kW$$

olarak bulunur.

### 5.1.2. Buharın Ekserjisi

Kazandan 385°C sıcaklıkta ve 25 bar basınçta kuru buhar çıkmaktadır. Buna göre kazandan çıkan kuru buharın özgül fiziksel ekserjisi, entalpi ve entropi değerleri steam TAB'dan okunarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$(ex^{fiz})_{buhar} = (h - h_o) - T_o(s - s_o)$$

$$(ex^{fiz})_{buhar} = (3207.26 - 104.93) - 298.15 (6.9676 - 0.3672)$$

$$(ex^{tm})_{buhar} = 1134.42\ kJ/kg$$

Buharın kimyasal ekserjisi yukarıda bulunan besleme suyunun kimyasal ekserjisine eşit olduğundan, toplam özgül ekserji,

$$(ex^{top})_{buhar} = (ex^{fiz})_{buhar} + (ex^{kim})_{buhar}$$

$$(ex^{top})_{buhar} = 1134.42 + 176.44$$

$$(ex^{top})_{buhar} = 1310.86\ kJ/kg$$

değerine eşit olur. Toplam ekserji ise,

$$(\dot{E}x^{top})_{buhar} = \dot{m}_{buhar} \times (ex^{top})_{buhar}$$

$$(\dot{E}x^{top})_{buhar} = 13.88 \times 1310.86$$

$$(\dot{E}x^{top})_{buhar} = 18194.73\ kW$$

olarak bulunur.

### 5.1.3. Yakıt Ekserjisinin Belirlenmesi

Kazanda yakıt olarak kullanılan kok gazı, yüksek fırın gazı ve konverter gazının ekserjilerinin belirlenmesinde, Çizelge 5.1'de verilen yakıtların termofiziksel özellikleri kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. Yakıtların termofiziksel özellikleri.

Parametreler	Kok Gazı	Yüksek Fırın Gazı	Konverter Gazı
Kazana Giriş Basıncı, $P_c$	2.84 kPa	2.93 kPa	8.00 kPa
Mutlak Basınç, $P_m$	104.165 kPa	104.255 kPa	109.325 kPa
Kazan Girişindeki Hacimsel Debisi, $\dot{V}_i$	3000 Nm <sup>3</sup> /h 0.83 Nm <sup>3</sup> /s	7180 Nm <sup>3</sup> /h 2 Nm <sup>3</sup> /s	11000 Nm <sup>3</sup> /h 3.05 Nm <sup>3</sup> /s
Kok Gazının Alt Isıl Değeri, $H_u$	3954 kcal/Nm <sup>3</sup> 16545 kJ/Nm <sup>3</sup>	743 kcal/Nm <sup>3</sup> 3109 kJ/Nm <sup>3</sup>	1500 kcal/Nm <sup>3</sup> 6280 kJ/Nm <sup>3</sup>
Kazana Giriş Sıcaklıkları	30 °C	30 °C	30 °C
Kazan Girişindeki Yoğunlukları, $\rho_i$	0.486 kg/Nm <sup>3</sup>	1.359 kg/Nm <sup>3</sup>	1.511 kg/Nm <sup>3</sup>
Molar Ağırlıkları, $M_i$	10.786 kg/kmol	30.44 kg/kmol	31.36 kg/kmol

Çizelge 5.2. Bazı endüstriyel yakıtların  $\phi$  değerleri (Kotas, 1995).

Yakıt	$\phi$
Kok gazı	1.05
Farklı Kömür Türleri	1.06
Turba	1.16
Odun	1.15
Farklı fuel oil ve petrol	1.04
Doğalgaz	1.04
Hava gazı	1.00
Yüksek Fırın Gazı	0.98
Hidrojen	0.985
Karbonmonoksit (okg)	0.973
Kükürt	2.017

Yakıtların kimyasal ekserjisi aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulunmuştur.

$$\varphi = \frac{ex^{kim}}{(\dot{H}_u)_{yakıt}}$$

$$ex^{kim} = \varphi \times (\dot{H}_u)_{yakıt} \quad (5.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte, yakıtların  $\varphi$  değerleri Çizelge 5.2'den kok gazı için 1.05, yüksek fırın gazı için 0.98 ve konverter gazı için 0.973 olarak alınmıştır.

Kok gazının özgül kimyasal ekserjisi:

$$(ex^{kim})_{kokg} = \varphi \times (H_u)_{kokg}$$

$$(ex^{kim})_{kokg} = 1.05 \times 16545 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$(ex^{kim})_{kokg} = 17372.25 \text{ kJ/Nm}^3$$

Yüksek fırın gazının özgül kimyasal ekserjisi:

$$(ex^{kim})_{yfg} = \varphi \times (H_u)_{yfg}$$

$$(ex^{kim})_{yfg} = 0.98 \times 3109 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$(ex^{kim})_{yfg} = 3046.82 \text{ kJ/Nm}^3$$

Konverter gazının özgül kimyasal ekserjisi:

$$(ex^{kim})_{kong} = \varphi \times (H_u)_{kong}$$

$$(ex^{kim})_{kong} = 0.973 \times 6280 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$(ex^{kim})_{kong} = 6110.44 \text{ kJ/Nm}^3$$

olarak bulunur.

Yakıtların fiziksel ekserjileri ise aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$(\bar{e}x^{fiz})_{yakıt} = \bar{C}_{p,yakıt} \times \left[ (T - T_o) - T_o \ln\left(\frac{T}{T_o}\right) \right] + \bar{R}T_o \ln\left(\frac{P}{P_o}\right) \quad (5.4)$$

Eşitlikteki yakıtın özgül ısısı, sıcaklığa bağlı aşağıdaki eşitliğe göre belirlenmiştir.

$$\bar{C}_{p,yakıt}(T) = a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^3$$

Eşitlikteki a, b, c ve d katsayıları Ek-4 tablodan alınarak her bir yakıt için sıcaklığa bağlı özgül ısı değeri hesaplanmıştır.

Kok gazının fiziksel ekserjisi:

$$T = 303.15 \text{ K } (30^\circ\text{C})$$

$$T_o = 298.15 \text{ K}$$

$$P = 104.165 \text{ kPa}$$

$$P_o = 101.325 \text{ kPa}$$

$$\bar{C}_{p,kok}(T) = a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^3$$

$$\bar{C}_{p,kokg}(T) = 9.957 + \frac{3.39 \times T}{10^4} + \frac{1.29 \times T^2}{10^6} - \frac{3.89 \times T^3}{10^{10}}$$

$$\bar{C}_{p,kokg}(303.15) = 9.957 + \frac{3.39 \times 303.15}{10^4} + \frac{1.29 \times (303.15)^2}{10^6} - \frac{3.89 \times (303.15)^3}{10^{10}}$$

$$\bar{C}_{p,kokg}(303.15) = 10.167 \text{ kJ/kmolK}$$

$$(\bar{e}x^{fiz})_{kokg} = \bar{C}_{p,kokg} \times \left[ (T - T_o) - T_o \ln\left(\frac{T}{T_o}\right) \right] + \bar{R}T_o \ln\left(\frac{P}{P_o}\right)$$

$$\begin{aligned} (\bar{e}x^{fiz})_{kokg} &= 10.167 \times \left[ (303.15 - 298.15) - 298.15 \ln\left(\frac{303.15}{298.15}\right) \right] + 8.314 \\ &\quad \times 298.15 \ln\left(\frac{104.165}{101.325}\right) \end{aligned}$$

$$(\bar{e}x^{fiz})_{kokg} = 68.94 \text{ kJ/kmol}$$

$$(ex^{fiz})_{kokg} = \frac{\rho_{yfg}}{M_{yfg}} \times (\bar{e}x^{fiz})_{yfg} = \frac{0.486 \text{ kg/Nm}^3}{10.786 \text{ kg/kmol}} \times 68.94 \text{ kJ/kmol}$$

$$(ex^{fiz})_{kokg} = 3.106 \text{ kJ/Nm}^3$$

Yüksek fırın gazının fiziksel ekserjisi:

$$T = 303.15 \text{ K (30}^\circ\text{C)}$$

$$T_o = 298.15 \text{ K}$$

$$P = 104.255 \text{ kPa}$$

$$P_o = 101.325 \text{ kPa}$$

$$\bar{C}_{p,yfg}(T) = a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^3$$

$$\bar{C}_{p,yfg}(303.15) = 1.166 + \frac{9.58 \times T}{10^6} + \frac{1 \times T^2}{10^7} + \frac{-5.37 \times T^3}{10^{11}}$$

$$\bar{C}_{p,yfg}(303.15) = 1.166 + \frac{9.58 \times 303.15}{10^6} + \frac{(303.15)^2}{10^7} - \frac{5.37 \times (303.15)^3}{10^{11}}$$

$$\bar{C}_{p,yfg}(303.15) = 1.177 \text{ kJ/kmolK}$$

$$(\bar{e}x^{fiz})_{yfg} = \bar{C}_{p,yfg} \times \left[ (T - T_o) - T_o \ln\left(\frac{T}{T_o}\right) \right] + \bar{R}T_o \ln\left(\frac{P}{P_o}\right)$$

$$\begin{aligned} (\bar{e}x^{fiz})_{yfg} &= 1.177 \times \left[ (303.15 - 298.15) - 298.15 \ln\left(\frac{303.15}{298.15}\right) \right] + 8.314 \\ &\quad \times 298.15 \ln\left(\frac{104.255}{101.325}\right) \end{aligned}$$

$$(\bar{e}x^{fiz})_{yfg} = 70.71 \text{ kJ/kmol}$$

$$(ex^{fiz})_{yfg} = \frac{\rho_{yfg}}{M_{yfg}} \times (\bar{ex}^{fiz})_{yfg} = \frac{1.359 \text{ kg/Nm}^3}{30.44 \text{ kg/kmol}} \times 70.71 \text{ kJ/kmol}$$

$$(ex^{fiz})_{yfg} = 3.157 \text{ kJ/Nm}^3$$

Konverter gazının fiziksel ekserjisi:

$$T = 303.15 \text{ K (30}^\circ\text{C)}$$

$$T_o = 298.15 \text{ K}$$

$$P = 109.325 \text{ kPa}$$

$$P_o = 101.325 \text{ kPa}$$

$$\bar{C}_{p,kong}(T) = a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^3$$

$$\bar{C}_{p,kong}(T) = 0.907 + \frac{2.99 \times T}{10^4} + \frac{1.26 \times T^2}{10^8} - \frac{3.38 \times T^3}{10^{11}}$$

$$\bar{C}_{p,kong}(303.15) = 0.907 + \frac{2.99 \times 303.15}{10^4} + \frac{1.26 \times (303.15)^2}{10^8} - \frac{3.38 \times (303.15)^3}{10^{11}}$$

$$\bar{C}_{p,kong}(303.15) = 0.997 \text{ kJ/kmolK}$$

$$(\bar{ex}^{fiz})_{kong} = \bar{C}_{p,kong} \times \left[ (T - T_o) - T_o \ln\left(\frac{T}{T_o}\right) \right] + \bar{R}T_o \ln\left(\frac{P}{P_o}\right)$$

$$\begin{aligned} (\bar{ex}^{fiz})_{kong} &= 0.997 \times \left[ (303.15 - 298.15) - 298.15 \ln\left(\frac{303.15}{298.15}\right) \right] + 8.314 \\ &\quad \times 298.15 \ln\left(\frac{109.325}{101.325}\right) \end{aligned}$$

$$(\bar{ex}^{fiz})_{kong} = 188.41 \text{ kJ/kmol}$$

$$(ex^{fiz})_{kong} = \frac{\rho_{yfg}}{M_{yfg}} \times (\bar{ex}^{fiz})_{yfg} = \frac{1.511 \text{ kg/Nm}^3}{31.36 \text{ kg/kmol}} \times 188.41 \text{ kJ/kmol}$$

$$(ex^{fiz})_{kong} = 9.078 \text{ kJ/Nm}^3$$

olarak bulunur. Toplam ekserji değeri, yakıtların fiziksel ekserjileri ile kimyasal ekserjilerinin toplamının hacimsel debileri ile çarpılması sonucu elde edilir.

$$\dot{E}x^{top} = \dot{V}_i(ex^{kim} + ex^{fiz}) \quad (5.5)$$

Kok gazının toplam ekserjisi:

$$\dot{E}x^{kokg} = \dot{V}_{kokg}(ex^{kim} + ex^{fiz})_{kokg}$$

$$\dot{E}x^{kokg} = 0.83 (17372.25 + 3.106)$$

$$\dot{E}x^{kokg} = 14421.54 \text{ kW}$$

Yüksek fırın gazının toplam ekserjisi:

$$\dot{E}x^{yfg} = \dot{V}_{yfg}(ex^{kim} + ex^{fiz})_{yfg}$$

$$\dot{E}x^{yfg} = 2 (3046.82 + 3.157)$$

$$\dot{E}x^{yfg} = 6099.95 \text{ kW}$$

Konverter gazının toplam ekserjisi:

$$\dot{E}x^{kong} = \dot{V}_{kong}(ex^{kim} + ex^{fiz})_{kong}$$

$$\dot{E}x^{kong} = 3.05 (6110.44 + 9.078)$$

$$\dot{E}x^{kong} = 18664.53 \text{ kW}$$

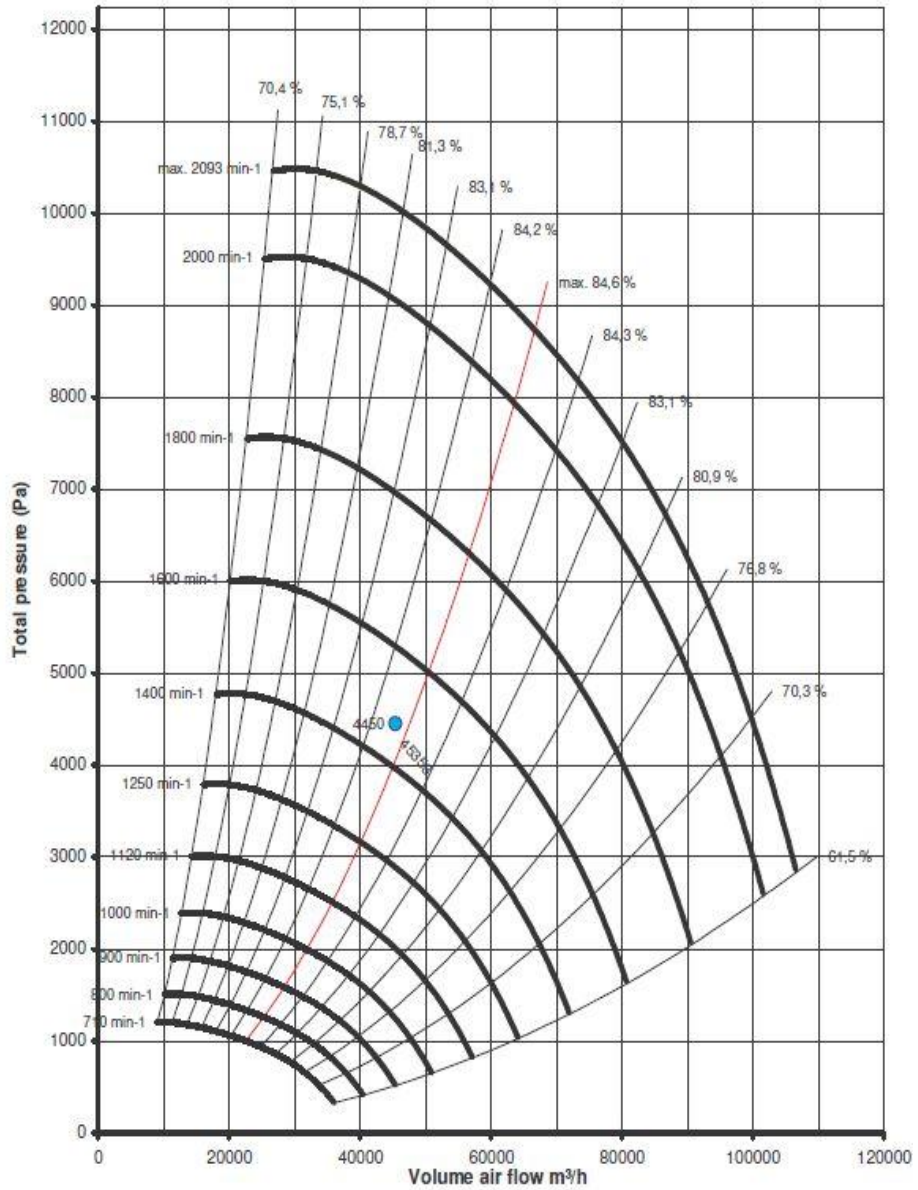
olarak bulunur. Toplam yakıt ekserjisi ise:

$$(\dot{E}x^{top})_{yakıt} = 14421.54 + 6099.95 + 18664.53 = 39186.02 \text{ kW}$$

olur.

#### 5.1.4. Kazana Giren Yakma Havası Ekserjisinin Belirlenmesi

Sistemde, kazana yanma havasını sağlayan bir adet vantilatör bulunmaktadır. Emiş yapılan hava iki ayrı yakıcıya eşit miktarda gönderilmektedir. Bir yakıcıya gönderilen hava miktarı 18000 m<sup>3</sup>/h olmak üzere iki yakıcıda toplam 36000 m<sup>3</sup>/h'dir. Kazana yakma havasını sağlayan vantilatör 1500 devir, 41.333 m<sup>3</sup>/h maksimum emiş kapasitesine sahip 4 kPa basınçta ve 72 kW gücündedir. Kazan 50 t/h kapasitede çalışırken vantilatör açıklığı %85 - %90 olarak ölçülmektedir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Vantilatörün karakteristik çalışma eğrisi.



Kazana saatte 36000 m<sup>3</sup> yakma havası gönderildiğine göre, birim zamanda kazana gönderilen hava miktarı:

$$\dot{V}_{nemli\ hava} = 36000/3600 = 10.1\ m^3/s$$

$$\dot{V}_{nemli\ hava} = 10.1\ m^3/s$$

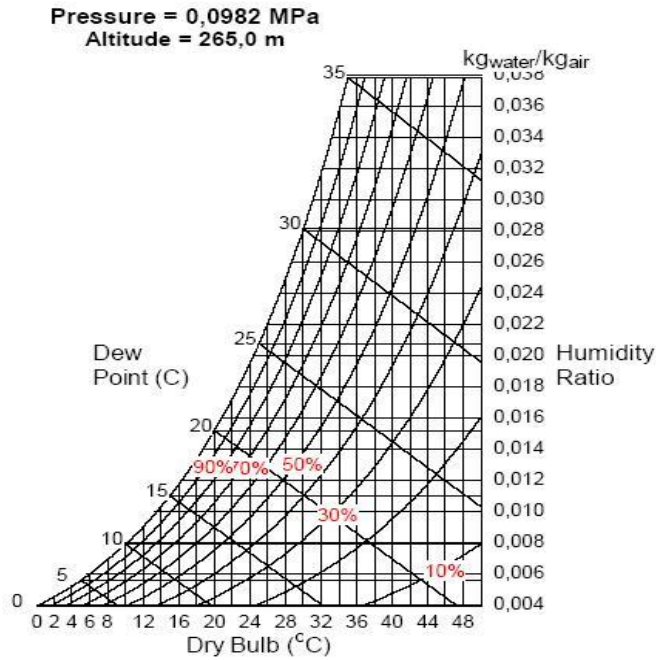
$$\dot{m}_{nemli\ hava} = \dot{V}_{nemli\ hava} \times \rho_{nemli\ hava} = 10.1 \times 1.2 = 12.12\ kg/s$$

$$\dot{m}_{nemli\ hava} = 10.1 \times 1.2 = 12.12\ kg/s$$

Nemli hava miktarı, kuru hava ile su buharı miktarının toplamına eşit olacaktır.

$$\dot{m}_{nemli\ hava} = \dot{m}_{kuru\ hava} + \dot{m}_{su\ buharı} \quad (5.6)$$

Kuru hava ve su buharı miktarı, kazanın bulunduğu bölgeye uygun bir psikometrik diyagrama göre belirlenebilir. Karabük (rakım 270 m) şartlarına uygun bir psikometrik diyagram Şekil 5.2'de görülmektedir. Kuru termometre sıcaklığı 25 °C olarak alınmış, yaş termometre sıcaklığı ise 18°C olarak ölçülmüştür. Bu değerlere göre, Karabük için verilen psikrometrik diyagramdan bağıl nem % 50, özgül nem ise 0.01 kg su buharı/ kg kuru hava olarak okunur.



Şekil 5.2. +265 m için psikrometrik diyagram.

Özgül nem değerini kullanarak kuru hava miktarı:

$$w = \frac{\dot{m}_{su\ buharı}}{\dot{m}_{kuru\ hava}}$$

$$\dot{m}_{su\ buharı} = 0.01 \times \dot{m}_{kuru\ hava}$$

$$\dot{m}_{nemli\ hava} = \dot{m}_{kuru\ hava} + 0.01 \times \dot{m}_{kuru\ hava} = 12.12\ kg/s$$

$$1.01 \times \dot{m}_{kuru\ hava} = 12.12\ kg/s$$

$$\dot{m}_{kuru\ hava} = 12\ kg/s$$

olarak bulunur. Buna göre su buharı miktarı ise,

$$\dot{m}_{su\ buharı} = 0.01 \times \dot{m}_{kuru\ hava}$$

$$\dot{m}_{su\ buharı} = 0.01 \times 12$$

$$\dot{m}_{su\ buharı} = 0.12\ kg/s$$

olur. Kazana giren yakma havasının ekserji hesabında kullanılacak olan kuru hava ve su buharı molar debisi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Kuru havanın kütleli debisinin kuru havanın moleküler ağırlığı olan  $M_{kuru\ hava} = 28.97\ kg/kmol$  değerine oranlanmasıyla bulunur.

$$\dot{n}_{kuru\ hava} = \frac{\dot{m}_{kuru\ hava}}{M_{kuru\ hava}}$$

$$\dot{n}_{kuru\ hava} = \frac{12}{28.97}$$

$$\dot{n}_{kuru\ hava} = 0.41\ kmol/s$$

Su buharının molar debisi ise, su buharının kısmi basıncı hesaplanıp daha sonra mükemmel gaz kabulü ile kuru hava içerisindeki su buharının mol sayısına göre bulunmuştur. Buna göre yakma havası içerisindeki su buharının molar debisi:

$$\phi = \frac{P_{su\ buharı}}{P_{doyma}} \quad (5.7)$$

$$P_{doyma} = 3.169 \text{ kPa}$$

$$P_{su \text{ buharı}} = \phi \times P_{doyma}$$

$$P_{su \text{ buharı}} = 0.50 \times 3.169 = 1.58 \text{ kPa}$$

$$P_{su \text{ buharı}} = 1.58 \text{ kPa}$$

$$\frac{\dot{n}_{su \text{ buharı}}}{\dot{n}_{kuru \text{ hava}} + \dot{n}_{su \text{ buharı}}} = \frac{P_{su \text{ buharı}}}{P_{atm}}$$

$$\frac{\dot{n}_{su \text{ buharı}}}{0.41 + \dot{n}_{su \text{ buharı}}} = \frac{1.58}{101.325}$$

$$\dot{n}_{su \text{ buharı}} = 0.0065 \text{ kmol/s}$$

Yakma havası içerisindeki kuru hava ve su buharının molar debisi, nemli havanın kimyasal bileşiminde yerine yazılırsa, aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\{\dot{n}_{su \text{ buharı}} \text{H}_2\text{O} + \dot{n}_{kuru \text{ hava}} (\text{O}_2 + 3.76 \text{N}_2)\}$$

$$\{0.0065 \text{H}_2\text{O} + 0.41 (\text{O}_2 + 3.76 \text{N}_2)\}$$

Çizelge 5.3. Nemli havanın bileşenlerinin molar debileri ve molar oranları.

Nemli havanın bileşenleri	Molar debisi ( $\dot{n}_i$ ) (kmol/s)	Molar oranı ( $y_i$ )	Standart molar kimyasal ekserjisi ( $\bar{e}^{kim}$ ) (kJ/kmol)
H <sub>2</sub> O	0.00652	0.003	11710
O <sub>2</sub>	0.41	0.209	3970
N <sub>2</sub>	1.54	0.787	720
Toplam	1.96	1	

Yakma Havaasının Kimyasal Ekserjisi:

Kazana giren yakma havasının kimyasal ekserjisi, aşağıdaki molar ekserji eşitliğine göre Çizelge 5.3'deki değerler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\bar{e}_x^{kim} = \bar{R}T_o \sum y_i \ln \left( \frac{y_i}{y} \right) = \sum_i y_i \bar{e}^{kim,i} + \bar{R}T_o \sum_i y_i \ln y_i \quad (5.8)$$

$$(\bar{e}x^{kim})_{hava} = (0.003 \times 11710) + (0.209 \times 3970) + (0.787 \times 720) + 8.314 \times 298.15 \times [0.003 \times \ln(0.003) + 0.209 \times \ln(0.209) + 0.787 \times \ln(0.787)]$$

$$(\bar{e}x^{kim})_{hava} = 110.02 \text{ kJ/kmol}$$

Yakma Havaasının Fiziksel Ekserjisi:

Kazana giren yakma havasının fiziksel ekserjisi ise aşağıdaki molar ekserji eşitliğine göre bulunmuştur.

$$(\bar{e}x^{fiz})_{hava} = \bar{C}_{p,hava} \times \left[ (T - T_o) - T_o \ln\left(\frac{T}{T_o}\right) \right] + \bar{R}T_o \ln\left(\frac{P}{P_o}\right)$$

Yukarıdaki eşitlikteki havanın sıcaklığa bağlı sabit basınçtaki molar özgül ısı kapasitesi aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \bar{C}_{p,hava}(T) = 1.04841 - \frac{3.83719}{10^4}T + \frac{9.45378}{10^7}T^2 - \frac{5.49031}{10^{10}}T^3 \\ + \frac{7.92981}{10^{14}}T^4 \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} \bar{C}_{p,hava}(473.15) = 1.04841 - \frac{3.83719}{10^4}473.15 + \frac{9.45378}{10^7}(473.15)^2 \\ - \frac{5.49031}{10^{10}}(473.15)^3 + \frac{7.92981}{10^{14}}(473.15)^4 \end{aligned}$$

$$\bar{C}_{p,hava}(473.15) = 1.024 \text{ kJ/kmolK}$$

$$\begin{aligned} (\bar{e}x^{fiz})_{hava} = 1.024 \times \left[ (473.15 - 298.15) - 298.15 \ln\left(\frac{473.15}{298.15}\right) \right] \\ + 8.314 \times 298.15 \times \ln\left(\frac{103.725}{101.325}\right) \end{aligned}$$

$$(\bar{e}x^{fiz})_{hava} = 96.23 \text{ kJ/kmol}$$

Kazana giren yakma havasının toplam ekserjisi ise;

$$(\dot{E}x^{top})_{hava} = \dot{n}_{hava} \times (\bar{e}x^{kim} + \bar{e}x^{fiz})_{hava}$$

$$(\dot{E}x^{top})_{hava} = 0.41 \times (110.02 + 96.23)$$

$$(\dot{E}x^{top})_{hava} = 84.56 \text{ kW}$$

olarak bulunur.

Çizelge 5.4. Baca gazı bileşenlerinin molar debileri ve kimyasal ekserjileri.

	Molar debi ( $\dot{n}_i$ ) (kmol/s)	Molar oranı ( $y_i$ )	Standart molar kimyasal ekserjisi ( $\bar{e}^{kim}$ ) (kJ/kmol)
O <sub>2</sub>	0.01906	0.0320	3970
H <sub>2</sub> O	0.0779	0.1312	11710
CO <sub>2</sub>	0.1472	0.2479	20140
N <sub>2</sub>	0.3498	0.5889	720
Toplam	0.594	1	

### 5.1.5. Baca Gazı Bileşenlerinin Ekserjilerinin Belirlenmesi

Bacadan atmosfere atılan baca gazı sıcaklığı 168°C'dir. Bacada baca gazını dışarıya atmaya yardımcı olan 1500 d/d devirli, 24 m<sup>3</sup>/s kapasiteli, 350 kW güçlü, 7.63 kPa statik basınçlı ve 108.955 kPa mutlak basınçlı Siemens marka bir adet aspiratör bulunmaktadır. Aspiratörün karakteristik çalışma eğrisine göre Bölüm 4'de baca gazının hacimsel debisi  $\dot{V}_{baca} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ , molar debisi ise  $\dot{n}_{baca} = 0.594 \text{ kmol/s}$  olarak bulunmuştur. Ayrıca Bölüm 4'de bulunan baca gazı bileşenlerinin molar debileri, molar oranları Çizelge 5.5'de verilmiştir. Bu değerler kullanılarak aşağıda verilen molar ekserji eşitliği kullanılarak baca gazının kimyasal ekserjisi hesaplanmıştır.

$$\bar{e}x^{kim} = \bar{R}T_o \sum y_i \ln \left( \frac{y_i}{y} \right) = \sum_i y_i \bar{e}^{kim,i} + \bar{R}T_o \sum_i y_i \ln y_i$$

Baca gazının kimyasal ekserjisi:

$$(\bar{e}x^{kim})_{baca\ gazı} = [(0.1312 \times 11710) + (0.032 \times 3970) + (0.5889 \times 720) + (0.2479 \times 20140) + 8.314 \times 298.15 \times [0.0320 \times \ln(0.0320) + 0.1312 \times \ln(0.1312) + 0.2479 \times \ln(0.2479) + 0.5889 \times \ln(0.5889)]]$$

$$(\bar{e}x^{kim})_{baca\ gazı} = 4516.53\text{ kJ/kmol}$$

Baca gazının fiziksel ekserjisi ise, aşağıda verilen molar ekserji eşitliğine göre hesaplanmıştır.

$$(\bar{e}x^{fiz})_{baca\ gazı} = \bar{C}_{p,baca\ gazı} \times \left[ (T - T_o) - T_o \ln\left(\frac{T}{T_o}\right) \right] + \bar{R}T_o \ln\left(\frac{P}{P_o}\right)$$

Eşitlikteki molar baca gazı özgül ısı kapasitesi ise Ek-3'deki tablodan her bir baca gazının molar ısı kapasitesi ile molar oranlarının çarpımından bulunmuştur. Tablodan okunan molar ısı kapasitesi değerleri:

$$\bar{C}_{p,CO_2} = 7.63\text{ kJ/kmolK}$$

$$\bar{C}_{p,H_2O} = 6.25\text{ kJ/kmolK}$$

$$\bar{C}_{p,O_2} = 5.48\text{ kJ/kmolK}$$

$$\bar{C}_{p,N_2} = 5.45\text{ kJ/kmolK}$$

Her bir bileşenin molar ısı kapasitesi ile Çizelge 5.5'den alınan molar oranları çarpımına göre baca gazı molar ısı kapasitesi:

$$\bar{C}_{p,baca\ gazı} = y_{CO_2} \times \bar{C}_{p,CO_2} + y_{H_2O} \times \bar{C}_{p,H_2O} + y_{O_2} \times \bar{C}_{p,O_2} + y_{N_2} \times \bar{C}_{p,N_2}$$

$$\bar{C}_{p,baca\ gazı} = 0.2479 \times 7.63 + 0.1312 \times 6.25 + 0.032 \times 5.48 + 0.5889 \times 5.45$$

$$\bar{C}_{p,baca\ gazı} = 6.095\text{ kJ/kmolK}$$

Baca gazının fiziksel ekserjisi:

$$(\bar{e}x^{fiz})_{baca\ gazı} = 6.095 \times \left[ (441.15 - 298.15) - 298.15 \times \ln\left(\frac{441.15}{298.15}\right) \right] \\ + 8.314 \times 298.15 \times \ln\left(\frac{108.96}{101.325}\right)$$

$$(\bar{e}x^{fiz})_{baca\ gazı} = 339.69\ kJ/kmol$$

Baca gazının toplam ekserjisi ise;

$$(\dot{E}x^{top})_{baca\ gazı} = \dot{n}_{baca\ gazı}(\bar{e}x^{kim} + \bar{e}x^{fiz})_{baca\ gazı}$$

$$(\dot{E}x^{top})_{baca\ gazı} = 0.594 (4516.53 + 339.69)$$

$$(\dot{E}x^{top})_{baca\ gazı} = 2884.59\ kW$$

olarak bulunur.

## 5.2. BUHAR KAZANININ ENERJİ VE EKSERJİ VERİMLERİNİN BELİRLENMESİ

### 5.2.1. Kazan Ekserji Kaybının (Tersinmezlik) Belirlenmesi

Kazanda meydana gelen ekserji kaybı veya tersinmezliklerin toplamı, aşağıda verilen eşitliklere göre kazana girenlerin ekserjisi ile çıkanların ekserji farkından bulunur.

$$\sum \dot{E}x^{kayıp} = \sum \dot{E}x_g - \sum \dot{E}x_ç$$

$$\sum \dot{I} = \sum \dot{E}x_g - \sum \dot{E}x_ç$$

Buna göre kazana giren ve çıkanlar için ekserji toplamı ayrı ayrı hesaplanacak olursa, besleme suyu, yakma havası ve yakıt girenler, buhar ve baca gazı ise çıkanlar olarak alınır ve aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\sum \dot{E}x_g = (\dot{E}x^{top})_{besleme\ suyu} + (\dot{E}x^{top})_{hava} + (\dot{E}x^{top})_{yakıt} \quad (5.10)$$

$$(\dot{E}x^{top})_{besleme\ suyu} = 3076.22\ kW$$

$$(\dot{E}x^{top})_{hava} = 84.56\ kW$$

$$(\dot{E}x^{top})_{yakıt} = 39186.02\ kW$$

$$\sum \dot{E}x_g = 3076.22 + 84.56 + 39186.02$$

$$\sum \dot{E}x_g = 42265.13\ kW$$

$$\sum \dot{E}x_{\zeta} = (\dot{E}x^{top})_{baca\ gazı} + (\dot{E}x^{top})_{buhar} \quad (5.11)$$

$$(\dot{E}x^{top})_{baca\ gazı} = 2884.59\ kW$$

$$(\dot{E}x^{top})_{buhar} = 18194.73\ kW$$

$$\sum \dot{E}x_{\zeta} = 2884.59 + 18194.73 = 21079.32\ kW$$

Buna göre toplam tersinmezlik veya toplam ekserji kaybı:

$$\sum \dot{I} = 42265.13 - 21079.32$$

$$\sum \dot{I} = 21185.81\ kW$$

$$\sum \dot{E}x^{kayıp} = 21185.81\ kW$$

olur.

### 5.2.2. Buhar Kazanının Ekserji Verimi

Buhar kazanının ekserji verimi aşağıdaki eşitliğe göre,

$$\Psi = 1 - \frac{\sum \dot{I}}{(\dot{E}x^{top})_{yakıt}} \quad (5.12)$$

$$\Psi = 1 - \frac{21185.81}{39186.02}$$



$$\Psi = 1 - 0.54 = 0.46$$

$$\Psi = \% 46$$

olarak bulunur.

### 5.2.3. Buhar Kazanı İyileştirme Potansiyeli

Buhar kazanının iyileştirme potansiyeli aşağıdaki eşitliğe belirlenmiştir. Buna göre,

$$\dot{I}P = (1 - \Psi)(\dot{E}x_g - \dot{E}x_c)$$

Buna göre kazanda,

$$\dot{I}P = (1 - 0.46)(42265.13 - 21079.32)$$

$$\dot{I}P = 11440.33 \text{ kW}$$

değerinde bir iyileştirme potansiyeli olduğu tespit edilmiştir. Kazandaki ekserji yıkımının kazanda kullanılan yakıtı oranı ise aşağıdaki eşitliğe belirlenmiştir.

$$y = \frac{\dot{E}x^{yıkım1}}{(\dot{E}x^{top})_{yakıt}}$$

Kazandaki ekserji yıkımı, tersinmezlikler sonucu olduğundan dolayı tersinmezliklerin toplamına eşit olacaktır. Buna göre,

$$y = \frac{21185.81}{39186.02}$$

$$y = 0.54$$

olarak bulunur.

## BÖLÜM 6

### BUHAR KAZANININ EKONOMİK ANALİZİ

Bu bölümde, buhar kazanı ekserji maliyet hesabı ve eksergoekonomik açıdan ekonomik olarak analiz edilmiştir. Ekonomik analiz, buhar kazanı için aşağıdaki kabuller dikkate alınarak yapılmıştır.

- Buhar kazanının yılda ortalama 7800 saat çalıştığı kabul edilmiştir.
- Kazanda saatte ortalama 140 ton yakıt kullanılmaktadır.
- Faiz oranı % 3 ( $r_i = 0.03$ ); yıllık düzenli artış oranı % 4 ( $r_n = 0.04$ ); geri ödeme oranı % 6 ( $i_{eff} = 0.06$ ) olarak kabul edilmiştir.
- Buhar kazanının işletme ömrü  $n=25$  yıl olarak alınmıştır.

Bu değerler kullanılarak aşağıda ekonomik analiz için gerekli parametreler sırasıyla hesaplanmıştır.

Seviyelendirilmiş fiyat düzeltme faktörü (k):

$$k = \frac{1 + r_n}{1 + i_{eff}} = \frac{(1 + 0.04)}{(1 + 0.06)} = 0.981$$

Anapara geri kazanım faktörü (CRF):

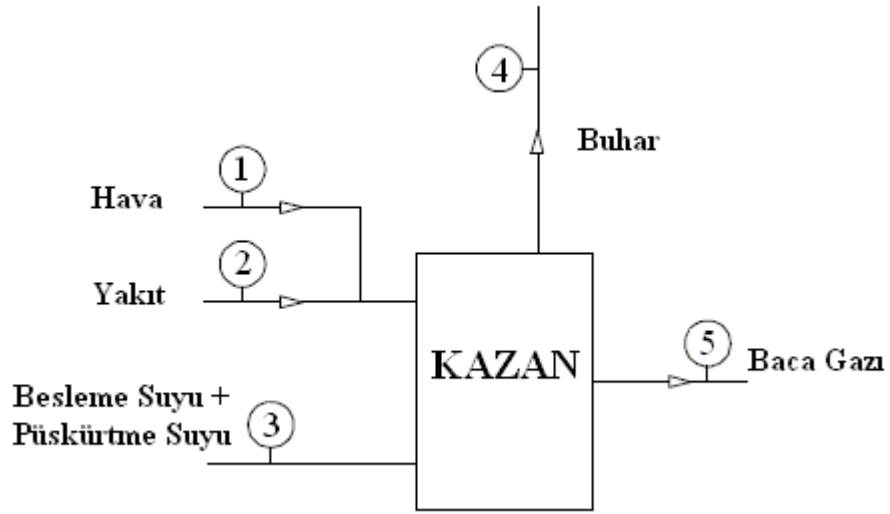
$$CRF = \frac{i_{eff}(1 + i_{eff})^n}{(1 + i_{eff})^n - 1} = \frac{0.06(1 + 0.06)^{25}}{(1 + 0.06)^{25} - 1} = 0.078$$

Yıllık düzenli artış oranı düzeltme faktörü (CELF):

$$CEL F = \frac{k(1 - k^n)}{1 - k} CRF = \frac{0.981(1 - 0.981^{25})}{1 - 0.981} 0.078 = 1.534$$

Seviyelendirme faktörü (A):

$$A = \frac{CEL F}{1 + r_i} = \frac{1.534}{1 + 0.03} = 1.489$$



Şekil 6.1. Buhar kazanı akım şeması.

Çizelge 6.1. Buhar kazanının maliyet analizi.

<b>Maliyetler</b>	<b>Buhar kazanı</b>
İlk Yatırım Maliyeti (\$)	8705056
Yıllık Vergiler, Sigorta ve Personel Masrafı (\$/yıl)	1741011
Yedek Parça Masrafı (\$/yıl)	3247412
Seviyelendirilmiş İlk Yatırım, İşletme ve Bakım Masrafları (Z) (\$/h)	1629867
Yıllık Yakıt Masrafı (\$/yıl)	0

Şekil 6.1’de buhar kazanı akım şeması, Çizelge 6.1’de ise buhar kazanının maliyet analiz değerleri verilmiştir. Çizelge 6.1’deki maliyet analizi göz önünde bulundurularak, buhar kazanının seviyelendirilmiş parasal değeri (Z) aşağıdaki gibi bulunur.

Kazanın seviyelendirilmiş parasal değeri ( $\dot{Z}$ ):

$$\dot{Z}_{kazan} = \left[ \frac{8705056}{25 \text{ yıl} \times 7800 \text{ saat}} + \frac{(1741011 + 3247412)}{7800 \text{ saat}} \right] \times 1.489$$

$$\dot{Z}_{kazan} = 1018.74 \text{ \$/h}$$

olarak bulunur.

Buhar kazanı için eksergoekonomik analiz:

Yakma havasının ve kazanda kullanılan yakıt tesisdeki demir çelik üretim prosesi sırasında elde edildiğinden dolayı ekserji maliyeti sıfırdır.

$$c_1 = 0$$

$$c_2 = 0 \text{ \$/kJ}$$

Birim besleme suyu ekserjisi maliyeti:

$$c_3 = \frac{\text{besleme suyu maliyeti}}{\text{ekserji akısı}} = \frac{14.62 \text{ \$/h}}{11074392 \text{ kJ/h}} = 1.32 \times 10^{-6} \text{ \$/kJ}$$

Baca gazının birim ekserjisinin maliyeti yakıtın birim ekserjisinin maliyetine eşittir.

$$c_2 = c_5 = 0 \text{ \$/kJ}$$

Kazana giren besleme suyu ve çıkan buhar hattı ürün olduğundan bu iki akımın birim ekserjisinin maliyeti birbirine eşittir.

$$c_3 = c_4 = 1.32 \times 10^{-6} \text{ \$/kJ}$$

Buhar kazanına, yakıt, besleme suyu ve yakma havası giren akım, buhar ve baca gazı çıkan akımlardır. Buna göre, buhar kazanı için ekserji maliyet denklemi yazıldığında aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$c_1\dot{E}_1 + c_2\dot{E}_2 + c_3\dot{E}_3 + \dot{Z}_{kazan} = c_4\dot{E}_4 + c_5\dot{E}_5$$

$$(0 \text{ \$/kJ} \times 163368 \text{ kJ/h}) + (0 \text{ \$/kJ} \times 158134392 \text{ kJ/h}) + (1,28 \cdot 10^{-6} \text{ \$/kJ} \times 11348496 \text{ kJ/h}) + 1018.74 \text{ \$/h} = (1,28 \cdot 10^{-6} \text{ \$/kJ} \times 65559600 \text{ kJ/h}) + (c_5 \times 11320560 \text{ kJ/h})$$

$$c_5 = 9.11 \times 10^{-5} \text{ \$/kJ}$$

Buhar kazanı kayıp ekserji maliyeti:

$$c_{kayıp} = c_2 \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_2 + \dot{E}_3} + c_3 \frac{\dot{E}_3}{\dot{E}_2 + \dot{E}_3}$$

$$c_{kayıp} = 0 \text{ \$/kJ} \times \frac{140775660 \text{ kJ/h}}{140775660 + 11074392 \text{ kJ/h}} + 1.28 \times 10^{-6} \text{ \$/kJ} \times \frac{11074392 \text{ kJ/h}}{140775660 + 11074392 \text{ kJ/h}}$$

$$c_{kayıp} = 9.62 \times 10^{-8} \text{ \$/kJ}$$

$$\dot{C}_{kayıp} = c_{kayıp} \times \dot{E}^{kayıp} = 9.62 \times 10^{-8} \text{ \$/kJ} \times 76268916 \text{ kJ/h}$$

$$\dot{C}_{kayıp} = 7.33 \text{ \$/h}$$

olarak bulunur.

Eksergoekonomik faktör:

$$f = \frac{\dot{Z}_{kazan}}{\dot{Z}_{kazan} + \dot{C}_{kayıp}}$$

$$f = \frac{1018.74 \$/h}{(1018.74 + 7.33)\$/h}$$

$$f = 0.992$$

olarak bulunur.

Yakıt olarak doğalgaz kullanılması durumunda buhar kazanı için eksergoekonomik analiz:

Buhar kazanında yakıt olarak doğalgaz kullanılmış olsaydı kazanda üretilen buharın ekonomik analizinin nasıl değiştiğini görebilmek için yeni bir ekonomik analiz yapılmıştır. Yukarıda yapılan ekonomik analizde sadece  $c_2$  değeri değişecek olup, diğer değerler aynı olacağından dolayı aşağıda sadece  $c_2$  değeri hesaplanmıştır.

Doğalgazın şebekeden alış fiyatı= 0.5385 \$/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır. Buna göre yıllık doğal gaz maliyeti 2789655 m<sup>3</sup>/yıl eşit olur.

Doğalgaz için birim yakıt ekserjisi maliyeti:

$$c_3 = \frac{\text{besleme suyu maliyeti}}{\text{ekserji akısı}} = \frac{288.67 \$/h}{76268916 \text{ kJ/h}} = 3.78 \times 10^{-6} \$/\text{kJ}$$

Buhar kazanı için ekserji maliyet denklemi tekrar yazılırsa,

$$c_1\dot{E}_1 + c_2\dot{E}_2 + c_3\dot{E}_3 + \dot{Z}_{kazan} = c_4\dot{E}_4 + c_5\dot{E}_5$$

$$(0\$/\text{kJ} \times 304416 \text{ kJ/h}) + (3,78 \cdot 10^{-6} \$/\text{kJ} \times 140775660 \text{ kJ/h}) + (1,32 \cdot 10^{-6} \$/\text{kJ} \times 11074392 \text{ kJ/h}) + 1018.74 \$/h = (1,32 \cdot 10^{-6} \$/\text{kJ} \times 65501028 \text{ kJ/h}) + (c_5 \times 10384524 \text{ kJ/h})$$

$$c_5 = 1.42 \times 10^{-4} \$/\text{kJ}$$

olarak bulunur.

Buhar kazanı kayıp ekserji maliyeti:

$$c_{kayıp} = c_2 \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_2 + \dot{E}_3} + c_3 \frac{\dot{E}_3}{\dot{E}_2 + \dot{E}_3}$$

$$c_{kayıp} = 3.78 \times 10^{-6} \$/kJ \times \frac{140775660 \text{ kJ/h}}{140775660 + 11074392 \text{ kJ/h}} + 1.32 \times 10^{-6} \$/kJ \times \frac{11074392 \text{ kJ/h}}{140775660 + 11074392 \text{ kJ/h}}$$

$$c_{kayıp} = 3.6 \times 10^{-6} \$/kJ$$

$$\dot{C}_{kayıp} = c_{kayıp} \times \dot{E}^{kayıp} = 3.6 \times 10^{-6} \$/kJ \times 76268916 \text{ kJ/h}$$

$$\dot{C}_{kayıp} = 274.56 \$/h$$

olarak bulunur.

Eksergoekonomik faktör:

$$f = \frac{\dot{Z}_{kazan}}{\dot{Z}_{kazan} + \dot{C}_{ksyıp}}$$

$$f = \frac{1018.74 \$/h}{(1018.74 + 274.56) \$/h}$$

$$f = 0.787$$

olarak bulunur.

Yakıt olarak kömür kullanılması durumunda buhar kazanı için eksergoekonomik analiz:

Doğalgazda olduğu gibi buhar kazanında yakıt olarak kömür kullanılması durumunda kazanda üretilen buharın ekserjisi maliyeti:

$$c_3 = \frac{\text{besleme suyu maliyeti}}{\text{ekserji akısı}} = \frac{1960 \$/h}{76268916 \text{ kJ/h}} = 2.57 \times 10^{-5} \$/kJ$$

Maliyet denge denklemi:

$$c_1\dot{E}_1 + c_2\dot{E}_2 + c_3\dot{E}_3 + \dot{Z}_{kazan} = c_4\dot{E}_4 + c_5\dot{E}_5$$

$$(0 \$/kJ \times 304416 \text{ kJ/h}) + (2,57 \cdot 10^{-5} \$/kJ \times 140775660 \text{ kJ/h}) + (1,32 \cdot 10^{-6} \$/kJ \times 11074392 \text{ kJ/h}) + 1018.74 \$/h = (1,32 \cdot 10^{-6} \$/kJ \times 65501028 \text{ kJ/h}) + (c_5 \times 10384524 \text{ kJ/h})$$

$$c_5 = 4.39 \times 10^{-4} \$/kJ$$

Buhar kazanı kayıp ekserji maliyeti:

$$c_{kayıp} = c_2 \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_2 + \dot{E}_3} + c_3 \frac{\dot{E}_3}{\dot{E}_2 + \dot{E}_3}$$

$$c_{kayıp} = 2.57 \times 10^{-5} \$/kJ \times \frac{140775660 \text{ kJ/h}}{140775660 + 11074392 \text{ kJ/h}} + 1.32 \times 10^{-6} \$/kJ \times \frac{11074392 \text{ kJ/h}}{140775660 + 11074392 \text{ kJ/h}}$$

$$c_{kayıp} = 2.39 \times 10^{-5} \$/kJ$$

$$\dot{C}_{kayıp} = c_{kayıp} \times \dot{E}^{kayıp} = 2.39 \times 10^{-5} \$/kJ \times 76268916 \text{ kJ/h}$$

$$\dot{C}_{kayıp} = 1822.82 \$/h$$

olarak bulunur.



Eksergoekonomik faktör:

$$f = \frac{\dot{Z}_{kazan}}{\dot{Z}_{kazan} + \dot{C}_{kayıp}} = \frac{1018.74 \text{ \$/h}}{(1018.74 + 1822.82)\text{\$/h}} = 0.358$$

olarak bulunur.

## BÖLÜM 7

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Kardemir A.Ş.'de bulunan, yakıt olarak demir çelik üretimi sırasında açığa çıkan atık gazlardan kok gazı, konverter gazı ve yüksek fırın gazının yakıldığı gaz yakıtlı bir buhar kazanında enerji ve ekserji analizi yapılarak kazanın performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca buhar kazanı, ekserji maliyet hesabı ve eksergoekonomik açıdan ekonomik olarak analiz edilmiştir. Kazan açık sistem olarak tek bir ünite halinde ele alınmış ve buna göre enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Kazanın enerji ve ekserji analizi sonucunda, enerji veriminin % 91, ekserji veriminin ise % 46 olduğu bulunmuştur. Enerji kaybının 6445.5 kW, ekserji kaybının (yıkımının) ise 21185.81 kW olduğu belirlenmiştir. Kazanın 11440.33 kW'lık iyileştirme potansiyeline sahip olduğu, kazandaki ekserji yıkımının kazanda kullanılan yakıt oranının ise 0.54 olduğu tespit edilmiştir. Kazanda üretilen buharın ekserji maliyeti 7.33 \$/h, eksergoekonomik faktörü ise 0.992 olarak bulunmuştur.

Ayrıca kazanda yakıt olarak kok gazı, yüksek fırın gazı ve konverter gazı yerine doğal gaz ve kömür kullanılması durumunda kazanda üretilen buharın ekserji maliyeti belirlenmiştir. Yakıt olarak doğal gaz ve kömür kullanılması durumunda ekserji maliyeti ve eksergoekonomik faktör sırasıyla, 274.56 \$/h, 0.787; 1822.82 \$/h, 0.358 olarak bulunmuştur. Kazanda kullanılan yakıtın ekserji maliyeti, tesiste demir çelik demir çelik üretimi sırasında açığa çıkan atık gazlar olduğundan dolayı buharın ekserji maliyeti doğal gaz kullanılmasına göre 35, kömüre göre 250 kat daha düşük olmuştur.

Analizlerden elde edilen sonuçlara göre, kazanda meydana gelen enerji ve ekserji kaybını azaltabilmek için yapılabilecek iyileştirmeler olduğu gözükmektedir. Ekserji kaybının yüksek olmasının sebebi, yanma olayındaki kimyasal enerji, ısı enerjisi ve iç enerji gibi düzensizliklerin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Enerji ve ekserji

kayıplarının azaltılması için ısı geçişine engel olan boru iç ve dış yüzeyindeki tabakaların oluşması engellenerek kazanda iyileştirmeler yapılabilir. Aksi takdirde yakıt yakılarak elde edilen ısı enerjisi baca gazı ile birlikte atmosfere atılacaktır. Kazan borularının iç yüzeyinde oluşan tabakalar, kazan besleme suyunun kalitesinin düşük olmasından kaynaklanabilir. Boru dış yüzeyinde oluşan tabakalar ise yakıtın yanması sonucunda oluşan partiküllerin yüzeye yapışmasıyla oluşabilir. Bu tabakaların oluşması engellenip, kazan dış yüzeyinde ısı kaybına maruz yüzeyler ısı kaybına karşı izolasyon yapıldığı takdirde, kazanın enerji ve ekserji verimleri artacaktır.

## KAYNAKLAR

- Aljundi Isam H., “Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan”, *Chemical Engineering Department, Mutah University, Al-Karak, Jordan*, 29: 324-328 (2009).
- Bidini, G. and Stecco, S. S., “A computer code using exergy for optimizing thermal plants”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power - Transactions of the ASME*, 113 (1): 145-150 (1991).
- Bodvarsson, G. and Eggers, D.E., “The exergy of thermal water”, *Geothermics*, 1: 93-95 (1972).
- Chejne, F. and Restrepo, J. A. “New rules for the exergo-economic optimization methodology”, *Energy*, 28: 993-1003 (2003).
- Çamdalı, Ü., Erişen, A. and Çelen, F., “Energy and exergy analyses in a rotary burner with pre-calcinations in cement production”, *Energy Conversion and Management*, 45: 3017-3031 (2004).
- Çengel, Y. A. and Boles, M. A. “Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik”, Derbentli, T., *McGraw-Hill - Literatür Yayıncılık*, İstanbul, 369-791 (1996).
- Çengel, Y. A., Wood, B. and Dincer, I. “Is bigger thermodynamically better?”, *Exergy, an International Journal*, 2: 62-68 (2002).
- Doldersum, A., “Exergy analysis proves viability of process modifications”, *Energy Conversion and Management*, 39 (16-18): 1781-1789 (1998).
- Dragan M., Uzuneanu K., Panait T. and Gelu C., “Thermal systems and environmental engineering department”, ‘Dunarea de Jos’ *University of Galati*, Domneasca Street, Galati, Romania, 263-266 (2009).
- Ertesvag, I.S., “Energy, exergy, and extended-exergy analysis of the Norwegian society 2000”, *Energy, an International Journal*, Department of energy and process engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 30 (5): 649-675 (2005).
- Gaggioli, R. A., Sama, D. A., Qian, Sonhang and El-Sayed, Y. M., “Integration of a new process into an existing site. A case study in the application exergy analysis”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME*, 113 (2): 170-183 (1991).

Geredelioglu Ç., “Çayırhan termik santralının enerji ve ekserji analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi*, Isparta, 49-51 (2011).

Guarinello Jr, F. F., Cerqueira, S. A. A. G. and Nebra, S. A., “Thermoeconomic evaluation of a gas turbine cogeneration system” *Energy Conversion and Management, State University of Campinas*, Brazil, 41: 1191-1200 (2000).

Habib M. A., Said , S. A. M. and Al Zaharana, I., “Thermodynamic optimization of reheat regenerative thermal-power plants”, *Applied Energy*, 63: 17-34 (1999).

Heper, Y., “Buhar santralleri teorisi ve uygulaması”, *ODTÜ Yayınları*, Ankara, 33-114 (2001).

İnternet: İgdaş, “Kazanlar” <http://www.igdas.com.tr/docs/pdf/kazanlar.pdf> (2011).

Jiang Y. Y. and Zhou S. X., “Exergy analysis of boiler based on the temperature gradient”, *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China, Asia-Pacific, 1-4 (2010).

Kopaç, M. and Zemher B., “Exergy analysis of the steam-injected gas turbine”, *International Journal of Exergy*, 1 (3): 363-374 (2004).

Kotas T, “The exergy method of thermal plant analysis”, *Krieger Publishing Company*, Florida, 32-45 (1995).

Pak, P. S., Suzuki, Y., “Exergetic evaluation of gas turbine cogeneration systems for district heating and cooling”, *International Journal of Energy Research*, 21: 209-220 (1997).

Regulagadda, P., Dincer, I. and Naterer, G.F., “Exergy analysis of a thermal power plant with measured boiler and turbine losses”, *Applied Thermal Engineering*, 30 (8-9): 970-976 (2010).

Rosen, M. A., “Comparison based on energy and exergy analysis of the potential cogeneration efficiencies for fuel-cells and other electricity generation devices”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 15 (4): 267-274 (1990).

Saidur R., Ahamed J.U. and Masjuki H.H., “Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers”, *Department of Mechanical Engineering, University of Malaya*, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia, 38: 2188-2197 (2010).

Şahin Z., “Gaz-katı yakıtlı enerji santralının ekserji verim artışının araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 5-14 (2006).

Tsatsaronis, G., “Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 19 (3): 227-257 (1993).

Ünal F., “Bir termik santralin ekserji analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-9 (2009).

Wall G., “Exergy-a useful concept, physical resource theory group”, *PhD. Chalmers University of Technology*, Göteborg, Sweden, 26-34 (1986).

## ÖZGEÇMİŞ

Çağdaş FİLİZ 1983 yılında Karabük'te doğdu. İlköğrenimini ve liseyi Karabük'te tamamladı. 75. Yıl Karabük Anadolu Lisesi'nden 2001 yılında mezun oldu. Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2006 yılında öğrenimini tamamladı. 2007 yılında askerliğini asteğmen olarak yaptıktan sonra değişik iş alanlarında kısa süreli çalıştı. Son olarak 2011 yılında Kilis 7 Aralık Üniversitesi'nde öğretim görevlisi olarak göreve başlamıştır. Halen bu görevinde devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres: Mehmet Sanlı Mahallesi  
Av. Sait Daldaban Sokak  
Toki DG/5B Blok No: 10  
79000 merkez/KİLİS

Tel: (542) 577 58 48

E- posta: cfiliz@kilis.edu.tr

**EK AÇIKLAMALAR A.  
BAZI GAZLARIN ÖZELLİKLERİ**



Çizelge EK A.1. Bazı gazların entalpisi için ortalama izobarik özgül ısı kapasitesi.

K	°C	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Hava	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
273.15	0	29.04	25.31	29.01	28.69	29.1	36.29	35.02	39.42	49.67	32.77
298.15	25	29.11	26.07	29.07	28.73	29.1	37.1	35.71	39.89	50.77	32.92
323.15	50	29.18	26.83	29.12	28.77	29.2	37.9	36.39	40.35	51.86	33.06
349.15	75	29.25	27.43	29.18	28.81	29.3	38.61	37.08	40.81	52.91	33.21
373.15	100	29.32	27.95	29.23	28.85	29.3	39.27	37.76	41.24	53.92	33.35
398.15	125	29.39	28.41	29.29	28.9	29.4	39.88	38.45	41.67	54.9	33.5
423.15	150	29.46	28.81	29.35	28.94	29.4	40.46	39.14	42.08	55.85	33.64
448.15	175	29.53	29.17	29.41	28.98	29.5	41	39.83	42.49	56.77	33.79
473.15	200	29.59	29.5	29.47	29.02	29.6	41.52	40.52	42.88	57.65	33.93
498.15	225	29.66	29.79	29.53	29.07	29.6	42	41.2	43.26	58.51	34.07
523.15	250	29.73	30.06	29.6	29.11	29.7	42.46	41.89	43.63	59.34	34.22
548.15	275	29.8	30.3	29.66	29.15	29.8	42.89	42.58	43.98	60.15	34.36
573.15	300	29.86	30.52	29.73	29.19	26.8	43.31	43.26	44.33	60.92	34.5
598.15	325	29.93	30.73	29.79	29.24	29.9	43.7	43.94	44.67	61.67	34.64
623.15	350	30	30.92	29.86	29.28	30	44.08	44.62	44.99	62.39	34.78
648.15	375	30.06	31.09	29.92	29.32	30	44.44	45.3	45.31	63.09	34.92
673.15	400	30.13	31.26	29.99	29.36	30.1	44.79	45.98	45.62	63.77	35.06
698.15	425	30.19	31.41	30.06	29.41	30.1	45.12	46.65	45.91	64.42	35.19
723.15	450	30.26	31.56	30.13	29.45	30.2	45.44	47.32	46.2	65.05	35.33
748.15	475	30.32	31.69	30.2	29.49	30.3	45.75	47.99	46.48	65.66	35.47
773.15	500	30.38	31.82	30.27	29.53	30.3	46.04	48.65	46.75	66.25	35.6
798.15	525	30.45	31.94	30.34	29.58	30.4	46.33	49.31	47.01	66.81	35.74
823.15	550	30.51	32.05	30.41	29.62	30.5	46.61	49.97	47.26	67.36	35.87
848.15	575	30.57	32.16	30.48	29.66	30.5	46.87	50.62	47.5	67.89	36.01
873.15	600	30.63	32.26	30.55	29.7	30.6	47.13	51.26	47.74	68.4	36.14
898.15	625	30.69	32.36	30.62	29.74	30.6	47.38	51.91	47.97	68.89	36.28
923.15	650	30.75	32.45	30.69	29.79	30.7	47.62	52.54	48.19	69.37	36.41
948.15	675	30.82	32.54	30.76	29.83	30.8	47.85	53.18	48.4	69.83	36.54
973.15	700	30.88	32.63	30.83	29.87	30.8	48.08	53.8	48.6	70.28	36.67
998.15	725	30.94	32.71	30.9	29.91	30.9	48.3	54.42	48.8	70.71	36.8
1023.15	750	31	32.79	30.97	29.96	31	48.51	55.04	48.99	71.13	36.93
1048.15	775	31.05	32.86	31.05	30	31	48.72	55.65	49.17	71.54	37.06
1073.15	800	31.11	32.93	31.12	30.04	31.1	48.92	56.25	49.35	71.93	37.19
1098.15	825	31.17	33	31.19	30.08	31.1	49.12	56.84	49.52	72.32	37.32
1123.15	850	31.23	33.07	31.26	30.13	31.2	49.31	57.43	49.68	72.69	37.45
1148.15	875	31.29	33.14	31.33	30.17	31.3	49.5	58.01	49.84	73.06	37.57
1173.15	900	31.34	33.2	31.4	30.21	31.3	49.68	58.58	49.99	73.41	37.7
1198.15	925	31.4	33.26	31.47	30.25	31.4	49.86	59.15	50.14	73.76	27.83
1223.15	950	31.46	33.32	31.54	30.3	31.5	50.03	59.71	50.28	74.1	37.95
1248.15	975	31.51	33.37	31.61	30.34	31.5	50.2	60.25	50.41	74.43	38.08
1273.15	1000	31.57	33.43	31.68	30.38	31.6	50.37	60.79	50.55	74.76	38.2
1298.15	1025	31.62	33.48	31.74	30.42	31.6	50.53	61.33	50.67	75.09	38.33
1323.15	1050	31.68	33.53	31.81	30.47	31.7	50.68	61.85	50.79		38.45
1348.15	1075	31.73	33.58	31.88	30.51	31.8	50.84	62.36	50.91		38.57
1373.15	1100	31.79	33.63	31.94	30.55	31.8	50.99	62.86	51.02		38.69

Çizelge EK A.1. (devam ediyor).

1398.15	1125	31.84	33.68	32.01	30.59	31.9	51.14	63.36	51.13		38.81
1423.15	1150	31.89	33.73	32.07	30.63	32	51.28	63.84	51.24		38.93
1448.15	1175	31.95	33.77	32.14	30.68	32	51.42	64.31	51.34		39.05
1473.15	1200	32	33.82	32.2	30.72	32.1	51.56	64.77	51.44		39.17
1498.15	1225	32.05	33.86	32.26	30.76	32.2	51.7	65.22	51.53		39.29
1523.15	1250	32.1	33.9	32.32	30.8	32.2	51.83		51.62		39.41
1548.15	1275	32.15	33.94	32.38	30.85	32.3	51.96		51.71		39.53
1573.15	1300	32.2	33.99	32.44	30.89	32.3	52.09		51.8		39.64
1598.15	1325	32.25	34.02	32.5	30.93	32.4	52.21		51.88		39.8
1623.15	1350	32.3	34.06	32.56	30.97	32.5	52.33		51.96		39.88
1648.15	1375	32.35	34.1	32.61	31.02	32.5	52.45		52.04		39.99
1673.15	1400	32.4	34.14	32.67	31.06	32.6	52.57		52.12		40.11
1698.15	1425	32.45	34.18	32.72	31.1	32.7	52.69		52.2		40.22
1723.15	1450	32.5	34.21	32.77	31.14	32.7	52.8		52.28		40.33
1748.15	1475	32.55	34.25	32.82	31.19	32.8	52.92		52.35		40.45
1773.15	1500	32.6	34.28	32.87	31.23	32.8	53.03		52.42		40.56
1798.15	1525	32.64	34.32	32.92	31.27	32.9	53.13		52.49		40.67
1823.15	1550	32.69	34.35		31.31	33	53.24		52.57		40.78
1848.15	1575	32.74	34.38		31.35	33	53.34		52.64		40.89
1873.15	1600	32.78	34.42		31.4	33.1	53.45		52.71		41
1898.15	1625	32.83	34.45		31.44	33.2	53.55		52.78		41.11
1923.15	1650	32.87	34.48		31.48	33.2	53.65		52.85		41.22
1948.15	1675	32.92	34.51		31.52	33.3	53.75		52.92		41.33
1973.15	1700	32.96	34.54		31.57	33.3	53.84		53		41.43
1998.15	1725	33.01	34.57		31.61	33.4	53.94		53.07		41.54
2023.15	1750	33.05	34.6		31.65	33.5	54.03		53.15		41.65
2048.15	1775	33.09	34.63		31.69	33.5	54.12		53.22		41.75
2073.15	1800	33.14	34.66		31.74	33.6	54.21		53.3		41.86
2098.15	1825	33.18	34.69		31.78	33.7	54.3		53.38		41.96
2123.15	1850	33.22	34.72		31.82	33.7	54.39		53.46		42.06
2148.15	1875	33.26	34.74		31.86	33.8	54.48		53.54		42.17
2173.15	1900	33.3	34.77		31.91	33.8	54.56		53.63		42.27
2198.15	1925	33.34	34.8		31.95	33.9	54.65		53.71		42.37
2223.15	1950	33.39	34.83		31.99	34	54.73		53.8		42.47
2248.15	1975	33.43	34.85		32.03	34	54.81		53.9		42.57
2273.15	2000	33.46	34.88		32.08	34.1	54.89		53.99		42.67
2298.15	2025	33.5	34.91		32.12	34.2	54.97		54.09		42.77

Çizelge EK A.2. Bazı gazların entropisi için ortalama izobarik ısı kapasitesi.

K	°C	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Hava	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
273.15	0	29.4	25.3	29	28.7	29.1	36.3	35	39.4	49.7	32.81
298.15	25	29.1	26.1	29.1	28.7	29.1	37.1	35.7	39.9	50.8	32.97
323.15	50	29.2	26.8	29.1	28.8	29.2	37.9	36.4	40.4	51.9	33.12
348.15	75	29.3	27.4	29.2	28.8	29.3	38.6	37	40.8	52.9	33.26
373.15	100	29.3	27.9	29.2	28.9	29.3	39.2	37.7	41.2	53.8	33.41
398.15	125	29.4	28.3	29.3	28.9	29.4	39.8	38.3	41.6	54.7	33.54
423.15	150	29.4	29.7	29.3	28.9	29.4	40.3	38.9	42	55.6	33.68
448.15	175	29.5	29	29.4	29	29.5	40.8	39.6	42.3	56.4	33.81
473.15	200	29.6	29.3	29.4	29	29.5	41.2	40.2	42.7	57.2	33.94
498.15	225	29.6	29.5	29.5	29	29.6	41.6	40.7	43	57.9	34.07
523.15	250	29.7	29.8	29.6	29.1	29.6	42	41.3	43.3	58.6	34.2
548.15	275	29.7	30	29.6	29.1	29.7	42.4	41.9	43.6	59.3	34.32
573.15	300	29.8	30.2	29.7	29.1	29.8	42.7	42.4	43.9	59.9	34.44
598.15	325	29.8	30.3	29.7	29.2	29.8	43.1	43	44.2	60.5	34.56
623.15	350	29.9	30.5	29.8	29.2	29.9	43.4	43.5	44.4	61.1	34.68
648.15	375	29.9	30.7	29.8	29.2	29.9	43.7	44.1	44.7	61.7	34.8
673.15	400	30	30.8	29.9	29.3	30	43.9	44.6	44.9	62.2	34.91
698.15	425	30	30.9	29.9	29.3	30	44.2	45.1	45.2	62.7	35.02
723.15	450	30.1	31	30	29.3	30	44.5	45.6	45.4	63.2	35.14
748.15	475	30.1	31.1	30	29.4	30.1	44.7	46.1	45.6	63.7	35.25
773.15	500	30.2	31.2	30.1	29.4	30.1	44.9	46.6	45.8	64.1	35.36
798.15	525	30.2	31.3	30.1	29.4	30.2	45.2	47.1	46	64.6	35.46
823.15	550	30.3	31.4	30.2	29.5	30.2	45.4	47.6	46.2	65	35.57
848.15	575	30.3	31.5	30.2	29.5	30.3	45.6	48.1	46.4	65.4	35.68
873.15	600	30.4	31.6	30.3	29.5	30.3	45.8	43.6	46.6	65.8	35.78
898.15	625	30.4	31.7	30.3	29.6	30.4	46	49	46.7	66.2	35.88
923.15	650	30.5	31.7	30.4	26.6	30.4	46.1	49.5	46.9	66.5	35.99
948.15	675	30.5	31.8	30.4	29.6	30.5	46.3	49.9	47	66.9	36.09
973.15	700	30.6	31.9	30.5	29.7	30.5	46.5	50.4	47.2	67.2	39.19
998.15	725	30.6	31.9	30.5	29.7	30.5	46.6	50.8	47.3	97.5	36.29
1023.15	750	30.6	32	30.6	29.7	30.6	46.8	51.2	47.5	67.8	36.39
1048.15	775	30.7	32.1	30.6	29.7	30.6	47	51.7	47.6	68.1	36.49
1073.15	800	30.7	32.1	30.7	29.8	30.7	47.1	52.1	47.7	68.4	36.58
1098.15	825	30.8	32.2	30.7	29.8	30.7	47.2	52.5	47.9	68.7	36.68
1123.15	850	30.8	32.2	30.8	29.8	30.8	47.4	52.9	48	68.9	36.77
1148.15	875	30.8	32.3	30.8	29.9	30.8	47.5	53.3	48.1	69.2	36.87
1173.15	900	30.9	32.3	30.9	28.9	30.8	47.6	53.7	48.2	69.5	36.96
1198.15	925	30.9	32.4	30.9	29.9	30.9	47.8	54.1	48.3	69.7	37.06
1223.15	950	30.9	32.4	31	29.9	30.9	47.9	54.4	48.4	70	37.15
1248.15	975	31	32.5	31	30	31	48	54.8	48.5	70.2	37.24
1273.15	1000	31	32.5	31	30	31	48.1	55.2	48.6	70.4	37.33
1298.15	1025	31.1	32.5	31.1	30	31.1	48.3	55.5	48.7	70.7	37.42
1323.15	1050	31.1	32.6	31.1	30.1	31.1	48.4	55.9	48.8		37.51
1348.15	1075	31.1	32.6	31.2	30.1	31.1	48.5	56.2	48.9		37.6
1373.15	1100	31.2	32.7	31.2	30.1	31.2	48.6	56.6	49		37.69

Çizelge EK A.2. (devam ediyor).

1398.15	1125	31.2	32.7	31.3	30.1	31.2	48.7	56.9	49		37.78
1423.15	1150	31.2	32.7	31.3	30.2	31.3	48.8	57.2	49.1		37.86
1448.15	1175	31.3	32.8	31.3	30.2	31.3	48.9	57.5	49.2		37.95
1473.15	1200	31.3	32.8	31.4	30.2	31.3	49	57.8	49.3		38.04
1498.15	1225	31.3	32.8	31.4	30.2	31.4	49.1	58.1	49.3		38.12
1523.15	1250	31.4	32.9	31.5	30.3	31.4	49.2		49.4		38.21
1548.15	1275	31.4	32.9	31.5	30.3	31.5	49.3		49.5		38.29
1573.15	1300	31.4	32.9	31.5	30.3	31.5	49.3		49.5		38.38
1598.15	1325	31.5	33	31.6	30.3	31.5	49.4		49.6		38.46
1623.15	1350	31.5	33	31.6	30.4	31.6	49.5		49.7		38.54
1648.15	1375	31.5	33	31.6	30.4	31.6	49.6		49.7		38.63
1673.15	1400	31.6	33	31.7	30.4	31.6	49.7		49.8		38.71
1698.15	1425	31.6	33.1	31.7	30.5	31.7	49.8		49.8		38.79
1723.15	1450	31.6	33.1	31.4	30.5	31.7	49.8		49.9		38.87
1748.15	1475	31.7	33.1	31.8	30.5	31.8	49.9		49.9		38.95
1773.15	1500	31.7	33.1	31.8	30.5	31.8	50		50		39.03
1798.15	1525	31.7	33.2	31.8	30.6	31.8	50.1		50.1		39.11
1823.15	1550	31.7	33.2		30.6	31.9	50.1		50.1		39.19
1848.15	1575	31.8	33.2		30.6	31.9	50.2		50.2		39.27
1873.15	1600	31.8	33.2		30.6	31.9	50.3		50.2		39.34
1898.15	1625	31.8	33.3		30.7	32	50.4		50.3		39.42
1923.15	1650	31.9	33.3		30.7	32	50.4		50.3		39.5
1948.15	1675	31.9	33.3		30.7	32.1	50.5		50.4		39.58
1973.18	1700	31.9	33.3		30.7	32.1	50.6		50.4		39.65
1998.15	1725	31.9	33.3		30.8	32.1	50.6		50.5		39.73
2023.15	1750	32	33.4		30.8	32.2	50.7		50.5		39.8
2048.15	1775	32	33.4		30.8	32.2	50.7		50.6		39.88
2073.15	1700	32	33.4		30.8	32.2	50.8		50.6		39.95
2098.15	1825	32	33.4		30.8	32.3	50.9		50.7		40.03
2123.15	1850	32.1	33.5		30.9	32.3	50.9		50.7		40.1
2148.15	1875	32.1	33.5		30.9	32.3	51		50.8		40.18
2173.15	1900	32.1	33.5		30.9	32.4	51		50.8		40.25
2198.15	1925	32.1	33.5		30.9	32.4	51.1		50.9		40.32
2223.15	1950	32.2	33.5		31	32.5	51.2		50.9		40.4
2248.15	1975	32.2	33.5		31	32.5	51.2		51		40.47
2273.15	2000	32.2	33.6		31	32.5	51.3		51		40.54
2298.15	2025	32.2	33.6		31	32.6	51.3		51.1		40.61

Çizelge EK A.3. Bazı gazların ortalama izobarik ekserji kapasitesi.

K	°C	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Hava	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
273.15	0	-1.29	-1.11	-1.29	-1.27	-1.29	-1.6	-1.55	-1.74	-2.19	-1.51
298.15	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
323.15	50	1.16	1.07	1.16	1.14	1.16	1.52	1.45	1.61	2.07	1.26
348.15	75	2.21	2.1	2.21	2.18	2.21	2.95	2.83	3.1	4.05	2.45
373.15	100	3.17	3.07	3.16	3.12	3.17	4.31	4.15	4.5	5.93	3.55
398.15	125	4.06	3.99	4.04	3.98	4.06	5.6	5.41	5.81	7.72	4.57
423.15	150	4.87	4.86	4.85	4.78	4.87	6.82	6.62	7.04	9.45	5.52
448.15	175	5.63	5.68	5.61	5.52	5.63	7.98	7.79	8.21	11.1	6.4
473.15	200	6.34	6.45	6.31	6.21	6.33	9.09	8.93	9.31	12.69	7.22
498.15	225	7	7.18	6.97	6.85	6.99	10.14	10.03	10.36	14.21	8
523.15	250	7.62	7.87	7.58	7.45	7.61	11.15	11.11	11.37	15.68	8.74
548.15	275	8.21	8.52	8.17	8.01	8.19	12.11	12.16	12.32	17.1	9.43
573.15	300	8.76	9.14	8.72	8.54	8.74	13.03	13.19	13.24	18.47	10.09
598.15	325	9.28	9.73	9.24	9.05	9.27	13.91	14.19	14.11	19.79	10.72
623.15	350	9.78	10.29	9.73	9.52	9.76	14.75	15.18	14.95	21.07	11.32
648.15	375	10.26	10.82	10.21	9.98	10.23	15.36	16.15	15.76	22.3	11.9
673.15	400	10.71	11.33	10.66	10.41	10.68	16.34	17.1	16.53	23.49	12.45
698.15	425	11.14	11.81	11.09	10.82	11.11	17.09	18.03	17.28	24.64	12.98
723.15	450	11.55	12.27	11.5	11.21	11.52	17.81	18.95	18	25.76	13.49
748.15	475	11.95	12.71	11.9	11.58	11.92	18.5	19.86	18.69	26.84	13.98
773.15	500	12.33	13.13	12.28	11.94	12.3	19.17	20.75	19.36	27.88	14.46
798.15	525	12.69	13.54	12.65	12.29	12.66	19.82	21.64	20	28.9	14.92
823.15	550	13.04	13.93	13	12.62	13.02	20.45	22.5	20.62	29.88	15.36
848.15	575	13.38	14.3	13.35	12.94	13.35	21.05	23.36	21.22	30.83	15.79
873.15	600	13.71	14.66	13.68	13.25	13.68	21.63	24.21	21.8	31.75	16.21
898.15	625	14.03	15.01	14	13.55	14	22.2	25.04	22.37	32.65	16.61
923.15	650	14.33	15.34	14.31	13.83	14.3	22.75	25.86	22.91	33.52	17.01
948.15	675	14.63	15.66	14.61	14.11	14.6	23.28	26.86	23.43	34.36	17.39
973.15	700	14.92	15.97	14.91	14.38	14.89	23.8	27.48	23.94	35.13	17.76
998.15	725	15.19	16.27	15.19	14.64	15.17	24.3	28.27	24.44	35.97	18.13
1023.15	750	15.46	16.56	15.47	14.89	15.44	24.79	29.05	24.91	36.75	18.48
1048.15	775	15.73	16.84	15.74	15.14	15.71	25.26	29.82	25.38	37.5	18.83
1073.15	800	15.98	17.11	16	15.37	15.96	25.72	30.59	25.82	38.24	19.17
1098.15	825	16.23	17.37	16.26	15.61	16.22	26.17	31.34	26.26	38.95	19.5
1123.15	850	16.47	17.63	16.51	15.83	16.46	26.6	32.08	26.68	39.65	19.82
1148.15	875	16.71	17.87	16.76	16.05	16.7	27.03	32.81	27.09	40.33	20.14
1173.15	900	16.94	18.11	16.99	16.26	16.93	27.44	33.53	27.49	40.99	20.45
1198.15	925	17.16	18.34	17.23	16.47	17.16	27.85	34.24	27.87	41.64	20.75
1223.15	950	17.38	18.57	17.46	16.67	17.38	28.24	34.94	28.25	42.27	21.05
1248.15	975	17.59	18.79	17.68	16.87	17.6	28.62	35.63	28.61	42.89	21.34
1273.15	1000	17.8	19	17.9	17.07	17.82	29	36.3	28.96	43.5	21.63
1298.15	1025	18	19.21	18.11	17.26	18.02	29.37	36.97	29.31	44.1	21.91
1323.15	1050	18.2	19.41	18.32	17.44	18.23	29.72	37.63	29.64		22.19
1348.15	1075	18.4	19.61	18.52	17.62	18.43	30.07	38.27	29.97		22.46
1373.15	1100	18.59	19.8	18.72	17.8	18.63	30.41	38.91	30.28		22.73

Çizelge EK A.3. (devam ediyor).

1398.15	1125	18.77	19.99	18.92	17.97	18.82	30.75	39.53	30.59		22.99
1423.15	1150	18.96	20.17	19.11	18.14	19.01	31.07	40.15	30.89		23.25
1448.15	1175	19.14	20.35	19.3	18.31	19.2	31.39	40.75	31.18		23.5
1473.15	1200	19.31	20.52	19.48	18.47	19.38	31.71	41.34	31.46		23.75
1498.15	1225	19.48	20.69	19.66	18.63	19.56	32.01	41.91	31.74		24
1523.15	1250	19.65	20.86	19.84	18.79	19.74	32.31		32.01		24.24
1548.15	1275	19.82	21.02	20.01	18.95	19.92	32.61		32.27		24.48
1573.15	1300	19.98	21.18	20.18	19.1	20.09	32.89		32.53		24.72
1598.15	1325	20.14	21.34	20.34	19.25	20.26	33.18		32.78		24.95
1632.15	1350	20.3	21.49	20.51	19.39	20.42	33.45		33.03		25.18
1648.15	1375	20.45	21.64	20.66	19.54	20.59	33.73		33.27		25.41
1673.15	1400	20.6	21.79	20.82	19.68	20.75	33.99		33.51		25.63
1698.15	1425	20.75	21.93	20.97	19.82	20.91	34.25		33.74		25.85
1723.15	1450	20.9	22.07	21.12	19.96	21.07	34.51		33.96		26.07
1748.15	1475	21.04	22.21	21.27	20.09	21.23	34.76		34.19		26.28
1773.15	1500	21.18	22.34	21.41	20.23	21.38	35.01		34.4		26.49
1798.15	1525	21.32	22.47	21.55	20.36	21.53	35.25		34.62		26.7
1823.15	1550	21.46	22.6		20.49	21.68	35.49		34.83		26.91
1848.15	1575	21.59	22.73		20.62	21.83	35.72		35.04		27.11
1873.15	1600	21.72	22.85		20.74	21.98	35.95		35.24		27.31
1898.15	1625	21.85	22.98		20.87	22.12	36.18		35.45		27.51
1923.15	1650	21.98	23.1		20.99	22.26	36.4		35.65		27.71
1948.15	1675	22.11	23.22		21.11	22.41	36.62		35.85		27.9
1973.15	1700	22.23	23.33		21.23	22.55	36.84		36.04		28.09
1998.15	1725	22.35	23.45		21.35	22.68	37.05		36.24		28.28
2023.15	1750	22.47	23.56		21.47	22.82	36.26		36.43		28.47
2048.15	1775	22.59	23.67		21.58	22.96	37.46		36.62		28.66
2073.15	1800	22.71	23.78		21.7	23.09	37.66		36.81		28.84
2098.15	1825	22.83	23.88		21.81	23.22	37.86		37		29.02
2123.15	1850	22.94	23.99		21.92	23.36	38.06		37.2		29.2
2148.15	1875	23.05	24.09		22.03	23.49	38.25		37.39		29.38
2173.15	1900	23.16	24.19		22.14	23.62	38.44		37.58		29.56
2198.15	1925	23.27	24.3		22.25	23.74	38.63		37.77		29.73
2223.15	1950	23.38	24.39		22.36	23.87	38.81		37.96		29.9
2248.15	1975	23.48	24.49		22.46	24	38.99		38.15		30.07
2273.15	2000	23.59	24.59		22.57	24.12	38.17		38.34		30.24
2298.15	2025	23.69	24.68		22.67	24.24	39.35		38.54		30.41

Çizelge EK A.4. Özgül ısı eşitliği için katsayı değerleri  $C_{po}=a+bT+cT^2+dT^3$  [T, K ve  $C_{po}$ , kJ/(kmol K) birimlerinde].

Madde	Kimyasal formülü	a	b	c	d	Sıcaklık aralığı K	% hata En yüksek	Ort.
Azot	N <sub>2</sub>	28.90	-0.1571*10 <sup>-2</sup>	0.8081*10 <sup>-5</sup>	-2.873*10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.59	0.34
Oksijen	O <sub>2</sub>	25.48	1.520*10 <sup>-2</sup>	-0.7155*10 <sup>-5</sup>	1.312*10 <sup>-9</sup>	273-1800	1.19	0.28
Hava		28.11	0.1967*10 <sup>-2</sup>	0.4802*10 <sup>-5</sup>	-1.966*10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.72	0.33
Hidrojen	H <sub>2</sub>	29.11	-0.1916*10 <sup>-2</sup>	0.4003*10 <sup>-5</sup>	-0.8704*10 <sup>-9</sup>	273-1800	1.01	0.26
Karbon monoksit	CO	28.16	0.1675*10 <sup>-2</sup>	0.5372*10 <sup>-5</sup>	-2.222*10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.89	0.37
Karbon dioksit	CO <sub>2</sub>	22.26	5.981*10 <sup>-2</sup>	-3.501*10 <sup>-5</sup>	7.469*10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.67	0.22
Su buharı	H <sub>2</sub> O	32.24	0.1623 *10 <sup>-2</sup>	1.055*10 <sup>-5</sup>	-3.595*10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.53	0.24
Azot oksit	NO	29.34	-0.09395*10 <sup>-2</sup>	0.9747*10 <sup>-5</sup>	-4.187*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.97	0.36
Azot oksit	N <sub>2</sub> O	24.11	5.8632*10 <sup>-2</sup>	-3.562*10 <sup>-5</sup>	10.58*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.59	0.26
Azot dioksit	NO <sub>2</sub>	22.9	5.715*10 <sup>-2</sup>	-3.52*10 <sup>-5</sup>	7.87*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.46	0.18
Amonyak	NH <sub>3</sub>	27.568	2.5630*10 <sup>-2</sup>	0.99072*10 <sup>-5</sup>	-6.6909*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.91	0.36
Kükürt	S <sub>2</sub>	27.21	2.218*10 <sup>-2</sup>	-1.628*10 <sup>-5</sup>	3.986*10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.99	0.38
Kükürt dioksit	SO <sub>2</sub>	25.78	5.795*10 <sup>-2</sup>	-3.812*10 <sup>-5</sup>	8.612*10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.45	0.24
Kükürt trioksit	SO <sub>3</sub>	16.40	14.58*10 <sup>-2</sup>	-11.20*10 <sup>-5</sup>	32.42*10 <sup>-9</sup>	273-1300	0.29	0.13
Asetilen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	21.8	9.2143*10 <sup>-2</sup>	-6.527*10 <sup>-5</sup>	18.21*10 <sup>-9</sup>	273-1500	1.46	0.59
Benzen	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-36.22	48.475*10 <sup>-2</sup>	-31.57*10 <sup>-5</sup>	77.62*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.34	0.20
Metanol	CH <sub>4</sub> O	19.0	9.152*10 <sup>-2</sup>	-1.22*10 <sup>-5</sup>	-8.039*10 <sup>-9</sup>	273-1000	0.18	0.08
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	19.9	20.96*10 <sup>-2</sup>	-10.38*10 <sup>-5</sup>	20.05*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.40	0.22
Hidrojen klorür	HCl	30.33	-0.7620*10 <sup>-2</sup>	1.327*10 <sup>-5</sup>	-4.338*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.22	0.08
Metan	CH <sub>4</sub>	19.89	5.024*10 <sup>-2</sup>	1.269*10 <sup>-5</sup>	-11.01*10 <sup>-9</sup>	273-1500	1.33	0.57
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6.900	17.27 *10 <sup>-2</sup>	-6.406*10 <sup>-5</sup>	7.285*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.83	0.28
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-4.04	30.48*10 <sup>-2</sup>	-15.72*10 <sup>-5</sup>	31.74*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.40	0.12
n-Bütan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3.96	37.15*10 <sup>-2</sup>	-18.34*10 <sup>-5</sup>	35.00*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.54	0.24
t-Bütan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-7.913	41.60*10 <sup>-2</sup>	-23.01*10 <sup>-5</sup>	49.91*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.25	0.13
n-Pentan	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	6.774	45.43*10 <sup>-2</sup>	-22.46*10 <sup>-5</sup>	42.29*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.56	0.21
n-Heksan	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	6.938	55.22*10 <sup>-2</sup>	-28.65*10 <sup>-5</sup>	57.69*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.72	0.20
Etilen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.95	15.64*10 <sup>-2</sup>	-8.344*10 <sup>-5</sup>	17.67*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.54	0.13
Propilen	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	3.15	23.83*10 <sup>-2</sup>	-12.18*10 <sup>-5</sup>	24.62*10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.73	0.17